

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de La Paz



Nuevas Perspectivas en Robótica y Computación

CIRC
2017

Coordinadores de la Edición
Iliana Castro Liera
Mario Cortés Larrinaga

ISBN: 978-607-97128-5-3



Esta página fue dejada en blanco intencionalmente



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de La Paz



Nuevas Perspectivas en Robótica y Computación

D. R. © INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA PAZ
Blvd. Forjadores de B.C.S. No. 4720
Col. 8 de octubre
C. P. 23080
La Paz, Baja California Sur, México

Primera edición mayo de 2017

ISBN: 978-607-97128-5-3



Reservados todos los derechos. Ninguna parte de este libro puede ser reproducida, archivada o transmitida, en cualquier sistema –electrónico, mecánico, de fotorreproducción, de almacenamiento en memoria o cualquier otro– sin hacerse acreedor a las sanciones establecidas en las leyes, salvo con el permiso escrito del titular de los derechos de la obra.

Diseño de la portada: Iliana Castro Liera

Esta página fue dejada en blanco intencionalmente

COMITÉS

Coordinador General

M.C. Mauricio Salvador Rodríguez Ojeda - Instituto Tecnológico de La Paz

Coordinador del Programa Técnico

Dr. Marco Antonio Castro Liera - Instituto Tecnológico de La Paz

Comité Revisor

Dr. Francisco Herrera Fernández - UCLV Cuba

Dr. Alejandro Israel Barranco Gutiérrez - Instituto Tecnológico de Celaya

Dr. Víctor Adrián Santibáñez Dávila - Instituto Tecnológico de La Laguna

Dr. Ricardo Emmanuel Campa Cocom - Instituto Tecnológico de La Laguna

Dr. Alejandro Enrique Dzul López - Instituto Tecnológico de La Laguna

M.C. Edmundo Javier Ollervides Vázquez - Instituto Tecnológico de La Laguna

Dr. Eduardo Javier Moreno Valenzuela - CITEDI Tijuana

Dr. Eusebio Bugarín Carlos - Instituto Tecnológico de Ensenada

Dra. Ana Yaveni Aguilar Bustos - Instituto Tecnológico de Ensenada

Dr. Jesús Alberto Sandoval Galarza - Instituto Tecnológico de La Paz

M.S.C. Iliana Castro Liera - Instituto Tecnológico de La Paz

Dr. Saúl Martínez Díaz - Instituto Tecnológico de La Paz

Dr. Israel Marcos Santillán Méndez - Instituto Tecnológico de La Paz

Dr. Marco Antonio Castro Liera - Instituto Tecnológico de La Paz

M.C. Jesús Antonio Castro - Instituto Tecnológico de La Paz

M.A.T.I. Luis Armando Cárdenas Florido - Instituto Tecnológico de La Paz

M.S.C. José Luis Gómez Torres - Instituto Tecnológico de La Paz

M.S.C. Diego García Molleda - Instituto Tecnológico de La Paz

M.S.C. César Higuera Verdugo - Instituto Tecnológico de La Paz

Coordinadores de la edición

M.S.C. Iliana Castro Liera - Instituto Tecnológico de La Paz

Dr. Mario Cortés Larrinaga - Instituto Tecnológico de La Paz

ÍNDICE

Portada	
Comités	iv
Índice	v
Análisis experimental de controladores en vuelo estacionario de un Quadrotor	1
Regulación Robusta de Salida vía Modos Deslizantes Continuos. Parte I: Regulación de un Quad-Rotor	7
Regulación Robusta de Salida vía Modos Deslizantes Continuos. Parte II: Formación de Quad-Rotors Líder-Seguidor	13
Modelado cinemático y dinámico de un robot bípedo humanoide	19
Modelado y simulación de un exoesqueleto con fines de rehabilitación en extremidades inferiores	27
Control de posición de un sistema levitador magnético de un grado de libertad	35
Micro-posicionamiento de un motor piezoelectrico ultrasónico lineal basado en un controlador PID	41
Development of a prototype for the study of stiction	47
Modelado Matemático de un Sistema Modular Interconectable para formar un Controlador PID de Tipo Didáctico	53
Análisis de estabilidad y convergencia global de un esquema adaptable en regulación utilizando el Principio de Invariancia de LaSalle	61
Modelado y Control en Espacio Operacional de un Mecanismo de Cinco Barras	68
Control cinemático de posición con interpolación polinómica de un manipulador para la identificación y alcance de tomate en invernadero	74
Control PD adaptable basado en la regla MIT modificada para la dinámica lateral de un MAV de ala fija	80
A Real-Time System Using the Preempt-RT patch and the RM, PIP and EDF scheduling policies	86
Diseño de una mano mecatrónica para un robot humanoide	92
Modelado del aprovechamiento académico del I.T.L.P. mediante minería de datos	100
Desarrollo de un sistema de adquisición para señales cardiacas, mioeléctricas y de temperatura humanas	105
Detección automática de la línea de costa usando imágenes multiespectrales de alta resolución	111
Implementación de Sistema Difuso Mamdani de Salidas Triangulares en Arduino	116
Una implementación eficiente de algoritmo memético para TSP	121
Generación de tabla de frecuencias para compresión por árbol de contexto con GPGPU	126
Segmentación de células del ciclo estral. Comparativa entre: Otsu, Media Aritmética, Máxima Entropía y Entropía Cruzada.	130
Autenticación y Auto-recuperación de una Región de Interés en Imágenes a Color empleando la DCT	135
Watermarking scheme based on digital image preprocessing	142
Criptografía Visual Extendida Mediante el Método Esteganográfico Estocástico de Difusión de Error	147
Análisis y Cálculo de la Distorsión Binocular Perceptible en Imágenes Estereoscópicas	153
Marca de Agua Visible Adaptiva basada en el Análisis de Luminosidad y Contraste de la Imagen Digital	159
Ontología de estudios de diagnóstico de Radiología para la generación automática de mensajes HL7	165
Aplicación de Realidad Aumentada (LUDE Raum)	171
Serket: Sistema de protección de datos para dispositivos móviles	177
Mecanismos de seguridad en una aplicación de eBanking para una entidad financiera no bancaria bajo arquitectura orientada a servicios	183
Aplicación Web de seguimiento de publicaciones de Facebook, Twitter y Google+, utilizando el protocolo Oauth	189
Control de un Robot Móvil Tipo Ackerman por medio del Modelo Dinámico	195

Sobre Control de Velocidad en Tiempo Real de un Robot Movil Omnidireccional de 4 Ruedas	201
Avance en el Desarrollo de una Interfaz para Planificación de Tareas del Robot Móvil Create-2	207
Determining Artificial Neural Network Architecture for Directioning a Four-Wheeled Vehicle with a BCI	213
Study of Stepper Motor Performance in a Cartesian Robot with chaotic injections	219
Detección de Objetos Sobresalientes en Imágenes Digitales Utilizando Cadenas de Markov	224
Matching entre puntos similares para medición de deformación laminar	230
Algoritmo paralelo en GPU para el rastreo de armas de fuego tipo pistola	237
Técnicas de visión artificial aplicadas a la detección de baches	242
Caracterización de superficie mediante vistas ortogonales simultáneas para inspección automatizada de productos	248

Análisis Experimental de Controladores en Vuelo Estacionario de un *Quadrotor*

Ricardo Pérez Alcocer^a, Oscar Garduño Delgadillo^b, Javier Moreno Valenzuela^b

^aCONACyT-Instituto Politécnico Nacional - CITEDI

^bInstituto Politécnico Nacional - CITEDI

Ave. Instituto Politécnico Nacional 1310, Nueva Tijuana

Tijuana B.C. 22435, Mexico

Email: rperez@citedi.mx, moreno@citedi.mx

Resumen—En este trabajo se presenta un análisis comparativo de esquemas de control aplicados a un *quadrotor*, al cual se le ha asignado la tarea de realizar vuelo estacionario. Un controlador original basado en el conocimiento del modelo dinámico del vehículo es presentado. El conjunto de algoritmos de control fueron validados experimentalmente y métricas de desempeño fueron calculadas a fin de establecer las ventajas que presentan.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de vehículos aéreos no tripulados se ha incrementado considerablemente en los últimos años, este incremento en el uso de esta tecnología se debe principalmente a la amplia gama de actividades en las cuales se puede aplicar. Ejemplos de la aplicación de los vehículos aéreos no tripulados son las tareas de exploración, mapeo y transporte por mencionar algunos [1]-[2]. Un tipo particular de estos vehículos es el *quadrotor*, el cual posee un conjunto de cuatro rotores que han sido colocados en una estructura en forma de X y con una separación de $\pi/2$ [rad] entre cada uno de ellos. El *quadrotor* brinda funcionalidades muy atractivas en comparación con otros vehículos aéreos, estas características incluyen la habilidad para despegar y aterrizar de modo vertical sin la necesidad de amplios espacios, la capacidad de realizar vuelos acrobáticos en espacios estrechos y un costo relativamente bajo.

El diseño de estrategias de control que garanticen estabilidad al *quadrotor* es parte fundamental para que estos vehículos puedan realizar tareas de menara autónoma, sin embargo, dado que su dinámica es altamente no lineal y además está fuertemente acoplada, desarrollar estos controladores no resulta una tarea trivial. Un número considerable de trabajos han sido dedicados al desarrollo de algoritmos de control empleando distintas técnicas de control [3]-[4]. En este trabajo se presenta un controlador original basado en el modelo dinámico del *quadrotor* y se compara su desempeño de manera experimental con otros tres esquemas de control con el objetivo determinar las ventajas que pudieran presentar unos con respecto a los otros. Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección II se presenta la dinámica de *quadrotor*, los esquemas de control que son objeto de estudio en este trabajo se describen en la Sección III, posteriormente en la Sección IV se presentan los resultados experimentales y

finalmente, en la Sección V se exponen las conclusiones obtenidas de este trabajo.

II. DINÁMICA DEL *QUADROTOR*

Las ecuaciones de movimiento que describen el comportamiento del *quadrotor* ha sido analizada y expuesta en un distintos textos científicos [5]-[6]. La dinámica del *quadrotor* puede ser obtenida considerando el vehículo como cuerpo rígido moviéndose en el espacio tridimensional. En la figura 1 se muestra la representación de un *quadrotor* obtenida con un software de diseño asistido por computadora CAD por su siglas en inglés, en la cual se presentan los distintos movimientos que puede realizar.

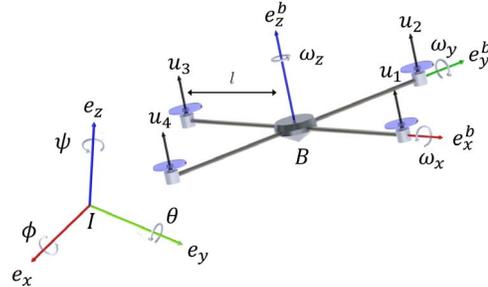


Figura 1. Representación del quadrotor en el espacio cartesiano incluyendo los marcos de referencia inercial y del vehículo.

En esta sección se presenta el conjunto de ecuaciones que describen la dinámica del *quadrotor* representada con respecto al marco de referencia inercial, adicionalmente se asume que el centro de masa coincide con el marco de referencia del vehículo. Esta suposición permite separar la dinámica de posición de la dinámica de orientación, simplificando las ecuaciones de movimiento las cuales quedan de la siguiente manera

$$m\ddot{\mathbf{p}} + m\mathbf{g}e_z = \mathbf{f}_p, \quad (1)$$

$$H_o(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + C_o(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{f}_o, \quad (2)$$

donde $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$ es la posición con respecto al marco de referencia inercial, $\boldsymbol{\eta} = [\phi \ \theta \ \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ es el vector de los ángulos de Euler, el cual representa la orientación del vehículo con respecto al marco de referencia inercial, m es la masa

del *quadrotor*, g es la constante de aceleración gravitacional, $e_z = [0 \ 0 \ 1]^T \in \mathbb{R}^3$ es el vector unitario en la dirección del eje z del marco de referencia inercial, $H_o(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de inercia asociada a la orientación, $C_o(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de Coriolis de orientación, $\mathbf{f}_p \in \mathbb{R}^3$ es el vector de fuerza generadas por los rotores del vehículo y $\mathbf{f}_o \in \mathbb{R}^3$ es el vector de torques externos.

Por otro lado, las entradas de fuerza y torque \mathbf{f}_p y \mathbf{f}_o se relacionan con el empuje producido por cada rotor u_i de la siguiente manera

$$\mathbf{f}_p = R(\boldsymbol{\eta}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{total} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{13}(\boldsymbol{\eta}) \\ r_{23}(\boldsymbol{\eta}) \\ r_{33}(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix} u_{total}, \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_o = W(\boldsymbol{\eta})^{-T} \begin{bmatrix} l(u_2 - u_4) \\ l(u_3 - u_1) \\ k_d \sum_{i=1}^4 (-1)^i u_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

donde r_{ij} es el ij -ésimo elemento de la matriz de rotación $R(\boldsymbol{\eta}) \in SO(3)$ definida como

$$R(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\theta c_\psi s_\phi - s_\psi c_\phi & s_\theta c_\psi c_\phi + s_\psi s_\phi \\ c_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\theta s_\psi c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$W(\boldsymbol{\eta})^{-1}$ es una matriz de transformación, la cual relaciona el vector de la variación de los ángulos de Euler $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ con el vector de velocidades angulares $\boldsymbol{\omega}$ definida como

$$W(\boldsymbol{\eta})^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s_\theta \\ 0 & c_\phi & c_\theta s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}, \quad (6)$$

donde s_x representa la función seno de x y c_x el coseno de x , u_{total} es el empuje total generado por los cuatro rotores, el cual se calcula como

$$u_{total} = \sum_{i=1}^4 u_i. \quad (7)$$

Sea B la matriz de distribución de fuerzas la cual se define de la siguiente manera

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & l & 0 & -l \\ -l & 0 & l & 0 \\ -k_d & k_d & -k_d & k_d \end{bmatrix}, \quad (8)$$

entonces, la relación de las señales $\mathbf{f}_p(t)$ y $\mathbf{f}_o(t)$ con $\mathbf{u}(t)$ está dada por

$$\mathbf{u} = [0_{4 \times 2} \ B^{-1}] \begin{bmatrix} R(\boldsymbol{\eta}) & 0 \\ 0 & W(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p \\ \mathbf{f}_o \end{bmatrix}. \quad (9)$$

III. ALGORITMOS DE CONTROL

En esta sección se presenta los distintos esquemas de control que son objeto de estudio en este trabajo. Estos controladores constan de una estructura de doble lazo, donde el lazo interno se encarga de estabilizar la orientación mientras que el lazo externo define el comportamiento de posición. La representación gráfica de la estructura de los

controladores se puede observar en la figura 2. Los dos primeros controladores emplean técnicas de control con estructura proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integral-derivativo/proporcional-derivativo (PID/PD), el tercero es un control no lineal el cual fue diseñado con técnicas de *backstepping*. Finalmente se presenta un control basado en el modelo dinámico del *quadrotor* introducido en las ecuaciones (1)-(2). Es importante hacer notar que el lazo de control de orientación determina el movimiento en el plano horizontal, al seguir los valores deseados de los ángulos de alabeo y cabeceo que se calculan en tiempo de ejecución dentro del lazo de control de posición.

III-A. Objetivo de control

Los algoritmos de control estudiados en este análisis fueron diseñados con el objetivo de garantizar que el *quadrotor* alcance y mantenga una posición y orientación deseada, denotada por $\mathbf{p}_d(t)$ y $\boldsymbol{\eta}_d(t)$ respectivamente. Los valores de referencia para la posición $\mathbf{p}_d(t)$ y ángulo de guiñada $\psi_d(t)$ son determinados por el operador mientras que los ángulos de alabeo deseado $\phi_d(t)$ y cabeceo deseado $\theta_d(t)$ son calculados en tiempo de ejecución por el control de posición. Considerando estas señales de referencia, el vector del error de posición $\tilde{\mathbf{p}}(t)$ y el vector de error de orientación $\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t)$ se definen como sigue

$$\tilde{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{p}_d(t) - \mathbf{p}(t), \quad (10)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) = \boldsymbol{\eta}_d(t) - \boldsymbol{\eta}(t). \quad (11)$$

De este modo, el objetivo bajo el cual se diseñaron los controladores consiste en calcular las señales de entrada $\mathbf{f}_p(t)$ y $\mathbf{f}_o(t)$ tales que se garantice la siguiente condición

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{p}}(t) \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) \end{bmatrix} = 0. \quad (12)$$

III-B. Control tipo PD

El primer controlador analizado en este trabajo tiene una estructura PD tanto para la dinámica de posición como para la de orientación. La señal de entrada de este esquema está dada por

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\mu}_1, \quad (13)$$

$$\mathbf{f}_o = K_{p\eta} \tilde{\boldsymbol{\eta}} + K_{d\eta} \dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}, \quad (14)$$

donde $\mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta})$ es un operador definido como

$$\mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} r_{13}(\boldsymbol{\eta}) \\ r_{23}(\boldsymbol{\eta}) \\ r_{33}(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix} \frac{1}{r_{33}(\boldsymbol{\eta})}, \quad (15)$$

$\boldsymbol{\mu}_1$ es una señal de entrada auxiliar establecida como

$$\boldsymbol{\mu}_1 = \hat{m} [g + k_z \ddot{z} + k_{dz} \dot{\ddot{z}}]. \quad (16)$$

$K_{p\eta}$ y $K_{d\eta}$ son matrices diagonales definidas positivas, k_z y k_{dz} son constantes positivas y \hat{m} es un estimado de la masa total del *quadrotor*.

Complementando la acción de control, el comportamiento del *quadrotor* en el plano xy se establece definiendo los valores deseados de los ángulos de alabeo $\phi_d(t)$ y cabeceo

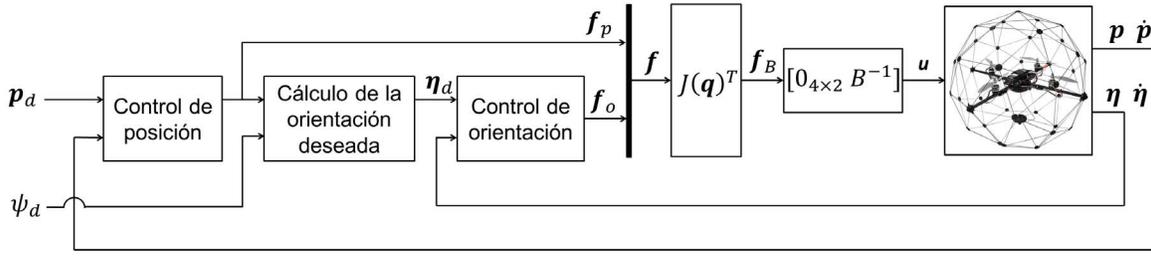


Figura 2. Diagrama de bloques de la estructura de los controladores estudiados en este trabajo.

$\theta_d(t)$, los cuales se actualizan en tiempo de ejecución bajo la siguiente relación

$$\theta_d = k_x \tilde{x} + k_{dx} \dot{\tilde{x}}, \quad (17)$$

$$\phi_d = k_y \tilde{y} + k_{dy} \dot{\tilde{y}}, \quad (18)$$

donde k_x, k_y, k_{dx} y k_{dy} son ganancias constantes y positivas.

III-C. Control tipo PID/PD

El segundo controlador fue introducido por Wang *et al.* en [7]. Este esquema está estructurado con un control PID en el lazo externo y un control PD en el lazo interno. Con el objetivo de estandarizar la notación en este documento, la ley de control tipo PID/PD fue reescrita de la siguiente manera

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta})\mu_2, \quad (19)$$

$$\mathbf{f}_o = W(\boldsymbol{\eta})^{-T} (K_{p\eta}\tilde{\boldsymbol{\eta}} - K_\omega\boldsymbol{\omega}), \quad (20)$$

donde $\mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta})$ es el operador definido en (15), μ_2 es la señal de entrada auxiliar

$$\mu_2 = \hat{m}g + r_{33}(\boldsymbol{\eta}) \left(k_z \tilde{z} + k_{dz} \dot{\tilde{z}} + k_{iz} \int \tilde{z} dt \right), \quad (21)$$

$K_{p\eta}$ y K_Ω son matrices de ganancias diagonales definidas positivas y k_z, k_{dz} y k_{iz} son constantes positivas.

Como se mencionó anteriormente, el control de posición se realiza de manera indirecta modificando los valores deseados de alabeo $\phi_d(t)$ y cabeceo $\theta_d(t)$, para lo cual se emplea el siguiente control PID

$$\theta_d = k_x \tilde{x} + k_{dx} \dot{\tilde{x}} + k_{ix} \int \tilde{x} dt, \quad (22)$$

$$\phi_d = k_y \tilde{y} + k_{dy} \dot{\tilde{y}} + k_{iy} \int \tilde{y} dt, \quad (23)$$

siendo $k_x, k_y, k_{dx}, k_{dy}, k_{ix}$ y k_{iy} ganancias constantes positivas.

III-D. Control de linealización por retroalimentación con backstepping

El tercer algoritmo que se analiza en este trabajo es un control de linealización por retroalimentación con *backstepping*, el cual garantiza estabilidad al sistema en lazo cerrado. En [8], los autores introducen el controlador y analizan la estabilidad del sistema empleando teoría de Lyapunov. La estructura general del controlador es la misma que en los esquemas anteriores, con un lazo externo de control para la

posición y uno interno para la orientación. Siguiendo con la estandarización de la notación, de nueva cuenta es necesario reescribir la ley de control para lo cual se define el error de posición filtrado $\mathbf{s}_p(t) = [s_{px} \ s_{py} \ s_{pz}]^T \in \mathbb{R}^3$ y el error de orientación filtrado $\mathbf{s}_\eta(t) = [s_{\eta\phi} \ s_{\eta\theta} \ s_{\eta\psi}]^T \in \mathbb{R}^3$ de la siguiente manera

$$\mathbf{s}_p = \dot{\tilde{\mathbf{p}}} + \Lambda_p \tilde{\mathbf{p}}, \quad (24)$$

$$\mathbf{s}_\eta = \dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} + \Lambda_\eta \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \quad (25)$$

donde $\Lambda_p = \text{diag}\{\Lambda_{px}, \Lambda_{py}, \Lambda_{pz}\} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, y $\Lambda_\eta = \text{diag}\{\Lambda_{\eta\phi}, \Lambda_{\eta\theta}, \Lambda_{\eta\psi}\} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ son matrices diagonales definidas positivas. Del análisis de estabilidad, las ganancias Λ_{px} y Λ_{py} deben ser seleccionadas suficientemente grandes, tales que las siguientes condiciones se satisfagan

$$\Lambda_{px} > \left| \frac{s_{px}}{\tilde{x}} \right|,$$

$$\Lambda_{py} > \left| \frac{s_{py}}{\tilde{y}} \right|.$$

Así, la entrada de control en [8] se puede escribir como

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta})\mu_3, \quad (26)$$

$$\mathbf{f}_o = W(\boldsymbol{\eta})^{-T} \left\{ \mathcal{S}(\dot{\boldsymbol{\eta}})^T I \dot{\boldsymbol{\eta}} + I[(I_3 - \Lambda_\eta^2)\tilde{\boldsymbol{\eta}} + (\Lambda_\eta + K_{s\eta})\mathbf{s}_\eta] \right\}, \quad (27)$$

donde μ_3 se define como

$$\mu_3 = m[g + (1 - \Lambda_{pz}^2)\tilde{z} + (\Lambda_{pz} + k_{spz})s_{pz}], \quad (28)$$

$I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es el tensor de inercia, $I_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de identidad, $K_{s\eta} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ son matrices de ganancias diagonales definidas positivas, k_{spz} es una constante positiva y dado un vector $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T \in \mathbb{R}^3$, $\mathcal{S}(\mathbf{a}) \in \mathcal{SS}(3)$ es una matriz antisimétrica definida como

$$\mathcal{S}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

La actualización de los ángulos deseados de alabeo $\phi_d(t)$ y cabeceo $\theta_d(t)$ encargados de definir el comportamiento del *quadrotor* en el plano horizontal se realiza mediante la siguiente ley de control

$$\phi_d = \sin^{-1}(\gamma_1^{sol} s_{\psi} - \gamma_2^{sol} c_{\psi}), \quad (30)$$

$$\theta_d = \sin^{-1}\left(\frac{\gamma_1^{sol} c_{\psi} + \gamma_2^{sol} s_{\psi}}{c_{\phi}}\right), \quad (31)$$

donde γ_1^{sol} y γ_2^{sol} son entradas virtuales calculadas como

$$\gamma_1^{sol} \leq \begin{cases} \gamma_1^{max} & \text{para } s_{px} \geq 0 \\ -\gamma_1^{max} & \text{para } s_{px} < 0 \end{cases},$$

$$\gamma_2^{sol} \leq \begin{cases} \gamma_2^{max} & \text{para } s_{py} \geq 0 \\ -\gamma_2^{max} & \text{para } s_{py} < 0 \end{cases},$$

siendo γ_1^{max} y γ_2^{max} constantes positivas que cumplen las siguientes condiciones

$$0 < \gamma_1^{max} \leq |0.7071|,$$

$$0 < \gamma_2^{max} \leq |0.7071|.$$

III-E. Control no lineal basado en modelo

El último algoritmo de control que se presenta en este trabajo es un esquema original, el cual está diseñado con base en el modelo dinámico del *quadrotor* dado en (1)-(2). La ley de control se define como

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{r}_c(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\mu}_4, \quad (32)$$

$$\mathbf{f}_o = \mathbf{H}_o(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}}_r + \mathbf{C}_o(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}}_r + \mathbf{K}_{s\eta}\mathbf{s}_\eta, \quad (33)$$

donde $\boldsymbol{\mu}_4$ es la entrada de control auxiliar dada por

$$\boldsymbol{\mu}_4 = m\ddot{z}_d + mg + k_{pp}\tilde{z} + k_{dp}\dot{\tilde{z}}, \quad (34)$$

$\mathbf{s}_\eta(t)$ es el error de orientación filtrado establecido en (25), $\mathbf{K}_{s\eta} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es una matriz diagonal definida positiva, k_z y k_{dz} son constantes positivas, $\mathbf{H}_o(\boldsymbol{\eta})$ es la matriz de inercia y $\mathbf{C}_o(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})$ es la matriz de Coriolis, donde estos dos últimos términos están dados explícitamente por

$$\mathbf{H}_o(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{W}(\boldsymbol{\eta})^{-T} \mathbf{I} \mathbf{W}(\boldsymbol{\eta})^{-1}, \quad (35)$$

$$\mathbf{C}_o(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = \mathbf{W}(\boldsymbol{\eta})^{-T} [\mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}) \mathbf{I} - \mathbf{I} \mathbf{W}(\boldsymbol{\eta})^{-1} \dot{\mathbf{W}}(\boldsymbol{\eta})^{-1}] \mathbf{W}(\boldsymbol{\eta})^{-1}, \quad (36)$$

además la señal $\dot{\boldsymbol{\eta}}_r(t)$ se calcula como

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_r = \dot{\boldsymbol{\eta}}_d + \Lambda \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \quad (37)$$

siendo $\Lambda \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ una matriz diagonal definida positiva.

Finalmente, los valores de referencia para los ángulos de alabeo $\phi_d(t)$ y cabeceo $\theta_d(t)$ se obtienen como sigue

$$\theta_d = \tan^{-1} \left[\frac{m}{\mu} (c_{\psi_d} f_{I_1} + s_{\psi_d} f_{I_2}) \right], \quad (38)$$

$$\phi_d = \tan^{-1} \left[\frac{m c_{\theta_d}}{\mu} (s_{\psi_d} f_{I_1} - c_{\psi_d} f_{I_2}) \right], \quad (39)$$

donde f_{I_1} y f_{I_2} se definen como

$$f_{I_1} = \ddot{x}_d + k_x \tilde{x} + k_{dx} \dot{\tilde{x}}, \quad (40)$$

$$f_{I_2} = \ddot{y}_d + k_y \tilde{y} + k_{dy} \dot{\tilde{y}}, \quad (41)$$

y k_x, k_y, k_{dx}, k_{dy} son ganancias constantes positivas.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El desempeño de los controladores estudiados en este trabajo fue evaluado con base en los resultados experimentales al realizar la tarea de vuelo estacionario en tiempo real. El *quadrotor* Qball 2, manufacturado por Quanser, fue utilizado como plataforma de prueba para la validación del los controladores, este *quadrotor*, el cual se muestra en la figura 3, está equipado con una unidad de mediciones inerciales (IMU) y un sonar, usados para medir la velocidad angular $\boldsymbol{\omega}(t)$, la orientación $\boldsymbol{\eta}(t)$ y la altura $z(t)$ del vehículo. Adicionalmente, se usa el sistema de captura de movimiento *Optitrack* con el objetivo de estimar la posición del *quadrotor* en el plano horizontal. Los valores de los parámetros cinemáticos y dinámicos del *quadrotor* usados en la implementación de los controladores fueron tomados del manual de usuario del *quadrotor* [9] y se presentan en la tabla I.



Figura 3. *Quadrotor* Qball 2 manufacturado por Quanser.

Tabla I
PARÁMETROS DE *QUADROTOR* QBALL 2.

Notación	Descripción	Valor	Unidades
g	Aceleración de la gravedad	9.8	[m/s ²]
m	Masa del <i>quadrotor</i>	1.79	[kg]
l	Distancia entre el centro de masa del <i>quadrotor</i> y la posición del eje de las propelas	0.2	[m]
I_{xx}	Momento de inercia con respecto a x axis	0.03	[kg m ²]
I_{yy}	Momento de inercia con respecto a y axis	0.03	[kg m ²]
I_{zz}	Momento de inercia con respecto a z axis	0.04	[kg m ²]

La tarea de vuelo estacionario se establece como un problema de regulación donde las señales de referencia fueron definidas con el objetivo de que el centro de masa del vehículo alcance y permanezca un punto fijo en el espacio cartesiano durante el vuelo, mientras que el ángulo de guiñada deseado también permanece constante. Estas señales de referencia fueron seleccionadas como se menciona a continuación

$$\mathbf{p}_d(t) = [0 \ 0 \ 0.6]^T [m],$$

$$\psi_d(t) = 0 [rad].$$

Las ganancias de control fueron obtenidas empíricamente a través de un proceso de prueba y error, los valores para cada controlador se presentan a continuación. Para el caso del controlador PD (13)-(14), (16)-(18) se usaron las siguientes ganancias

$$\begin{aligned} k_{px} &= 0.27, \quad k_{py} = 0.27, \quad k_{pz} = 2.41, \\ k_{dx} &= 0.16, \quad k_{dy} = 0.16, \quad k_{dz} = 3.02, \\ K_{p\eta} &= \text{diag}\{1.29, 1.44, 2.00\}, \\ K_{d\eta} &= \text{diag}\{0.30, 0.24, 0.50\}. \end{aligned}$$

Las ganancias para el controlador PID/PD (19)-(23) fueron seleccionadas como

$$\begin{aligned} k_x &= 0.27, \quad k_{dx} = 0.1625, \quad k_{ix} = 0.01, \\ k_y &= 0.27, \quad k_{dy} = 0.1625, \quad k_{iy} = 0.01, \\ k_z &= 11.17, \quad k_{dz} = 4.46, \quad k_{iz} = 2.23, \\ K_{p\eta} &= \text{diag}\{1.75, 1.75, 2.6\}, \\ K_{\Omega} &= \text{diag}\{0.35, 0.4, 1\}. \end{aligned}$$

Por su parte, para el controlador por *backstepping* (26)-(30), el resultado del proceso de selección de ganancias generó los siguientes valores

$$\begin{aligned} \Lambda_p &= \text{diag}\{1.75, 1.0, 2.0107\}, \\ k_{spz} &= 2.3587, \quad \gamma_1^{max} = \gamma_2^{max} = 0.025, \\ \Lambda_\eta &= \text{diag}\{8.2638, 8.2638, 29.0466\}, \\ K_{s\eta} &= \text{diag}\{6.7362, 6.7362, 2.2034\}, \end{aligned}$$

Finalmente, el controlador basado en modelo (32)-(34), (38)-(39) fue implementado con los siguientes valores en las ganancias

$$\begin{aligned} K_{pp} &= \text{diag}\{4.0, 3.75, 2.41\}, \\ K_{dp} &= \text{diag}\{1.9, 1.25, 3.00\}, \\ K_s &= \text{diag}\{0.30, 0.24, 0.50\}, \\ K_{\Lambda} &= \text{diag}\{4.30, 6.00, 4.00\}. \end{aligned} \quad (42)$$

Con el objetivo de presentar un análisis cuantitativo del desempeño de los controladores estudiados en este trabajo, se calculó métricas relacionadas con el error de pose y las señales de entrada asociadas con cada esquema. El error cuadrático medio para cada una de las señales de pose fue calculado y además se obtuvo la media y desviación estándar del empuje total aplicado por los rotores.

Los resultados experimentales al realizar la tarea de vuelo estacionario se presentan en la figura 4. La ruta seguida por el *quadrotor* en el espacio 3D aplicando los distintos controladores se muestran con diferentes colores en la gráfica. La línea azul corresponde al control PD, la verde al PID/PD, la roja al control por *backstepping* (BS) y la cian al basado en modelo (CBM). Note que para todos los controladores, la posición del *quadrotor* permanece cercana a la referencia deseada $\mathbf{p}_d(t)$.

La evolución en el tiempo de la posición $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, el ángulo de guiñada $\psi(t)$, y sus respectivas señales deseadas se muestran en la figura 5. En estas gráficas, la línea negra punteada representa los valores de referencia para cada señal.

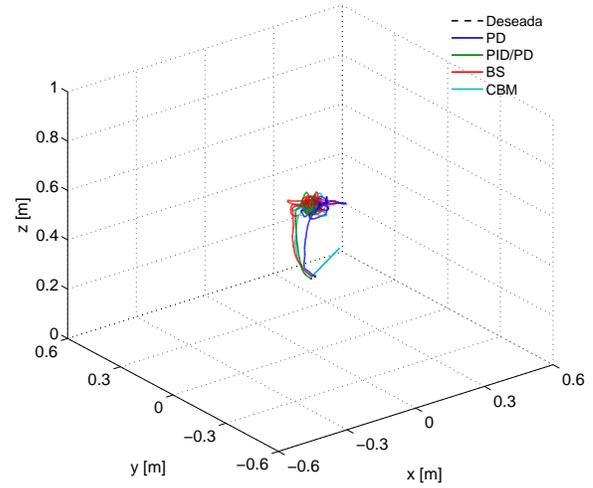


Figura 4. **Resultados experimentales:** Ruta seguida por el *quadrotor* empleando los distintos controladores estudiados en este trabajo.

Se puede observar que el desempeño obtenido con los distintos controladores es similar entre ellos. Por su parte, la acción de control calculada y generada por los rotores $u_i(t)$ se presenta en la figura 6. Note que la frecuencia de las señales de entrada para el controlador de *backstepping* son más altas que las de los otros controladores, este efecto se produce por las discontinuidades en el cálculo de los valores deseados de las señales de alabeo $\phi_d(t)$ y cabeceo $\theta_d(t)$.

El cálculo de las métricas de desempeño se realizó sin tomar en cuenta el período transitorio, se excluyeron de dicho cálculo los datos correspondientes a los primeros 10 segundos del experimento. La tabla II presenta los valores del error cuadrático medio para cada señal de posición asociados a los esquemas de control evaluados, se observa que todos los controladores producen valores similares y las menores magnitudes no están relacionados a un único controlador.

Tabla II
ERROR CUADRÁTICO MEDIO PARA LAS SEÑALES DE POSE.

Señal	PD	PID/PD	BS	MBC
$\tilde{x}(t)$	0.04459	0.02976	0.03252	0.02528
$\tilde{y}(t)$	0.03711	0.03599	0.03137	0.03490
$\tilde{z}(t)$	0.01005	0.00710	0.01077	0.00966
$\phi(t)$	0.84763	0.35235	1.19196	0.46671
$\theta(t)$	0.54266	0.39346	1.18652	0.52361
$\tilde{\psi}(t)$	0.62407	0.53464	0.35435	0.71246

Finalmente, en la tabla III se presenta la media y desviación estándar del empuje total aplicado al *quadrotor* con los cuatro controles evaluados. Se observa claramente que la media es similar para todos los casos, sin embargo, la desviación estándar presenta valores con mayor discrepancia. En particular, el valor más pequeño corresponde al controlador basado en modelo mientras el mayor proviene del control por *backstepping*. Esta métrica es importante porque valores más altos se relacionan con demandas de empuje mayores y por lo tanto se produce una descarga en un período de tiempo más corto.

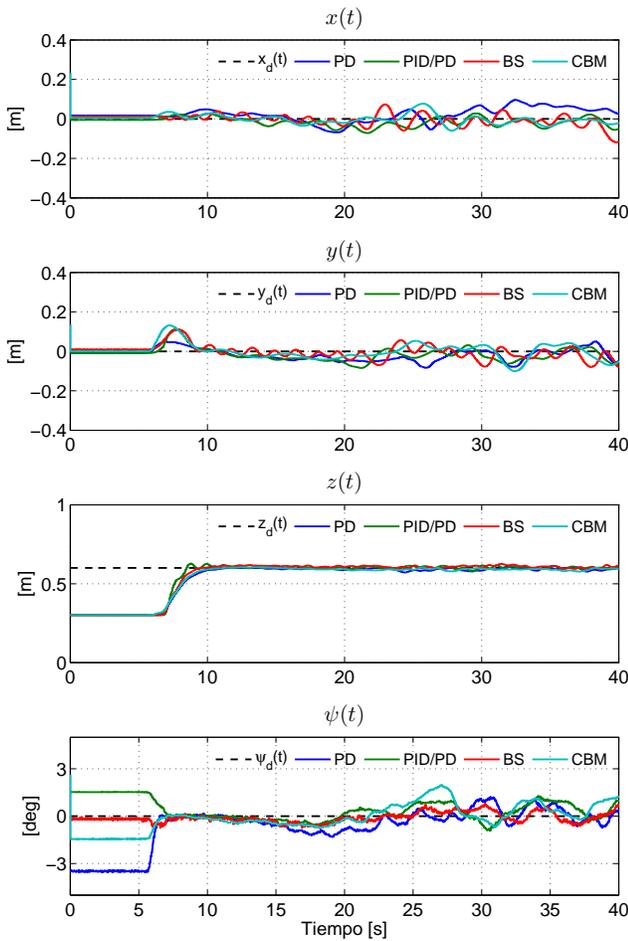


Figura 5. **Resultados experimentales:** Señales de posición $p(t)$ y ángulo de guiñada $\psi(t)$ descritas por el *quadrotor* empleando los cuatro controladores distintos.

Tabla III
MEDIA $\mu_{u_{total}}$ Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma_{u_{total}}$ DEL EMPUJE TOTAL $u_{total}(t)$ APLICADO AL *QUADROTOR* CON LOS DISTINTOS CONTROLADORES.

Señal	PD	PID/PD	BS	CBM
$\mu_{u_{total}}$	17.56975	17.54405	17.45599	17.57248
$\sigma_{u_{total}}$	0.09012	0.14643	0.16685	0.06601

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el desempeño de controladores aplicados a un *quadrotor* al realizar la tarea de vuelo estacionario. Cuatro esquemas de control fueron estudiados e implementados para su validación experimental, tres de ellos fueron tomados de la literatura y un control original basado en modelo fue presentado. En general, los esquemas de control estudiados mostraron un comportamiento satisfactorio al cumplir con la tarea asignada, adicionalmente, de las gráficas de error de pose se puede observar un comportamiento similar para todos los controles. Con el objetivo de tener un análisis cuantitativo del desempeño se calcularon métricas con las cuales se puede concluir que para el vuelo estacionario del *quadrotor*, los

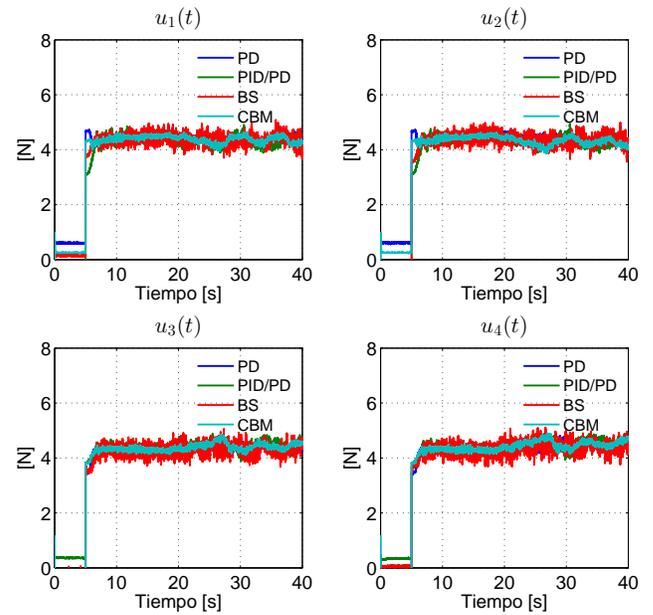


Figura 6. **Resultados experimentales:** Comparación del desempeño en las señales de entrada $u_i(t)$ generados por los cuatro esquemas de control.

cuatro controles generan errores de pose muy cercanos unos de los otros de tal modo que no se puede establecer que alguno de los esquemas sobresalga sobre los otros. Sin embargo, tomando en cuenta el empuje total generado por los rotores se observa que el control basado en modelo produce una demanda de energía menor a la de los otros algoritmos. Finalmente, como trabajo futuro se pretende explorar el comportamiento de los controles en la tarea de seguimiento de trayectorias.

REFERENCIAS

- [1] L. Kaul, R. Zlot, and M. Bosse, "Continuous-time three-dimensional mapping for micro aerial vehicles with a passively actuated rotating laser scanner," *Journal of Field Robotics*, vol. 33, no. 1, pp. 103–132, 2016.
- [2] D. Mellinger, M. Shomin, N. Michael, and V. Kumar, *Cooperative Grasping and Transport Using Multiple Quadrotors*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 545–558.
- [3] B. Sumantri, N. Uchiyama, and S. Sano, "Least square based sliding mode control for a quad-rotor helicopter and energy saving by chattering reduction," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 66, pp. 769–784, 2016.
- [4] D. Cabecinhas, R. Cunha, and C. Silvestre, "A globally stabilizing path following controller for rotorcraft with wind disturbance rejection," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 708–714, 2015.
- [5] L. R. García-Carrillo, A. E. Dzúl-López, R. Lozano, and C. Pégard, *Quad Rotorcraft Control*. Springer London, 2013.
- [6] J. Kim, M.-S. Kang, and S. Park, "Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft," in *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs*, Nevada, USA, Jun 2009, pp. 9–26.
- [7] C. Wang, M. Nahon, and M. Trentini, "Controller development and validation for a small quadrotor with compensation for model variation," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Florida, USA, May 2014, pp. 902–909.
- [8] Y.-C. Choi and H.-S. Ahn, "Nonlinear control of quadrotor for point tracking: Actual implementation and experimental tests," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1179–1192, 2015.
- [9] Quanser, *User Manual Qball 2 for QUARC, Set up and Configuration*, 2014.

Regulación Robusta de Salida vía Modos Deslizantes Continuos. Parte I: Regulación de un *Quad-Rotor*

Héctor Ríos[†], Jaime González-Sierra[†] y Alejandro Dzul[‡]

[†]CONACYT - TECNM/Instituto Tecnológico de La Laguna

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Blvd. Revolución y Cuahtémoc S/N, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México

Emails: hriosb@correo.itlalaguna.edu.mx y jamesgsjr@hotmail.com

[‡]TECNM/Instituto Tecnológico de La Laguna

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Blvd. Revolución y Cuahtémoc S/N, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México

Email: dzul@faraday.itlalaguna.edu.mx

Resumen—En este trabajo se da solución al problema de regulación de salida para un *Quad-Rotor*. El esquema de control propuesto se basa en técnicas de Modos Deslizantes y éste es capaz de regular las posiciones y los ángulos del *Quad-Rotor* de forma robusta para cierta clase de perturbaciones que estén afectando el sistema. La regulación está compuesta de controladores continuos por Modos Deslizantes en cascada que proporcionan una regulación uniforme y en un tiempo finito. Resultados de simulación ilustran la efectividad de la estrategia de control propuesta.

I. INTRODUCCIÓN

LA investigación relacionada con los vehículos aéreos no-tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés) ha ido creciendo significativamente en los años recientes. Dicho interés se debe principalmente a los costos bajos de estos vehículos y a su gran gama de aplicaciones en áreas diversas (seguridad, supervisión, entrega, mantenimiento, grabación de imágenes y videos, *etc.*). Entre los UAVs, los *Quad-Rotors* representan a los vehículos aéreos más usados debido tanto a sus distintos modos de vuelo como a su simplicidad de operación y tamaño [13]. En estos días, uno puede comprar fácilmente este tipo de vehículos, por lo que la seguridad tanto del piloto como de las personas que se encuentren alrededor de éste se vuelve esencial. Es en este punto donde los sistemas de control juegan un papel importante debido a que éstos pueden garantizar dicha seguridad haciendo uso de la información que el vehículo tiene disponible (información de sensores).

En la literatura se pueden encontrar diversos trabajos relacionados al diseño de controladores robustos para *Quad-Rotors*. Por ejemplo, en [3] se propone un control por Modos Deslizantes basado en un esquema de observador de perturbaciones para diseñar un controlador robusto de

vuelo para un *Quad-Rotor* en presencia de perturbaciones acotadas. Por otra parte, en [2] se presenta un controlador por Modos Deslizantes y un controlador no-lineal \mathcal{H} para estabilizar el movimiento rotacional de un *Quad-Rotor* en presencia de perturbaciones aerodinámicas e incertidumbre en el modelo. Sin embargo, dicho controlador presenta la desventaja del excesivo costo computacional que requiere encontrar la solución de una ecuación diferencial parcial de Hamilton-Jacobi-Isaacs. En [11] se propone el diseño de un control de inclinación robusto y óptimo para un *Hexa-Rotor* con incertidumbre paramétrica y perturbaciones externas. Dicho controlador se compone de la combinación de un control LQR y un observador de perturbaciones. Desafortunadamente, la sintonización del observador resulta muy complicada y la estrategia de control sólo es aplicada a la dinámica traslacional. Por otro lado, en [4] se presenta un controlador robusto, basado en otro observador de perturbaciones por Modos Deslizantes, para vuelos de formación en UAVs en presencia de entradas desconocidas. Sin embargo, los patrones geométricos de formación son muy limitados.

En el contexto de control en tiempo-finito para *Quad-Rotors* nos encontramos con los trabajos propuestos en [1], [9] y [5]. Particularmente, en [1] se diseña un controlador óptimo en tiempo-finito para un *Quad-Rotor* que opera en varias condiciones de vuelo. Otro controlador en tiempo-finito es propuesto en [9] para estabilización de un *Quad-Rotor* con modelo linealizado. En [5] se presenta el diseño de una ley de control PD para seguimiento de posición mientras que para el seguimiento de inclinación se diseña un controlador en tiempo-finito. En cuanto a controladores en tiempo-fijo [10], *i.e.* controladores con convergencia en un tiempo-finito y pre-escrito, en [14] se presenta un algoritmo de control, basado en el algoritmo Terminal de Modos Deslizantes,

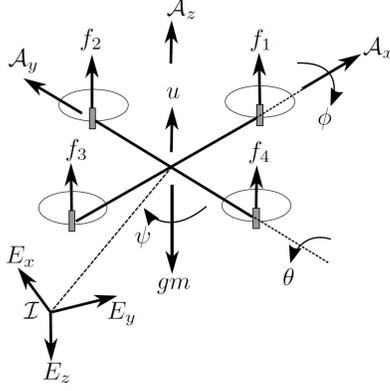


Figura 1. Diagrama esquemático del *Quad-Rotor*. Las fuerzas f_1, f_2, f_3 y f_4 corresponden al empuje de cada motor y se relacionan directamente con los momentos angulares, i.e. $u = \sum_{i=1}^4 f_i$, $\tilde{\tau}_\psi = C(-f_1 + f_2 - f_3 + f_4)$, $\tilde{\tau}_\theta = l(f_2 - f_4)$, $\tilde{\tau}_\phi = l(f_3 - f_1)$, con C una constante que depende de las características del rotor y l la distancia del centro de masa al rotor.

para un *Quad-Rotor* que es capaz de realizar seguimiento de trayectorias en presencia de perturbaciones acotadas. Sin embargo, como la mayoría de los controladores por Modos Deslizantes, presenta la desventaja de ser discontinuo.

En este trabajo se analiza el problema de regulación de salida para un *Quad-Rotor*. Este trabajo contribuye con el diseño de un controlador robusto, basado en Modos Deslizantes, que es capaz de regular las posiciones y los ángulos del *Quad-Rotor* de forma robusta para cierta clase de perturbaciones afectando el sistema. La regulación está compuesta de controladores continuos por Modos Deslizantes en cascada que proporcionan regulación uniforme y en tiempo-finito. De nuestro conocimiento a la fecha, esta es la primera vez que se aplica un controlador robusto y continuo por Modos Deslizantes para regular las posiciones y los ángulos de un *Quad-Rotor*.

La estructura de este trabajo se presenta a continuación. El planteamiento del problema se presenta en la Sección II, mientras que algunos preliminares se introducen en la Sección III. La estrategia de control robusto se muestra en la Sección IV. Algunos resultados de simulación se ilustran en la Sección V. Finalmente, en la Sección VI se discuten los comentarios finales.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Considere la siguiente dinámica simplificada, por medio de Euler-Lagrange, de un *Quad-Rotor* (ver Fig. 1 y, para más detalles [7])

$$\ddot{x} = u_m(\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi \sin \theta), \quad (1a)$$

$$\ddot{y} = u_m(\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \psi \sin \phi), \quad (1b)$$

$$\ddot{z} = u_m \cos \phi \cos \theta - g + d_z(t), \quad (1c)$$

$$\ddot{\psi} = \tilde{\tau}_\psi + d_\psi(t), \quad (1d)$$

$$\ddot{\theta} = \tilde{\tau}_\theta + d_\theta(t), \quad (1e)$$

$$\ddot{\phi} = \tilde{\tau}_\phi + d_\phi(t), \quad (1f)$$

donde $x, y \in \mathbb{R}$ son las coordenadas en el plano horizontal, $z \in \mathbb{R}$ es la posición vertical, $\psi, \theta, \phi \in \mathbb{R}$ corresponden al ángulo de guiñada (alrededor del eje z), ángulo de cabeceo (alrededor del eje y), y ángulo de alabeo (alrededor del eje x), respectivamente. Los momentos angulares están dados por $\tilde{\tau}_\psi, \tilde{\tau}_\theta, \tilde{\tau}_\phi \in \mathbb{R}$, respectivamente; mientras que $u_m := u/m$ con $u \in \mathbb{R}$ denotando el empuje total y $m \in \mathbb{R}_{>0}$ denotando la masa del *Quad-Rotor*. Los términos $d_z, d_\psi, d_\theta, d_\phi : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}$ representan las incertidumbres en el modelo y las perturbaciones externas. Se asume que dichas incertidumbres y perturbaciones están uniformemente acotadas y son Lipschitz continuas, i.e. $|d_z(t)| \leq D_z$, $|d_\psi(t)| \leq D_\psi$, $|d_\theta(t)| \leq D_\theta$, $|d_\phi(t)| \leq D_\phi$, y $|\dot{d}_z(t)| \leq \bar{D}_z$, $|\dot{d}_\psi(t)| \leq \bar{D}_\psi$, $|\dot{d}_\theta(t)| \leq \bar{D}_\theta$, $|\dot{d}_\phi(t)| \leq \bar{D}_\phi$, para todo $t \geq 0$; con $D_z, D_\psi, D_\theta, D_\psi, \bar{D}_z, \bar{D}_\psi, \bar{D}_\theta$ y \bar{D}_ϕ constantes positivas y conocidas. También se considera que las posiciones x, y, z , y los ángulos ψ, θ, ϕ , así como sus respectivas velocidades, son medibles. Por propósitos de legibilidad, se usa la siguiente notación: $sx := \sin x$, $cx := \cos x$ y $tx := \tan x$.

El objetivo de este trabajo consiste en regular de forma robusta las posiciones x, y, z , y el ángulo ψ , a pesar de las incertidumbres y perturbaciones en el *Quad-Rotor*.

III. PRELIMINARES

Considere una ecuación diferencial variante en el tiempo [8], i.e.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t, x(t)), \quad t \geq t_0, \quad t_0 \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $f : \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ representa una función continua con respecto a x , medible con respecto a t , y tal que $f(t, 0) = 0$. Asuma que la solución del sistema (2), para una condición inicial $x_0 \in \mathbb{R}^n$ en el instante de tiempo $t_0 \in \mathbb{R}$, se denota como $x(t, t_0, x_0)$ y está definida en algún intervalo de tiempo $[t_0, t_0 + T)$ donde $0 \leq T < \infty$. Sea Ω un subconjunto abierto de \mathbb{R}^n tal que $0 \in \Omega$.

Definición 1. [8], [10]. En el punto de equilibrio $x = 0$, el sistema (2) se dice:

1) Uniformemente Estable (UE) si para cualquier $\epsilon > 0$ existe $\delta(\epsilon)$ tal que para cualquier $x_0 \in \Omega$, si $\|x_0\| \leq \delta(\epsilon)$ entonces $\|x(t, t_0, x_0)\| \leq \epsilon$ para todo $t \geq t_0$, y cualquier $t_0 \in \mathbb{R}$.

2) Uniformemente Exponencialmente Estable (UEE) si es UE y tiene convergencia exponencial desde Ω , i.e. para cualquier $x_0 \in \Omega$ existen $k, \gamma > 0$ tales que $\|x(t, t_0, x_0)\| \leq k \|x_0\| e^{-\gamma(t-t_0)}$, para todo $t \geq t_0$, y cualquier $t_0 \in \mathbb{R}$.

3) Uniformemente Estable en Tiempo-Finito (UETF) si es UE y tiene convergencia en tiempo-finito desde Ω , i.e. para cualquier $x_0 \in \Omega$ existe $0 \leq T^{x_0} < +\infty$ tal que $x(t, t_0, x_0) = 0$ para todo $t \geq t_0 + T^{x_0}$, y cualquier $t_0 \in \mathbb{R}$. La función $T_0(x_0) = \inf \{T^{x_0} \geq 0 : x(t, t_0, x_0) = 0, \forall t \geq t_0 + T^{x_0}\}$ es conocida como el tiempo de llegada del sistemas (2).

Si $\Omega = \mathbb{R}^n$, entonces en $x = 0$ el sistema (2) se dice Globalmente UE (GUE), UEE (GUEE), o UETF (GUETF), respectivamente.

Para los preliminares relacionados con la teoría de Modos Deslizantes referirse por favor a [12].

IV. ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO

En esta sección se presenta el diseño de la estrategia de control robusto para regular las posiciones x , y , z , y el ángulo ψ . Dicho esquema está compuesto por controladores continuos por Modos Deslizantes en cascada diseñados por medio una estrategia jerárquica. Debido al desacoplamiento que existe entre el control de posición y la dinámica de altitud, el modelo se puede ver como una serie de sub-sistemas anidados. Por lo tanto, la altitud z y el ángulo de guiñada ψ representan el primer sub-sistema a ser regulado, para regular después las posiciones horizontales x , y , y los ángulos de cabeceo θ y alabeo ϕ , respectivamente. El control de posición horizontal será diseñado como un control de alto nivel, mientras que el control de orientación como uno de bajo nivel.

Considere la representación en el espacio de estados del sistema (1), i.e.

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = u_m (s\phi_1 s\psi_1 + c\phi_1 c\psi_1 s\theta_1), \quad (3a)$$

$$\dot{y}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = u_m (c\phi_1 s\theta_1 s\psi_1 - c\psi_1 s\phi_1), \quad (3b)$$

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = u_m c\phi c\theta - g + d_z(t), \quad (3c)$$

$$\dot{\psi}_1 = \psi_2, \quad \dot{\psi}_2 = \tilde{\tau}_\psi + d_\psi(t), \quad (3d)$$

$$\dot{\theta}_1 = \theta_2, \quad \dot{\theta}_2 = \tilde{\tau}_\theta + d_\theta(t), \quad (3e)$$

$$\dot{\phi}_1 = \phi_2, \quad \dot{\phi}_2 = \tilde{\tau}_\phi + d_\phi(t), \quad (3f)$$

donde los sub-índices 1 representan posiciones y ángulos, respectivamente; mientras que los sub-índices 2 definen las velocidades correspondientes para cada una de las variables.

Se propone el siguiente controlador continuo en cascada

$$u = \frac{m(z_3 - k_{z_1} [\varphi_z]^{\frac{1}{2}} + g)}{c\theta c\phi}, \quad \dot{z}_3 = -k_{z_3} [\varphi_z]^0, \quad (4a)$$

$$\varphi_z = z_2 + k_{z_2} [e_{z_1}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4b)$$

$$\tilde{\tau}_\psi = \psi_3 - k_{\psi_1} [\varphi_\psi]^{\frac{1}{2}}, \quad \dot{\psi}_3 = -k_{\psi_3} [\varphi_\psi]^0, \quad (4c)$$

$$\varphi_\psi = \psi_2 + k_{\psi_2} [e_{\psi_1}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4d)$$

$$\tilde{\tau}_\theta = \theta_3 - k_{\theta_1} [\varphi_\theta]^{\frac{1}{2}}, \quad \dot{\theta}_3 = -k_{\theta_3} [\varphi_\theta]^0, \quad (4e)$$

$$\varphi_\theta = \theta_2 + k_{\theta_2} [e_{\theta_1}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4f)$$

$$\tilde{\tau}_\phi = \phi_3 - k_{\phi_1} [\varphi_\phi]^{\frac{1}{2}}, \quad \dot{\phi}_3 = -k_{\phi_3} [\varphi_\phi]^0, \quad (4g)$$

$$\varphi_\phi = \phi_2 + k_{\phi_2} [e_{\phi_1}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4h)$$

$$\theta_d = -(k_{x_1} e_{x_1} + k_{x_2} x_2)/g, \quad (4i)$$

$$\phi_d = (k_{y_1} e_{y_1} + k_{y_2} y_2)/g, \quad (4j)$$

donde $[\cdot]^\gamma := |\cdot|^\gamma \text{sign}(\cdot)$, para cualquier $\gamma \in \mathbb{R}_{\geq 0}$; $e_{x_1} := x_1 - x_d$, $e_{y_1} := y_1 - y_d$, $e_{z_1} := z_1 - z_d$, $e_{\psi_1} := \psi_1 - \psi_d$, $e_{\theta_1} := \theta_1 - \theta_d$, $e_{\phi_1} := \phi_1 - \phi_d$ son los errores de regulación,

respectivamente; mientras que $x_d, y_d, z_d, \psi_d \in \mathbb{R}$ son las referencias deseadas, y $k_{x_i}, k_{y_i}, i = 1, 2, k_{z_j}, k_{\psi_j}, k_{\theta_j}, k_{\phi_j}, j = \overline{1, 3}$, constantes de diseño.

El siguiente teorema describe las propiedades de convergencia de la estrategia de control aquí propuesta.

Teorema 1. *Sea el controlador continuo en cascada (4) aplicado al sistema (3). Entonces, para ciertas constantes positivas $k_{x_i}, k_{y_i}, i = 1, 2, k_{z_j}, k_{\psi_j}, k_{\theta_j}, k_{\phi_j}, j = \overline{1, 3}$, los errores de regulación e_{z_1} y e_{ψ_1} serán UETF, mientras que los errores de regulación e_{x_1} y e_{y_1} serán UEE.*

Demostración. La demostración se hará de forma constructiva para cada uno de los sub-sistemas.

a) *Control de altitud y guiñada.* Sustituya el control (4a) – (4b) en (3c), i.e.

$$\dot{z}_1 = z_2,$$

$$\dot{z}_2 = z_3 - k_{z_1} [\varphi_z]^{\frac{1}{2}} + d_z(t),$$

$$\dot{z}_3 = -k_{z_3} [\varphi_z]^0,$$

donde $\varphi_z = z_2 + k_{z_2} [e_{z_1}]^{\frac{2}{3}}$. Defina $\bar{z}_3 := z_3 + d_z(t)$, entonces se tiene que

$$\dot{e}_{z_1} = z_2, \quad (5a)$$

$$\dot{z}_2 = \bar{z}_3 - k_{z_1} [\varphi_z]^{\frac{1}{2}}, \quad (5b)$$

$$\dot{\bar{z}}_3 = -k_{z_3} [\varphi_z]^0 + \dot{d}_z(t). \quad (5c)$$

Note que la dinámica anterior es la misma que la dinámica que presenta el algoritmo Continuo Singular Terminal de Modos Deslizantes presentado en [6]. Basados en el enfoque de la función de Lyapunov, se ha demostrado en [6] que si la perturbación $\dot{d}_z(t)$ está acotada, i.e. $|\dot{d}_z(t)| \leq \bar{D}_z$, entonces el sistema (5) es UETF para ciertas constantes positivas $k_{z_j}, j = \overline{1, 3}$. De este modo, se tiene que $z(t) = z_d$ para todo $t \geq T_z$.

Ahora sustituya la entrada de control (4c) – (4d) en (3c), y defina $\bar{\psi}_3 := \psi_3 + d_\psi(t)$, i.e.

$$\dot{e}_{\psi_1} = \psi_2, \quad (6a)$$

$$\dot{\psi}_2 = \bar{\psi}_3 - k_{\psi_1} [\varphi_\psi]^{\frac{1}{2}}, \quad (6b)$$

$$\dot{\bar{\psi}}_3 = -k_{\psi_3} [\varphi_\psi]^0 + \dot{d}_\psi(t), \quad (6c)$$

donde $\varphi_\psi = \psi_2 + k_{\psi_2} [e_{\psi_1}]^{\frac{2}{3}}$. Por lo tanto, basados en [6], si $|\dot{d}_\psi(t)| \leq \bar{D}_\psi$, entonces el sistema (6) también es UETF para ciertas constantes positivas $k_{\psi_j}, j = \overline{1, 3}$, y de este modo se tiene que $\psi = \psi_d$ para todo $t \geq T_\psi$.

b) *Control de posición longitudinal y cabeceo.* Es claro que para un tiempo $T = \max(T_z, T_\psi)$, se tiene que $e_{z_1} = z_3 =$

$\varphi_z = e_{\psi_1} = 0$, y por lo tanto (3a) y (3e) se reducen a

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= gt\theta_1, \\ \dot{\theta}_1 &= \theta_2, \\ \dot{\theta}_2 &= \tilde{\tau}_\theta + d_\theta(t).\end{aligned}$$

Suponga que $\theta \approx t\theta$ y recuerde que $\theta_d = \theta_1 - e_{\theta_1}$. Entonces, se obtiene que

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= ge_{\theta_1} + g\theta_d, \\ \dot{\theta}_1 &= \theta_2, \\ \dot{\theta}_2 &= \tilde{\tau}_\theta + d_\theta(t).\end{aligned}$$

Sustituya la entrada de control (4e) y la referencia (4i) en la dinámica previa, y defina $\bar{\theta}_3 := \theta_3 + d_\theta(t)$, i.e.

$$\begin{aligned}\dot{e}_{x_1} &= x_2, & (7a) \\ \dot{x}_2 &= ge_{\theta_1} - k_{x_1}e_{x_1} - k_{x_2}x_2, & (7b) \\ \dot{e}_{\theta_1} &= \theta_2, & (7c) \\ \dot{\theta}_2 &= \bar{\theta}_3 - k_{\theta_1}[\varphi_\theta]^{\frac{1}{2}}, & (7d) \\ \dot{\theta}_3 &= -k_{\theta_3}[\varphi_\theta]^0 + \dot{d}_\theta(t). & (7e)\end{aligned}$$

Por lo tanto, basados en [6], si $|\dot{d}_\theta(t)| \leq \bar{D}_\theta$, entonces el sistema (7c)–(7e) es *UETF* para ciertas constantes positivas k_{θ_j} , $j = \bar{1}, \bar{3}$, y de este modo $e_{\theta_1} = 0$ para todo $t \geq T_\theta$.

Así, el sistema (7a)–(7b) se reduce a

$$\begin{aligned}\dot{e}_{x_1} &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -k_{x_1}e_{x_1} - k_{x_2}x_2,\end{aligned}$$

y por lo tanto, para ciertas constantes positivas k_{x_i} , $i = 1, 2$, es fácil demostrar que e_{x_1} es *UEE*.

c) *Control de posición lateral y alabeo*. Recuerde que para un instante de tiempo $T = \max(T_z, T_\psi)$, $e_{z_1} = z_3 = \varphi_z = e_{\psi_1} = 0$. Suponga que $\phi \approx t\phi$ y que $\phi_d = \phi_1 - e_{\phi_1}$. Entonces, se tiene que (3b) y (3f) se pueden reducir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= -ge_{\phi_1} - g\phi_d, \\ \dot{e}_{\phi_1} &= \phi_2, \\ \dot{\phi}_2 &= \tilde{\tau}_\phi + d_\phi(t).\end{aligned}$$

Sustituya la entrada de control (4g) y la referencia (4j) en

la dinámica previa, y defina $\bar{\phi}_3 := \phi_3 + d_\phi(t)$, i.e.

$$\dot{e}_{y_1} = y_2, \quad (8a)$$

$$\dot{y}_2 = -ge_{\phi_1} - k_{y_1}e_{y_1} - k_{y_2}y_2, \quad (8b)$$

$$\dot{e}_{\phi_1} = \phi_2, \quad (8c)$$

$$\dot{\phi}_2 = \bar{\phi}_3 - k_{\phi_1}[\varphi_\phi]^{\frac{1}{2}}, \quad (8d)$$

$$\dot{\phi}_3 = -k_{\phi_3}[\varphi_\phi]^0 + \dot{d}_\phi(t). \quad (8e)$$

Basados en [6], si $|\dot{d}_\phi(t)| \leq \bar{D}_\phi$, se tiene que el sub-sistema (8c)–(8e) también es *UETF* para ciertas constantes positivas k_{ϕ_j} , $j = \bar{1}, \bar{3}$, y por lo tanto, se tiene que $e_{\phi_1} = 0$, para todo $t \geq T_\phi$.

De este modo, el sistema (8a)–(8b) se puede re-escribir de la siguiente manera

$$\begin{aligned}\dot{e}_{y_1} &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= -k_{y_1}e_{y_1} - k_{y_2}x_2,\end{aligned}$$

y para ciertas constantes positivas k_{y_i} , $i = 1, 2$, uno puede demostrar que e_{y_1} es *UEE*. La demostración concluye en este punto. \square

Observación 1. Es importante señalar que las señales de control u , $\tilde{\tau}_\psi$, $\tilde{\tau}_\theta$ y $\tilde{\tau}_\phi$ son continuas y robustas contra perturbaciones acotadas y Lipschitz continuas. Además, note que la robustez del controlador propuesto permite usar un modelo simplificado del Quad-Rotor, dejando la dinámica no modelada como parte de las perturbaciones.

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El *Quad-Rotor* descrito por (1), con $m = 1[kg]$ y $g = 9.81[m/s^2]$, y el controlador continuo en cascada (4), son implementados en Matlab Simulink[®]. Los parámetros del controlador se describen en el Cuadro I. Con propósitos de comparación, también es implementada una estrategia de control PD jerárquico [7]. El Cuadro I también muestra las ganancias para los controladores PD, con sub-índice p para la ganancia proporcional, y sub-índice d para la derivativa.

Todas las simulaciones han sido implementadas con el método de integración de Euler y con un tiempo de muestreo igual a $0.001[seg]$. Las perturbaciones presentan la misma estructura, i.e.

$$d(t) = 0.5 \sin(t) + 0.1.$$

Los resultados de regulación se describen en la Fig. 2. Es fácil ver que la estrategia de control robusto aquí propuesta es capaz de lidiar con las perturbaciones que afectan la dinámica del *Quad-Rotor* alcanzando sin problemas las posiciones deseadas. Por otra parte, es claro que el control PD jerárquico genera algunas oscilaciones no deseadas.

Las señales de control se pueden ver en la Fig. 3. Evidentemente, la estrategia de control propuesta requiere un poco más de energía para compensar las perturbaciones correspondientes. Sin embargo, haciendo una comparación con la energía que requiere la estrategia de control PD jerárquico,

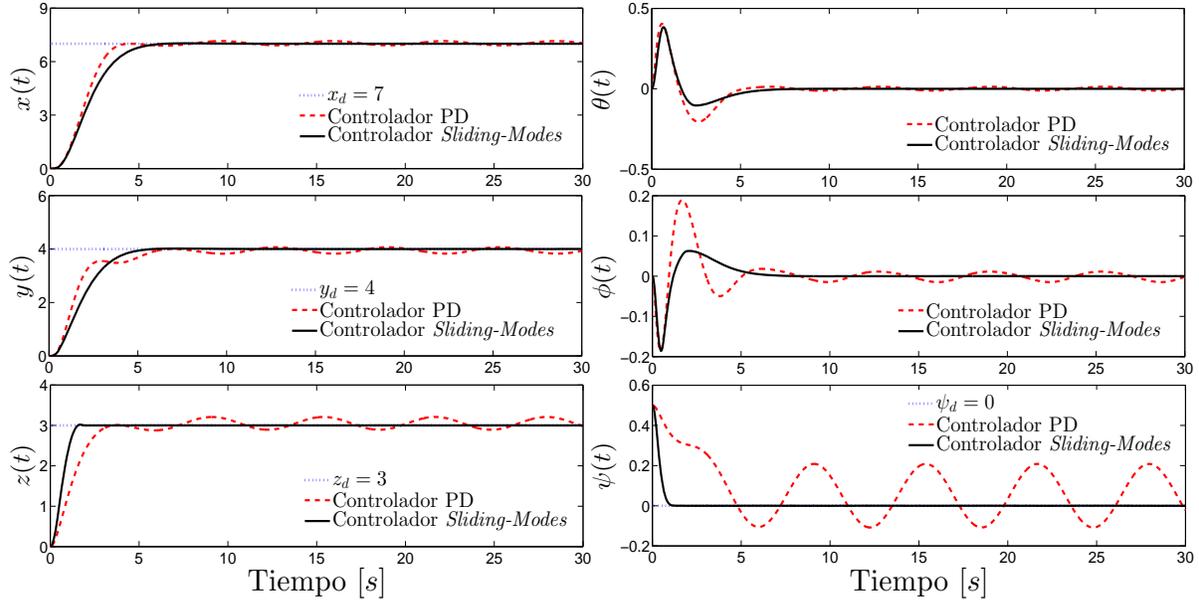


Figura 2. Posiciones y Ángulos de Euler. Comparativo del comportamiento del Quad-Rotor ante perturbaciones.

 Cuadro I
 PARÁMETROS DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

PARÁMETRO	MODOS DESLIZANTES	PDS
k_{x_1}, k_{x_p}	0.6857	0.6857
k_{x_2}, k_{x_d}	1.4286	0.6857
k_{y_1}, k_{y_p}	0.0699	0.0699
k_{y_2}, k_{y_d}	0.1456	0.1456
k_{z_1}, k_{z_p}	5	2
k_{z_2}, k_{z_d}	2	3
k_{z_3}	1	-
k_{ψ_1}, k_{ψ_p}	5	2
k_{ψ_2}, k_{ψ_d}	2	3
k_{ψ_3}	1	-
$k_{\theta_1}, k_{\theta_p}$	5	35
$k_{\theta_2}, k_{\theta_d}$	2	10
k_{θ_3}	1	-
k_{ϕ_1}, k_{ϕ_p}	5	35
k_{ϕ_2}, k_{ϕ_d}	2	10
k_{ϕ_3}	1	-

se aprecia que ambas estrategias emplean prácticamente la misma energía de control.

La Fig. 4 ilustra la tarea de regulación en una visión 3D del comportamiento del Quad-Rotor al aplicarle el controlador propuesto y el PD.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se da solución al problema de regulación de salida para un Quad-Rotor contribuyendo con el diseño de un controlador robusto, basado en Modos Deslizantes, que es capaz de regular las posiciones y los ángulos del

Quad-Rotor de forma robusta para cierta clase de perturbaciones afectando el sistema. La regulación está compuesta de controladores continuos por Modos Deslizantes en cascada que proporcionan regulación uniforme y en tiempo-finito. De nuestro conocimiento a la fecha, esta es la primera vez que se aplica un controlador robusto y continuo por Modos Deslizantes para regular las posiciones y los ángulos de un Quad-Rotor. Los resultados de simulación ilustran la efectividad de la estrategia de control propuesta.

AGRADECIMIENTOS

H. Ríos y J. González-Sierra agradecen el apoyo financiero por parte del CONACYT 270504 y 266524, respectivamente. Todos los autores agradecen el apoyo financiero por parte de proyectos TECNM y CONACYT 134534.

REFERENCIAS

- [1] K. Alexis, G. Nikolakopoulos, and A. Tzes. Constrained optimal attitude control of a quadrotor helicopter subject to wind-gusts: Experimental studies. *American Control Conference*, pages Baltimore, MD, USA, 4451–4455, 2010.
- [2] G. Alizadeh and K. Ghasemi. Control of quadrotor using sliding mode disturbance observer and nonlinear H -Infinite. *International Journal of Robotics (Theory and Applications)*, 4(1):38–46, 2015.
- [3] L. Besnard, Y.B. Shtessel, and B. Landrum. Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer. *Journal of the Franklin Institute*, 349:658–684, 2012.
- [4] G. Damien. Unmanned aerial vehicle formation using sliding mode disturbance observers, aerial vehicles. *INTECH*, Chapter 11(1):211–234, 2009.
- [5] H. Du, H. Shen, and W. Zhu. Control of a hovering quadrotor aircraft based finite-time attitude control algorithm. *12th IEEE International Conference on Control & Automation*, pages Kathmandu, Nepal, 192–197, 2016.
- [6] L. Fridman, J. A. Moreno, B. Bandyopadhyay, S. Kamal, and A. Chailanga. Continuous nested algorithms: The fifth generation of sliding mode controllers. In X. Yu and M. Ö. Efe, editors, *Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics*, chapter 2, pages 5–35. Springer International Publishing, 2016.

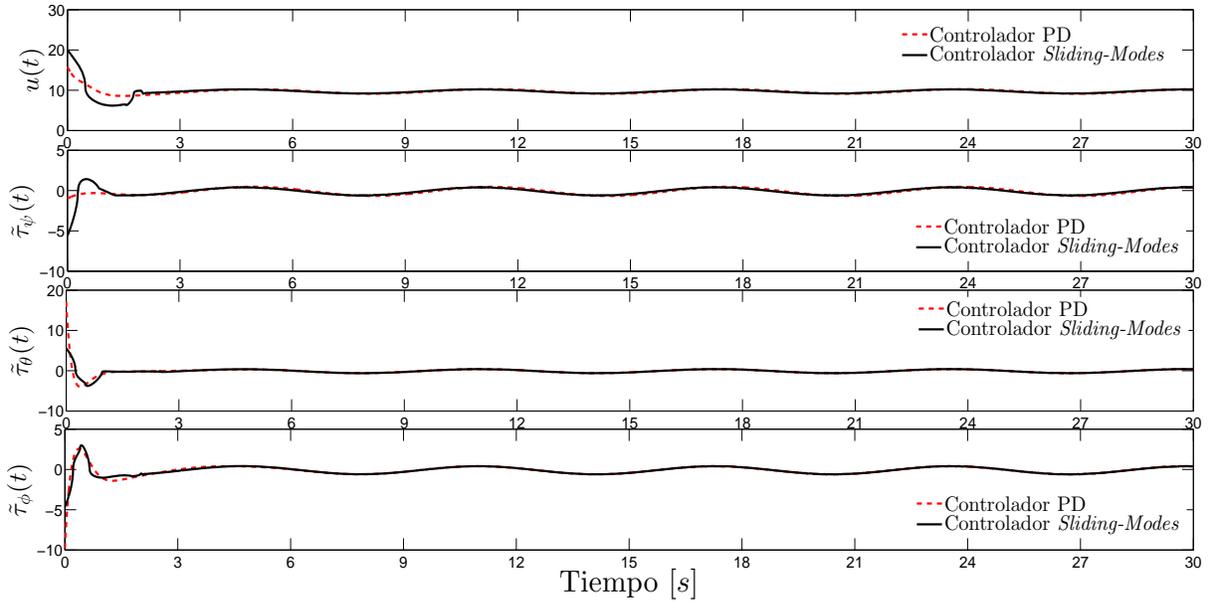


Figura 3. Señales de Control. Señales de control obtenidas al aplicar los controladores.

[7] L. R. García-Carrillo, A.E. Dzul-López, R. Lozano, and C. Pégard. *Quad Rotorcraft Control*. Advances in Industrial Control. Springer-Verlag London Heidelberg New York Dordrecht, London, 2013.

[8] H. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, New Jersey, U.S.A., 2002.

[9] V. Muralidharan, A.K. Ekbote, and A.D. Mahindrakar. Finite-time control of a quadrotor system. *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, pages Kanpur, India, 643–647, 2015.

[10] A. Polyakov. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(8):2106–2110, 2012.

[11] N.D. Salim, D. Derawi, H. Zamzuri, K. Nonami, and M.A.A. Rahman. Robust optimal attitude controller for mimo uncertain hexarotor mavs: Disturbance observer-based. *Mathematical Problems in Engineering*, 18(5):1–24, 2016.

[12] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant. *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhauser, New York, 2014.

[13] K. Valavanis and G. Vachtsevanos. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Netherlands, 2015.

[14] H. Yun, Z. Zongyu, and S. Zhiguang. Fixed-time terminal sliding mode trajectory tracking control of a quadrotor helicopter. *Proc. of the 34th Chinese Control Conference*, pages Hangzhou, China, 4361–4366, 2015.

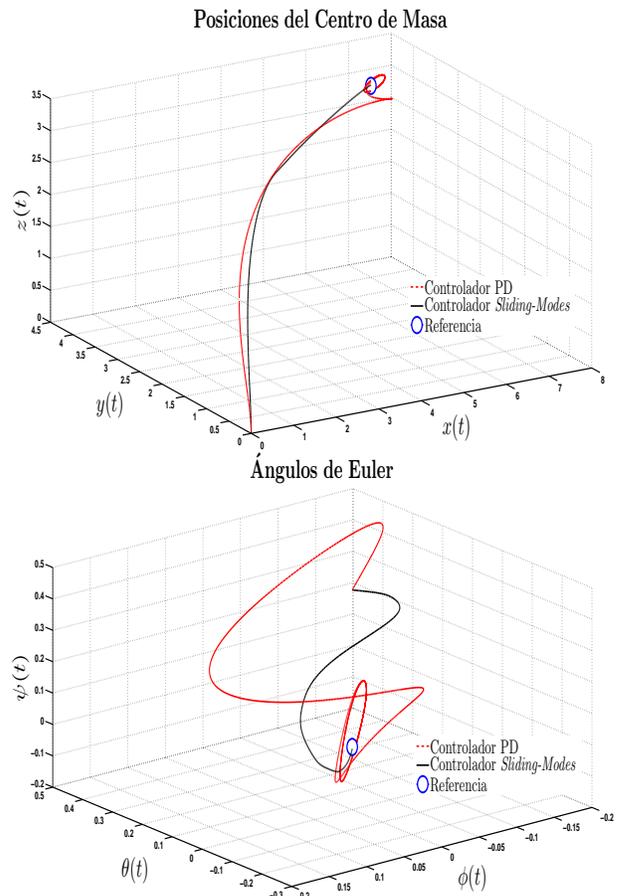


Figura 4. Posiciones y Ángulos de Euler - Vista 3D. Visualización 3D del comportamiento del Quad-Rotor cuando son aplicados los controles Modos Deslizantes y PD.

Regulación Robusta de Salida vía Modos Deslizantes Continuos. Parte II: Formación de *Quad-Rotors* Líder-Seguidor

Jaime González-Sierra[†], Héctor Ríos[†] y Alejandro Dzul[‡]

[†]CONACYT - TECNM/Instituto Tecnológico de La Laguna

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Bldv. Revolución y Cuauhtémoc S/N, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México

Emails: jamesgsjr@hotmail.com y hriosb@correo.itlalaguna.edu.mx

[‡]TECNM/Instituto Tecnológico de La Laguna

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Bldv. Revolución y Cuauhtémoc S/N, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México

Email: dzul@faraday.itlalaguna.edu.mx

Resumen—Este trabajo aborda el problema de coordinar dos *Quad-Rotors* para su posicionamiento en una referencia deseada utilizando el esquema líder-seguidor. La estrategia de control desarrollada es robusta ante perturbaciones y se basa en las técnicas de control por Modos Deslizantes continuos. Se presentan simulaciones numéricas que ilustran el correcto desempeño de la estrategia de control.

I. INTRODUCCIÓN

LOS vehículos aéreos no-tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) han tenido últimamente un auge importante debido a la gran variedad de aplicaciones que se pueden encontrar en diversas áreas (salud, vigilancia, transporte, exploración de zonas, mapeo, localización de objetos, supervisión y mantenimiento de redes eléctricas, etc.). Entre los diferentes tipos de UAVs, se encuentran los *Quad-Rotors*. Este tipo de vehículos es el más usado en la investigación y en el desarrollo de aplicaciones debido a su tamaño y a su modo de vuelo. Algunas de sus aplicaciones se pueden encontrar en [12], [19], [21], [22]. Además en la literatura existe una gama amplia de estrategias de control para estabilizar al *Quad-Rotor* y/o para que realice el seguimiento de trayectorias deseadas [3], [9], [10], [20], [25].

Una de las principales áreas de investigación es la de coordinación de movimiento. Específicamente se busca diseñar una ley de control de formación que permita que un grupo de robots móviles se mantengan en un patrón geométrico deseado, para que éstos, ejecuten una tarea dada.

Algunos trabajos relacionados con control de formación de UAVs son [4], [7], [15]. En primera instancia, en [4] se propone un método para que un grupo de robots heterogéneos, conformados por *Quad-Rotors* y robots móviles terrestres se comuniquen entre sí para realizar tareas de búsqueda y rescate; en [7] se proponen condiciones suficientes y

necesarias para que un conjunto de *Quad-Rotors* formen un patrón geométrico y sigan una trayectoria bajo topologías de interacción que cambian conforme éstos avanzan; en [15] se presenta la coordinación entre un *Quad-Rotor* y un vehículo de superficie no-tripulado, para inspeccionar los litorales del mar. En el mismo contexto, en [11] se presenta el control de multi-agentes para formación de patrones geométricos con evasión de obstáculos y colisiones basándose en campos vectoriales repulsivos. Por otra parte, en [18] se desarrollan estrategias de control, basadas en funciones de transferencia, para que dos *Quad-Rotors* se ubiquen en una posición deseada y realicen el seguimiento de una trayectoria asignada. En este último caso, se hacen evidentes las perturbaciones de aire que producen los mismos *Quad-Rotors*, realizando movimientos no deseados. En [6] se diseña un controlador robusto basado en un observador de perturbaciones por Modos Deslizantes para lograr vuelo en formación. La desventaja de este trabajo radica en que la formación sólo es posible para configuraciones triangulares. Debido a esta restricción, algunos patrones geométricos no pueden ser realizados. Además en [1] proponen un controlador óptimo de tiempo-finito para un *Quad-Rotor*, operando bajo condiciones severas de viento, tomando en consideración que las acciones de control solo afectan a la dinámica rotacional. Finalmente, en [17] diseñan un controlador en tiempo-finito para estabilizar el modelo linealizado de un *Quad-Rotor*.

Este trabajo se enfoca en regular de manera robusta la salida para un grupo de *Quad-Rotors* de tal modo que formen un patrón geométrico deseado. El enfoque utilizado para diseñar las estrategias de control está basado en las técnicas de Modos Deslizantes, las cuales son capaces de regular de manera robusta la posición y orientación de cada *Quad-Rotor* tomando en cuenta la presencia de perturbaciones que actúan

en el modelo. La estrategia propuesta está compuesta por controladores por Modos Deslizantes continuos en cascada que proporcionan estabilidad uniforme y en tiempo-finito.

Este trabajo se desarrolla de la siguiente manera. El planteamiento del problema se presenta en la Sección II, mientras que en la Sección III se introducen algunos preliminares. La Sección IV presenta la estrategia de control robusto así como un análisis de estabilidad. En la Sección V se ilustran los resultados obtenidos en la simulación numérica y en la Sección VI se mencionan las conclusiones.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Considere un grupo de dos *Quad-Rotors* $N = \{R_1, R_2\}$. La dinámica de cada uno de ellos está descrita por las ecuaciones de Euler-Lagrange (Fig. 1)

$$\ddot{x}_i = \frac{u_i}{m_i} (\sin \phi_i \sin \psi_i + \cos \phi_i \cos \psi_i \sin \theta_i), \quad (1a)$$

$$\ddot{y}_i = \frac{u_i}{m_i} (\cos \phi_i \sin \theta_i \sin \psi_i - \cos \psi_i \sin \phi_i), \quad (1b)$$

$$\ddot{z}_i = \frac{u_i}{m_i} \cos \phi_i \cos \theta_i - g + d_{z_i}(t), \quad (1c)$$

$$\ddot{\psi}_i = \tilde{\tau}_{\psi_i} + d_{\psi_i}(t), \quad (1d)$$

$$\ddot{\theta}_i = \tilde{\tau}_{\theta_i} + d_{\theta_i}(t), \quad (1e)$$

$$\ddot{\phi}_i = \tilde{\tau}_{\phi_i} + d_{\phi_i}(t), \quad (1f)$$

para todo $i = 1, 2$, donde $x_i, y_i, z_i \in \mathbb{R}$ definen la posición del centro de masa de cada *Quad-Rotor* en un espacio de tres dimensiones, $\psi_i, \theta_i, \phi_i \in \mathbb{R}$ son los ángulos de guiñada, de cabeceo y de alabeo respectivamente. Las entradas de control $\tilde{\tau}_{\psi_i}, \tilde{\tau}_{\theta_i}, \tilde{\tau}_{\phi_i} \in \mathbb{R}$ corresponden a los momentos de guiñada, de cabeceo y de alabeo, respectivamente. La cuarta entrada de control está dada por el empuje total $u_i \in \mathbb{R}$, $m_i \in \mathbb{R}_{>0}$ corresponde a la masa de cada *Quad-Rotor* y g es la aceleración de la gravedad. Por simplicidad se considera que los dos *Quad-Rotors* tienen la misma masa, i. e. $m_i = m$, $i = 1, 2$. Además, se considera que el sistema (1) está perturbado por los términos $d_{z_i}(t), d_{\psi_i}(t), d_{\theta_i}(t)$ y $d_{\phi_i}(t)$, los cuales se asume que están uniformemente acotados y son Lipschitz continuos, i.e. $|d_{z_i}(t)| \leq D_{z_i}, |d_{\psi_i}(t)| \leq D_{\psi_i}, |d_{\theta_i}(t)| \leq D_{\theta_i}, |d_{\phi_i}(t)| \leq D_{\phi_i}$, así como su derivada $|\dot{d}_{z_i}(t)| \leq \bar{D}_{z_i}, |\dot{d}_{\psi_i}(t)| \leq \bar{D}_{\psi_i}, |\dot{d}_{\theta_i}(t)| \leq \bar{D}_{\theta_i}, |\dot{d}_{\phi_i}(t)| \leq \bar{D}_{\phi_i}$, para todo $t \geq 0$; con constantes positivas conocidas $D_{z_i}, D_{\psi_i}, D_{\theta_i}, D_{\phi_i}, \bar{D}_{z_i}, \bar{D}_{\psi_i}, \bar{D}_{\theta_i}$ y \bar{D}_{ϕ_i} . Para más detalles, en [16] se presenta un modelo más completo del *Quad-Rotor*. Además, para una fácil lectura, se utiliza la siguiente notación $sx := \sin x$, $cx := \cos x$ y $tx := \tan x$.

El objetivo de este trabajo es regular de forma robusta las posiciones x_i, y_i, z_i , y el ángulo ψ_i , $i = 1, 2$ a pesar de las incertidumbres y perturbaciones presentes en el modelo, de tal manera que formen en un patrón geométrico deseado.

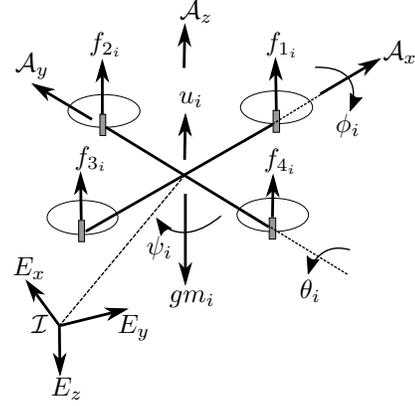


Figura 1. Diagrama del *Quad-Rotor* en un marco inercial. Las fuerzas $f_{1_i}, f_{2_i}, f_{3_i}, f_{4_i}$ corresponden al empuje de cada motor del i -ésimo *Quad-Rotor* y se relacionan directamente con los momentos angulares i.e. $u_i = \sum_{j=1}^4 f_{j_i}$, $\tilde{\tau}_{\psi} = B(-f_{1_i} + f_{2_i} - f_{3_i} + f_{4_i})$, $\tilde{\tau}_{\theta} = l(f_{2_i} - f_{4_i})$, $\tilde{\tau}_{\phi} = l(f_{3_i} - f_{1_i})$ donde B es una constante que depende de las características del rotor y l la distancia del centro de masa al rotor.

III. PRELIMINARES

Considere una ecuación diferencial variante en el tiempo [13] dada por

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t, x(t)), \quad t \geq t_0, \quad t_0 \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado; $f : \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función continua con respecto a x y medible con respecto a t y $f(t, 0) = 0$. Se asume que la solución del sistema (2) para una condición inicial $x_0 \in \mathbb{R}^n$ en un instante de tiempo $t_0 \in \mathbb{R}$ está dada por $x(t, t_0, x_0)$ y está definida en algún intervalo de tiempo $[t_0, t_0 + T)$ donde $0 \leq T < \infty$. Sea Ω un subconjunto abierto \mathbb{R}^n , tal que $0 \in \Omega$.

Definición 1. [13], [23]. *En el punto de equilibrio $x = 0$, el sistema (2) se dice:*

- Uniformemente Estable (UE) si para cualquier $\epsilon > 0$ hay un $\delta(\epsilon)$ de tal manera que para cualquier $x_0 \in \Omega$, si $|x_0| \leq \delta(\epsilon)$ entonces $|x(t, t_0, x_0)| \leq \epsilon$ para todo $t \geq t_0$, para cualquier $t_0 \in \mathbb{R}$.
- Uniformemente Exponencialmente Estable (UEE) si es UE y tiene convergencia exponencial desde Ω , i.e. para cualquier $x_0 \in \Omega$ se tiene que $\|x(t, t_0, x_0)\| \leq k \|x_0\| e^{-\gamma(t-t_0)}$ con $k, \gamma > 0$ para todo $t \geq t_0$, y cualquier $t_0 \in \mathbb{R}$.
- Uniformemente Estable en Tiempo-Finito (UETF) si es UE y converge en tiempo finito desde Ω , i.e. para cualquier $x_0 \in \Omega$ existe $0 \leq T^{x_0} < +\infty$ tal que $x(t, t_0, x_0) = 0$ para todo $t \geq t_0 + T^{x_0}$, para cualquier $t_0 \in \mathbb{R}$. La función $T_0(x_0) = \inf \{T^{x_0} \geq 0 : x(t, t_0, x_0) = 0, \forall t \geq t_0 + T^{x_0}\}$ se denomina tiempo de establecimiento del sistema (2).

Si $\Omega = \mathbb{R}^n$, entonces se dice que $x = 0$ es globalmente UE (GUE), UEE (GUEE), UETF (GUETF), respectivamente.

Sea $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i \ \psi_i \ \theta_i \ \phi_i]^T$, $i = 1, 2$ el vector de posición y orientación de cada *Quad-Rotor* en un espacio de tres dimensiones. A través de una gráfica de formación se puede modelar la forma de comunicación entre los *Quad-Rotors* y establecer el patrón geométrico deseado entre ellos.

Definición 2. [5]. Una gráfica de formación $G = \{N, E, C\}$ consiste de un conjunto de vértices $N = \{R_1, \dots, R_n\}$, el cual corresponde a cada *Quad-Rotor* del grupo; un conjunto de aristas $E = \{(R_j R_i) \in N \times N, i \neq j\}$ que denotan que el *Quad-Rotor* R_i recibe información del *Quad-Rotor* R_j y un conjunto $C = \{\mathbf{c}_{ji} \in \mathbb{R}^3 \mid (R_j R_i) \in N \times N, i \neq j\}$ que representa un vector de posición relativa deseada del *Quad-Rotor* R_i con respecto al *Quad-Rotor* R_j .

En este trabajo se considera la gráfica de formación directa de cadena abierta, también conocida como esquema líder-seguidor [2], [14], donde R_n es el líder y R_i con $i = \bar{1}, n - \bar{1}$ son los seguidores. Por simplicidad, en este trabajo sólo se considera la coordinación de dos *Quad-Rotors*. El vector de posición y orientación deseado para cada *Quad-Rotor* está dado por

$$\mathbf{r}_1^* = \begin{bmatrix} x_2 + c_{21_x} \\ y_2 + c_{21_y} \\ z_2 + c_{21_z} \\ \psi_2 \\ \theta_1^* \\ \phi_1^* \end{bmatrix}, \quad (3a)$$

$$\mathbf{r}_2^* = \mathbf{m}_d(t), \quad (3b)$$

donde $\mathbf{c}_{21} = [c_{21_x} \ c_{21_y} \ c_{21_z}]^T$ es un vector de formación invariante en el tiempo el cual especifica la posición relativa deseada entre el *Quad-Rotor* R_2 y el *Quad-Rotor* R_1 y $\mathbf{m}_d(t) = [x_d \ y_d \ z_d \ \psi_d \ \theta_d \ \phi_d]^T$ es la trayectoria deseada. En este caso se considera que x_d , y_d , z_d y ψ_d son referencias deseadas constantes. El error de formación está dado por $\mathbf{e}_i = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^*$, con $i = 1, 2$, donde $\mathbf{e}_i = [e_{x_i} \ e_{y_i} \ e_{z_i} \ e_{\psi_i} \ e_{\theta_i} \ e_{\phi_i}]^T$. Los vectores de error de posición y orientación para cada coordenada están dados por

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_x &= [e_{x_1} \ e_{x_2}]^T, & \mathbf{e}_y &= [e_{y_1} \ e_{y_2}]^T, \\ \mathbf{e}_z &= [e_{z_1} \ e_{z_2}]^T, & \mathbf{e}_\psi &= [e_{\psi_1} \ e_{\psi_2}]^T, \\ \mathbf{e}_\theta &= [e_{\theta_1} \ e_{\theta_2}]^T, & \mathbf{e}_\phi &= [e_{\phi_1} \ e_{\phi_2}]^T, \end{aligned}$$

y los vectores de error de velocidad para cada coordenada se definen como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_x &= [\varepsilon_{x_1} \ \varepsilon_{x_2}]^T, & \boldsymbol{\varepsilon}_y &= [\varepsilon_{y_1} \ \varepsilon_{y_2}]^T, \\ \boldsymbol{\varepsilon}_z &= [\varepsilon_{z_1} \ \varepsilon_{z_2}]^T, & \boldsymbol{\varepsilon}_\psi &= [\varepsilon_{\psi_1} \ \varepsilon_{\psi_2}]^T, \\ \boldsymbol{\varepsilon}_\theta &= [\varepsilon_{\theta_1} \ \varepsilon_{\theta_2}]^T, & \boldsymbol{\varepsilon}_\phi &= [\varepsilon_{\phi_1} \ \varepsilon_{\phi_2}]^T, \end{aligned}$$

donde $\varepsilon_{x_i} = \dot{x}_i - \dot{x}_i^*$, $\varepsilon_{y_i} = \dot{y}_i - \dot{y}_i^*$, $\varepsilon_{z_i} = \dot{z}_i - \dot{z}_i^*$, $\varepsilon_{\psi_i} = \dot{\psi}_i - \dot{\psi}_i^*$, $\varepsilon_{\theta_i} = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_i^*$, y $\varepsilon_{\phi_i} = \dot{\phi}_i - \dot{\phi}_i^*$ con $i = 1, 2$.

Por otra parte, para más detalles sobre la teoría de Modos Deslizantes, referirse a [24].

IV. ESTRATEGIA DE CONTROL

Los controladores en cascada propuestos para los *Quad-Rotors* se diseñan por medio de una estrategia jerárquica. Debido al desacoplamiento entre el control de posición y la dinámica de la orientación, el modelo puede representarse como una serie de subsistemas anidados. De esta manera, el ángulo de guiñada y la altura son los primeros subsistemas en ser regulados; posteriormente la posición longitudinal y lateral y los ángulos de cabeceo y alabeo, respectivamente. El control de posición en el plano horizontal se diseña como un controlador de alto nivel mientras que el control de orientación como un control de bajo nivel.

A continuación se propone el siguiente controlador en cascada para todo $i = 1, 2$,

$$u_2 = m \frac{(\bar{z}_2 - \bar{k}_{z_1} [\bar{\varphi}_{z_2}]^{\frac{1}{2}} + g)}{c\theta_2 c\phi_2}, \quad (4a)$$

$$u_1 = \frac{m(\bar{z}_1 - \bar{k}_{z_1} [\bar{\varphi}_{z_1}]^{\frac{1}{2}}) + u_2 c\theta_2 c\phi_2}{c\theta_1 c\phi_1}, \quad (4b)$$

$$\dot{z}_i = -\bar{k}_{z_3} [\bar{\varphi}_{z_i}]^0, \quad \bar{\varphi}_{z_i} = \varepsilon_{z_i} + \bar{k}_{z_2} [e_{z_i}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4c)$$

$$\tilde{\tau}_{\psi_2} = \bar{\psi}_2 - \bar{k}_{\psi_1} [\bar{\varphi}_{\psi_2}]^{\frac{1}{2}}, \quad (4d)$$

$$\tilde{\tau}_{\psi_1} = \bar{\psi}_1 - \bar{k}_{\psi_1} [\bar{\varphi}_{\psi_1}]^{\frac{1}{2}} + \tilde{\tau}_{\psi_2}, \quad (4e)$$

$$\dot{\psi}_i = -\bar{k}_{\psi_3} [\bar{\varphi}_{\psi_i}]^0, \quad \bar{\varphi}_{\psi_i} = \varepsilon_{\psi_i} + \bar{k}_{\psi_2} [e_{\psi_i}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4f)$$

$$\tilde{\tau}_{\theta_i} = \bar{\theta}_i - \bar{k}_{\theta_1} [\bar{\varphi}_{\theta_i}]^{\frac{1}{2}}, \quad (4g)$$

$$\dot{\theta}_i = -\bar{k}_{\theta_3} [\bar{\varphi}_{\theta_i}]^0, \quad \bar{\varphi}_{\theta_i} = \varepsilon_{\theta_i} + \bar{k}_{\theta_2} [e_{\theta_i}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4h)$$

$$\tilde{\tau}_{\phi_i} = \bar{\phi}_i - \bar{k}_{\phi_1} [\bar{\varphi}_{\phi_i}]^{\frac{1}{2}}, \quad (4i)$$

$$\dot{\phi}_i = -\bar{k}_{\phi_3} [\bar{\varphi}_{\phi_i}]^0, \quad \bar{\varphi}_{\phi_i} = \varepsilon_{\phi_i} + \bar{k}_{\phi_2} [e_{\phi_i}]^{\frac{2}{3}}, \quad (4j)$$

$$\boldsymbol{\Theta}_d = \frac{1}{g} (-\bar{\mathbf{K}}_{x_1} \mathbf{e}_x - \bar{\mathbf{K}}_{x_2} \boldsymbol{\varepsilon}_x), \quad (4k)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_d = \frac{1}{g} (\bar{\mathbf{K}}_{y_1} \mathbf{e}_y + \bar{\mathbf{K}}_{y_2} \boldsymbol{\varepsilon}_y), \quad (4l)$$

donde la función $[\cdot]^\gamma := |\cdot|^\gamma \text{sign}(\cdot)$, para cualquier valor de γ tal que $\gamma \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, $\boldsymbol{\Theta}_d = [\theta_1^* \ \theta_d]^T$, $\boldsymbol{\Phi}_d = [\phi_1^* \ \phi_d]^T$ son los vectores de orientación deseados, $\bar{\mathbf{K}}_{x_\ell} = \text{diag}\{\bar{k}_{x_{1\ell}}, \bar{k}_{x_{2\ell}}\}$, $\bar{\mathbf{K}}_{y_\ell} = \text{diag}\{\bar{k}_{y_{1\ell}}, \bar{k}_{y_{2\ell}}\}$, con $\ell = 1, 2$, son matrices diagonales de ganancias.

Teorema 1. Sea el controlador continuo en cascada (4) aplicado al sistema (1). Entonces, para ciertas constantes positivas $\bar{k}_{y_{1\ell}}, \bar{k}_{x_{1\ell}}$, $\ell = 1, 2$, $\bar{k}_{z_p}, \bar{k}_{\psi_p}, \bar{k}_{\theta_p}, \bar{k}_{\phi_p}$, $p = \bar{1}, \bar{3}$, los errores de formación e_{z_i} , e_{ψ_i} , e_{θ_i} y e_{ϕ_i} con $i = 1, 2$ serán UETF, mientras que los errores de formación e_{x_i} , e_{y_i} , con $i = 1, 2$ serán UEE.

Demostración. La demostración se hará de forma constructiva para cada uno de los sub-sistemas.

a) *Control de altura y de guiñada.* Sustituyendo el control (4a), (4b) y (4c) en (1c) y expresándolo en términos de las coordenadas del error, se obtiene el siguiente sistema en

forma vectorial

$$\dot{\mathbf{e}}_z = \boldsymbol{\varepsilon}_z, \quad (5a)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_z = \tilde{\mathbf{z}}_z - \bar{k}_{z_1} \boldsymbol{\Phi}_z^{\frac{1}{2}}, \quad (5b)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_z = -\bar{k}_{z_3} \boldsymbol{\Phi}_z^0 + C \dot{\mathbf{d}}_z, \quad (5c)$$

donde $C = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ y

$$\boldsymbol{\Phi}_z^{\frac{1}{2}} := \begin{bmatrix} [\bar{\varphi}_{z_1}]^{\frac{1}{2}} \\ [\bar{\varphi}_{z_2}]^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Phi}_z^0 := \begin{bmatrix} [\bar{\varphi}_{z_1}]^0 \\ [\bar{\varphi}_{z_2}]^0 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{d}}_z := \begin{bmatrix} \dot{d}_{z_1} \\ \dot{d}_{z_2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

con $\tilde{\mathbf{z}} = [\tilde{z}_1 \quad \tilde{z}_2]^T$ donde $\tilde{z}_1 = \bar{z}_1 + \bar{d}_{z_1} - \bar{d}_{z_2}$ y $\tilde{z}_2 = \bar{z}_2 + \bar{d}_{z_2}$. Tomando en cuenta que la dinámica (5) tiene la misma estructura al Algoritmo Continuo Singular Terminal de Modos Deslizantes [8], se puede concluir que si las perturbaciones d_{z_i} con $i = 1, 2$ están acotadas, i.e. $|\dot{d}_{z_i}(t)| \leq \bar{D}_{z_i}$, entonces, para algunos valores positivos de \bar{k}_{z_p} , con $p = \bar{1}, \bar{3}$, (5) es UETF y por lo tanto $z_2(t) = z_d$, mientras que $z_1(t) = z_1^*$, para todo $t \geq T_z$.

Posteriormente, considerando que el ángulo de guiñada deseado ψ_d es constante, se sustituye el control (4d), (4e), (4f) en (1d) obteniendo el siguiente sistema en términos de las coordenadas del error

$$\dot{\mathbf{e}}_\psi = \boldsymbol{\varepsilon}_\psi, \quad (7a)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\psi}}}_\psi = \tilde{\boldsymbol{\psi}}_\psi - \bar{k}_{\psi_1} \boldsymbol{\Phi}_\psi^{\frac{1}{2}}, \quad (7b)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\psi}}}_\psi = -\bar{k}_{\psi_3} \boldsymbol{\Phi}_\psi^0 + C \dot{\mathbf{d}}_\psi, \quad (7c)$$

donde $\tilde{\boldsymbol{\psi}} = [\tilde{\psi}_1 \quad \tilde{\psi}_2]^T$ con $\tilde{\psi}_1 = \bar{\psi}_1 + d_{\psi_1} - d_{\psi_2}$, $\tilde{\psi}_2 = \bar{\psi}_2 + d_{\psi_2}$, y los vectores $\boldsymbol{\Phi}_\psi^{\frac{1}{2}}$, $\boldsymbol{\Phi}_\psi^0$, $\dot{\mathbf{d}}_\psi$ se definen de manera similar a (6). De nueva cuenta, basados en [8], si $|\dot{d}_{\psi_i}(t)| \leq \bar{D}_{\psi_i}$, entonces (7) también es UETF para algunos valores positivos de \bar{k}_{ψ_p} , con $p = \bar{1}, \bar{3}$ y $\psi_i = \psi_i^*$, con $i = 1, 2$ para todo $t \geq T_\psi$.

b) *Control de posición longitudinal y cabeceo.* Resulta claro que para un tiempo $T = \max(T_z, T_\psi)$, $e_{z_i} = \bar{z}_i = \bar{\varphi}_{z_i} = e_{\psi_i} = 0$, con $i = 1, 2$. Suponga que $t\theta_i \approx \theta_i$ y recuerde que $\theta_i = e_{\theta_i} + \theta_i^*$, con $i = 1, 2$. Entonces, sustituyendo el control (4g), (4h), (4k) en (1a) y (1e), y representándolo en las coordenadas del error, se tiene

$$\dot{\mathbf{e}}_x = \boldsymbol{\varepsilon}_x, \quad (8a)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_x = gC\mathbf{e}_\theta - \bar{\mathbf{K}}_{x_1} C\mathbf{e}_x - \bar{\mathbf{K}}_{x_2} C\boldsymbol{\varepsilon}_x, \quad (8b)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_\theta = \boldsymbol{\varepsilon}_\theta, \quad (8c)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_\theta = \tilde{\boldsymbol{\theta}}_\theta - \bar{k}_{\theta_1} \boldsymbol{\Phi}_\theta^{\frac{1}{2}}, \quad (8d)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_\theta = -\bar{k}_{\theta_3} \boldsymbol{\Phi}_\theta^0 + \dot{\mathbf{d}}_\theta - \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d, \quad (8e)$$

donde $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = [\tilde{\theta}_1 \quad \tilde{\theta}_2]^T$, con $\tilde{\theta}_1 := \bar{\theta}_1 + d_{\theta_1}(t) - \bar{\theta}_1^*$, $\tilde{\theta}_2 := \bar{\theta}_2 + d_{\theta_2}(t) - \bar{\theta}_d$, $\ddot{\boldsymbol{\theta}} = [\ddot{\theta}_1^* \quad \ddot{\theta}_d]^T$, $\dot{\mathbf{d}}_\theta$, $\boldsymbol{\Phi}_\theta^{\frac{1}{2}}$ y $\boldsymbol{\Phi}_\theta^0$ se definen de manera similar como en el caso anterior. Nuevamente, basados en [8], si $|\dot{d}_{\theta_i}(t)| \leq \bar{D}_{\theta_i}$, entonces el subsistema (8c)-(8e) es UEFT para algunos valores positivos \bar{k}_{θ_p} , con $p = \bar{1}, \bar{3}$, y por lo tanto $e_{\theta_i} = 0$, $i = 1, 2$, para todo $t \geq T_\theta$.

Note que los términos $\ddot{\theta}_1^*$ y $\ddot{\theta}_d$ están acotados debido a la suavidad del término θ_i^* , con $i = 1, 2$.

En consecuencia, (8a)-(8b) se reduce a

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_x \\ \dot{\tilde{\mathbf{z}}}_z \end{bmatrix} = \bar{A} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_x \\ \boldsymbol{\varepsilon}_x \end{bmatrix},$$

con

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_2 & \mathbf{I}_2 \\ -\bar{\mathbf{K}}_{x_1} C & -\bar{\mathbf{K}}_{x_2} C \end{bmatrix},$$

donde $\mathbf{0}_2$ es una matriz de ceros de 2×2 e \mathbf{I}_2 es la matriz identidad de 2×2 . Realizando una adecuada permutación de la matriz \bar{A} de tal manera que se pueda expresar como una matriz diagonal superior a bloques, entonces, para cualquier valor positivo de los parámetros de la matriz $\bar{\mathbf{K}}_{x_\ell}$, con $\ell = 1, 2$, la matriz \bar{A} es Hurwitz y por lo tanto \mathbf{e}_x es UEE.

c) *Control de posición lateral y alabeo.* Recordando que para un tiempo $T = \max(T_z, T_\psi)$, $e_{z_i} = \bar{z}_i = \bar{\varphi}_{z_i} = e_{\psi_i} = 0$. Suponga que $t\phi_i \approx \phi_i$ y $\phi_i := e_{\phi_i} + \phi_i^*$, $i = 1, 2$. Tomando en consideración un procedimiento similar al caso previo, utilizando la estrategia de control (4i), (4j), (4l) en (1b) y (1f), con $\tilde{\boldsymbol{\phi}}_1 := \bar{\boldsymbol{\phi}}_1 + d_{\phi_1}(t) - \bar{\boldsymbol{\phi}}_1^*$, $\tilde{\boldsymbol{\phi}}_2 := \bar{\boldsymbol{\phi}}_2 + d_{\phi_2}(t) - \bar{\boldsymbol{\phi}}_d$, el sistema, en términos de las coordenadas del error, se reescribe de manera matricial como

$$\dot{\mathbf{e}}_y = \boldsymbol{\varepsilon}_y, \quad (9a)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_y = -gC\mathbf{e}_\phi - \bar{\mathbf{K}}_{y_1} C\mathbf{e}_y - \bar{\mathbf{K}}_{y_2} C\boldsymbol{\varepsilon}_y, \quad (9b)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_\phi = \boldsymbol{\varepsilon}_\phi, \quad (9c)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\phi}}}_\phi = \tilde{\boldsymbol{\phi}}_\phi - \bar{k}_{\phi_1} \boldsymbol{\Phi}_\phi^{\frac{1}{2}}, \quad (9d)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\phi}}}_\phi = -\bar{k}_{\phi_3} \boldsymbol{\Phi}_\phi^0 + \dot{\mathbf{d}}_\phi - \ddot{\boldsymbol{\phi}}, \quad (9e)$$

donde $\tilde{\boldsymbol{\phi}} = [\tilde{\phi}_1 \quad \tilde{\phi}_2]^T$, $\ddot{\boldsymbol{\phi}} = [\ddot{\phi}_1^* \quad \ddot{\phi}_d]^T$, $\dot{\mathbf{d}}_\phi$, $\boldsymbol{\Phi}_\phi^{\frac{1}{2}}$, $\boldsymbol{\Phi}_\phi^0$ se definen como en el caso anterior. Basados en [8], si $|\dot{d}_{\phi_i}(t)| \leq \bar{D}_{\phi_i}$, entonces el subsistema (9c)-(9e) también es UETF para algunos valores positivos \bar{k}_{ϕ_p} con $p = \bar{1}, \bar{3}$ y $e_{\phi_i} = 0$, con $i = 1, 2$ para todo $t \geq T_\phi$. Note que los términos $\ddot{\phi}_1^*$ y $\ddot{\phi}_d$ están acotados debido a la suavidad del término ϕ_i^* , con $i = 1, 2$.

Por lo tanto, (9a)-(9b) se reescribe como

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_y \\ \dot{\tilde{\boldsymbol{\phi}}}_\phi \end{bmatrix} = \tilde{A} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_y \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y \end{bmatrix},$$

con

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_2 & \mathbf{I}_2 \\ -\bar{\mathbf{K}}_{y_1} C & -\bar{\mathbf{K}}_{y_2} C \end{bmatrix}.$$

Realizando una adecuada permutación de la matriz \tilde{A} de tal manera que se pueda expresar como una matriz diagonal superior a bloques, entonces, para cualquier valor positivo de los parámetros de la matriz $\bar{\mathbf{K}}_{y_\ell}$, con $\ell = 1, 2$ la matriz \tilde{A} es Hurwitz y \mathbf{e}_y es UEE. De esta manera se concluye la prueba. \square

Observación 1. Las entradas de control u_i , $\tilde{\tau}_{\psi_i}$, $\tilde{\tau}_{\theta_i}$ y $\tilde{\tau}_{\phi_i}$, con $i = 1, 2$, son robustas ante cualquier perturbación acotada y Lipschitz continuas. Además, note que la robustez del controlador propuesto permite usar un modelo simplificado

Cuadro I
 CONDICIONES INICIALES

Parámetro	Seguidor	Líder
Posición (x_i y_i z_i)	(-2 0 0)	(0 0 0)
Orientación (ψ_i θ_i ϕ_i)	($\frac{\pi}{8}$ 0 0)	($\frac{\pi}{6}$ 0 0)

 Cuadro II
 PARÁMETROS DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL.

Parámetro	Valor
$\bar{k}_{z_1}, \bar{k}_{\psi_1}, \bar{k}_{\theta_1}, \bar{k}_{\phi_1}$	5
$\bar{k}_{z_2}, \bar{k}_{\psi_2}, \bar{k}_{\theta_2}, \bar{k}_{\phi_2}$	2
$\bar{k}_{z_3}, \bar{k}_{\psi_3}, \bar{k}_{\theta_3}, \bar{k}_{\phi_3}$	1

del Quad-Rotor, dejando la dinámica no modelada como parte de las perturbaciones.

V. SIMULACIONES NUMÉRICAS

Los parámetros del Quad-Rotor presentado en (1) son $m = 1[kg]$ y $g = 9.81[m/s^2]$. La simulación se implementó con el método de integración de Euler con un tiempo de muestreo de $0.001[s]$. Las perturbaciones tienen la siguiente estructura

$$\begin{aligned} d_{z_i}(t) &= \cos(t) + 0.2, & d_{\psi_i}(t) &= 0.3 \sin(0.6t) - 0.5, \\ d_{\theta_i}(t) &= 0.5 \cos(0.5t), & d_{\phi_i}(t) &= 0.7 \sin(t), \quad i = 1, 2. \end{aligned}$$

El Cuadro I presenta las condiciones iniciales para cada Quad-Rotor. La referencia deseada para el líder está dada por $\mathbf{m}_d(t) = [2 \ 4 \ 5 \ 0 \ \theta_d \ \phi_d]^T$ y los vectores de posición estático se definen de tal manera que los Quad-Rotors formen en una línea con una pendiente de 45° con respecto al plano horizontal, esto es, $\mathbf{c}_{21} = [-2 \ -2 \ -1]^T$. El Cuadro II muestra los valores de los parámetros para las estrategias de control (4).

La Fig. 2 describe la trayectoria que realiza cada Quad-Rotor para alcanzar la posición deseada, logrando formar el patrón geométrico deseado aún ante la presencia de perturbaciones.

Por otra parte, en la Fig. 3 se aprecia que los ángulos de orientación de cada Quad-Rotor convergen a cero.

Finalmente, la Fig. 4 ilustra las señales de control requeridas para que los Quad-Rotors se posicionen en la referencia deseada.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una estrategia de control robusta basada en la técnica de Modos Deslizantes continuos que

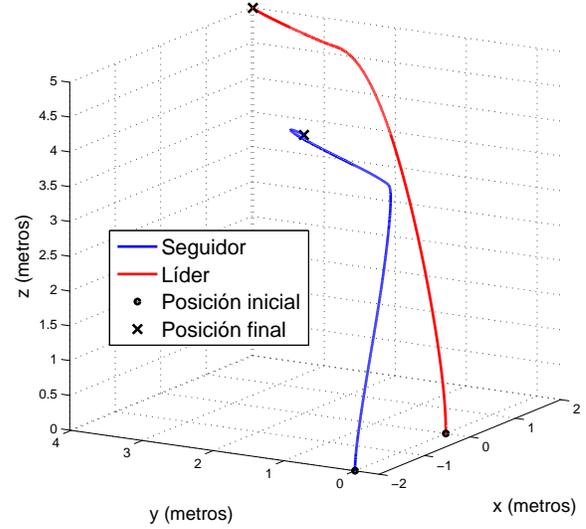


Figura 2. Trayectoria de los Quad-Rotors.

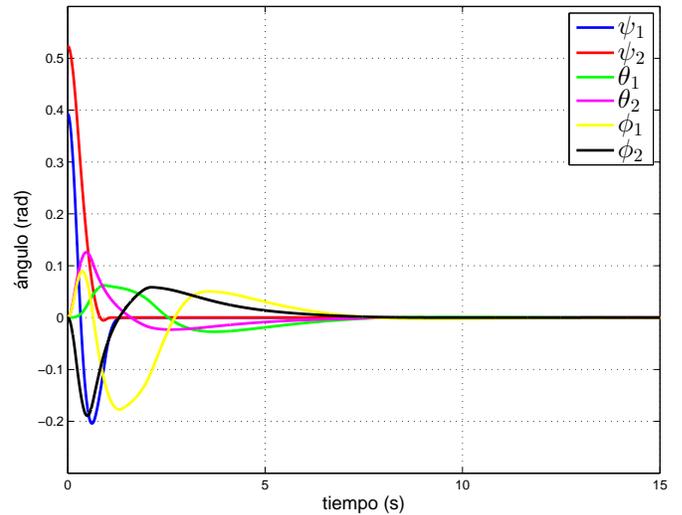


Figura 3. Ángulos de orientación de los Quad-Rotors.

proporcionan una regulación uniforme y en tiempo finito para lograr que un grupo de Quad-Rotors se formen en un patrón geométrico deseado utilizando el esquema líder-seguidor y que además están afectados por cierta clase de perturbaciones. Los resultados de simulación indican que, aún ante la presencia de perturbaciones, se logra la formación deseada.

Como trabajo futuro, se busca extender estos resultados a n número de Quad-Rotors, implementar observadores de estado para estimar algunos de los parámetros del modelo, evasión de colisiones y seguimiento de trayectoria.

AGRADECIMIENTOS

Jaime González-Sierra y Héctor Ríos agradecen el apoyo financiero por parte del CONACyT 266524 y 270504, respec-

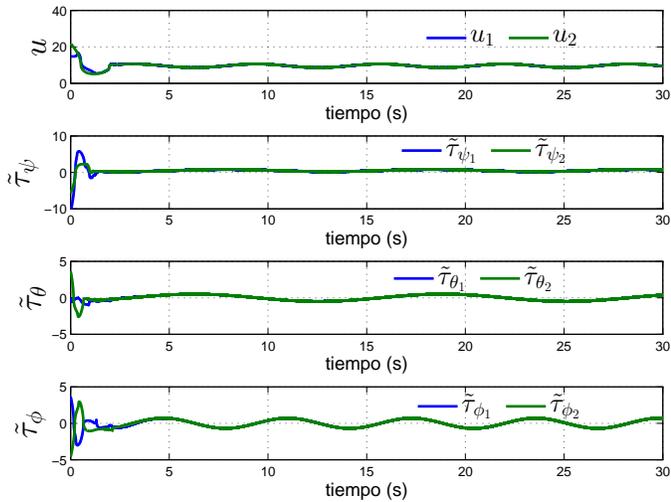


Figura 4. Señales de control.

tivamente. Todos los autores agradecen el apoyo financiero por parte de proyectos TecNM y CONACYT 134534.

REFERENCIAS

- [1] K. Alexis, G. Nikolakopoulos and A. Tzes. *Constrained optimal attitude control of a quadrotor helicopter subject to wind-gusts: Experimental studies*. American Control Conference, Baltimore, MD, USA, 4451-4455, 2010.
- [2] F. Belkhouche and B. Belkhouche. *Modelling and controlling a robotic convoy using guidance laws strategies*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 35(4):813-825, 2005.
- [3] Y.-B. Chen, G.-C. Luo, Y.-S. Mei, J.-Q. Yu and X.-L. Su. *Uav path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory*. International Journal of Systems Science, 47(6):1407-1420,2016.
- [4] P. Cruz and R. Fierro. *Towards optical wireless communications between micro unmanned aerial and ground systems*. In International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Denver, Colorado, USA, 2015.
- [5] J. Desai. *A Graph theoretic Approach for Modelling Mobile Robot Team Formations*, Journal of Robotic Systems, 19, 511-525, 2002.
- [6] G. Damien. *Unmanned aerial vehicle formation using sliding mode disturbance observers*, Aerial vehicles. INTECH, Chapter 11, 2009.
- [7] X. Dong, Y. Zhou, Z. Ren and Y. Zhong. *Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies*. Control Engineering Practice, 46:26-36.
- [8] L. Fridman, J. A. Moreno, B. Bandyopadhyay, S. Kamal and A. Chalanga. *Continuous Nested Algorithms: The Fifth Generation of Sliding Mode Controllers*, In X. Yu and M. Ö. Efe (eds.), Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics, chapter 2, 5-35. Springer International Publishing, 2016.
- [9] L. R. García-Carrillo, I. Fantoni, E. Rondon and A.E. Dzul-López. *Three-dimensional position and velocity regulation of a quadrotorcraft using optical flow*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 51(1):358-371, 2015.
- [10] A. Grancharova and E.I. Gröthli. *Uavs trajectory planning by distributed mpc under radio communication path loss constraints*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 79(1):115-134,2015.
- [11] J. González-Sierra, J. Santiaguillo-Salinas and E. Aranda-Bricaire. *Reciprocal collision avoidance for a group of second order agents*. In XVIII Congreso Mexicano de Robótica, Sinaloa, México, 2016.
- [12] K. Kang, J. V. R. Prasad and E. Johnson. *Active control of a uav helicopter with a slung load for precision airborne cargo delivery*. Unmanned Systems, 4(3):213-226.
- [13] H. Khalil. *Nonlinear Systems*, Nonlinear Systems, Prentice Hall, New Jersey, U.S.A., 2002.
- [14] K. Kyriakopoulos and D. Dimarogonas. *Formation control and collision avoidance for multiagent systems and a connection between formation infeasibility and flocking behavior*. In Conference on Decision and Control, pages 84-89, Sevilla, Spain, 2005.
- [15] M. Lindermuth, R. Murphy, E. Steimle, W. Armitage, K. Dreger, T. Elliot, M. Hall, D. Kalyadin, J. Kramer, M. Palankar, K. Pratt and C. Griffinn. *Sea robot-assisted inspection*. IEEE Robotics and Automation Magazine, 18(2):96-107.
- [16] Robert Mahony, Vijay Kumar and Peter Corke. *Multirotor Aerial Vehicles*. IEEE Robotics and Automation Magazine, 20-32, 2012.
- [17] V. Muralidharan, A.K. Ekbote and A.D. Mahindrakar. *Finite-time control of a quadrotor system*. Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, Kanpur, India, 643-647, 2015.
- [18] M. Méndez-Martínez, J. González-Sierra and E. Aranda-Bricaire. *Control de vuelo en configuración líder-seguidor para aeronaves tipo cuadri-rotor*. AMRob Journal, Robotics: Theory and Applications, 3(1):17-22, 2015.
- [19] L. Merino, F. Caballero, J. M. de Dios, I. Maza, A. Ollero. *An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement*. J. Intell. Robot. Syst., 65:533-548, 2011.
- [20] J. P. Ortiz, L. I. Minchala, M. J. Reinoso. *Nonlinear robust H_∞ pid controller for the multivariable system quadrotor*. IEEE Latin America Transactions, 14(3):1176-1183.
- [21] T. Özaslan, S. Shen, Y. Mulgaonkar, N. Michael and V. Kumar. *Inspection of penstocks and featureless tunnel-like environments using micro UAVs*. In Mejias, L., Corke, P., and Roberts, J., editors, Springer Tracts in Advanced Robotics, Field and Service Robotics, volume 105, pages 123-136. Springer International Publishing.
- [22] I. Palunko, P. Cruz and R. Fierro. *Agile load transportation*. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(3):69-79, 2012.
- [23] A. Polyakov. *Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, 57(8), 2106-2110, 2012
- [24] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman and A. Levant. *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhauser, New York, 2014.
- [25] S. Spedicato, G. Notarstefano, H. H. Bühlhoff and A. Franchi. *Aggressive maneuver regulation of a quadrotor uav*. In Inaba, M. and Corke, P., editors, Springer Tracts in Advanced Robotics: Robotics Research, volume 114, pages 95-112, 2016. Springer International Publishing.

Modelado cinemático y dinámico de un robot bípedo humanoide

Antonio Martínez Chavelas
División de Estudios de Posgrado e
Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, Baja California Sur.
clefftony@gmail.com

Carlos Guevara Guillén
División de Estudios de Posgrado e
Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, Baja California Sur.

Saul Martínez Díaz
División de Estudios de Posgrado e
Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, Baja California Sur.
saulmd@itlp.edu.mx

Abstract — El presente trabajo consiste en el modelado cinemático y dinámico de la mitad inferior de un robot bípedo humanoide de 12 grados de libertad. Los eslabones se proponen con dimensiones semejantes a las de un ser humano. La idea principal es contar con un modelo que sirva como base para desarrollar un prototipo de bajo costo para aplicaciones didácticas.

I. INTRODUCCIÓN

El campo de la robótica en los últimos años ha adquirido mucha importancia debido a la necesidad de la sociedad que demanda máquinas con capacidad de desarrollar tareas de manera autónoma y segura, además que sirvan para asistir a los seres humanos en diferentes ámbitos.

Un robot humanoide es un robot cuyo cuerpo tiene la forma de un ser humano, por esta razón posee las mismas limitaciones, tanto de movimientos como de acciones. La principal ventaja de estos robots es la capacidad de utilizar objetos diseñados para seres humanos, como escaleras, automóviles, puertas, entre otros. Los robots humanoides son muy utilizados para asistir a personas enfermas o de edad avanzada, así como para realizar tareas peligrosas.

Un ejemplo de lo anterior es el robot Atlas [1] desarrollado por Boston Dynamics. Dicho robot cuenta con 28 grados de libertad actuados de manera hidráulica. El robot tiene una altura de 187.96 cm y un peso de 149.68 kg. Un ejemplo de un robot humanoide diseñado para asistir personas es el robot WABIAN-2R [2], el cual tiene una altura de 1.48 m y un peso de 64 kg. Con la tecnología actual, se pueden diseñar piezas para robots e imprimirlas mediante impresoras 3D. Algunos ejemplos de esto son el robot humanoide DyRos [3], el cual cuenta con 12 grados de libertad y el robot humanoide Lola [4]. Estos sistemas robóticos son de costo monetario elevado, lo cual los hace inaccesibles para mucha gente.

En [5] se mencionan diferentes métodos para obtener el modelo dinámico de un sistema bípedo, del cual resulta de interés el método de Euler-Lagrange para sistemas bípedos con una fase de soporte simple. En [6] se obtiene el modelo cinemático y dinámico de un sistema bípedo de 5 grados de

libertad en cada pierna, y uno en la cadera, resultando en un sistema de 11 grados de libertad en total, lo cual restringe su movilidad.

En este trabajo se propone el modelo de la parte inferior de un robot humanoide con 12 grados de libertad. Los elementos de dicho sistema son geometrías simples, permitiendo que el modelo matemático sea sencillo, lo cual hace que su construcción sea fácil y de bajo costo.

II. DISEÑO DEL ROBOT BÍPEDO HUMANOIDE

Para este trabajo se diseñó un sistema bípedo humanoide basándose en los movimientos que un ser humano es capaz de realizar. Los grados de libertad indican la cantidad de movimientos que pueden realizar cada junta, así como los ejes en los que se podrá actuar dichas juntas. El ser humano puede realizar tres movimientos con la cadera, lo que significa que la cadera consta de tres grados de libertad. La rodilla solo puede realizar un movimiento, por lo cual tiene un solo grado de libertad. Al igual que la cadera, el tobillo consta de tres grados de libertad. Sin embargo, en el presente trabajo se utilizarán sólo dos grados de libertad, esto debido a que el tercer grado de libertad se puede omitir sin perjudicar la marcha humana. Puede concluirse que el sistema tendrá 6 grados de libertad en cada pierna, y cada pierna será independiente con respecto a la otra, lo cual resulta en un sistema de 12 grados de libertad.

El sistema cuenta con dimensiones semejantes a la de un ser humano. En [7], se muestra el promedio de las dimensiones físicas de diferentes seres humanos de diferentes edades, de las cuales las dimensiones relevantes se muestran en la Tabla 1.

Una vez que se definen los grados de libertad y las dimensiones requeridas, se procede a seleccionar y dimensionar las articulaciones y los eslabones. Como el presente trabajo se enfoca en el estudio del sistema y su locomoción, se simplificará el diseño mecánico. Para los eslabones y articulaciones se establecen las siguientes limitantes:

- Los eslabones son de geometrías sencillas y no presentan deformaciones.
- El material elegido para el sistema es hierro 0.6010

(EN-GJL-100) de la norma DIN, con una densidad de 7250 kg/m³.

- Los torques aplicados se desarrollan en las articulaciones de manera directa.
- La densidad de los eslabones es constante.

Dimensiones de miembro inferior de trabajadores industriales, 18 a 65 años, sexo masculino	
Dimensión	Promedio [cm]
Altura trocánter mayor	87.3
Altura rodilla	47.8
Diámetro bitrocantéreo	34.2
Longitud de pie	23.2
Anchura de pie	9

Tabla 1: Dimensiones de miembros inferiores de un mexicano promedio.

El sistema diseñado se muestra en la figura 1:

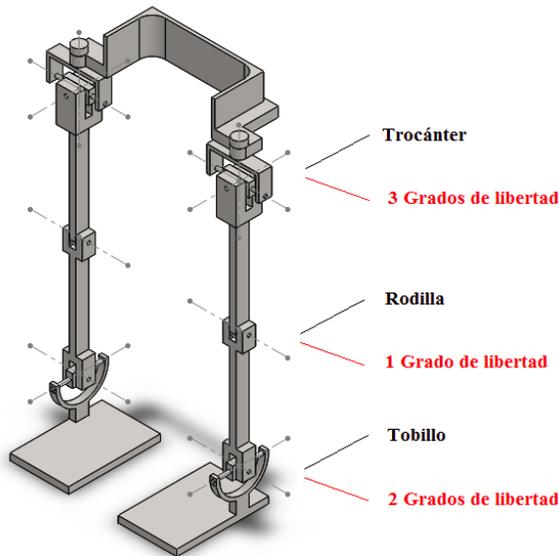


Fig. 1. Propuesta de robot bípedo.

El sistema bípedo cuenta con puntos de interés relevantes durante el desarrollo de la cinemática, dichos puntos se muestran en la figura 2. La pierna derecha se nombrará como pierna *A*, mientras que la pierna izquierda es la pierna *B*. Así mismo, en el centro de la cadera se define un punto *C*, el cual divide la cadera en partes iguales. Cada articulación es un punto de interés, esto quiere decir que el tobillo tiene dos puntos de interés ubicados en el mismo lugar, pero realizando diferente rotación. Lo anterior se cumple de igual forma con la cadera.

pero con tres puntos de interés.

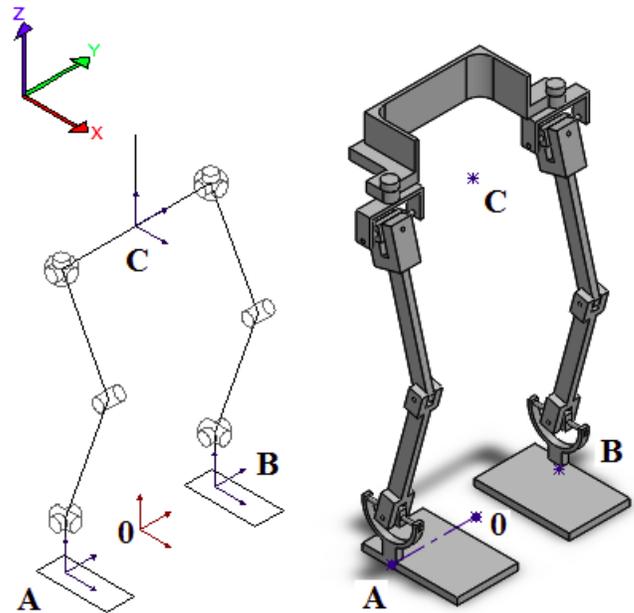


Fig. 2. Puntos de interés.

III. MODELADO CINEMÁTICO Y TRAYECTORIA

Un modelo cinemático es el conjunto de ecuaciones que describen los movimientos de los eslabones de un sistema con respecto a un sistema de referencia. Esto significa que el modelo cinemático permite conocer las velocidades, aceleraciones, y posiciones que adoptan cada uno de los elementos de un sistema durante la realización de una actividad.

Sin embargo, el modelo cinemático no considera las fuerzas que causan dicho movimiento. El estudio que relaciona el movimiento con las fuerzas asociadas se denomina modelo dinámico.

Para desarrollar el modelo cinemático y dinámico, es necesario realizar un diagrama esquemático del robot, en el cual se etiqueten sus dimensiones, ángulos y planos de referencia. Este diagrama nos sirve para visualizar el sistema de una forma simplificada, así como para reconocer los puntos de interés de nuestro sistema. Lo anterior se muestra en la Figura 3.

A. Cinemática directa

La cinemática directa proporciona una ecuación que relaciona las configuraciones de todos los eslabones que se encuentren en la cadena cinemática, con el fin de determinar las coordenadas y orientación en las que se encuentra el eslabón final con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo.

El método utilizado para resolver la cinemática directa es el método de las matrices de transformación homogéneas, la cual consiste en una matriz de 4x4 que está compuesta por cuatro submatrices [8].

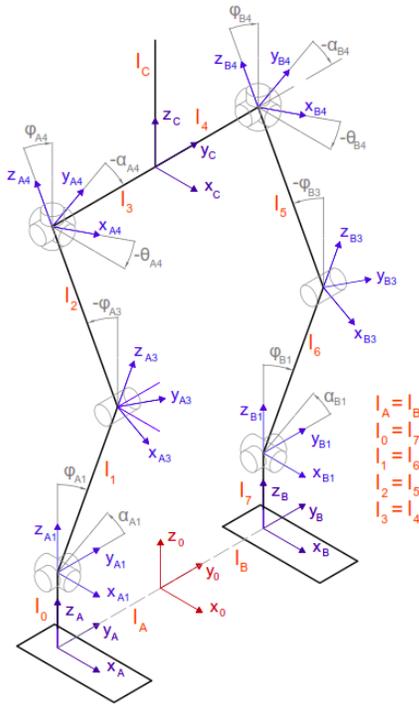


Fig. 3. Diagrama esquemático.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{1 \times 3} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

En donde:

- $R_{3 \times 3}$ es una matriz de 3×3 que representa la rotación de un plano coordenado con respecto a un plano de referencia.
- $\mathbf{p}_{1 \times 3}$ se conoce como vector de posición, el cual se compone de la distancia que existe desde el punto de origen hasta la ubicación de nuestra matriz de transformación homogénea. Los elementos de este vector son la distancia en el eje x , eje y y eje z .
- $f_{1 \times 3}$ es la transformación de perspectiva, la cual nos indica cómo varía la distancia del sistema con respecto a un espectador. Para este caso de estudio se mantendrán sus valores en cero.
- 1 es el factor de escala global.

Con el fin de identificar de forma sencilla el eje en el cual se realiza el giro, se proponen los siguientes nombres para los giros:

- Si gira con el eje x como pivote: alfa (α), siendo positivo en sentido de las manecillas del reloj.
- Si gira con el eje y como pivote: phi (ϕ) siendo positivo en sentido de las manecillas del reloj.
- Si gira con el eje z como pivote: theta (θ) siendo

positivo en sentido de las manecillas del reloj.

El sistema se divide en dos cadenas cinemáticas, una de ellas es la pierna derecha (pierna A) hasta el punto medio de la cadera (punto C), la segunda cadena cinemática es la pierna izquierda (pierna B) hasta el punto medio de la cadera (punto C). Así mismo, el modelo cinemático se divide en dos fases: Fase de soporte derecho, la cual consiste en utilizar la pierna derecha como soporte del sistema, siendo la pierna izquierda la pierna de balanceo; Fase de soporte izquierdo, en la cual la pierna izquierda es la pierna de soporte, por lo que la pierna derecha es la pierna de balanceo.

La cinemática directa que se desea modelar consiste en encontrar la posición y orientación de los efectores finales de ambas cadenas cinemáticas durante las dos fases en la que se dividió la marcha. Esto quiere decir, que en la fase de soporte derecho uno de los efectores finales es el punto medio de la cadera (punto C), mientras que el otro efector final de la segunda cadena cinemática es el pie izquierdo (punto B). Así mismo, en la fase de soporte izquierdo el primer efector final es el punto medio de la cadera (punto C) y el segundo efector final es el pie de la pierna de balanceo (punto A , ya que la pierna de balanceo es la derecha). Es importante recordar que en ambas fases se toma como punto de partida el punto θ .

La matriz de transformación homogénea de cada efector final se obtiene al multiplicar cada una de las matrices de transformación homogéneas de los puntos de interés de dicha cadena cinemática. Al ser una multiplicación de matrices, es importante respetar el orden en el que se realizan dichas multiplicaciones. Lo anterior genera una matriz de la forma :

$${}^0T_n = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_{ij} = r_{ij}(q_k) \quad k = 1, 2 \dots n$$

En donde el superíndice izquierdo es el sistema de referencia base y el subíndice derecho el sistema de referencia móvil del eslabón final de la cadena cinemática. Cada elemento de la matriz de transformación homogénea 0T_n es una ecuación no lineal compuesta de los ángulos q_k que se encuentran en la cadena cinemática.

1. Fase de soporte derecho.

La cinemática directa del efector final de la primera cadena cinemática (punto C) se obtiene al resolver:

$${}^0T_C = {}^0T_A {}^AT_{A1} {}^{A1}T_{A2} {}^{A2}T_{A3} {}^{A3}T_{A4} {}^{A4}T_{A5} {}^{A5}T_{A6} {}^{A6}T_C \quad (1)$$

El segundo efector final (punto B) se obtiene resolviendo:

$${}^CT_B = {}^CT_{B6} {}^{B6}T_{B5} {}^{B5}T_{B4} {}^{B4}T_{B3} {}^{B3}T_{B2} {}^{B2}T_{B1} {}^{B1}T_B \quad (2)$$

2. Fase de soporte izquierdo.

La cinemática directa del efector final de la primera cadena cinemática (punto C) se obtiene al resolver:

$${}^0T_C = {}^0T_B {}^BT_{B1} {}^{B1}T_{B2} {}^{B2}T_{B3} {}^{B3}T_{B4} {}^{B4}T_{B5} {}^{B5}T_{B6} {}^{B6}T_C \quad (3)$$

El segundo efector final (punto A) se obtiene resolviendo:

$${}^CT_A = {}^CT_{A6} {}^{A6}T_{A5} {}^{A5}T_{A4} {}^{A4}T_{A3} {}^{A3}T_{A2} {}^{A2}T_{A1} {}^{A1}T_A \quad (4)$$

B. Cinemática inversa

La cinemática directa permite determinar una matriz que contiene el conjunto de ecuaciones que relacionan la posición y orientación del marco de referencia móvil del último eslabón. Por otro lado, la solución de la cinemática inversa del sistema permite encontrar los ángulos q_k del conjunto de las ecuaciones de la matriz de transformación homogénea. El sistema se divide en dos fases y en dos cadenas cinemáticas, ambas siendo las mismas utilizadas en la cinemática directa.

De los métodos para resolver la cinemática inversa, los métodos numéricos resultan sencillos de utilizar debido a que no son dependientes específicamente de un robot, sino que se pueden aplicar a cualquier sistema cinemático. La principal desventaja de estos métodos es que resultan lentos para converger a una solución, por lo que normalmente los cálculos no se realizan en tiempo real. Dentro de los métodos numéricos se encuentra la rama de los métodos iterativos, la cual cuenta con una amplia variedad de técnicas, varias de ellas basadas en el método de Newton.

Se utiliza el método iterativo de Newton-Raphson para resolver la cinemática inversa, el cual consiste en resolver la siguiente ecuación [9]:

$$\mathbf{q}^{(i+1)} = \mathbf{q}^{(i)} + J(\mathbf{q}^{(i)})^{-1} \cdot [\mathbf{T} - \mathbf{T}(\mathbf{q}^{(i)})] \quad (5)$$

Donde i es el número de iteración a resolver, n es el número de iteraciones; $\mathbf{q}^{(i+1)}$ es el vector resultante de la iteración actual, el cual que contiene los ángulos calculados. Este vector se convierte en el vector de entrada en la siguiente iteración; $\mathbf{q}^{(i)}$ es el vector de entrada con el que se trabaja durante la iteración; $J(\mathbf{q}^{(i)})^{-1}$ es la inversa de la matriz jacobiana, evaluada con los ángulos del vector de entrada; \mathbf{T} es la matriz de transformación homogénea del efector final expresada en forma vectorial, con la posición y orientación que se desea alcanzar; y $\mathbf{T}(\mathbf{q}^{(i)})$ es la matriz de transformación homogénea del efector final obtenida mediante la cinemática directa, evaluada con los valores de entrada de $\mathbf{q}^{(i)}$ y expresada en forma vectorial.

El proceso para resolver la cinemática es el siguiente:

1. Se define un número de n iteraciones, se asigna el valor de $i = 0$.
2. Se proponen valores de posición y orientación deseados para la matriz de transformación homogénea del efector final, y se acomodan en forma de vector (\mathbf{T}).
3. Se proponen valores iniciales de $\mathbf{q}^{(i)}$ cuando $i = 0$.
4. Se evalúa la matriz jacobiana inversa ($J(\mathbf{q}^{(i)})^{-1}$) con los

valores de $\mathbf{q}^{(i)}$.

5. Se evalúa la matriz de transformación homogénea del efector final con los valores propuestos en $\mathbf{q}^{(i)}$ y se expresa en forma de vector ($\mathbf{T}(\mathbf{q}^{(i)})$).
6. Con los valores calculados se opera la ecuación (5).
7. El vector resultante se asigna a $\mathbf{q}^{(i+1)}$.
8. Se incrementa el valor de i en 1.
9. Se repiten los pasos 4, 5, 6, 7 y 8 hasta que $i = n$.
10. El vector $\mathbf{q}^{(n)}$ contiene el resultado final.

C. Caminata en plano sagital

Se propone un conjunto de trayectorias para cada uno de los efectores finales (cadera y pie flotante) que en conjunto coordinen el desplazamiento del bípedo en el espacio. Debido a que conocemos en qué posición y orientación se deben encontrar la cadera y el pie flotante, el problema consiste en encontrar la configuración de las demás articulaciones, por lo cual se usa la cinemática inversa.

Algunas consideraciones dentro de las trayectorias para la marcha propuesta son las siguientes:

- El pie de soporte se mantiene siempre paralelo al suelo y no se mueve hasta que cambie a pie flotante.
- El planteamiento de la trayectoria es puramente cinemático, no se estudia la estabilidad del sistema debido a la presencia de fuerzas externas.
- La marcha se realiza con desplazamiento en el plano sagital. Los únicos ángulos que cambian durante la marcha son:

$$\mathbf{q}_A = \begin{bmatrix} \phi_{A1} \\ \phi_{A3} \\ \phi_{A4} \end{bmatrix} \quad \mathbf{q}_B = \begin{bmatrix} \phi_{B1} \\ \phi_{B3} \\ \phi_{B4} \end{bmatrix}$$

- La trayectoria para la cadera consiste en un desplazamiento en el eje x de 8 cm. Este movimiento se sincroniza con el desplazamiento del pie flotante.
- La cadera durante la trayectoria no presenta desplazamiento en el eje y ni z .
- El pie flotante sigue 3 trayectorias diferentes de manera secuenciada:
 - La primera consiste en un levantamiento del talón mientras la punta del pie se mantiene en el mismo punto hasta que el pie forma un ángulo con respecto al suelo de 40° , lo cual significa un giro en el pie con la punta como su pivote.
 - Posteriormente, el pie sigue una trayectoria circular, subiendo unos pocos centímetros para luego descender. Mientras el pie descende, este mismo se encuentra girando hasta que el talón forma un ángulo de 2° con

respecto al suelo.

- Una vez alcanzado este ángulo, el pie toca el suelo y el talón funciona como pivote de giro hasta que toda la planta del pie entra en contacto con el suelo.
- Durante la marcha, la pierna de balanceo se alterna entre la izquierda y derecha, haciendo posible dicha marcha.
- En el primer paso el pie izquierdo se desplaza 34.2 cm y la cadera 8 cm, mientras que los pasos siguientes tienen un desplazamiento de 68.4 cm para la pierna flotante y 34.2 cm para la cadera.

IV. MODELADO DINÁMICO

El modelo dinámico consiste en una ecuación que relaciona las fuerzas que se ejercen en el sistema con los efectos causados por la posición, velocidad y aceleración del sistema [10].

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \quad (6)$$

El modelo dinámico nos permite conocer los torques que se necesitan aplicar en las articulaciones para que los eslabones del bípido desarrollen una posición, velocidad y aceleración deseada. El método a utilizar para desarrollar el modelo dinámico es el método de Euler-LaGrange, el cual se basan en el concepto de las energías. La energía puede definirse como la capacidad que tiene un robot de realizar un trabajo.

A partir de las energías del robot se construye el lagrangiano $L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, el cual se representa mediante la diferencia entre su energía cinética K y su energía potencial P :

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - P(\mathbf{q}) \quad (7)$$

De esta ecuación de Lagrange, se puede llegar a una forma compacta del modelo dinámico del bípido de n grados de libertad.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

En donde:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \frac{\partial K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left[\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] \quad (10)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (11)$$

La ecuación (8) es el modelo dinámico compacto, la ecuación (9) es la matriz de inercia, (10) es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis, la ecuación (11) es el vector de gravedad y $\boldsymbol{\tau}$ es el vector de fuerzas externas.

Se toman las siguientes consideraciones al realizar el modelado dinámico:

- Se omite las pérdidas de energía por fricción interna

del sistema.

- El pie de soporte del sistema no se puede mover mientras hace función de soporte.
- El impacto de la pierna de balanceo con el piso se despreja.
- El robot humanoide se desplaza por una superficie plana sin inclinación o deformaciones.

Obtener la energía potencial consiste en sustituir los valores de masa de todos los eslabones, el vector de gravedad y los vectores del centro de masa (estos vectores nos indican donde se encuentran los centros de masa con respecto al origen) en la siguiente ecuación:

$$P(\mathbf{q}) = m_c \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_c + m_{b1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_{b1} + \sum_{i=2}^6 m_{ai} \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_{ai} + m_{bi} \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_{bi}$$

Para obtener la energía cinética del sistema es necesario sumar la energía cinética lineal K_l y rotacional K_r del sistema.

$$K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K_l + K_r \quad (12)$$

En donde:

$$K_l = \frac{1}{2} \mathbf{v}_c^T m_c \mathbf{v}_c + \frac{1}{2} \mathbf{v}_{b1}^T m_{b1} \mathbf{v}_{b1} +$$

$$\sum_{i=2}^6 \frac{1}{2} \mathbf{v}_{ai}^T m_{ai} \mathbf{v}_{ai} + \frac{1}{2} \mathbf{v}_{bi}^T m_{bi} \mathbf{v}_{bi}$$

$$K_r = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_C^T I_c \boldsymbol{\omega}_C + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_B^T I_{b1} \boldsymbol{\omega}_B +$$

$$\sum_{i=2}^6 \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{Ai}^T I_{Ai} \boldsymbol{\omega}_{Ai} + \sum_{i=1}^5 \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{Bi}^T I_{b(i+1)} \boldsymbol{\omega}_{Bi}$$

En donde m representa la masa de los eslabones, los vectores de velocidad lineal con respecto al origen se obtienen al derivar los vectores de posición del centro de masa con respecto al origen, $\boldsymbol{\omega}$ representan a los vectores asociados a las matrices antisimétricas de velocidad angular, I representan a las matrices de momentos de inercia de las masas de los eslabones.

V. RESULTADOS

Con base en las consideraciones propuestas para la trayectoria se desarrolló la marcha bípida. En las figuras 4, 5 y 6 se muestra la simulación de la marcha, en donde la pierna izquierda se muestra de color rojo, mientras que la derecha se muestra en color azul.

con los que presentan las piernas humanas en una caminata [11].

Lo anterior con el fin de observar las diferencias de la caminata propuesta con respecto a la humana, así como comprobar que el sistema de locomoción propuesto es capaz de desarrollar la caminata con ángulos de movilidad dentro del rango de movimiento de un ser humano.

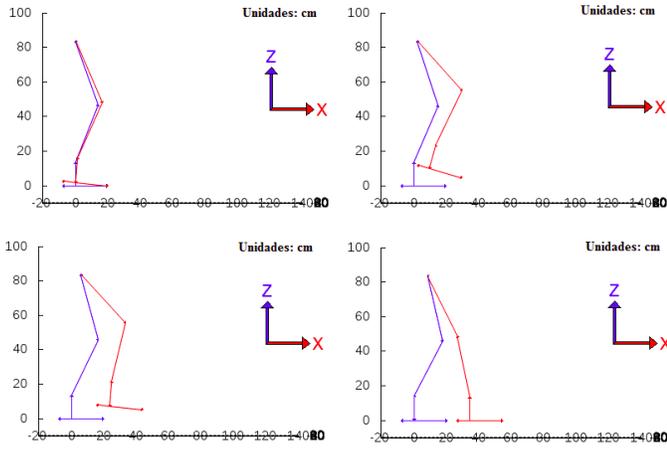


Fig. 4. Primer paso.

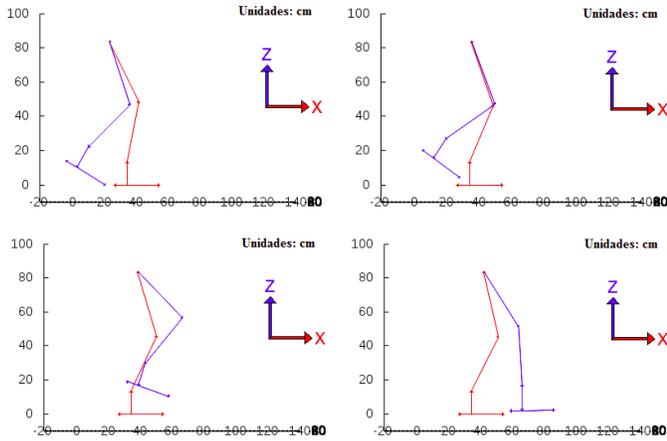


Fig. 5. Segundo paso.

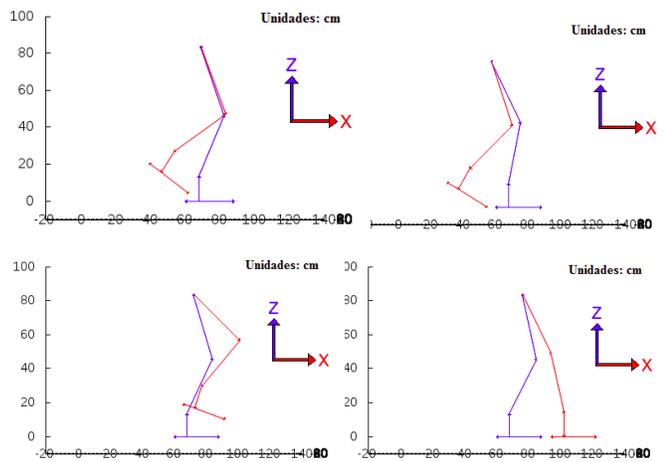


Fig. 6. Tercer paso.

Parte importante del desarrollo de la trayectoria es el análisis de los ángulos resultantes para el sistema bípedo a lo largo de la misma. Particularmente, es interesante comparar estos ángulos

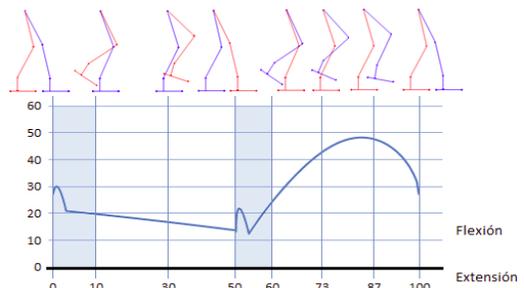
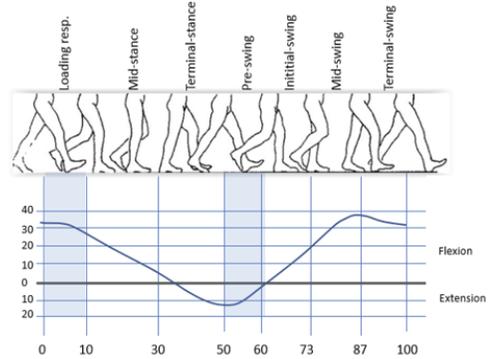


Fig. 7. Comparación de ángulos de la cadera.

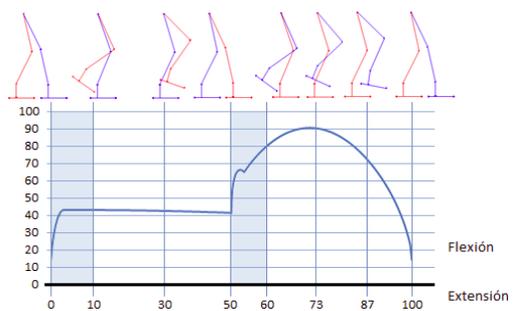
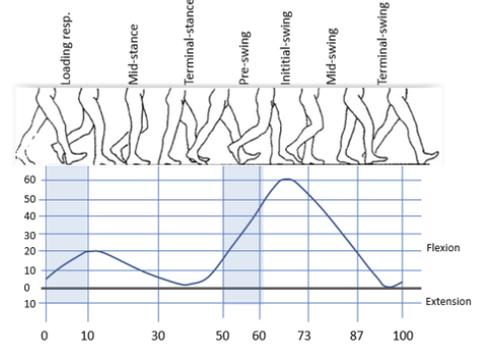


Fig. 8. Comparación de ángulos de la rodilla

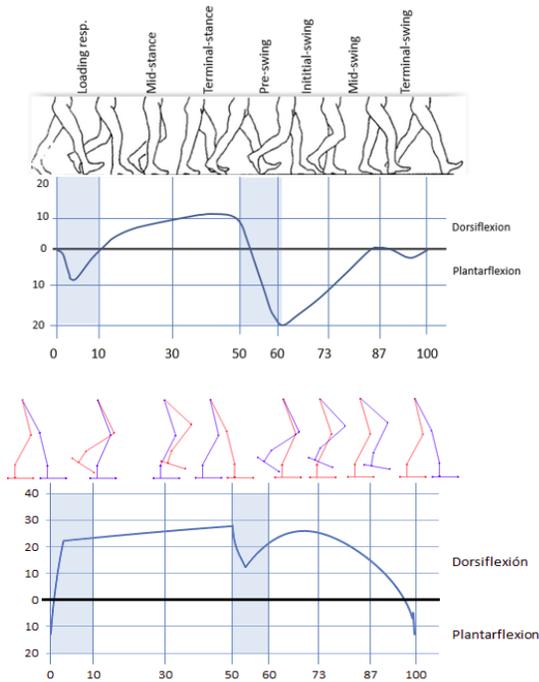


Fig. 9. Comparación de ángulos del tobillo.

Para obtener los torques del bípido para un instante de tiempo determinado, es preciso sustituir todos los valores de los vectores de estado en el modelo compacto, es decir las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares.

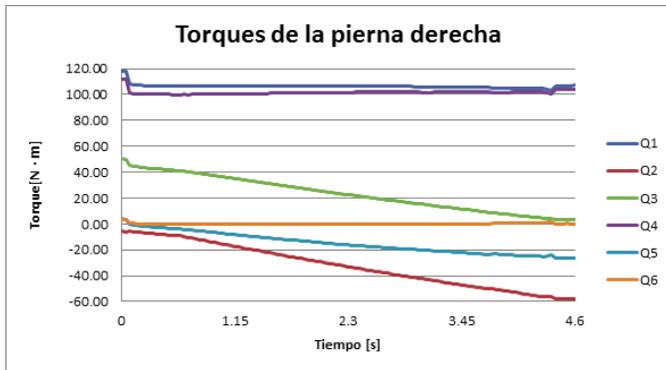


Fig. 10. Torques desarrollados por la pierna derecha.

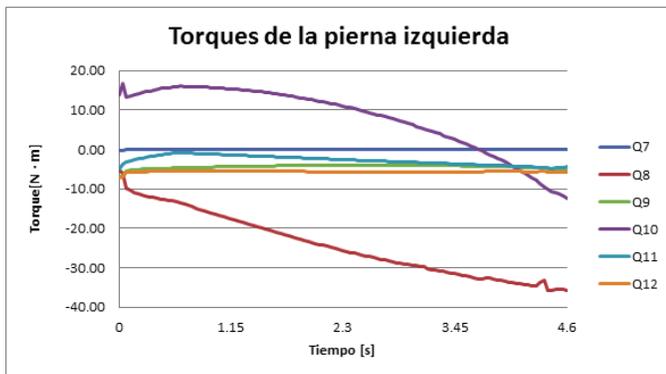


Fig. 11. Torques desarrollados por la pierna izquierda.

La trayectoria a seguir es la de el primer paso de la trayectoria planteada anteriormente, las velocidades y aceleraciones se obtienen en base a dicha trayectoria. Los torques obtenidos mediante el modelo dinámico para dar un paso son los siguientes

VI. CONCLUSIONES

De los torques obtenidos se pueden identificar diferentes aspectos de la dinámica del modelo.

- La pierna con mayores torques desarrollados es la de soporte. Esto es debido a que la pierna de soporte recibe las reacciones de las fuerzas aplicadas a la pierna flotante.
- Los torques de mayor magnitud son aquellos que se aplican en el eje x en la pierna de soporte. Esto es debido a que en el eje y se presentan las mayores distancias de los centros de masa de la cadera y la pierna flotante con respecto a las articulaciones de la pierna de soporte.
- El torque de mayor magnitud en la trayectoria se desarrolla en la articulación con giro α_{A1} y los torques de menor magnitud se desarrollan en las articulaciones con giros θ_{A4} y θ_{B4} . El torque de mayor magnitud se debe a que es el giro del tobillo en el eje x , que como ya se mencionó, tiene que cargar con todo el resto del bípido.
- Suponiendo que el pie flotante pueda estar posicionado coincidente con el suelo, el modelo resolverá la dinámica como si este pie siguiera siendo cargado por la pierna de soporte. El modelo dinámico para fase de soporte simple no modela cuando el pie flotante impacta con el suelo, para ello se necesita desarrollar otro modelo que aproxime a este fenómeno.

REFERENCES

- [1] Boston Dynamics. Atlas - The Agile Anthropomorphic Robot. url: <http://www.bostondynamics.com/robot-Atlas.html>.
- [2] N. Owano. WABIAN robot from Japan steps closer to human walk. 2013. url: <http://phys.org/news/2013-06-wabian-robot-japan-closer-human.html>.
- [3] B. Butler Millsaps. DyRoS, the 3D Printed Humanoid Robot, Presented at 'Humanoids 2014'. 2014. url: <http://3dprint.com/26939/dyros-3d-printed-robot/>.
- [4] Thomas Buschmann, Sebastian Lohmeier, Heinz Ulbrich. "Humanoid robot Lola: Design and walking control", Journal of Physiology - Paris 103 (2009) 141–148.
- [5] F. N. Hayder, J. Burkhard, Wen-Hong. "Dynamic Modeling of Biped Robot using Lagrangian and Recursive Newton-Euler Formulations", International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 101– No.3, September 2014.
- [6] Rahul R. Thavai, Shishirkumar N. Kadam. "Kinematic, Dynamic Modeling and Simulation of Biped Robot", International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Volume 4, Issue 4, April 2015.

- [7] R.Á. Chaurand y col. *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile*. Colección Modulo. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, División de Tecnología y Procesos, Departamento de Producción y Desarrollo, Centro de Investigaciones en Ergonomía, 2007. isbn: 978-970-27-1 193-3.
- [8] Fu, K. S., R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee. *Robotics: Control, Sensing, Vision, And Intelligence*. 1st ed. McGraw-Hill, 1987. Print.
- [9] Reza N Jazar. *Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control*. Segunda edicion. Springer Science & Business Media, 2010. isbn: 978-1-4419-1749-2.
- [10] R. Kelly y V. Santibáñez. *Control de movimiento de robots manipuladores. Automática y Robótica*. Pearson Educación, 2003. isbn: 9788420538310.
- [11] Human gait cycle: some graphs. Sep. de 2014. url: <http://sme-chinoises-euronext.typepad . fr / artbot / 2014 / 09 / human - gait - cycle - some - graphs . html> (visitado 24-05-2016).

Modelado y Simulación de un Exoesqueleto con fines de rehabilitación en extremidades inferiores

Marizcal Castro, Antonio de Jesús

División de Estudios de Posgrados e Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, B.C.S., México
amarizcal_castro@hotmail.com

Santillán Mendez, Israel Marcos

División de Estudios de Posgrados e Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, B.C.S., México
israel.santillan@itlp.edu.mx

Sandoval Galarza, Jesús Alberto

División de Estudios de Posgrados e Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, B.C.S., México
jsandoval@itlp.edu.mx

Gómez Torres, José Luis

División de Estudios de Posgrados e Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, B.C.S., México
joseluismx33@gmail.com

Resumen—El siguiente trabajo presenta el modelado, simulación y resultados obtenidos en el diseño y análisis de un Exoesqueleto para terapias de rehabilitación. Se calculó el torque para cada articulación dado las posiciones conocidas. Se utilizaron las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange para encontrar dichos torques en base a la ecuación dinámica que se obtuvo del sistema. Para el propósito de la simulación se utilizó un esquema de control conocido como Par-Calculado. Por último, se compararon las respuestas de un modelo sin perturbaciones contra un modelo con que incluyó errores en sensores de posición y velocidad equivalente al 1% del valor leído. Las aceleraciones, velocidades y posiciones se introdujeron a SimMechanics para obtener una animación del Exoesqueleto.

Palabras clave—Exoesqueleto, Órtesis Robótica, Control Par-Calculado.

I. INTRODUCCIÓN

Tal como se describe en [1] y [2], un *Exoesqueleto* es un dispositivo mecánico activo esencialmente antropomórfico que por su naturaleza se coloca ajustado al cuerpo del usuario. Puede ser visto como una tecnología que extiende, complementa o mejora la función y la capacidad humana en la extremidad donde se utiliza; en este caso es llamado *Órtesis Robótica*. Para el caso cuando sustituye la pérdida de la extremidad, por ejemplo, después de una amputación, se le llama *Prótesis Robótica*.

El Exoesqueleto se diseñó para ser utilizado en terapias de rehabilitación de extremidades inferiores de niños en un rango de edad de 10 a 14 años. Dicho equipo podrá adaptarse a la morfología de las extremidades inferiores de los pacientes. Un ejemplo de los pacientes que podrán utilizar este Exoesqueleto son aquellos que hayan sufrido problemas debido a algún accidente, problema medular, esquelético-muscular o alguna otra condición médica que imposibilite el correcto movimiento de marcha. En el diseño se tomó en cuenta disponer de 3 grados de libertad (gdl) para cada pierna.

En México existen 2,162,018 personas con alguna limitación para caminar o mover según se corrobora en [3]. La población de interés del presente trabajo (niños de 10-14 años) implica a 44,719 personas con este tipo de discapacidad.

Las medidas antropomórficas referentes a la población de interés se tomaron de [4], para el propósito del presente trabajo se tomó la media de la mediana de las medidas. Esto es, la mediana del rango de edad de la población a la que se dirige, que es 12 años y la media que existen entre los niños y niñas de dicha edad. Aunque dichas medidas se tomaron en cuenta para el presente trabajo, el diseño

considera los posibles ajustes a realizar para la longitud y volumen en las piernas y muslos.

En el diseño de las partes del Exoesqueleto se usó un software CAD, considerando emplear Aluminio EN-AW 5052 que tiene una densidad de $2,860 \frac{kg}{m^3}$. Este dato es esencial para determinar los valores de los parámetros utilizados en las ecuaciones dinámicas, tales como: masa, centro de masa y momentos de inercia. Estos parámetros los proporciona el mismo software CAD y son referentes al Exoesqueleto. Para los parámetros que aporta el usuario a la dinámica del sistema, se utilizaron lo que proporciona Vaughan, et al. [5]. En [5] la manera de representar las distintas partes del cuerpo humano es mediante la representación de cuerpos geométricos, cuya densidad promedio, considerando la media de la mediana en el rango de población de estudio, es de $1,193.47 \frac{kg}{m^3}$.

En el diseño propuesto, se incluyen los parámetros que el paciente le añade al sistema. Se considera que el paciente se encuentra en un ambiente controlado, es decir, cuenta con un arnés de seguridad que sujeta el peso del paciente y se encuentra en un lugar fijo sobre una banda o caminadora eléctrica. Los actuadores ejercen torque únicamente para el movimiento de las piernas. Las características de los motores y reducciones son las siguientes:

Cadera. Motor, 90W, 24V, 444 mNm.
Reductor planetario, reducción 66:1

Rodilla. Motor de 70W, 24V, 128 mNm.
Reductor planetario, reducción 91:1

Tobillo. Motor de 70W, 24V, 128 mNm.
Reductor planetario, reducción 91:1

Este trabajo se ha distribuido como sigue: en el apartado II se presenta el modelo cinemático, mientras que en el apartado III se presenta el modelo dinámico. La planeación del movimiento se presenta en el apartado IV. El control de posición utilizado para realizar la simulación se presenta en el apartado V. Por último, los apartados VI y VII presentan los resultados obtenidos y las conclusiones, respectivamente.

II. CINEMÁTICA

A. Planos de movimiento

La marcha humana se realiza en un espacio tridimensional, siendo el plano Sagital, Frontal y Transversal, ver Fig. 1. Para este trabajo, se toma en cuenta el plano Sagital para cuestión de análisis del movimiento.

B. Movimientos de las extremidades inferiores

Se tomaron en cuenta los movimientos de las extremidades inferiores. La cadera cuenta con 3 gdl, la rodilla con 1 gdl y el tobillo con 3 gdl, tal como se muestra en la Fig. 2.

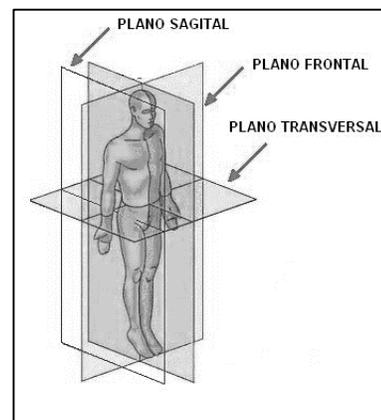


Fig. 1 Planos de movimiento. [6]

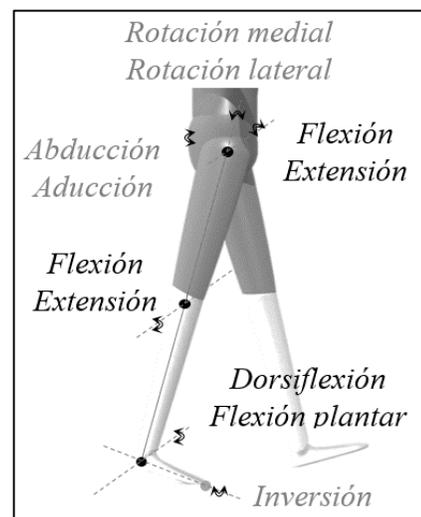


Fig. 2 Movimientos de Extremidades Inferiores

C. Parámetros Denavit-Hartenberg

En la Tabla 1 se muestran los parámetros Denavit-Hartenberg (D-H) del sistema completo. Se consideró un grado de libertad en la pierna, uno en la rodilla y uno más en el tobillo. En la Fig. 3 se muestran los ejes coordenados utilizados en el análisis.

donde:

- θ_1 = Ángulo de rotación de la cadera
- θ_2 = Ángulo de rotación de la rodilla
- θ_3 = Ángulo de rotación del tobillo
- l_1 = longitud del muslo
- l_2 = longitud de la pierna
- l_{c3} = longitud al centro de masa del pie

TABLA I
PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG

i	Joint	Alcances	θ_i	d_i	a_i	α_i
0(0→1)	Base	0	-90°	0	0	0
1(1→2)	Cadera	(-30°) Extensión/Flexión $(+120^\circ)$	θ_1	0	l_1	0
2(2→3)	Rodilla	(0°) Extensión/Flexión $(+150^\circ)$	θ_2	0	l_2	0
3(3→4)	Tobillo	(-40°) Flexión plantar/Dorsiflexión $(+20^\circ)$	θ_3	0	0	0
4(4→5)	CM ₃		0	l_{c3}	0	0

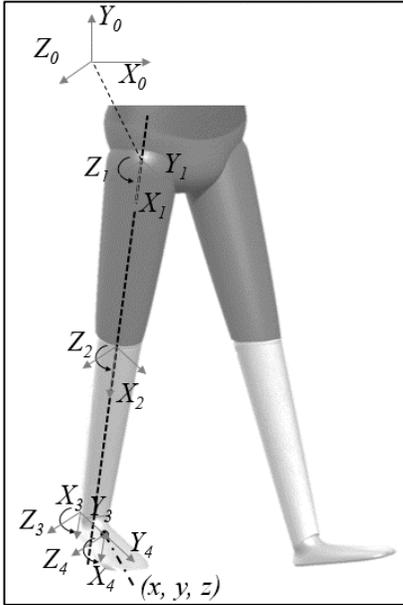


Fig. 3 Ejes coordenados

III. DINÁMICA

A. Diagrama de Cuerpo libre

En la Fig. 4 se pueden apreciar todas las variables que afectan el movimiento de las extremidades.

B. Ecuación Dinámica

Ya que se desea conocer el par en cada articulación, se emplea la ecuación de dinámica inversa, dada por:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (1)$$

Donde $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ y $g(q)$ son las matrices de inercia, Coriolis y gravedad respectivamente. Para su cálculo se utilizaron las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange.

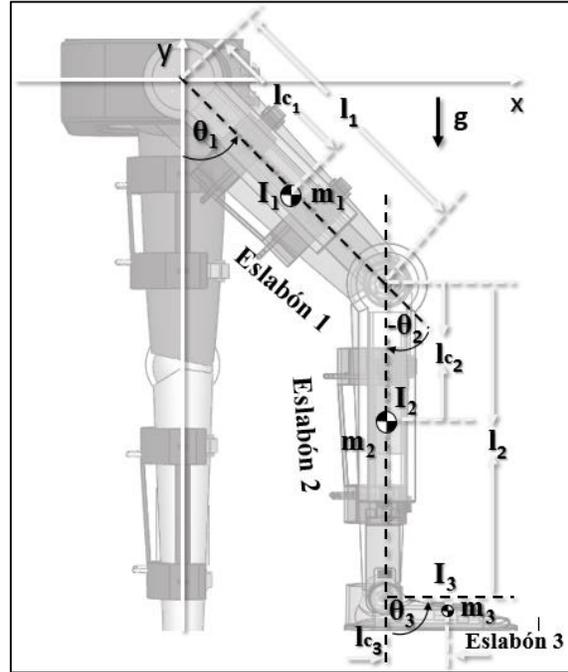


Fig. 4 Diagrama de cuerpo libre del Exoesqueleto

A su vez, las matrices están dadas por:

$$M(q)\ddot{q} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$m_{11} = A + 2B + 2(C + D)$$

$$m_{12} = E + B + 2C + D$$

$$\begin{aligned}
m_{13} &= F + C + D \\
m_{21} &= E + B + 2C + D \\
m_{22} &= E + 2C \\
m_{23} &= F + C \\
m_{31} &= F + C + D \\
m_{32} &= F + C \\
m_{33} &= F
\end{aligned}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= 2(G + H)\dot{q}_2 + 2(H + I)\dot{q}_3 \\
c_{12} &= 2(H + I)\dot{q}_3 + (G + H)\dot{q}_2 \\
c_{13} &= (H + I)\dot{q}_3 \\
c_{21} &= (I)\dot{q}_3 \\
c_{22} &= (2I)\dot{q}_3 - (G + H)\dot{q}_2 \\
c_{23} &= (I)\dot{q}_3 \\
c_{31} &= -(2I)\dot{q}_2 - (H + I)\dot{q}_1 \\
c_{32} &= -(I)\dot{q}_2 \\
c_{33} &= 0
\end{aligned}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = g \begin{bmatrix} J + K + L \\ J + K \\ L \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde las matrices quedan en función de los siguientes componentes:

$$\begin{aligned}
A &= m_1 l_{c1}^2 + I_1 + I_2 + I_3 + m_2 [l_1^2 + l_{c2}^2] + m_3 [l_1^2 + l_2^2 + l_{c3}^2] \\
B &= [m_2 l_1 l_{c3} + m_3 l_1 l_2] \cos(q_2) \\
C &= l_1 l_{c3} [\cos(q_1) \cos(q_1 + q_2 + q_3) + \sin(q_1) \sin(q_1 + q_2 + q_3)] \\
D &= l_2 l_{c3} [\cos(q_1 + q_2) \cos(q_1 + q_2 + q_3) + \sin(q_1 + q_2) \sin(q_1 + q_2 + q_3)] \\
E &= m_2 l_{c2}^2 + I_2 + I_3 + m_3 [l_2^2 + l_{c3}^2] \\
F &= I_3 + m_3 l_{c3}^2 \\
G &= [-m_2 l_1 l_{c2} - m_3 l_1 l_2] \sin(q_2) \\
H &= -m_3 l_1 l_{c3} \sin(q_2 + q_3) \\
I &= -m_3 l_2 l_{c3} \sin(q_3) \\
J &= [m_1 l_{c1} + m_2 l_1 + m_3 l_1] \sin(q_1) \\
K &= [m_2 l_{c2} + m_3 l_2] \sin(q_1 + q_2) \\
L &= [m_3 l_{c3}] \sin(q_1 + q_2 + q_3)
\end{aligned}$$

IV. PLANEACIÓN DEL MOVIMIENTO

A. Análisis de la caminata

Stansfield, et al. [7] realizó el cálculo de la trayectoria de movimiento de la marcha en una población de niños de 7-12 años. Los parámetros de normalización se obtuvieron con un sistema de 5 cámaras, los cuales fueron cruciales para la obtención de los ángulos de las articulaciones.

Con estos parámetros, Kirtley, C. en [8] creó una base de datos donde es posible introducir la longitud de las piernas y la velocidad de la marcha para obtener los ángulos correspondientes para cada articulación. Esta base de datos es la que se utilizó para generar la trayectoria del movimiento de la marcha en el sistema propuesto.

B. Seguimiento de las posiciones

Una vez obtenidas las posiciones articulares, se exportaron estos datos al software Matlab® en una matriz de 6x50, siendo las filas las articulaciones y las columnas los puntos en la trayectoria para cada articulación. El número de datos que describen el movimiento total de un paso de la marcha es de 50. Debido a que no se cuenta con los parámetros de inicio de marcha, se toman los puntos de la pierna derecha desde $\mathbf{q}_{d1} \rightarrow \mathbf{q}_{d50}$, de la pierna izquierda de $\mathbf{q}_{d26} \rightarrow \mathbf{q}_{d50}$. En ambos casos, cuando llega a \mathbf{q}_{d50} el siguiente punto es \mathbf{q}_{d1} . El diagrama de flujo 1 explica la metodología de seguimiento de trayectoria.

Donde:

- i: i-ésima columna de posiciones pierna D
- j: j-ésima columna de posiciones pierna I
- \mathbf{q}_{d_i} : vector de posiciones deseadas pierna D
- \mathbf{q}_{d_j} : vector de posiciones deseadas pierna I
- $\mathbf{q}_d = [\mathbf{q}_{d_i} \quad \mathbf{q}_{d_j}]^T$
- $\dot{\mathbf{q}}_d = [\dot{\mathbf{q}}_{d_i} \quad \dot{\mathbf{q}}_{d_j}]^T$
- $\tilde{\mathbf{q}}$: vector de errores de posición
- $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$

El vector de velocidad $\dot{\mathbf{q}}_d$ se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{q}}_{d_i} = \frac{\mathbf{q}_{d_{i+1}} - \mathbf{q}_{d_i}}{\text{cte tiempo}} \quad (5)$$

$$\dot{q}_{d_j} = \frac{q_{d_{j+1}} - q_{d_j}}{cte\ tiempo} \quad (6)$$

Los valores para cada pierna son vectores de 3x1 (cadera, rodilla, tobillo).

El vector de posiciones se cambia a la siguiente posición cuando cada elemento de \tilde{q} tiene un valor de $-1 < \tilde{q}_{i,j} < 1$, posteriormente se calcula el vector de velocidad \dot{q}_d .

V. CONTROL DE POSICIÓN

A. Control Par-Calculado

El control aquí propuesto es utilizado para realizar la simulación. Como se comenta en [9], este controlador es capaz de satisfacer el objetivo de control en forma global.

La ecuación de este controlador está dada por

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + K_v\dot{\tilde{q}} + K_p\tilde{q}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (7)$$

Donde K_v y K_p son matrices simétricas definidas positivas.

En la Fig. 5(a) se muestra el esquema de Control Par-Calculado sin incluir error en las lecturas de posición y velocidad, en la Fig. 5(b) incluyendo error.

En [9] se analiza a detalle la prueba de estabilidad de Lyapunov de la ecuación (7).

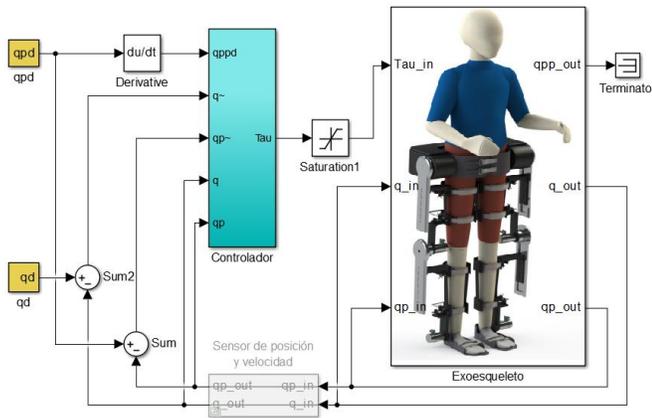


Fig. 5(a) Esquema de control sin error

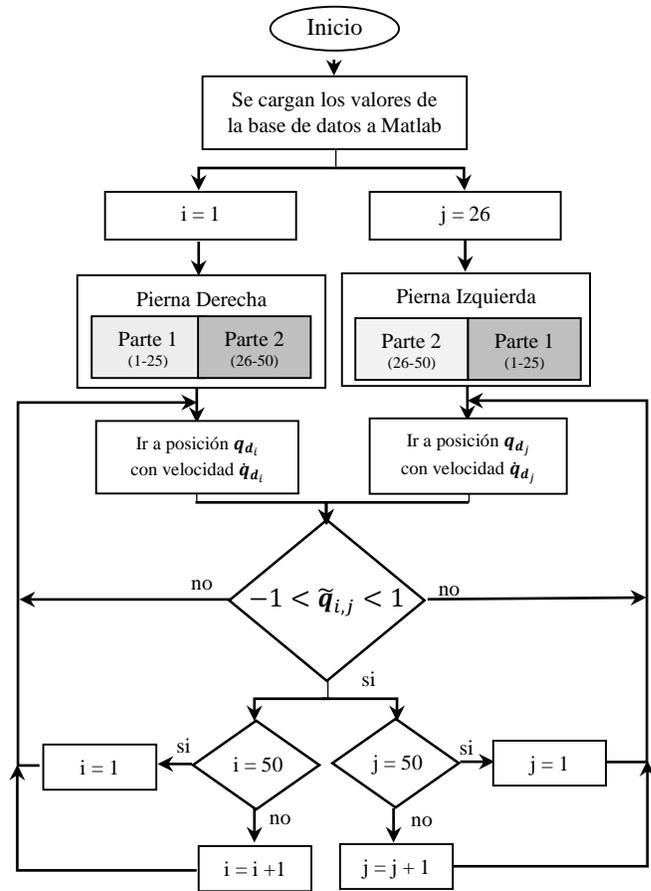


Diagrama de Flujo 1. Seguimiento de trayectoria

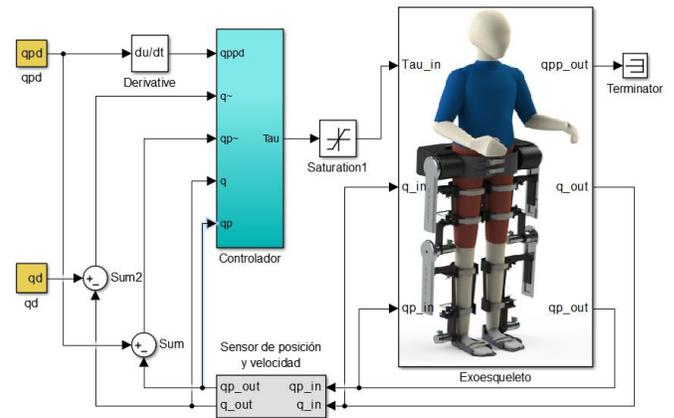


Fig. 5(b) Esquema de control con error

En la Fig. 6 se muestra el esquema del controlador que se presenta en la ecuación (7).

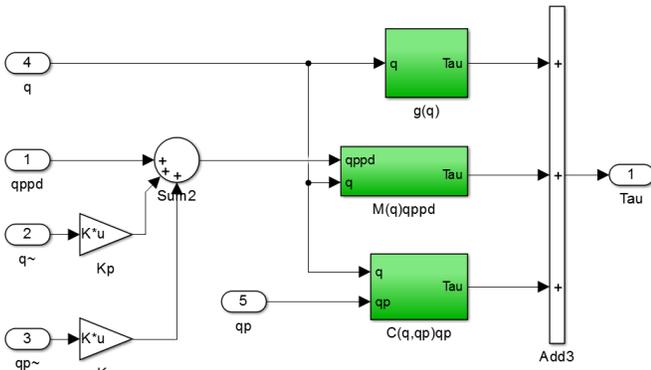


Fig. 6 Esquema del controlador

VI. RESULTADOS

El esquema de Par-Calculado permitió controlar las posiciones requeridas para cada punto marcado en la planeación de movimiento. Con los cálculos e información que se mostró anteriormente, se introdujeron los siguientes parámetros del sistema al software de análisis y simulación:

- $l_1 = 0.38669 \text{ m}$
- $l_2 = 0.42621 \text{ m}$
- $l_{c1} = 0.15654 \text{ m}$
- $l_{c2} = 0.18446 \text{ m}$
- $l_{c3} = 0.03329 \text{ m}$
- $m_1 = 6.73843 \text{ kg}$
- $m_2 = 4.54872 \text{ kg}$
- $m_3 = 0.65959 \text{ kg}$
- $I_1 = 0.12897 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $I_2 = 0.11313 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $I_3 = 0.00055 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $g = 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$K_p = \text{diag}\{k_{p_1}, k_{p_2}, k_{p_3}, k_{p_4}, k_{p_5}, k_{p_6}\}$$

$$k_{p_1} = 90 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$k_{p_2} = 120 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$k_{p_3} = 110 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$k_{p_4} = 90 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$k_{p_5} = 120 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$k_{p_6} = 110 \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$K_v = \text{diag}\{k_{v_1}, k_{v_2}, k_{v_3}, k_{v_4}, k_{v_5}, k_{v_6}\}$$

$$k_{v_1} = 0.25 \times k_{p_1} \frac{1}{\text{s}}$$

$$k_{v_2} = 0.15 \times k_{p_2} \frac{1}{\text{s}}$$

$$k_{v_3} = 0.25 \times k_{p_3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$k_{v_4} = 0.25 \times k_{p_4} \frac{1}{\text{s}}$$

$$k_{v_5} = 0.15 \times k_{p_5} \frac{1}{\text{s}}$$

$$k_{v_6} = 0.25 \times k_{p_6} \frac{1}{\text{s}}$$

La Fig. 7 muestra las comparativas de las posiciones deseadas y las posiciones reales¹. La Fig. 8 muestra los torques en los actuadores¹.

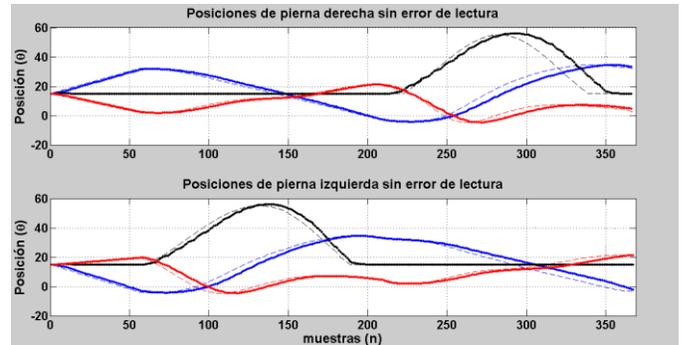


Fig. 7 Posiciones deseada (línea punteada). Posiciones reales (línea sólida). No se incluye error.

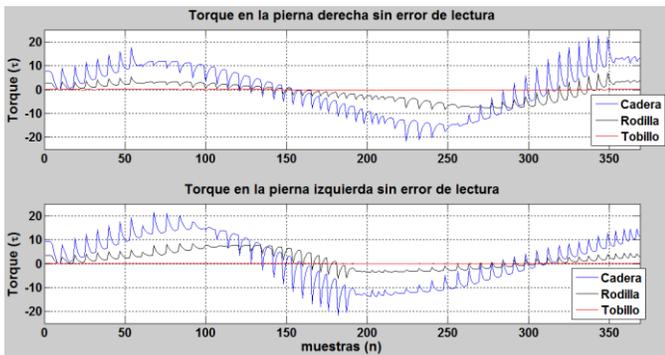


Fig. 8 Torque en las articulaciones sin error incluido.

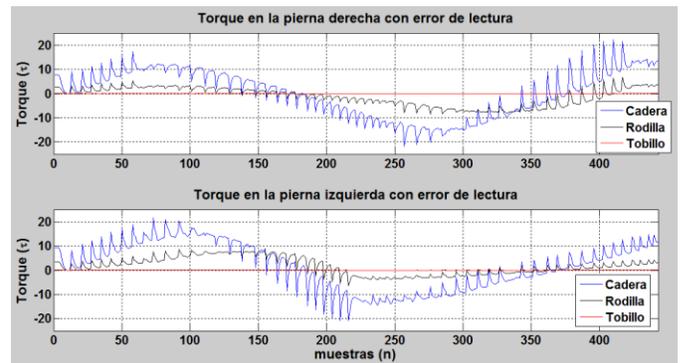


Fig. 10 Torque en las articulaciones con error de lectura incluido

Por otro lado, se experimentó con perturbaciones en forma de introducir errores aleatorios al 1% en los valores de lectura de la velocidad y la posición angular. Se simuló el sistema para evaluar la dinámica inversa, ver Fig 5(b).

La Fig. 9 muestra las comparativas de las posiciones deseadas y las posiciones reales¹ introduciendo error en las lecturas. La Fig. 10 muestra los torques en los actuadores¹ considerando el error.

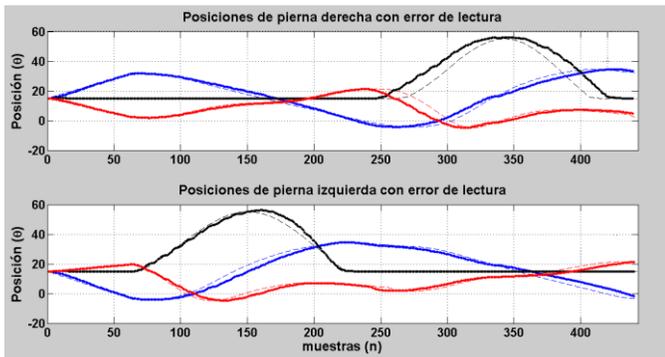


Fig. 9 Posiciones deseada (línea punteada). Posiciones reales (línea sólida). Se incluye error en las lecturas.

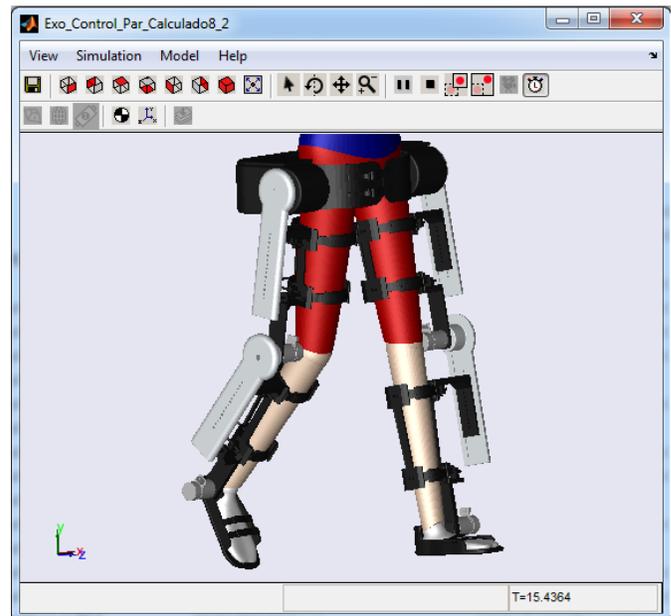


Fig. 11 Animación en SimMechanics

VII. CONCLUSIONES

En el diseño del Exoesqueleto se contempló los ajustes que requiera el paciente en el rango de edades previamente mencionado. Los valores de la masa, longitudes, entre otros, se deja abierto para introducirlos en las matrices de la ecuación dinámica en (2), (3) y (4).

El tiempo de simulación para alcanzar los 50 puntos en un experimento sin perturbaciones en las lecturas de velocidad y posición angular fue de 18.073 segundos y con perturbaciones de 18.234 segundos. Las pruebas se realizaron en una computadora con un procesador i7-2630QM de 2.00 GHz de reloj y con 10 GB en memoria RAM.

¹Debido a que el número de puntos en la trayectoria del caminado son 50, se interpolaron algunos puntos para ajustar a la cantidad de muestras obtenidas en la simulación.

En el caso del Exoesqueleto se requiere trabajar con control de trayectorias para obtener mejores resultados, evitar saturar los motores y perfiles de movimientos más suavizados para los pacientes.

Es conveniente también simular el efecto de la fricción en las articulaciones para evitar errores más grandes.

Los tiempos de simulación fueron muy grandes debido a que las velocidades angulares se incrementaron. Es conveniente reducir dicha velocidad y modificar los valores de K_v y K_p para evitar saturaciones en el motor y movimientos fuertes en la estructura.

Estas consideraciones se tomarán en cuenta a futuro para la mejora del control de las posiciones angulares en el sistema, reducción o eliminación de error y optimizar el tiempo de simulación.

REFERENCIAS

- [1] José L. Pons, “Wearable Robots, Biomechatronic Exoskeletons”, 1st. Ed., Wiley, 2008.
- [2] A. M. Dollar and H. Herr, “Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art,” IEEE Trans. Robot., vol. 24, no. 1, pp. 144–158, 2008.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), simbad, censo 2010.
- [4] Chaurand, R., Prado León, L., González Muñoz, E., Dimensiones antropométricas de población latinoamericana, 2da. Ed. Universidad de Guadalajara, 280 págs., 2007
- [5] Vaughan, C., Davis, B., O'Connor, J., Dynamics of Human Gait, 2nd. Ed., Kihobo Publishers, 141 pag. 1999.
- [6] Chourio, P., Educación Física deporte Recreación Ambiente y Salud, <https://pedrochourio.jimdo.com/biomec%C3%A1nica/planos-del-cuerpo/>, [Accedido el 4 de oct. de 2016]
- [7] Stansfield, B., Hillman, S., "Hazlewood, M., Robb, J. Regression analysis of gait parameters with speed in normal children walking at self-selected speeds", Gait Posture. 2006 Apr;23(3):288-94. Epub 2005 Jun 22.
- [8] Kirtley, C., Clinical Gait Analysis, <http://www.clinicalgaitanalysis.com/data/index.html>, [Accedido el 7 de nov. De 2016]
- [9] Kelly, R., Santibañez, V. Control de Movimiento de Robots Manipuladores, 1ra. ed., Pearson Educación, 344 pag. 2003.
- [10] Reyes Cortés, F. Robótica. Control de robots manipuladores. 1ra. Ed. Alfaomega Ed, 592 págs., 2011.
- [11] Reyes Cortés, F. Matlab aplicado a Robótica y Mecatrónica. 1ra. Ed. Alfaomega Ed, 460 págs., 2012.

Control de posición de un sistema levitador magnético de un grado de libertad

E. G. Chávez, S. Vergara, M. A. D. Vargas, F. Reyes

Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE), Grupo de robótica.

Maestría en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

Av San Claudio y 18 Sur S/N, C.U., Edificio 109A, C.P. 72570, Puebla, Pue., México.

email: *erick.chavezg@alumno.buap.mx*

Abstract—En el siguiente trabajo se presenta un sistema levitador magnético de un grado de libertad siendo afectado por la acción de un algoritmo de control tipo PD. Se presenta el modelo dinámico de dicho sistema, obtenido al utilizar el método de Euler-Lagrange. Se realizó un análisis de los fenómenos electromagnéticos, con el fin de complementar el modelo dinámico del sistema. Se diseñó una tarjeta de adquisición de datos para capturar y acondicionar las señales eléctricas provenientes, y destinadas, del sistema para luego ser desplegadas, gráficamente, en una interfaz de usuario realizada en MATLAB.

This paper presents a one DOF magnetic levitation system being affected by the action of a PD type control algorithm. Also it presents the dynamic model of the system using the Euler-Lagrange method. To complement this model, we performed an analysis of the electromagnetic phenomena shown using concepts of electromagnetic theory. We also designed a data acquisition board dedicated to capture and adapt the electric signals coming, and going, from the system to later be shown, graphically, by a graphic user interface made in MATLAB.

Index Terms—Electromagnetismo, Euler-Lagrange, Interfaz gráfica de usuario, MATLAB.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de levitación magnética son dispositivos con elementos electromagnéticos que, utilizando el principio de electromagnetismo, levita elementos con propiedades ferromagnéticas. Este tipo de sistemas son cada vez más utilizados debido a la mínima presencia de fricción ocasionada por el contacto mecánico entre elementos estáticos y móviles. Es por esto que resulta efectivo en numerosas ventajas como la disminución de ruido audible, un aumento en el periodo de vida de piezas mecánicas, la habilidad de trabajar en ambientes de alto vacío, etc. Los sistemas magnéticos trabajan generalmente con dos tipos de fuerzas: fuerza de atracción, repulsión. Como su nombre lo especifica, la fuerza de atracción de un objeto se encarga de atraer objetos hacia él; caso contrario de la fuerza de repulsión, que no permite que esto suceda, es decir, aleja a los objetos alrededor de un cuerpo, este es el principio que caracteriza la levitación. Este fenómeno ocurre principalmente al aplicar una fuerza de igual magnitud que la fuerza de atracción gravitacional terrestre, pero en dirección contraria, provocando una fuerza de repulsión artificial que anula la acción de la fuerza gravitacional, provocando que el objeto se suspenda en el aire.

La capacidad de trabajar en ambientes de alto vacío ofrece una gran ventaja para desarrollar varias aplicaciones[2][3][4][5]. Se debe de tener en cuenta que la necesidad constante de suministrar una fuerza de repulsión para generar el fenómeno de levitación y a la naturaleza no lineal del sistema conlleva a la existencia de diferentes propuestas de modelado matemático y algoritmos de control.

El objetivo de este trabajo es conseguir un modelo dinámico que tome en cuenta el fenómeno magnético que tiene presente este sistema mecánico. Utilizando el modelo dinámico como base, generar un algoritmo de control y supervisar el comportamiento del sistema afectado por él utilizando una interfaz de usuario donde se configure los parámetros del algoritmo de la ley de control y, de igual manera, se visualice información propia del sistema con ayuda de gráficas que se actualizan constantemente. El siguiente diagrama presente el proceso descrito:

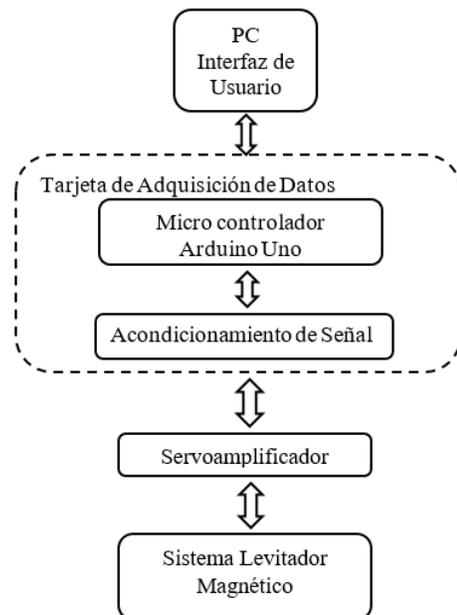


Fig. 1: Diagrama de flujo del sistema levitador magnético.

Abril 6, 2017

II. SISTEMA LEVITADOR MAGNÉTICO

Para este trabajo se utilizó el sistema levitador magnético ECP modelo 730. Este dispositivo cuenta con dos embobinados (uno arriba y otro abajo) alineados verticalmente con ayuda de un cilindro de vidrio que se utiliza como guía, estos embobinados producen un campo magnético cuando se les suministra una corriente eléctrica. El campo magnético generado de los embobinados incrementa con respecto a la corriente eléctrica que se administre provocando un incremento en la altura suspendida de un indicador visual. Este indicador se trata de un imán permanente en forma de disco hecho de una aleación de neodimio, hierro y boro. Este tipo de imanes permanentes son uno de los más poderosos utilizados comercialmente. La figura 2 muestra una fotografía del sistema levitador.

Este dispositivo cuenta con un conjunto de sensores ópticos, emisor y receptor, que producen una caída de potencial correspondiente a la distancia que recorrida por el haz de luz, producido por el emisor, hacia el receptor. Para mejorar el desempeño de estos sensores, los discos magnéticos cuentan con un recubrimiento laminar reflectante, con esto el haz de luz está íntegro y no exista problemas para que el receptor óptico obtenga la mayor información posible.



Fig. 2: Dispositivo ECP Modelo 730.

III. MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA

El modelo dinámico de un sistema es una representación la cual puede describir el comportamiento físico de un sistema a través de una expresión matemática. Al ser una expresión matemática, existen varias metodologías para encontrar dicha expresión cada una con diferentes consideraciones a tomar, en este trabajo se empezó con un análisis del fenómeno electromagnético presente en el sistema.

IV. MODELO DINÁMICO MAGNÉTICO

En este sistema, la fuerza magnética es generada por una bobina. Dicha bobina relaciona esa fuerza con una entrada de voltaje/corriente. La acción de la bobina se modela considerando el campo magnético entre la bobina el disco magnético como una función de la distancia que separa a ambos.

Utilizando la teoría electromagnética, el análisis se realiza bajo las siguientes consideraciones[6]:

- La ley de Biot-Savart nos proporciona la relación que existe entre la corriente y el campo magnético generado

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

donde $d\vec{B}$ es la diferencial de campo magnético, en tesla,

μ es la constante de permeabilidad, Henry/m,

I es la corriente en A,

$d\vec{l}$ es la diferencial de la longitud del elemento cargado, en m,

r es el vector de distancia del elemento cargado al campo, en m.

- El disco magnético puede visualizarse como una espira circular, el campo magnético en el centro se calcula con la ley de Biot-Savart. En este caso el ángulo entre el elemento cargado y el campo es constante (90 deg), ocasionando que el vector resultante del producto cruz una unidad. El campo magnético es:

$$dB = \frac{\mu}{4\pi} I \frac{2\pi R}{R^2} = \frac{\mu I}{2R} \quad (2)$$

donde R es el radio del disco.

- El campo magnético a lo largo del eje Z de una espira circular de igual manera se calcula con la ley de Biot-Savart. En este caso, el ángulo entre el elemento cargado y el campo sigue siendo constante (90 deg), así que el producto cruz resulta una unidad.

$$dB_z = \frac{\mu}{4\pi} I \frac{2\pi R}{(z^2 + R^2)} \cos \alpha \quad (3)$$

$$= \frac{\mu I R}{2(z^2 + R^2)} \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} \quad (4)$$

La fuerza entre conductores cargados de corriente es dada por la ley de Lorentz:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (5)$$

donde $d\vec{F}$ es la diferencial de fuerza, en Newtons

$$f_{mag} = I_a 2\pi R \frac{\mu I_b R}{2(z^2 + R^2)} \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} \quad (6)$$

$$= I_a \frac{\mu I_b \pi R^3}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (7)$$

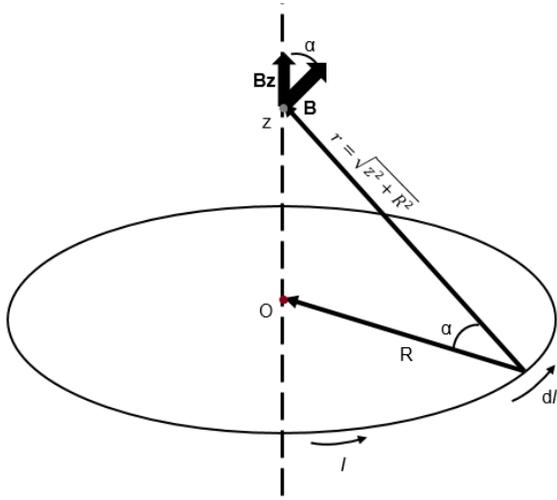


Fig. 3: Diagrama Campo magnético de una espira circular a lo largo del eje Z.

donde I_a es la corriente que recorre en el embobinado y I_b es la corriente recorriendo en el disco magnético, ambos en Amperes. Nótese que la corriente I_b es constante ya que se trata de un imán permanente. La ecuación 7 se puede escribir de la siguiente forma

$$f_{mag} = \frac{aI_a}{(z^2 + b)^{3/2}} \quad (8)$$

donde $a = \mu I_b \pi R^3$ y $b = R^2$.

A. Cinemática Directa

Se refiere a cinemática directa como la relación del movimiento que existe en una estructura articulada en base de un sistema de referencia inercial con el fin de expresarla con una ecuación matemática. Para este trabajo se utiliza la metodología de Denavit-Hartenberg principalmente porque este sistema cuenta con una cadena abierta con una articulación cilíndrica, por consiguiente la tabla de parámetros DH sólo cuenta con una fila como se muestra en la tabla ??:

Tabla I: Tabla de parámetros DH

l	α	d	θ
0	0	z	0

Una vez obtenidos los parámetros DH, utilizamos esa información para obtener la cinemática directa mediante la matriz de transformación homogénea, quedando de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde z es la distancia que existe entre el plato protector del embobinado con el disco magnético. Cabe resaltar que en este

sistema no interesa la rotación que podría presentar el disco magnético, solamente la distancia, es por eso que no existe componentes en las coordenadas (x, y) .

V. MODELO DINÁMICO

Uno de los procedimientos más empleados para la obtención de modelos dinámicos de sistemas mecánicos, es el basado en las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange[7]. El empleo de estas ecuaciones para el modelado requiere de dos conceptos importantes: La energía cinética y la energía potencial, y la diferencia entre estos tipos de energía se define como función lagrangiana (10):

$$\mathcal{L}(\mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}) = \mathcal{K}(\mathbf{v}) - \mathcal{U}(\mathbf{z}) \quad (10)$$

La energía cinética está formulada de la siguiente manera:

$$\mathcal{K}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} m \mathbf{v}^T \mathbf{v} \quad (11)$$

Mientras que la energía potencial se expresa como:

$$\mathcal{U}(\mathbf{z}) = mgl(\mathbf{z}) \quad (12)$$

Para utilizar la ecuación 11 es necesario conocer la cinemática diferencial, que es simplemente la derivada con respecto al tiempo de la cinemática directa (9).

$$\mathbf{v} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde \mathbf{v} es el vector que contiene la velocidad de cada uno de las coordenadas de posición del sistema. Una vez obtenida la velocidad se sustituye en la ecuación 11:

La energía cinética esta formulada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \mathcal{K}(\mathbf{v}) &= \frac{1}{2} m \mathbf{v}^T \mathbf{v} \\ &= \frac{1}{2} m \dot{z}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Y la energía potencial se expresa como:

$$\begin{aligned} \mathcal{U}(\mathbf{z}) &= mgl(\mathbf{z}) \\ &= mgz \end{aligned} \quad (15)$$

Sustituimos las expresiones (11) y (12) en la ecuación 10:

$$\mathcal{L}(\mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}) = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 - mgz \quad (16)$$

Una vez obtenido el langrangiano (16) se pueden obtener las ecuaciones de movimiento:

$$F = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \dot{z}} \right) - \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta z} \quad (17)$$

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \dot{z}} = m\dot{z} \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \dot{z}} \right) = m\ddot{z} \quad (19)$$

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta z_1} = -mg \quad (20)$$

$$F = m\ddot{z} + mg \quad (21)$$

El modelo dinámico del sistema levitador magnético se concluye al añadir el resultado del análisis electromagnético (ecuación 8) y el fenómeno de fricción viscosa presente por tratarse de un sistema mecánico a la ecuación de movimiento (21):

$$F = m\ddot{z} + mg + b\dot{z} - \frac{aI_a}{(z^2 + b)^{3/2}} \quad (22)$$

VI. CONTROLADOR

Se sabe que existe una relación entre el voltaje suministrado a la bobina con la fuerza magnética que genera. Esta relación se puede expresar de la forma

$$F = kv \quad (23)$$

$$v = \frac{F}{k} \quad (24)$$

donde v es el voltaje suministrado y k la relación entre voltaje y fuerza.

El voltaje suministrado, de primera instancia, se genera a partir de un algoritmo de control tipo PD simple, por lo que la expresión queda

$$F = k_p \ddot{z} - k_v \dot{z} \quad (25)$$

$$v = \frac{k_p}{k} \ddot{z} - \frac{k_v}{k} \dot{z} \quad (26)$$

Por otro lado, la corriente en un inductor[8] es

$$i(t) = \exp^{-\frac{R}{L}t} i(0) + \underbrace{(1 - \exp^{-\frac{R}{L}t})}_{\alpha} v(t) \quad (27)$$

donde R es la resistencia del embobinado, L la inductancia e $i(0)$ es la corriente inicial de la bobina, en este caso se consideran condiciones iniciales iguales a cero.

Sustituimos la ecuación 26 en 27

$$i(t) = \alpha \left(\frac{k_p}{k} \ddot{z} - \frac{k_v}{k} \dot{z} \right) \quad (28)$$

La ecuación 28 se sustituye en la ecuación 8

$$f_{mag} = \frac{\alpha(k_p \ddot{z} - k_v \dot{z})a}{k(z^2 + b)^n} \quad (29)$$

La ecuación 29 denota la fuerza magnética que genera el algoritmo de control tipo PD simple, que se suministra a la bobina.

VII. SIMULACIÓN

Para comprobar la veracidad del modelo dinámico del sistema conseguido por el análisis matemático realizado, se utiliza una simulación en el ambiente de Simulink de MATLAB. En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al modelo dinámico completo del sistema levitador magnético. Y en la figura 5 se encuentra el diagrama de bloques de Simulink donde se aplica un controlador tipo PD al modelo dinámico.

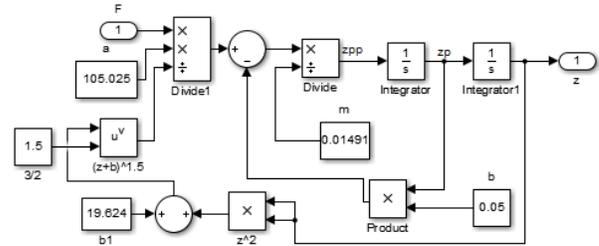


Fig. 4: Diagrama Simulink del modelo dinámico.

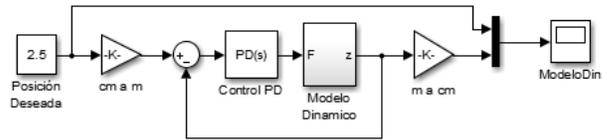


Fig. 5: Diagrama Simulink del modelo dinámico con control PD.

VIII. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Esta tarjeta se encarga de transformar la información digital procesada por la computadora y micro controlador a señales eléctricas analógicas, y viceversa, que se entregan al servo amplificador, que suministra la corriente correspondiente a la bobina, y genere el campo magnético necesario para mover el imán permanente del sistema. Esta tarjeta consta de dos partes: un circuito electrónico dedicada al acondicionamiento de señal y una tarjeta ARDUINO UNO.

A. Hardware

El circuito electrónico de la tarjeta de adquisición de datos se encarga de acondicionar la señal eléctrica obtenida a través de los sensores del sistema, así como la señal generada por el controlador. Consiste en una combinación de amplificadores operacionales en distintas configuraciones y un conjunto de convertidores: digital-analógico y , su contra parte, analógico-digital este último se encuentra en la tarjeta ARDUINO UNO.

B. Software

Para programar la tarjeta ARDUINO UNO como una tarjeta de adquisición de datos se utilizó el compilador de código

abierto IDE versión 1.8.1. El lenguaje que maneja este compilador esta basado en el lenguaje C[8]. El micro controlador de la tarjeta ARDUINO UNO se encarga de leer e interpretar la señal del sensor, generar la acción de control correspondiente para lograr la posición deseada, obtenida a través de la interfaz de usuario, del imán mandando una señal eléctrica al servo amplificador del sistema y, a su vez, mandar los parámetros a la interfaz para exhibirlos al usuario. Este procedimiento se realiza cada 30 milisegundos.

La figura 6 muestra el diagrama de flujo correspondiente a la comunicación entre la interfaz de usuario y la tarjeta ARDUINO UNO.

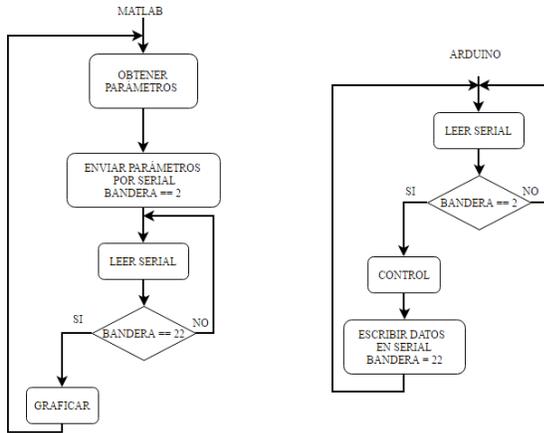


Fig. 6: Comunicación serial entre ARDUINO y MATLAB.

IX. INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario para el sistema levitador magnético se desarrolló utilizando el lenguaje de programación de MATLAB GUI, ya que cuenta con características de programación orientada a objetos aptas para generar interfaces gráficas de usuario. MATLAB GUI es un entorno de programación visual que permite realizar y ejecutar programas donde se ingresa y/o despliega datos. La figura 7 muestra la pantalla principal de la interfaz de usuario.



Fig. 7: Ventana de la Interfaz de Usuario.

En el apartado de ARDUINO se encuentra botones para inicializar (CONECTAR) y detener (DESCONECTAR) la comunicación serial entre la computadora y la tarjeta ARDUINO.



Fig. 8: Apartado ARDUINO.

En el apartado de CONTROLADOR contiene una lista desplegable de los tipos de controladores disponibles a utilizar, una vez elegido se aparecen los recuadros de texto para modificar los parámetros propios del controlador. Con el botón GRAFICAR, se inicializa el proceso para graficar de los datos obtenidos del sistema y presentándolos en la parte derecha de la ventana.



Fig. 9: Apartado CONTROLADOR.

En PARÁMETROS se encuentra el recuadro de texto para designar la posición deseada requerida por el usuario, también se muestran los datos de posición real y el error en "tiempo real".

X. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evidenciar la funcionamiento del sistema en lazo cerrado utilizando un algoritmo de control PD simple, se colocó como posición deseada ($z_d = 2.5\text{cm}$) con constantes proporcional y derivativa ($k_p = 18, k_v = 5$) respectivamente. La figura 10 muestra la ventana de la interfaz de usuario ya configurada y mostrando las gráficas de posición real y error que presenta el sistema, al igual que el voltaje suministrado al servo amplificador y la fuerza magnética generada por la bobina.

La figura 11 muestra el apartado de gráficas de la interfaz de usuario, en esta se puede ver en la parte superior izquierda la gráfica de posición real, donde la línea roja denota la posición deseada colocada en la interfaz, y la línea azul es la información recabada gracias a la tarjeta de adquisición de datos. En la parte inferior izquierda se encuentra la gráfica de error, en esta se puede apreciar que el valor de error tiende a

REFERENCIAS

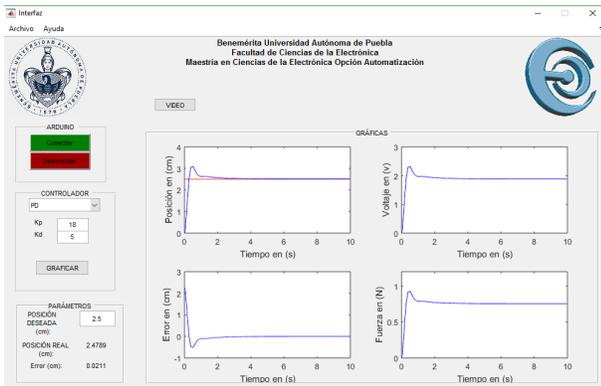


Fig. 10: Ventana de la Interfaz de Usuario configurada.

cero con una exactitud de 2%, justamente lo que se deseaba conseguir con una tolerancia aceptable. Mientras que en la parte derecha se encuentra las gráficas de voltaje y fuerza suministrada y generada, respectivamente.

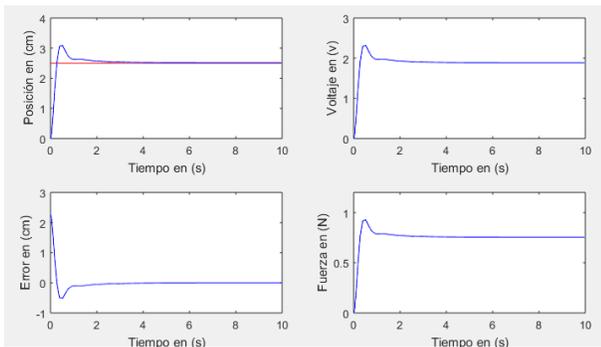


Fig. 11: Gráficas de posición, error, voltaje y fuerza de la interfaz de usuario.

XI. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Las pruebas preliminares que se realizaron en el laboratorio de Robótica y Control de la FCE-BUAP mostraron resultados satisfactorios al utilizar este el controlador tipo PD simple, por lo que invita a utilizar otros tipos de leyes de control más sofisticadas, como controladores acotados por ejemplo, para este tipo de sistemas no lineales. El uso de estos modelos didácticos desarrolla una capacidad para extrapolar los conocimientos obtenidos hacia sistemas mucho más complejos y especializados. Como trabajo futuro, se planea incluir otros algoritmos de control y mejorar estéticamente la interfaz de usuario con el fin de crear una ventana que sea de fácil manejo pero sin descuidar su funcionamiento. También se tiene contemplado aumentar el rango de trabajo del sistema, ya que actualmente se encuentra en un rango aceptable de cero a cinco centímetros, no obstante se espera incrementarlo.

- [1] W. Barie and J. Chiasson, "Linear and Nonlinear state-space controllers for magnetic levitation" International Journal of Systems Science, vol. 27, number 11, pp. 1153-1163.
- [2] M. Shaq and S. Akhtar, "Inverse Model Based Adaptive Control of Magnetic Levitation System", 5 th Asian Control Conference. 2004.
- [3] F. Zhang and K. Suyama, "Nonlinear Feedback Control of Magnetic Levitating System By Exact Linearization Approach" Tokyo University of Mercantile Marine, Japan, Proc. IEEE Conf. Contr. Appl., pp. 267-268 (1995).
- [4] P. Suster and A. Jadlovska, "Modeling and Control Design of Magnetic Levitation System", 10th IEEE Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. 2012.
- [5] M.Valiuvan and S.Ranganathan, "Modelling and Control of Magnetic Levitation System", International Conference on Emerging Trends in Science ,Engineering ad Technology. 2012.
- [6] Halliday, D, Resnik, R, Krane, K.S. (1999). Física Vol 2. (3ra ed.). México: Continental. pp. 300-305.
- [7] Reyes, F , Cid, J , Vargas, E. (2013). *Robótica: Control de Robots Manipuladores*. 1ra Ed. México: Alfaomega. pp 210-220.
- [8] Arduino.cc. (2017). Arduino - Reference. Noviembre 2016. [Online]. Disponible: <https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>

Micro-posicionamiento de un motor piezoeléctrico ultrasónico lineal basado en un controlador PID

J. Luis Luna

Email: jluna@ctrl.cinvestav.mx

Rubén Garrido

Email: garrido@ctrl.cinvestav.mx

Departamento de Control Automático

CINVESTAV-IPN

Ciudad de México

Resumen—En este trabajo se presenta un resumen histórico del desarrollo de los motores piezoeléctricos ultrasónicos, también llamados motores ultrasónicos (MUs). Se describe su principio de funcionamiento, su clasificación así como un panorama de las aplicaciones de esta tecnología. Este trabajo también reporta la aplicación experimental de una ley de control Proporcional Integral Derivativa (PID) para el micro-posicionamiento de un motor piezoeléctrico lineal. Los resultados ponen en relieve las limitaciones de esta ley de control cuando los posicionamientos son menores a 1 mm debido a los niveles de fricción elevados a bajas velocidades.

I. INTRODUCCIÓN

Los motores basados en principios electromagnético se han desarrollado durante más de un siglo y han sido ampliamente utilizados en muchos campos. En años recientes, los métodos de diseño y tecnologías de fabricación y control de estos motores han alcanzado un alto grado de madurez [1]. Sin embargo, los desarrollos tecnológicos recientes en sistemas de información, dispositivos médicos, naves espaciales, satélites e instrumentos de precisión, han planteado nuevos requisitos para los motores tales como pequeño tamaño, peso ligero, poco ruido y ninguna interferencia electromagnética [2]. Una clase particular de motores piezoeléctricos (MPs) denominados motores ultrasónicos (MUs) cumplen con la mayoría de los requisitos antes mencionados y constituyen una alternativa a los motores electromagnéticos tradicionales. Esta nueva clase de motores poseen características únicas tales como alto par o fuerza, respuesta rápida y retención de la posición sin utilizar un freno externo. Los MUs basan su funcionamiento en la capacidad que tienen los materiales piezoeléctricos de vibrar en la banda de frecuencia ultrasónica y en el efecto piezoeléctrico inverso. De esta manera, el movimiento mecánico y el par se obtienen por medio de la fuerza de contacto friccional entre el estátor y el rotor.

Hoy en día el aumento en la aceptación de los MUs en el mercado ha motivado investigación cuyo objetivo es lograr alta precisión, respuesta rápida, así como control de la posición y de velocidad de estos motores bajo cargas variables y tomando en cuenta su naturaleza no lineal. Las estrategias de control aplicadas a los MUs reportadas en la literatura [3],[4],[5],[6] son la ley de control Proporcional Integral Derivativa (PID) con ganancias fijas y variables, técnicas de control

adaptable, controladores basados en redes neuronales, técnicas de control difuso y control por modos deslizantes. Debido a que las estrategias de control mencionadas anteriormente tienen sus propias ventajas y desventajas, se han desarrollado controladores que combinan algunas de las técnicas anteriores. Recientemente, técnicas de control no lineal y los algoritmos genéticos también se han aplicado a los MUs [7].

Uno de los objetivos de este trabajo es dar un breve panorama sobre los motores ultrasónicos, su principio de funcionamiento y su clasificación. Otro objetivo es reportar un estudio experimental sobre la aplicación de una ley de control clásica PID para el micro-posicionamiento de un motor piezoeléctrico ultrasónico lineal. En la Sección 2 se describen los fundamentos de piezoelectricidad de los MUs. La Sección 3 muestra un resumen sobre el desarrollo histórico de los MUs así como su clasificación. Un modelo simplificado de un motor ultrasónico lineal se presenta en la Sección 4 mientras que la Sección 5 menciona una ley de control PID estándar empleada en la parte experimental. La sección 6 reporta los experimentos sobre el micro posicionamiento de un motor ultrasónico lineal. Finalmente, la Sección 7 da algunas conclusiones y describe el trabajo futuro a desarrollar.

II. FUNDAMENTOS DE PIEZOELECTRICIDAD

El término piezoelectricidad describe la propiedad que exhiben algunos cristales para polarizarse eléctricamente cuando se les aplica una tensión mecánica compresiva o extensiva [8]. En el año de 1880 este fenómeno fue descubierto de forma experimental por los hermanos Curie: Pierre(1859-1906) y Jacques(1855-1941) , quienes observaron que los monocristales de Turmalina, los de cuarzo y la sal de Rochelle presentan cargas eléctricas al aplicar un esfuerzo de compresión en una dirección dada; esas cargas son proporcionales a la presión y desaparecen cuando ésta cesa. A este fenómeno se le conoce como efecto piezoeléctrico directo. En 1881 Gabriel Lippman de manera teórica y utilizando principios de la termodinámica, predijo la existencia del efecto piezoeléctrico inverso, es decir, que al aplicar una diferencia de potencial en las caras opuestas del cristal se produce una deformación, fenómeno que fue comprobado experimentalmente por los hermanos Curie ese mismo año [9]. En el caso del efecto piezoeléctrico directo, la

relación lineal entre la presión Π_m aplicada sobre un material piezoeléctrico y la densidad de carga D resultante se describe como

$$D = d\Pi_m$$

con d una constante cuyas unidades son (C/N). Por otro lado, en el efecto piezoeléctrico inverso la relación que describe la deformación x_m desarrollada debido a la aplicación de un campo eléctrico E está dada por

$$x_m = \delta E$$

donde δ es una constante y sus unidades son m/V [10]. La descripción gráfica de cómo ocurren los efectos piezoeléctricos directo e inverso es la siguiente. En la Figura 1a se observa un material piezoeléctrico cilíndrico en reposo, en el cual no hay fuerza o voltaje que actúe sobre él. Si se aplica una fuerza de compresión como se ve en la Figura 1b el resultado será una variación en el momento dipolar generándose así un voltaje; si el cilindro se estira como en la Figura 1c el voltaje tendrá la misma polaridad que el eje de polarización. En este caso la energía mecánica se transforma en energía eléctrica mediante el efecto piezoeléctrico directo. Por otro lado, si se aplica un voltaje con la misma polaridad que la del eje de polarización, el cilindro se encoje como se muestra en la Figura 1d; si se aplica un voltaje con polaridad inversa al eje de polarización, el cilindro se estira como se ve en la Figura 1e. Finalmente si se aplica un voltaje con polaridad alterna el cilindro se encogerá y se alargará con la misma frecuencia que el voltaje aplicado tal como se ve en la Figura 1f. En este último caso la energía eléctrica se transforma en mecánica, fenómeno descrito por el efecto piezoeléctrico inverso [11].

III. HISTORIA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES PIEZOELÉCTRICOS

En la década de 1940, los científicos descubrieron el compuesto $BaTiO_3$, que es fácil de procesar y sirve para la fabricación de elementos piezoeléctricos. Este descubrimiento promovió grandemente el desarrollo de la tecnología de los MPs. Ya en 1948, Williams y Brown solicitaron la primera patente de “piezomotor” en la historia el cual se muestra en la Figura 2. En 1965, Lavrinenko en la Unión Soviética diseñó un motor ultrasónico (MU) rotatorio mostrado en la Figura 3a que utiliza la vibración de una placa piezoeléctrica para impulsar al rotor del MU. En 1973, Barth en IBM propuso un esquema estructural el cual contiene el principio del motor ultrasónico moderno como se muestra en la Figura 3b. En 1975, Vishnevsky también propuso un esquema de diseño similar al de Barth (ver Figura 3c).

En 1981, el lituano Vasiliev desarrolló con éxito un motor ultrasónico con la capacidad de conducir cargas elevadas. Después de los hallazgos de la investigación de Vasiliev, Sashida en 1982 diseñó y construyó un MU de onda estacionaria. En 1985, Kumada desarrolló un MU híbrido longitudinal-torsional [7]. En 1991 la empresa Physik Instrumente (PI) desarrolló un MU con actuadores compuestos y en 1994 la empresa Nanomotion Ltd puso en venta un motor ultrasónico

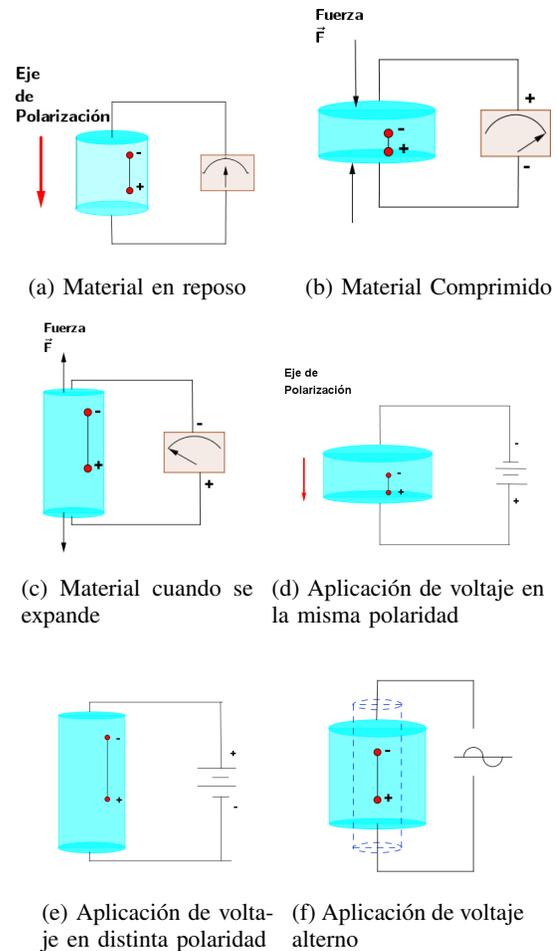


Figura 1: Descripción gráfica del efecto piezoeléctrico

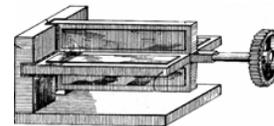


Figura 2: “Piezomotor” de Williams y Brown [12]

el cual emplea dos modos de vibración, uno longitudinal y otro curvo [12]. Actualmente, los motores ultrasónicos son producidos por varios fabricantes en el mundo entre los cuales destacan las empresas Canon, Fukoku, Asmo, SII, Canon Precision, Shinsei, Kyocera, Olympus y Mitsuba. En Japón, aproximadamente el 40 por ciento de los MUs se emplean en cámaras y el 35 por ciento en automóviles, el resto para productos tales como impresoras, copiadoras, equipos de audio y equipos médicos incluyendo sistemas de resonancia magnética [13]. Cabe mencionar que aunque las publicaciones de Barth, Wischnewski y Lavrinenko reportaron desarrollos tecnológicos significativos, desafortunadamente tuvieron poco impacto en la tecnología de los MUs. En contrapartida, el trabajo de (Sashida 1982) y muchos artículos sobre varios aspectos de

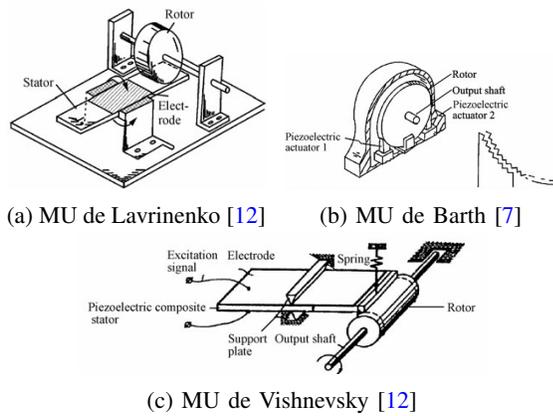


Figura 3: Primeros MUs

Característica	Tipo de MU
Método de propagación de onda	Onda viajera, estacionaria
Salida de movimiento	Lineal, rotacional
Estado de contacto entre el estátor y el rotor	Sin contacto, con contacto
Condiciones de excitación del estátor	Resonante, no resonante
Numero de grados de libertad del rotor	Un grado o múltiples grados de libertad
Forma geométrica del estátor	Disco, anillo, barra
Direcciones giratorias	Unidireccional, bidireccional
Tipo de vibración usada en el estátor	Longitudinal, curva, torsional, compuesta

Tabla I: Clasificación de los MUs [7].

estos actuadores que han sido publicados durante las últimas décadas[14] tuvieron un gran impacto en la tecnología de los MUs.

III-A. Ventajas de los motores ultrasónicos sobre los motores electromagnéticos

- (1) Poseen una estructura compacta y un diseño flexible.
- (2) Alto par y/o fuerza a baja velocidad.
- (3) Pueden alcanzar una velocidad estable en pocos milisegundos y frenar incluso más rápido que los motores electromagnéticos debido a la fricción elevada entre la parte fija y la parte móvil del motor.
- (4) Buena controlabilidad de la posición y velocidad y alta resolución de desplazamiento.
- (5) No producen interferencia electromagnética.
- (6) Generan bajos niveles de ruido. La banda de frecuencia de funcionamiento de los motores ultrasónicos suele ser arriba de los 20 kHz más allá del alcance de la audición humana.
- (7) Funcionamiento en vacío lo cual los hace aptos para la fabricación de semiconductores [7].

III-B. Desventajas

- (1) Baja eficiencia: Los MUs tienen dos procesos de conversión de energía. El primer proceso convierte energía eléctrica en energía mecánica mediante el efecto piezoeléctrico inverso. El segundo proceso transforma la vibración de la parte fija del motor, en movimiento de la parte móvil por medio de la fricción mecánica. La pérdida de energía surge de estos dos procesos, especialmente en el segundo.
- (2) Una vida operativa corta y un funcionamiento inadecuado en forma continua.
- (3) Tienen requisitos especiales para las señales de control [7].

III-C. Clasificación de los MUs

La Tabla I muestra una clasificación de los MUs de acuerdo a algunas de sus características.

III-D. Motores ultrasónicos lineales

Existen dos clases principales de motores ultrasónicos lineales (MUL) que se clasifican de acuerdo a su principio de accionamiento. La primera clase utiliza el efecto piezoeléctrico directo donde el fenómeno de histéresis es la característica no lineal más sobresaliente de estos motores. La segunda clase basa su operación en el efecto piezoeléctrico inverso. En este caso la fricción mecánica ha sido identificada como el principal problema a tratar. La fuerza de fricción necesita ser compensada adecuadamente para mejorar el comportamiento transitorio y reducir el error de seguimiento [15]. Los MUL se han desarrollado rápidamente en los últimos años y se aplican en las siguientes áreas

- (1) Dispositivos de fabricación de semiconductores.
- (2) Aeronáutica.
- (3) Posicionamiento de alta precisión.
- (4) Miniaturización de los sistemas de información
- (5) Equipo biomédico

Un grupo de motores piezoeléctricos lineales comercialmente disponibles son los llamados dispositivos de micro-empuje. En este caso, los movimientos elípticos de los puntos superficiales de contacto entre la parte fija y móvil del motor se generan por la superposición de los modos de extensión y flexión de las estructuras oscilantes (ver Figura 4). Estos movimientos microscópicos se transforman en un movimiento lineal macroscópico a través de la fricción. La precisión de posición de los motores de micro-empuje está influenciada principalmente por el sistema de medición y la estrategia de control y, por supuesto, está limitada por los efectos de deslizamiento debidos al mecanismo de contacto de la fuerza de fricción [16].

IV. MODELO DEL MOTOR PIEZOELÉCTRICO HR4-K-S3 Y EL CONTROLADOR AB5 DE NANOMOTION LTD

El motor HR4-K-S3 de Nanomotion Ltd es un MU de tipo onda estacionaria y pertenece al grupo de dispositivos de micro-empuje. Además, cuenta con un codificador de posición óptico con una resolución de 50 nm. Cuando estos motores funcionan con un amplificador Nanomotion AB5, su dinámica puede ser descrita de acuerdo al modelo siguiente

$$M\ddot{x} + K_{fv}\dot{x} = K_f(V_{IN} - V_{offset}) \quad (1)$$

Donde:

- M Masa total de la parte móvil del motor incluyendo la carga [kg]
- V_{IN} Voltaje de entrada: ± 10 [V]
- V_{offset} Voltaje aplicado para compensar el desbalance en voltaje causado por el amplificador: 0-2.5 [V]
- K_f Constante de Fuerza: $2-4 \left[\frac{N}{V} \right]$
- K_{fv} Factor de amortiguamiento: $60-72 \left[\frac{N \times s}{m} \right]$
- $K_{fv}\dot{x}$: Fricción viscosa
- \dot{x} : Velocidad
- \ddot{x} : Aceleración

Cabe mencionar que el modelo de fricción viscosa adoptado es muy simple, y es probable que un modelo de fricción más complicado podría ser más conveniente para diseñar controladores que compensen su efecto con el fin de lograr posicionamientos de alta precisión.

V. CONTROLADOR PID

El controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) ha estado en el corazón de la práctica de ingeniería de control durante casi un siglo. La capacidad de los controladores PID para compensar la mayoría de los procesos prácticos ha dado lugar a su amplia aceptación en las aplicaciones industriales. En particular, estos controladores tienen un buen desempeño para procesos con dinámica benigna y requisitos de desempeño moderados [17]. Se propone usar un algoritmo de control tipo PID en donde el objetivo principal es minimizar el error entre la posición deseada y la salida. Entonces la ley de control usada esta dada por la ecuación (2):

$$V_{IN} = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau - K_d \dot{y} \quad (2)$$

Donde e denota el error de posición definido como $e := r - y$, r es la referencia, y la posición medida mediante el codificador de posición óptico y \dot{y} la derivada temporal de la posición.

VI. EXPERIMENTOS EN TIEMPO REAL

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos al aplicar la ley de control PID al motor ultrasónico. Estos se pueden tomar como un punto de partida para el desarrollo de leyes de control para este tipo de sistemas.

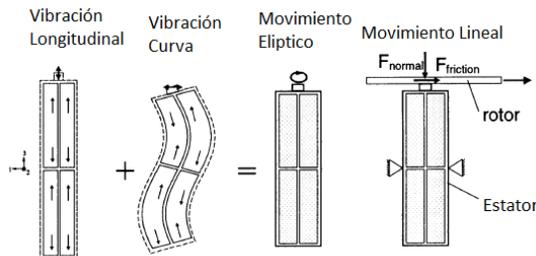


Figura 4: Motor de micro-empuje usando una placa rectangular piezoeléctrica [16].

VI-A. Configuración experimental

La Figura 5 representa la configuración experimental. El prototipo de laboratorio empleado en los experimentos consta de un motor piezoeléctrico, modelo HR4-K-S3 accionado por un amplificador AB5, modelo AB5-TP HR E4 configurado en modo servo, ambos de la compañía Nanomotion Ltd. Un codificador lineal óptico Renishaw RGH24H30D30A con 50 nm de resolución permite medir la posición del motor. El algoritmo PID se implementa utilizando la plataforma de programación MatLab/Simulink bajo el ambiente de control en tiempo real QUARC y una tarjeta de adquisición de datos QPID, estos dos últimos de la marca Quanser Consulting. La señal de control producida por la tarjeta QPID pasa a través de una caja de aislamiento galvánico. La siguiente función de transferencia compuesta por un filtro pasa altas en cascada con un filtro pasa bajas permite obtener estimaciones de la velocidad \dot{y} a partir de las mediciones de posición y

$$G(s) = \frac{300s}{s+300} \cdot \frac{300}{s+300} \quad (3)$$

Los diagramas de Simulink utilizan un período de muestreo de 1 ms y el método de integración Euler-ode1.

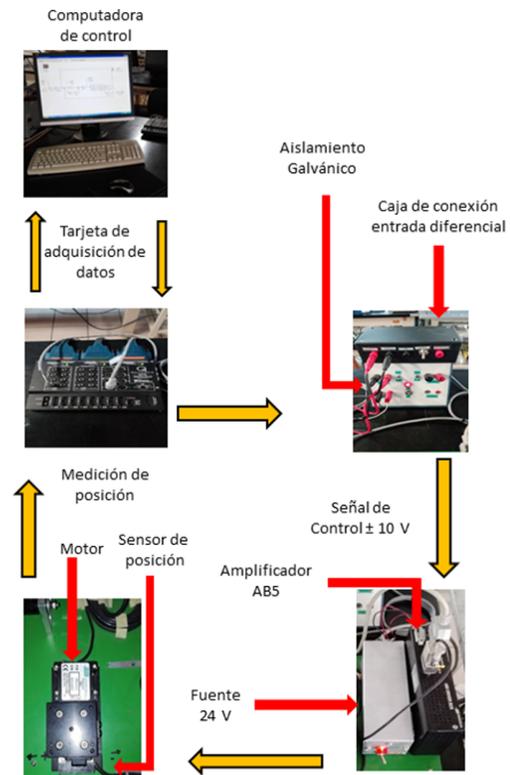


Figura 5: Configuración experimental

VI-B. Resultados experimentales

La tabla II resume los resultados experimentales. Esta muestra la sintonización del controlador PID para cada experimento. Los errores de posicionamiento mostrados en la

tabla corresponden al tiempo $t = 4$ s. Por razones de espacio no se muestran las señales de control. Se agregó una masa de 0.940 kg al motor como carga. Las figuras siguientes muestran la evolución temporal de la posición y del error durante 1 s. Experimento 1: Referencia escalón 0.1 mm=100 μ m. Figura 6 y 7.

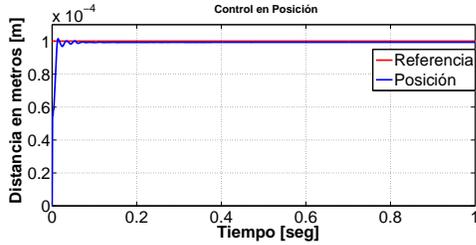


Figura 6: Resultado del control en posición para 0.1mm

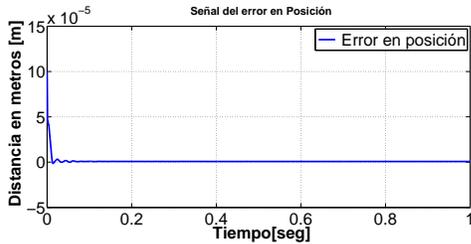


Figura 7: Error en posición para 0.1mm

Experimento 2: Referencia escalón 0.5 mm=500 μ m. Figura 8 y 9.

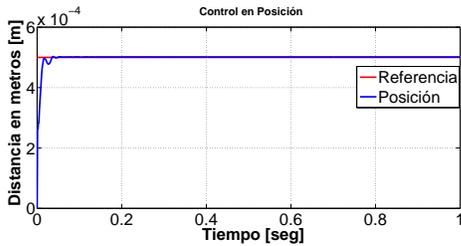


Figura 8: Resultado del control en posición para 0.5 mm

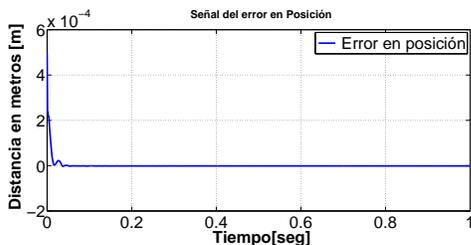


Figura 9: Error en posición 0.5 mm

Experimento 3: Referencia escalón 1 mm. Figura 10 y 11.

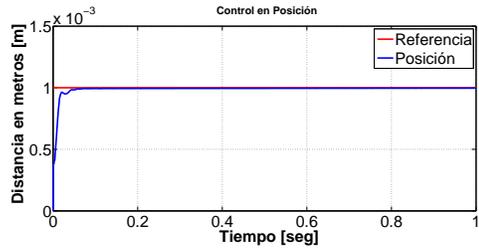


Figura 10: Posición de 1mm

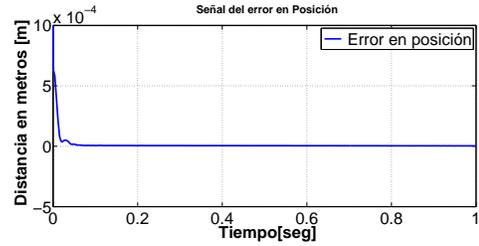


Figura 11: Error en posición para 1mm

Experimento 4: Referencia escalón 10 mm. Figura 12 y 13.

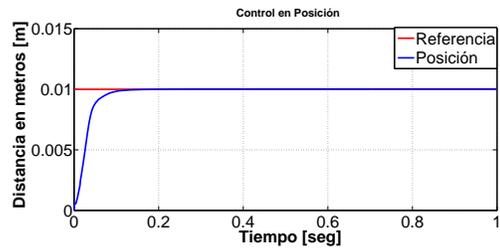


Figura 12: Control en posición 10 mm

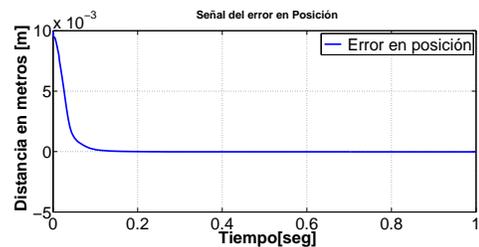


Figura 13: Error en posición 10 mm

Experimento 5: Referencia con perfil de velocidad trapezoidal de 25 mm. Figura 14 y 15.

VI-C. Análisis de los resultados experimentales

De los resultados obtenidos se pueden obtener las conclusiones siguientes. Para desplazamientos de pequeña magnitud es necesario emplear ganancias altas en el controlador PID. En el caso de desplazamiento iguales o mayores a 1 mm, las

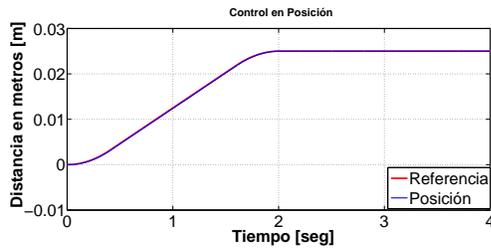


Figura 14: Seguimiento de trayectoria

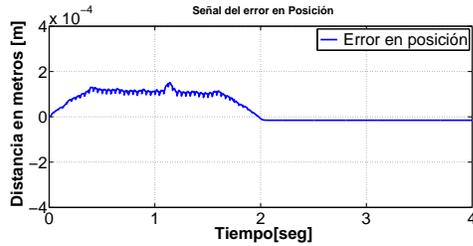


Figura 15: Error de seguimiento de trayectoria

Experimento	Referencia	K_p	K_i	K_d	error
1	0.1 mm	37000	10000	250	$0.5\mu\text{m}$
2	0.5 mm	32000	8000	200	$-1\mu\text{m}$
3	1 mm	9000	4000	100	$0.5\mu\text{m}$
4	10 mm	9000	4000	100	$24\mu\text{m}$
5	25 mm	9000	4000	100	$15\mu\text{m}$

Tabla II: Resultados experimentales

ganancias del controlador PID fueron pequeñas. Una manera de explicar lo anterior es tomando en cuenta la naturaleza no lineal del fenómeno de fricción el cual es parte importante del funcionamiento de un motor ultrasónico. La fricción no lineal produce fuerzas de mayor valor a bajas velocidades comparadas con las fuerza a velocidades mayores[18]. En consecuencia, son necesarias ganancias mayores a bajas velocidades para vencer a las fuerzas de fricción y así lograr errores de posicionamiento pequeños. Por otro lado, si se emplean ganancias elevadas durante desplazamientos grandes, la respuesta del motor es demasiado violenta y es por ello que las ganancias del controlador deben ser más pequeñas en este caso. Notar también que reduciéndose las ganancias se incrementa el valor del error en estado estacionario de manera considerable. En conclusión, un controlador PID clásico no es suficiente para obtener un desempeño aceptable para todas las referencias. Es importante mencionar que en el caso del Experimento 5 se aplicó una referencia con perfil de velocidad trapezoidal con el fin de limitar la velocidad del motor a 250 mm/s: este valor es el máximo recomendado por fabricante para evitar daños al motor.

VII. CONCLUSIÓN

En este artículo se dio un panorama general y estado del arte de los motores ultrasónicos. Se empleó un algoritmo Proporcional Integral Derivativo para la regulación de la posición de un motor ultrasónico de onda estacionaria. Los

experimentos muestran que este controlador no proporciona un desempeño uniforme para todos los valores de desplazamiento. Para desplazamientos pequeños es necesario emplear ganancias mayores comparadas con aquellas empleadas para desplazamiento grandes; los efectos de fricción no lineal a bajas velocidades son los responsables de este comportamiento. El trabajo futuro sobre el control de este tipo de motores debe considerar estos fenómenos para el diseño de leyes de control.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al CONACyT por su apoyo mediante la beca 151190015. Además, agradecen a los ingenieros Gerardo Castro y Jesús Meza por apoyo en el acondicionamiento del prototipo de laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] T. Sashida and T. Kenjo, "Introduction to ultrasonic motors," 1993.
- [2] B. Koc, S. Catagay, and K. Uchino, "A piezoelectric motor using two orthogonal bending modes of a hollow cylinder," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 49, no. 4, pp. 495–500, 2002.
- [3] C.-l. Xia, W.-y. Qi, R. Yang, and T.-n. SHI, "Identification and model reference adaptive control for ultrasonic motor based on rbf neural network," *PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING.*, vol. 24, no. 7, pp. 117–121, 2004.
- [4] F.-J. Lin, "Fuzzy adaptive model-following position control for ultrasonic motor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 261–268, 1997.
- [5] F.-J. Lin, R.-J. Wai, and M.-P. Chen, "Wavelet neural network control for linear ultrasonic motor drive via adaptive sliding-mode technique," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 50, no. 6, pp. 686–698, 2003.
- [6] K. Tanaka, M. Oka, A. Uchibori, Y. Iwata, and H. Morioka, "Precise position control of an ultrasonic motor using the pid controller combined with nn," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 146, no. 3, pp. 46–54, 2004.
- [7] C. Zhao, *Ultrasonic motors: technologies and applications*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [8] J. F. Nye, *Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices*. Oxford university press, 1985.
- [9] W. P. Mason, "Piezoelectricity, its history and applications," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, no. 6, 1981.
- [10] G. Bertotti and I. D. Mayergoyz, *The Science of Hysteresis: 3-volume set*. Academic Press, 2005.
- [11] S. R. Moheimani and A. J. Fleming, "Fundamentals of piezoelectricity," *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, pp. 9–35, 2006.
- [12] K. Spanner, "Survey of the various operating principles of ultrasonic piezomotors," in *Proc. of the international conference Actuator*, 2006.
- [13] T. Maeno, "Recent progress of ultrasonic motors in japan," in *The First International Workshop on Ultrasonic Motors and Actuators*, 2005, pp. 15–17.
- [14] J. Wallaschek, "Piezoelectric ultrasonic motors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 6, no. 1, pp. 71–83, 1995.
- [15] K. Tan, T. H. Lee, and H. X. Zhou, "Micro-positioning of linear-piezoelectric motors based on a learning nonlinear pid controller," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 6, no. 4, pp. 428–436, 2001.
- [16] T. Hemsell and J. Wallaschek, "Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors," *Ultrasonics*, vol. 38, no. 1, pp. 37–40, 2000.
- [17] Q.-G. Wang, "Handbook of pi and pid controller tuning rules, aidan o'dwyer, imperial college press, london, 375pp, isbn 1-86094-342-x, 2003," 2005.
- [18] B. Armstrong-Helouvy, *Control of machines with friction*. Springer Science & Business Media, 2012, vol. 128.

Development of a prototype for the study of stiction

M. C. Rodríguez-Liñán and J. A. Rojas-Quintero
 CONACYT - TecNM/Instituto Tecnológico de Ensenada
 Ensenada, Baja California, México
 Email: mcrodriguez@conacyt.mx
 Email: jarojas@conacyt.mx

E. Bugarin, A. Y. Aguilar-Bustos and A. A. Duarte
 TecNM/Instituto Tecnológico de Ensenada
 Ensenada, Baja California, México
 Email: ebugarin@ite.edu.mx
 Email: aaguilar@ite.edu.mx
 Email: alejandro.duarte@ite.edu.mx

Abstract—This paper introduces a mechanical rig developed to reproduce nonlinearities such as backlash, saturation and stiction, typically found in valve actuators. The platform can be adjusted to produce different nonlinear behaviours by changing the configuration of the mechanism. Our prototype will assist the design of appropriate compensation strategies for such nonlinearities.

I. INTRODUCTION

The term stiction, short for 'static friction', is used to refer to the 'sticking' behaviour of two surfaces when they come into contact. It represents the threshold that must be overcome to separate the objects.

Control valves are the most common type of actuator used in the process industry. However, they often suffer from various problems such as backlash, saturation, and stiction. The presence of these nonlinearities affects the proper behaviour of the valve, it can cause excess energy consumption, rapid wear of components, reduced product quality, etc.

In general, when the valve presents one of the above mentioned nonlinear effects, its behaviour tends to be oscillatory. Moreover, it has been reported that among these nonlinearities, stiction is the most common, causing about 20% to 30% of the observed oscillations, [1]. Therefore, the identification and analysis of stiction, along with the development of its compensation control schemes, are topics of high interest [2], [3].

The study of stiction can be divided into two main problems: identification and modelling, and compensation. Over the years there have been many attempts at obtaining an accurate model for stiction. See [1], [2], [4]–[10], [11]–[14]. Examples of compensation approaches for stiction have been proposed based either on physical or data-driven models. Some examples of the first can be found in [4], which gives an extensive review of existing compensation techniques. Other works in this area are [15]–[19]. Also worth mentioning are control schemes based on data-driven models, such as [11], [20]–[25]. Among the several strategies for compensating stiction, the most common are 'the knocker' and 'dithering', [3], [4]; literature shows some works that are based on one of those two methods, [12], [26].

However, whether it is for analysis, detection or compensation, these works rely on commercially available control valves. The objective of this paper is to present a new laboratory rig designed at the Instituto Tecnológico de Ensenada.

The proposed prototype is based on an experimental setup developed at The University of Manchester to evidence the usage of PID control, and to analyse backlash [27]. This new mechanism adapts the Manchester kit to the study of stiction by including two breaks that can be repositioned by the user as needed. It will allow researchers to analyse stiction and to design appropriate control strategies for this nonlinearity. Moreover, since the breaks are adjustable, different configurations for stiction, or even pure backlash, can be used.

The mechanism was built using equipment and materials already available at the laboratory. It is interfaced with a PC via a Q4 card and a Universal Power Module UPM 180-25B, by Quanser, and it can be programmed in real-time in Simulink[®] (MathWorks[®]).

The paper is organised as follows. Section II describes the typical behaviour of a control valve affected by stiction. Section III describes the proposed mechanism. The experimental results are presented in section IV, and the concluding remarks in section V.

II. STICTION BEHAVIOUR

As mentioned before, there are basically two approaches used to describe stiction: physical models [1], [2], [4]–[6], and data-driven models [7], [9]–[12].

Physical models are written considering the forces acting on the valve. They require the knowledge of several parameters, which are not always easy to measure. Data-driven models, on the other hand, do not need exact knowledge of the valve's parameters; they only need qualitative information of the valve's behaviour. Normally, these models only need one [11], [12] or two parameters, [2], [7], [9], [10].

In what follows, the behaviour of stiction is described following a general two-parameter data-driven model. The parameters S and J indicate whether the valve is stuck or abruptly opened. Additionally, S can be expressed as $f_D + f_S$, where f_D denotes the 'deadband' associated with pure backlash, i.e. when there is no 'slip-jump', and f_S is the 'stickband' plus 'deadband'.

The behaviour of a valve with stiction is presented in Figure 1. It can be divided into three types of movement: a moving phase (represented by lines l_1 and l_2), a sticking phase (section $S = f_D + f_S$), and a slip-jump phase (indicated by J). Referring to Figure 1, if the valve is initially at rest at point 1, stiction will prevent it from moving linearly along the ideal

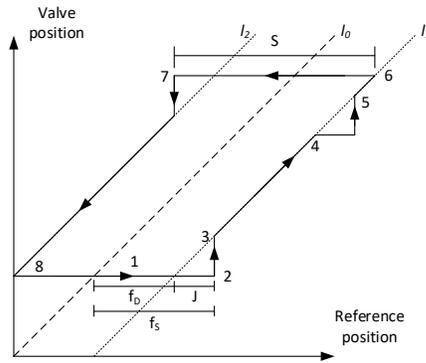


Figure 1. Valve Stiction. Points 1 to 8 represent different instants in the sticking valve's behaviour, while line l_0 identifies the ideal behaviour, when the valve does not stick.

line l_0 . Once the valve input is strong enough to overcome stiction (point 2), the valve is abruptly opened, generating a jump $J = f_S - f_D$ (point 3). The valve, now released, follows the input along line l_1 , unless it gets stuck again (point 4). Point 6 represents the instant when the input changes direction to close the valve. Because of stiction, the valve will not move for a lapse $S = f_D + f_S$. When the force is large enough, the valve will move (point 7) with a jump J . If there are no other obstacles along the way, the valve will continue moving along line l_2 .

In absence of 'stick-band', the valve behaves as if affected by pure backlash (represented by f_D). Backlash is a dynamic nonlinearity with memory, which means that both the input's value and its derivative determine the output. When backlash is present in an actuator's input, the output is delayed and some of the information is lost. In figure 1, if the valve is initially at rest (point 1) and increases its value (but is less than f_D), the valve will remain static until the reference is big enough to initiate movement. If the input keeps increasing, the valve will follow along line l_1 until the input changes direction (decreases). Once again, due to backlash, the valve will stay at its previous position while the input is inside the 'deadband'. At this point, if the reference keeps decreasing, it will eventually exit the 'deadband' and the valve will move linearly along line l_2 .

III. EXPERIMENTAL PLATFORM DESCRIPTION

The proposed mechanism aims to replicate the stiction nonlinearity commonly observed in valve actuators motion control. During the design process, four main characteristics were identified as desirable:

- 1) An *oscillatory behaviour* is necessary to comply with the ideal valve operation. The mechanism is required to properly react to oscillatory inputs.
- 2) A *sufficiently long range of motion* allows a proper observation of the nonlinearity.
- 3) *Ease of implementation* in order to avoid long design periods. The idea is to focus on the study rather than the platform development process.

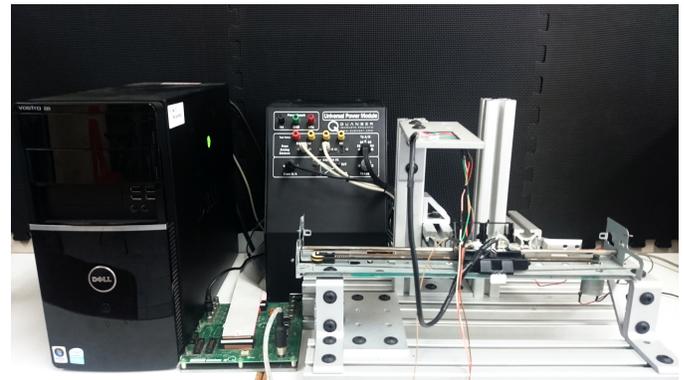


Figure 2. Experimental platform. From left to right this figure shows the CPU, a Quanser Q4 terminal board, a Quanser Universal Power Module and our experimental platform with the print head.

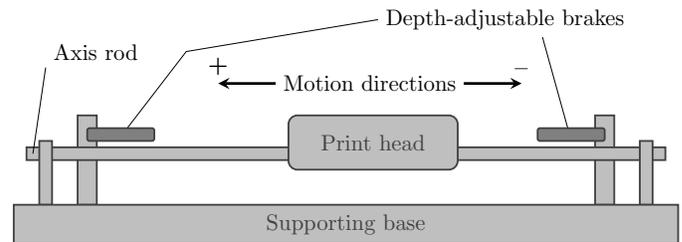


Figure 3. Experimental platform schematics. The print head is able to perform oscillatory motions along the axis rod. Brakes can be strategically positioned also along the axis as well, and their depth can be adjusted at will.

- 4) *Adjustable brakes* are desired in order to produce a varying stiction effect. One should be able to tighten them at will in order to render various cases such as: pure backlash (brakes absence), or mild or severe stiction; at one or both end positions.

Our experimental platform (see figure 2) is inspired by a printer kit developed at The University of Manchester [27]. Note that that device is not intended for studying the stiction phenomenon. To the authors knowledge, there are no other similar platforms providing the above features, intended for stiction study.

By using a print head as a control mechanism, our design complies with characteristic 1) (a print head is specifically designed for horizontal back-and-forth type of motion). Characteristic 2) can be met via an adequate printer size. Figure 3 shows a schematic of our design and its main features. In our case, the maximum range of motion can be of 330 mm along the main axis and the brakes can be positioned anywhere along this axis.

Characteristic 3) was achieved by working with extruded aluminium profiles. Such profiles have the advantage of being highly modular; therefore, the whole frame of our experimental platform was constructed in this fashion. The overall construction proved to be robust. In addition, most extruded aluminium (or other metals) profile vendors provide with numerous compatible accessories. As a result, we were able to find a suitable accessory element which fits the needs of

characteristic 4), simplifying the design process even more. This last element was employed as an depth-adjustable brake. As this break can be repositioned to obtain a desired level of stiction (or pure backlash), the platform permits the study of these two nonlinearities. Furthermore, the DC motor used to drive the print head has an inherent saturation (a minimum and maximum operating level), which, when not properly compensated, can cause instability or poor performance of the controller. Then, the mechanism can also be used in experiments for saturation compensation.

One of the objectives of this platform is to control the print head position according to a desired reference. Therefore, the mechanism is equipped with a quadrature encoder. The print head is actuated by a 12 V DC motor. Transmission is achieved with a belt, allowing for a range of motion along the whole axis rod. The controllers can be programmed in real-time in a PC using Simulink® from MathWorks®. A Quanser Q4 card is employed to communicate and provide feedback to the PC. Additionally, a Quanser Universal Power Module is used to power the DC motor.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

To evaluate the adequacy of the platform, a series of experiments, with different brake configurations is performed. These were conducted to demonstrate the modularity of our device. It should be noted that in all experiments the sampling period is set to 1 ms (strict) and the reference is a sinusoidal signal. A proportional controller, with a gain of 500, and a saturation of ± 10 V is used in the control signal.

- **Experiment 1** It is assumed that no stiction is affecting the mechanism, so the head can move freely along the axis rod. In this case, the print head is released from both brakes.
- **Experiments 2 and 3** In these exercises, it is assumed that stiction is present either at the right end (Experiment 2) or at the left end (Experiment 3) of the rod. In other words, only one brake (right or left) is used.
- **Experiment 4** Stiction is assumed to be at the center of the rail. Only one brake is used in this case.
- **Experiment 5** Stiction is assumed to affect both ends of the run. Brakes are located at the extremes of the axis rod.

The brakes in experiments 2 through 5 are fixed at two positions, tight or loose, to simulate the effect of varying stiction intensities.

Remark Note that in the following figures, the *right* is in the negative domain (refer to figure 3).

Experiment 1. In this example, since none of the brakes was used, no stiction affects the plant. However, the system is inherently nonlinear, as is evidenced in figures 4 and 5, where it can be observed that the plant is affected by backlash.

Experiment 2. The stiction is present only at the right end of the printer rail. To show the flexibility of the mechanism, two cases are reported: mild stiction and severe stiction. The results of these experiments are shown in figures 6 to 8.

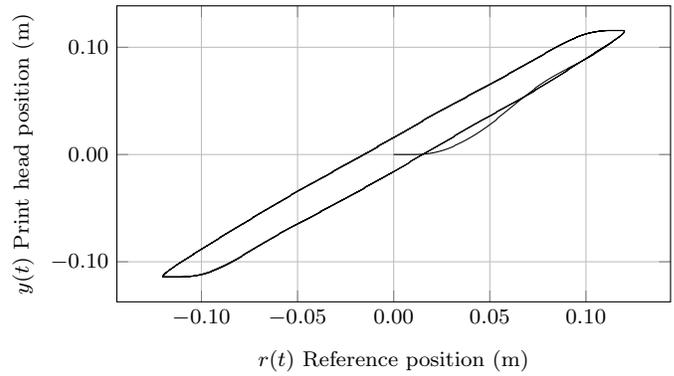


Figure 4. **Experiment 1. No stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Note the backlash nonlinearity presence on print head.

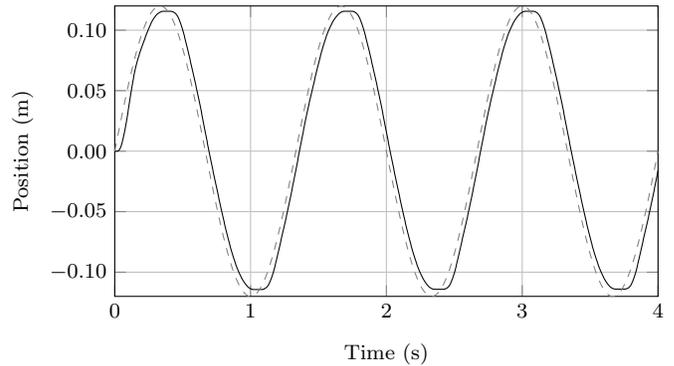


Figure 5. **Experiment 1. No stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Note the backlash nonlinearity presence on print head. In the figure, the dashed is the reference, and the solid line is the output.

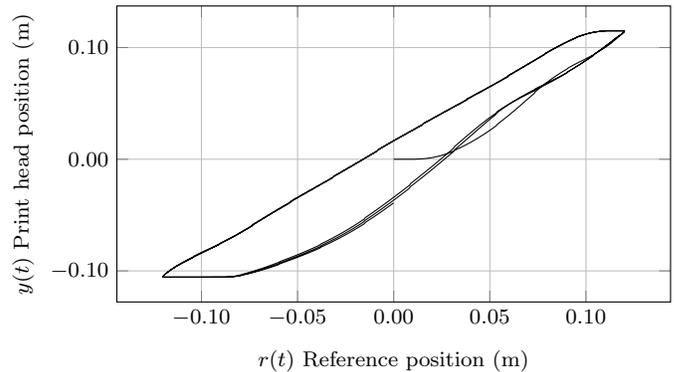


Figure 6. **Experiment 2. Mild stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is affecting only the right end of the rod.

Experiment 3 Now, the stiction is present only at the left end of the rail. Similar to experiment 2, the brake is adjusted to obtain a mild or severe stiction. Figure 10 shows the input–output relation obtained for mild stiction, and figure 12 shows the results for severe stiction. Additionally, figures 11 and 13 show the time variations for mild and severe stiction, respectively.

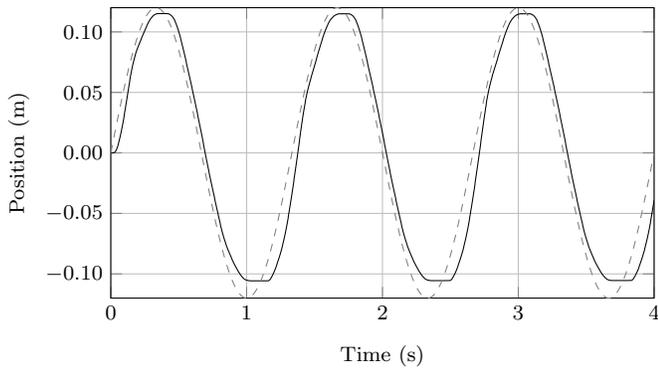


Figure 7. **Experiment 2. Mild stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is affecting only the right end of the rod. In the figure, the dashed line represents the reference, and the solid line the output.

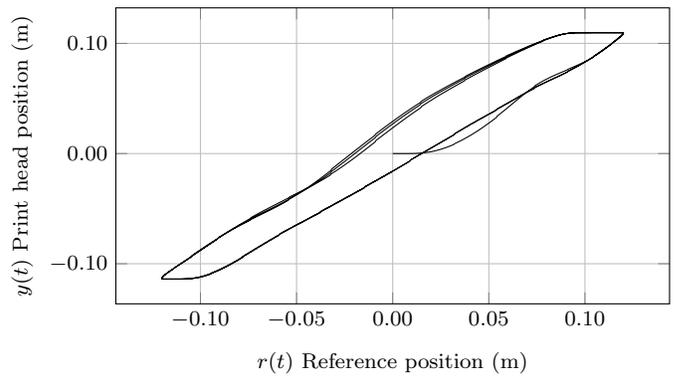


Figure 10. **Experiment 3. Mild stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is affecting only the left end of the rod.

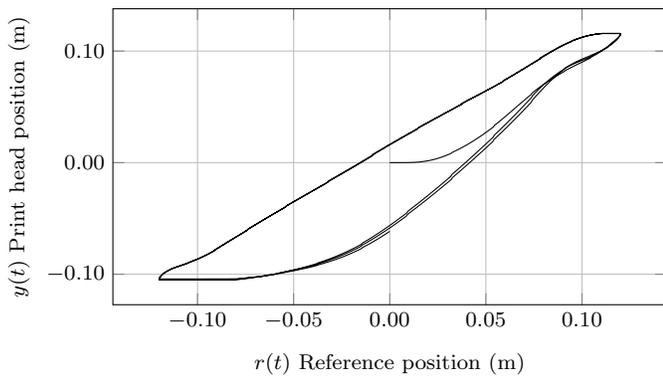


Figure 8. **Experiment 2. Severe stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is affecting only the right end of the rod.

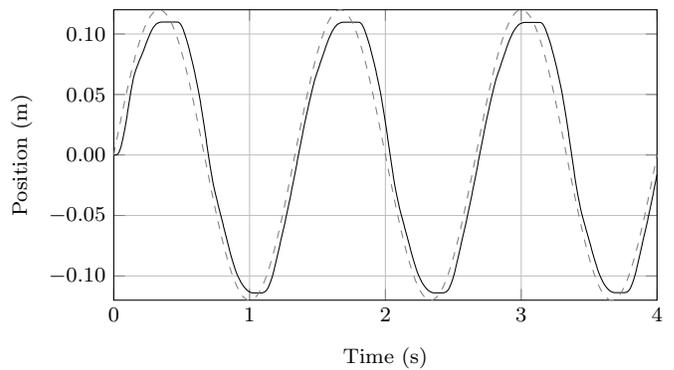


Figure 11. **Experiment 3. Mild stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is affecting only the left end of the rod. The dashed line represents the reference, and the solid line the output.

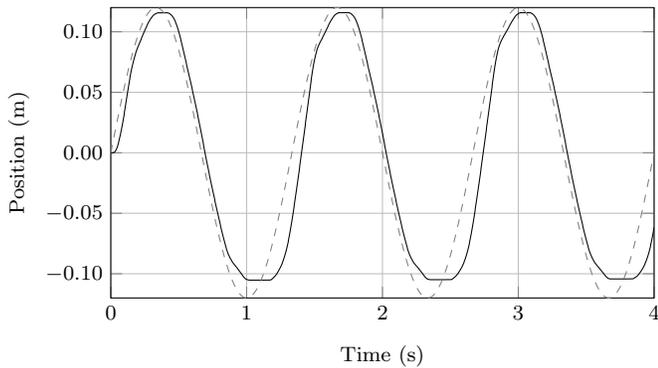


Figure 9. **Experiment 2. Severe stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is affecting only the right end of the rod. In the figure, the dashed line represents the reference, and the solid line the output.

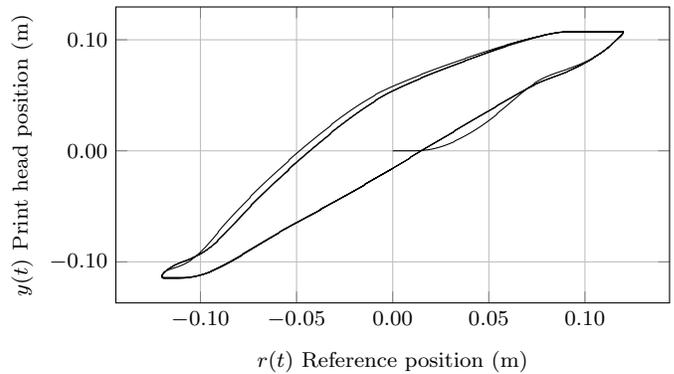


Figure 12. **Experiment 3. Severe stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is affecting only the left end of the rod.

Experiment 4 One of the brakes is fixed so that stiction is present only at the center of the rail. Figures 14 and 15 show the reference versus output response and the time evolution of the plant when the brake is loosened to produce mild stiction. Then, the brake is tightened to obtain a severe nonlinearity, results are presented in figures 16 and 17.

Experiment 5 Finally, to simulate the case when stiction is present at each end of the rail, both brakes are fixed to produce mild or severe stiction. Figures 18 through 21 show the results obtained in each case.

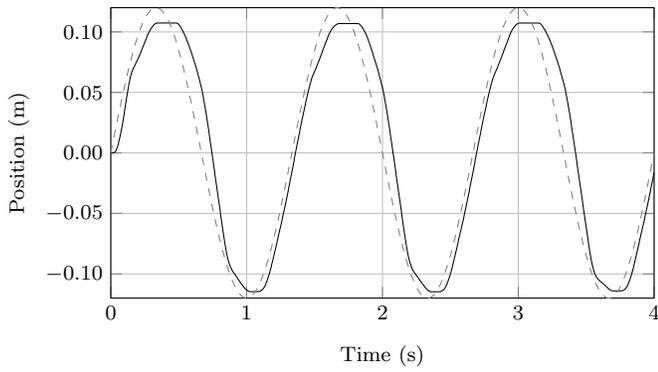


Figure 13. **Experiment 3. Severe stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is affecting only the left end of the rod. The dashed line represents the reference, and the solid line the output.

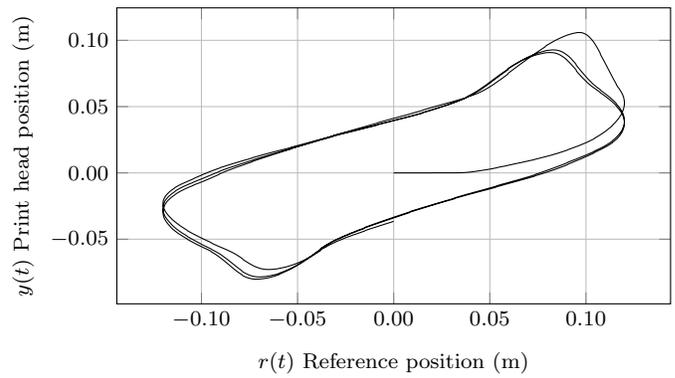


Figure 16. **Experiment 4. Severe stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is at the center of the rod.

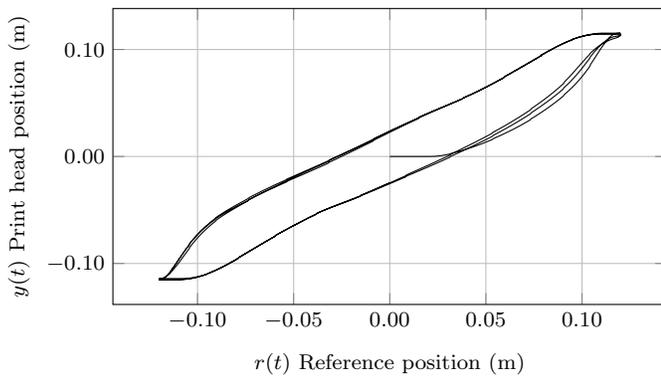


Figure 14. **Experiment 4. Mild stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is present at the center of the rod.

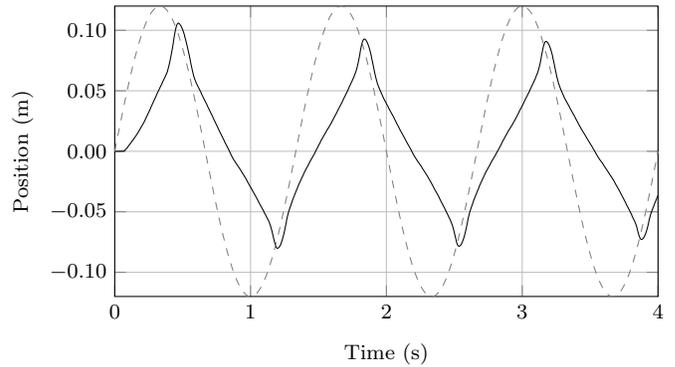


Figure 17. **Experiment 4. Severe stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is at the center of the rod. The dashed line represents the reference, and the solid line the output.

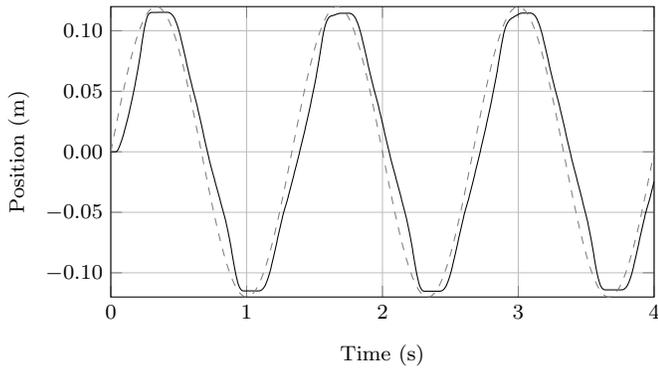


Figure 15. **Experiment 4. Mild stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is present at the center of the rod. The dashed line represents the reference, and the solid line the output.

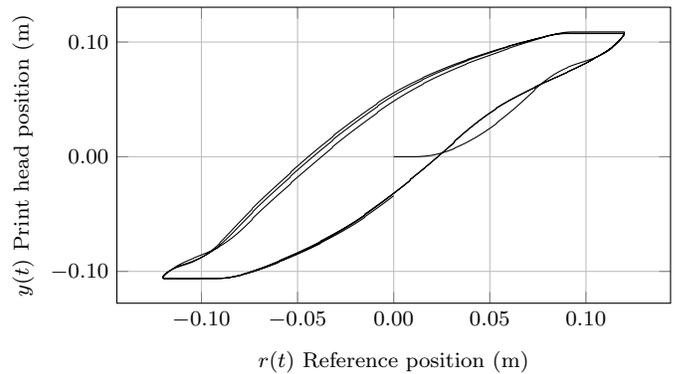


Figure 18. **Experiment 5. Mild stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is present at both extremes.

V. CONCLUSIONS

This paper introduced the development of a new mechanism to replicate the stiction nonlinearity present at control valves. The results shown here evidenced that our proposed experimental platform succeeds at reproducing such nonlinearity.

The proposed plant offers a solution that is modular, low-cost, and easy-to-implement. In the future, these features

will permit to analyse and detect nonlinear behaviours, and to design novel control strategies for saturation, backlash, and stiction nonlinearities. In particular, it will allow further research in open problems, such as detection and proper compensation of stiction. In this sense, the mechanism presented here provides a wide range of possible experimentations.

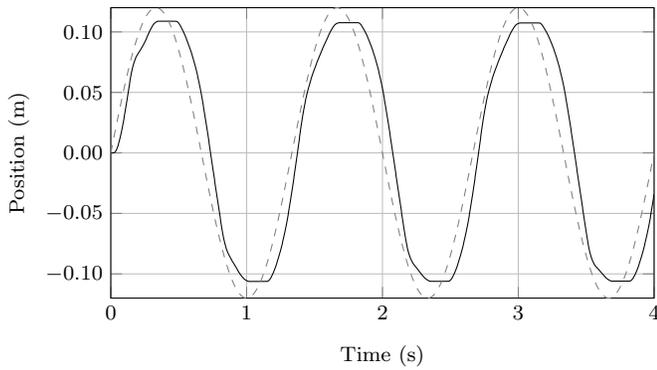


Figure 19. **Experiment 5. Mild stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is present at both extremes. The dashed line represents the reference, and the solid line the output.

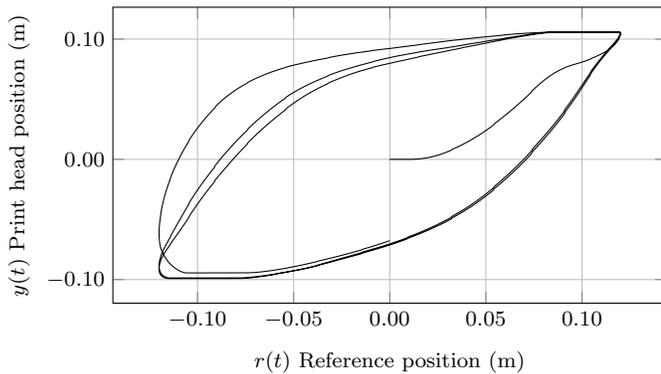


Figure 20. **Experiment 5. Severe stiction.** Actual print head position versus reference signal during 4 seconds. Stiction is present at both extremes.

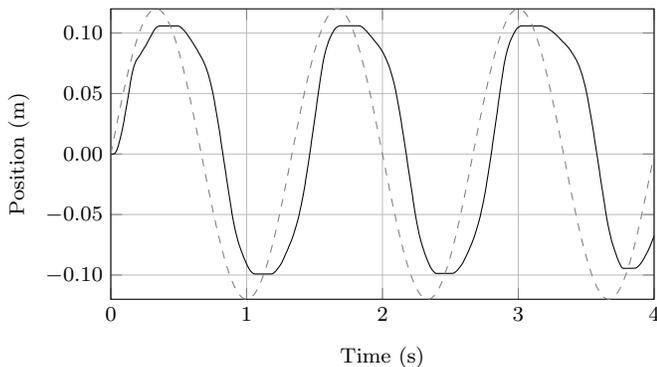


Figure 21. **Experiment 5. Severe stiction.** Time evolution of the reference position and print head actual position. Stiction is at both extremes. In the figure, the dashed line represents the reference, and the solid line the output.

VI. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge the support provided by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico de Ensenada (ITE) and PRODEP institutions.

REFERENCES

[1] M. Jelali and B. Huang, Eds., *Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods*. Springer-Verlag

London, 2010.

[2] M. Choudhury, N. Thornhill, and S. Shah, “Modelling valve stiction,” *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 5, pp. 641–658, 2005.

[3] T. Häggglund, “A friction compensator for pneumatic control valves,” *J. Process Control*, vol. 12, pp. 897–904, 2002.

[4] B. Armstrong-Hélouvy and C. Dupont, P. ad Canudas-de-Wit, “A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction,” *Automatica*, vol. 30, pp. 1083–1138, 1993.

[5] K. Astrom, “Control of systems with friction,” 1998, pp. 25–32.

[6] H. Olsson, “Control of systems with friction,” PhD Thesis, Lund University, 1996.

[7] S. Chen, K. Tan, and S. Huang, “Two-layer binary tree data-driven model for valve stiction,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, pp. 2842–2848, 2008.

[8] M. Choudhury, N. Thornhill, and S. Shah, “A data driven model for valve stiction,” 2003.

[9] Q. He, J. Wang, M. Pottmann, and S. Qin, “A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, pp. 4549–4560, 2007.

[10] M. Kano, H. Maruta, H. Kugemoto, and K. Shimizu, “Practical model and detection algorithm for valve stiction,” 2004, pp. 5–7.

[11] L. Ivan and S. Lakshminarayanan, “A new unified approach to valve stiction quantification and compensation,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, pp. 3474–3483, 2009.

[12] R. Srinivasan and R. Rengaswamy, “Approaches for efficient stiction compensation in process control valves,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 218–229, 2008.

[13] H. Zabiri and N. Mazuki, “A black-box approach in modelling valve stiction,” *World Academy of Science, Engineering & Technology*, vol. 68, pp. 264–271, 2010.

[14] R. Bacci di Capaci, C. Scali, and G. Pannochia, “System identification applied to stiction quantification in industrial control loops: A comparative study,” *Journal of Process Control*, vol. 46, pp. 11–23, 2016.

[15] A. Kayihann and F. Doyle, “Friction compensation for a process control valve,” *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 799–812, 2000.

[16] L. Mostefai, M. Denai, and Y. Hori, “Fuzzy observer-based control of servomechanisms subject to friction dynamics,” 2007, pp. 328–332.

[17] P. Lischinsky, C. Canudas-de Wit, and G. Morel, “Friction compensation for an industrial hydraulic robot,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, pp. 25–32, 1999.

[18] R. Šelmić and F. Lewis, “Neural network approximation of piecewise continuous functions: application to friction compensation,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 13, no. 3, pp. 745–751, 2002.

[19] H. Durand and P. Christofides, “Actuator stiction compensation via model predictive control for nonlinear processes,” *AIChE*, vol. 62, no. 6, pp. 2004–2023, 2016.

[20] M. Farenzena and J. Trierweiler, “Modified pi controller for stiction compensation,” vol. 43, 2010, pp. 799–804.

[21] M. De Souza, C. Munaro, and S. Munareto, “Improved stiction compensation in pneumatic control valves,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 106–114, 2012.

[22] J. W. V. Dambros, M. Farenzena, and J. Trierweiler, “Data-based method to diagnose valve stiction with variable reference signal,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, pp. 10316–10327, 2016.

[23] L. Fang, J. Wang, X. Tan, and Q. Shang, “Analysis and compensation of control valve stiction-induced limit cycles,” 2016, pp. 1688–1693.

[24] M. C. Rodríguez-Liñán and W. P. Heath, “MPC for plants subject to saturation and deadzone, backlash or stiction,” in *IFAC Conference NMPC’12*, vol. 4 Pt. 1, 2012, pp. 418–423.

[25] M. C. Rodríguez-Liñán, “New control design and analysis techniques for plants with actuator nonlinearities,” PhD thesis, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, 2013.

[26] M. A. Mohammad and B. Huang, “Compensation of control valve stiction through controller tuning,” *Journal of Process Control*, vol. 22, pp. 1800–1819, 2012.

[27] W. P. Heath, P. M. Onel, O. and Green, B. Lennox, Z. Gai, Z. He, and M. C. Rodríguez-Liñán, “Developing a student-focused undergraduate laboratory,” *Int. J. Elec. Eng. Educ.*, vol. 50, no. 3, 2013.

Modelado Matemático de un Sistema Modular Interconectable para formar un Controlador PID de Tipo Didáctico.

J. Z. García Cortés, A. Mireles Medina, J. F. Carrillo
García, U. Ramirez Ordaz

Departamento de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte
Rio Grande, Zacatecas, México
profejulioz@hotmail.com; mirelesmed_7@hotmail.com;
carrillogarciafj@yahoo.com.mx;
uba_ramirez@yahoo.com.mx

Resumen— En este trabajo se documenta el modelado matemático de un prototipo que consiste en cuatro módulos didácticos que, junto con un horno eléctrico forman un sistema de control de temperatura. El enfoque es didáctico, con lo que se pretende mejorar los procesos de enseñanza - aprendizaje en las asignaturas de control automático. Se identificó un modelo matemático que representa el sistema de control modular propuesto y se realizaron pruebas de estabilidad en MatLab. Los resultados fueron aceptables e ilustrativos. Se cuenta con una herramienta didáctica para interesar a los Alumnos en el estudio de estos temas.

Palabras Clave— *Modelado matemático, Control, PID, Proceso enseñanza - aprendizaje.*

Abstract—In this paper the mathematical modeling of a prototype is documented. It consists of four teaching modules, an electric furnace with forming a temperature control system. The intention is didactic, which aims to improve the teaching - learning process in automatic control. A mathematical model was identified that representing the proposed modular control system. Stability tests were performed in MatLab. The results were acceptable and illustrative. It has an educational tool to engage students in the study of these issues.

Keywords—*Mathematical Model, Control, PID, Teaching - Learning Process*

I. INTRODUCCIÓN

El Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte de Río Grande, Zac., requiere de prototipos didácticos que permitan tanto a profesores y estudiantes realizar prácticas de laboratorio de una acción de control real en lo que compete a la ingeniería de control; de modo que una vez diseñados estos prototipos, con el uso de modelos matemáticos el estudiante pueda obtener su propio análisis por medio de un software de simulación denominado MatLab. Para ello en el presente artículo se considera que los modelos permiten a los individuos hacer inferencias y predicciones, entender los

fenómenos, decidir las acciones a tomar y controlar su ejecución. Este es el sentido de "working model" [1]. Mientras que un modelo matemático de un fenómeno o situación problema, es un conjunto de símbolos y relaciones matemáticas que representa, de alguna manera, el fenómeno en cuestión [2].

Como ya se ha mencionado existen asignaturas que son un tanto complejas como es propiamente la ingeniería de control, que es donde se pretende desarrollar un prototipo didáctico que haga el uso de un modelo matemático en un sistema modular interconectable para formar un controlador PID, que sea altamente didáctico, de tal manera que el estudiante sea más autodidacta y se le facilite la adquisición del conocimiento. Un prototipo didáctico tiene una ventaja cuantitativa muy interesante, que es considerablemente los bajos costos que implica su elaboración, así mismo, apoya al estudiante por ser una herramienta que permite la demostración de una realidad dada a una simple simulación [3].

El estudiante al hacer uso de un prototipo didáctico en la ingeniería de control le dará la libertad de ser crítico con respecto de las decisiones que tiene que estar tomando diariamente. Y de esta forma se logre un aprendizaje significativo. Los modelos matemáticos son herramientas relevantes para representar una realidad que puede ser manipulable sin tener repercusiones riesgosas. Estos pueden ser de forma gráfica o en forma de un ejemplo que le conlleve la simulación.

Lo que se pretende es hacer representaciones de los problemas de la realidad, entre otras cosas el modelo matemático permite hacer predicciones con respecto de los sucesos que se van presentando en un entorno determinado.

Por otro lado, un prototipo didáctico es una herramienta pedagógica que puede facilitar el aprendizaje de los estudiantes y más aún un prototipo que es un elemento imprescindible para efectuar diferentes pruebas y de esta

forma obtener resultados esperados para la toma de decisiones.

Hacer uso de modelo matemático conlleva el ahorro en dos variables muy importantes como son: el tiempo y los costos. Ya que traerá mejores beneficios al proceso enseñanza-aprendizaje, efectuar las simulaciones que representan la realidad. Por otro lado, un prototipo didáctico es menos costoso que un equipo comercial con todos sus elementos y herramientas de trabajo.

De esta forma el estudiante pueda comprender los sistemas mecatrónicos del controlador PID por medio de dicho prototipo. La mecatrónica hoy en día ha tornado una importancia impredecible en el área de ingeniería, debido a la combinación de tres esferas inherentes a esta como son la informática, electrónica y mecánica [4].

Además, es relevante abordar lo que significa un sistema mecatrónico que no es más que aquel que recoge señales, las procesa y, como salida, genera fuerzas y movimientos [4]. Un sistema mecatrónico requiere invariablemente un esfuerzo multidisciplinario en donde se coordinen y trabajen concurrentemente los diferentes equipos de trabajo [5], con los cuales el docente imparte la asignatura de ingeniería de control

Por lo tanto, se ha determinado el modelo matemático de un módulo de instrumentación, un módulo de control, un módulo de potencia y un horno eléctrico, de forma que al interconectarlos formen un sistema de control PID para controlar la temperatura del mismo. Lo anterior a manera de prototipo didáctico, donde el estudiante pueda practicar una y otra vez y efectuar su análisis correspondiente cada vez que así lo requiera.

Por último, hacer énfasis en el uso de los modelos matemáticos para solución de problemas es una sugerencia viable para que el estudiante antes de enfrentarse a la realidad haga predicciones [6] simulaciones y análisis; que le lleve a adquirir un conocimiento fundamental para devolverse posteriormente en una aplicación real.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Conceptualización del Controlador Modular

La Fig. 1, muestra el diagrama de bloques de un sistema para controlar la temperatura interior de un horno eléctrico de mufla. Dentro de este sistema, se integran los módulos didácticos intercambiables objeto del presente trabajo.

El conjunto del controlador modular consta de cuatro módulos: El módulo de Alimentación o fuente de energía, el módulo de Instrumentación, el módulo del control y el módulo de potencia. También se requiere de un multímetro, de preferencia con interfaz para PC, para registrar principalmente el voltaje que representa la temperatura interior del horno y grabarla en tiempo real.

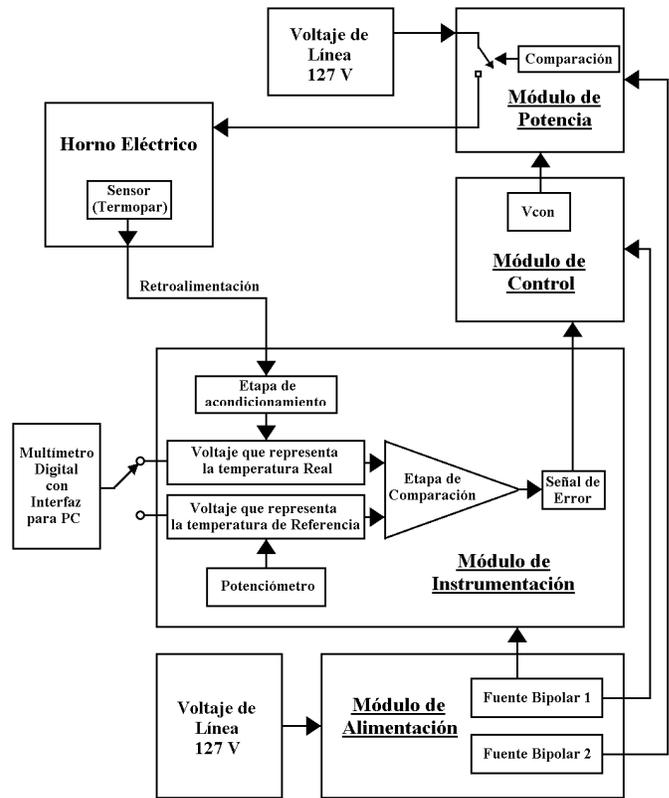


Fig. 1. Diagrama de bloques del diseño del controlador.

B. Descripción de la planta piloto

Como ya se mencionó, este proyecto está enfocado a controlar la temperatura de un horno que calienta mediante resistencia eléctrica; Fotografías del horno se muestran en la Fig. 2.



Fig. 2. Fotografías del horno eléctrico abierto y cerrado.

El horno eléctrico de mufla funciona a 127 Voltios, y consume 6 Amperios.

En la Fig. 3, se muestra la curva de reacción obtenida de forma experimental [7] en una prueba de lazo abierto.

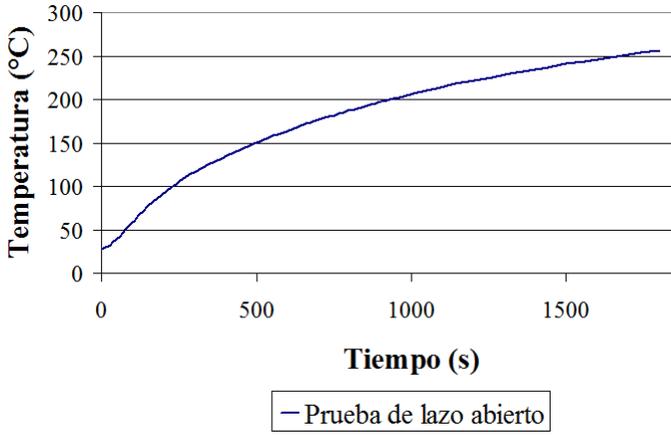


Fig. 3. Curva de reacción del horno eléctrico en lazo abierto.

C. Algoritmo de Control PID

En la Fig. 4 se muestra una estructura de control PID implementada mediante amplificadores operacionales propuesta en [8].

El autor explica que el segundo AO funciona como inversor de signo y como ajustador de ganancia.

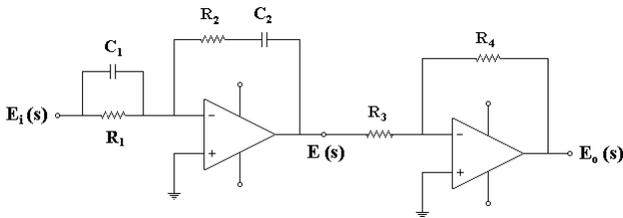


Fig. 4. Estructura PID propuesta por K. Ogata

Tomando como referencia el circuito de la Fig. 4, La función de transferencia que resulta de su análisis es la ecuación (1).

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4(R_1C_1 + R_2C_2)}{R_3R_1C_2} \left[1 + \frac{1}{(R_1C_1 + R_2C_2)s} + \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1 + R_2C_2}s \right] \quad (1)$$

La ecuación (2) es el esquema que corresponde a esta estructura, en [9] es llamado: “controlador PID ideal”. Cuando el controlador se expresa con la función de transferencia canónica de la ecuación (2), Kp se denomina ganancia proporcional, Ti tiempo integral y Td tiempo derivativo [10].

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_p \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s \right) \quad (2)$$

A partir de la ecuación (1), se obtiene que la ganancia proporcional Kp, el tiempo integral Ti y el tiempo derivativo Td son:

$$K_p = \frac{R_4(R_1C_1 + R_2C_2)}{R_3R_1C_2} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{1}{R_1C_1 + R_2C_2} \quad (4)$$

$$T_d = \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1 + R_2C_2} \quad (5)$$

El esquema de control PID ideal, también puede expresarse mediante la función de transferencia canónica mostrada en (6), en este caso, Kp se denomina ganancia proporcional, Ki ganancia integral y Kd ganancia derivativa [10].

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

Para éste controlador:

$$K_p = \frac{R_4(R_1C_1 + R_2C_2)}{R_3R_1C_2} \quad (7)$$

$$K_i = \frac{R_4}{R_3R_1C_2} \quad (8)$$

$$K_d = \frac{R_4R_2C_1}{R_3} \quad (9)$$

D. Método de Control por Paquetes

Para entregar la energía eléctrica a las resistencias del horno eléctrico, se está utilizando el método de control por paquetes; éste es un método que en [11] es llamado “Principio de control encendido - apagado”; también es conocido como “Paquetes de onda”, “on-off”, “Modulación discontinua”, “Tiempo de ciclo”, etc. [12]. Este tipo de control se usa en aplicaciones con una gran inercia mecánica y alta constante de tiempo térmico (como en calefacción industrial y control de velocidad de motores). El voltaje sinusoidal de entrada se conecta con la carga durante “n” ciclos y se desconecta durante “m” ciclos de un periodo “T”. El concepto del método se ilustra en la Fig. 5, los ciclos del voltaje de c.a. que están iluminados de negro representan los ciclos que llevan energía a la carga (n), mientras que los iluminados de blanco representan los ciclos que no se entrega energía a la carga (m).

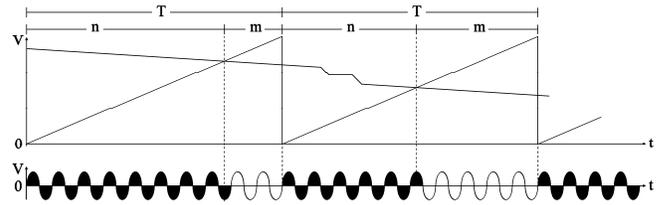


Fig. 5. Concepto del método de control por paquetes.

En este trabajo, el método se implementa comparando un voltaje de control (Vcon), contra un voltaje rampa (Vrampa) mediante un circuito con A.O. como el mostrado en la Fig. 6. El resultado se ilustra en la Fig. 7.

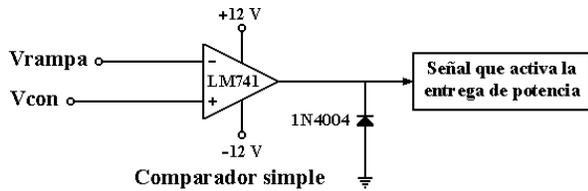


Fig. 6. Etapa de comparación.

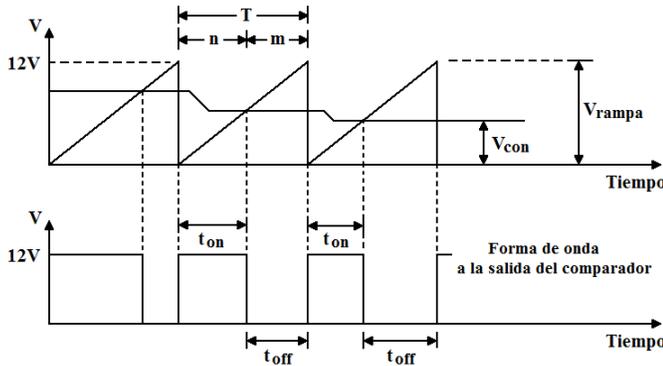


Fig. 7. Resultado de la comparación entre Vcon y Vrampa.

III. DESARROLLO

A. Diseño del Módulo de Fuente de Energía

La Fig. 8, muestra el circuito que se diseñó para construir una fuente de voltaje bipolar para proporcionar energía al resto de los módulos. Nótese que un mismo transformador con derivación central es utilizado para alimentar dos fuentes de alimentación bipolar independientes de $\pm 12V$. Una de estas fuentes bipolares será utilizada para energizar dos módulos, el de instrumentación y el del controlador PID. Por otra parte, la segunda fuente bipolar se usa para energizar el módulo de potencia, ya que este módulo contiene una etapa donde el voltaje tiene variaciones que afectan el funcionamiento de los otros módulos a causa de las perturbaciones que genera.

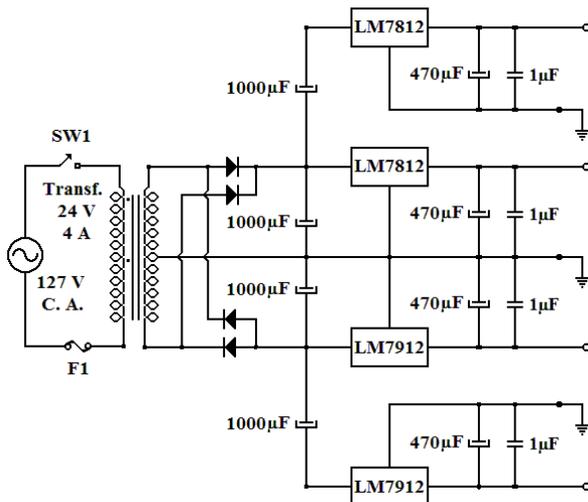


Fig. 8. Circuito del módulo de alimentación bipolar.

La fuente de energía es un elemento activo dentro del sistema de control que proporciona energía a los demás módulos; si se supone que con ayuda de los reguladores de voltaje y los filtros, los niveles de voltaje y corriente son estables, para los fines de este trabajo se establece que este módulo no requiere modelación matemática.

B. Diseño y Modelado del Módulo de Instrumentación

El módulo de instrumentación está compuesto de tres partes. Una etapa de adquisición de señal que genera un voltaje que representa la temperatura interior del horno de mufla, que en este trabajo es la variable controlada y se denota por " V_M "; otra etapa que genera un voltaje que representa la temperatura de referencia " V_R ", y un voltímetro como dispositivo de medición y lectura. La temperatura interior del horno eléctrico se registra mediante un transductor, en este caso, un termopar tipo "J"; luego se envía la señal de la temperatura registrada a un circuito que la amplifica utilizando un AO OP07 y la compensa mediante un sensor LM35 [13]. La Fig. 9, muestra el circuito del cual se obtiene el voltaje que representa la temperatura interior del horno eléctrico, de forma que 1mV corresponde a $1^\circ C$ [14]. Este voltaje se puede monitorear mediante un voltímetro; como el transductor tiene su etapa de acondicionamiento, el voltímetro no requiere de algún ajuste en especial para indicar la temperatura [15].

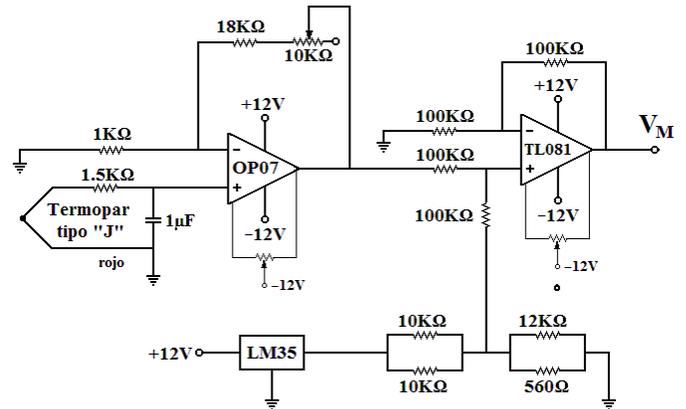


Fig. 9. Circuito que amplifica y compensa el voltaje del termopar.

La Fig. 10, muestra el circuito que se diseñó para generar un voltaje que represente la temperatura de referencia, en la misma escala de voltaje del empleado para representar la temperatura del horno eléctrico, para de ésta forma, poderlos comparar. El voltaje de referencia se sostiene mediante un seguidor de voltaje implementado con un AO LM741 y también puede medirse en el mismo voltímetro utilizando un mecanismo de interrupción de 2 polos y 2 tiros.

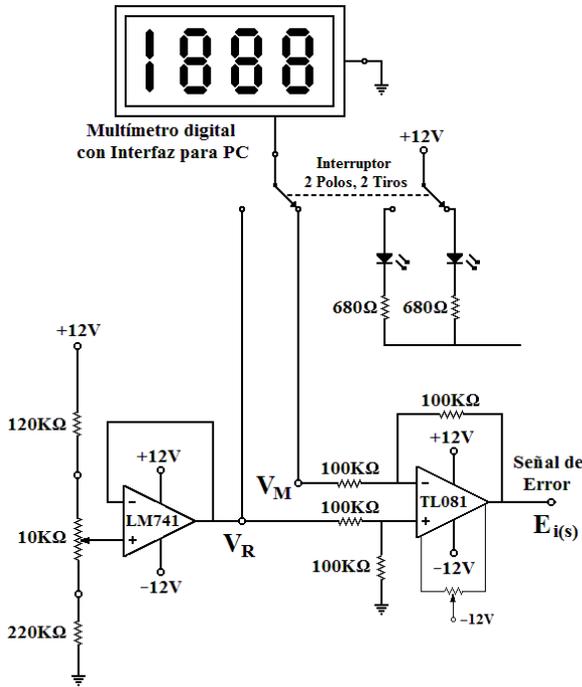


Fig. 10. Circuito selector de referencia, visualización y comparación.

La Fig. 10 también muestra el circuito de comparación diferencial para obtener la señal de error denominada $E_i(s)$.

El modelo matemático simplificado que corresponde a los circuitos de las Fig. 9 y 10 es:

$$E_i(s) = V_R(s) - V_M(s) \quad (10)$$

C. Diseño y modelado del Módulo de Control

En 1942, Ziegler y Nichols desarrollaron en forma empírica el primer método con ecuaciones sencillas para calcular los valores de proporcional (S), integral (r) y derivativa (q), determinando los valores de la ganancia o sensibilidad última (S_u) y del último periodo de oscilación (P_u), quedando para los tres modos de control proporcional+integral+derivativa PID: $S=0.6 \cdot S_u$; $r=0.5 \cdot P_u$; $q=P_u/8$. [16], donde: "S" es Sensitivity, y "r" sería el inverso de Reset rate y "q" es Pre-act time. [7]. La referencia [17] describe lo anterior como segundo método de Ziegler-Nichols: $K_p=0.6K_{cr}$, $T_i=0.5P_{cr}$ y $T_d=0.125P_{cr}$; donde K_{cr} es un valor crítico de ganancia en la cual la salida exhibe por primera vez oscilaciones sostenidas, siendo P_{cr} su periodo correspondiente.

Se obtuvieron resultados aceptables en el control de la temperatura del horno eléctrico utilizando el segundo método de Ziegler-Nichols [17]. Se procedió implementando únicamente la ganancia proporcional, aumentándola cada vez más desde 0 hasta obtener por primera vez oscilaciones sostenidas. Obtenido K_{cr} , se midió el periodo para conocer P_{cr} ; se aplicaron las fórmulas [17], luego se propuso algunos valores comerciales y se resolvieron los demás utilizando MatLab. Conociendo estos datos se implementó la estructura

del controlador diseñado, pasando entonces a un trabajo de sintonía fina en el sitio para un punto de referencia de 200°C .

Los valores comerciales que finalmente se determinaron se muestran en el circuito de la Fig. 11.

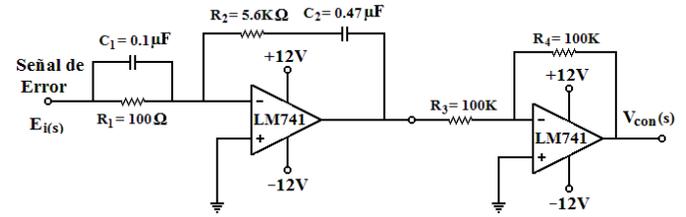


Fig. 11. Valores determinados luego de una sintonía fina en el sitio.

Retomando (7), (8) y (9) se obtiene:

$$K_p = 56.21 \quad \text{según (7)}$$

$$K_i = 21276.59 \quad \text{según (8)}$$

$$K_d = 5.6 \times 10^{-4} \quad \text{según (9)}$$

Sustituyendo estos valores en (6) se obtiene el modelo matemático del algoritmo PID de la Fig. 11.

$$\frac{V_{con}(s)}{E_i(s)} = 56.21 + \frac{21276.59}{s} + 0.00056 \cdot s \quad (11)$$

D. Diseño y modelado del Módulo de Potencia

Para implementar un circuito electrónico que sea capaz de establecer el método de control por paquetes, se diseñó el circuito que se muestra en la Fig. 12. Se basa en un oscilador astable implementado mediante un NE555. Se incluye un diodo de la terminal 7 a la 6, para lograr que el tiempo en estado bajo pueda ser mucho mayor que el tiempo en estado alto. Asimismo, se colocó una resistencia variable cuyo propósito es ajustar el tiempo que duran los paquetes, para hacerlo coincidir con el tiempo de respuesta característico del horno eléctrico.

Por otra parte, el tiempo en alto dura el tiempo preciso para crear un corto circuito y descargar el capacitor del AO LM741 configurado como integrador. Cuando en la terminal 3 del NE555 aparece un breve pulso en alto, el desarrollo del voltaje rampa se detiene; a su vez, el voltaje cae a 0 voltios durante el tiempo que dura el pulso. Enseguida, el proceso de carga del capacitor se repite obteniéndose una señal diente de sierra, un voltaje rampa.

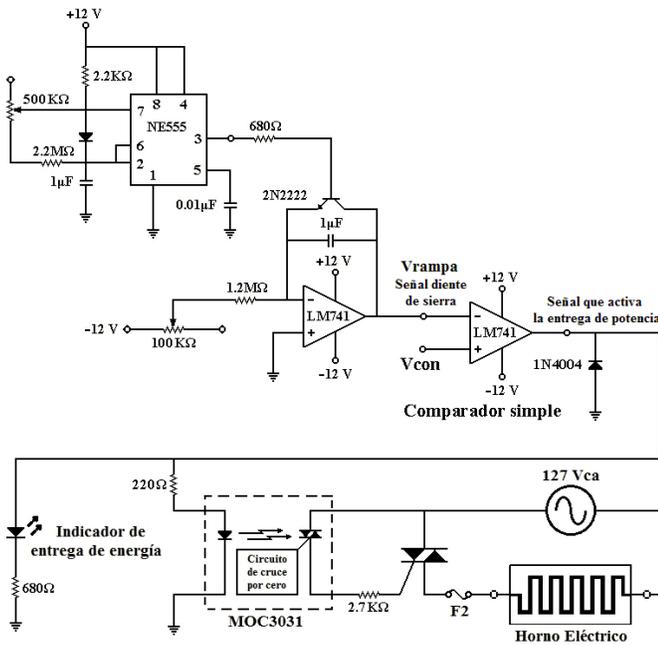


Fig. 12. Circuito para el módulo de potencia.

Enseguida, la señal diente de sierra se compara contra el voltaje de control proveniente del módulo del controlador PID; La salida del comparador constituye la señal de disparo para entregar energía al horno eléctrico. El uso del optotriac MOC3031 se prefiere en este caso para aislar la etapa de potencia del resto de los circuitos; además de que los semiciclos pasan completos, gracias al circuito de cruce por cero integrado dentro del MOC3031. Por último, se utilizó un Triac BTA24 como elemento final de control. Este dispositivo se eligió por su capacidad de corriente, lo cual, junto con un disipador de calor ayuda a protegerlo.

La señal que activa la entrega de energía al horno eléctrico se expresará por $E_{pot}(s)$. Entonces, para el circuito de la Fig. 12, se propone el modelo matemático simplificado partiendo de que:

$$V_{Rampa} = \frac{1}{s} \quad (12)$$

Posteriormente, observando la etapa de comparación del circuito de la Fig. 12, y debido a que la salida diente de sierra proviene de un A.O. configurado como integrador inversor se obtiene:

$$E_{pot}(s) = \frac{1}{s} - V_{con}(s) \quad (13)$$

E. Modelado del Horno eléctrico

En la Fig. 3 se mostró la curva de reacción en lazo abierto a partir de la cual se obtendrá el modelo matemático de horno eléctrico el cual se denotará por $G_M(s)$. Para ello, se recurrió al método propuesto en [18], donde se propone (14):

$$G_M(s) = \frac{K \cdot e^{t_0 s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (14)$$

Donde

K es la ganancia de estado estacionario.

τ es la constante de tiempo del proceso.

t_0 es el tiempo de retardo.

Luego, de la Fig. 3, se obtienen los siguientes parámetros:

$$K = \frac{100^\circ C - 50^\circ C}{232.48s - 76.43s} = 0.3204 \frac{^\circ C}{s}$$

$$t_0 = 28.6s$$

$$\tau = 257 \times 0.632 = 162.42$$

Ahora bien, en [19], se propone (15):

$$e^{t_0 s} \cong \frac{1}{t_0 s + 1} \quad (15)$$

Por lo tanto, reemplazando el término correspondiente al retardo de transporte (15) en (14) se tiene:

$$G_M(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{t_0 s + 1} \quad (16)$$

Sustituyendo los valores determinados anteriormente:

$$G_M(s) = \frac{0.3204}{162.42s + 1} \cdot \frac{1}{28.6s + 1}$$

Simplificando:

$$G_M(s) = \frac{0.3204}{4645.2s^2 + 191s + 1} \quad (17)$$

La Ecuación (17) constituye el modelo matemático del horno eléctrico de mufla utilizado.

IV. RESULTADOS

A. Diagrama a bloques del sistema de control

En la Fig. 13, se muestra una secuencia de flujo a bloques de los modelos matemáticos obtenidos en el desarrollo de los módulos del sistema de control.

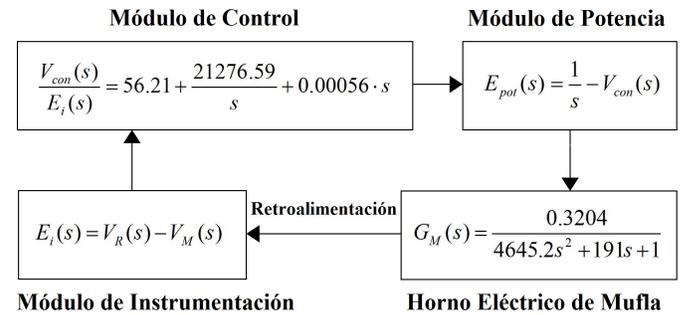


Fig. 13. Arreglo de los modelos matemáticos en una secuencia de bloques.

En la Fig. 14 se muestra el diagrama de bloques normalizado, el cual se obtuvo manipulando algebraicamente las ecuaciones de la Fig. 13.

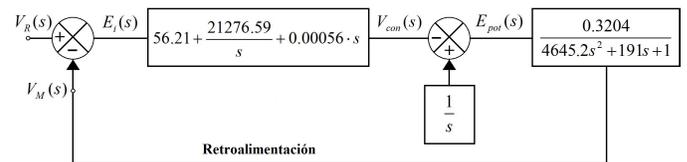


Fig. 14. Diagrama de bloques normalizado del sistema modelado.

Utilizando MatLab se reduce a un solo bloque el sistema de control representado en la Fig. 14, donde la transmitancia total se denota por $G_T(s)$ resultando:

$$G_T(s) = \frac{-0.0008971s^2 - 90.05s - 34083.5}{23226s^3 + 955s^2 + 5s} \quad (18)$$

En la Fig. 15, se muestra el diagrama a bloques reducido a un solo bloque, donde puede observarse que su principal transmitancia es (18).

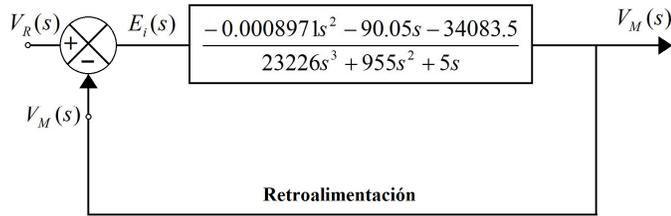


Fig. 15. Sistema de control representado en su forma canónica.

B. Análisis del modelo en MatLab

En la Fig. 16, se muestran las trazas de Bode de (18) obtenidas mediante MatLab, su análisis indica que el sistema de control representado por el modelo matemático obtenido es estable.

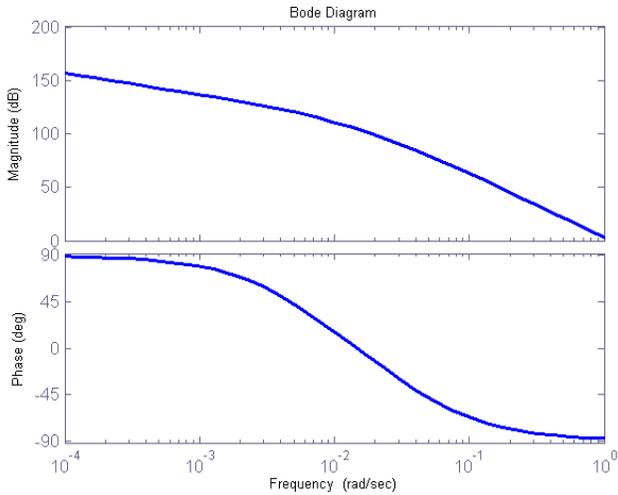


Fig. 16. Trazas de Bode usando la función “bode” de (18).

En la Fig. 17, se muestra la gráfica obtenida en MatLab para la función “nyquist” a partir de (18). Su análisis demuestra que el sistema es estable.

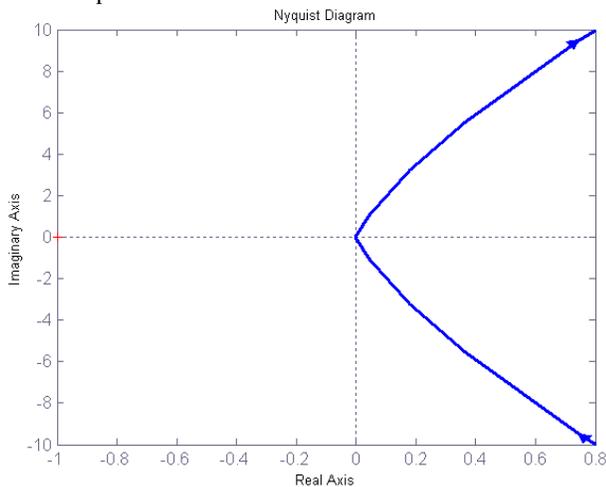


Fig. 17. Diagrama de Nyquist para el sistema representado por (18).

C. Pruebas de funcionamiento

Se realizaron prácticas de prueba reales utilizando los módulos. En la Fig. 19 se muestra una fotografía de la conexión de los módulos para realizar estos ensayos.

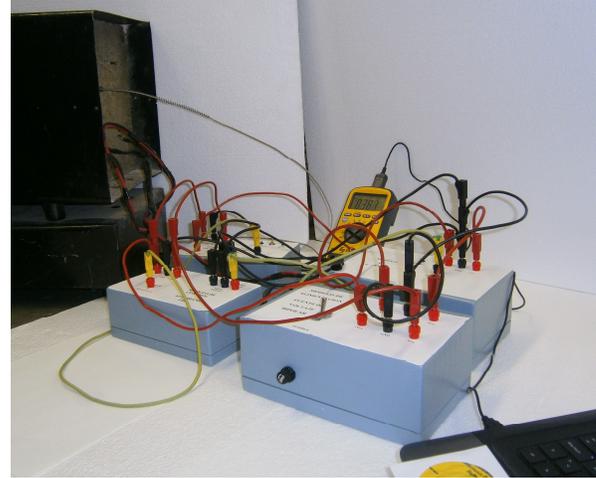


Fig. 18. Fotografía de los módulos didácticos interconectados.

El resultado de una práctica real de control de temperatura con el valor de referencia ajustado a 200°C se muestra en la Fig. 19. Se puede observar que el punto de referencia se alcanza en un tiempo mayor al que lo haría haciendo funcionar el horno eléctrico en lazo abierto. Este comportamiento es el esperado cuando se implementa un controlador que envía energía dosificada a la carga para obtener un sobreimpulso mínimo, tratando de alcanzar el valor de referencia en el menor tiempo posible. Cabe señalar que lo anterior se logró en gran medida al sintonizar in situ el algoritmo de control PID.

Relacionado al párrafo anterior, nótese que en la Fig. 19 se incluye una gráfica de una respuesta idealizada de control, este modelo ideal está ajustado para alcanzar el punto de consigna en un tiempo muy cercano al que lo haría en lazo abierto, lo cual, como ya se explicó, sería muy difícil de lograr en la realidad sin tener un sobreimpulso considerable.

Este modelo idealizado será usado posteriormente para calcular una aproximación de la eficiencia del controlador PID diseñado.

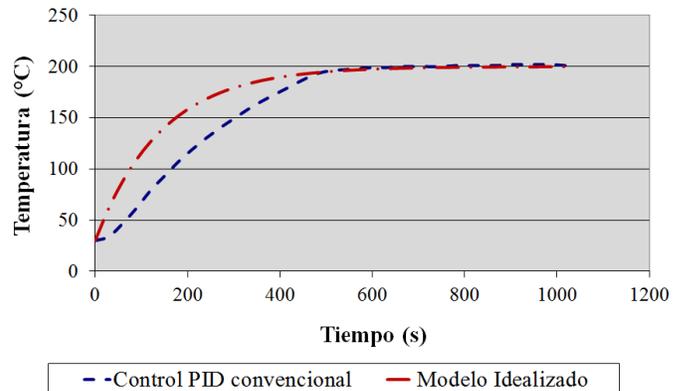


Fig. 19. Resultados de una práctica de prueba real a 200°C.

De igual manera, en la Fig. 20, se muestran los resultados de una práctica real con el set point ajustado a 250°C.

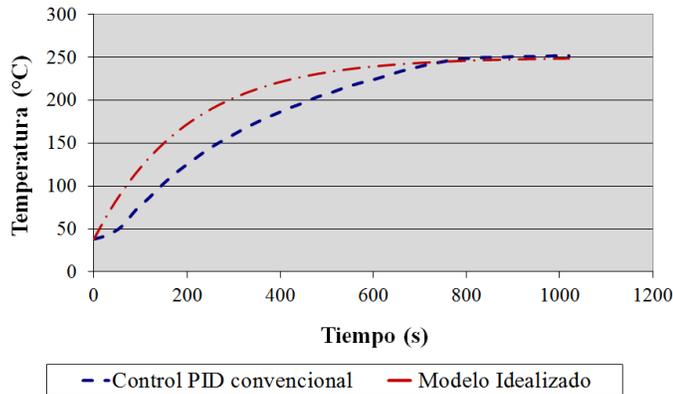


Fig. 20. Resultados de una práctica de prueba real a 250°C.

En la Tabla I se muestran los resultados de eficiencia para cada una de las prácticas realizadas. Se consiguieron buenos niveles de eficiencia sobre todo para la prueba con el punto de referencia ajustado a 200°C, lo cual es comprensible ya que para los trabajos de sintonía fina en sitio se estableció ese valor.

TABLA I

	Control PID
Prueba a 200°C	87,03%
Prueba a 250°C	79,12%

IV. CONCLUSIONES

Se logró elaborar un modelo matemático que representa el sistema modular didáctico de control de temperatura compuesto por cuatro módulos didácticos y un horno eléctrico de mufla. El sistema de control de temperatura para un horno eléctrico utilizando estos módulos intercambiables funcionó bien. Los resultados de las prácticas de prueba fueron satisfactorios. Se obtuvo una medida de la eficiencia del controlador. El laboratorio de Ingeniería electromecánica del Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte cuenta ahora con los módulos y su correspondiente modelo matemático; de ésta forma, los estudiantes podrán efectuar las prácticas propuestas por los docentes que imparten las asignaturas de ingeniería de control incluyendo las matemáticas asociadas que sustentan la teoría de control. Con este proyecto los alumnos podrán observar en la práctica, la relación que existe entre el comportamiento del sistema físico con el resultado de los diferentes análisis aplicados al modelo matemático que lo representa. Es posible verificar lo anterior analizando la respuesta de cada una de las gráficas consideradas. Se espera contar en un futuro inmediato, con el diseño y fabricación de más módulos de control intercambiables que funcionen con distintos algoritmos de control, para que los alumnos puedan observar las diferencias de funcionamiento comparándolas con el controlador PID.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte los apoyos proporcionados para la ejecución del proyecto 205.14.2-PD que da lugar a ésta publicación.

REFERENCIAS

- [1] I. Greca y M. A. Moreira, “Un estudio piloto sobre representaciones mentales, imágenes, proposiciones y modelos mentales respecto al concepto de campo electromagnético en alumnos de física general, estudiantes de postgrado y físicos profesionales”, *Investigações em Ensino de Ciências*, vol. 1, núm. 1, pp. 95-108, 1996.
- [2] M. S. Biembengut y N. Hein, “Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática”, *Educación matemática*, vol. 16, núm. 2, pp. 105-125, 2004.
- [3] E. P. Lozada, N. Falcón y C. Alcalá, “Prototipos experimentales orientados al aprendizaje de la óptica”, *Revista Ciencias de la Educación*, vol. 20, n° 36, 2010.
- [4] C. Á. Peña, F. J. Neff, J. L. Moya Rodríguez, C. A. Chagoyén Méndez, y Á. S. Machado Rodríguez., “La enseñanza de la ingeniería mecatrónica, un reto del siglo XXI”, Cuba, 2010.
- [5] C. Lozoya y J. Contreras, “Vinculación academica-industria mediante el diseño y construcción de prototipos mecatrónicos”, México, 2013.
- [6] L. Huang, H. Fang y D. D Reible, “Mathematical model for interactions and transport of phosphorus and”, *El Sevier*, 2015.
- [7] J. G. Ziegler, N. B. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers”, *Transactions of ASME*, 64, 759-768, 1942.
- [8] K. Ogata, “Ingeniería de Control Moderna”, Ed. Pearson Educación S.A., 4ª ed., España, pp. 101-102, 2003..
- [9] A. O’Dwyer, “HandBook of PI and PID Controller Tuning Rules”, Ed. Imperial College Press, 2ª ed., Irlanda, pp. 1-7, 2006.
- [10] K. Ogata, “Ingeniería de Control Moderna”, Ed. Pearson Educación S.A., 4ª ed., España, pp. 101-102, 2003.
- [11] M. Rashid, “Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones”, Ed. Pearson Educación de México, S. A. De C.V., 3ª ed., México, pp. 500-502, 1994.
- [12] M. Bañuelos, J. Castillo, G. Rayo, S. Quintana, R. Damián, and J. Pérez, “Controlador PID de Temperatura de Tipo Didáctico”, en *Memorias de SOMI XV Congreso de Instrumentación*, Guadalajara, Jal., México, 2000.
- [13] J. Z. García, “Ensayo experimental sobre 2 estructuras de control PID proyectadas mediante amplificadores operacionales, en una aplicación de control de temperatura”, en *Memorias de 5º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, Ciudad de México, México, ISBN: 978-607-414-049-1J, 2008.
- [14] J. Z. García, “Ensayo experimental sobre 2 estructuras de control PID proyectadas mediante amplificadores operacionales, en una aplicación de control de temperatura”, en *Memorias de 5º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, Ciudad de México, México, ISBN: 978-607-414-049-1J, 2008.
- [15] D. Martínez, B. Ramírez, S. Elizarrarás, “Diseño de una planta controladora de temperatura”, en *Memorias de SOMI XV Congreso de Instrumentación*, Guadalajara, Jal., México, 2000.
- [16] G. Ávalos, M. A. Montúfar, F. E. Ortiz, G. Villalobos, “Teoría de Control, Ajuste de Controladores Industriales”, Instituto Politécnico Nacional, México DF, México, pp. 75-77, 2002.
- [17] K. Ogata, “Ingeniería de Control Moderna”, Ed. Pearson Educación S.A., 4ª ed., España, pp. 683-686, 2003.
- [18] C. Smith, A. Corripio, *Control Automático de Procesos, Teoría Y Práctica*, Ed. LIMUSA S. A. De C.V, México, D.F., pp. 96 y 115, 1991.
- [19] K. Ogata, “Ingeniería de Control Moderna”, Ed. Pearson Educación S.A., 4ª ed., España, pp. 383, 2003.

Análisis de estabilidad y convergencia global de un esquema adaptable en regulación utilizando el principio de invariancia de LaSalle

Ricardo Falcón¹, Víctor Santibáñez¹, Javier Ollervides¹, Jesús Sandoval²

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de la Laguna S/N, Torreón, Coahuila, México

² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de La Paz, Blvd. Forjadores de B.C.S. La Paz, B.C.S. México

Email: ricardofnp@gmail.com, vsantiba@itlalaguna.edu.mx, ejollervi@ieee.org, jsandoval@itlp.edu.mx

Resumen—En este artículo se estudia un controlador PD con compensación deseada de gravedad adaptable, que permite alcanzar el objetivo de control de posición de robots manipuladores sin la necesidad de conocer los valores numéricos de los parámetros empleados en su modelo dinámico. Comúnmente la estabilidad del origen del sistema en lazo cerrado y convergencia global de los errores de posición se demuestra utilizando el método directo de Lyapunov auxiliado con argumentos estándares de control adaptable basados en el lema de Barbalat [1]. En el presente trabajo se introduce un estudio alternativo de estabilidad y convergencia global de los errores a cero, empleando el Principio de Invariancia de LaSalle [2]. Se presenta una comparación utilizando ambos métodos.

I. INTRODUCCIÓN

El control de posición para robots manipuladores puede ser alcanzado por el control PD con compensación de gravedad, sin embargo, un inconveniente de este controlador es que el conocimiento del vector de pares gravitacionales $g(\mathbf{q}(t))$, el cual depende de parámetros como la masa de la carga, es requerido [4]. Para alcanzar el objetivo de control puede elegirse el vector de posiciones articulares deseadas en lugar de una evaluación en línea. Debido a su sencilla estructura, este último controlador ha sido utilizado ampliamente en control de robots y las ganancias de control pueden ser ajustadas fácilmente. [5]

Dicho controlador conocido como PD con compensación deseada de gravedad es utilizado cuando existe incertidumbre paramétrica y puede asegurar una convergencia de los errores de posición a cero; y con ganancias bien seleccionadas pueden mejorar el tiempo de respuesta de este controlador [1]. Sin embargo, la incertidumbre paramétrica o la ausencia del conocimiento de parámetros como la masa y la distancia al centro de masa del último eslabón para cargas de diferentes formas y masas puede afectar el cumplimiento del objetivo de control. Bajo estas condiciones la versión adaptable del controlador PD con compensación deseada de gravedad mantiene la garantía de convergencia de los errores de posición a cero. Es este último controlador el que será estudiado en el presente trabajo.

Tradicionalmente los análisis de estabilidad de sistemas de control adaptable de manipuladores, tanto en regulación

como en seguimiento de trayectorias de posición, se basan en la teoría de Lyapunov auxiliada del lema de Barbalat. Un estudio reciente [3] ha destacado la importancia del principio de invariancia de LaSalle en el análisis de sistemas no lineales autónomos y no autónomos y ha introducido un nuevo principio de invariancia de LaSalle, el cual relaja las condiciones requeridas en las versiones anteriores, tanto de LaSalle como de Barbalat, expandiendo de esta manera el alcance en los análisis de estabilidad. El objetivo del presente trabajo es comparar los métodos tradicionales de análisis de estabilidad del esquema de control adaptable tipo PD con compensación deseada de gravedad adaptable.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se explica el controlador PD con compensación deseada de gravedad en su versión adaptable, donde se describen algunas propiedades fundamentales para el desarrollo de esta ley de control. En la sección III se lleva a cabo el análisis de estabilidad, donde se utiliza un método alternativo utilizando el principio de invariancia de LaSalle [2], así como el análisis de estabilidad tradicional realizado con lemas basados en el lema de Barbalat [7, Lema 2.1]. Finalmente, en la sección IV, se presentan los resultados obtenidos con esta ley de control en simulación.

II. CONTROLADOR PD CON COMPENSACIÓN DESEADA DE GRAVEDAD ADAPTABLE

La ley del controlador PD con compensación deseada de gravedad está dada por la ecuación (1),

$$\boldsymbol{\tau} = K_p \tilde{\mathbf{q}} + K_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d). \quad (1)$$

donde las matrices $K_p = K_p^T > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y $K_v = K_v^T > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ simétricas y definidas positivas son seleccionadas en el diseño. El error de posición está dado por $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$, donde $\mathbf{q}_d \in \mathbb{R}^n$ denota el vector de posiciones articulares deseadas. Para este controlador se asume que el vector \mathbf{q}_d es constante, por lo tanto, la ley de control (1) toma la forma dada por (2).

$$\boldsymbol{\tau} = K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d). \quad (2)$$

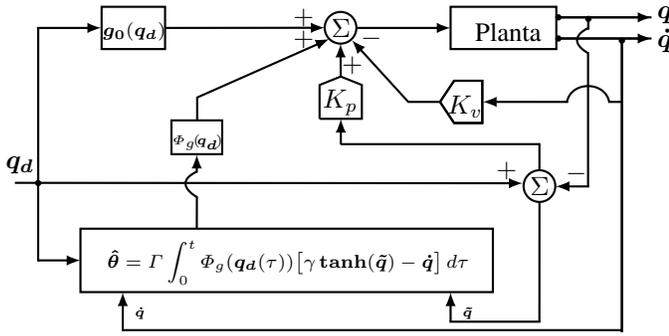


Figura 1: Control PD con compensación deseada de gravedad adaptable.

La utilidad práctica con respecto al controlador PD con compensación de gravedad es que el vector de pares gravitacionales deseados $\mathbf{g}(\mathbf{q}_d)$ utilizado en (2) depende sólo de \mathbf{q}_d y no de \mathbf{q} , por lo que se ahorra tiempo de cómputo ya que \mathbf{q}_d está definido y es constante.

De acuerdo con [1, Propiedad 14.1] se establece que el modelo dinámico de un robot de n g.d.l. (con una carga articular incluida) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$M(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{u} + C_0(\mathbf{q}, \mathbf{w}, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) = \Phi(\mathbf{q}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) \boldsymbol{\theta} + M_0(\mathbf{q}) \mathbf{u} + C_0(\mathbf{q}, \mathbf{w}) \mathbf{v} + \mathbf{g}_0(\mathbf{q}), \quad (3)$$

donde $\Phi(\mathbf{q}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $M_0(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C_0(\mathbf{q}, \mathbf{w}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{g}_0(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ y $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^m$. El vector $\boldsymbol{\theta}$, conocido como el vector de parámetros dinámicos, contiene elementos que dependen precisamente de los parámetros físicos como las masas y las inercias de los eslabones del robot manipulador y de la carga. Las matrices $M_0(\mathbf{q})$, $C_0(\mathbf{q}, \mathbf{w})$ y el vector $\mathbf{g}_0(\mathbf{q})$ representan las partes de las matrices $M(\mathbf{q})$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, y del vector $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ que no dependen del vector de parámetros dinámicos $\boldsymbol{\theta}$.

Debido al hecho anterior, la siguiente expresión es válida para toda $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}) \boldsymbol{\theta} + \mathbf{g}_0(\mathbf{x}). \quad (4)$$

La estructura de los esquemas de control adaptables para robots manipuladores también están definidos por una ley adaptable comúnmente utilizada en los sistemas adaptables continuos, también conocida como “ley integral” o “ley del gradiente,” como la expresada en (5).

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \Gamma \int_0^t \boldsymbol{\psi}(s, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d) ds + \hat{\boldsymbol{\theta}}(0). \quad (5)$$

donde $\Gamma = \Gamma^T \in \mathbb{R}^{m \times m}$ (llamada matriz de ganancias de adaptación) es simétrica y definida positiva y $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) \in \mathbb{R}^m$ son parámetros de diseño, mientras que $\boldsymbol{\psi}$ es una función vectorial a determinar, de dimensiones $m \times 1$.

En el caso particular del control de posición, estas leyes de

control toman las siguientes formas

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_d, \hat{\boldsymbol{\theta}}), \quad (6)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \Gamma \int_0^t \boldsymbol{\psi}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_d) dt + \hat{\boldsymbol{\theta}}(0). \quad (7)$$

El controlador PD con compensación deseada de gravedad adaptable es determinado por las Ecuaciones (6) y (7) como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d, \hat{\boldsymbol{\theta}}), \\ &= K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\mathbf{q}} + \Phi_g(\mathbf{q}_d) \hat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{g}_0(\mathbf{q}_d), \end{aligned} \quad (8)$$

donde se utiliza $\Phi_g(\mathbf{q}_d) = \Phi(\mathbf{q}_d, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$, y la ley adaptable es definida como

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \Gamma \Phi_g^T(\mathbf{q}_d) \int_0^t [\gamma \tanh(\tilde{\mathbf{q}}(s)) - \dot{\mathbf{q}}(s)] ds + \hat{\boldsymbol{\theta}}(0), \quad (9)$$

donde $K_p = K_p^T$ y $K_v = K_v^T$ son matrices simétricas definidas positivas de dimensiones $n \times n$ y la función vectorial de la tangente hiperbólica

$$\tanh(\tilde{\mathbf{q}}) = [\tanh(\tilde{q}_1) \quad \dots \quad \tanh(\tilde{q}_n)]^T \in \mathbb{R}^n \quad (10)$$

cumple con la siguiente propiedad

$$\|\tanh(\tilde{\mathbf{q}})\| \leq \begin{cases} \|\tilde{\mathbf{q}}\| & \forall \mathbb{R}^n \\ \frac{\|\tilde{\mathbf{q}}\|}{\sqrt{n}} & \forall \mathbb{R}^n \end{cases}$$

La ley de adaptación (9) está basada en la ley utilizada en [1, Capítulo 15].

Cabe resaltar que la ley de control expresada en (8) no depende del vector de parámetros dinámicos $\boldsymbol{\theta}$ sino, en los parámetros adaptables $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ que son obtenidos a partir de la ley de adaptación (9) la cual tampoco depende del vector $\boldsymbol{\theta}$.

De los parámetros de diseño a escoger en las Ecuaciones (8)–(9), sólo la matriz K_p debe ser escogida cuidadosamente. Con este fin, se definen $\lambda_{\max}\{M\}$, k_{C_1} y k_g como

$$\lambda_{\max}\{M(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta})\} \leq \lambda_{\max}\{M\} \forall \mathbf{q} \in \mathbb{R}^n, \boldsymbol{\theta} \in \Theta \in \mathbb{R}^m,$$

$$\|C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\theta})\| \leq k_{C_1} \|\dot{\mathbf{q}}\| \forall \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n, \boldsymbol{\theta} \in \Theta \in \mathbb{R}^m,$$

$$\|\mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{g}(\mathbf{y}, \boldsymbol{\theta})\| \leq k_g \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n, \boldsymbol{\theta} \in \Theta \in \mathbb{R}^m.$$

Las constantes $\lambda_{\max}\{M\}$, k_{C_1} y k_g son consideradas como conocidas. Para obtener estas constantes es necesario conocer explícitamente tanto las matrices $M(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta})$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\theta})$ y el vector de pares gravitacionales $\mathbf{g}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta})$, como al conjunto Θ , pero no es necesario conocer el vector de parámetros dinámicos $\boldsymbol{\theta}$.

Ahora se define el vector de errores paramétricos $\tilde{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^m$ como

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}. \quad (11)$$

El vector de errores paramétricos $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ es desconocido dado que está en función del vector de parámetros dinámicos $\boldsymbol{\theta}$ que se supone desconocido desde un principio. Sin embargo, el error paramétrico $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ es considerado sólo para fines de análisis.

De la definición del vector de errores paramétricos $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ en

(11) se puede ver que

$$\begin{aligned}\Phi_g(\mathbf{q}_d) \hat{\boldsymbol{\theta}} &= \Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \Phi_g(\mathbf{q}_d) \boldsymbol{\theta}, \\ &= \Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d, \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{g}_0(\mathbf{q}_d),\end{aligned}$$

donde se utilizó (4) con $\mathbf{x} = \mathbf{q}_d$.

Utilizando la definición anterior, la ley de control (8) puede ser escrita como

$$\boldsymbol{\tau} = K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d, \boldsymbol{\theta}). \quad (12)$$

El modelo dinámico del robot en lazo cerrado utilizando la ley de control (12) está dado por

$$\begin{aligned}M(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\theta}) \dot{\mathbf{q}} &= \\ K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d, \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{g}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}).\end{aligned} \quad (13)$$

Al obtener la derivada temporal del vector de errores adaptables se obtiene que $\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = \hat{\boldsymbol{\theta}}$, ya que el vector de parámetros dinámicos $\boldsymbol{\theta}$ se considera como constante. Por lo tanto, se obtiene que

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = \Gamma \Phi_g^T(\mathbf{q}_d) [\gamma \tanh(\tilde{\mathbf{q}}) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}], \quad (14)$$

A partir de todas las consideraciones anteriores, la ecuación de estados en lazo cerrado está dada por las Ecuaciones (13) y (14), y omitiendo el término $\boldsymbol{\theta}$ de los términos del modelo dinámico, ésta se puede escribir como

$$\left. \begin{aligned}\frac{d}{dt} \tilde{\mathbf{q}} &= -\dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \\ \frac{d}{dt} \dot{\tilde{\mathbf{q}}} &= M^{-1} [K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\boldsymbol{\theta}} \\ &\quad - C \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})], \\ \frac{d}{dt} \tilde{\boldsymbol{\theta}} &= \Gamma \Phi_g^T(\mathbf{q}_d) [\gamma \tanh(\tilde{\mathbf{q}}) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}],\end{aligned} \right\} \quad (15)$$

donde $M^{-1} = M^{-1}(\mathbf{q})$ y $C = C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$.

Vale la pena remarcar que éste es un conjunto de ecuaciones diferenciales autónomas con un vector de estados dado por $[\tilde{\mathbf{q}}^T \ \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \ \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T]^T$, y el origen en el espacio de estados expresado en (16) es un punto de equilibrio de (15).

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ \tilde{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^{2n+m}. \quad (16)$$

III. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Dado que el sistema de lazo cerrado (15) es autónomo, en este artículo mostramos como puede ser analizado utilizando el principio de invariancia de LaSalle mostrado en [3, Teorema 4.4]. Para esto se enuncia dicho teorema.

Teorema 1 (Principio de invariancia de LaSalle [2]). *Sea $\Omega \subset D \subset \mathbb{R}^n$ un conjunto compacto que es positivamente invariante con respecto a $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$ y sea $V : D \rightarrow \mathbb{R}$ una función continuamente diferenciable de manera que $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ en Ω . Sea E el conjunto de todos los puntos en Ω donde $\dot{V}(\mathbf{x}) = 0$. Sea M el conjunto invariante más grande en E , luego, cada solución que comienza dentro de Ω se aproxima a M conforme $t \rightarrow \infty$.*

La manera clásica de analizar la convergencia global del error de posición a cero es utilizar un lema cuya demostración

puede ser verificada siguiendo los mismos pasos que se utilizan para demostrar el lema de Barbalat. Este lema es el lema 2.1 de [7].

Lema 1. *Considérese una función continua $\mathbf{f} : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$. Supóngase que la función \mathbf{f} satisface las siguientes hipótesis:*

- $\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}} \in \mathcal{L}_\infty^n$.
- $\mathbf{f} \in \mathcal{L}_2^n$.

Entonces, necesariamente, se tiene que $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{f}(t) = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$.

Proposición 1. *Considere el sistema en lazo cerrado (15). El equilibrio $[\tilde{\mathbf{q}}^T \ \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \ \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T]^T = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^{2n+m}$ es estable y el $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{0}$.*

A continuación presentamos la prueba de la Proposición 1 utilizando alternativamente el teorema 1 y el lema 1.

III-A. Análisis de estabilidad utilizando el teorema 1

Se propone la función candidata de Lyapunov, dada por

$$\begin{aligned}V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) &= \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} - \gamma \tanh^T(\tilde{\mathbf{q}}) M(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ &\quad + \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \\ &\quad + \underbrace{\frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}} + \mathbf{g}^T(\mathbf{q}_d) \tilde{\mathbf{q}} + \mathcal{U}(\mathbf{q}) - \mathcal{U}(\mathbf{q}_d)}_{\mathbf{h}(\tilde{\mathbf{q}})}.\end{aligned} \quad (17)$$

El vector $\mathbf{h}(\tilde{\mathbf{q}})$ de dimensiones $n \times 1$ depende de los errores de posición $\tilde{\mathbf{q}}$ y del movimiento articular deseado \mathbf{q}_d que se supone acotado, y donde $\mathcal{U}(\mathbf{q})$ representa a la energía potencial del robot. Aquí se supone que todas las articulaciones del robot son del tipo rotacional.

Hay que recordar que para que (17) pueda calificar como una función candidata de Lyapunov debe de ser una función definida positiva y radialmente desacotada, es decir que

$$\begin{aligned}V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) &> 0 \quad \forall \tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \neq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n \text{ y } \tilde{\boldsymbol{\theta}} \neq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^m \\ V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) &\rightarrow \infty \text{ cuando } [\|\tilde{\mathbf{q}}\|^2 + \|\dot{\tilde{\mathbf{q}}}\|^2 + \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \infty\end{aligned}$$

Para mostrar que $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}})$ es una función definida positiva y radialmente desacotada, se debe acotar cada término por abajo. Para esto obsérvese que para el término $\mathbf{h}(\tilde{\mathbf{q}})$, de acuerdo con [7, pp. 314] se tiene que

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \tilde{\mathbf{q}} + \mathcal{U}(\mathbf{q}) - \mathcal{U}(\mathbf{q}_d) + \mathbf{g}^T(\mathbf{q}_d) \tilde{\mathbf{q}} \\ \geq \frac{1}{2} [\lambda_{\min}\{K_p\} - k_g] \|\tilde{\mathbf{q}}\|^2.\end{aligned} \quad (18)$$

Además se tiene que, para el término $-\gamma \tanh^T(\tilde{\mathbf{q}}) M(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}}$ se tiene la siguiente cota

$$-\gamma \tanh^T(\tilde{\mathbf{q}}) M(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \geq -\gamma \lambda_{\max}\{M\} \|\tilde{\mathbf{q}}\| \|\dot{\tilde{\mathbf{q}}}\|. \quad (19)$$

Para el término $\frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\tilde{\mathbf{q}}}$, utilizando la desigualdad de Rayleigh-Ritz, se acota de la siguiente manera

$$\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}\{M\} \|\dot{\mathbf{q}}\|^2 \quad (20)$$

Finalmente, para el término $\frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}$ se tiene que

$$\frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}\{\Gamma^{-1}\} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 \quad (21)$$

De (18)–(21) se puede ver que

$$V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) \leq \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \|\tilde{\mathbf{q}}\| & \|\dot{\mathbf{q}}\| & \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} \|\tilde{\mathbf{q}}\| \\ \|\dot{\mathbf{q}}\| \\ \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \end{bmatrix},$$

donde

$$P = \begin{bmatrix} \lambda_{\min}\{K_p\} - k_g & -\gamma \lambda_{\max}\{M\} & 0 \\ -\gamma \lambda_{\max}\{M\} & \lambda_{\min}\{M\} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{\min}\{\Gamma^{-1}\} \end{bmatrix}.$$

con $\lambda_{\min}\{K_p\} > k_g$, y escogiendo una γ adecuadamente seleccionada de la forma

$$\gamma < \frac{\sqrt{[\lambda_{\min}\{K_p\} - k_g] \lambda_{\min}\{M\}}}{\lambda_{\max}\{M\}}, \quad (22)$$

se tiene que, $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}})$ dada en (17) es definida positiva y radialmente desacotada, por lo tanto esta función califica como una *función candidata de Lyapunov*. La derivada temporal de $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}})$, se obtiene como

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) &= \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}^T K_p \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ &+ \left[\frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \right]^T \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}^T(\mathbf{q}_d) \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ &- \gamma \frac{d}{dt} \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) \dot{M}(\mathbf{q}) \\ &- \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) M(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}. \end{aligned}$$

Despejando la ecuación de lazo cerrado (15) y la ecuación (14) se tiene

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) &= -\dot{\mathbf{q}}^T K_v \dot{\mathbf{q}} - \gamma \frac{d}{dt} [\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})]^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \\ &- \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) C^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \\ &- \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_p \tilde{\mathbf{q}} + \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_v \dot{\mathbf{q}} \\ &- \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) [\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})]. \end{aligned} \quad (23)$$

Para probar que $\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) \leq 0$ es semidefinida negativa se acota cada término de la función por arriba. Para el término $-\dot{\mathbf{q}}^T K_v \dot{\mathbf{q}}$ se tiene que

$$-\dot{\mathbf{q}}^T K_v \dot{\mathbf{q}} \leq -\lambda_{\min}\{K_v\} \|\dot{\mathbf{q}}\|^2.$$

Para el término $\gamma \frac{d}{dt} [\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})]^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$ se tiene que

$$\begin{aligned} -\gamma \frac{d}{dt} [\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})]^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} &\leq \gamma \|\dot{\mathbf{q}}\| \|\text{diag}\{\text{sech}^2(\tilde{\mathbf{q}})\}\| \|M(\mathbf{q})\| \|\dot{\mathbf{q}}\|, \\ &\leq \gamma \lambda_{\max}\{M\} \|\dot{\mathbf{q}}\|^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Para el término $-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) C^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}$ se tiene

$$\begin{aligned} -\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) C^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} &\leq |\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) C^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}|, \\ &\leq \gamma \|C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}\| \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|, \\ &\leq \gamma \sqrt{n} k_{C_1} \|\dot{\mathbf{q}}\|^2, \end{aligned}$$

por tanto,

$$-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) C^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \leq \gamma \sqrt{n} k_{C_1} \|\dot{\mathbf{q}}\|^2.$$

Para el término $-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_p \tilde{\mathbf{q}}$, con K_p suficientemente grande, se llega a

$$\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_p \tilde{\mathbf{q}} \geq \gamma \lambda_{\min}\{K_p\} \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2,$$

es decir,

$$-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_p \tilde{\mathbf{q}} \leq -\gamma \lambda_{\min}\{K_p\} \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2.$$

Para el término $\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_v \dot{\mathbf{q}}$ tenemos que

$$\begin{aligned} \gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_v \dot{\mathbf{q}} &\leq |\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) K_v \dot{\mathbf{q}}|, \\ &\leq \gamma \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\| \|K_v\| \|\dot{\mathbf{q}}\|, \\ &\leq \gamma \lambda_{\max}\{K_v\} \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\| \|\dot{\mathbf{q}}\|. \end{aligned}$$

Y para el término $-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) [\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})]$ se llega a

$$\begin{aligned} -\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) [\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})] &\leq |-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) [\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})]|, \\ &\leq \gamma \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\| \|\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})\|, \end{aligned}$$

usando la propiedad de la dinámica residual [1, pp. 108]

$$-\gamma \mathbf{tanh}^T(\tilde{\mathbf{q}}) [\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{g}(\mathbf{q})] \leq \gamma k_{h2} \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2. \quad (25)$$

De estas cotas superiores se puede obtener

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}) \leq -\gamma \begin{bmatrix} \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\| \\ \|\dot{\mathbf{q}}\| \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\| \\ \|\dot{\mathbf{q}}\| \end{bmatrix}. \quad (26)$$

donde

$$Q = \begin{bmatrix} \lambda_{\min}\{K_p\} - k_{h2} & -\frac{1}{2} \lambda_{\max}\{K_v\} \\ -\frac{1}{2} \lambda_{\max}\{K_v\} & \frac{1}{\gamma} \lambda_{\min}\{K_v\} - \lambda_{\max}\{M\} - \sqrt{n} k_{C_1} \end{bmatrix}$$

con γ adecuadamente seleccionada de la siguiente manera

$$\gamma < \frac{4 [\lambda_{\min}\{K_p\} - k_{h2}] \lambda_{\min}\{K_v\}}{\lambda_{\max}^2\{K_v\} + 4 [\lambda_{\min}\{K_p\} - k_{h2}] [\sqrt{n} k_{C_1} + \lambda_{\max}\{M\}]}. \quad (27)$$

Por lo que de (22) y (27) se debe cumplir que

$$\gamma < \min \left\{ \frac{\sqrt{[\lambda_{\min}\{K_p\} - k_g] \lambda_{\min}\{M\}}}{\lambda_{\max}\{M\}}, \frac{4 [\lambda_{\min}\{K_p\} - k_{h2}] \lambda_{\min}\{K_v\}}{\lambda_{\max}^2\{K_v\} + 4 [\lambda_{\min}\{K_p\} - k_{h2}] [\sqrt{n} k_{C_1} + \lambda_{\max}\{M\}]} \right\}. \quad (28)$$

Dado que se probó que la función candidata de Lya-

punov (17) es una función definida positiva y radialmente desacotada con un mínimo único en el origen $\begin{bmatrix} \tilde{q}^T & \dot{\tilde{q}}^T & \tilde{\theta}^T \end{bmatrix}^T = \mathbf{0}^T \in \mathbb{R}^{2n+m}$ y $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta})$ es semidefinida negativa se tiene que el origen es un equilibrio estable y que \tilde{q} y $\dot{\tilde{q}}$ están acotadas, es decir, pertenecen al espacio de funciones $\tilde{q}, \dot{\tilde{q}} \in \mathcal{L}_\infty^n$ y $\tilde{\theta} \in \mathcal{L}_\infty^m$.

Con el fin de utilizar el teorema 1, se procede a definir el conjunto Ω como la componente conectada del conjunto $\left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q}^T & \dot{\tilde{q}}^T & \tilde{\theta}^T \end{bmatrix}^T \in D \subseteq \mathbb{R}^{2n+m} : V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \leq c \right\}$ conteniendo el origen, donde $c > 0$ satisface

$$V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \leq c < \alpha := \min V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta})$$

$$\left\| \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \right\| = r$$

con $r > 0$ siendo el radio de una bola abierta D_r , dada por

$$D_r = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in D : \left\| \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \right\| < r \right\} \subseteq D$$

Note que la componente conectada conteniendo el origen definida por

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in D : V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \leq c < \alpha \right\}$$

es cerrado por definición y acotado porque está en el interior de D_r , esto es, $\Omega \subset D_r$. Para ver esto último suponga *ad absurdum* que $\Omega \not\subset D_r$, entonces en este caso existe un

punto $\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \Omega$ que se sitúa en la frontera de D_r , es decir

$\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \partial D_r$. En este punto se tiene $V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \geq \alpha > c$,

sin embargo para todo $\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \Omega$, se tiene a su vez que

$V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \leq c < \alpha$, lo cual es una contradicción (ver [2], pg. 115). Por tanto Ω es un conjunto compacto (cerrado y acotado).

Ahora, debido a que $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \leq 0 \forall \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \Omega$ se tiene

que $V(\tilde{q}(t), \dot{\tilde{q}}(t), \tilde{\theta}(t)) \leq V(\tilde{q}(0), \dot{\tilde{q}}(0), \tilde{\theta}(0)) \leq c \forall t \geq 0$; esto es

$$\begin{bmatrix} \tilde{q}(0) \\ \dot{\tilde{q}}(0) \\ \tilde{\theta}(0) \end{bmatrix} \in \Omega \Rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{q}(t) \\ \dot{\tilde{q}}(t) \\ \tilde{\theta}(t) \end{bmatrix} \in \Omega \subset D_r \subset D \forall t \geq 0.$$

Por tanto Ω es un conjunto positivamente invariante con respecto a (15). Debido al desacotamiento radial de $V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta})$ es posible probar que Ω es acotado para todos los valores de

c (ver Khalil [2], pp. 123) y cualquier punto $\begin{bmatrix} \tilde{q}(0) \\ \dot{\tilde{q}}(0) \\ \tilde{\theta}(0) \end{bmatrix} \in D =$

\mathbb{R}^{2n+m} puede ser incluido en el interior del conjunto compacto y positivamente invariante Ω donde $V(\tilde{q}(t), \dot{\tilde{q}}(t), \tilde{\theta}(t)) \leq V(\tilde{q}(0), \dot{\tilde{q}}(0), \tilde{\theta}(0))$. Por tanto, el conjunto Ω está dado por

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n+m} : V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) \leq c := V(\tilde{q}(0), \dot{\tilde{q}}(0), \tilde{\theta}(0)) \right\}$$

Por otra parte el conjunto

$$E = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \Omega : \dot{V}(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \tilde{\theta}) = 0 \right\}$$

resulta de acuerdo a (26),

$$E = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \in \Omega : \tilde{q} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n, \dot{\tilde{q}} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n \right.$$

$$\left. \text{y } \tilde{\theta} : \|\tilde{\theta}\| \leq \sqrt{\frac{2V_0}{\lambda_{\min}\{P\}}} \right\}$$

Para que una solución pertenezca a E para todo $t \geq 0$, es necesario y suficiente que $\tilde{q}(t) = \mathbf{0} \forall t \geq 0$, $\dot{\tilde{q}}(t) = \mathbf{0} \forall t \geq 0$, lo cual implica que $\ddot{\tilde{q}}(t) = \mathbf{0} \forall t \geq 0$. De acuerdo a la ecuación de lazo cerrado, esto a su vez implica que $\tilde{\theta}(t)$ es tal que satisfaga $\Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\theta}(t) = \mathbf{0} \forall t \geq 0$. Por tanto el máximo conjunto invariante M , está dado por:

$$M = \{ \tilde{q} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n, \dot{\tilde{q}} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$$

$$\text{y } \tilde{\theta} \in \mathbb{R}^m : \Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\theta} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n \} \quad (29)$$

De acuerdo al teorema 1, se concluye que las soluciones tienden al máximo conjunto invariante dado en (29); es decir $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}(t) = \mathbf{0}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{q}}(t) = \mathbf{0}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}(t) \rightarrow \tilde{\theta}^*$, donde $\Phi_g(\mathbf{q}_d) \tilde{\theta}^* = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^n$. En caso de que $\Phi_g(\mathbf{q}_d) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ sea de excitación persistente [8] [9] el error paramétrico $\tilde{\theta}^*$ será igual a cero. Es decir, el equilibrio será asintóticamente estable en forma global.

III-B. Análisis de estabilidad utilizando el lema 1

Esta sección prueba de la manera tradicional que el error de posición tiende a cero utilizando el lema 1, [7, Lema 2.1]. Con este fin, es conveniente definir el siguiente vector $\mathbf{x} = [\|\tanh(\tilde{q})\| \quad \|\dot{\tilde{q}}\|]^T$. Por otra parte, utilizando el teorema de Rayleigh-Ritz se tiene

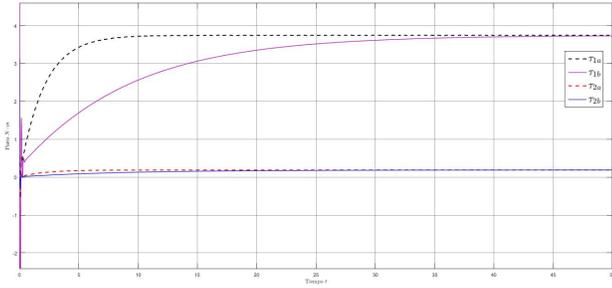
$$\begin{aligned} \gamma \mathbf{x}^T Q \mathbf{x} &\geq \gamma \lambda_{\min}\{Q\} [\|\tanh(\tilde{q})\|^2 + \|\dot{\tilde{q}}\|^2], \\ &\geq \gamma \lambda_{\min}\{Q\} \|\tanh(\tilde{q})\|^2, \end{aligned} \quad (30)$$

y cambiando el signo de la ecuación (30) se llega a

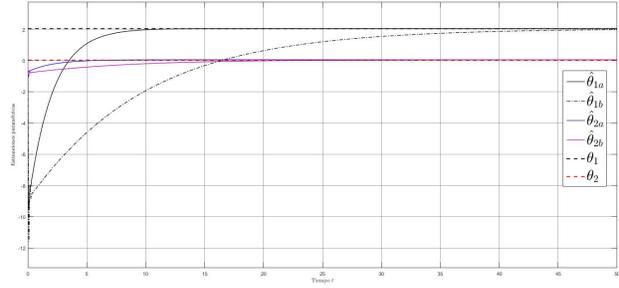
$$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \leq -\gamma \mathbf{x}^T Q \mathbf{x} \leq -\gamma \lambda_{\min}\{Q\} \|\tanh(\tilde{q})\|^2. \quad (31)$$

Hasta el momento, se conoce que $\tilde{q} \in \mathcal{L}_\infty^n$, $\dot{\tilde{q}} \in \mathcal{L}_\infty^n$, y $\tilde{\theta} \in \mathcal{L}_\infty^m$, pero aún no se puede concluir que el origen es un punto de equilibrio asintóticamente estable. Para esto hace falta probar que $\tilde{q} \in \mathcal{L}_2^n$, es decir, probar que

$$k \geq \int_0^\infty \|\tanh(\tilde{q}(t))\|^2 dt$$



(a) Resultados comparativos donde τ_{1a} y τ_{2a} representan los pares obtenidos con la ley adaptable (9) y τ_{1b} y τ_{2b} los pares obtenidos en [1, Capítulo 15].



(b) Resultados comparativos donde $\hat{\theta}_{1a}$ y $\hat{\theta}_{2a}$ representan los parámetros adaptados con la ley adaptable (9) y $\hat{\theta}_{1b}$ y $\hat{\theta}_{2b}$ los parámetros adaptados en [1, Capítulo 15].

A partir de (31), integrando ambos lados de la desigualdad, tenemos que

$$\int_{V_0}^{V_\infty} dV \leq -\gamma \lambda_{\min}\{Q\} \int_0^\infty \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2 dt \quad (32)$$

donde se definió $V_0 := V(\tilde{\mathbf{q}}(0), \dot{\tilde{\mathbf{q}}}(0), \tilde{\boldsymbol{\theta}}(0))$ y $V_\infty := \lim_{t \rightarrow \infty} V(\tilde{\mathbf{q}}(t), \dot{\tilde{\mathbf{q}}}(t), \tilde{\boldsymbol{\theta}}(t))$. Para esto, el lado izquierdo de la desigualdad (32) puede ser evaluado trivialmente como

$$V_\infty - V_0 \leq -\gamma \lambda_{\min}\{Q\} \int_0^\infty \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2 dt$$

lo que puede ser reescrito como

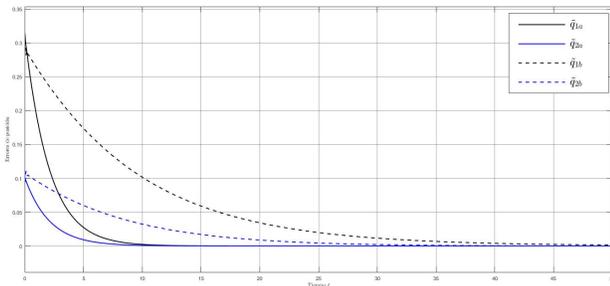
$$-V_0 \leq -\gamma \lambda_{\min}\{Q\} \int_0^\infty \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2 dt - V_\infty, \quad (33)$$

Al saber que la función de Lyapunov $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}})$ es definida positiva, se conoce que $V_\infty \geq 0$ y por lo tanto, de la desigualdad (33) se tiene que

$$-V_0 \leq -\gamma \lambda_{\min}\{Q\} \int_0^\infty \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2 dt. \quad (34)$$

De la desigualdad (34) se llega a

$$\frac{V_0}{\gamma \lambda_{\min}\{Q\}} \geq \int_0^\infty \|\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})\|^2 dt, \quad (35)$$



(a) Resultados en simulación de los errores de posición, donde el subíndice a representa el controlador con la ley adaptable (9) y el subíndice b representa la ley adaptable utilizada en [1, Capítulo 15].

donde el término $V_0/(\gamma \lambda_{\min}\{Q\})$ es constante y positivo. Por lo tanto, se puede decir que el error de posición $\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}})$ pertenece a \mathcal{L}_2^n , es decir

$$\mathbf{tanh}(\tilde{\mathbf{q}}) \in \mathcal{L}_2^n$$

Utilizando el lema 1 se concluye que los errores de posición $\tilde{\mathbf{q}}$ tienden asintóticamente a cero, es decir

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{0} \quad \forall \mathbb{R}^n.$$

Es decir, se alcanza el objetivo de control.

IV. SIMULACIONES

A manera de ilustración de los resultados del análisis de estabilidad se muestran algunas simulaciones numéricas donde se puede observar que los errores de posición tienden a cero y los parámetros estimados están acotados, y están dados por la masa del segundo eslabón y por el producto de la masa del segundo eslabón por la distancia al centro de masa del segundo eslabón. Se muestran los resultados obtenidos con la ley adaptable (9) y un cambio en las ganancias, donde las ganancias proporcional y derivativa quedaron definidas como $K_p = \text{diag}\{30\}$ y $K_v = \text{diag}\{7, 3\}$, y la matriz de ganancias de los parámetros adaptables quedo definida como $\Gamma = \text{diag}\{550, 49\}$ y $\gamma = 0.5$ aplicado al modelo del robot CICESE ubicado en el Instituto Tecnológico de la Laguna.



Figura 4: Robot de dos grados de libertad.

Actualmente se pretenden desarrollar pruebas experimentales en el robot de dos grados de libertad ubicado en el Instituto Tecnológico de la Laguna, mostrado en la Figura 4.

En la Figura 2b se tienen unos tiempos de convergencia de 9.62 segundos y 46.2 segundos para θ_1 y 13.69 segundos y 45.14 segundos para θ_2 .

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un análisis comparativo de estabilidad para el controlador PD con compensación deseada de gravedad en su versión adaptable en regulación utilizando la Teoría de Lyapunov auxiliada de un enfoque alternativo del principio de invariancia de LaSalle, que se ve en [2], así como utilizando argumentos estándares de control adaptable basados en el lema de Barbalat, como se ve en [7, Lema 2.1], en los cuales ha sido posible concluir la convergencia de los errores de posición a cero. Se han establecido además condiciones suficientes para poder concluir estabilidad asintótica de manera global.

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan su agradecimiento al TecNM y al CONACyT por el apoyo recibido y las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] R. Kelly, V. Santibáñez, and A. Loria, *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, ser. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2006.
- [2] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, ser. Pearson Education. Prentice Hall, 2002.
- [3] I. Barkana, "Defending the beauty of the invariance principle," *International Journal of Control*, vol. 87, no. 1, pp. 186–206, 2014.
- [4] R. Kelly, "Global positioning of robot manipulators via pd control plus a class of nonlinear integral actions," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, no. 7, pp. 934–938, Jul 1998.
- [5] P. Ouyang, J. Acob, and V. Pano, "{PD} with sliding mode control for trajectory tracking of robotic system," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 2, pp. 189 – 200, 2014.
- [6] S. S. Sastry, *Nonlinear systems: analysis, stability, and control*. Springer Science & Business Media, 2013, vol. 10.
- [7] R. Kelly and V. Santibáñez, *Control de movimiento de robots manipuladores*, ser. Automática y Robótica. Pearson Educación, 2003.
- [8] A. Loria, R. Kelly, and A. R. Teel, "Uniform parametric convergence in the adaptive control of mechanical systems," *European Journal of Control*, vol. 11, no. 2, pp. 87 – 100, 2005.
- [9] A. Loria, E. Panteley, D. Popovic, and A. R. Teel, " δ -persistence of excitation: a necessary and sufficient condition for uniform attractivity," vol. 3, pp. 3506–3511 vol.3, Dec 2002.

Modelado y Control en Espacio Operacional de un Mecanismo de Cinco Barras

Ismael Medina, Ricardo Campa
 TecNM - Instituto Tecnológico de la Laguna
 División de Estudios de Posgrado e Investigación
 Torreón, Coah., 27000, México

Israel Soto
 Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
 Instituto de Ingeniería y Tecnología
 Ciudad Juárez, Chih., 32310, México

Resumen—Uno de los procedimientos más empleados en la obtención del modelo dinámico de robots manipuladores es el basado en la formulación de Lagrange. Mediante esta formulación el modelo dinámico puede ser obtenido en términos de cualquier conjunto de coordenadas generalizadas, aunque comúnmente se selecciona un conjunto de coordenadas mínimo, que puede ser el de las coordenadas articulares activas (actuadas) o el de las coordenadas operacionales, que describen la posición y orientación (es decir, la postura) del efector final del robot. El objetivo de este documento es ilustrar la aplicación de la formulación de Lagrange para obtener el modelo dinámico en espacio operacional de un sistema mecánico de cadena cinemática cerrada conocido como mecanismo de cinco barras. Además, se presentan los resultados experimentales obtenidos al aplicar diferentes controladores en espacio operacional a un prototipo de mecanismo de cinco barras con el que contamos en nuestro laboratorio.

I. INTRODUCCIÓN

Los robots manipuladores son, por mucho, los más usados en la industria, al grado de que el término robot industrial se ha vuelto un sinónimo de robot manipulador. De acuerdo con [1] un robot manipulador está construido por una sucesión de cuerpos rígidos (eslabones) conectados por medio de articulaciones, que pueden estar actuadas (articulaciones activas) o no (articulaciones pasivas), y constituyen lo que se conoce como una cadena cinemática. Un manipulador cuenta con un eslabón fijo o base, y generalmente lo que se pretende es, mediante el movimiento proporcionado por las articulaciones activas, controlar la posición y orientación (i.e., la postura) del eslabón que contiene el llamado elemento terminal, que le permite al robot realizar la tarea especificada.

De acuerdo a su estructura mecánica, los robots manipuladores se clasifican en robots de cadena cinemática abierta (en los que existe sólo un camino desde la base hasta el elemento terminal) y de cadena cinemática cerrada (en los que existe más de un camino). Los robots manipuladores de cadena abierta se conocen comúnmente como robots seriales, mientras que los llamados robots paralelos son un caso particular de los robots de cadena cerrada en los que el elemento terminal está unido a la base por medio de dos o más cadenas cinemáticas independientes, conocidas como piernas del robot. Para más información sobre robots paralelos véase la referencia [2].

Debido a las cadenas cerradas, en los robots paralelos existen restricciones cinemáticas que limitan el movimiento relativo entre los eslabones. Y cuando tales restricciones se pueden expresar como ecuaciones algebraicas entre las coordenadas (no mínimas) seleccionadas, se habla de restricciones *holonómicas*.

El modelo dinámico de un manipulador, obtenido mediante las ecuaciones de movimiento de Lagrange, puede estar escrito en términos de cualquier conjunto de coordenadas generalizadas,

ya sea mínimo o no mínimo. Un conjunto de coordenadas generalizadas se dice que es mínimo si su número es igual al número n de grados de libertad (gdl) del robot y es no mínimo si el conjunto está formado por $m > n$ coordenadas. Las ecuaciones de movimiento de Lagrange, formuladas en términos de un conjunto no mínimo de coordenadas son llamadas *ecuaciones de Lagrange de primera especie* y requieren la resolución de $m - n$ multiplicadores de Lagrange. A las ecuaciones de movimiento de Lagrange formuladas en términos de un conjunto mínimo de coordenadas se les conoce como *ecuaciones de Lagrange de segunda especie*.

El modelo dinámico de un robot paralelo debe satisfacer las restricciones holonómicas impuestas por las cadenas cerradas. Y aunque es posible obtener el modelo dinámico empleando directamente un conjunto mínimo de coordenadas generalizadas, es mejor trabajar con un conjunto no mínimo de coordenadas obteniendo así un *modelo dinámico no mínimo*, y luego aplicar el llamado método de proyección para obtener un *modelo dinámico mínimo*. Cabe mencionar que se puede seleccionar cualquier conjunto de coordenadas mínimas para obtener el modelo dinámico mínimo, pero lo común es seleccionar ya sea las coordenadas articulares activas (ya que generalmente el número de articulaciones actuadas es igual al número de gdl del robot) o bien las coordenadas operacionales (un conjunto mínimo de coordenadas de postura) del elemento terminal.

El llamado mecanismo de cinco barras (M5B), o también mecanismo \overline{RRRRR} , es un sistema que sirve como un punto de partida para el estudio de los robots paralelos, ya que es un robot paralelo planar de sólo dos grados de libertad. La figura 1 muestra el modelo CAD del prototipo de M5B que se encuentra operativo en el Laboratorio de Mecatrónica y Control del Instituto Tecnológico de la Laguna.

En este trabajo se propone el uso de coordenadas operacionales, que en el caso del M5B determinan la posición en el plano del elemento terminal, para obtener un modelo dinámico mínimo en espacio operacional de este sistema. Además, con fines de comparación, se obtiene también el modelo dinámico mínimo en espacio articular. Posteriormente, se aplican y evalúan en forma experimental cuatro controladores de movimiento que se implementan en espacio operacional.

II. EL MECANISMO DE CINCO BARRAS

El M5B posee 2 gdl y presenta un movimiento restringido a un plano. El mecanismo es llamado así, debido a que consta de cuatro eslabones móviles y un eslabón fijo que corresponde a la base del robot. Aunque, en general, los eslabones móviles del

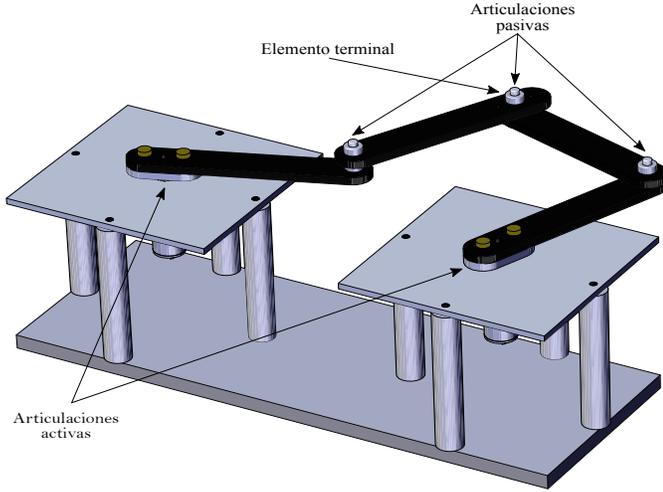


Figura 1: Modelo CAD del mecanismo de cinco barras del Tecnológico de la Laguna.

M5B pueden ser de diferente longitud (correspondiente a L_1 , L_2 , L_3 y L_4 en la figura 2) en lo sucesivo, se considera que son de la misma longitud, igual a L . Asimismo, la longitud del eslabón fijo (distancia entre los puntos A_1 y A_2) se considera igual a $2L$.

El movimiento relativo entre los eslabones móviles se lleva a cabo por medio de cinco articulaciones rotacionales, dos de ellas activas (las correspondientes a los puntos A_1 y A_2 en la figura 2) y las tres restantes son pasivas (las indicadas como puntos B_1 , B_2 y P en la misma figura). El elemento terminal del robot, ubicado en el punto P , tiene coordenadas cartesianas

$$\chi = [x_m \quad y_m]^T \in \mathbb{R}^2 \quad (1)$$

definidas con respecto al marco de referencia $\Sigma_0(X_0, Y_0)$ colocado en el punto medio entre los puntos A_1 y A_2 .

Además, para fines de modelado, se define el vector de coordenadas articulares activas

$$\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2]^T \in \mathbb{R}^2$$

y el vector de coordenadas articulares pasivas

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \quad \beta_2]^T \in \mathbb{R}^2$$

donde q_1 , q_2 , β_1 y β_2 son ángulos mostrados en la figura 2. Y combinando \mathbf{q} y $\boldsymbol{\beta}$ se obtiene el vector de coordenadas generalizadas no mínimas

$$\boldsymbol{\rho} = [\mathbf{q}^T \quad \boldsymbol{\beta}^T]^T \in \mathbb{R}^4.$$

Cabe señalar que las coordenadas operacionales del elemento terminal (x_m, y_m) pueden ser controladas por medio de las coordenadas articulares activas (q_1, q_2) , y ese es el principio en el que se basa el esquema de control en espacio operacional que se explica en la sección 3.

II-A. Modelado cinemático

El análisis de posición de los robots manipuladores implica dos problemas, el de cinemática directa y el de cinemática inversa. El modelo cinemático inverso de posición (MCIP) consiste en el mapeo de una postura (es decir, una posición y orientación) conocida del elemento terminal del robot, a un conjunto de

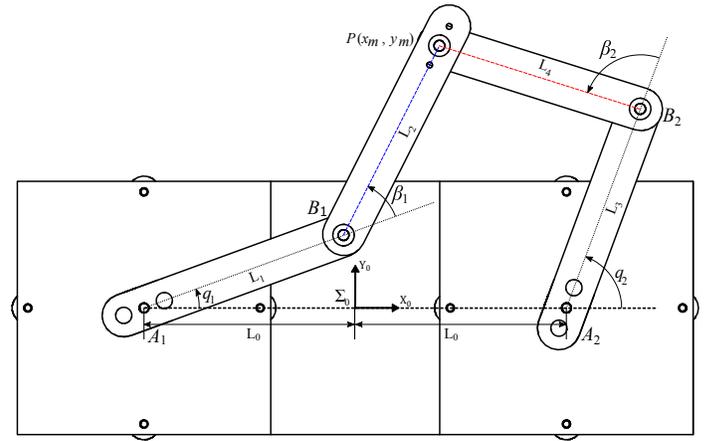


Figura 2: Parámetros cinemáticos del mecanismo de cinco barras.

variables articulares activas que logren esa postura. El modelo cinemático directo de posición (MCDP) es el problema de encontrar la postura del efector final a partir de ciertas coordenadas articulares activas previamente dadas. En otras palabras para el M5B, las ecuaciones obtenidas del análisis cinemático de posición describen la relación entre los vectores \mathbf{q} y χ .

A continuación se describe como obtener el MCIP y el MCDP del M5B.

II-A1. Modelo cinemático inverso: Como ya se explicó la posición del elemento terminal está descrita por el vector (1). Con respecto al marco de referencia Σ_0 , los vectores de posición \mathbf{b}_i de los puntos B_i ($i = 1, 2$) pueden ser escritos como

$$\mathbf{b}_1 = L [\mathbf{C}(q_1) - 1 \quad \mathbf{S}(q_1)]^T, \quad \mathbf{b}_2 = L [\mathbf{C}(q_2) + 1 \quad \mathbf{S}(q_2)]^T \in \mathbb{R}^2$$

donde se usa la notación $\mathbf{C}(\cdot) = \cos(\cdot)$ y $\mathbf{S}(\cdot) = \sin(\cdot)$. Entonces el MCIP puede ser resuelto escribiendo las siguientes ecuaciones de restricción:

$$\gamma_1 = \|\chi - \mathbf{b}_1\| - L = 0, \quad \gamma_2 = \|\chi - \mathbf{b}_2\| - L = 0$$

o en otra forma:

$$(x_m - LC(q_1) + L)^2 + (y_m - LS(q_1))^2 = L^2 \quad (2)$$

$$(x_m - LC(q_2) - L)^2 + (y_m - LS(q_2))^2 = L^2. \quad (3)$$

De las ecuaciones anteriores, si la posición (x_m, y_m) del punto P es conocida, las coordenadas q_1 y q_2 se pueden obtener como:

$$q_i = \text{atan2}(\mathbf{S}(q_i), \mathbf{C}(q_i)), \quad i = 1, 2$$

donde

$$\mathbf{S}(q_i) = \frac{b_i c_i \pm a_i \sqrt{a_i^2 + b_i^2 - c_i^2}}{a_i^2 + b_i^2}, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\mathbf{C}(q_i) = \frac{a_i c_i \mp b_i \sqrt{a_i^2 + b_i^2 - c_i^2}}{a_i^2 + b_i^2}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

en las cuales

$$a_1 = 2L(x_m + L)$$

$$b_1 = b_2 = 2y_m L$$

$$c_1 = L^2 + (x_m + L)^2 + y_m^2 - L^2$$

$$a_2 = 2L(x_m - L)$$

$$c_2 = L^2 + (x_m - L)^2 + y_m^2 - L^2$$

Nótese que existen cuatro soluciones posibles para el MCIP del M5B, dependiendo del signo que se tome en (4) y (5).

II-A2. Modelo cinemático directo: La solución al MCDP consiste en obtener el vector χ en función de \mathbf{q} .

Desarrollando las expresiones (2) y (3) es posible llegar a un sistema de ecuaciones del tipo:

$$x_m^2 + y_m^2 + a'_1 x_m + b'_1 y_m + c'_1 = 0 \quad (6)$$

$$x_m^2 + y_m^2 + a'_2 x_m + b'_2 y_m + c'_2 = 0 \quad (7)$$

donde

$$a'_1 = 2L(1 - C(q_1))$$

$$b'_1 = -2LS(q_1)$$

$$c'_1 = L^2(1 - 2C(q_1))$$

$$a'_2 = -2L(1 + C(q_2))$$

$$b'_2 = -2LS(q_2)$$

$$c'_2 = L^2(1 + 2C(q_2))$$

Nótese que (6) y (7) representan las ecuaciones de dos circunferencias que se intersectan. Los dos puntos de intersección (que serían las soluciones del MCDP) deben satisfacer la siguiente expresión

$$x_m = d(\mathbf{q})y_m + e(\mathbf{q}) \quad (8)$$

donde

$$d(\mathbf{q}) = \frac{S(q_1) - S(q_2)}{C(q_2) - C(q_1) + 2}$$

$$e(\mathbf{q}) = \frac{L(C(q_1) + C(q_2))}{C(q_2) - C(q_1) + 2}$$

Sustituyendo la ecuación (8) en (6) se obtiene

$$f(\mathbf{q})y_m^2 + g(\mathbf{q})y_m + h(\mathbf{q}) = 0 \quad (9)$$

en la cual

$$f(\mathbf{q}) = 1 + d(\mathbf{q})^2$$

$$g(\mathbf{q}) = 2d(\mathbf{q})e(\mathbf{q}) + a'_1 d(\mathbf{q}) + b'_1$$

$$h(\mathbf{q}) = e(\mathbf{q})^2 + a'_1 e(\mathbf{q}) + c'_1$$

Por lo tanto, y_m puede obtenerse de (9) como

$$y_m = \frac{-g(\mathbf{q}) \pm \sqrt{g(\mathbf{q})^2 - 4f(\mathbf{q})h(\mathbf{q})}}{2f(\mathbf{q})} \quad (10)$$

Las ecuaciones (8) y (10) dan las dos soluciones posibles del MCDP para el M5B.

II-B. Modelado dinámico

El modelo dinámico de un robot manipulador puede obtenerse a partir de las ecuaciones de movimiento de Lagrange. Tales ecuaciones pueden escribirse en términos de un conjunto de coordenadas generalizadas no mínimas. Se llega entonces a un sistema de ecuaciones algebro-diferenciales que se pueden escribir como

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})}{\partial \dot{\boldsymbol{\rho}}} \right\} - \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})}{\partial \boldsymbol{\rho}} = \boldsymbol{\tau}_\rho + \left(\frac{\partial \boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}} \right)^T \boldsymbol{\lambda} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{0} \quad (12)$$

donde $\boldsymbol{\rho}$ es el vector de coordenadas generalizadas no mínimas, $\boldsymbol{\tau}_\rho$ denota el vector de fuerzas generalizadas, el lagrangiano $\mathcal{L}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})$ es la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial del mecanismo; el último término de la ecuación (11) representa el vector que determina las fuerzas de restricción asociadas a las coordenadas generalizadas no mínimas, donde $\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho})$ es el vector de restricciones holonómicas y $\boldsymbol{\lambda}$ es el vector de multiplicadores de Lagrange, que asegura que tales restricciones se cumplan.

II-B1. Modelo dinámico no mínimo: La ecuación (11) puede reescribirse en su forma compacta como:

$$M(\boldsymbol{\rho})\ddot{\boldsymbol{\rho}} + C(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})\dot{\boldsymbol{\rho}} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\rho}) = \boldsymbol{\tau}_\rho + D(\boldsymbol{\rho})^T \boldsymbol{\lambda} \quad (13)$$

donde $M(\boldsymbol{\rho})$ es llamada la matriz de inercias, $C(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})$ es la matriz centrífuga y de Coriolis, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\rho})$ es el vector de fuerzas debidas a la gravedad y $D(\boldsymbol{\rho}) = \frac{\partial \boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}}$ es el jacobiano del vector de restricciones.

Dado que el M5B es de 2 gdl, deben existir dos ecuaciones de restricción, expresadas de la forma $\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^2$, esto es:

$$\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho}) = L \begin{bmatrix} C(q_1) + C(q_1 + \beta_1) - C(q_2) - C(q_2 + \beta_2) - 2 \\ S(q_1) + S(q_1 + \beta_1) - S(q_2) - S(q_2 + \beta_2) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^2 \quad (14)$$

De modo que $D(\boldsymbol{\rho}) = \frac{\partial \boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}}$ queda

$$D(\boldsymbol{\rho}) = L \begin{bmatrix} D_{11}(\boldsymbol{\rho}) & D_{12}(\boldsymbol{\rho}) & D_{13}(\boldsymbol{\rho}) & D_{14}(\boldsymbol{\rho}) \\ D_{21}(\boldsymbol{\rho}) & D_{22}(\boldsymbol{\rho}) & D_{23}(\boldsymbol{\rho}) & D_{24}(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 4}$$

donde

$$D_{11}(\boldsymbol{\rho}) = -S(q_1) - S(q_1 + \beta_1)$$

$$D_{12}(\boldsymbol{\rho}) = S(q_2) + S(q_2 + \beta_2)$$

$$D_{13}(\boldsymbol{\rho}) = -S(q_1 + \beta_1)$$

$$D_{14}(\boldsymbol{\rho}) = S(q_2 + \beta_2)$$

$$D_{21}(\boldsymbol{\rho}) = C(q_1) + C(q_1 + \beta_1)$$

$$D_{22}(\boldsymbol{\rho}) = -C(q_2) - C(q_2 + \beta_2)$$

$$D_{23}(\boldsymbol{\rho}) = C(q_1 + \beta_1)$$

$$D_{24}(\boldsymbol{\rho}) = -C(q_2 + \beta_2)$$

El modelo de la forma (13) para el M5B quedaría definido por las siguientes matrices:

$$M(\boldsymbol{\rho}) = \begin{bmatrix} M_{11}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & M_{13}(\boldsymbol{\rho}) & 0 \\ 0 & M_{22}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & M_{24}(\boldsymbol{\rho}) \\ M_{31}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & M_{33}(\boldsymbol{\rho}) & 0 \\ 0 & M_{42}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & M_{44}(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4},$$

$$C(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = \begin{bmatrix} C_{11}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) & 0 & C_{13}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) & 0 \\ 0 & C_{22}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) & 0 & C_{24}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) \\ C_{31}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{42}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}.$$

donde los elementos no nulos de las matrices anteriores son:

$$M_{11}(\boldsymbol{\rho}) = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_{c2}^2 + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_{c2} \cos(\beta_1) + I_1 + I_2$$

$$M_{13}(\boldsymbol{\rho}) = M_{31}(\boldsymbol{\rho}) = m_2 l_{c2}^2 + m_2 L_1 l_{c2} \cos(\beta_1) + I_2$$

$$M_{22}(\boldsymbol{\rho}) = m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_4 L_3^2 + 2m_4 L_3 l_{c4} \cos(\beta_2) + I_3 + I_4$$

$$M_{24}(\boldsymbol{\rho}) = M_{42}(\boldsymbol{\rho}) = m_4 l_{c4}^2 + m_4 L_3 l_{c4} \cos(\beta_2) + I_4$$

$$M_{33}(\boldsymbol{\rho}) = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$M_{44}(\boldsymbol{\rho}) = m_4 l_{c4}^2 + I_4$$

$$C_{11}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = -m_2 L_1 l_{c2} \sin(\beta_1) \dot{\beta}_1$$

$$C_{13}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = -m_2 L_1 l_{c2} \sin(\beta_1) [\dot{q}_1 + \dot{\beta}_1]$$

$$C_{22}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = -m_4 L_3 l_{c4} \sin(\beta_2) \dot{\beta}_2$$

$$C_{24}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = -m_4 L_3 l_{c4} \sin(\beta_2) [\dot{q}_2 + \dot{\beta}_2]$$

$$C_{31}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = m_2 L_1 l_{c2} \sin(\beta_1) \dot{q}_1$$

$$C_{42}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = m_4 L_3 l_{c4} \sin(\beta_2) \dot{q}_2$$

donde m_i es la masa del eslabón i , l_{c_i} es la distancia del eje de rotación del eslabón i a su centro de masa (c.d.m.), e I_i es el

momento de inercia con respecto a un eje perpendicular al plano de movimiento y que pasa por el c.d.m. del eslabón i .

Dado que se considera que el M5B se mueve en el plano horizontal $\mathbf{g}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{0}$. Asimismo, el vector $\boldsymbol{\tau}_\rho$ y el vector de multiplicadores de Lagrange se definen de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau}_\rho = [\tau_{q_1} \quad \tau_{q_2} \quad 0 \quad 0]^T \in \mathbb{R}^4 \quad \text{y} \quad \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T \in \mathbb{R}^2$$

II-B2. Modelo dinámico mínimo en espacio articular: Nótese que el modelo (13) es no mínimo, en el sentido de que queda definido en términos del vector $\boldsymbol{\rho} \in \mathbb{R}^4$ y requiere el cálculo del vector de fuerzas de restricción (último término de (13)). Afortunadamente siempre es posible encontrar una matriz $R(\boldsymbol{\rho})$ cuyas columnas pertenezcan al espacio nulo de $D(\boldsymbol{\rho})$, de manera que $D(\boldsymbol{\rho})R(\boldsymbol{\rho}) = O$, o bien, $R(\boldsymbol{\rho})^T D(\boldsymbol{\rho})^T = O$.

Y es posible demostrar que tal matriz $R(\boldsymbol{\rho})$ satisface

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = R(\boldsymbol{\rho})\dot{\boldsymbol{q}} \quad (15)$$

pero si se define

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = J_q(\boldsymbol{\rho})\dot{\boldsymbol{q}}$$

entonces, recordando que $\boldsymbol{\rho} = [\mathbf{q}^T \quad \boldsymbol{\beta}^T]^T$, es posible reescribir (15) como

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}} \\ \dot{\boldsymbol{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ J_q(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}} \in \mathbb{R}^{4 \times 2}.$$

de modo que el jacobiano $J_q(\boldsymbol{\rho})$ se puede obtener derivando (14) con respecto al tiempo, reagrupando términos y despejando $\dot{\boldsymbol{\beta}}$. Finalmente queda

$$J_q(\boldsymbol{\rho}) = \begin{bmatrix} J_{q_{11}}(\boldsymbol{\rho}) & J_{q_{12}}(\boldsymbol{\rho}) \\ J_{q_{21}}(\boldsymbol{\rho}) & J_{q_{22}}(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

con

$$J_{q_{11}}(\boldsymbol{\rho}) = \frac{S(q_2 + \beta_2 - q_1) - S(q_1 - q_2 + \beta_1 - \beta_2)}{S(q_1 - q_2 + \beta_1 - \beta_2)}$$

$$J_{q_{12}}(\boldsymbol{\rho}) = -\frac{S(\beta_2)}{S(q_1 - q_2 + \beta_1 - \beta_2)}$$

$$J_{q_{21}}(\boldsymbol{\rho}) = \frac{S(\beta_1)}{S(q_1 - q_2 + \beta_1 - \beta_2)}$$

$$J_{q_{22}}(\boldsymbol{\rho}) = -\frac{S(q_1 + \beta_1 - q_2) + S(q_1 - q_2 + \beta_1 - \beta_2)}{S(q_1 - q_2 + \beta_1 - \beta_2)}$$

Obtenida la matriz $R(\boldsymbol{\rho})$ el modelo dinámico reducido en espacio articular del M5B, se obtiene premultiplicando (13) por $R(\boldsymbol{\rho})^T$ y utilizando (15) y su derivada temporal; se llega a

$$M_r(\boldsymbol{\rho})\ddot{\boldsymbol{q}} + C_r(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})\dot{\boldsymbol{q}} + \mathbf{g}_r(\boldsymbol{\rho}) = \boldsymbol{\tau}_r \quad (16)$$

donde

$$M_r(\boldsymbol{\rho}) = R(\boldsymbol{\rho})^T M(\boldsymbol{\rho}) R(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

$$C_r(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = R(\boldsymbol{\rho})^T M(\boldsymbol{\rho}) \dot{R}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) + R(\boldsymbol{\rho})^T C(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) R(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

$$\mathbf{g}_r(\boldsymbol{\rho}) = R(\boldsymbol{\rho})^T \mathbf{g}(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$$

$$\boldsymbol{\tau}_r = R(\boldsymbol{\rho})^T \boldsymbol{\tau}_\rho \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$$

Nótese que $\boldsymbol{\tau}_r = \boldsymbol{\tau}_q = [\tau_{q_1} \quad \tau_{q_2}]^T$ y que (16) es una ecuación diferencial vectorial no lineal en el estado $[\mathbf{q}^T \quad \dot{\mathbf{q}}^T]^T$.

II-B3. Modelo dinámico mínimo en espacio operacional: Siguiendo un procedimiento similar al empleado en la subsección anterior es posible encontrar una matriz $S(\boldsymbol{\rho})$ que en este caso satisfaga

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = S(\boldsymbol{\rho})\dot{\boldsymbol{\chi}} \quad (17)$$

o bien

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}} \\ \dot{\boldsymbol{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W(\boldsymbol{\rho}) \\ J_\chi(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\chi}}$$

donde $W(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ y $J_\chi(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ son matrices jacobianas que transforman los vectores de velocidades $\dot{\boldsymbol{\chi}}$ en $\dot{\boldsymbol{q}}$ y $\dot{\boldsymbol{\chi}}$ en $\dot{\boldsymbol{\beta}}$, respectivamente. Para obtener las matrices $W(\boldsymbol{\rho})$ y $J_\chi(\boldsymbol{\rho})$, que a su vez forman la matriz $S(\boldsymbol{\rho})$, es necesario considerar las siguientes expresiones:

$$LC(q_1) + LC(q_1 + \beta_1) - L = x_m$$

$$LC(q_2) + LC(q_2 + \beta_2) + L = x_m$$

$$LS(q_1) + LS(q_1 + \beta_1) = y_m$$

$$LS(q_2) + LS(q_2 + \beta_2) = y_m$$

mismas que, combinadas, forman el vector $\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho})$. Obteniendo las derivadas temporales de las ecuaciones anteriores y realizando algunas consideraciones trigonométricas, es posible llegar a las expresiones de las cuales se obtiene la matriz $W(\boldsymbol{\rho})$. Dichas expresiones son:

$$L^2 S(\beta_1) \dot{q}_1 = [LC(q_1 + \beta_1)] \dot{x}_m + [LS(q_1 + \beta_1)] \dot{y}_m$$

$$L^2 S(\beta_2) \dot{q}_2 = [LC(q_2 + \beta_2)] \dot{x}_m + [LS(q_2 + \beta_2)] \dot{y}_m$$

De igual manera es posible obtener las ecuaciones para $J_\chi(\boldsymbol{\rho})$ a partir de las expresiones que forman el vector $\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{\rho})$, las cuales son:

$$-L^2 S(\beta_1) \dot{\beta}_1 = L[C(q_1) + C(q_1 + \beta_1)] \dot{x}_m + L[S(q_1) + S(q_1 + \beta_1)] \dot{y}_m$$

$$-L^2 S(\beta_2) \dot{\beta}_2 = L[C(q_2) + C(q_2 + \beta_2)] \dot{x}_m + L[S(q_2) + S(q_2 + \beta_2)] \dot{y}_m$$

Por lo tanto, para el mecanismo estudiado se llega a:

$$S(\boldsymbol{\rho}) = \begin{bmatrix} \frac{C(q_1 + \beta_1)}{LS(\beta_1)} & \frac{S(q_1 + \beta_1)}{LS(\beta_1)} \\ \frac{C(q_2 + \beta_2)}{LS(\beta_2)} & \frac{S(q_2 + \beta_2)}{LS(\beta_2)} \\ -\frac{C(q_1) + C(q_1 + \beta_1)}{LS(\beta_1)} & -\frac{S(q_1) + S(q_1 + \beta_1)}{LS(\beta_1)} \\ -\frac{C(q_2) + C(q_2 + \beta_2)}{LS(\beta_2)} & -\frac{S(q_2) + S(q_2 + \beta_2)}{LS(\beta_2)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 2} \quad (18)$$

Se puede verificar de igual manera que $D(\boldsymbol{\rho})S(\boldsymbol{\rho}) = O$, o equivalentemente, $S(\boldsymbol{\rho})^T D(\boldsymbol{\rho})^T = O$. Así que el modelo dinámico mínimo en espacio operacional se obtiene premultiplicando (13) por $S(\boldsymbol{\rho})^T$ y usando (17), así como su derivada temporal, lo que resulta en

$$M_s(\boldsymbol{\rho})\ddot{\boldsymbol{\chi}} + C_s(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})\dot{\boldsymbol{\chi}} + \mathbf{g}_s(\boldsymbol{\rho}) = \boldsymbol{\tau}_s \quad (19)$$

donde

$$M_s(\boldsymbol{\rho}) = S(\boldsymbol{\rho})^T M(\boldsymbol{\rho}) S(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

$$C_s(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) = S(\boldsymbol{\rho})^T M(\boldsymbol{\rho}) \dot{S}(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) + S(\boldsymbol{\rho})^T C(\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}}) S(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

$$\mathbf{g}_s(\boldsymbol{\rho}) = S(\boldsymbol{\rho})^T \mathbf{g}(\boldsymbol{\rho}) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = S(\boldsymbol{\rho})^T \boldsymbol{\tau}_\rho \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$$

Sin embargo, para que (19) sea de utilidad es necesario expresar τ_s en función de las fuerzas generalizadas aplicadas a las articulaciones activas (τ_q), pero es fácil demostrar que esa relación esta dada por

$$\tau_s = W(\rho)^T \tau_q$$

donde

$$W(\rho) = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \frac{C(q_1 + \beta_1)}{S(\beta_1)} & \frac{S(q_1 + \beta_1)}{S(\beta_1)} \\ \frac{C(q_2 + \beta_2)}{S(\beta_2)} & \frac{S(q_2 + \beta_2)}{S(\beta_2)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

De esta forma, (19) se puede reescribir como:

$$M_s(\rho)\ddot{\chi} + C_s(\rho, \dot{\rho})\dot{\chi} + g_s(\rho) = W(\rho)^T \tau_q$$

Nótese ahora que los estados que definen la dinámica del sistema son $[\chi^T \dot{\chi}^T]^T$.

III. CONTROL EN ESPACIO OPERACIONAL

El control de regulación y el seguimiento de trayectorias son las tareas más comunes a realizar por robots manipuladores; dada una trayectoria deseada, se determinan los pares aplicados a los servoactuadores que forman las articulaciones, de tal manera que el manipulador siga esa trayectoria variante en el tiempo. En lo siguiente, se presentan cuatro esquemas de control que serán aplicados para el seguimiento de una trayectoria en espacio operacional.

Para definir las leyes de control en espacio operacional se utilizan las mismas expresiones de los controladores en espacio articular, pero dado que las fuerzas generalizadas (en este caso pares) son aplicadas a las articulaciones activas, se debe emplear la pseudoinversa derecha de W^T (que en este caso es igual a la inversa de dicha matriz, es decir, W^{-T}). En los controladores el vector $\chi_d \in \mathbb{R}^2$ es la postura deseada, por lo tanto, contiene la trayectoria deseada a seguir por el efector final, y el vector $\tilde{\chi} = \chi_d - \chi \in \mathbb{R}^2$ es el error de seguimiento. Mas detalles sobre los controladores aquí empleados pueden consultarse en [3].

III-A. Control PD

La primera estrategia de control es una ley de control PD basada en el error de posición y velocidad del vector de coordenadas de postura. La ley de control es:

$$\tau_q = W^{-T} (K_p \tilde{\chi} + K_v \dot{\tilde{\chi}})$$

donde $K_p, K_v \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ son matrices definidas positivas seleccionadas por el diseñador y denominadas ganancia de posición y de velocidad, respectivamente.

III-B. Control PID

Una alternativa al control PD es incorporar un término adicional denominado acción de control integral, esto da origen al control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). La ley de control PID puede expresarse de la siguiente manera:

$$\tau_q = W^{-T} \left[K_p \tilde{\chi} + K_v \dot{\tilde{\chi}} + K_i \int_0^t \tilde{\chi}(\mu) d\mu \right]$$

donde las matrices de diseño $K_p, K_v, K_i \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, llamadas respectivamente las ganancias proporcional, derivativa e integral, son matrices simétricas y definidas positivas convenientemente elegidas.

III-C. Control PD con precompensación

El control PD con precompensación es un controlador PD básico que compensa la dinámica del robot evaluada explícitamente en el movimiento deseado. Esta ley de control es:

$$\tau_q = W^{-T} [M_s(\rho)\ddot{\chi}_d + C_s(\rho, \dot{\rho})\dot{\chi}_d + K_p \tilde{\chi} + K_v \dot{\tilde{\chi}}]$$

III-D. Control Par Calculado

El algoritmo par calculado es una estructura de control de trayectorias que tiene el atributo de obtener una ecuación lineal en malla cerrada. El controlador par calculado en espacio operacional tiene la siguiente expresión:

$$\tau_q = W^{-T} \left\{ M_s(\rho) [\ddot{\chi}_d + K_v \dot{\tilde{\chi}} + K_p \tilde{\chi}] + C_s(\rho, \dot{\rho}) \dot{\tilde{\chi}} \right\}$$

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evaluar el desempeño de los controladores descritos en la sección anterior en un M5B se realizaron experimentos en el prototipo del Laboratorio de Mecatrónica y Control del Instituto Tecnológico de la Laguna. Mas información sobre este prototipo puede encontrarse en [4], y una aplicación del mecanismo se describe en [5].

La posición inicial del robot es

$$x_m(0) = 0, \quad y_m(0) = 0$$

La trayectoria deseada está dada por:

$$\chi_d(t) = \begin{bmatrix} 0.04 (1 - e^{-10 \cdot t^3}) - 0.04 (1 - e^{-10 \cdot t^3}) \cos(t) \\ 0.127 - 0.04 (1 - e^{-10 \cdot t^3}) \sin(t) \end{bmatrix} \text{ m}$$

La figura 3 muestra la evolución temporal de la norma de los errores de seguimiento. Las figuras 4 y 5 muestran los pares τ_{q1} y τ_{q2} que se aplican con cada uno de los controladores.

En la tabla 1 se muestran las ganancias utilizadas en cada uno de los controladores y la última columna muestra el valor RMS de las normas del error en el intervalo de ejecución de 19 segundos, con la finalidad de que el elemento terminal realice tres repeticiones del movimiento deseado.

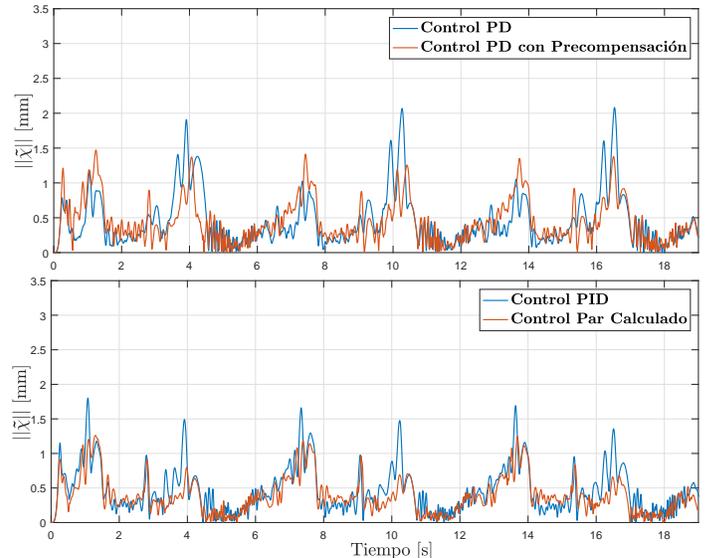


Figura 3: Norma de los errores de seguimiento.

Tabla I: Parámetros de cada uno de los controladores.

Controlador	K_p	K_v	K_i	$\ \tilde{\chi}\ $ rsm [mm]
Control PD	506	13	–	0.59486
Control PID	525	13	13	0.57582
Control PD con Precompensación	536	13	–	0.54592
Control Par-Calculado	2530	73	–	0.47472

REFERENCIAS

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer, 2009.
- [2] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Springer, 2006.
- [3] R. Kelly, V. Santibáñez and A. Loría, *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, Springer, 2005.
- [4] O. Alvarado, “Construcción, modelado y control de un mecanismo tipo péndulo invertido esférico”, tesis de maestría, Instituto Tecnológico de la Laguna, diciembre 2010.
- [5] I. Soto and R. Campa, “Modelling and control of a spherical inverted pendulum on a five-bar mechanism”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 12, No. 95, 2015.

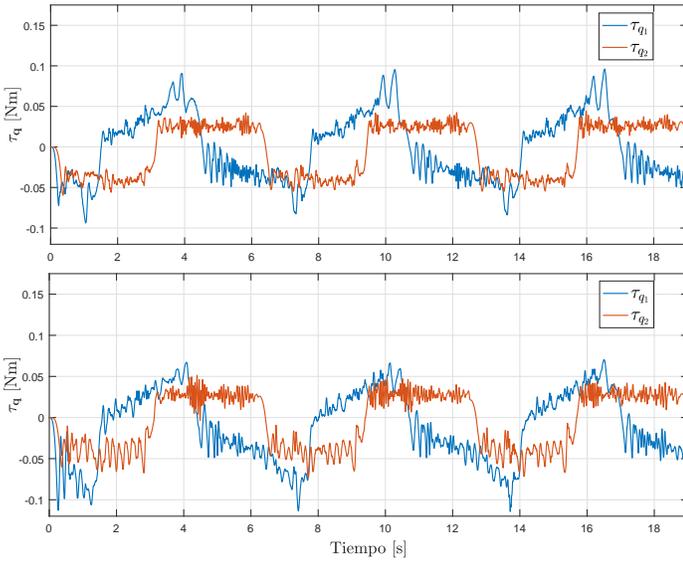


Figura 4: Pares aplicados a cada servomotor: Control PD (arriba) y PD con precompensación (abajo).

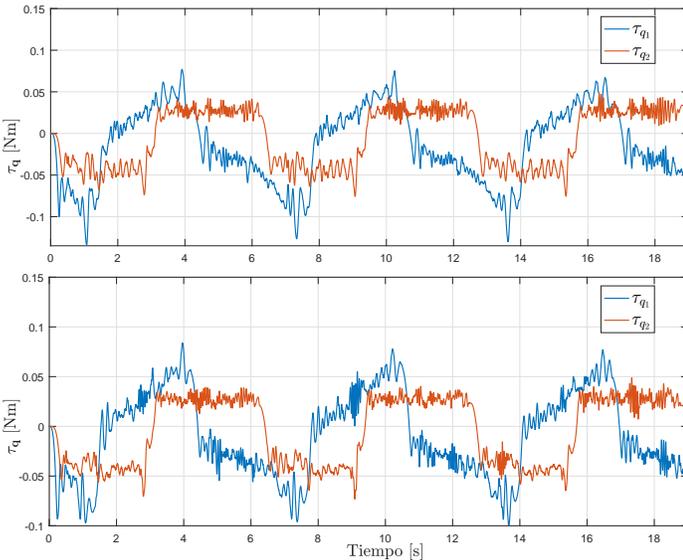


Figura 5: Pares aplicados a cada servomotor: Control PID (arriba) y Control Par Calculado (abajo).

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se realizó una revisión sobre el procedimiento para obtener el modelo dinámico, tanto en espacio articular como operacional, de un sistema de cadena cerrada conocido como mecanismo de cinco barras. La metodología emplea el método de proyección del jacobiano de restricción, con la finalidad de pasar de un modelo dinámico no mínimo a un modelo mínimo. Al final, se implementaron cuatro controladores con el fin de evaluar el desempeño del mecanismo en el seguimiento de una trayectoria circular suavizada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por CONACyT y el Tecnológico Nacional de México (TecNM).

Control cinemático de posición con interpolación polinómica de un manipulador para la identificación y alcance de tomate en invernadero.

Francesco José García Luna
Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Ciudad Juárez, Chihuahua
Email: francesco.garcia@uacj.mx

América Berenice Morales Díaz
Programa de Robótica y Manufactura Avanzada
CINVESTAV Saltillo, Coahuila
Email: america.morales@cinvestav.edu.mx

Resumen—En el presente artículo se diseña un control cinemático de posición con convergencia suave a lazo abierto en un manipulador de 5 grados de libertad dotado con un sensor de visión tridimensional (RGB-D). El objetivo del sensor RGB-D es identificar la posición Euclidiana del centroide del fruto de tomate en condiciones de iluminación en invernadero, la posición detectada se utiliza para indicarle al manipulador la posición del fruto, esto se hace usando la matriz de transformación de la cámara hacia al manipulador, con lo cual el manipulador alcanza la posición del fruto. Se muestran resultados experimentales del desempeño del control aplicado.

I. INTRODUCCIÓN

La robótica y la automatización son actividades que han sido adoptadas en una gran variedad de tareas industrializadas, como el caso de la industria manufacturera. En la actualidad en el campo de la agricultura se han estado desarrollando sistemas autónomos para aumentar su producción y disminuir costos en tareas repetitivas, como el caso del monitoreo y cosecha de frutos, ya que estas tareas representan un rango del 50 a 70 % del costo total de producción [1].

En el caso de la agricultura protegida, es decir, la desarrollada en invernaderos, se encuentra una gran área de oportunidad para la robótica de precisión. Por esta razón, se ha desarrollado tecnología y maquinaria especializada para tareas en invernaderos, tales como siembra, trasplante, riego y control automático ambiental. Sin embargo, cuando se trata del monitoreo y cosecha de frutos se encuentra un gran reto traducido en el aumento de su eficiencia, precisión y robustez en el sensado del ambiente y por ende en el desarrollo de dichas tareas. Por estas razones no se encuentran sistemas robóticos comercializados y si en cambio existe mucho trabajo de investigación y desarrollo en esta dirección. Por lo que se reporta el desarrollo de algunos sistemas robotizados autónomos para la cosecha de frutos tales como el tomate, pepino, uvas, naranjas, melones, por mencionar algunos, en Japón, EUA, Israel y en algunos países Europeos [2].

El tomate (*Solanum lycopersicum L.*) es un fruto que tiene gran relevancia a nivel mundial tanto por su valor nutricional como por su valor como producto procesado [3]. En México, entre los principales cultivos producidos en condiciones

protegidas se encuentra el tomate con un 70 %, seguido por pimiento (*Capsicum annum L.*) 16 % y pepino (*Cucumis sativus L.*) 10 % [4]. Además, México es el principal exportador de tomate a nivel mundial y envía su producto principalmente a EE.UU., Canadá y El Salvador [5]

La tarea de monitoreo y cosecha de tomate usando un sistema robótico autónomo requiere del uso de manipuladores, efectores finales, sensores de visión, y sistemas de navegación y de control [2]. Regularmente, el sistema de manipulación puede consistir de una plataforma móvil en la cual va montado un brazo robótico operado a lazo abierto con el objetivo de mover el efector final hacia el objetivo, que en este caso, es el tomate susceptible de cosecharse. Para lograr la tarea de localización, posicionamiento y cosecha del tomate se requiere el reconocimiento y localización de tomate susceptible de cosecharse en la planta en condiciones ambientales y de iluminación en el invernadero, lo cual constituye un gran reto. Por esta razón, en el presente trabajo se describe el desarrollo de un prototipo robótico dotado con un sensor de visión, con el objetivo de identificar y alcanzar fruto de tomate en condiciones de invernadero.

Para lograr el objetivo planteado, el trabajo se divide en cuatro secciones: en la primera sección se presenta una breve introducción de los retos que existen en el área de robótica en la agricultura protegida. En la segunda sección se presentan los modelos cinemáticos del sistema de visión artificial y del manipulador; el algoritmo de visión artificial que identifica el centroide del tomate; así como también el diseño de la ley de control de regulación que permite al manipulador alcanzar la posición del centroide del tomate identificado. En la tercer sección se muestran los resultados experimentales del sistema propuesto. Finalmente, en la cuarta sección se presentan algunas conclusiones del trabajo.

II. CONTRIBUCIÓN PRINCIPAL

Este artículo propone una modificación del algoritmo de segmentación utilizado en [6] y en [7] para su aplicación en ambientes poco estructurados, que permite identificar fruto de tomate y alcanzarlo mediante un manipulador de 5 grados de libertad. Los experimentos fueron realizados en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Campus Saltillo.

II-A. Modelo Cinemático

El sistema utilizado consta de un manipulador de cinco grados de libertad (todos de revoluta) y tres eslabones de aluminio, una cámara RGB-D y una estructura que une los dos componentes. Primeramente se debe de conocer la posición del efector final con respecto a la base del manipulador (marco referencial inercial) en función de sus variables articulares, es decir:

$$x = f(q) \quad (1)$$

Donde:

- x : vector de la posición Euclidiana del efector final.
- q : vector de posiciones articulares.

También se debe de conocer la posición de un punto 3D visto desde la cámara con respecto al marco referencial inercial, es decir:

$$x_{cam} = f(q_{cam}) \quad (2)$$

Donde:

- x_{cam} : vector de la posición euclidiana de un punto 3D visto desde el marco referencial de la cámara.
- q_{cam} : vector de posiciones articulares de la cámara.

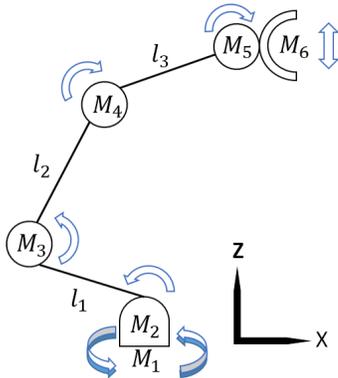


Figura 1. Esquema del manipulador mostrando los actuadores (M_i) y los eslabones (l_j).

En la Figura 1 se observa la estructura esquemática del manipulador, mostrando el eje de rotación de cada uno de los actuadores (M_i) y las longitudes de los eslabones (l_j) que unen a las articulaciones.

Donde:

- l_1 : 12cm.
- l_2 : 17.5cm.
- l_3 : 23cm.

- $M_i = q_i$: i -ésimo actuador relacionado con la i -ésima variable articular.

Debido a que una cadena cinemática puede definirse como un grupo de eslabones unidos o arreglados de forma que el movimiento del eslabón i depende del eslabón $i - 1$, entonces, la cadena cinemática del manipulador presentado en la Figura 1 puede modelarse usando los parámetros presentados en el Cuadro I. Los parámetros de la cadena cinemática fueron calculados utilizando una variación de la convención de Denavit-Hartenberg. Esta variación tiene sólo las siguientes reglas:

- Todas las rotaciones articulares deben de ser sobre el eje z .
- Todas las traslaciones entre marcos referenciales deben de ser sobre el eje x .
- El eje x_i siempre debe de ser paralelo a la dirección del eslabón que une al marco referencial i con el marco referencial $i + 1$.

Cuadro I
CADENA CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR

Σ	$t(x)$	$t(y)$	$t(z)$	$R(x)$	$R(y)$	$R(z)$
0→1	-	-	-	-	-	$\pi/2 - q_1$
1→2	-	-	-	-	-	$-q_2$
2→3	l_1	-	-	-	-	$-\pi/2 - \pi/4 + q_3$
3→4	l_2	-	-	-	-	$\pi/2 + \pi/4 - q_4$
4→5	l_3	-	-	-	-	$\pi/2 - q_5$

Donde:

- Σ : Transformación entre el marco referencial $n \rightarrow n + 1$.
- $t(\alpha)$: MTH de traslación sobre el eje α .
- $R(\alpha)$: MTH de rotación sobre el eje α .
- MTH: Matriz de Transformación Homogénea.

Con los datos del Cuadro I se puede re-escribir (1) en forma explícita cómo:

$$\begin{aligned}
 T_0 &= I_4 \\
 T_0^1 &= T_0 R_z(\pi/2 - q_1) \\
 T_0^2 &= T_0^1 R_x(-\pi/2) R_z(-q_2) \\
 T_0^3 &= T_0^2 t_x(l_1) R_z(-\pi/2 - \pi/4 + q_3) \\
 T_0^4 &= T_0^3 t_x(l_2) R_z(\pi/2 + \pi/4 - q_4) \\
 T_0^5 &= T_0^4 t_x(l_3) R_y(\pi/2) R_z(\pi/2 - q_5) \\
 x &= T_0^5(1.,3,4)
 \end{aligned} \quad (3)$$

Para obtener la cinemática del sistema de visión artificial, se considera que éste sensor se colocó en una posición fija con respecto al eje coordenado inercial siendo su cadena cinemática mostrada en el Cuadro II.

Cuadro II
CADENA CINEMÁTICA DEL SENSOR RGB-D

Σ	$t(x)$	$t(y)$	$t(z)$	$R(x)$	$R(y)$	$R(z)$
0→ c_1	c_x	c_y	c_z	-	$\pi/2 + \pi/10$	$-\pi/2$
$c_1 \rightarrow c_2$	-	-	-	$\pi/2$	-	-

Donde $[c_x, c_y, c_z]^T$ es el vector de dirección que existe entre el marco referencial del manipulador y el marco referencial de la cámara.

El sistema de visión usado fue un sensor RGB-D de marca ASUS, modelo Xtion Pro Live y se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Sensor RGB-D utilizado, cuenta con una cámara RGB, dos micrófonos, un emisor de puntos infrarrojos y un sensor infrarrojo.

De la misma forma que con el manipulador, se puede utilizar la información del Cuadro II para re-escribir (2) de forma explícita cómo:

$$\begin{aligned} T_0^{c1} &= T_0 t_x(c_x) t_y(c_y) t_z(c_z) R_y(\pi/2 + \pi/10) R_z(-\pi/2) \\ T_0^{c2} &= T_0^{c1} R_x(\pi/2) \\ x_{cam} &= T_0^{c2}(1.,3,4), \end{aligned} \quad (4)$$

Esta transformación (ver Figura 3) indica la relación que existe entre un mismo punto desde dos perspectivas diferentes, esto es, desde la cámara y desde la base del manipulador como se muestra en (5).

$$X = T_0^{c2} x$$

Donde x es un punto en el espacio que habita en \mathbb{R}^3 desde el marco referencial del sensor RGB-D, X es un punto en el espacio que de igual manera habita en \mathbb{R}^3 pero desde el marco referencial inercial. Por último T_0^{c2} es la matriz de transformación homogénea que relaciona x con X .

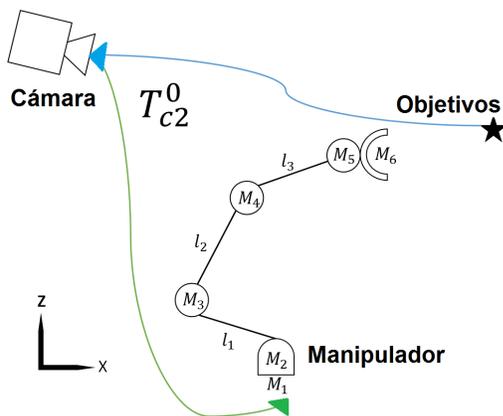


Figura 3. Posición del punto de interés desde la perspectiva del marco referencial inercial.

Cabe destacar que las variables articulares tanto del manipulador como de la cámara tienen compensaciones debido a propiedades intrínsecas de los mecanismos de unión (errores de medición y de observación)

II-B. Identificación de tomate en invernadero en tiempo real

El algoritmo de procesamiento de imágenes fue programado en C^{++} utilizando las librerías de acceso libre OpenCV (<http://opencv.org/>) para las funciones de procesamiento de imágenes y OpenNI (<http://openni.ru/openni-sdk/>) para acceder a los datos del sensor RGB-D. La función principal es segmentar correctamente el tomate y mediante la utilización de una nube de mapa de puntos 3D proporcionada por el sensor RGB-D, identificar su posición euclidiana con respecto a la cámara y mapearla al sistema coordenado del manipulador.

Debido a que se utiliza un sensor infrarrojo, existen ciertas condiciones que se deben de tener en cuenta para un experimento satisfactorio:

- No debe de existir al momento de la segmentación 3D presencia de luz natural, debido a que causa interferencia con el sensor.
- El sensor infrarrojo cuenta con una distancia operacional de +50cm, lo que significa que cualquier objeto que se encuentre a menos de 50cm no podrá ser detectado.

Se programó un algoritmo en C^{++} que cumple con la función de segmentar los tomates maduros en la imagen y determinar la posición tridimensional de su centroide. Dicha posición es considerada como la pose deseada (x_d) para el sistema de control de posición del manipulador (mostrado como Algoritmo 1).

Algoritmo 1 Algoritmo de Identificación

- 1: **function** IDENTIFICACIÓN DE TOMATE
- 2: Acceder a los datos del sensor
- 3: Extraer del sensor la imagen a color original RGB @ 640x480px.
- 4: Eliminar la saturación de la imagen para conseguir un mejor contraste.
- 5: Aplicar filtro en el espacio de color RGB con el objetivo de suprimir los verdes.
- 6: Separar el canal rojo.
- 7: Discriminar objetos que se encuentran a más de 1 metro de distancia de la cámara.
- 8: Binarizar la imagen.
- 9: Utilizar transformaciones morfológicas (erosión, dilatación, cierre y apertura) para eliminar el ruido.
- 10: Determinar siluetas y centroides en pixeles.
- 11: Realizar un cambio de coordenadas para mapear el punto al marco coordenado del manipulador usando (2).
- 12: Guardar la posición (x_d) en un archivo de texto para ser leído por el algoritmo de control del manipulador

II-C. Control Cinemático

Según [8] un control cinemático se diseña sin la consideración de los parámetros dinámicos del robot, asumiendo que su velocidad y posición de referencia se reproduce de forma precisa. Para esto, debe:

- Regular la pose o configuración articular (con referencia a una constante).

- Seguimiento de trayectoria (con referencia variante en el tiempo).

A pesar de:

- Perturbaciones externas o efectos dinámicos no modelados.
- Errores iniciales (dependientes de perturbaciones externas).
- Implementación en tiempo discreto.
- Parámetros del robot ambiguos.

Es posible utilizar:

- *Feedback*: Mediciones del estado del robot.
- *Feedforward*: Comandos nominales generados en la etapa de planeación.

El error generado entre la referencia y la pose del robot puede ser calculado tanto el plano de la tarea (nivel de la tarea) como en el plano del trabajo (nivel articulación). La acción de control siempre ocurre a nivel articulación y el desempeño se evalúa solo a nivel de la tarea

Con esto en mente, se propone un esquema de control clásico proporcional (5) de regulación punto-punto a lazo abierto para obtener las directivas de posición del manipulador y conseguir que el efector final alcance la posición del tomate en el invernadero.

$$u = K_p e \quad (5)$$

Donde $u = \dot{q}$, K_p es la ganancia proporcional (> 0) y el error de regulación e esta definido como:

$$e = x_d - x \quad (6)$$

Este esquema de control da como resultado una convergencia exponencial del error. Esto en robótica, esto no es recomendable, debido a que ese cambio súbito de posición podría dañar el sistema debido a su alta demanda de corriente un poco tiempo, y debido a que no se puede controlar el tiempo de convergencia. Para evitar este comportamiento, se desarrolló un sub-algoritmo de control de velocidad utilizando una interpolación polinómica entre la pose del manipulador y la posición deseada (ver [9]). Para lograr esto se utilizó el siguiente polinomio descrito en (7) para la posición:

$$\hat{x} = a_0 + a_1(t - t_i) + a_2(t - t_i)^2 + a_3(t - t_i)^3 \quad (7)$$

Junto con su primera derivada temporal (7) para la velocidad:

$$\dot{\hat{x}} = a_1 + 2a_2(t - t_i) + 3a_3(t - t_i)^2 \quad (8)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_0 &= x_i \\ a_1 &= \dot{x}_i \\ a_2 &= (-3(x_i - x_d) - (2\dot{x}_i + \dot{x}_d)(t_d - t_i))/(t_d - t_i)^2 \\ a_3 &= (2(x_i - x_d) + (\dot{x}_i + \dot{x}_d)(t_d - t_i))/(t_d - t_i)^3 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (7) - (8) crean una trayectoria interpolando una posición inicial (x_i) y una posición final (x_f) del efector final, controlando el tiempo de inicio de la acción de control (t_i) y el tiempo en el que se desea converger en la referencia (t_f). Y debido a esta interpolación, (6) se re-define cómo:

$$\hat{e} = \hat{x}_d - x \quad (9)$$

Donde: \hat{x} es la posición deseada sobre la trayectoria.

Sabiendo esto, se puede calcular q utilizando la cinemática inversa y el error re-definido de forma:

$$q = \int \dot{q} = \int (J(q)^+ \hat{e}) \quad (10)$$

Donde: $J(q)^+$ es la pseudo-inversa de Moore-Penrose de la matriz Jacobiana. Esta matriz se encarga de mapear las velocidades articulares a velocidades cartesianas y analíticamente se define en (11):

$$J(q) = \left[\frac{\partial q}{\partial x} \right] \quad (11)$$

De esta forma, el perfil de convergencia cambia de su comportamiento exponencial a un comportamiento cúbico controlado y suave.

III. RESULTADOS

El robot utilizado se muestra en la figura 4, donde:

1. Sensor RGB-D.
2. Manipulador.

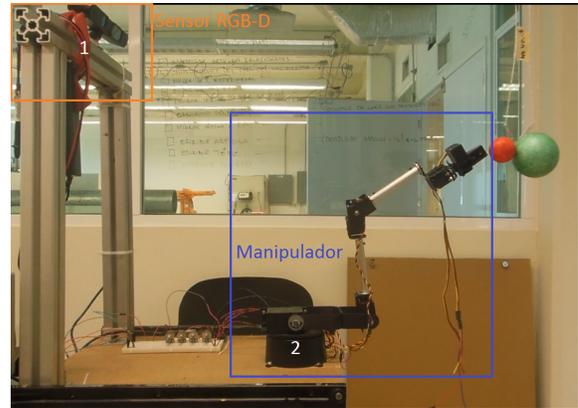


Figura 4. Robot manipulador de 5 GdL con 3 eslabones y dotado con visión por computadora.

Se posicionó el robot frente a la planta de tomate considerando la distancia mínima de detección del sensor de profundidad (mostrado en la Figura 5) y utilizando (Algoritmo 1) y la ley de control (5) se obtuvieron los siguientes resultados de segmentación:

- En la Figura (6) se muestra la imagen original capturada desde la cámara RGB con un tamaño de 640x480 pixeles.
- En la Figura (7) se muestra el resultado del filtro de saturación.
- por último, en la Figura (8) se muestran las siluetas de los tomates identificados.

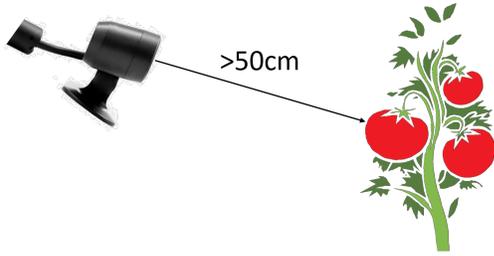


Figura 5. Posicionamiento frente a la planta.



Figura 6. Imagen original RGB obtenida del sensor.



Figura 7. Resultado tras eliminar las saturaciones.

Al no tener encoders en las articulaciones, el error de posicionamiento sólo puede ser observado mediante la cadena cinemática. Sin embargo, las propias tarjetas electrónicas de los servos tienen conocimiento de su posición con cierto grado de confiabilidad. Debido a que el manipulador solo debe de posarse frente al objetivo, esta confiabilidad es suficiente como para no incorporar encoders.

El control de velocidad permite mover al manipulador desde $f(q_i = 0)$ a la posición donde se encuentra localizado el tomate x_d (Figuras 9 y 10). En la Figura (9) se puede observar que la convergencia del error es exponencial, mientras que en la Figura (10) se observa una convergencia suave y controlada. En ambos casos en el eje X se muestran las iteraciones en una escala de 100:1 iteraciones/segundo que tardó el efector final

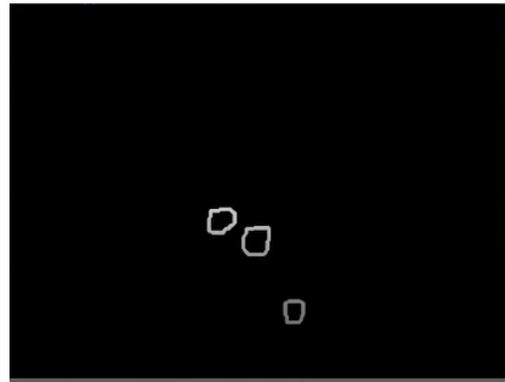


Figura 8. Resultado tras la identificación de los centroides y las siluetas.

para converger a la posición deseada ($x \rightarrow x_d$) mediante la aplicación de la ley de control, mientras que en el eje Y se muestra el error de posición en cm. El tiempo aproximado de convergencia establecido fue de 4.5 segundos y éste puede ser modificado a través de los coeficientes usados en la ecuación (7).

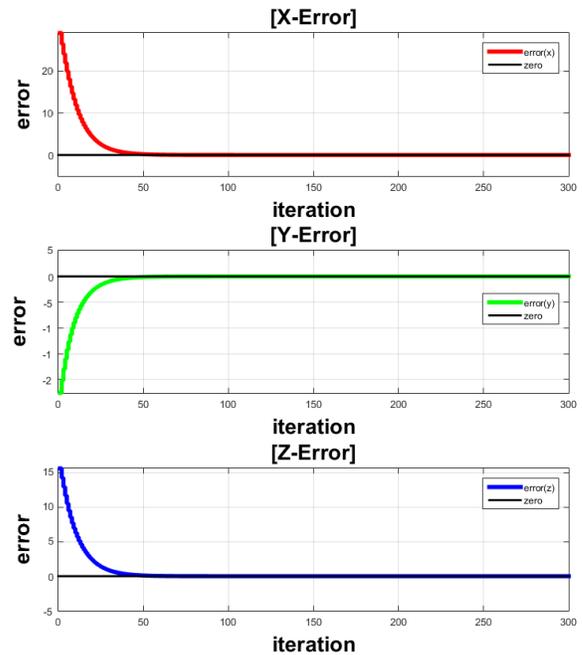


Figura 9. Error de posición en los tres ejes estimado tras envío de directivas de posición a los servos sin interpolación cúbica.

En la figura (9) se puede observar que la convergencia del error es exponencial, mientras que en la figura (10) se observa una convergencia suave y controlada. En ambos casos en el eje X se muestran las iteraciones en una escala de 100:1 iteraciones/segundo que tardó el efector final para converger a la posición deseada ($x \rightarrow x_d$) mediante la aplicación de la ley de control, mientras que en el eje Y se muestra el error de posición en cm. que requirió la ley de control para hacer que en una escala de 100:1 iteraciones/segundo

REFERENCIAS

- [1] J. R. Society, "Robotics manual," *Science Publishing House*, 1996.
- [2] N. Kondo and K. C. Ting, "Robotics for bioproduction system," *American Society of Agricultural Engineering Publishers*, 1998.
- [3] Mehdizadeh, Darbandi, Naseri-Rad, and Tobeh, "Growth and yield of tomato (*lycopersicon esculentum* mill.) as influenced by different organic fertilizers," *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 2013.
- [4] [Online]. Available: <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>
- [5] [Online]. Available: [http://www.mexicoproduce.mx/productos.html#\#\\\$jitomate](http://www.mexicoproduce.mx/productos.html#\#\$jitomate)
- [6] F. García-Luna and A. Morales-Díaz, "Towards an artificial vision-robotic system for tomato identification," 2016.
- [7] F. García-Luna and A. Morales-Díaz, "Aplicación de esquemas de control clásico en un manipulador móvil para la identificación y alcance de tomate en invernadero," 2016.
- [8] F. Flacco and A. D. Luca, "Discrete-time redundancy resolution at the velocity level with acceleration/torque optimization properties," 2014.
- [9] L. Biagiotti and C. Melchiorri, *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*.

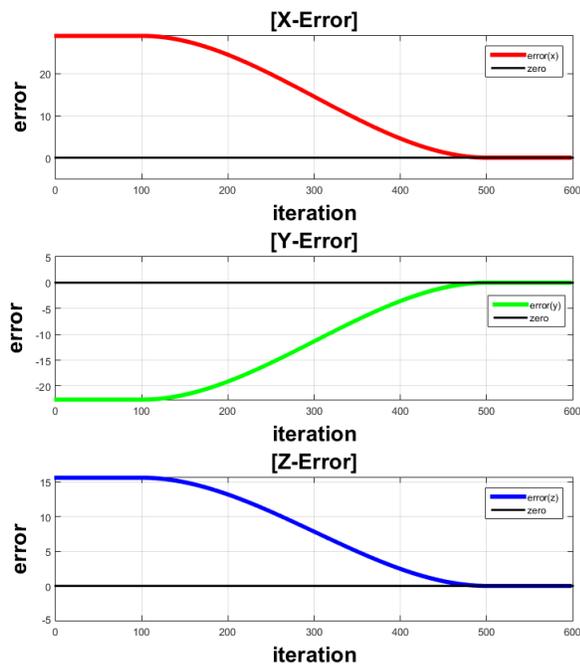


Figura 10. Error de posición en los tres ejes estimado tras envío de directivas de posición a los servos con interpolación cúbica.

- El eje X son las iteraciones que tardó la ley de control para hacer que el efector final convergiera en la posición deseada ($x \rightarrow x_d$) en una escala de 100:1 iteraciones/segundo.
- El eje Y es el error de posición en cm.

El tiempo aproximado de convergencia establecido fue de 4.5 segundos y éste puede ser modificado en con la ecuación (7).

IV. CONCLUSIÓN

De diez experimentos realizados en campo, siete fueron satisfactorios. Los experimentos que no resultaron satisfactorios se debe a problemas con la iluminación. Sin embargo se demostró que el algoritmo de segmentación tridimensional de tomate en invernadero cumple con su función, mientras que la ley de control propuesta es suficientemente robusta para lograr hacer que el efector final del manipulador converga alrededor del centroide del tomate.

Como trabajo futuro se propone robustecer el sistema de visión cambiando la detección de profundidad e incluir una discriminación de tomates individuales en función de la misma. Así mismo se propone construir una plataforma móvil que pueda navegar en el invernadero de forma robusta.

Control PD adaptable basado en la regla MIT modificada para la dinámica lateral de un MAV de ala fija

Tadeo Espinoza

Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura
Universidad Juárez del Estado de Durango
Gómez Palacio, Durango, México
Email: tadeo1519@gmail.com

Alejandro Dzul

División de Estudios de Posgrado e Investigación
TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna
Torreón, Coahuila, México
Email: dzul@faraday.itlalaguna.edu.mx

Víctor Santibáñez

División de Estudios de Posgrado e Investigación
TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna
Torreón, Coahuila, México
Email: vsantiba@itlalaguna.edu.mx

Resumen—Este trabajo presenta una ley de control PD basándose en la regla MIT modificada. El mecanismo de ajuste de la regla MIT ha sido implementada con tres tipos de modos deslizantes, i.e., modos deslizantes de primer orden, modos deslizantes de segundo orden (2-SM), y modos deslizantes de alto orden (HOSM). El controlador propuesto ha sido diseñado para el control de la dinámica lateral de un vehículo aéreo miniatura (Miniature Aerial Vehicle (MAV)) no tripulado. Se han realizado varias simulaciones para analizar la regla MIT modificada aplicada a este modelo dinámico.

I. INTRODUCCIÓN

En la teoría de control, existen varios sistemas dinámicos que poseen parámetros constantes inciertos o parámetros acotados que varían lentamente [1]. Por ejemplo, cuando se desarrolla un MAV (Miniature Aerial Vehicle), se pueden agregar o quitar sensores o baterías, entonces se modifica el peso y en consecuencia los parámetros inerciales. De la misma forma, cuando un MAV está volando en condiciones ambientales adversas, está expuesto a cambios en la densidad del aire que es usualmente considerada como un valor constante. Con el fin de resolver los problemas antes mencionados, diferentes leyes de control podrían diseñarse. Una opción podría ser una ley de control adaptable [2] que permita lograr un vuelo estable para un vehículo aéreo miniatura no tripulado el cual es sometido a condiciones ambientales adversas. El control adaptable ha sido aplicado en áreas como la robótica, aviones, cohetes, procesos químicos, sistemas electrónicos, barcos, etc. [1].

Se pueden encontrar en la literatura algunos trabajos relacionados con la regla MIT, como en [3], donde han aplicado la regla del MIT basados en un control por modelo de referencia para la regulación de un sistema de segundo orden; la contribución de [3] es la modificación de la regla del MIT con el objetivo de obtener una mayor amplitud en la referencia deseada, debido a que la regla MIT tiende a la inestabilidad

con valores de referencias grandes, y éste es uno de los inconvenientes de trabajar con el algoritmo de la regla MIT, aún más, es sensible a cambios grandes en la ganancia de adaptación, esto es, incluso con cambios decimales en dicha ganancia, el sistema tiende a la inestabilidad. En [3] sólo muestran un ejemplo de cómo hacer una ganancia adaptable de la ley de control que proponen, y la otra ganancia de éste es no adaptable.

En [4], la regla MIT se ha aplicado a un proceso de destilación, considerando un modelo linealizado, además de aplicar un control de realimentación adaptativa para dos parámetros del controlador, y la referencia es una señal escalón unitario.

En [5], se ha presentado una comparación de la regla MIT con el método del gradiente y por el método de Lyapunov. En [5] se diseñó una ley de control para la regulación de un tanque esférico con una referencia de entrada pequeña, y además no realizan ninguna modificación a la regla MIT. Cabe mencionar que los trabajos citados anteriormente muestran resultados obtenidos en simulación utilizando el software de MatLab.

Las contribuciones de este trabajo son:

- Modificación del mecanismo de ajuste de la regla MIT al combinarla con la teoría de modos deslizantes. Se eligen como variables de adaptación las ganancias de un controlador Proporcional-Derivativo. Dado que se observa el efecto de chattering, entonces se modifica a un modos deslizantes de segundo orden (2-SM) con el objetivo de reducir este efecto, y finalmente para reducir aún más o eliminar completamente el efecto chattering, se modifica a la misma regla MIT con un modos deslizantes de alto orden (HOSM).
- Además, con los cambios mencionados en el punto anterior a la regla MIT, se obtiene una menor sensibilidad en la ganancia adaptativa, y por lo tanto, es posible

variar la referencia deseada con valores mayores a los propuestos en los trabajos antes mencionados ([3], [4], [5]).

- Más aún, se propone una definición diferente de la regla MIT con la función sign y con la función sign – sign para el mecanismo de adaptación, a la mostrada en [1] y [6].

La organización del artículo es la siguiente: la sección II muestra las ecuaciones que definen el modelo dinámico para la dinámica lateral del vehículo aéreo miniatura no tripulado; la sección III trata sobre la ley de control desarrollada para el movimiento de alabeo del UAV de ala fija. En la sección IV se muestran los resultados obtenidos en simulación. Finalmente, en la sección V se tienen las conclusiones y el trabajo a futuro.

II. DINÁMICA LATERAL DEL MAV DE ALA FIJA

Para poder controlar la dinámica lateral o ángulo de alabeo del vehículo aéreo miniatura no tripulado, es necesario la obtención del modelo matemático que define la dinámica lateral de este vehículo, para ello, se omite cualquier estructura flexible del MAV, y se considera como un cuerpo sólido. Además, no se considera la curvatura de la tierra es decir, se considera como plana, esto es debido a que se asume que el vehículo aéreo miniatura solo volará distancias cortas. Con las consideraciones anteriores, se obtiene el modelo dinámico por la segunda ley de movimiento de Newton. El ángulo de alabeo es generalmente controlado de forma sencilla por los alerones, pero estos ángulos son en general demasiado no lineales y están a menudo acompañados por el termino del ángulo de guiñada [10]. Dado lo anterior, el ángulo de guiñada en pruebas experimentales para el ángulo de alabeo, se considerará al ángulo de guiñada como una perturbación en la ecuación del ángulo de alabeo, y así se puede probar la robustez del controlador aplicado a dicho ángulo. Entonces, el modelo para diseñar el controlador PD adaptable para el ángulo de alabeo para el MAV está dado por las siguientes ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\dot{\phi} = p \quad (1)$$

$$\dot{p} = L_p p + L_{\delta_a} \delta_a \quad (2)$$

donde:

ϕ : Ángulo de alabeo.

p : Velocidad angular en alabeo tomando como referencia el centro de gravedad del vehículo.

δ_a : Desviación de la superficie de control y representa la entrada de control en los alerones, dada en grados.

L_p : Derivada aerodinámica de estabilidad en alabeo.

L_{δ_a} : Derivada aerodinámica de control en alabeo.

En la Figura 1 se observan las variables involucradas en el ángulo de alabeo. Las derivadas aerodinámicas para el ángulo de alabeo están definidas por las siguientes fórmulas [10]:

$$L_p = \frac{\rho V S b^2}{4 I_{xx}} C_{l_p} \quad (3)$$

$$L_{\delta_a} = \frac{\rho V^2 S b}{2 I_{xx}} C_{l_{\delta_a}} \quad (4)$$

donde:

I_{xx} : Inercia en el eje x ($0.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$).

C_{l_p} : Coeficiente adimensional de amortiguamiento en alabeo (-0.15).

$C_{l_{\delta_a}}$: Coeficiente adimensional de efectividad de los alerones (0.005).

El vehículo aéreo no tripulado a controlar es un modelo a escala radio-controlado conocido como *T-28 Trojan*. Para obtener la matriz de inercia de este modelo, se desarrolló un objeto sólido de la nave utilizando el software Solid Works (ver Figura 2), donde los parámetros del área del ala, tamaño de fuselaje, etc., son proporcionados por el fabricante del modelo a escala *T-28 Trojan* [16].

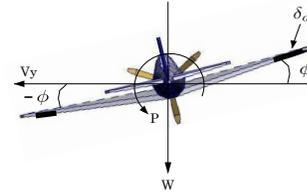


Figura 1. Ángulo de alabeo

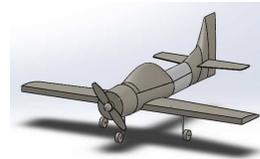


Figura 2. Modelo desarrollado en SolidWorks

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR ADAPTABLE

En esta sección se establecen reglas para la sintonía de las ganancias adaptables de un control PD para el movimiento de alabeo de un vehículo aéreo miniatura no tripulado; estas ganancias son definidas como $\hat{k}_{p\phi a}$ y $\hat{k}_{v\phi a}$. Las reglas de sintonía están basadas en la metodología por modelo de referencia, basándose en la regla MIT por el método del gradiente, con el objetivo de modificar este método con la teoría por modos deslizantes de primer orden, segundo orden y alto orden, dentro del mecanismo de ajuste.

Con este mecanismo de ajuste modificado se busca obtener una menor sensibilidad en la ganancia adaptable y así poder variar la referencia deseada con valores mayores a los propuestos en los trabajos de [3], [4], [5]. Además de proponer una formulación diferente de la regla MIT con la función sign y con la función sign – sign para el mecanismo de adaptación con respecto a la mostrada en [1] y [6].

Entonces, para el diseño de la ley de control adaptable se consideran las ecuaciones (1)-(2). Así, δ_a define la entrada de control, la cual está definida por:

$$\delta_a = \hat{k}_{p\phi a} e_\phi + \hat{k}_{v\phi a} \dot{e}_\phi \quad (5)$$

donde $\hat{k}_{p\phi a}$ y $\hat{k}_{v\phi a}$ son las llamadas ganancias adaptables de posición y velocidad respectivamente; el error de la dinámica

lateral está definido por $e_\phi = \phi - \phi_d$. Las ganancias del control PD adaptable tienen implícito un subíndice para indicar el algoritmo que se está aplicando como mecanismo de ajuste, este subíndice es $a_i := a_1, a_2, a_3, a_4$, donde a_1 corresponde a la regla del MIT, a_2 corresponde a la regla del MIT con modos deslizantes de primer orden, a_3 es la regla MIT con dos modos deslizantes (2-SM) y finalmente a_4 representa la regla del MIT con modos deslizantes de alto orden (HOSM). Por lo tanto, para el diseño de la regla MIT es introducido un error dado por:

$$e_m = \phi_m - \phi \quad (6)$$

donde ϕ denota el ángulo de alabeo y ϕ_m es el ángulo de alabeo del modelo de referencia. La metodología a seguir para el desarrollo de la regla MIT es la presentada en [6], considerando esto, el modelo aerodinámico se ha transformado en la representación de un función de transferencia para la construcción de la derivada de sensibilidad, y se construye con derivadas parciales con respecto a los parámetros del controlador $\hat{k}_{p\phi a}$ y $\hat{k}_{v\phi a}$. Así, la función de transferencia en lazo cerrado con el controlador PD adaptable está definida por:

$$\phi = \frac{L_{\delta_a} (\hat{k}_{p\phi a} + \hat{k}_{v\phi a} s)}{s^2 + (L_p + L_{\delta_a} \hat{k}_{v\phi a})s + L_{\delta_a} \hat{k}_{p\phi a}} \phi_d \quad (7)$$

y el modelo de referencia para este sistema, puede expresarse con una función de transferencia suave de un sistema clásico de segundo orden:

$$\phi_m = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \phi_d \quad (8)$$

donde $\zeta = 3.17$ [adimensional] y $\omega = 3.16$ [rad/s], considerando (6)-(8) son calculadas las derivadas parciales con respecto a $\hat{k}_{p\phi a}$ y $\hat{k}_{v\phi a}$ y después de algunas operaciones algebraicas se obtiene:

$$\frac{\partial e_m}{\partial \hat{k}_{p\phi a}} = \frac{L_{\delta_a}}{s^2 + (L_p + L_{\delta_a} \hat{k}_{v\phi a})s + L_{\delta_a} \hat{k}_{p\phi a}} (\phi - \phi_d) \quad (9)$$

$$\frac{\partial e_m}{\partial \hat{k}_{v\phi a}} = \frac{L_{\delta_a} s}{s^2 + (L_p + L_{\delta_a} \hat{k}_{v\phi a})s + L_{\delta_a} \hat{k}_{p\phi a}} (\phi - \phi_d) \quad (10)$$

En general, las expresiones (9) y (10) no se pueden utilizar debido a que los parámetros $\hat{k}_{p\phi a}$ y $\hat{k}_{v\phi a}$ son desconocidos, así que se asume un caso óptimo (denominador de (8)), definido como:

$$s^2 + (L_p + L_{\delta_a} \hat{k}_{v\phi a})s + L_{\delta_a} \hat{k}_{p\phi a} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (11)$$

Después de estas aproximaciones, son obtenidas las ecuaciones diferenciales para el controlador PD adaptable:

$$\dot{\hat{k}}_{p\phi a_1} = -\gamma_{1\phi} \left(\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) e_m \quad (12)$$

$$\dot{\hat{k}}_{v\phi a_1} = -\gamma_{2\phi} \left(\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) e_m \quad (13)$$

Se propone ahora modificar la regla MIT al añadirle con modos deslizantes de primer orden, mostrando así una diferencia con respecto a [6]; enseguida, se define una superficie

deslizante de la forma $s_{1\phi} = \dot{\phi}_m - p + k_{1\phi} e_m$ con el objetivo de obtener una mayor estabilidad en el mecanismo de ajuste y esta misma superficie deslizante se utilizará para el modos deslizantes de segundo orden y de alto orden, donde $k_{1\phi}$ es una ganancia definida positiva. Entonces, las ecuaciones diferenciales del controlador adaptable con la metodología por modos deslizantes está dada por:

$$\dot{\hat{k}}_{p\phi a_2} = -\gamma_{1\phi} \left(\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) (\beta_{p1\phi} \text{sign}(s_{1\phi})) \quad (14)$$

$$\dot{\hat{k}}_{v\phi a_2} = -\gamma_{2\phi} \left(\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) (\beta_{v1\phi} \text{sign}(s_{1\phi})) \quad (15)$$

donde $\beta_{p1\phi}$ y $\beta_{v1\phi}$ son valores positivos. Debido al chattering generado con los modos deslizantes de primer orden, se diseñó un mecanismo de ajuste con modos deslizantes de segundo orden con el objetivo de disminuir el efecto chattering. Este controlador por modos deslizantes de segundo orden incluye un diferenciador robusto de segundo orden, debido a que las derivadas en tiempo real son sensibles al ruido al transcurrir el tiempo en el que se realiza la derivada [7]. Este diferenciador está definido por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 = v_0 &= -\lambda_0 |x_0 - s_{1l}|^{1/2} \text{sign}(x_0 - s_{1l}) + x_1 \\ \dot{x}_1 &= -\lambda_1 \text{sign}(x_1 - v_0) \end{aligned}$$

donde x_0 y x_1 son estimaciones en tiempo real de $s_{1\phi}$ y $\dot{s}_{1\phi}$ respectivamente. Los valores de λ_1 y λ_2 son constantes positivas. Así, las ecuaciones diferenciales para las ganancias adaptables del controlador PD con la regla MIT y modos deslizantes de segundo orden son:

$$\dot{\hat{k}}_{p\phi a_3} = -\gamma_{1\phi} \left(\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) (\beta_{p1\phi} \text{sign}(s_{1\phi}) + \beta_{p2\phi} \text{sign}(\dot{s}_{1\phi})) \quad (16)$$

$$\dot{\hat{k}}_{v\phi a_3} = -\gamma_{2\phi} \left(\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (x_{1\phi} - x_{1\phi}^d) \right) (\beta_{v1\phi} \text{sign}(s_{1\phi}) + \beta_{v2\phi} \text{sign}(\dot{s}_{1\phi})) \quad (17)$$

donde $\beta_{p1\phi}$, $\beta_{p2\phi}$, $\beta_{v1\phi}$ y $\beta_{v2\phi}$ son ganancias positivas. Con el objetivo de reducir aún más o eliminar el chattering en el modos deslizantes de segundo orden, se ha diseñado un mecanismo de ajuste con la teoría de modos deslizantes de alto orden; para diseñar este mecanismo de ajuste es necesario un diferenciador robusto de segundo orden [7]. Este diferenciador está dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 = v_0 &= -\lambda_0 |x_0 - s_{1l}|^{2/3} \text{sign}(x_0 - s_{1l}) + x_1 \\ \dot{x}_1 = v_1 &= -\lambda_1 |x_1 - s_{1l}|^{1/2} \text{sign}(x_1 - v_0) + x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\lambda_2 \text{sign}|x_2 - v_1| \end{aligned}$$

donde x_0 , x_1 y x_2 son estimaciones en tiempo real de $s_{1\phi}$, $\dot{s}_{1\phi}$ y $\ddot{s}_{1\phi}$. Los valores de λ_0 , λ_1 y λ_2 son constantes

definidas positivas. Finalmente las ecuaciones diferenciales para el controlador adaptable PD con modos deslizantes de alto orden están definidas como:

$$\begin{aligned} \dot{k}_{p\phi a_4} = & -\gamma_{1\phi} \left(\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) \\ & (\alpha_{p\phi} [\dot{s}_{1\phi} + 2(|\dot{s}_{1\phi}|^3 + |s_{1\phi}|^2)^{1/6} \\ & \text{sign}(\dot{s}_{1\phi} + |s_{1\phi}|^{2/3} \text{sign}(s_{1\phi}))]) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{k}_{v\phi a_4} = & -\gamma_{2\phi} \left(\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} (\phi - \phi_d) \right) \\ & (\alpha_{v\phi} [\dot{s}_{1\phi} + 2(|\dot{s}_{1\phi}|^3 + |s_{1\phi}|^2)^{1/6} \\ & \text{sign}(\dot{s}_{1\phi} + |s_{1\phi}|^{2/3} \text{sign}(s_{1\phi}))]) \end{aligned} \quad (19)$$

donde $\alpha_{p\phi}$ y $\alpha_{v\phi}$ son ganancias positivas.

IV. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

IV-A. Regla MIT

En la Figura 3 se observan los resultados obtenidos con la regla MIT aplicada al movimiento en alabeo (utilizando Matlab-Simulink, con un paso de integración de 10^{-3} y el ODE 45, para todos los controladores), con $\gamma_{1\phi} = 400$ y $\gamma_{2\phi} = 90000$. La línea roja es la señal generada por el modelo de referencia, siendo esta señal la que debe converger el ángulo de alabeo (línea azul). En la misma Figura 3 se tiene el error entre la señal del modelo de referencia y el ángulo de alabeo actual, se puede apreciar que existe un error que al paso del tiempo va disminuyendo, la simulación solo muestra hasta 200 segundos, se considerará que en este tiempo debe de realizarse un buen seguimiento. La Figura 3 presenta la acción de control que aplica el controlador PD de ganancias adaptables; la acción de control está saturada a $\pm 40^\circ$, para nuestro caso esta acción de control está muy grande, debido a que en los alerones del UAV de ala fija donde se programará la ley de control, su deflexión es de $\pm 20^\circ$. Se intentó reducir la saturación del controlador a los valores permitidos, pero no fue posible obtener una buena respuesta al sintonizar la ganancia de adaptación. La regla MIT presentó en su señal de control algo de ruido o picos al saturarla.

IV-B. Regla MIT con modos deslizantes

En la Figura 4 se tiene el resultado obtenido con la regla MIT con modos deslizantes, con $\gamma_{1\phi} = 100$ y $\gamma_{2\phi} = 6000$; se aprecia una mejora considerable con respecto al resultado obtenido con la Regla MIT, donde se puede observar que se acerca al modelo de referencia antes de llegar la simulación a los 60 segundos. El error es menor a $\pm 1^\circ$ poco antes de los 20 segundos, además en la misma Figura 4 se aprecia que la acción de control está acotada a $\pm 20^\circ$ que es lo que permite el movimiento de los alerones en nuestro UAV de ala fija; sin embargo el inconveniente de utilizar este mecanismo de adaptación para las ganancias del controlador PD, es la existencia del efecto “chattering” en la señal de control.

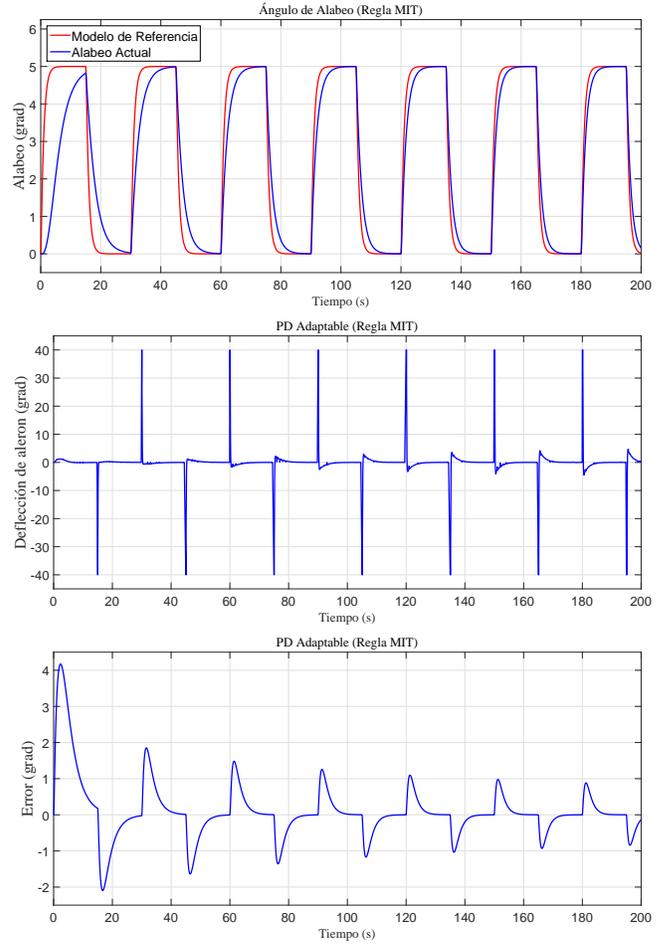


Figura 3. Regla MIT en alabeo

IV-C. Regla MIT con dos modos deslizantes

En la Figura 5 se observa la regla MIT con dos modos deslizantes, con $\gamma_{1\phi} = 30$ y $\gamma_{2\phi} = 5000$, en donde se aprecia que el ángulo actual de alabeo (línea azul) se acerca a la señal del modelo de referencia (línea roja) con un error menor a $\pm 1^\circ$ después de 60 segundos. La señal de la dinámica del error se muestra en la Figura 5; en la misma figura se presenta la acción de control, donde se tiene una disminución del efecto “chattering” además de estar acotada la señal del controlador a $\pm 20^\circ$, esta pequeña disminución se aprecia más cuando el ángulo actual de alabeo está sobre 0° .

IV-D. Regla MIT con modos deslizantes de orden superior

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos con la regla MIT con modos deslizantes de orden superior, con $\gamma_{1\phi} = 1200$ y $\gamma_{2\phi} = 100000$; se observa que el ángulo de alabeo actual (línea azul) se va acercando a la señal del modelo de referencia (línea roja) de manera considerable después de los 80 segundos. En la misma Figura 6, se observa que el error es menor, esto es, a $\pm 1^\circ$ después de 120 segundos, pero se consigue la eliminación del efecto “chattering” en la señal de control del PD adaptable, ver la Figura 7. Además de que la

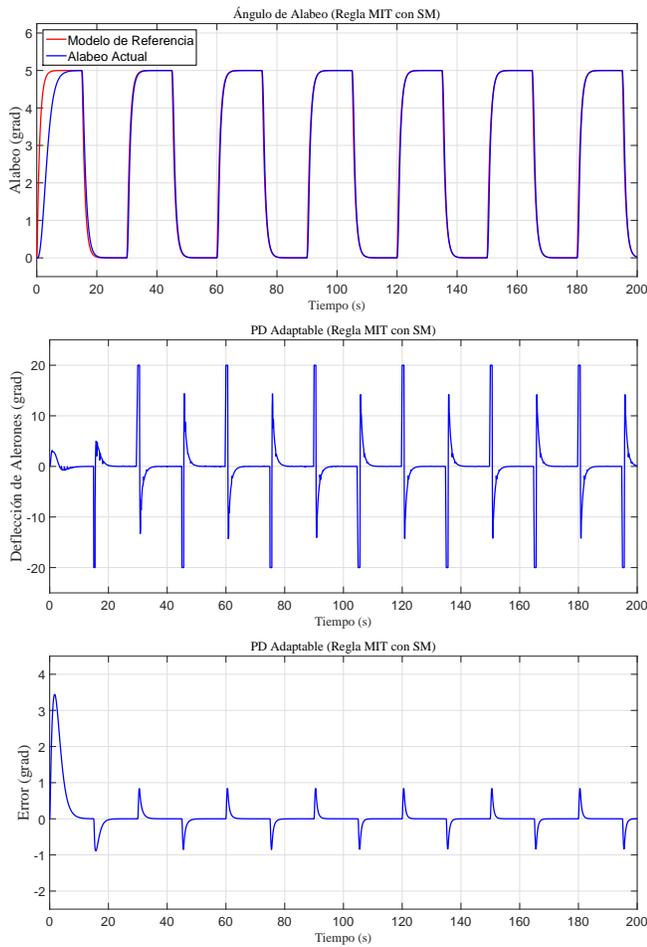


Figura 4. Regla MIT con SM en alabeo

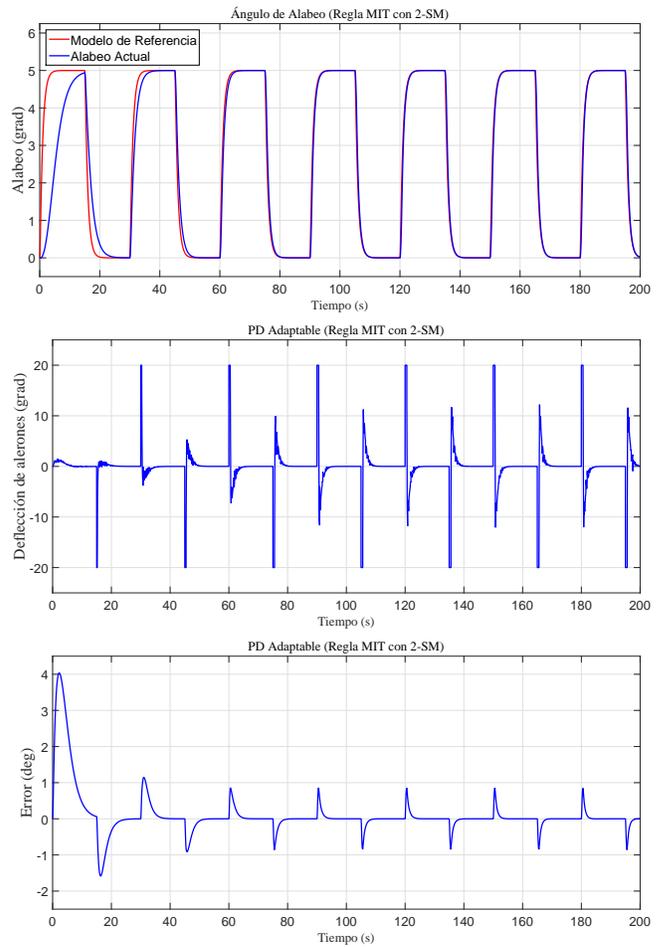


Figura 5. Regla MIT con 2-SM en alabeo

acción de control está dentro de los límites permitidos por los alerones $\pm 20^\circ$, ver la Figura 6.

En la Figura 7 se realizó un acercamiento de la acción de control con la regla MIT para apreciar el ruido o picos que ésta presenta; en la misma figura se puede observar el “chattering” en la Regla MIT con modos deslizantes. La regla del MIT con dos modos deslizantes aún se puede observar “chattering” en la señal de control del PD adaptable, ver la Figura 7. Con este acercamiento se valida que únicamente la Regla MIT con modos deslizantes de alto orden puede eliminar el efecto de “chattering”.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la modificación a la regla MIT con el método del gradiente, aplicando a esta regla la teoría por modos deslizantes en el mecanismo de adaptación de las ganancias de un controlador PD, el cual fue aplicado al movimiento en alabeo de un UAV de ala fija.

El controlador PD adaptable con la regla MIT sólo se logró saturar a $\pm 40^\circ$, siendo prácticamente imposible saturarla a $\pm 20^\circ$, que son los ángulos de deflexión permitidos por los alerones de nuestro UAV de ala fija; este controlador con la

regla MIT tuvo un buen resultado en simulación, pero la señal de control muestra algunos picos de ruido, además de no ser sencilla la sintonización de la ganancia de adaptación, debido a que con cambios de valores en cantidades de decimales en esta ganancia el sistema tiende a la inestabilidad de forma exponencial. Utilizando la regla MIT con modos deslizantes, se logró el seguimiento deseado saturando el controlador a $\pm 20^\circ$, pero la señal de control presentó el efecto “chattering”, en menor medida que que la regla MIT sola, pero aún presente.

Con la regla MIT con dos modos deslizantes se redujo el efecto “chattering” de la señal de control, pero el ángulo de alabeo actual se acercó a la señal de referencia en un tiempo mayor que al utilizar la regla MIT con modos deslizantes. Finalmente la regla MIT con modos deslizantes de orden superior presenta una buena respuesta en la señal de control, eliminando el efecto “chattering” y actuando la ley de control dentro de la saturación de $\pm 20^\circ$. Se observó también que es más sencilla la sintonización de las ganancias de adaptación para conseguir una respuesta aceptable.

El único inconveniente es que el error a $\pm 1^\circ$ se consigue después de los 120 segundos de simulación. El trabajo a futuro es aplicar las mismas técnicas para el control de guiñada, altura

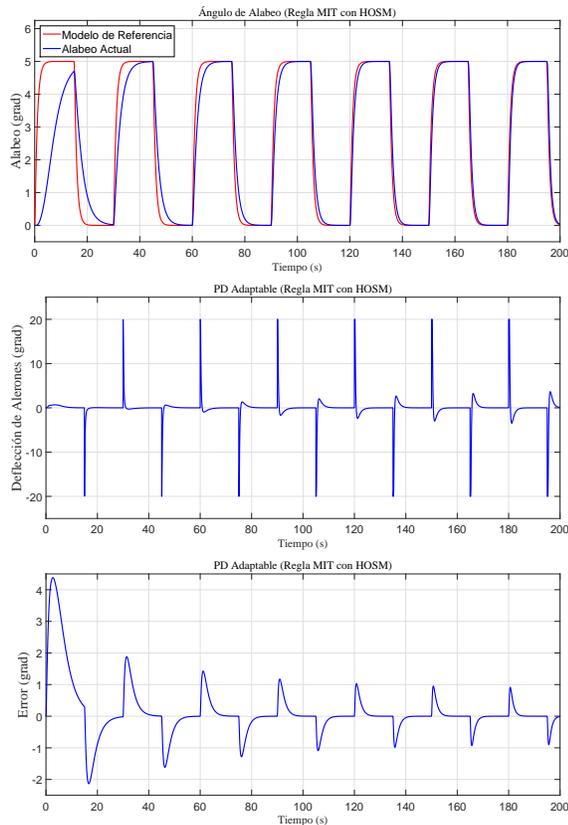


Figura 6. Regla MIT con HOSM en alabeo

y finalmente implementarlo en un sistema embebido de un vehículo aéreo no tripulado miniatura de ala fija para realizar una trayectoria.

AGRADECIMIENTOS

Todos los autores agradecen los apoyos financieros otorgados por CONACYT y el TecNM (Tecnológico Nacional de México).

REFERENCIAS

- [1] Slotine J.J. and Li W.: "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, ISBN: 0-1304-0890-5 USA, 1991
- [2] Cook M. V.: "Flight Dynamics Principles", Second edition, Ed. Elsevier, ISBN: 978-0-7506-6927-6, 2007
- [3] Jain P. and Nigam M.J.: "Design of a Model Reference Adaptive Controller Using Modified MIT Rule for a Second Order System", Advance in Electronic and Electric Engineering, ISSN 2231-1297, Volume 3, Number 4, pp. 477-484, 2013
- [4] George A. and Francis R. M.: "Model Reference Control of Binary Distillation Column Composition using MIT Adaptive Mechanism", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Volume 4, Issue 06, 2015
- [5] Kumer S., Manic K. S. and Deepa P.: "Model Reference Adaptive Control of a Spherical Tank", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Pages: 350-355, 2014
- [6] Åström K. J., Wittenmark B.: "Adaptive Control", 2nd Edition, Ed. Prentice Hall, ISBN: 978-0201558661, 1994
- [7] Levant A.: "Robust Exact Differentiation Via Sliding Mode Technique", *Automatica*, 34, 379-384, 1998.
- [8] Valavanis K. P.: "Advances in Unmanned Aerial Vehicles", Ed. Springer, ISBN: 1-4020-6113-4, 2007

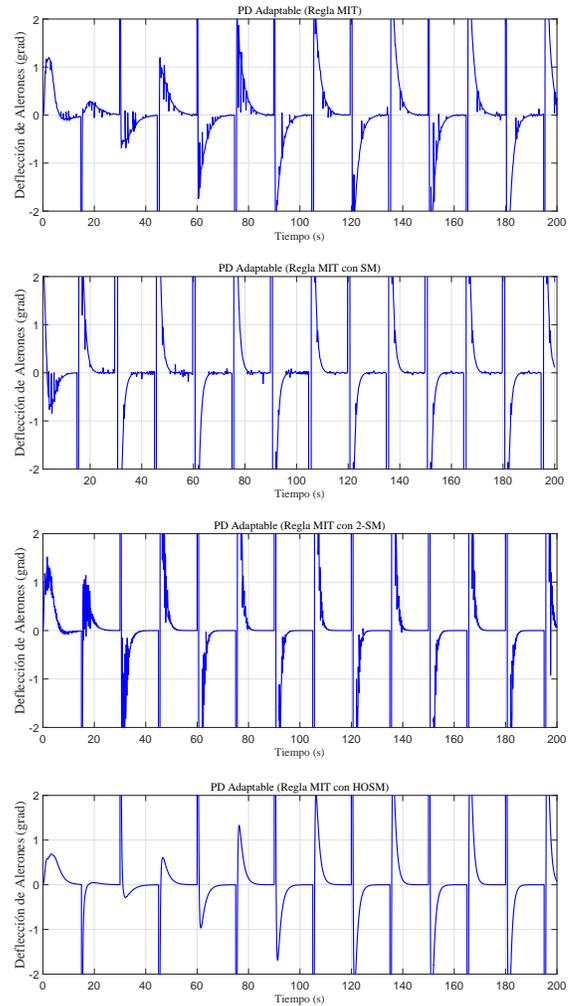


Figura 7. Acercamiento de las acciones de control

- [9] Guerrero J. and Lozano R.: "Flight Formation Control", Ed. Wiley, ISBN: 184-82-1323-9, 2012
- [10] Mclean D.: "Automatic Flight Control Systems", Ed. Prentice hall International, ISBN: 0-13-054008-0, 1990
- [11] Espinoza T., Parada R., Dzul A. and R. Lozano.: "Linear controllers implementation for a fixed-wing MAV", 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, USA, May 27-30, 2014.
- [12] Harkegard O. and Glad S. T.: "A Backstepping design for Flight Path Angle Control", In proceedings of the 39th Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, December 2000.
- [13] Espinoza T., Dzul A. and Llama M.: "Linear and Nonlinear Controllers Applied to Fixed-Wing UAV", International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 10, 33:2013
- [14] Brian L. S. and Frank L.: "Advances in Unmanned Aerial Vehicles", Ed. Jhon Wiley and Sons, ISBN: 0-471-61397-5, 1992
- [15] Khalil H.: "Nonlinear Systems", Ed. Prentice Hall, ISBN: 0-13-067389-7, 1996
- [16] <http://www.horizonhobby.com/>

A Real-Time System Using the Preempt-RT patch and the RM, PIP and EDF scheduling policies

Andrés Buelna¹, Mayra L. Lizárraga¹, Vidblain Amaro², Arnoldo Díaz-Ramírez¹, Larysa Burtseva²

¹Departamento de Sistemas y Computación, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Mexicali, Mexicali, Baja California, México

{mayral.lizarraga, andres.buelna.b}@gmail.com, adiaz@itmexicali.edu.mx

²Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

{vamaro, burtseva}@uabc.edu.mx

Abstract—This paper discusses how to implement a hard real-time system using the Preempt-RT Linux kernel patch. Two real-time controlling systems were developed to control the same physical system. One of them employs the Earliest Deadline First policy, thanks to a recent modification of the Linux kernel that implements it while complying with the POSIX real-time standard. The second one uses both the Rate Monotonic policy and the Priority Inheritance Protocol, due to the fact that two system tasks share the same critical section. A brief overview of the Preempt-RT patch is presented. Also, the paper discusses the implementation of the two real-time systems and the results of their execution.

Index Terms—real-time systems, rate monotonic protocol, priority inheritance protocol, earliest deadline first policy, preempt-rt.

I. INTRODUCTION

A real-time system (RTS) is a computing system that is expected to not only produce correct results; it is also expected to produce them satisfying specific timing constraints, in order to ensure the correct behavior and the predictability of the system [1]. These systems have been the subject of great interest due to the trend towards automation of everyday's systems and applications. Examples of them are self-driving cars, autonomous airplanes, or robots to care for the elderly. Some other applications include:

- Flight control
- Medical systems
- Industrial automation
- Robotics
- Military systems
- Cyber-physical systems

An RTS is comprised of a controlled or physical system (e.g., a robot) and a controlling system (e.g., a computational system), where the latter is comprised of n tasks, m processors, and r resources. Commonly, $n \gg m$. Also, an RTS includes the use of scheduling algorithms to assign processors and resources to the tasks, while guaranteeing the temporal restrictions of the system.

In order to design and implement RTSs, many models have been proposed. One of them is known as the periodic task model, in which every instance of the system tasks are released at a given constant rate, called the period. Typically, a single RTS encapsulates many periodic real-time tasks, each

with their specific time constraints. The objective of an RTS designer is to guarantee the accomplishment of the timing restrictions of the tasks that comprise the system, through the selection and use of a real-time operating system (RTOS) and real-time scheduling algorithms.

The deadline is the most used parameter to define the timing constraint of each task. There are different types of RTSs, depending on the consequences that may arise if at least one of the tasks misses its deadline:

- 1) Soft RTS: missing a task deadline produces a performance degradation, but it still has some utility for the system;
- 2) Firm RTS: missing a task deadline does not cause any damage, but the result after its deadline is useless for the system;
- 3) Hard RTS: missing a task deadline may cause catastrophic consequences.

Liu and Layland's Rate Monotonic (RM) and Earliest Deadline First (EDF) [2] are two of the most known algorithms for scheduling hard real-time periodic tasks. RM is a simple algorithm that assigns the highest priority to the task with the shortest period. The RM policy is a static priority algorithm since the priority of each task is fixed during the whole execution of the system. In contrast, the EDF policy assigns the highest priority to the task with the earliest deadline. EDF is a dynamic priority algorithm since the priority of each task may vary on each activation. Both algorithms ensure the predictability and the schedulability of the system (i.e., the accomplishment of the task's deadlines), as long as the task set satisfies the algorithm schedulability test.

The utilization factor of a real-time task set is given by:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i}, \quad (1)$$

where C_i represents the execution time of the task i and T_i represents its period.

Accordingly to Liu and Layland's sufficient schedulability test, a task set is schedulable on one processor under RM if the processor utilization factor U satisfies the inequality:

$$U \leq n(2^{1/n} - 1), \quad (2)$$

where n is the number of tasks in the system.

It can be seen from Eq. 2, that the least upper bound of the schedulability test tends to 0.69, when $n \rightarrow \infty$. In other words, accordingly to the Liu and Layland's schedulability test for RM, a hard real-time task set is schedulable under RM as long as its total utilization is less than 70%.

Lehoczy *et al.* [3] developed a necessary and sufficient schedulability test for the RM policy. This exact test considers the processor utilization by the periodic task set as a function of time in a critical instant. Let τ be a set of n tasks of the periods $T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_n$, respectively, in an uniprocessor RTS. The cumulative demand on the processor by a set of tasks over the time interval $[0, t]$ at a critical instant is:

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^i C_j \left\lceil \frac{t}{T_j} \right\rceil \quad (3)$$

where:

$$L_i(t) = \frac{W_i(t)}{t}$$

$$L_i = \min_{\{0 < t \leq T_i\}} L_i(t)$$

$$L = \max_{\{1 \leq i \leq n\}} L_i$$

$$S_i = \{kT_k | k = 1, \dots, \lfloor T_i/T_j \rfloor; j = 1, \dots, i\}$$

Here L_i is the utilization factor required to fulfill the deadline of a task τ_i , $1 \leq i \leq n$, over the time range $[0, t]$; W_i is the cumulative demand on the processor by a set of tasks τ_1, \dots, τ_i , over the time range $[0, t]$; S_i is the set of activation points of a task τ_i .

A task τ_i is schedulable under RM if and only if:

$$L_i = \min_{\{t \in S_i\}} L_i(t).$$

Moreover, a set of n tasks is schedulable under the RM rule if and only if:

$$L = \max_{\{1 \leq i \leq n\}} L_i \leq 1.$$

Liu and Layland also defined a sufficient and necessary schedulability test for EDF, in which a real-time task set is schedulable on one processor under EDF if and only if its total utilization is less than or equal to one. That is, if the following condition is satisfied:

$$U \leq 1. \quad (4)$$

From Eq. 4 it can be observed that a hard real-time task set is schedulable under EDF as long as its total utilization is less than 100%.

When a task set requires the access to shared resources, problems such as priority inversion can be troublesome. Lui Sha *et al.* proposed the Priority Inheritance Protocol (PIP), that reduces the impact of the priority inversion problem [4]. Under the PIP protocol, a low priority task inherits the priority of a higher priority task if the former blocks the later while using a shared resource. By the use of the priority inheritance, the time a higher-priority task spends in a blocked state is reduced to

the minimum, since a lower-priority task causing the blocking is allowed to complete its execution before other mid-priority tasks.

PIP can be used along with RM to allow resource sharing under a controlled environment. In order to test the schedulability of a task τ_i under PIP and RM, it is only needed to take into account the maximum blocking time of the task τ_i and the tasks with lower priority than τ_i . If the subset's processor utilization factor is less than or equal to $i(2^{1/i} - 1)$, as shown in Eq. 5, then the task's subset is schedulable under PIP and RM on one processor.

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_i}{T_i} + \frac{B_i}{T_i} \leq i(2^{1/i} - 1), \forall i, 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

One of the main motivations of the use of an RTS is that it is possible to control a lot of physical systems using a low-resources computer system (e.g., an embedded system). For instance, consider the case of an autonomous vehicle. To reduce costs, wires can be removed from the vehicle and replaced by an RTS and a wireless network. The functions of the vehicle, such as the breaking system, are controlled by the RTS, guaranteeing that the temporal restrictions are met, such as stopping the vehicle on time.

However, to implement a hard RTS, a hard RTOS must be used. Preempt-RT is a patch that adds hard real-time capabilities to the Linux kernel. It includes the RM and PIP scheduling policies. Recently, a new patch that implements the EDF scheduling policy has been developed. Unfortunately, there is a lack of information on how to develop a hard RTS taking advantage of these scheduling policies. In this paper, the implementation of two RTSs is discussed. The main contribution of this document is a demonstration of the design and implementation of complete RTSs using the Preempt-RT patch, the RM, PIP and EDF scheduling policies, and the real-time POSIX standard extension [5].

The rest of the document is organized as follows: a brief description of Preempt-RT patch as well as the EDF extension are presented in Section II. Section III discusses the implementation of the controlled system, whereas the design of the controlling system using the EDF scheduling policy is presented in Section IV. In Section V the controlling system is described, using the RM scheduling policy and the PIP protocol to control the access to the shared resources. Finally, the conclusions are presented in Section VI.

II. PREEMPT-RT

An operating system (OS) is a software that acts as intermediary between the computer hardware and the user applications. The OS kernel is a software module that is loaded into memory after the computer is booted, and controls all the operations of the computer. Among its main activities, the kernel controls the process management, the interrupt handling and the process synchronization. A general purpose OS (GPOS) aims to share equally all the computer resources among the user's applications, in order to provide multi-tasking services and improve user's interactive responses. In

contrast, an RTOS is designed to support specialized real-time applications [6]. Unlike a GPOS, an RTOS does not care about sharing resources equally among the system tasks since it always preempts a lower-priority task to execute a higher-priority one [7]. Additionally, the operations of an RTOS are time-bounded, since predictability is crucial to guarantee the timing restrictions of the RTS.

The activities of an RTS are commonly implemented as tasks or threads. An RTOS provides three important functions to serve tasks, which are:

- Scheduling
- Dispatch
- Intercommunication and synchronization.

The scheduler is an OS module that selects, from the ready tasks list, the next task to be executed, whereas the dispatcher is a module that performs the necessary bookkeeping actions to start the execution of the chosen task. Intercommunication and synchronization services assures that the tasks cooperate correctly, avoiding racing conditions and related anomalies.

To guarantee the temporal restrictions of the RTS, the scheduler implements real-time scheduling algorithms, such as RM, EDF, and synchronization protocols, such as PIP. The RTS designer chooses, among the available scheduling algorithms, those that better satisfy the RTS characteristics. There are many commercial and free-software RTOS's. Some examples are:

- VXworks [8]
- OSE [9]
- MaRTE OS [10].

Another approach to provide hard-real time capabilities is to modify an existing GPOS. For instance, the Linux kernel only provides support for soft RTSs. This makes Linux distributions not suitable for hard real-time applications. However, due to the fact that Linux is distributed using the GPL license and its source code is freely available, it is an attractive choice. Preempt-RT [11] is a kernel patch which makes a Linux system predictable and deterministic. The patch makes almost all kernel code preemptable. This is possible due to the following changes:

- Converting interrupt handlers into preemptable threads
- Implementing PIP for kernel mutexes, spin-locks and semaphores.
- Making critical sections protected preemptable using the functions `spin-lock_t` and `rwlock_t`.

Preempt-RT, as most RTOSs, provides two priority-based scheduling policies: First-In First-Out (FIFO) and Round Robin (RR), as well as the PIP synchronization protocol. The RM algorithm can be easily used through the FIFO policy. However, as was mentioned previously, the EDF algorithm allows a higher processor utilization than RM. Unfortunately, EDF is not implemented into the Linux kernel. Recently, a patch that implements the EDF scheduling algorithm has been developed [12]. The EDF scheduling policy is integrated complying with the POSIX Thread standard. The GLIBC library was also modified to accomplish it. Additionally, the FTRACE tool [13] is employed to allow the tracing of the kernel scheduling events. When the FTRACE option is

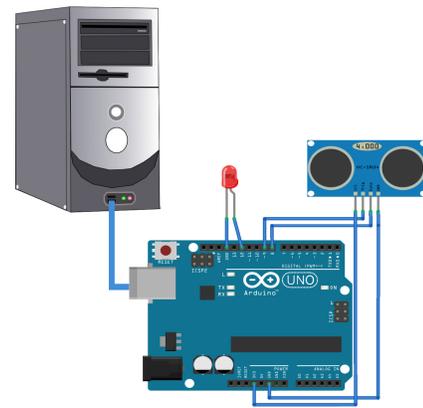


Figure 1. Architecture of the controlled system

activated, the scheduling events are traced and stored in a trace file, usually with the `.dat` file extension, which is parsed into the KIWI format. KIWI is an application that receives as input a `*.ktr` file, and produces graphs that show the scheduling events through time [14].

In the next sections, the implementation of the two RTSs using the Preempt-RT patch and the POSIX standard will be discussed. One of the systems uses the EDF scheduling policy. The other one uses the RM and PIP algorithms. Both systems control the same physical system, which is described next.

III. A REAL-TIME CONTROLLED SYSTEM

In order to illustrate the implementation of an RTS, a prototype of a controlled system was designed. It implements a periodic task (thread) that monitors if an object is detected within a predefined range. For instance, the system could be seen as a robot that is moving and checks periodically for objects that interfere with its trajectory. If an object is detected, it turns an LED on immediately. Conversely, when the object is no longer detected, the LED is turned off. These actions are equivalent to the re-adjusting of the robot's trajectory, within a specific timing window, to avoid a collision.

An ultrasonic HC-SR04 was used to detect obstacles. It is capable to detect objects and calculate the distance from the sensor to an object in a range of 2 to 450 cm. The sensor operates sending a start pulse and measuring the width of the return pulse. Additionally, an Arduino UNO microcontroller was used to communicate the ultrasonic sensor with the controlling system (e.g., a computer). Fig. 1 depicts the architecture of the RTS prototype. The LED was connected to the GND pin and the pin 12 of the Arduino micro-controller in order to represent the turning ON/OFF of the lights. Also, the pins 9 and 8 are used for the trigger and echo of the sensor, respectively. Finally, the VCC and GND pins are connected to the 5v and GND pins of the Arduino UNO.

If an object is detected within the detection range, the system checks if the LED light is turned off. In that case, the LED is turned on. In contrast, if the LED light is already on, no action is performed. When the task is activated on its next period and the object is no longer within the detection range, the system checks if the light is ON to turn it OFF.

These actions are performed by the controlling system, which communicates with the Arduino micro-controller through the USB serial port, using the Arduino-Serial library [15].

Two different controlling systems were designed for demonstration purposes. In both systems, there are three periodic tasks. Nevertheless, the tasks behave different on each system. One of them schedules the hard real-time tasks using the EDF policy. Only one task interacts with the controlled system, turning the LED ON and OFF. The second system schedules the hard real-time tasks using the RM policy. Since two system tasks share a critical section, the PIP protocol is used. Two tasks interact with the controlled system. The task with the highest priority turns the LED ON if an object is detected. The second task turns the LED OFF if no object is detected and the LED is already turned ON.

The controlling systems were executed on a Dell Vostro 260 with 6 Gb of RAM and an Intel® Core™ i3-2100 CPU @ 3.10GHz. However, since a mono-processor kernel was configured, only one core and 1 Gb of RAM were used. The system ran on a Debian GNU/Linux 7.4.0 Wheezy i386 OS, using the PREEMPT RT 3.4.61edfV2-rt77+ and the SSELINUX-EDF patches. The system used the EDF policy through the SSELINUX-EDF patch developed by Amaro *et al.* [12]. In the following sections each of the two controlling systems are explained briefly.

IV. EXAMPLE: EDF-BASED CONTROLLING SYSTEM

To test the performance of the EDF policy, an experiment was carried out using a controlling system comprised by three hard real-time tasks, that were implemented as POSIX threads. One task interacted with the controlled system, whereas the other two tasks were *independent*; i.e., they are supposed to interact and control some other physical systems.

Table I shows the worst execution time and period for every task.

Table I
TASK SET FOR EDF EXAMPLE

τ_i	τ_1	τ_2	τ_3
T_i	1000000000ns	800000000ns	700000000ns
C_i	481099035ns	234889412ns	664758422ns

According to the EDF schedulability test, a set of tasks is schedulable if and only if

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq 1 \quad (6)$$

Using the previous schedulability test, it can be concluded that the task set fulfills the schedulability condition since

$$\frac{481099035}{1000000000} + \frac{234889412}{800000000} + \frac{664758422}{700000000} \leq 1,$$

$$0.949654888 \leq 1.$$

Fig. 2 shows the execution of the tasks for a given period of time. It can be observed that all the tasks complete execution by their respective deadlines.

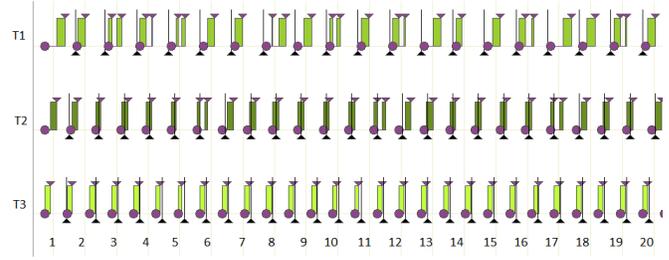


Figure 2. Task set scheduled under EDF

The following code shows the function `main()` where every thread, with respective deadline and initiation, is declared using the EDF policy.

In order to create and configure the system threads, the first step is to declare the threads identifiers and their attributes identifiers, as it is shown in line 6 and line 7, respectively. It is important to note that, to communicate the application with the Arduino micro-controller, the Arduino-Serial library was used. For instance, in line 9 the `fd` and `bitrate` identifiers are declared, where `fd` represents the connection to the serial port and `bitrate` is the transmission data rate. Lines 10 and 11 initialize the connection to the Arduino Card.

The RTS designer selects and sets the thread's scheduling policy through the function `pthread_attr_setschedpolicy`, as shown in line 17. The Preempt-RT patch implements the `SCHED_FIFO` and `SCHED_RR` scheduling policies. Additionally, the `SCHED_EDF` policy can be used if the kernel is properly patched. When the `SCHED_EDF` policy is used, it is necessary to specify the deadline of the thread, through the use of the `sched_param` data structure, as shown in line 20. Afterwards, the thread attributes are set (line 21).

Through the use of the function `clock_gettime` and the clock `CLOCK_MONOTONIC`, the amount of time elapsed since an unspecified point in the past, such as the system start-up, it is obtained and stored in `initialTime` (line 14). Since all the system threads start the execution at almost the same time, once the current time is obtained, the initial time is set to one second later (line 15).

```

1 #include "../arduino-serial/arduino-serial-lib.h"
2 #include <pthread.h>
3 struct timespec initialTime;
4 int main(int argc, char **argv) {
5     /** Declare variables */
6     pthread_t in, pr, out;
7     pthread_attr_t inAttr, prAttr, ouAttr;
8     struct sched_param param1, param2, param3;
9     int fd = -1, bitrate=9600;
10    fd = serialport_init("/dev/ttyACM0", bitrate);
11    serialport_flush(fd);
12    ...
13    /** Do some operations */
14    clock_gettime(CLOCK_MONOTONIC, &initialTime);
15    initialTime.tv_sec += 1;
16    // Set schedule policy
17    status = pthread_attr_setschedpolicy(&inAttr,
18                                         SCHED_EDF);
19    ...
20    // Set deadline
21    param1.sched_rel_deadline = t;
22    status = pthread_attr_setschedparam(&inAttr,
23                                       &param1);

```

```
22 ...
23 }
```

The code below describes the basic structure of the functions that the threads execute on each activation. Each thread has different parameters, such as the period, and performs different operations. Since the controlling system uses the periodic task model, each instance of the threads is activated periodically. For this reason, when a thread is created, the initialization parameters are set, as can be observed in lines 5-7. Afterwards, the thread executes an infinite loop (lines 9-13). The first operation inside the loop is the invocation to the `clock_nanosleep()` function (line 10), which suspends the thread until its period is elapsed, or a signal is delivered to the calling thread. At the end of the loop, once the thread operations are executed, the value of the thread period is added to the `nextActivation` variable (line 12), which is used by the `clock_nanosleep()` function to set the new activation instant for the thread.

```
1 void * inThread(int* fd) {
2   struct timespec periodActivation;
3   struct nextActivation, nextdeadline;
4   int period_time;
5   ...
6   period_time=1000000000;
7   periodActivation.tv_sec = 0;
8   periodActivation.tv_nsec = period_time;
9   nextActivation = initialTime;
10  /** Do some operations **/
11  ...
12  do{
13    clock_nanosleep(CLOCK_MONOTONIC, TIMER_ABSTIME,
14      &nextActivation, NULL);
15    /** Do some operations **/
16    ...
17    timespec_add(&nextActivation, &periodActivation);
18    ...
19  } while (1);
20  pthread_exit(NULL);
21 }
```

The following code explains the most important actions performed by the controller tasks. In order to allow the communication between the physical system and the controller thread, the next parameters were declared as shown in lines 11-13 of the code below. The functions `serialport_read_until` and `serialport_write` shown in lines 19 and 22 are used to communicate with the Arduino micro-controller. Next, it can be seen in lines 20 to 24 that the threads, on each activation, check if an object is detected. In such a case, the LED light is turned ON. Otherwise, it is turned OFF.

```
1 void * inThread(int* fd) {
2   struct timespec periodActivation;
3   struct nextActivation, nextdeadline;
4   ...
5   period_time=1000000000;
6   periodActivation.tv_sec = 0;
7   periodActivation.tv_nsec = period_time;
8   nextActivation = initialTime;
9   /** Do some operations **/
10  ...
11  const int buf_max = 256;
12  char serialport[buf_max], eolchar='\n', buf[buf_max];
13  int timeout = 5000, dist;
14  do{
15    clock_nanosleep(CLOCK_MONOTONIC, TIMER_ABSTIME,
16      &nextActivation, NULL);
17    /** Do some operations **/
```

```
17   memset(buf, 0, buf_max);
18   serialport_flush(*fd);
19   serialport_read_until(*fd, buf, eolchar, buf_max,
20     timeout);
21   dist=atoi(buf);
22   if (dist <=30)
23     rc = serialport_write(*fd, "1");
24   else
25     rc = serialport_write(*fd, "0");
26   ...
27   timespec_add(&nextActivation, &periodActivation);
28   ...
29 }while (1);
30 pthread_exit(NULL);
31 }
```

V. EXAMPLE: RM AND PIP BASED CONTROLLING SYSTEM

The second controlling system works with the RM policy and the PIP protocol and implements three threads. One of them is supposed to control a different physical system. The other two of the threads cooperate to control the physical system, sharing a critical section, which is the connection port with the physical system.

Since the task set shown in Table II does not satisfy the Liu and Layland's sufficient schedulability test, it is not known whether or not the task set is schedulable using RM. However, using the necessary and sufficient schedulability test proposed by J. Lehoczky *et al.* in [3] and adding the necessary maximum blocking times B_i , it can be concluded that the task set is schedulable using the RM and PIP protocols.

Table II
TASK SET FOR THE RM AND PIP EXAMPLE

τ_i	τ_1	τ_2	τ_3
T_i	700000000ns	800000000ns	1000000000ns
C_i	360164690ns	222114638ns	334387711ns
B_i	246928780ns	—	—
U_i	0.86727638	0.27764329	0.33438771

Proof: Using Lehoczky's sufficient and necessary schedulability tests, and including the blocking times due to the use of critical sections, we obtain:

- 1) Task τ_1 : Check $C_1 + B_1 \leq 700000000$. Since $360164690 + 246928780 \leq 700000000$, task τ_1 is schedulable.
- 2) Task τ_2 : Check whether either $C_1 + C_2 + B_2 \leq 700000000$; $360164690 + 222114638 + 0 \leq 700000000$ Or $C_1 + C_2 + B_2 \leq 800000000$ $360164690 + 222114638 + 0 \leq 800000000$
Since either of the two conditions needs to hold true we conclude that task τ_2 is schedulable
- 3) Task τ_3 : Check whether either $C_1 + C_2 + C_3 \leq 700000000$ $360164690 + 222114638 + 334387711 \leq 700000000$ Or $C_1 + C_2 + C_3 \leq 800000000$ $360164690 + 222114638 + 334387711 \leq 800000000$ Or $C_1 + C_2 + C_3 \leq 1000000000$ $360164690 + 222114638 + 334387711 \leq 1000000000$
Since the third condition holds true, we conclude that the task set is schedulable.

Fig. 3 shows the execution chart of the task set under RM with shared resources. The circles represent the activation of a job and the triangles represent the end of the execution of the job. We can observe that there are cases where Thread 3 is blocked by Thread 1 due to the utilization of the shared resources. It also can be observed that all the tasks meet their respective deadlines in the period of time depicted in Fig. 3 .

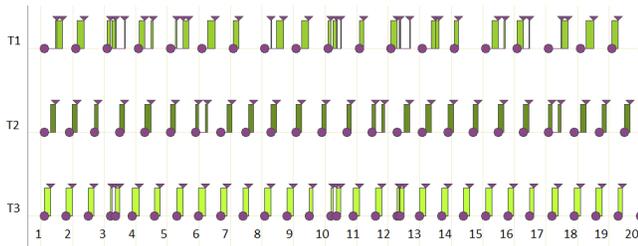


Figure 3. Task set scheduled under RM with shared resources

As it was explained in the previous case, the header files, as well as the main's thread parameters related to the connection, need to be included in the program's code. However, due to the fact that two tasks use the same port to communicate to the Arduino micro-controller, they request access to the critical section using the `pthread_mutex_lock` function and release it using the `pthread_mutex_unlock` function, after completing execution of the critical section. Both functions are shown in line 14 and 21 of the code below. Similarly, the communication is established making use of the `serialport_read_until` and `serialport_write` functions in lines 17 and 20, respectively.

```

1 void * Thread3(...) {
2     struct timespec periodActivation, nextActivation;
3     ...
4     nextActivation = initialTime;
5     const int buf_max = 256;
6     char serialport[buf_max], eolchar = '\n',
7         buf[buf_max];
8
9     int timeout = 5000, dist;
10    do{
11        /*** The thread is set to sleep until the next
12        activation time ***/
13        clock_nanosleep(CLOCK_MONOTONIC,
14                        TIMER_ABSTIME,
15                        &nextActivation, NULL);
16        /*** Do some operations ***/
17        pthread_mutex_lock(&mutex);
18        memset(buf, 0, buf_max);
19        serialport_flush(*fd);
20        serialport_read_until(*fd, buf, eolchar, buf_max,
21                            timeout);
22
23        dist=atoi(buf);
24        if(dist <=30)
25            rc=serialport_write(*fd, "1");
26        pthread_mutex_unlock(&mutex);
27        /*** Do some operations ***/
28        ...
29        timespec_add(&nextActivation,
30                    &periodActivation);
31    }while (1);
32    pthread_exit(NULL);
33 }

```

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

To implement a hard RTS, a hard RTOS must be used. Preempt-RT is a Linux kernel patch aimed to bound the latency of the kernel operations, thus providing hard real-time capabilities to Linux. Preempt-RT offers the FIFO scheduling policy and the Priority Inheritance Protocol as a synchronization protocol. Although the RM algorithm can be easily mapped onto FIFO, there are real-time task sets with high processor utilization that cannot be scheduled using RM but are scheduled using the EDF policy. Recently, a patch to the Linux kernel was developed, implementing the EDF policy offering compliance with the POSIX standard.

Unfortunately, there is no information regarding how to implement a hard RTS using the Preempt-RT kernel and the RM, PIP and EDF policies. This paper aims to fill this gap by discussing how to implement a hard RTS using these tools.

A prototype of a physical system was built, along with two hard RTS controlling systems. The schedulability analysis, the system code and the results of their executions were discussed.

As a future work, we plan to evaluate the RTSs introduced in this paper using a minimal hard real-time kernel.

REFERENCES

- [1] G. Buttazzo, *Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications*, ser. Real-Time Systems Series. Springer US, 2011. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=h6q-e4Q_rzgC
- [2] C. L. Liu and J. W. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment," *J. ACM*, vol. 20, no. 1, pp. 46–61, Jan. 1973. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/321738.321743>
- [3] J. Lehoczky, L. Sha, and Y. Ding, "The rate monotonic scheduling algorithm: exact characterization and average case behavior," in *[1989] Proceedings. Real-Time Systems Symposium*, Dec 1989, pp. 166–171.
- [4] L. Sha, R. Rajkumar, and J. P. Lehoczky, "Priority inheritance protocols: an approach to real-time synchronization," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 39, no. 9, pp. 1175–1185, Sep 1990.
- [5] T. O. G. 1998, *POSIX .13 IEEE Std. 1003.13-1998. Information Technology—Standardized Application Environment Profile—POSIX Realtime Application Support (AEP)*, 1998.
- [6] S. R. Reddy, "Selection of rtos for an efficient design of embedded systems," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 6, no. 6, pp. 29–37, 2006.
- [7] B. Furht, *Real-time UNIX systems: design and application guide*, ser. Kluwer international series in engineering and computer science. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [8] Vxworks website <https://www.windriver.com/products/vxworks/>.
- [9] Ose website <http://www.enea.com/ose>.
- [10] Marte os website <http://marte.unican.es/>.
- [11] Rt preempt home page <https://rt.wiki.kernel.org/>.
- [12] V. Amaro-Ortega, L. Burtseva, A. Díaz-Ramírez. *SSELINUX-EDF Registro Público de Derecho de Autor, No. 03-2016-042911515700-01, 3 Mayo, 2016. INDAUTOR, México*.
- [13] Ftrace home page. <https://www.kernel.org/doc/documentation/trace/ftrace.txt>.
- [14] Kiwi home page <http://www.gti-ia.upv.es/sma/tools/kiwi/index.php>.
- [15] Arduino-serial source page <https://github.com/todbot/arduino-serial>.

Diseño de una mano mecatrónica para un robot humanoide

Fernando Herrera Arroyo.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica. México.
Email: fhafce@gmail.com

Sergio Vergara Limon.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica. México.
Email: svergara2@hotmail.com

M. Aurora Diozcora Vargas Treviño.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica. México.
Email: auroravargast@hotmail.com

Darnes Vilariño Ayala.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Computación. México.
Email: darnes@cs.buap.mx

David Eduardo Pinto Avendaño

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Computación. México.
Email: dpinto@cs.buap.mx
darnes@cs.buap.mx

Resumen: El objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño y modelado de una mano mecatrónica con cualidades antropomórficas la cual será acoplada a un robot humanoide para propósitos de agarre, los puntos que se abordan principalmente son el estudio de la anatomía de la mano humana desde sus aspectos de funcionamiento hasta las medidas y ángulos de flexión para posteriormente realizar la construcción de la mano y los materiales empleados mediante el uso del programa CAD SolidWorks e impresión 3D, también se realiza la obtención de la cinemática de un dedo por los parámetros Denavit-Hartenberg así como la dinámica por la metodología de Euler Lagrange, de la misma forma se menciona la caracterización de los motores que serán los responsables del movimiento para que trabajen en su zona lineal, la descripción del firmware dentro de un FPGA del fabricante ALTERA de la familia Cyclone III con la cual se realiza la comunicación de la mano mediante una interfaz con un pic18f4550 hacia la pc.

Abstract: The main goal of this paper is present the design and modeling of a mechatronics hand with anthropomorphic qualities which will be coupled to a humanoid robot for gripping purposes, the main points that will be shown are the study of the anatomy of the human hand from its aspects of operation up to the measurement and flexion angles to the construction of the hand and the materials used by the use of CAD software SolidWorks and 3D printing, also we obtain the kinematics of a finger by the Denavit-Hartenberg parameters, and the Dynamics by Lagrange equations, we characterize the actuators (Gear-motors) that will be responsible for the movement of the hand to be able to work in their linear zone, we describe the firmware implemented in a FPGA from ALTERA Cyclone III family with which the communication of the hand is made through an interface using a microcontroller pic 18F4550 to the pc.

Keywords—mano, robótica, mecatrónica, robot humanoide

I. INTRODUCCIÓN

Un campo de estudio entre la robótica se ha enfocado en la emulación de los movimientos del ser humano en específico respecto a las extremidades, ya que sus aplicaciones son extensas desde terapias, prótesis, herramientas manipuladoras, hasta construcción de robots humanoides, esto con la finalidad de dar una mejor calidad de vida al usuario, reducir el esfuerzo humano para implementar ciertas tareas, o con fines de investigación.

En el laboratorio de ingeniería del lenguaje y conocimiento de la facultad de ciencias de la computación de la BUAP se adquirió un robot humanoide de la empresa hanson robotics con la capacidad de realizar expresiones faciales, sin embargo este robot cuenta con el torso robotizado, se desea desarrollar de manera gradual otras partes del cuerpo, por lo tanto se desarrollará una mano mecatrónica con la finalidad de agarre de objetos y a trabajo futuro se intentará contar con un sentido del tacto.

Es así como este trabajo se enfoca principalmente en la construcción de la mano mecatrónica la cual debe de constar de un sistema de control para poder acceder a los movimientos de los actuadores del sistema considerando los mecanismos de seguridad que eviten daños a las diferentes etapas que lo constituyen.

Las características del sistema son:

- Cuatro dedos y un dedo pulgar.
- Está basado en la cinemática y dinámica de los seres humanos.
- Contará con un control efectivo para la manipulación desde herramientas de software (en tiempo real).

- Contará con un circuito de protección que evite daños en la etapa de control.

II. DIAGRAMA GENERAL DE LA MANO

El estudio del cuerpo humano es un área de conocimiento que se ha venido desarrollando constantemente, en 1495 Leonardo Da Vinci fue uno de los pioneros en construir un robot humanoide mediante poleas, engranes y cables mediante el estudio de la anatomía humana en su respectiva época[1]. En el siglo XVI el médico militar francés Ambroise Paré desarrollo el primer brazo artificial móvil al cual le denomino “le petite loraine”, los dedos podían abrirse o cerrarse presionando o retrayendo una palanca para una prótesis de codo [2], a partir del siglo XX se han logrado adquirir nuevos conocimientos respecto a la anatomía del cuerpo humano, la medicina y la tecnología unen sus metodologías para crear nuevas herramientas que permiten dar soluciones a problemas mediante el uso de interfaces electrónicas, es así como se han desarrollado diferentes manos robóticas como la mano Utah/MIT [3], Stanford/jpl [4], entre otras, hasta las más sofisticadas. Una de las aplicaciones en el desarrollo de la mano mecatrónica es poder agarrar objetos y dar movilidad a una extremidad del robot al cual será acoplada, incluso podría usarse como un prototipo de prótesis al implementar sensores de fuerza.

Para la construcción de la mano mecatrónica es indispensable hacer un estudio minucioso de la anatomía de la mano humana ya que en base a sus características principales se realiza la misma [5], se realiza el estudio de la cinemática y dinámica de un dedo [7][8], así como se realiza el sistema de control y protección de los motores que serán los encargados de los movimientos de los dedos.

En la “Fig. 1” se muestra el diagrama general de la metodología empleada para la etapa de control el driver para proporcionar la energía a cada uno de los actuadores así como una etapa de acondicionamiento de señales para no dañar al FPGA, es mediante estos bloque mediante los cuales se realiza el movimiento de la mano diseñada.

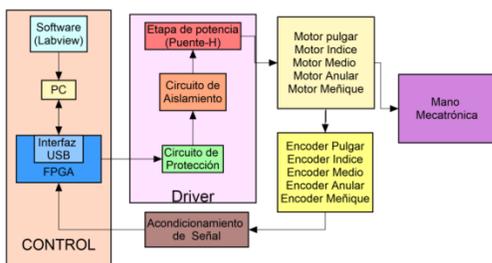


Fig. 1: Diagrama de diseño y construcción de la mano.

III. DISEÑO DE LA MECANICA DE LA MANO

En la construcción de la mano propuesta se utilizó el programa SolidWorks el cual es un software de diseño tridimensional que integra diversas herramientas para facilitar el modelado, es así como se usó el método de superficies para la forma de la palma en base a las medidas de la anatomía promedio de una persona como se muestra en la “Fig. 2”.

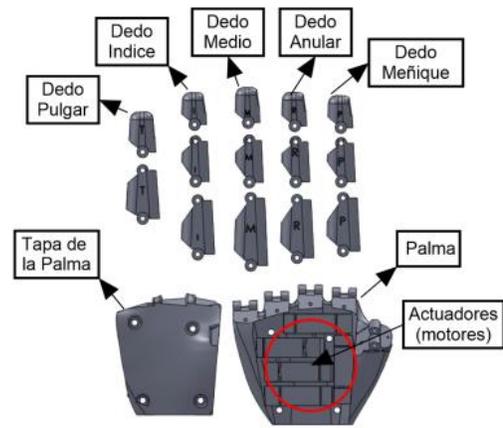


Fig. 2: Dedos, tapa de la palma y palma de mano.

En el diseño de los dedos se tomaron en cuenta los ángulos y medidas correspondientes a la anatomía como se muestra en la “TABLA 1” [6].

TABLA 1: Ángulos de Flexión (Dedos).

Elemento	Unión	Flexión (grados)
Dedos	IFD	60
“	IFP	100
“	MF	90
Pulgar	IFD	50
“	IFD	80

En el diseño de la palma y la tapa se usaron técnicas avanzadas de modelado mediante superficies y se insertaron dentro de la palma los moto-reductores para lograr un sistema integro. En la “Fig. 3” se muestra el diseño del ensamble completo de la mano la cual cuenta con 5 dedos.



Fig. 3: Mano ensamblada en SolidWorks

IV. DESARROLLO DE LA CINEMATICA Y DINAMICA

La cinemática directa es la parte de la física que estudia el movimiento de un sistema mecánico sin tomar en cuenta las fuerzas que lo originan, por consiguiente la cinemática directa de un dedo relaciona las coordenadas cartesianas en función de las coordenadas articulares. Existen varios métodos para obtener el modelo cinemático directo de robots manipuladores, uno de estos es la metodología de Denavit-Hartenberg y en su estructura en cadena cinemática abierta (el final de un eslabón es la base del siguiente) [7], queda representado en cuatro transformaciones homogéneas de la forma:

$$H_i = R_{z_i\theta_i} T_{z_i d_i} T_{x_i l_i} R_{x_i \alpha_i} \quad (1)$$

Los parámetros D-H de la “Fig. 4” son los siguientes:

Eslabón	l_i	α_i	$d_i; \beta_i$	θ_i
1	L1	0	0	q1
2	L2	0	0	q2
3	L3	0	0	q3

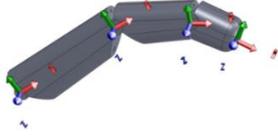


Fig. 4: Ejes de referencia para cada dedo.

Las ecuaciones 2, 3, 4 corresponden a la cinemática directa de los falanges: proximal, medial y distal de un dedo respectivamente tomando en cuenta los centros de masa de cada eslabón.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c1} \sin(q_1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_{c2} \cos(q_1 + q_2) \\ l_1 \sin(q_1) + l_{c2} \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_{c3} \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_{c3} \sin(q_1 + q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

La dinámica de un dedo mediante la metodología de las ecuaciones de Euler Lagrange corresponde a un robot planar de 3 g.d.l. Como primer paso es necesario obtener la cinemática directa del centro de masa de cada uno de los eslabones. Para el i -ésimo eslabón se toman en cuenta las longitudes anteriores l_{i-1} y ángulos q_i y q_{i-1} [8].

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = f_R(l_i, l_{i-1}, l_{ci}, q_{i-1}, q_i) \quad (5)$$

Luego se obtiene la cinemática diferencial del i -ésimo eslabón que corresponde a la derivada de la cinemática directa y de ahí deducir la rapidez lineal.

$$\mathbf{v}_i = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

La rapidez lineal del centro de masa de cada eslabón se calcula de la siguiente forma:

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2 \quad (7)$$

Posteriormente se obtiene la energía cinética $K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ que incluye el movimiento de traslación y rotación para poder calcular el lagrangiano con la resta de la energía potencial.

$$K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \sum_1^n \left[\frac{1}{2} \mathbf{m}_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} \mathbf{I}_i \dot{\mathbf{q}}_i^2 \right] \quad (8)$$

Donde \mathbf{I}_i es el momento de inercia de cada eslabón.

La energía potencial $U(\mathbf{q})$ no tiene una forma específica como en el caso de la energía cinética, depende de la geometría del robot en general.

$$U_i(\mathbf{q}) = \sum_1^n [m_i g l_{ci} h_i(\mathbf{q})] \quad (9)$$

Siendo $h_i(\mathbf{q})$ una función que indica la altura del eslabón con respecto al origen del sistema de referencia del robot. De esta forma se obtiene el lagrangiano como:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}) \quad (10)$$

Y por último se aplican las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange de la siguiente forma:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right] - \frac{\partial}{\partial q_i} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (11)$$

Es así como se proporcionan los torques o pares aplicados a cada actuador implementados en el FPGA para poder mover el mecanismo realizado [10].

V. DISEÑO DE LA TARJETA DE CONTROL DE LA MANO

El diseño de la tarjeta de control para los actuadores consisten en: La interfaz con la PC mediante LabView que se realiza con un microcontrolador pic18f4550 y el FPGA EP3C10F256C6 de la familia Cyclone III desarrollada en la facultad de ciencias de la electrónica (FCE) en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) [9] como se ve en la "Fig 5"

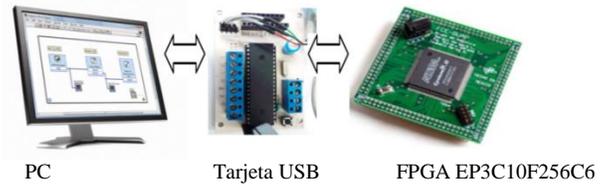


Fig. 5: Tarjeta de control.

Mediante un firmware se pueden leer las señales acondicionadas de cuadratura de los Encoders, para ello mediante un circuito retardador dentro del FPGA se genera una señal de reloj a la máquina de estado junto con las señales de entrada que se encarga de hacer el conteo como se muestra en la "Fig. 6".

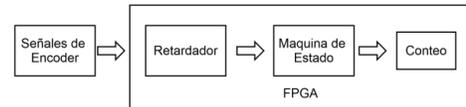


Fig. 6: Firmware implementado en el FPGA mediante el uso de Quartus 13.

De esta forma se obtiene la posición del eje de giro de la caja reductora a partir de la lectura de los encoders, mediante la programación en el FPGA se puede estimar la velocidad

por diferenciación numérica mediante el método de euler de la forma:

$$\dot{q}(t_k) \approx \frac{q(t_k) - q(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} = \frac{q(t_k) - q(t_{k-1})}{h} \quad (12)$$

Donde:

- $\dot{q}(t_k)$ es la velocidad estimada
- $q(t_k)$ es la posición del tiempo actual
- $q(t_{k-1})$ es la posición del tiempo anterior
- t_k es el tiempo actual
- t_{k-1} es el tiempo anterior
- h es el periodo de muestreo

Es así como se aplica el torque a cada motor usando un control tangente hiperbólico implementado dentro del FPGA de la forma:

$$\tau = Kp \tanh(q) - Kv \tanh(\dot{q}) \quad (13)$$

Para realizar el circuito de protección, circuito de aislamiento, circuito de potencia y de acondicionamiento de señales de los encoders de cada motor se realizó la tarjeta de la “Fig. 7”, fue necesario caracterizar los motores para calcular el circuito de potencia de esta forma se construyen 5 tarjetas para realizar el movimiento de la mano completa.

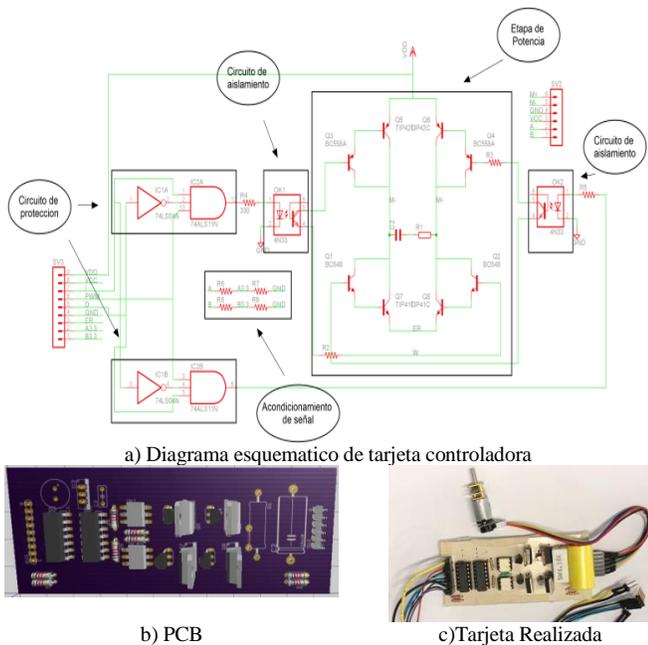


Fig. 7: Tarjeta controladora para cada actuador

VI. RESULTADOS PRELIMINARES

Al caracterizar cada dedo de la mano mediante un dinamómetro se encontró que la relación de la fuerza necesaria para dar movimiento al mismo era aproximadamente de 0.04Nm.

Es así como en la implementación práctica de la mano se eligieron moto-reductores que proporcionaran al menos el doble de la fuerza requerida “Fig. 8” los cuales tienen encoder

de cuadratura de tipo hall y se le colocó una polea en el eje a la cual está acoplada un hilo flexor que soporta una fuerza aproximada de 1.5Nm como actuador del movimiento de cada dedo de la mano, para este propósito es necesario caracterizar los motores para que trabajen en su zona lineal lo cual implica que la energía aplicada sea proporcional al torque o par aplicado mediante la técnica de modulación de ancho de pulso es así como se logra emular el comportamiento de un motor de transmisión directa.



Fig. 8: Moto-reductor CGM12-N20VA.

El torque es una magnitud vectorial, si alfa (α) es el ángulo entre el radio (r) y la fuerza (F), el valor numérico por definición del producto vectorial, es:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times (\vec{F} \text{sen } \alpha) \quad (12)$$

Si se aplica una fuerza a 90° entonces la ecuación del torque se ve afectada por la fuerza de gravedad y el resultante es un producto escalar de la forma:

$$\tau = r * F * g \quad (13)$$

Dónde:

- F es la fuerza medida con el dinamómetro en kg.
- r es el radio de la polea acoplada al motor en metros.
- g es la constante de gravitación universal.
- τ es el torque o par de motor.

La eficiencia es la relación que hay entre el torque sobre la potencia del motor y la ecuación es la siguiente:

$$\eta = \frac{\tau}{P} = \frac{\tau}{VI} \quad (14)$$

Dónde:

- η es la eficiencia del motor.
- P es la potencia consumida del motor.
- V es el voltaje del motor.
- I es la corriente de motor.

El actuador usado es un moto-reductor CGM12-N20VA-08200E como se muestra en la “Fig. 9”, el cual es un motor de corriente directa de 6v que tiene acoplada una caja reductora 100:1 y encoder de cuadratura con una resolución de 32 pulsos por revolución del eje del motor que corresponde aproximadamente a 3000 pulsos por revolución del eje de salida de 3mm de diámetro en forma de D. En la “TABLA 2” se muestran las características del motor.

TABLA 2: Especificaciones motor CGM12-N20VA-08200E.

Motor	CGM12-N20VA-08200E
Voltaje nominal	6 V
Revoluciones	90 RPM
Corriente (sin carga)	< 60 mA
Torque del motor	0,7 kg-cm
Corriente máxima	0,6 A.

Para caracterizar el motor se realiza un barrido de voltaje y se anotan los valores de corriente y fuerza, se calcula el torque y la eficiencia para encontrar el voltaje nominal del motor, para ello fue necesario el diseño de una base la cual fija el motor y una polea como se muestra en “Fig. 9 a) y b)”, los resultados obtenidos del barrido se pueden ver en la “TABLA 3” y la gráfica correspondiente de eficiencia contra voltaje se encuentra en la “Fig. 10”.

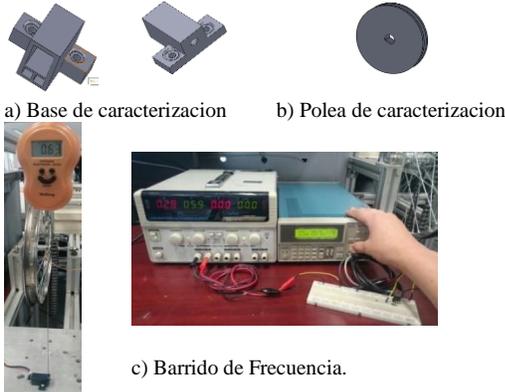


Fig. 9: Caracterización de moto-reductores

Al realizar el barrido de voltaje se obtuvieron los datos de la “tabla 3” para el motor 1.

TABLA 3: Datos de barrido de frecuencia motor 1

Motor 1 Barrido de voltaje					
Voltaje (V)	Corriente (A)	Fuerza (Kg)	Torque (Nm)	Eficiencia	Radio (m)
0	0	0	0	0	0.01
0.5	0.04	0	0	0	0.01
1	0.09	0.13	0.012753	0.1417	0.01
1.5	0.13	0.23	0.022563	0.115707692	0.01
2	0.18	0.35	0.034335	0.095375	0.01
2.5	0.22	0.5	0.04905	0.089181818	0.01
3	0.26	0.65	0.063765	0.08175	0.01
3.5	0.31	0.79	0.077499	0.07142765	0.01
4	0.35	0.92	0.090252	0.064465714	0.01
4.5	0.39	1.05	0.103005	0.058692308	0.01
5	0.43	1.24	0.121644	0.056578605	0.01
5.5	0.47	1.31	0.128511	0.04971412	0.01
6	0.51	1.52	0.149112	0.048729412	0.01
Fuerza en Kg a buscar 0.5			0.62		

La gráfica que representa la eficiencia calculada a partir de las mediciones de la “TABLA 3” para el motor 1 se muestra en la “Fig. 10”.

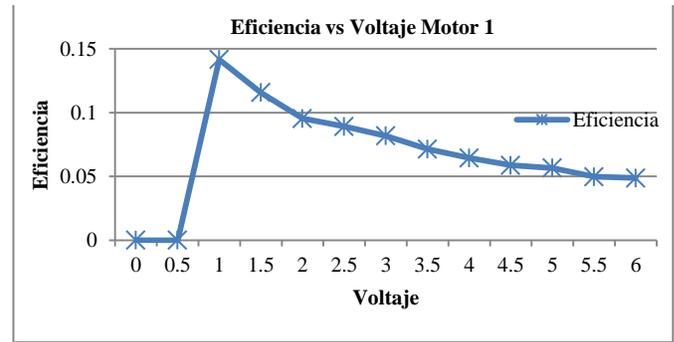


Fig. 10: Grafica de eficiencia de motor 1.

De la gráfica en la “Fig. 10” se eligió el voltaje de 5 volts ya que el torque fue mayor que en 4.5v aunque la eficiencia fue un poco menor.

Después se realiza un barrido de frecuencia en el cual se busca que la respuesta del torque sea la mitad del torque máximo o bien 0.06076Nm o la mitad de fuerza 0.62Kg aplicando una señal cuadrada con 50% de ancho de pulso, se dispuso a hacer un barrido de frecuencia con incrementos de 50 Hz y entre 200 a 250 Hz es donde se encuentra la fuerza o el torque buscado obteniendo los resultados de la “tabla 4”.

TABLA 4: Barrido de Frecuencia para motor 1.

Fuerza o torque	0.62	0.06076
Frecuencia	Fuerza	Torque
10	0.67	0.06566
50	0.78	0.07644
100	0.89	0.08722
150	0.87	0.08526
200	0.68	0.06664
250	0.58	0.05684
300	0.64	0.06272
350	0.73	0.07154
400	0.72	0.07056
450	0.81	0.07938
500	0.86	0.08428

Fuerza o torque	0.62	0.06076
200	0.68	0.06664
210	0.62	0.06076
220	0.6	0.0588
230	0.5	0.05782

De esta forma se dispone a hacer el barrido del ciclo de trabajo en la frecuencia encontrada para el motor 1 que fue de 210 Hz y los datos obtenidos están en la “tabla 5”.

TABLA 5: Barrido de porcentaje del ciclo de trabajo.

Ciclo de Trabajo (%)	Fuerza (Kg)	Torque (Nm)
10	0.12	0.011772
20	0.26	0.025506
30	0.34	0.033354
40	0.46	0.045126
50	0.62	0.060822
60	0.7	0.06867
70	0.82	0.080442
80	0.93	0.091233
90	1.02	0.100062
99	1.16	0.113796

Y la gráfica de Torque contra ciclo de trabajo que corresponde al motor 1 mediante la cual se observa la respuesta lineal respecto a la frecuencia en la “Fig. 11”.

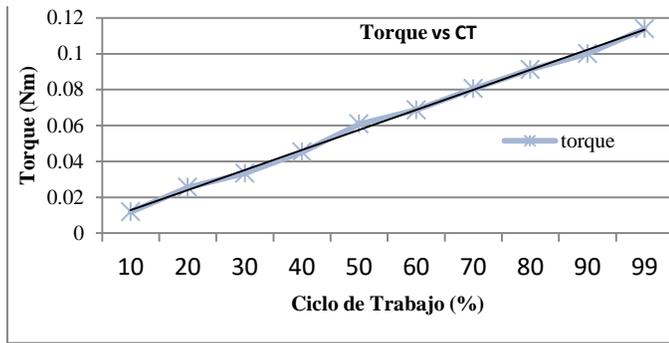


Fig. 11: Respuesta lineal motor 1 caracterizado a 210 Hz.

Para los 4 motores restantes se realizó el mismo procedimiento encontrando las frecuencias características en la tabla 6.

Tabla 6: Frecuencias características para los motores restantes.

Motor	Frecuencia (Hz)
2	240
3	200
4	200
5	100

Para realizar el movimiento de cada dedo se coloca una polea en el eje de salida del motor vista en la “Fig. 12” la cual tiene acoplado un hilo responsable de la flexión y por cada vuelta enrolla aproximadamente 24.5mm.



$$Circunferencia_{polea} = \pi * 7.8mm = 24.5 mm$$

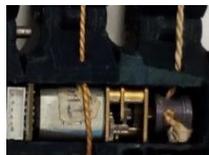


Fig. 12: Polea en el eje de giro de caja reductora.

Los cálculos correspondientes de los pulsos a contar por el control para cada dedo son los que se muestran en la “tabla 7”.

TABLA 7: Calculo de pulsos para la flexión de los dedos.

Dedo	Longitud de hilo	Vueltas (polea)	Pulsos
Pulgar	2.7cm	1.1	3300
Índice	4.8cm	2	6000
Medio	4.3cm	1.75	5250
Anular	4.6cm	1.87	5610
Meñique	4.8cm	2	6000

Mediante el firmware implementado en el FPGA realizado en Quartus 13 se pueden leer las señales de los Encoders de cuadratura y el conteo visualizado en hexadecimal se realiza mediante la herramienta signaltap como se muestra en la “Fig. 13” y “Fig. 14” respectivamente.

En la “Fig. 13” se muestran las señales de cuadratura en amarillo y azul retardada 90° una respecto de la otra, en color púrpura la señal retardada generada con el FPGA para detectar las señales de cuadratura en una región estable para no tener conteos erróneos a causa del jitter.



Fig. 13: Señales de encoder y señal retardadora.

En la “Fig. 14” se muestran las señales correspondientes al contador (conta) y las señales de cuadratura a (enc_A) y b (enc_B) correspondientes.

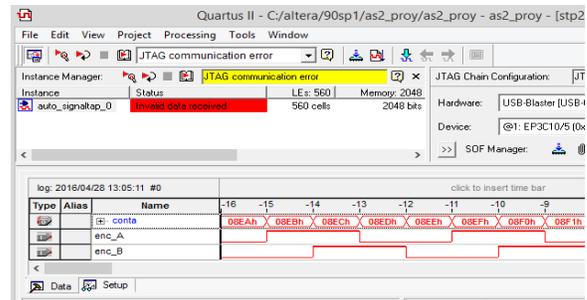


Fig. 14: Señal de contador y encoder a y b.

En la “Fig 15” se muestra el cableado completo para el movimiento del sistema mecatrónico realizado el cual consta de la placa realizada anteriormente el pic18f4550 y divisores de voltaje para acondicionar las señales del pic al fpga.

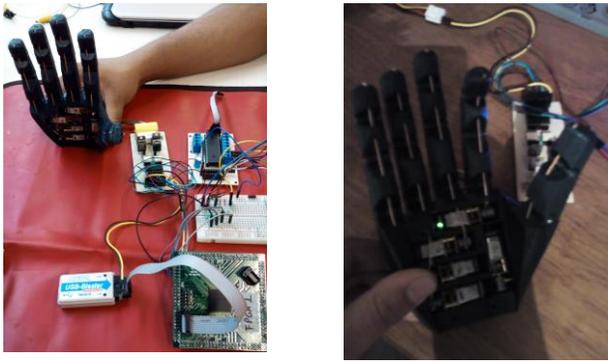


Fig. 15: Sistema mecatrónico y control de un actuador.

En la Fig 16 se muestra la interfaz preliminar de labview la cual cuenta con el control preliminar para un dedo y se grafica la posición y el torque aplicado para llegar a la posición deseada.

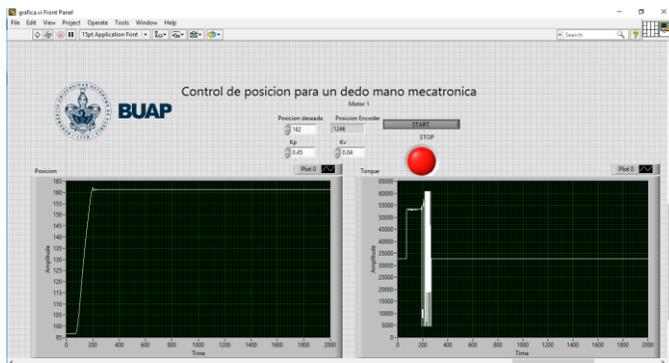


Fig. 16: Interfaz preliminar de un actuador.

En la “Fig 17” se muestra la gráfica de error de posición mediante la cual se observa que se encuentra en la posición de -360 grados esto es porque el error equivale a la posición deseada menos la posición actual y la posición deseada es 0°.

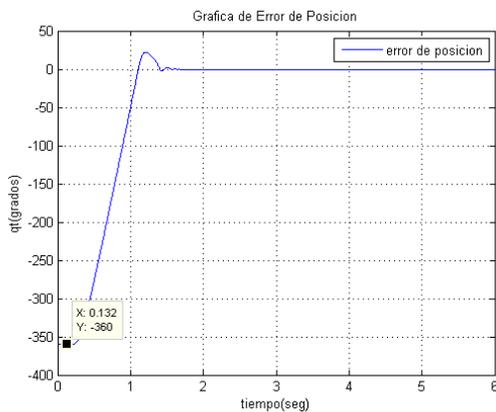


Fig. 17: Gráfica de error de posición.

En la Fig.18 se muestra la gráfica de posición en la cual se observa que la posición actual es de 360° y la deseada 0°.

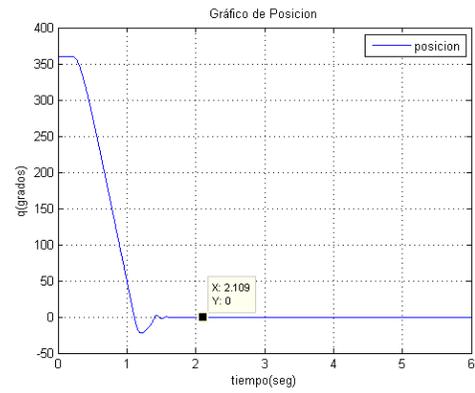


Fig. 17: Grafica de posición.

En la Fig. 19 se muestra la gráfica de estimación de velocidad por el método de diferenciación de euler a partir de los datos de la posición.

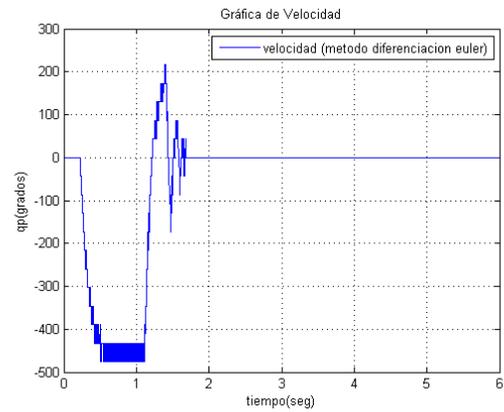


Fig. 18: Grafica de velocidad estimada por diferenciación de Euler.

En la ”Fig. 19” se muestra el torque correspondiente aplicado acotado por el control tangente hiperbólico.

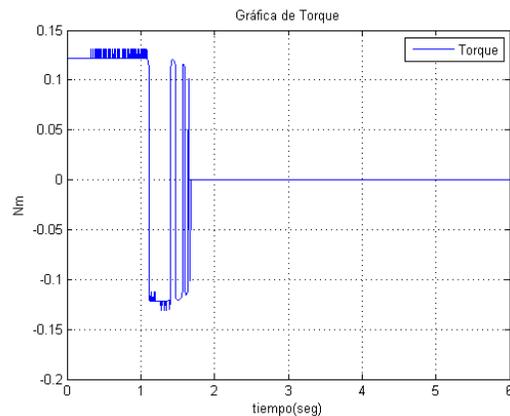


Fig. 19: Grafica de torque aplicado al actuador.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Para la realización de este trabajo fue necesario hacer un estudio detallado de los ángulos de flexión de la mano humana en la construcción de la mano mecatrónica así como también

fue necesaria la correcta caracterización de los motores para poder trabajar en su zona lineal y asegurar que la energía aplicada fue proporcional al torque aplicado.

A pesar que los motores tenían las mismas características físicas las frecuencias de caracterización fueron distintas para cada uno de esta forma se puede emular el comportamiento de un motor de transmisión directa con un moto-reductor.

Al realizar las pruebas preliminares de la resolución de los encoders a partir de los datos del fabricante se encontraron inconsistencias ya que especificaba que tenía 2cpr (dos ciclos por revolución) y en la caracterización de encoder se detectó que tenía 8 cpr por línea al ser de cuadratura el número de pulsos sería de 32 lo que implica que al tener una caja reductora de 100:1 se obtiene una mayor resolución esto implica que el error de posición es de aproximadamente 0.1125 grados ($360^\circ/3200$) obteniendo un control más óptimo en los actuadores .

De la misma forma se realiza la detección de los pulsos de los encoders de los actuadores mediante la programación del FPGA Cyclone III y se aplica un control tangente hiperbólico para poder aplicar el torque necesario para el mecanismo y realizar el movimiento por consiguiente de la mano.

Mediante la interfaz realizada en LabView se obtuvieron las gráficas de posición y torque con las cuales mediante una conversión de unidades y por el método de euler de diferenciación numérica se realiza una estimación de la velocidad del actuador haciendo uso de Matlab, como trabajo a futuro se realizara el movimiento de los demás actuadores para los cuatro dedos restantes, y se mejorara la interfaz para poder obtener los torques y las posiciones de los mismos. Así como también se realizaran pruebas de todo el sistema completo.

REFERENCIAS

- [1] Rosheim, Elling Mark. "Leonardo's Lost Robots" Springer, 2006
- [2] Paré, Ambroise. "Les oeuvres d'Ambroise Paré" Lyon : Chez la vefve de Claude Rigaud et Claude Obert, en rue Merciere, à la Fortune,1633.
- [3] S.C Jacobsen, E. K. Iversen D.F Knutti, R.T Johnson and K.B. Biggers "Design of the UTAH/MIT dextrous hand", IEEE International Conference of Robotics and Automation., San Francisco, CA, USA, 1986.
- [4] J.K Salisbury and J. J. Craig "Articulated hands:Force control and kinematic issues" The International Journal of Robotics Research 1982.
- [5] Gray, Richard L, Vogl, A waygne y Mitchell, Adam W M. "Anatomia de Gray para estudiantes" 3a ed. España : Elsevier, 2015

- [6] Mallon WJ, Brown HR, Nunley JA, "Digital ranges of motion: normal values in young adults" Duke University Medical Center, Durham, N.C., USA,September 1991.
- [7] Subir Kumar Saha "Introduccion a laRobótica", McGraw-Hill, 2008 pag 121.
- [8] Fernando Reyes Cortes, "Robótica control de robots manipuladores", alfa omega, 1er edición
- [9] Vergara S., Vargas M.A., Paic G., Tejeda G., Fernandez A., León I., Reyes F., and Villasenor L. Characterization of the ACORDE scintillator counters using a PCI electronic card, volume 53 (2) 120-125. Revista Mexicana de Física, México, Abril 2007
- [10] Alberto de Jesús Lagunes limon, "Diseño y construccion de un guante sensor de posiciones" , Tesis de maestria, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Junio 2009.

Modelado del aprovechamiento académico del I.T.L.P. mediante minería de datos.

I.S.C. Blanca Cecilia Rosas Burgoin
Maestría en Sistemas Computacionales
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, Baja California Sur, México
cecyburgoin@gmail.com

M.A.T.I. Luis Armando Cárdenas Florido
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Instituto Tecnológico de La Paz
La Paz, Baja California Sur, México
armando.cardenas@gmail.com

Abstract— Resumen: En este trabajo se busca, a través de la aplicación de técnicas de minería de datos, encontrar un modelo de análisis de información que permita determinar los patrones y características del comportamiento de las variables que inciden en los índices del rendimiento académico de los alumnos del Instituto Tecnológico de La Paz, para poder coadyuvar a la toma de decisiones y realizar acciones pertinentes.

I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de técnicas de minería de datos en el análisis de indicadores y estadística de los procesos educativos tiene como objetivo obtener una mejor comprensión del método de aprendizaje de los estudiantes y de su participación global en el proceso, orientado a la mejora de la calidad y rentabilidad del sistema educativo.

La minería de datos es una de las técnicas más utilizadas para analizar el desempeño de los estudiantes, donde se emplea para la obtención de modelos, tareas, métodos y algoritmos para la exploración de datos y tiene como función encontrar y analizar patrones que caractericen los comportamientos de dichos estudiantes en base a sus logros, evaluaciones y el dominio de contenido de conocimiento que tienen los alumnos.

La minería de datos se define como el proceso de extraer conocimiento útil y comprensible, previamente desconocido, desde grandes cantidades de datos almacenados en distintos formatos [1].

El aprovechamiento académico, así como la deserción de los alumnos es una preocupación constante, y uno de los principales objetivos en la educación superior es determinar los múltiples factores que pueden influir en ellos [2].

Para este estudio se toma como referencia información de estudiantes del año 2006 al 2015 del Instituto Tecnológico de La Paz y una de las variables que se analizó son las notas obtenidas por el estudiante, las cuales certifican el logro alcanzado y es un indicador preciso y accesible para valorar el rendimiento académico. Hay variables que se relacionan con el éxito, fracaso u abandono de los estudiantes, tomando en cuenta los indicadores, como son los índices de reprobación y deserción, si estos aumentan, afecta de manera directa a los índices de egresados y de titulación, los cuales disminuyen.

Se ha intentado, a partir de ciertos estudios y usando distintas metodologías, identificar el proceso de un alumno con riesgo de fracaso escolar [3]. En [4], Se observa una visión general de las técnicas de minería de datos que se han utilizado para predecir el rendimiento de los estudiantes. En [5], se analiza información

académica con el objetivo de identificar los factores que influyen en el desempeño académico del estudiante.

Algunos estudios han encontrado patrones ocultos de acuerdo a la clasificación de los estudiantes en base a sus características demográficas y académicas [6]. Otros trabajos toman en cuenta factores socioeconómicos, factores familiares [7]. Se ha identificado que existe una relación importante entre el desempeño académico y los casos de deserción escolar [8].

En este trabajo se busca identificar las variables que inciden en el aprovechamiento escolar de los alumnos del Instituto Tecnológico de La Paz, con el fin de identificar a aquellos que presentan mayor riesgo de fallo o abandono. El principal objetivo es construir un modelo de minería de datos para el análisis relacionado con el aprovechamiento académico, que permita identificar las variables y los múltiples factores que pueden influir en ellos.

II. METODOLOGÍA

De acuerdo al problema de estudio, para realizar este proyecto se aplicó la metodología CRISP-DM, que es actualmente la guía de referencia más utilizada en el desarrollo de proyectos de minería de datos. Esta metodología estructura el proceso en seis fases, como se muestra en la siguiente figura 1.

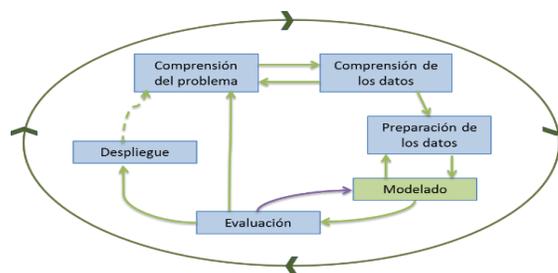


Figura 1. Diagrama de Metodología CRISP-DM.

Una de las ventajas de la metodología CRISP-DM es independiente de la herramienta tecnológica a utilizar en la Explotación de Datos, lo cual la hace más flexible.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

A. Comprensión del problema.

a) Determinación de los objetivos del Problema.

Contexto.

El Instituto Tecnológico de la Paz, es una escuela de nivel superior, donde se imparten 9 carreras a nivel licenciatura y dos posgrados.

b) *Objetivos.*

Cumplir con los planes de estudio, alcanzando altos niveles en el índice de titulados, además de brindar clases de calidad, para la formación de profesionistas exitosos que puedan desempeñarse en el ámbito laboral y formar profesionistas de excelencia, capaces de responder de manera efectiva y específica a las necesidades regionales, con calidad, productividad y una visión nacional e internacional.

c) *Criterios de éxito.*

Al cumplir con los objetivos podremos determinar cuáles alumnos necesitarán más apoyo o establecer algún seguimiento académico, para mejorar su desempeño escolar.

1) *Evaluación de la situación.*

El Instituto Tecnológico de la Paz cuenta con las herramientas necesarias para el desarrollo de este proyecto, además de contar con un sistema de bases de datos que permite aplicar las herramientas de minería de datos, así como un sistema para analizar la información.

a) *Análisis del costo- beneficio.*

El costo-beneficio para llevar a cabo la investigación ofrece un mayor grado de utilidad, ya que no se requiere un gran despliegue de recursos financieros la mayoría de los requerimientos ya se cuenta con ellos.

3) *Determinación de los Objetivos de Minería de Datos.*

a) *Objetivo de minería de datos.*

Diseñar un modelo de minería de datos que nos permita agrupar y asociar las variables de los alumnos, para detectar posibles tendencias o patrones de comportamiento relacionadas con el desempeño académico de los alumnos del Instituto Tecnológico de La Paz.

b) *Criterios de éxito de minería de datos.*

Se establece como criterio de éxito, identificar las posibles tendencias o patrones, en las variables que están relacionadas con el desempeño académico de los alumnos del Instituto Tecnológico de La Paz, así como el de evaluar la incidencia que éstas tienen en los porcentajes de los índices de reprobación y deserción.

4) *Plan del proyecto.*

1) *Técnicas de minería de datos.*

Para llevar a cabo el proyecto se utilizó la herramienta SQL Server 2012 de Microsoft, donde se comparan los siguientes algoritmos:

- *Reglas de Asociación.*

Los modelos de asociación se generan basándose en conjuntos de datos que contienen identificadores para casos individuales y para los elementos que contienen los casos. Un grupo de elementos de un caso se denomina un conjunto de elementos. Un modelo de asociación se compone de una serie de conjuntos de elementos y de las reglas que describen cómo estos elementos se agrupan dentro de los casos. [9]

Para efectos de la realización del proyecto, este algoritmo es de utilidad ya que podemos identificar los elementos de asociación entre los alumnos que

reprobaron o aprobaron, en determinada materia, es decir, identificar lo que tienen en común cada uno de ellos con el resto de los registros que cumplen con el parámetro deseado.

- *Cluster.*

El algoritmo de agrupamiento de Microsoft es un algoritmo de segmentación que itera en los casos de un conjunto de datos para agruparlos en grupos que contengan características similares. Estas agrupaciones son útiles para la exploración de datos, la identificación de anomalías en los datos y la creación de predicciones [9].

La aplicación de este algoritmo nos permite agrupar y clasificar a los alumnos que reprobaron cierta materia, y segmentarlos de acuerdo a la coincidencia en diferentes parámetros e ir formando diversos grupos de los mismos, además de crear relaciones entre cada uno de los alumnos que integran el grupo.

- *Árboles de decisión.*

El algoritmo de árboles de decisión es un algoritmo de segmentación que trata de resolver los problemas de discriminación en una población segmentando de forma progresiva la muestra para obtener finalmente una clasificación fehaciente en grupos homogéneos, según la variable de interés (variable de segmentación o dependiente).

La asignación de un elemento poblacional a un segmento se lleva a cabo de acuerdo a los valores de determinadas variables medidas sobre el que constituyen las variables independientes del modelo.

El algoritmo de árboles de decisión realiza particiones secuenciales del conjunto de datos para maximizar las diferencias de la variable dependiente o criterio base entre los segmentos, y se caracterizan por desarrollar un proceso de división de forma arborescente. Estas divisiones se representan como nodos [10].

B. *Comprensión de los datos.*

1) *Recolección de Datos Iniciales.*

La fuente de datos con que se lleva a cabo la investigación, es la base de datos académica del Instituto Tecnológico de La Paz, correspondiente a los periodos 2006-2015.

La base de datos se encuentra almacenada en *MySQL* y para la realización de nuestro proyecto fue necesario exportarla a *SQL Server* mediante el uso de la herramienta llamada *SQL Server Migration Assistant for MySql*.

C. *Preparación de los datos.*

Para este proyecto sólo se seleccionaron 9 tablas de la base de datos escolar.

1) *Proceso de Extracción, Transformación y Carga.*

En esta fase se verificó que los datos en nuestra base de datos no tuvieran incongruencias, y se verificó la integridad relacional.

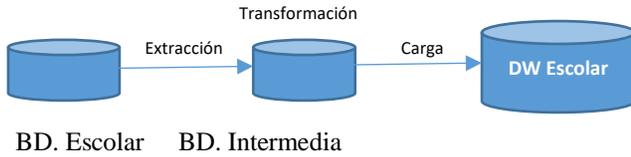


Figura 2. Proceso ETL.

En este proyecto fue necesario integrar la clave de Maestro y de Especialidad a la tabla de Cardex, ya que desde esta tabla no se podía obtener los datos relacionados del maestro que impartió la materia al alumno, así como la especialidad del alumno. Por lo tanto, de acuerdo a su clave, se obtuvo e integró el nombre del maestro que impartió la materia, así como a la especialidad a la que pertenece el alumno, además que se agregaron nuevos campos, como el de 'curso', 'acredito', y 'rangocalificación'.

Como resultado del proceso ETL que se muestra en la figura 2, y a partir de la bodega de datos, generamos nuestro modelo multidimensional tipo constelación que se muestra en la figura 3, el cual es necesario para la fase de modelado de nuestro proyecto de minería de datos.

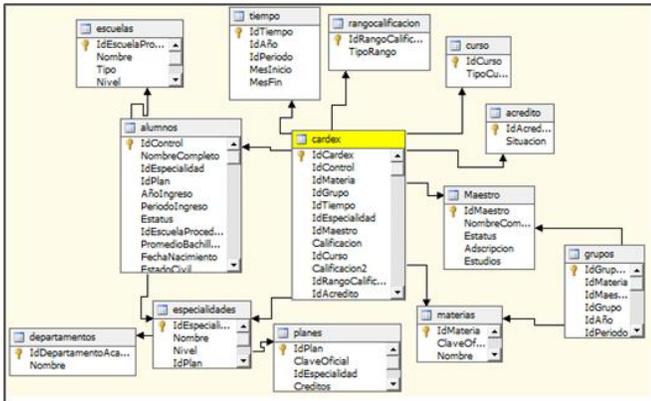


Figura 3. Modelo Multidimensional.

D. *Modelado.*

Como primer paso se seleccionó el método para definir la estructura de minería de datos y se definieron los datos con los cuales se generó la estructura de modelo de minería de datos. Las pruebas se analizarán con una muestra, en la que sólo se incluyen los registros de los alumnos del área de la especialidad de Sistemas Computacionales con 26,658 registros. Para las pruebas se seleccionaron las variables de entrada: Curso, Maestro y Materia.

Se probaron los siguientes algoritmos: el algoritmo de asociación de *SQL Server* y los algoritmos de agrupamiento *K-means* y *EM*. Dichas pruebas nos sirvieron para probar la calidad y veracidad del modelo.

III. RESULTADOS OBTENIDOS.

Los resultados obtenidos nos muestran información del comportamiento de las variables, porque nos sirven para poder establecer nuevos parámetros en la ejecución de nuevas pruebas con mayores conjuntos de valores. Los resultados se muestran a continuación:

Soporte	Tam...	Conjunto de elementos
350	2	Nombre = TALLER DE ADMINISTRACION, Id Curso = 1
344	1	Nombre = FUNDAMENTOS DE INVESTIGACION
343	2	Nombre = FUNDAMENTOS DE INVESTIGACION, Id Curso = 1
342	2	Nombre = FUNDAMENTOS DE PROGRAMACION, Id Curso = 1
339	2	Nombre = MATEMATICAS DISCRETAS, Id Curso = 1
336	1	Nombre = TUTORIA
336	2	Nombre = TUTORIA, Id Curso = 1
322	1	Nombre = MATEMATICAS PARA COMPUTACION
319	2	Nombre = MATEMATICAS PARA COMPUTACION, Id Curso = 1
318	2	Nombre = FISICA I, Id Curso = 1
316	1	Nombre = INTRODUCCION A LA INGENIERIA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES
315	1	Nombre = SEMINARIO DE ETICA
314	2	Nombre = SEMINARIO DE ETICA, Id Curso = 1
311	2	Nombre = INTRODUCCION A LA INGENIERIA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES, Id Cur...
310	2	Nombre = FUNDAMENTOS DE PROGRAMACION, Id Curso = 1
304	2	Nombre = MATEMATICAS I, Id Curso = 1
293	1	Nombre = PROBABILIDAD Y ESTADISTICA
291	1	Nombre = PROBABILIDAD Y ESTADISTICA

Figura 4. Algoritmo de asociación a priori resultados prueba 1.

En la figura 4, el algoritmo generó 75 reglas, con una probabilidad mínima de 80% y un soporte mínimo de 67%, que muestra que hay una asociación fuerte de las materias con los alumnos, y nos muestran las materias que tienen mayor incidencia en el nivel de reprobación.

Probabilidad	Importancia	Regla
0,709	0,390	Nombre = PROBABILIDAD Y ESTADISTICA, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1
0,611	0,325	Nombre = PROBABILIDAD Y ESTADISTICA, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1
0,585	0,309	Nombre = FUNDAMENTOS DE PROGRAMACION, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1
0,550	0,280	Nombre = PROBABILIDAD Y ESTADISTICA -> Id Acredito = 1
0,549	0,276	Nombre = ESTRUCTURA DE DATOS, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1
0,546	0,277	Nombre = PROBABILIDAD Y ESTADISTICA -> Id Acredito = 1
0,540	0,275	Nombre = FUNDAMENTOS DE PROGRAMACION -> Id Acredito = 1
0,530	0,264	Nombre = MATEMATICAS I, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1
0,523	0,255	Nombre = CALCULO VECTORIAL, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1
0,515	0,253	Nombre = MATEMATICAS I -> Id Acredito = 1
0,500	0,239	Nombre = CALCULO DIFERENCIAL, Id Curso = 1 -> Id Acredito = 1

Figura 5. Algoritmo de asociación a priori resultados prueba 2.

En la figura 5, vemos las materias que tienen mayor incidencia en el índice del aprovechamiento y con estos resultados generados podemos agregar nuevas variables de entrada para poder conocer asociaciones más específicas de las relaciones que tiene el alumno con las materias de mayor reprobación.

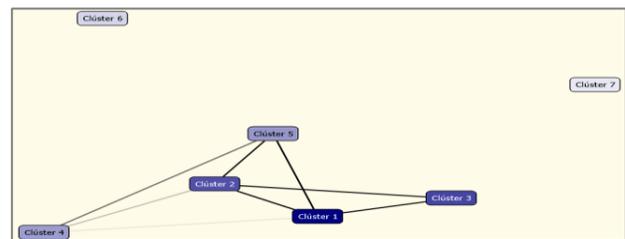


Figura 6. Diagrama de grupos (cluster) de Algoritmo EM.

El diagrama de grupos (*cluster*) de la Figura 6, muestra la información de las variables Materia, Maestro y Curso, en la que podemos observar el grado de densidad, es decir de los vínculos más fuertes al agrupar las variables, y nos indican que es similar en la mayoría de ellos.



Figura 7. Perfil de grupos (*clusters*) de EM de la Prueba 1.

En la Figura 7, muestra que los grupos que se generaron a partir de la relación que tienen las variables Curso, Materia y Maestro, tienen cierta relación entre ellos. Vemos en la figura 8 los resultados de una segunda prueba, donde se ve con mayor claridad que las materias y los maestros tienen mayor influencia en el desempeño académico.

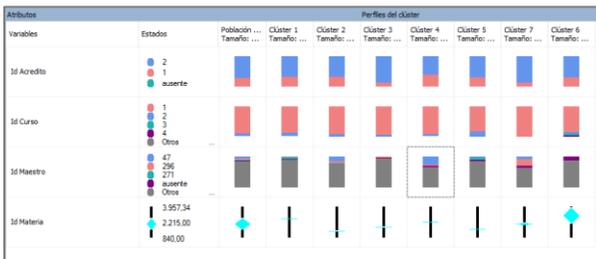


Figura 8. Resultados del algoritmo EM de la prueba 2.

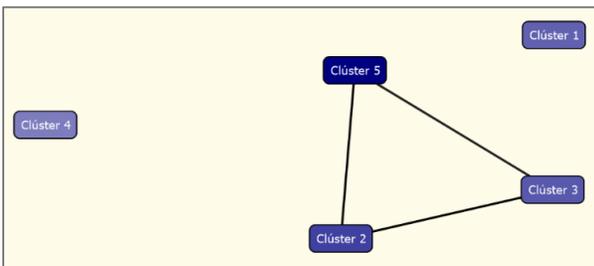


Figura 9. Diagrama de grupos (*cluster*) de Algoritmo *K-medias*.

El diagrama de la Figura 9, muestra la información de los conjuntos generados a partir de las variables de entrada que tienen un vínculo mayor entre ellas, y nos indican que son muy similares los niveles de probabilidad de la desviación típica de las distancias de cada uno de ellos, lo que nos servirá para realizar más pruebas y así determinar con mayor certeza el grado

de influencia de las variables en el nivel de reprobación de los alumnos.



Figura 10. Perfil de grupos (*cluster*) de *K-means*.

El Perfil de grupos (*clusters*) de la Figura 10, muestra que las variables Curso, Materia y Maestro, tienen relación en el aprovechamiento académico. Los resultados que nos muestra la figura 11 de una segunda prueba, nos indica que las variables, Materia y Maestro tienen una fuerte relación en la aprobación y reprobación de los alumnos.

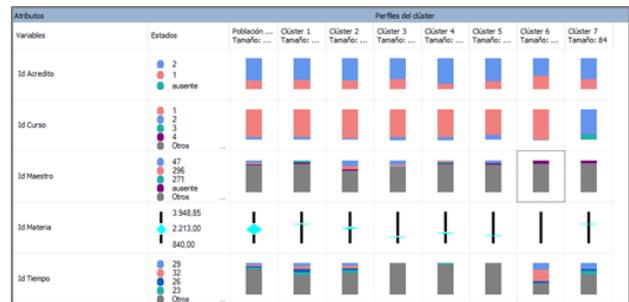


Figura 11. Resultados del algoritmo *K-means* de la prueba 2.

Una vez que se aplicaron los diferentes algoritmos sobre los datos, podemos identificar que los resultados de las variables de entrada, Curso, Maestro, Materia, establecen un cierto grado de relación entre ellas para determinar si un alumno acreditó o no, sin embargo, para determinar con mayor precisión el grado de influencia de cada variable, será necesario realizar más pruebas sobre los datos.

IV. TRABAJO FUTURO.

Como trabajo futuro, se aplicarán nuevas pruebas en los algoritmos de minería de datos seleccionados, en nuestro modelo multidimensional, las cuales son las siguientes:

- Se aplicarán nuevas pruebas a los modelos usados, y agregaremos nuevas variables como son el semestre y la especialidad.
- Extraer patrones y reglas que permitan generar un perfil del caso típico que represente un patrón del modelo.
- Hacer una evaluación de los resultados y seleccionar el algoritmo que cumpla con los objetivos del problema.
- Corroborar el funcionamiento del modelo de minería de datos.

REFERENCIAS

- [1] F. C. p. Witten y B. R., *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques with java Implementations*, Morgan Kauffmann Publishers, 2000.
- [2] A. Hernández Cedano Jaime Ángel, *Modelo de minería de datos para identificación de patrones que influyen en el aprovechamiento escolar*, La Paz, México: CIRC 2015, 2015.
- [3] Á. G. H. Jiménez Galindo Álvaro, *Minería de Datos en la Educación*, Madrid, España, 2010.
- [4] Amirah Mohamed Shahiria, *The Third Information Systems International Conference, A Review on Predicting Student's Performance using Data Mining Techniques*, Malasia: Procedia Computer Science, 2015.
- [5] Z. Natek, *Student data mining solution–knowledge management system related to higher education institutions*, Eslovenia: Expert Systems with Applications, 2014.
- [6] A. F. Harwati, *Mapping Student's Performance Based on Data Mining Approach (A Case Study)*, Indonesia: Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015.
- [7] H. Gulati, *Predictive Analytics Using Data Mining Technique*, Noida, India: Computer Science and Engineering, 2015.
- [8] R. S. Karina B. Eckert, *Análisis de Deserción-Permanencia de Estudiantes Universitarios Utilizando Técnica de Clasificación en Minería de Datos*, Argentina: Formación Universitaria, 2015.
- [9] Microsoft.com, *Data system, Performance and Scalability*, Business Intelligence Editions., 2012.
- [10] P. Maria, *Minería de datos a través de ejemplos*, México: Alfaomega Grupo Editor, 2015.

Desarrollo de un sistema de adquisición para señales cardiacas, mioeléctricas y de temperatura humanas

J. Raúl Olmedo Viveros¹, M.A. Vargas¹, S. Vergara¹,
F. Reyes¹, A. Palomino¹, D. Vilariño², M. Vargas³,
J.M. Rodríguez Lelis⁴

¹Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Edif. 109A Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México

²Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Edif. 109A Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México

³Escuela de Ciencias, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, PRIV.12 de Junio 100, Universidad, Universitaria Uabjo, 68125 Oaxaca, OAX, México

⁴CENIDET, Departamento de Mecánica, Prolongación Palmira S/N Esq. Apatzingan, Colonia Palmira. Cuernavaca, C.P. 62490 Morelos, México

Resumen— Se presenta en este trabajo el diseño para el desarrollo de un sistema de adquisición de datos para utilizarlo en rehabilitación. En el cual se utilizará la tarjeta denominada MIOCARD 1.0 realizada por el grupo de Robótica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica dentro de la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la cual cuenta con una tarjeta FPGA de la familia Cyclone II [1]. Dicha tarjeta cuenta con 4 canales analógicos disponibles, en ella se implementarán tres dispositivos médicos de tipo no invasivo; los correspondientes a un Electrocardiógrafo, un Electromiógrafo y un Termómetro corporal. En el Electrocardiógrafo se obtendrán las señales correspondientes a las 12 derivaciones de las señales del corazón, en otro canal un Electromiógrafo donde serán obtenidas señales musculares con electrodos de tipo superficial y otro canal será destinado al Termómetro para el censo de la temperatura corporal del paciente.

Abstract—The design of a device made as a data acquisition system to be used in rehabilitation is developed in this paper. In this work will be used a device denominated MIOCARD 1.0 implemented by the Robotics department of the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, the device counts with a FPGA of Cyclone III family. This device contains 4 available channels, in it will be implemented 3 no invasive medical devices; corresponding an electrocardiograph, an electromyograph and a corporal thermometer, in which in the electrocardiograph are going to be obtained the 12 derivations of the heart signals, in other cannal corresponding on the electromyograph are going to be obtained the muscular signals by superficial electrodes and the other channel is destined to the thermometer for censung the corporal temperature of the patient.

Keywords— FPGA, Electromyography, electrocardiography, data acquisition system.

I. INTRODUCCIÓN

En la medicina existen diversos tipos de herramientas que son utilizadas como auxiliares en la detección, tratamiento y monitoreo de ciertas enfermedades o patologías presentes en el ser humano.

Sin embargo, a pesar de que todas las personas con algún tipo de padecimiento deberían tener las mismas oportunidades para realizarse estudios, análisis, tratamientos y evaluar su mejora, esto no es posible, ya que en nuestro país no se desarrolla la tecnología ni los instrumentos necesarios para tratar este tipo de padecimientos, por lo tanto, tienen que ser importados, lo cual hace más difícil su adquisición y eleva los costos de los tratamientos y análisis de dichas patologías.

Es por esto que en este trabajo se desarrolla un sistema de adquisición de datos para utilizarlo en rehabilitación, en el cual se crea un dispositivo capaz de obtener señales bioeléctricas procedentes del cuerpo humano, correspondientes a estudios de electromiografía y electrocardiografía, así también poder hacer un censo de la temperatura corporal del paciente mientras se está realizando los estudios. Se revisaron bibliográficamente las señales eléctricas de los músculos, del corazón y de la temperatura corporal, se realizaron los ajustes necesarios para poder adquirir las tres señales por medio de la tarjeta de adquisición MIOCARD 1.0, se diseñó el firmware necesario para el sistema de adquisición de señales, también el software del sistema fue diseñado para hacer posible la adquisición de las señales y poder interpretarlas en una PC, ya con esto, se realizaron pruebas experimentales del sistema diseñado.

II. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA

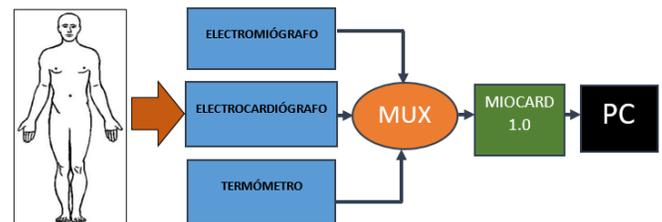


Figura 1. Diagrama general del sistema.

Como puede verse en la Figura 1, el diagrama muestra una imagen general de la estructura del sistema diseñado. En éste se pueden observar los tres tipos de señales provenientes del

cuerpo humano y después de un procesamiento, las mismas terminan con su visualización en una PC.

El papel de la electricidad con relación al sistema nervioso surgió de la observación de los efectos de la aplicación de la misma al organismo, y eventualmente, del descubrimiento que tanto músculos como nervios podían ser fuentes de energía. Éste descubrimiento fue la base del diagnóstico eléctrico o electrodiagnóstico.

En el siglo XX, el electrodiagnóstico fue perfeccionado por Edgar Douglas Adrian y Bronk Detlev con la aguja coaxial en 1929, base de la electromiografía actual [3].

El electrocardiograma es un estudio de la actividad eléctrica del corazón, con la finalidad de poder determinar algunas anomalías en el funcionamiento de este, ya que las células cardíacas producen los estímulos para que el músculo cardíaco pueda trabajar de una manera adecuada, si existe un mal funcionamiento del corazón, el electrocardiograma permite conocer la actividad del corazón y conforme a esto poder hacer un análisis de los resultados para determinar si existe algún tipo de enfermedad o problema en el corazón [4,5].

Las señales electromiográficas (EMG) de superficie son muy importantes en el reconocimiento de patrones, control de dispositivos, rehabilitación, entre otros campos debido a la facilidad con la que se pueden adquirir de forma no invasiva y sin peligro para el individuo. Ésta señal provee información acerca de la actividad neuromuscular presente en el músculo activo correspondiente a la suma de la actividad de un número mayor de unidades motoras más pequeñas[6].

El termómetro permite medir la temperatura de una persona y determinar si se encuentra o no dentro de un rango normal; conociendo que una temperatura corporal alta corresponde a una fiebre. También puede ser útil monitorearla para comprobar si una persona padece síntomas de enfermedad o si un tratamiento determinado está funcionando, especialmente los tratamientos de infecciones con antibióticos[1].

La temperatura normal varía de una persona a otra, dependiendo de la edad, la hora día y el lugar del cuerpo donde ésta fue medida. La temperatura promedio normal es de 37°.

III. DISEÑO DEL ELECTROMIÓGRAFO

En el registro de las señales bioeléctricas de superficie existen inconvenientes tales como el ruido del ambiente, el que es debido al movimiento de los electrodos y la interferencia entre canales o también llamado crosstalk. Para eliminar estos inconvenientes se implementará una etapa de pre amplificación y filtrado para evitar distorsiones en la información contenida en las señales. Es importante el diseño de filtros para la adquisición de las señales de una manera adecuada para su posterior procesamiento [6].

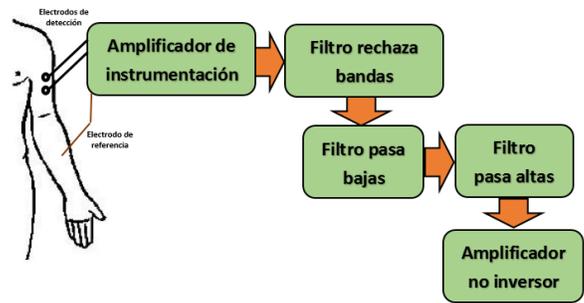


Figura 2. Diagrama a bloques del EMG.

Como puede verse en la Figura 2, en el diagrama a bloques se presenta la etapa de amplificación y filtrado, en el cual se muestra un amplificador de instrumentación con matrícula AD8221ARZ, un filtro de rechazo de banda con frecuencia de corte en 60Hz, un filtro pasa bajas con primer orden con frecuencia de corte de 1kHz, un pasa altas de primer orden con frecuencia de corte en 10Hz y finalmente es amplificada con un amplificador en configuración no inversora para poder así ser registrada por un microcontrolador PIC16F877A, para el cual es necesario agregar un voltaje de offset de 1.5V debido que no acepta voltajes negativos, y de la misma manera se agrega un amplificador en configuración inversora con ganancia unitaria ya que la señal obtenida está invertida debido a la etapa anterior.

IV. DISEÑO DEL ELECTROCARDIÓGRAFO Y EL MEDIDOR DE TEMPERATURA

El electrocardiograma (ECG/EKG, del alemán Elektrokardiogramm) es la representación gráfica de la actividad eléctrica del corazón, sirve para conocer el ciclo cardíaco y estudiar algunas deficiencias del mismo, como defectos del miocardio, agrandamiento del corazón, defectos congénitos, entre otros. El corazón produce potenciales de acción con una frecuencia de 1Hz (un latido por segundo), estos, al propagarse hacia las aurículas y los ventrículos generan un espectro de entre 0.01Hz hasta 150Hz y la amplitud típica en QRS es de 1mV [2].

Para poder registrar las señales eléctricas que produce el corazón se utiliza un aparato llamado electrocardiógrafo encargado de muestrear la señal eléctrica. Los estímulos que produce el corazón para contraerse producen una diferencia de potencial que puede ser muestreada. La señal se adquiere a través de cables conectados en el cuerpo del individuo (electrodos), ésta es enviada a un amplificador que aumentará la amplitud de la pequeña señal adquirida que ronda en el orden de los milivolts [7,8].

Es posible observar la actividad eléctrica del corazón desde 12 posiciones diferentes, las cuales son llamadas derivaciones del ECG, las señales eléctricas del corazón se dividen en dos planos con 6 señales cada uno. El plano frontal que comprende las señales: DI, DII, DIII aVR, aVL y aVF; y el plano horizontal que comprende las señales V1 a V6. Con estas 12 señales obtenemos la información completa del corazón del paciente.

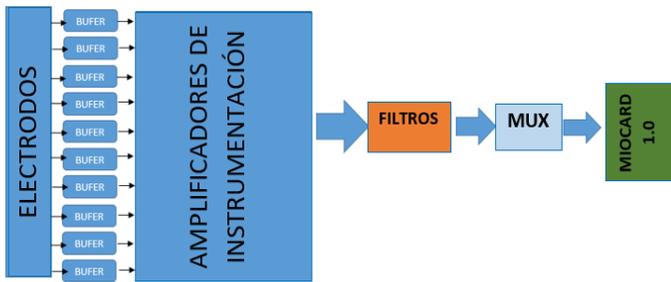


Figura 3. Diagrama a bloques del ECG.

Como puede verse en la Figura 3, el diagrama a bloques muestra en rasgos generales el procesamiento después de la obtención de las señales provenientes del corazón mediante la utilización de electrodos, posteriormente se llevará a cabo la etapa de filtrado, donde, como se ha mencionado anteriormente se encontrarán los filtros pasa bajas, pasa altas, amplificador inversor y un sumador, con el propósito de obtener una señal lo suficientemente “limpia” para poder multiplexarla y al final poder hacer un buen procesamiento de la señal mediante el software en la tarjeta MIOCARD 1.0.

V. HARDWARE, FIRMWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA

5.1 Hardware: Para el diseño del Hardware se tendrán dos circuitos diferentes para cada dispositivo, en cada uno se tendrá una etapa de pre amplificación y filtrado. Para el caso del electromiógrafo, como puede verse en la Figura 4, se muestra el diagrama de dicha parte:

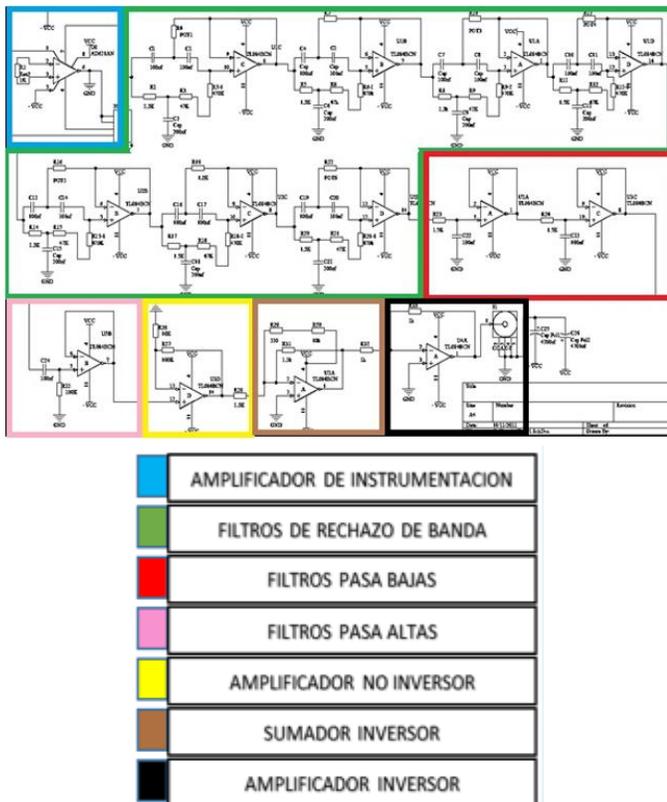


Figura 4. Diagrama electrónico del EMG.

Para la implementación de la primera amplificación se utiliza un amplificador de instrumentación con matrícula AD8221ARZ, el cual es de tipo diferencial y se utiliza una ganancia de 495, para la implementación de los filtros se utilizó el circuito integrado TL084, que contiene 4 amplificadores operacionales[1].

Para la creación del hardware del electrocardiógrafo se utiliza también una etapa de pre amplificación y filtrado, en las cuales se utiliza de igual manera el amplificador de instrumentación AD8221ARZ pero con una ganancia de 883, el circuito general de la etapa de amplificación y filtrado para las 12 señales eléctricas del corazón, como puede verse en la Figura 5, se puede observar cada una de las etapas mencionadas con anterioridad.

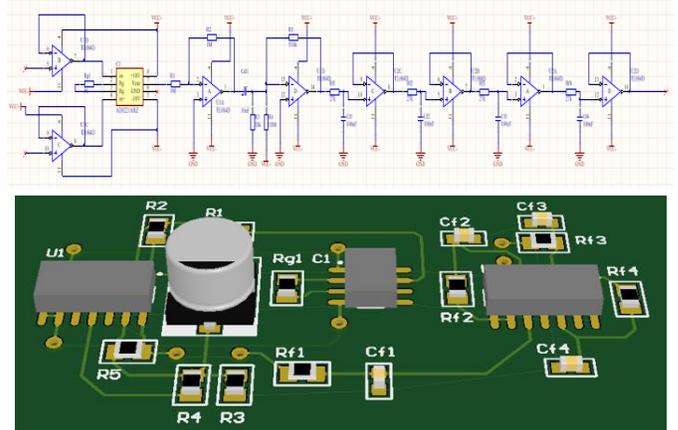


Figura 5. Diagrama electrónico del ECG.

Después de los electrodos se emplean unos amplificadores en forma de seguidor con el propósito de evitar una atenuación de las señales, después del amplificador de instrumentación se tiene el amplificador inversor; necesario debido a que al agregarle un offset a la señal ECG, con el sumador inversor la señal se invierte, por ello se requiere de un amplificador inversor con ganancia unitaria para poder obtener al final la señal original con el offset agregado sin que ésta se encuentre invertida. El filtro pasa altas es necesario para eliminar la componente en directa que puede interferir en la señal que se desea visualizar, esto, debido al movimiento de los electrodos y cables. El sumador inversor se utiliza para agregar un offset a la señal debido a que la etapa de ADC del microcontrolador sólo acepta valores positivos para realizar la conversión por ello que se utiliza un offset de 1.5 Volts para que la señal ECG quede en el rango positivo para el sistema. El filtro pasa bajas es utilizado para atenuar las señales de 60 Hz en adelante para que no interfieran con nuestra señal, la señal de 60 Hz proviene de la fuente, pero con el filtro pasa bajas se atenúa esa señal y las que están por encima de ese valor para que no interfieran con nuestras señales ECG.

Para la implementación del Termómetro se utiliza un sensor LM35DZ con una resolución de 10mV por grado centígrado (10mV/°C) y un amplificador operacional TL084 para amplificar la señal y de esta manera pueda ser

interpretada por el FPGA, como puede verse en la Figura 6, en donde se muestra el diagrama electrónico:

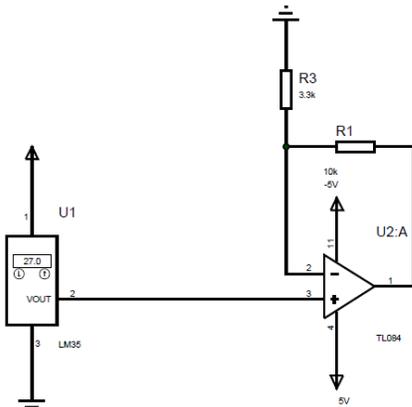


Figura 6. Diagrama eléctrico del termómetro.

Ya que el sistema está constituido por 3 diferentes tipos de señales y por lo tanto se hará uso de 3 canales analógicos, al ser el FPGA un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad se puede programar; es posible gracias a sus características y versatilidad concentrar el control de los 3 diferentes dispositivos en él ya que se necesita de varios módulos internamente: la comunicación entre el PIC y el FPGA, siguiendo con el control de flujo y a la vez la memoria FIFO, en donde se guardan todos los datos que posteriormente contribuyen para la reproducción de la señal, y por último se encuentra el protocolo encargado de comunicar la computadora con la tarjeta de adquisición.

La Tarjeta de adquisición cuenta con 4 canales analógicos, de esta manera los 3 dispositivos a implementar se ajustan perfectamente al sistema, las entradas están diseñadas con conectores tipo LEMO, ya que funcionan perfectamente para aplicaciones médicas, de pruebas y mediciones, por su capacidad de limitar muy significativamente el ruido.

5.2 Firmware: Para la implementación del Firmware se utilizó programación en código AHDL creado con la herramienta de programación Quartus II de Altera y con el uso del FPGA EP2C8Q208C7 de la familia Cyclone II, en donde se utiliza un bus PCI para comunicar la tarjeta de adquisición de datos con la PC. Como puede verse en la Figura 7, en el diagrama a bloques, para el caso del electromiógrafo se utiliza un bloque de control de flujo de datos que se encarga de la selección del canal que se desea utilizar, ocupando un rango de 1Hz a 20KHz, también para el envío de datos a la memoria FIFO en donde se guardarán para después poder reproducir la señal [2].

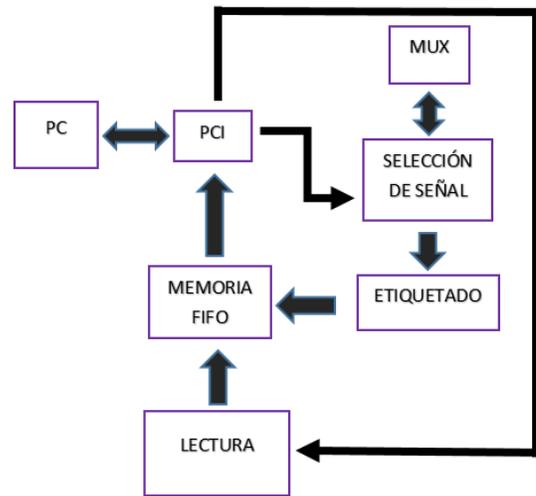


Figura 7. Diagrama general del firmware.

5.3 Software: El software fue diseñado finalmente para el sistema completo, en el cual se incluyen los tres tipos de señales que se pretenden obtener, correspondientes al EMG, ECG y termómetro.

Mediante la utilización de un botón de selección de canal el usuario elige cuál será la señal que se visualice en el software, de la misma manera se encuentra un botón de toma de muestras, con el cual comienza la visualización de dicha señal.

Cuenta con tres pestañas, en las cuales se puede visualizar las señales adquiridas, cada señal con una sección en donde se muestran sus gráficas individuales, para el caso del ECG se cuentan con las 12 gráficas correspondientes a las 12 derivaciones del corazón. Para la señal EMG sólo corresponderá con una gráfica y el termómetro de la misma manera con un indicador de temperatura.

La creación del software se hace mediante el uso del ambiente de programación en LabView y con la utilización del protocolo PCI para realizar la comunicación entre la tarjeta de adquisición y la computadora.

VI. RESULTADOS PRELIMINARES

Se realizaron pruebas experimentales para la obtención de las señales del corazón, correspondientes a las derivaciones de Einthoven DI, DII y DIII. Como puede verse en las Figuras 8 y 9, se muestran en las ilustraciones que las pruebas en el osciloscopio fueron exitosas, ya que corresponden fielmente a la estructura prevista.

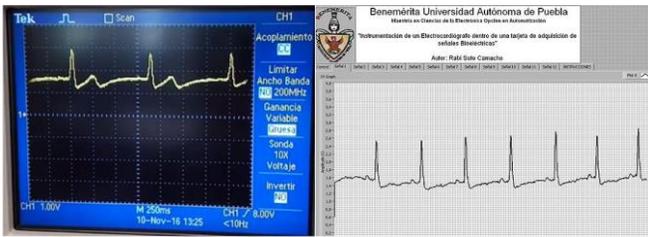


Figura 8. Comparación de derivación DII en el osciloscopio y software.

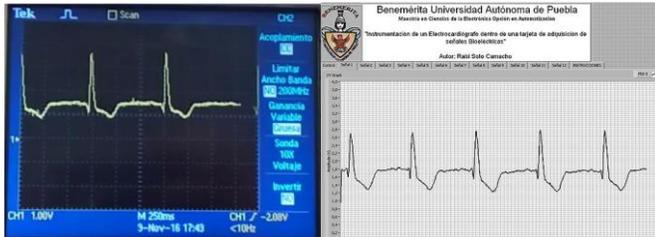


Figura 9. Comparación de derivación DIII en osciloscopio y software.

Posteriormente también se efectuaron pruebas para adquirir de manera simultánea las señales y así cumplir con los objetivos de monitorear todas las derivaciones del corazón al mismo tiempo, como puede verse en las Figuras 10 y 11, los resultados fueron satisfactorios observando las señales en el osciloscopio.

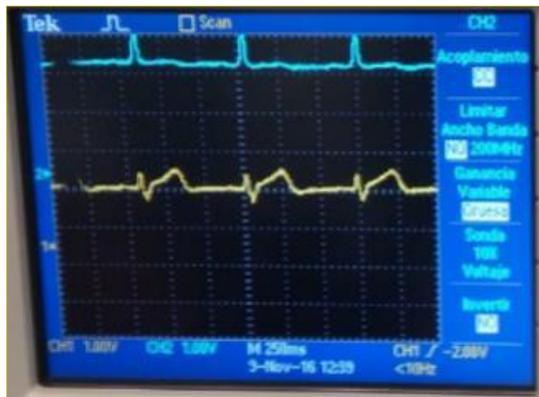


Figura 10. Derivaciones DI y DII.



Figura 11. Derivaciones DI y DIII.

De la misma manera se efectuaron pruebas experimentales para la obtención de la señal del electromiógrafo. Igualmente las pruebas se realizaron de manera satisfactoria, ya que se obtuvieron los resultados esperados. Como puede verse en la Figura 12, se muestran la señal obtenida en un osciloscopio:

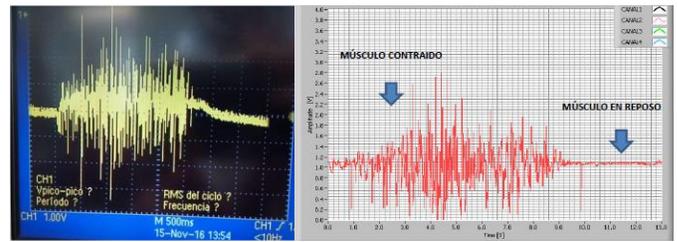


Figura 12. Señal del EMG en el osciloscopio.

Para la realización de las pruebas experimentales del termómetro se implementó el sensor de temperatura en una tablilla de experimentación. El sensor fue colocado en la axila del sujeto de prueba durante 5 minutos con el brazo presionado contra el cuerpo. Como puede verse en la Figura 13, se observó la temperatura corporal del paciente en el panel frontal de LabView.

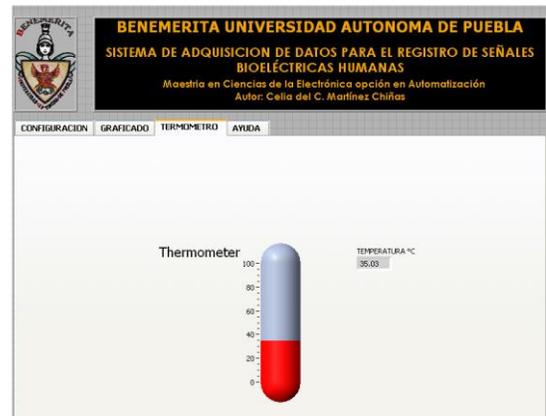


Figura 13. Temperatura del paciente.

La temperatura del sujeto de pruebas medida por el sistema de adquisición de datos diseñado fue de 35°C.

VII. CONCLUSIONES

Resulta de gran importancia la creación de la parte de pre amplificación y filtrado, ya que al ser señales muy pequeñas las que se pretenden adquirir puede haber mucha interferencia por señales no deseadas consideradas como ruido, por esto para poder hacer un correcto procesamiento de las señales es relevante poder adquirirlas de una manera adecuada que facilite su manejo. La utilización del amplificador de instrumentación resulta indispensable para la realización del sistema, ya que estos amplificadores logran trabajar con altas ganancias y son capaces de recibir y amplificar señales en órdenes de voltaje muy bajos. Con la implementación de estos dispositivos médicos en conjunto se tiene como propósito proveer una herramienta importante para el estudio de las señales bioeléctricas.

REFERENCIAS

- [1] Celia del Carmen Martínez Chiñas, Sistema de Adquisición de Datos para el Registro de Señales Bioeléctricas, tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2012.
- [2] Rabi Soto Camacho, Instrumentación de un electrocardiógrafo dentro de una tarjeta de adquisición de señales bioeléctricas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2014.
- [3] Raven Lippincott, “*Rehabilitation Medicine*”, Principles and practice. 3ª edición, pp. 1-18 EE.UU.1998.
- [4] Mauricio Duque R. Boris E. Vegga, Electrocardiografía, Editorial Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular Primera Edición 2008.
- [5] Laura Moreno Ochoa, Como Entender un Electrocardiograma, Ediciones Díaz de Santos S.A., 2000.
- [6] Luis Gila Useros, Armando Malanda Trigueros, Ignacio Rodríguez Carreño, J.Rodríguez Falces, Javier Navallas Irujo. “*Métodos de procesamiento y análisis de señales electromiográficas*”. Vol. 32, N°. Extra 3, (Ejemplar dedicado a: Actualización en Neurofisiología clínica), pp. 27-43, 2009.
- [7] Abel Andrés Morist, Pedro Luis Alberbe Zabaleta, Atlas de Electrocardiografía, Primera Edición, Editorial Osaldetza.
- [8] C. Castellano, M. A. Pérez de Juan, F. Attie, Electrocardiografía Clínica, Segunda Edición, Editorial Elsevier.
- [9] Guyton y Hall, Tratado de Fisiología Médica, 13ª edición, John E. Hall, Unidad II y III.
- [10] Stuart Ira Fox, Fisiología humana, 12ª edición, Mc Graw Hill, Capítulo 13. 2011.
- [11] Ronald J. Tocci, Neal S. Widmer, Gregory L. Moss, Sistemas Digitales Principios y Aplicaciones, 10ª ed., Pearson Prentice Hall. 2007.
- [12] Sergio Franco, Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, 3ª ed., Mc Graw Hill, 2005.
- [13] Prof. Dr. Guillermo Franco Salazar, Manual de Electrocardiografía y Electroencefalografía, Capítulo 3: “El Electrocardiograma. Componentes. Valores normales y Semiología de sus perturbaciones”, Editorial Manual Moderno. México. Año 2007.

DetECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA LÍNEA DE COSTA USANDO IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE ALTA RESOLUCIÓN

Guillermo Martínez Flores, Martín Y. Bañuelos Montero, Enrique H. Nava Sánchez

Departamento de Oceanología

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional

La Paz, Baja California Sur, México

gmflores@ieee.org, mybm.2812@gmail.com, enava@ipn.mx

Resumen—Se presenta la implementación de algoritmos para la detección automática de la línea de costa en regiones con espuma generada por la rompiente del oleaje (*whitecaps*). Para ello, se utilizaron imágenes multiespectrales SPOT-7 de 1.5 m de resolución espacial de la región de San José del Cabo, B. C. S., a las que se aplicaron índices para el enmascaramiento de agua utilizando los canales verde e infrarrojo cercano, así como de blancura, con las bandas visibles. Las imágenes resultado de los algoritmos fueron fusionadas para generar una imagen binaria tierra/mar, con la que se empleó un procedimiento de seguimiento de contorno para obtener las coordenadas de la línea de costa en un archivo tipo *shapefile*. Estos algoritmos formarán parte de un sistema para evaluar cambios en la línea de costa por procesos de erosión y depósito.

Palabras clave—Línea de costa, erosión, depósito, procesamiento de imágenes, imágenes SPOT.

I. INTRODUCCIÓN

La línea de costa es el límite entre la tierra y el mar. Sus propiedades como tipo de sedimento, orientación, longitud y ubicación geográfica son fundamentales para la navegación, el manejo de recursos costeros, el monitoreo de la erosión y la protección ambiental [1], [2]. Su evolución natural depende principalmente de la interacción entre los factores dinámicos (nivel de energía del oleaje, mareas, corrientes litorales, tormentas, fluctuaciones en el nivel del mar) y los factores de resistencia (litología, orientación y batimetría). La interacción de estos factores controla el comportamiento de la línea de costa, definiendo los patrones de cambio espacio-temporales [3].

Durante las últimas décadas, el desarrollo de las poblaciones en el litoral se ha incrementado drásticamente y los resultados conflictivos de este desarrollo son cada vez más evidentes, como la pérdida de construcciones e infraestructura cercana a la línea de costa [4].

La planificación y el ordenamiento territorial de zonas costeras se han hecho imprescindibles, sobre todo ante un inminente incremento en el nivel medio del mar, que acelera los procesos de erosión, generando, en algunas zonas, un rápido retroceso de la línea de costa [5]. Países con importantes centros urbanos expuestos a esta variación de la línea de costa y a las grandes pérdidas económicas resultantes, se han visto en la necesidad de crear organismos que evalúen y cuantifiquen las tasas de erosión costera, como la Agencia de Manejo

Federal de Emergencia (FEMA) en Estados Unidos o la Conferencia Activa de Problemas Asociados a la Línea de Costa (SCOPAC) en el Reino Unido [1].

Ante la necesidad de evaluar estos cambios en la línea de costa, este tópico se ha abordado desde la perspectiva de la percepción remota y el análisis digital de imágenes, principalmente de las captadas con la serie de satélites Landsat [6], [7], [8], [9], [10] y algunas otras utilizando imágenes de radar [11], [12] metodologías orientadas a objetos [13], modelos numéricos [14] e imágenes de alta resolución con digitalización manual de la línea de costa [15]. La segmentación del área marina puede realizarse utilizando las bandas del infrarrojo cercano y medio de imágenes satelitales como Landsat, QuickBird y SPOT para obtener de manera semiautomática la ubicación de la línea de costa en grandes extensiones del litoral [16].

En este trabajo se implementan algoritmos para detectar la línea de costa en imágenes multiespectrales de 1.5 m de resolución espacial. A esta escala, la espuma generada por la rompiente del oleaje (*whitecaps*) presenta un problema desde el punto de vista de la segmentación de la imagen. Si el viento es intenso, la rompiente se puede dar incluso lejos de la costa, pero por lo general, en la región ésta ocurre en aguas someras. En ambos casos, el efecto de este proceso en las imágenes es considerado como una interferencia o ruido que se debe eliminar.

A partir del procedimiento propuesto se automatiza la detección de la línea de costa, eliminando la interferencia antes mencionada, lo cual constituye un primer paso en el monitoreo autónomo de cambios en la zona costera del sur de la Península de Baja California. Esta evaluación se complementará con el registro de perfiles de playa, con el fin de validar la magnitud de las variaciones estacionales, anuales e interanuales. Se espera generar información sobre el comportamiento de la línea de costa e inferir la tendencia de cambio a mediano y largo plazo.

La incorporación de la informática en las técnicas cartográficas, con la percepción remota, el tratamiento digital de imágenes, la geodesia y los sistemas de información geográfica, permiten aplicar estas técnicas al estudio de las Ciencias de la Tierra (Geomática), con la finalidad de monitorear y preservar nuestro entorno [1], [17], [18].

II. DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron dos imágenes obtenidas con el satélite SPOT-7 con resolución espacial de 1.5 m y espectral de cuatro bandas, con los siguientes rangos de longitudes de onda (μm): 0.450-0.520, 0.530-0.590, 0.625-0.695 y 0.760-0.890, correspondientes al azul, verde, rojo e infrarrojo, respectivamente (<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-7>). Estas imágenes cubren la zona costera del sur de la Península de Baja California (Fig. 1), para los días 18 y 30 de noviembre de 2014.

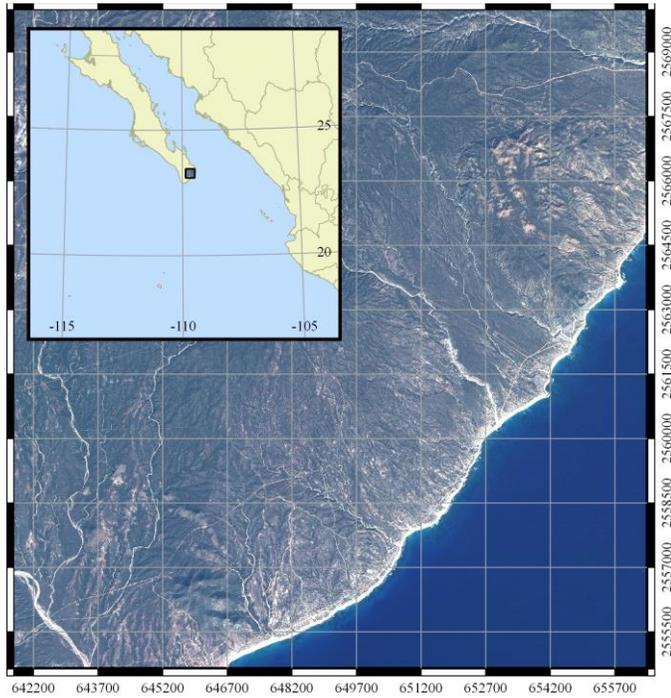


Figura 1. Ubicación del área de estudio y subregión de la imagen SPOT-7 del 30/NOV/2014 (composición con las bandas infrarroja, verde y azul, 4-1-2) utilizada en las pruebas del algoritmo de segmentación. ©Astrium Services 2015, producida por el SIAP bajo licencia SPOT IMAGE.

Para la detección de la posición de la línea de costa, se utilizó como indicador el límite de la transición mar/playa (otros límites comúnmente utilizados son el límite superior de la superficie mojada sobre la playa y la posición de la berma). Los indicadores de las características morfológicas de la playa basadas en el nivel del mar dependen del alcance del oleaje sobre la cara de la playa, el cual a su vez obedece a variables como la pendiente del perfil de playa, amplitud del perfil (distancia desde un punto de referencia fijo sobre la trasplaya), estado de la marea y ángulo e intensidad del viento y oleaje. Un aspecto importante a considerar en el análisis es el estado de la marea al momento en que las imágenes fueron captadas.

Las imágenes están proyectadas en coordenadas UTM, zona 12, datum WGS84. La información de la proyección (contenida en un archivo tipo *World file*), es utilizada para georeferenciar las imágenes. Para optimizar el procedimiento, las imágenes originales (de aproximadamente $20,000 \times 20,000$ píxeles), se subdividieron en regiones de 700×700 , seleccionando aquellas que contenían regiones marinas. Finalmente, a estas subimágenes se aplicaron los algoritmos para la detección y extracción de la línea de costa (Fig. 2).

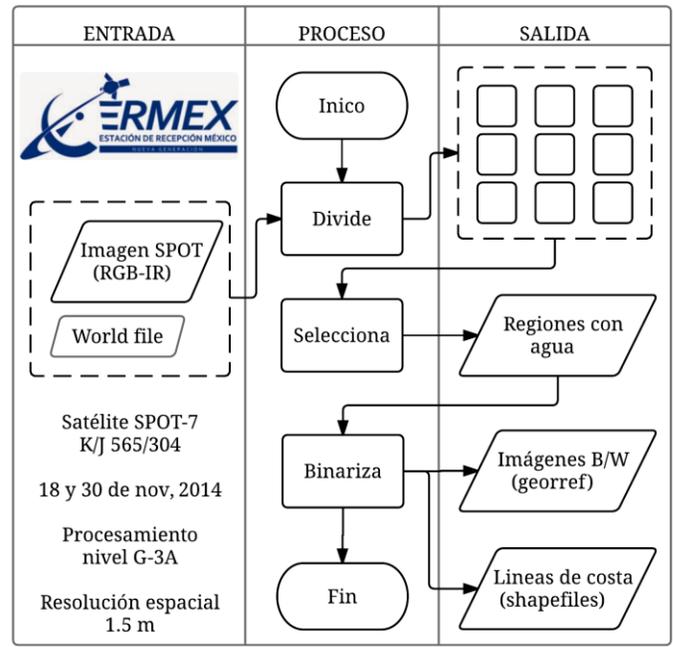


Figura 2. Diagrama general del proceso. La imagen SPOT-7 se divide seleccionando los cuadrantes con regiones marinas. Estas subimágenes se binarizan y posteriormente se extraen las coordenadas de los píxeles del área terrestre que colindan con píxeles de la región marina (en cada subimagen).

Los segmentos de línea de costa obtenidos de cada subimagen fueron almacenados en archivos vectoriales de tipo polilínea (en formato *shapefile*), para su posterior manejo en un sistema de información geográfica (QGIS).

Para seleccionar las subimágenes con regiones marinas, se utilizó la modificación del índice diferencial de agua normalizado (MNDWI, por sus siglas en inglés), propuesto por Han-qi [19]:

$$MNDWI = \frac{TM_2 - TM_5}{TM_2 + TM_5} \quad (1)$$

Donde TM_2 y TM_5 corresponden a las bandas verde e infrarrojo, respectivamente, de imágenes Landsat TM (*Thematic Mapper*). En el caso de las imágenes SPOT-7 utilizadas en este trabajo, éstas corresponden a las bandas 2 y 4. Este algoritmo genera una imagen en la que los píxeles con valor de 1 representan la cobertura de agua y los píxeles en 0 la región terrestre, por lo que también se utilizó como una primera aproximación al proceso de segmentación tierra/mar.

En la Figura 3a se muestra la banda infrarroja de una subimagen de San José del Cabo, B. C. S., del 18/NOV/2014. Se observa que el oleaje perpendicular a las barras arenosas sumergidas formadas frente de la desembocadura del arroyo el Álamo, ocasiona que la rompiente del oleaje ocurra alejado de la línea de costa (Línea 3 de la Fig. 3). En esta subimagen, los niveles digitales con valores más bajos corresponden a la región marina.

Existe una transición marcada entre los píxeles correspondientes a la playa y los del mar, sin embargo, en las zonas de rompiente de olas la transición es difusa, lo que provoca un error en la segmentación con el MNDWI.

En la Figura 3b se muestra la segmentación utilizando este índice, se aprecia el efecto de la interferencia de la rompiente del oleaje en la detección de la línea de costa. Este efecto del oleaje también impide una detección adecuada en la región norte de la subimagen, aunque no de forma tan evidente, resultando en una sobreestimación del área de la playa.

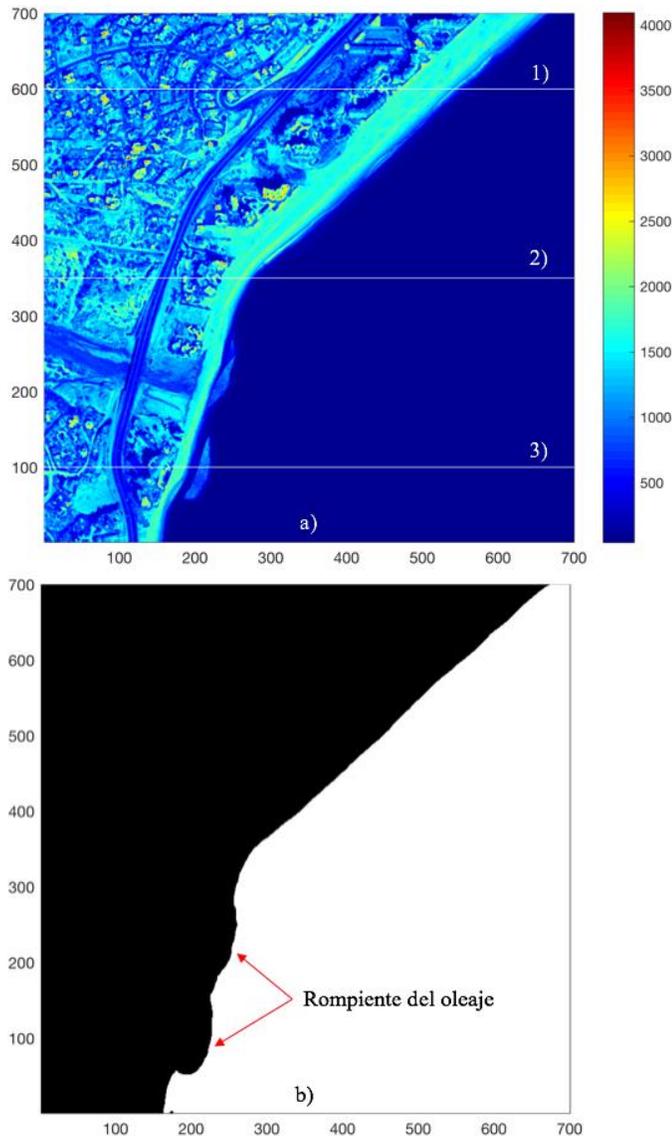


Figura 3. a) Banda del infrarrojo cercano de la imagen SPOT-7 del 18/NOV/2014. Generado con datos provenientes de la ERMEXNG-0169-2017. Los perfiles espectrales de las líneas 1, 2 y 3 se muestran en la Figura 4. b) Segmentación de la imagen con el algoritmo MNDWI e interferencia de la rompiente del oleaje en la detección de la línea de costa.

En la Figura 4 se muestran los perfiles espectrales de las cuatro bandas de la subimagen SPOT-7 (Fig. 3a), así como el perfil del MNDWI (señalado como IW). Este índice toma un valor binario, 1 para los píxeles correspondientes al área marina y 0 para los de la región continental). Para presentarlo en cada gráfica, este índice se ha multiplicado por el máximo nivel digital de los perfiles en las cuatro bandas. En los perfiles de la Figura 3c se observa con más detalle la interferencia que provoca la rompiente del oleaje en la detección de la línea de costa.

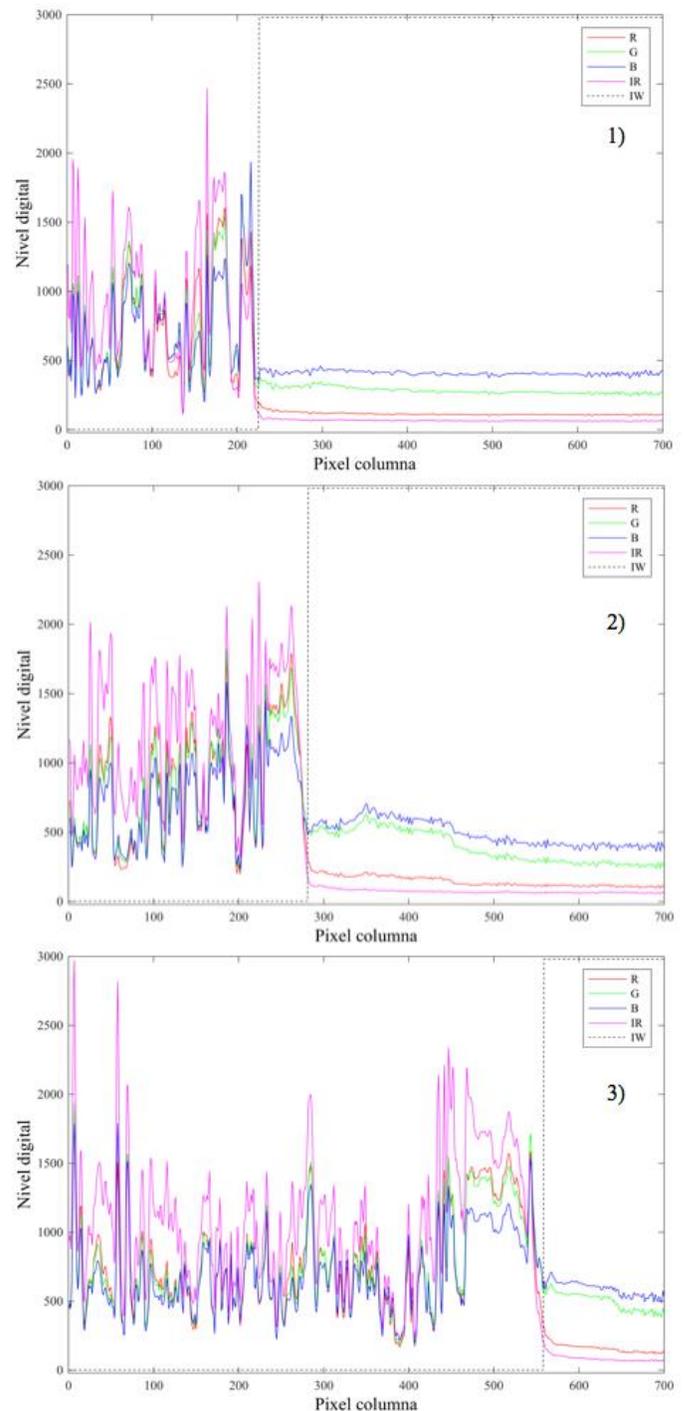


Figura 4. Perfiles espectrales de la subimagen de la Fig. 3a. Se muestra la variación los niveles digitales de los canales rojo, verde, azul e infrarrojo, así como el MNDWI calculado según la Ec. 1.

Para abordar el problema que provoca la espuma generada por la rompiente de las olas en la segmentación, se implementaron dos índices. Éstos han sido ampliamente utilizados en la industria de los bioprocesos para evaluar la calidad de los alimentos a partir de su respuesta espectral [20], [21].

Estos índices revelan las regiones con tendencia al color amarillo (YI) y blanco (WI) en una imagen digital, utilizando

el esquema de color CIE Lab (*International Commission on Illumination*):

$$YI = 142.86 \ b/L \quad (2)$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (3)$$

Donde L representa la luminosidad en el rango de 0 (nivel más oscuro) a 100 (mayor luminosidad), a y b son canales de color que representarán valores de gris neutro cuando $a = b = 0$. Los colores complementarios rojo / verde están representados a lo largo del eje a, con el verde con valores negativos y el rojo con positivos. Los colores complementarios amarillo / azul se representan a lo largo del eje b, con el azul en valores negativos y el amarillo en positivos (Fig. 5).

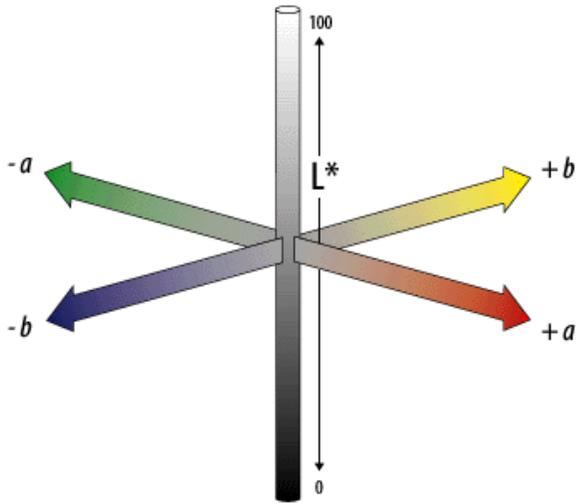


Figura 5. Espacio de color CIE Lab en un sistema de coordenadas 3D (modificado de http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/cielab.html).

Estos índices (Ec. 2 y Ec. 3) fueron utilizados con las bandas de la región visible de las imágenes SPOT-7 para identificar y segmentar las zonas de rompiente del oleaje, con la finalidad de fusionarlas con las regiones previamente identificadas como marinas según el algoritmo MNDWI.

III. RESULTADOS

La Figura 6 muestra el resultado de la detección de la línea de costa (imagen del 30/NOV/2014), combinando los algoritmos de segmentación MNDWI, YI y WI. En la parte superior se representan como imágenes binarias dos subregiones de la zona de estudio con la transición tierra (blanco) / mar (azul). La extracción de las coordenadas (UTM) de píxeles-tierra que colindan con píxeles-mar, fueron etiquetados como líneas de costa (polilíneas verdes). Los píxeles-tierra que colindan con los bordes de la subregión, se etiquetaron como el complemento de la región terrestre (polilíneas rojas).

Las coordenadas generadas de esta forma fueron almacenadas (en formato *shapefile*) con la finalidad de realizar futuras evaluaciones de cambio. Se incorporaron a estos registros los datos básicos de cada subimagen (fecha, hora, cobertura), así como de la propia línea de costa (identificación, número de vértices y ubicación de cada vértice).

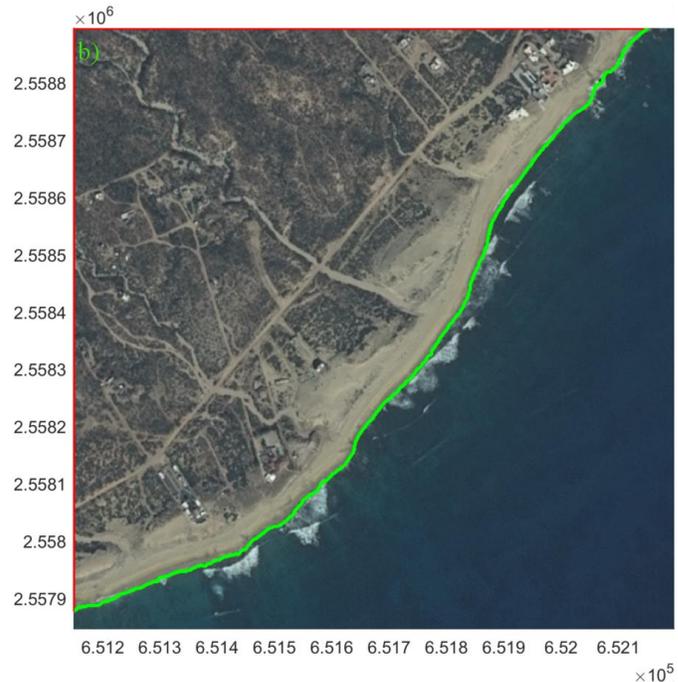
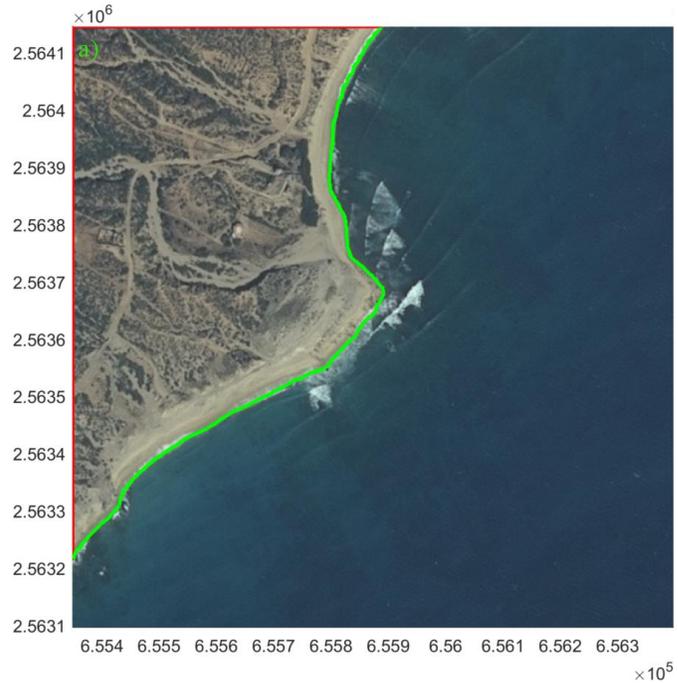
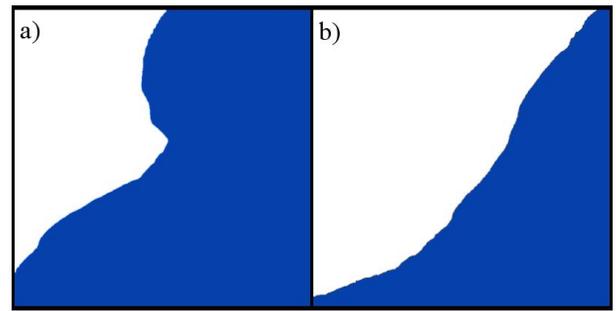


Figura 6. Imágenes binarias resultado de la fusión de los índices MNDWI, YI y WI. Líneas de costa obtenidas a partir de las dos subimágenes. Generado con datos provenientes de la ERMEXNG-0169-2017.

La Tabla I muestra un ejemplo de tres secciones de línea de costa de 740, 732 y 580 vértices respectivamente, y a continuación los primeros 5 registros de estos vértices.

TABLA I. CONTENIDO DE LOS ARCHIVOS SHAPEFILE. SE MUESTRAN LOS PRIMEROS CINCO REGISTROS DE LAS PRIMERAS TRES POLILÍNEAS.

Geometría: Line, Id: 001					
Vértices: 740					
Cobertura: [655350.0, 655891.5, 2563216.5, 2564143.5]					
Id	Vert	Fecha	Hora	Este	Norte
001	001	2014/11/30	17:38:40	655350.0	2563216.5
001	002	2014/11/30	17:38:40	655351.5	2563216.5
001	003	2014/11/30	17:38:40	655351.5	2563218.0
001	004	2014/11/30	17:38:40	655351.5	2563219.5
001	005	2014/11/30	17:38:40	655351.5	2563221.0

Geometría: Line, Id: 002					
Vértices: 732					
Cobertura: [654658.5, 655201.5, 2562048.0, 2563093.5]					
Id	Vert	Fecha	Hora	Este	Norte
002	001	2014/11/30	17:38:40	654658.5	2562048.0
002	002	2014/11/30	17:38:40	654658.5	2562049.5
002	003	2014/11/30	17:38:40	654658.5	2562051.0
002	004	2014/11/30	17:38:40	654658.5	2562052.5
002	005	2014/11/30	17:38:40	654658.5	2562054.0

Geometría: Line, Id: 003					
Vértices: 580					
Cobertura: [653250.0, 654091.5, 2560509.0, 2560993.5]					
Id	Vert	Fecha	Hora	Este	Norte
003	001	2014/11/30	17:38:40	653250.0	2560509.0
003	002	2014/11/30	17:38:40	653251.5	2560509.0
003	003	2014/11/30	17:38:40	653253.0	2560510.5
003	004	2014/11/30	17:38:40	653254.5	2560510.5
003	005	2014/11/30	17:38:40	653256.0	2560512.0

Con la implementación de estos procedimientos en un sistema de monitoreo, se podrá llevar a cabo la comparación de líneas de costa de diferentes épocas para evaluar de manera automática las áreas de los tramos erosivos y de depósito, así como la conversión del espacio erosionado o acumulado en polígonos para calcular las tasas de cambio en secciones transversales a la orientación de la costa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado como parte del proyecto SIP-20151440, "Impacto antropogénico como factor principal que induce la erosión severa en Las Playitas, San José del Cabo, B. C. S.". Las imágenes del satélite SPOT fueron captadas por la estación ERMEXNG y proporcionadas por el SIAP/SAGARPA. Los autores agradecen también al CICIMAR-IPN, por las facilidades prestadas para realizar este trabajo y en especial al MC. Jesús Antonio Castro del Instituto Tecnológico de La Paz, por su contribución para mejorarlo.

REFERENCIAS

[1] Patiño-León, J. "La importancia del monitoreo de la variación de la línea de costa", 2002, Primer seminario virtual de las ciencias del Mar, Oannes. Perú.

[2] Zhang, T. Yang, X., Shanshan, H., Fenzhen S. "Extraction of Coastline in Aquaculture Coast from Multispectral Remote Sensing Images: Object-Based Region Growing Integrating Edge Detection", 2013, *Remote Sensing*, 5, 4470-4487 pp.

[3] García-Rubio, G. Huntley, D. Russell, P. "Evaluating shoreline identification using optical satellite images", 2015, *Marine Geology*, 359, 96-105 pp.

[4] Aydin, M. Uysal, M. "Risk assessment of coastal erosion of Karasu coast in Black Sea", 2014, *Journal of Coastal Conservation*, 18(6), 673-682 pp.

[5] Pinto, P. "Estudio Geomorfológico en los Entornos Costeros con Mareas mediante la Extracción Automática de Líneas de Costa de Imágenes de Satélite de Resolución Media" (Tesis de Licenciatura). Universitat Politècnica de Valencia, 2016, Valencia, España.

[6] Ryu, J.-H., Won, J.-S., & Min, K. D. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomsu Bay, Korea. 2002, *Remote Sensing of Environment*, 83(3), 442-456. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00059-7](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00059-7).

[7] Maiti, S., & Bhattacharya, A. K. "Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach", 2009, *Marine Geology*, 257(1), 11-23. <http://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.006>.

[8] Kuleli, T., Guneroglu, A., Karsli, F., & Dihkan, M. "Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey", 2011, *Ocean Engineering*, 38(10), 1141-1149.

[9] Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. "Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision". 2012, *Remote Sensing of Environment*, 123, 1-11. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024>.

[10] Zhang, X.; Zhang, X.; Lan, Q.Q.; Ali Baig, M.H. "Automated detection of coastline using Landsat TM based on water index and edge detection methods". 2012, *Earth Obs. Remote Sens. Appl. (EORSA)*, doi:10.1109/EORSA.2012.6261155.

[11] Al Fugura, A., Billa, L., & Pradhan, B. "Semi-automated procedures for shoreline extraction using single RADARSAT-1 SAR image", 2011, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95(4), 395-400. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.10.009>.

[12] Tello-Alonso, M. López-Martínez, C., Marrorqui, J., Salembier, P. "Edge enhancement algorithm based on the wavelet transform for automatic Edge detection in SAR images", 2011, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 49(1), 222-235 pp.

[13] Rasuly, A., Naghdifar, R., Rasoli, M. "Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques", 2010, *Procedia Environmental Sciences*, 2, 416-426. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.046>.

[14] Karunarathna, H., & Reeve, D. E. "A hybrid approach to model shoreline change at multiple timescales", 2013, *Continental Shelf Research*, 66, 29-35. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2013.06.019>.

[15] Ford, M. "Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands", 2013, *Remote Sensing of Environment*, 135, 130-140. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.027>.

[16] Almonacid, J. "Obtención de línea de costa con procesión sub-pixel a partir de imágenes Landsat (TM, ETM+ y OLI)", 2014, Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

[17] Zújar-Ojeda J. "Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta", 2000, *Boletín de la A.G.E.* 30:103-108.

[18] Rush R. & Ollerhead, J. "An Assessment of ArcView 3.1 and Image Analysis 1.0 as Tools for Measuring Geomorphic Change in Coastal Saltmarshes", 2000, Department of Geography, University of Guelph, Ontario, Canada.

[19] Han-qiu, X. "A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)", 2005, *Journal of Remote Sensing*, 9(5), 589-595. Retrieved from http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-YGXB200505011.htm.

[20] Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. "Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review", 2013, *Food and Bioprocess Technology*, 6, 36-60. <http://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>.

[21] Rhim, J.W., Y. Wu, C.L. Weller and M. Schnepf, "Physical characteristics of a composite film of soy protein isolate and propyleneglycol alginate", 1999, *J. Food Sci. Eng. Process*, 64: 149-152.

Implementación de Sistema Difuso Mamdani de Salidas Triangulares en Arduino

Cruz Camacho Luis Antonio

Departamento de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato, México
luis_cr_15@hotmail.com

Ruiz Huitrón Francisco Daniel

Departamento de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato, México
paco_you_@hotmail.com

Barranco Gutiérrez Alejandro Israel

Departamento de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato, México
israel.barranco@itcelaya.edu.mx

Miranda Cervantes Ricardo

Departamento de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato, México
ricardo_mir.ce@hotmail.com

Tellez Pérez José Antonio

Departamento de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato, México
s_ml@live.com.mx

Resumen— En este trabajo se presenta la implementación de un sistema difuso tipo Mamdani en una de las tarjetas más usadas en este momento: Arduino uno. La aportación de este trabajo consiste en la condensación del cálculo del centroide en la salida del sistema; de dos integrales típicas para el cálculo del centroide, a dos simples divisiones con seis multiplicaciones. Se compararon los resultados con los obtenidos usando FIS Editor de Matlab y se obtuvieron mejores resultados debido a que la propuesta de este trabajo arroja resultados con centésimas mientras la Fuzzy Toolbox de Matlab solamente décimas.

Palabras clave—Arduino; Mamdani; centroide;

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad una gran cantidad de empresas hacen uso de sistemas difusos para el control de sus procesos como son: refrigeradores, hornos de microondas, así como, otros aparatos electrodomésticos. La plataforma de Arduino es de código abierto y hardware libre por lo cual muchas personas que no dominan la programación de microcontroladores logran diseñar e implementar fácilmente aplicaciones con esta tecnología. También estas tarjetas son utilizadas en todo el mundo gracias a su portabilidad, bajo costo y funcionalidad. En este trabajo se combinan estas ventajas de los sistemas difusos y arduino. Además, se presenta una fórmula condensada con pocas operaciones matemáticas para acelerar el cálculo del centroide, por lo que el tiempo utilizado en este proceso es pequeño. Este reduce la utilización de dos integrales numéricas [1], a simples sumas, multiplicaciones y divisiones.

A. Sistemas Difusos

Los sistemas difusos, son sistemas que toman decisiones basados en lógica difusa, es decir, toman decisiones de forma similar a una persona. Por otra parte, la lógica Booleana se basa en la teoría clásica de conjuntos en donde sólo se tienen las posibilidades de pertenecer o no a un conjunto. La lógica difusa modela ambigüedades en la pertenencia a un conjunto, esto es, cuantifica la pertenencia de un elemento a un conjunto determinado, tales elementos son representados mediante variables lingüísticas.

El origen de la Lógica Difusa data de mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley (California) cuando el ingeniero Lotfy A. Zadeh (1965) publicó el artículo titulado “Fuzzy sets el Principio de Incompatibilidad” [2], este afirma que: “Conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual, la precisión y el significado son características excluyentes”. En este paradigma reside la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas [3]. Este modelo permite representar el conocimiento de la manera en que los humanos lo hacemos, del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos [4].

Una variable lingüística adopta valores con palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno; estas

palabras se pueden representar mediante conjuntos difusos. Una variable numérica toma valores numéricos, por ejemplo: edad = 65, mientras que una variable lingüística toma valores lingüísticos: edad es “viejo”. Todos los valores lingüísticos forman un conjunto de términos o etiquetas [5].

En la Figura 1, podemos observar las cuatro partes que componen un sistema difuso, las cuales son: fusificación, base de conocimiento, mecanismos de inferencia y defusificación.

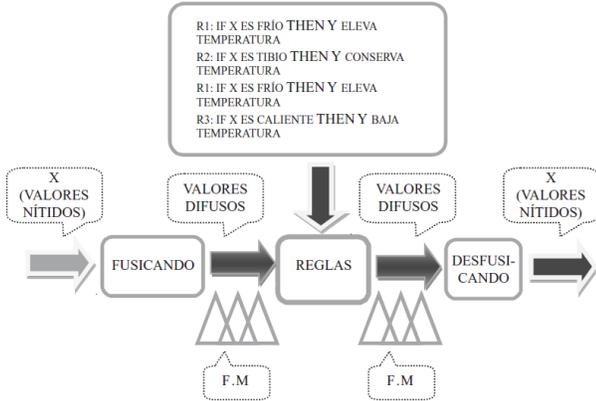


Fig. 1. Bloques Principales de un Sistema Difuso [3].

La entrada de un sistema de lógica difusa tipo Mamdani es un valor numérico. El fusificador lo convierte a uno o varios valores de pertenencia asociados a etiquetas, mismos que el mecanismo de inferencia puede procesar. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia que entran en los diferentes conjuntos difusos del universo del discurso de las variables de entrada al sistema.

En la figura 2 se muestra una entrada con tres funciones de membresía (“por”, “good” y “excellent”) del fusificador, estas etiquetan un valor de entrada.

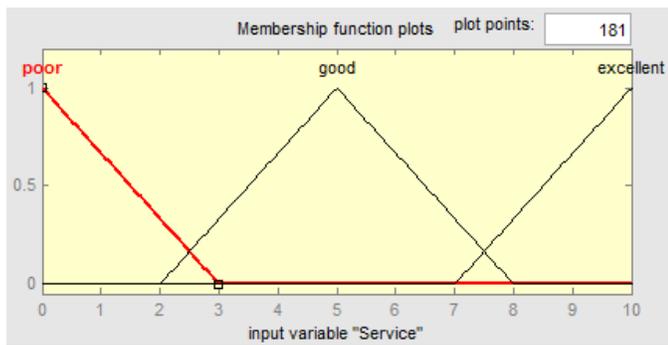


Fig. 2. Entrada del Fusificador con Tres Funciones de Membresía.

El mecanismo de inferencia toma los niveles de pertenencia provenientes del fusificador y los procesa con operadores de lógica difusa (mínimo para el operador AND y máximo para el operador OR) de acuerdo a la base del conocimiento para finalmente generar las salidas del sistema difuso calculando el centroide de la figura resultante. En la figura 3 se muestra el

mecanismo de inferencia implementado en la interfaz de Matlab Fuzzy Toolbox [6].

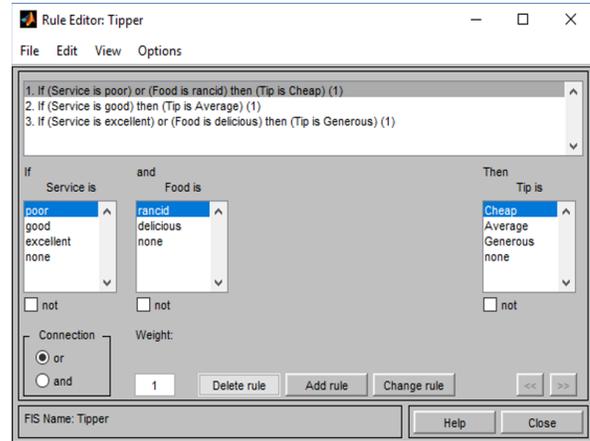


Fig. 3. Mecanismo de Inferencia en el Fuzzy Toolbox de Matlab.

Los sistemas difusos tipo Mamdani calculan la salida en base al valor del centroide de la figura formada por las funciones de membresía de la salida y los niveles de pertenencia inferenciados por las reglas de la base del conocimiento. En la figura 4 se aprecia que el valor de salida es diecinueve punto tres debido a la coordenada x del centroide de la figura inferior derecha.

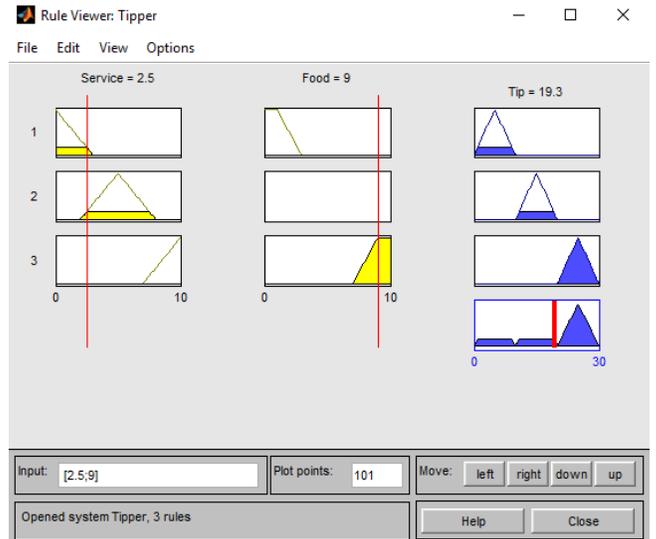


Fig. 4. Salida del Sistema Difuso en Función de Valores de Entrada.

II. MÉTODO

A. Materiales

Tarjeta Arduino.- Es un microcontrolador capaz de interpretar el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede interactuar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros actuadores.

Cable USB tipo B.- Es el encargado de llevar a cabo la comunicación entre la tarjeta de Arduino y el ordenador.

B. Herramientas de Desarrollo

Software Arduino.- Es una plataforma de programación electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución con un ordenador (por ejemplo, flash, Processing, MaxMCP, entre otros más).

Matlab.- Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Matlab está optimizado para resolver problemas científicos y de ingeniería. El lenguaje de Matlab, basado en matrices es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales.

C. Técnica.

El sistema difuso con el que se ejemplifica la implementación en Arduino fue tomado de Matlab Fuzzy Toolbox el cual modela el cálculo mental de la salida que corresponde a la propina “Tip”, con un rango de cero a treinta por ciento. Este tiene dos entradas llamadas: “Service” y “Food”, las cuales tienen un rango entre cero y diez cada una.

Las funciones de pertenencia de la entrada “Service” se muestran en la figura 2 y se denota como:

$$Poor = \begin{cases} 0, & t > 3 \text{ y } t < 0 \\ \frac{3-t}{3}, & 3 \geq t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$Good = \begin{cases} 0, & 2 \geq t \geq 8 \\ \frac{t-2}{3}, & 2 < t < 5 \\ \frac{8-t}{3}, & 5 \leq t < 8 \end{cases} \quad (2)$$

$$Excellent = \begin{cases} 0, & 7 \geq t > 10 \\ \frac{t-7}{3}, & 7 < t \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

Y las funciones de pertenencia de la entrada “Food” se describen en las siguientes ecuaciones:

$$Rancid = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 7 \\ \frac{3-t}{2}, & 1 < t \leq 3 \end{cases} \quad (4)$$

$$Delicious = \begin{cases} \frac{t-7}{2}, & 7 < x \leq 9 \\ 1, & 10 \geq t > 9 \end{cases} \quad (5)$$

Respecto a la etapa de inferencia, utilizando la base del conocimiento el sistema difuso en implementación se rige bajo las reglas mostradas en la Tabla I. En esta tabla la fila uno muestra los valores de entrada asociados a la salida “Cheap”, mientras las filas dos y tres muestran las salidas etiquetadas como “Average” y “Generous” correspondientemente.

TABLA I. REGLAS DE INFERENCIA

Fila	“Service”	“Food”	Operación	“Tip”
1	“Poor”	“Rancid”	Or	“Cheap”
2	“Good”		Equal	“Average”
3	“Excellent”	“Delicious”	Or	“Generous”

Para calcular los centroides se necesitan las áreas activadas por la base del conocimiento. En el caso de estudio las funciones de pertenencia de la salida son triangulares y son descritas en las ecuaciones 6, 7 y 8

$$Cheap = \begin{cases} \frac{t-5}{5}, & 5 \geq t \geq 0 \\ \frac{10-t}{5}, & 10 \geq t \geq 5 \end{cases} \quad (6)$$

$$Average = \begin{cases} \frac{t-15}{5}, & 15 \geq t > 10 \\ \frac{30-t}{5}, & 30 \geq t \geq 15 \end{cases} \quad (7)$$

$$Generous = \begin{cases} \frac{t-25}{5}, & 25 \geq t > 20 \\ \frac{30-t}{5}, & 30 \geq t \geq 25 \end{cases} \quad (8)$$

De acuerdo a los sistemas difusos tipo Mamdani y el cálculo de centroides mostrados en la figura 4, requiere de las áreas seleccionadas en cada etiqueta como lo indica [7]. Para calcular el área utilizada de cada triángulo podemos utilizar el siguiente procedimiento:

Partiendo de un triángulo como el de la Figura 5, el cual tiene una base de longitud B-A y altura C, podemos considerar el punto D como la altura límite hasta donde se desea conocer el área. De esta forma podemos partir el área total en 4 áreas menores que corresponden a dos triángulos de base E-A y altura D y dos rectángulos de base ((B-A)/2+A)-E y altura D. El área total se calcula con la ecuación 9 [4].

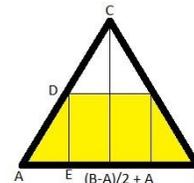


Figura 5. Triángulo Isósceles Base Para Definir el Cálculo del Área Sombreada.

$$A_T = 2 \left[\left(\frac{B-A}{2} + A - E \right) D + \frac{(E-A)D}{2} \right] \quad (9)$$

De los datos necesarios para aplicar la ecuación 9, desconocemos el valor de la variable E por lo que es necesario utilizar otra ecuación que nos ayude a despejar dicha variable. Para esto igualamos la pendiente de la recta \overline{AC} con la pendiente de la recta \overline{AD} (ecuación 10), de esta igualdad podemos despejar la variable E para obtener la ecuación 11 la cual podemos sustituir en la ecuación 9 y simplificando obtenemos la ecuación 12, la cual es una forma general para obtener el área que deseamos en un triángulo isósceles.

$$\frac{C}{\frac{B-A}{2} + A - A} = \frac{D}{E - A} \quad (10)$$

$$E = \frac{\left(\frac{B-A}{2}\right)D}{C} + A \quad (11)$$

$$A_T = 2 \left[\left(\frac{B-A}{2} - \frac{\frac{B-A}{2}D}{C} \right) D + \frac{\left(\frac{B-A}{2C}D\right)D}{2} \right] \quad (12)$$

Usando la ecuación 12 podemos sustituir los valores conocidos en este ejemplo para poder simplificar la ecuación e implementarla en la tarjeta Arduino Uno. Dichas relaciones son: la altura C que siempre es unitaria y la relación $(B-A)/2 = 5$, esta relación se mantiene constante en las tres funciones de este ejemplo por lo que se puede generalizar. Haciendo estas sustituciones obtenemos la ecuación 13 que es una forma reducida de la ecuación 12 que funciona particularmente para este ejemplo, considerando la variable D como el grado de pertenencia en cada función de salida.

$$A_T = \left[(5 - 5D)D + \frac{5D^2}{2} \right] \quad (13)$$

En este ejemplo la defusificación se hace por medio del cálculo del centroide de las funciones de las salidas “Tip Poor”, “Tip Average” y “Tip Generous” mostrada en la ecuación 14, en donde la variable P representa la propina y las variables A_{TP} , A_{TA} y A_{TG} representan las áreas de las funciones de pertenencia de la propina indicadas contenidas desde cero hasta el grado de pertenencia asociadas.

$$P = \frac{5A_{TP} + 15A_{TA} + 25A_{TG}}{A_{TP} + A_{TA} + A_{TG}} \quad (14)$$

Como se puede observar, para calcular el centroide es necesario calcular el área de cada función de las salidas, esto normalmente se hace por medio de promedios ponderados; por lo que en este caso las áreas son las ponderaciones [8]. Lo que facilita su implementación en Arduino.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultados se obtuvo una mayor precisión de datos arrojados de Arduino, ya que estos están en el rango de las centésimas, a diferencia de Toolbox de Matlab que sus resultados están en décimas. Otras ventajas de utilizar Arduino es su portabilidad, accesibilidad y no requiere licencias para su uso, en [9] el lector puede aprender más sobre mejores implementaciones de operaciones en Arduino.

En la siguiente gráfica se observa la función implementada del sistema difuso en Matlab (fig. 6)

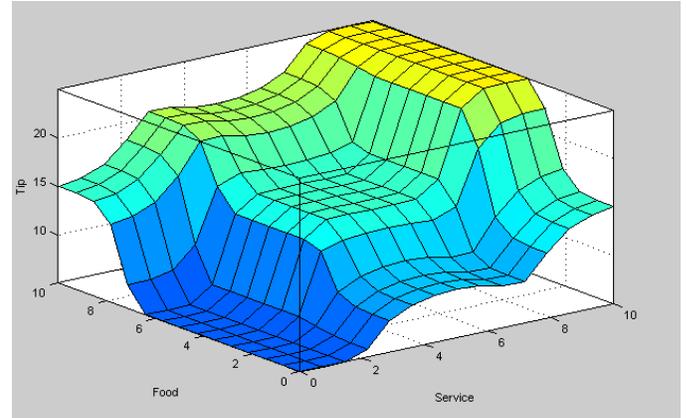


Fig. 6. Gráfica de Salida del Sistema Difuso de Prueba en Matlab.

Por otra parte, el sistema Arduino muestra un comportamiento igual al observado en la figura 7.

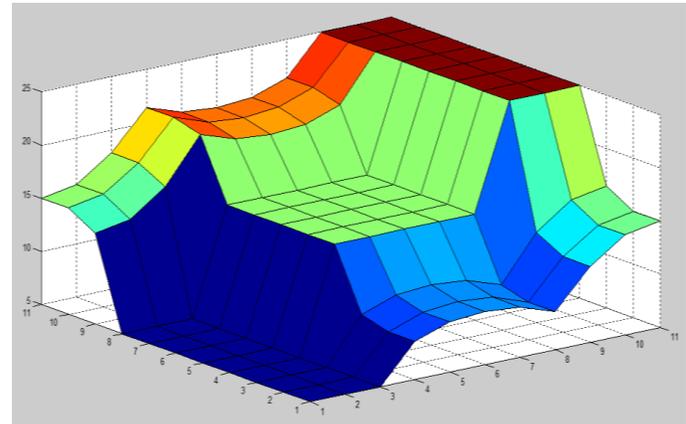


Fig. 6. Gráfica de Salida del Sistema Difuso de Prueba en Arduino.

IV. CONCLUSIONES

El presente sistema Mamdani implementado en Arduino presenta ventajas en cuestión de portabilidad, consumo de energía y precisión. La aportación de este trabajo analíticamente hablando, es la compactación del cálculo del centroide de la salida debido a que se utilizan solamente dos divisiones y seis multiplicaciones. Se espera que este trabajo sea de utilidad para la comunidad de lógica difusa, pues será fácil implementar en aparatos que lo requieran.

En los trabajos a futuro se sugiere, aumentar la velocidad del procesamiento, reducir los tiempos de comunicación y crear una interfaz más amigable con el usuario.

REFERENCIAS

- [1] E. W. Cheney, D. R. Kincaid, A. E. G. Hernández, and J. J. C. Rosas, "Métodos numéricos y computación". 6ta ed. Cengage Learning Editores, 2011.
- [2] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [3] G. L. Marco, "Implementación de un sistema difuso en VHDL". Annual Meeting on Innovation, Technology and Engineering, 2016.
- [4] P. Ponce, "Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería", Alfaomega, 2010, P. 5, 6.
- [5] F. M. McNeill, "Fuzzy Logic a practical approach", AP Profesional, 2000.
- [6] J.-S. Roger Jang y N. Gulley. "Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB". Versión 2, 1999.
- [7] A. Cárdenas, "Implementacion de un sistemas difuso en Arduino".
- [8] Li-xin Wang, "A Course in Fuzzy System and Control", Prentice Hall PTR, 1997.
- [9] "Overview Arduino Uno", Arduino, consultada por Internet el 19 de febrero de 2017. Dirección de internet: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.

Una implementación eficiente de algoritmo memético para TSP

Joel Artemio Morales Viscaya
 Instituto Tecnológico de La Paz
 División de estudios de posgrado e investigación
 La Paz, Baja California Sur, México
 iscviscaya@gmail.com

Marco Antonio Castro Liera
 Instituto Tecnológico de La Paz
 División de estudios de posgrado e investigación
 La Paz, Baja California Sur, México
 mcastro@itlp.edu.mx

Abstract - Se presenta una implementación eficiente del algoritmo memético que se describe en una aplicación anterior para resolver el problema del agente viajero en clusters de computadoras. El algoritmo utiliza una estrategia de búsqueda local que mezcla características de 3-OPT y Lin-Kernighan. La implementación propuesta lleva a cabo la estrategia de búsqueda local directamente sobre las permutaciones que representan los tours sin necesidad de traducirlas a conjuntos de aristas. Los resultados experimentales muestran un rendimiento superior al de la implementación anterior al aplicarlo en diferentes instancias obtenidas de la TSPLIB de entre 150 y 1002 ciudades.

Palabras clave- TSP(Traveling Salesman Problem), AG (Algoritmo Genético), arquitectura paralela, heurística, optimización, búsqueda local, computación evolutiva.

I. INTRODUCCIÓN

El problema del agente viajero simétrico (TSP por sus siglas en inglés, *Traveling Salesman Problem*) es un problema clásico y ampliamente estudiado de optimización combinatoria que consiste en encontrar, dado un conjunto de ciudades, la ruta más corta que permita a un agente viajero visitar todas ellas y regresar a la ciudad en la que inició el recorrido, en donde el costo del viaje entre las ciudades debe ser simétrica; es decir, el costo de ir de la ciudad A a la ciudad B debe ser el mismo que entre B y A, para cualquier par de ciudades en el conjunto [1].

TSP pertenece a la clase de problemas de optimización NP-duro (es un problema duro dentro de los no polinomiales) de acuerdo a [2] y es importante, pues constituye un componente central de un número considerable de problemas del mundo real, sus aplicaciones incluyen pero no están restringidas a la logística, la fabricación de circuitos integrados y tableros de circuitos perforados, medición por rayos x, data clustering, mira de telescopios, análisis de secuencias genéticas, guiado de láser para cristal, conexión de antenas, construcción, programación de tareas, la atención a llamadas de emergencia, servicio postal, entre otras.

TSP es posiblemente el problema más famoso y extensamente estudiado en el campo de la optimización combinatoria

[3]. En años recientes, muchas heurísticas o meta-heurísticas han sido aplicadas para resolver problemas NP-duros (ya que por definición no existen algoritmos que los resuelvan en tiempos razonables), como por ejemplo el recocido simulado [4], la Búsqueda Tabú (TS) [5], Algoritmos Genéticos (AG) [6], Redes Neuronales (RN) [7], Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) [8], Optimización por enjambre de partículas (PSO) [9], entre otras.

Un enfoque heurístico para los problemas de optimización combinatoria es la mejora iterativa de las soluciones, mediante una transformación que tome soluciones del problema y las lleve a nuevas soluciones con mejor aptitud, hasta que ya no sea posible encontrar dichas transformaciones, los algoritmos que llevan a cabo éstas transformaciones se conocen como de búsqueda local.

La combinación de algoritmos evolutivos poblacionales, cómo los mencionados anteriormente, con heurísticas de búsqueda local forman lo que se conoce como un algoritmo memético (MA), debido a la mezcla de las propiedades incluyentes de éstos y la exploración a detalle de zonas prometedoras de la búsqueda local, los MA han mostrado ser más eficientes y eficaces en la resolución de problemas combinatorios [2].

II. CLÚSTER DE COMPUTADORAS

Una alternativa para disminuir el tiempo de ejecución en la resolución de problemas complejos de ingeniería es el cómputo paralelo, que consiste en la ejecución de múltiples instrucciones de un programa simultáneamente en varias unidades de procesamiento [10], una forma de implementar el cómputo paralelo son los clúster de computadoras, que consisten en un conjunto de equipos de cómputo interconectados que colaborativamente intercambian y procesan información [11]. Sólo los procesadores locales tienen acceso directamente a la memoria local en cada nodo, por tanto, si un nodo requiere acceder a la memoria de otro nodo, se hace con un modelo de comunicación de paso de mensajes. Dentro del conjunto de nodos a uno de ellos se le asigna la tarea de iniciar, distribuir tareas y recopilar resultados de ejecución de la aplicación paralela, este nodo se conoce como maestro [11], como se muestra en la Fig. 1

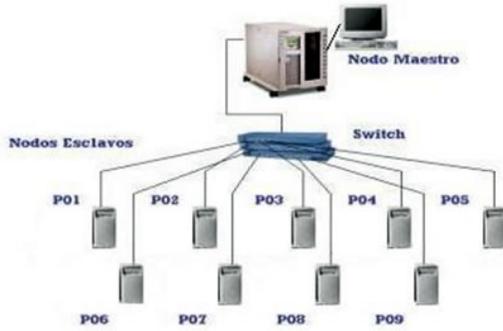


Figura 1. Esquema de un clúster de computadoras

III. EL ALGORITMO MEMÉTICO

En [1] se propone una estrategia en tres fases, una de inicialización de procesos en el clúster, la optimización que es un algoritmo memético y una etapa de consolidación de los resultados en que cada proceso envía hacia un proceso maestro, la fase fundamental o el núcleo de dicha estrategia es el algoritmo memético basado en un AG.

Un AG consta de tres operaciones básicas que se conocen como operadores genéticos: selección, cruza y mutación. Selección es el proceso por el cual se elige que individuos o soluciones permanezcan en la generación siguiente, decidimos utilizar elitismo, que consiste en simplemente conservar a los mejores individuos de la población.

Cruza es como se le conoce al proceso que genera nuevas soluciones utilizando los individuos que superaron la etapa de selección.

La mutación se considera un operador secundario en los algoritmos genéticos. Se aplica solamente a una cantidad reducida de los individuos y produce cambios aleatorios grandes en sus elementos.

Además, cada cierto número de generaciones se envía una cantidad prefijada de individuos (los mejores) hacia otra subpoblación, qué es lo que se conoce como migración.

Se modificó el ciclo principal de un AG, agregando después de los operadores genéticos de cruza y mutación, el algoritmo de búsqueda local, como se puede observar en la Fig. 2

III-A. Búsqueda local

Ya que se deben visitar todas las ciudades, TSP se puede reducir a encontrar el orden en que deben visitarse las mismas, lo cuál hace que la manera más barata de representar soluciones sea como un vector de n elementos, con n igual al número de ciudades de la instancia. Ésta representación en forma de permutación resulta particularmente adecuada para el AG, ya que existen múltiples algoritmos de cruza y mutación diseñados para permutaciones.

Sin embargo, aplicar los algoritmos de búsqueda local resulta más simple si representamos el problema en términos de grafos, vértices y aristas. El algoritmo de búsqueda local propuesto en [1] basado en hacer reemplazos de tres aristas, pero eligiendo qué aristas se van a reemplazar y, por qué aristas

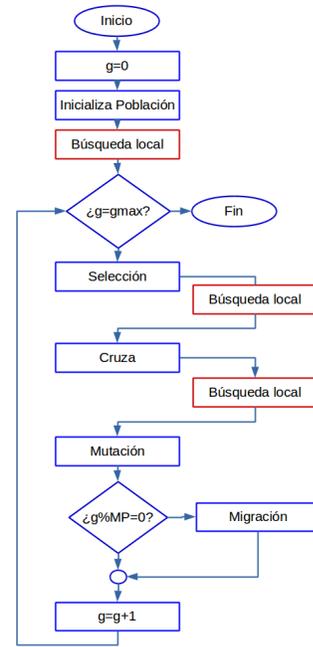


Figura 2. Diagrama del algoritmo memético

van a ser reemplazadas de manera “inteligente”, de manera similar a cómo ocurre en LK, consta de los siguientes pasos:

1. Se transforma la permutación en un conjunto de aristas que forman la ruta o recorrido original.
2. Se elige al azar un nodo n_1 .
3. Se selecciona una arista $x_1 = (n_1, n_2)$ tal que $x_1 \in T$, donde T es el conjunto de aristas de la solución original, dando prioridad siempre a la de costo mayor de las dos aristas posibles.
4. Se elige una arista $y_1 = (n_2, n_3)$ que comparta un nodo con x_1 tal que $y_1 \notin T$ y $\|y_1\| < \|x_1\|$. Si no es posible encontrar dicha y_1 , se regresa a 2 y se selecciona la otra arista x_1 posible. Si en dicho caso tampoco se puede encontrar y_1 , volvemos a 1 y se selecciona otro nodo n_1 .
5. Se selecciona una arista $x_2 = (n_3, n_4)$ que comparta un nodo con y_1 tal que $x_2 \in T$. Dado que existen dos aristas que satisfacen dichas condiciones se hace una selección tipo ruleta, asignando una mayor probabilidad de ser seleccionada a la arista de costo mayor.
6. Se elige de manera aleatoria $x_3 = (n_5, n_6)$, $x_3 \in T$, tal que $x_3 \neq x_1$, $x_3 \neq x_2$.
7. Se eligen y_2, y_3 tales que, al reemplazar (x_1, x_2, x_3) por (y_1, y_2, y_3) , el recorrido resultante sea hamiltoniano (dichas aristas y_2, y_3 no son únicas).
8. Si algún intercambio encontrado en 6 produce un costo menor al inicial, se efectúa el reemplazo y se regresa al paso 1.
9. En caso contrario, si ningún par y_2, y_3 produce un recorrido mejor, regresamos a 5 y seleccionamos otra

x_3 .

- En caso de haber probado todos los nodos x_3 posibles, se regresa al paso 3 seleccionando una arista y_1 distinta. Si ya se probó con todas las aristas y_1 , entonces se ha encontrado un óptimo local y el algoritmo termina transformando el conjunto de aristas en una permutación.

En [1] se muestra que dicho algoritmo de búsqueda local produce mejores soluciones en tiempos más cortos que implementaciones eficientes de otras estrategias, sin embargo, el paso 7 resulta particularmente costoso ya que la verificación de que un recorrido sea Hamiltoniano es de orden $O(n^2)$.

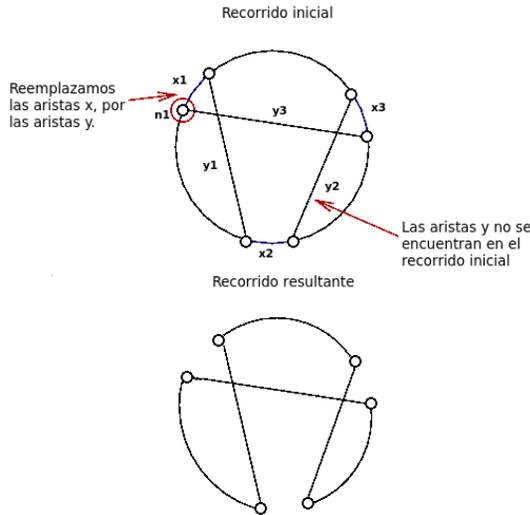


Figura 3. Ejemplo de iteración posible con reemplaza de tres aristas

Una posible iteración se puede observar en la Fig. 3

IV. MEJORAS IMPLEMENTADAS

Se modificó el algoritmo de búsqueda local por uno equivalente que trabaja directamente sobre la permutación. De esta forma no solamente nos ahorramos el primer y último paso, también eliminamos la costosa validación de que el recorrido resultante sea hamiltoniano. Esto debido a que toda permutación en que números adyacentes representen aristas, es un recorrido Hamiltoniano.

El algoritmo de búsqueda local mejorado consta de los siguientes pasos:

- Se elige al azar una ciudad C_1 (una posición en la permutación).
- Se selecciona una ciudad adyacente a C_1 , C_2 . La adyacencia entre $C_1 - C_2$ equivale a la arista x_1 en el algoritmo anterior.
- Elegimos C_3 una ciudad tal que el costo de $C_2 - C_3$ sea menor al costo de $C_1 - C_2$ la conexión hipotética $C_2 - C_3$ equivale a la arista y_1 del algoritmo anterior, si no se puede encontrar C_3 , regresamos a 2 y seleccionamos la otra ciudad adyacente a C_1 , si no se puede encontrar C_3 tampoco en ese caso, regresamos al paso 1 y se selecciona otro nodo C_1 .

- Elegimos C_4 una ciudad tal que en la permutación original aparezca conectada a C_3 . La conexión $C_3 - C_4$ es equivalente a x_2 .
- Se divide la permutación en tres segmentos, tales que algunas inversiones de dichos segmentos sean equivalentes a cambios de tres aristas, además las permutaciones resultantes de dichas inversiones no posean en índices adyacentes las ciudades C_3 y C_4 o las ciudades C_1 y C_2 equivalentes a x_1 y x_2 , y en ella aparezcan en índices adyacentes las ciudades C_2 y C_3 (la arista y_1).
- Si alguna de las inversiones del paso anterior produce un tour con costo menor que el original, se realiza la inversión, en caso contrario regresamos al paso anterior y probamos con otra división posible de la permutación (equivalente a seleccionar otro nodo x_3).
- En caso de que ninguna partición del intervalo produzca inversiones con costo menor, regresamos al paso 4 y seleccionamos la otra ciudad C_4 posible.
- En caso de haber probado con todas las ciudades C_4 posibles para un conjunto C_1, C_2, C_3 regresamos al paso 3 y elegimos otra ciudad C_3 posible.
- En caso de haber probado con todas las ciudades C_3 posibles, regresamos al paso 2 e intentamos con la otra ciudad adyacente a C_1 .
- En caso de haber probado con todas las ciudades C_2 posibles, regresamos al paso 1 e intentamos con otra ciudad C_1 , si ya probamos con todas las ciudades C_1 el algoritmo finaliza.

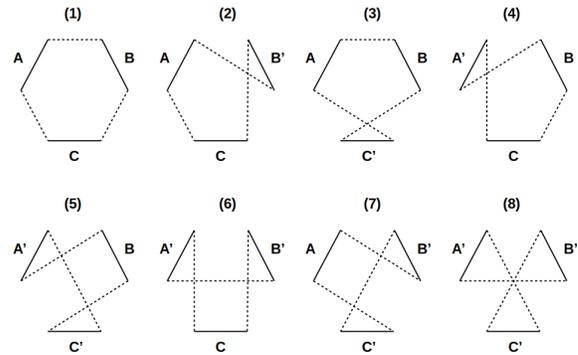


Figura 4. Posibles reconexiones con cambio de tres aristas

El paso 5 se puede llevar a cabo dado que, tal como se muestra en la figura 4, existen ocho formas en que puede reconectarse un grafo para producir un recorrido hamiltoniano al reemplazar 3 aristas [12]. Los segmentos a reconectar (marcados como A, B y C) en algunos casos deben recorrerse en sentido inverso (lo que se denota con una tilde) para formar la permutación que equivale al grafo resultante.

Otra mejora sobre la implementación anterior que nos permitió disminuir el tiempo de ejecución fue agregar un atributo booleano a los individuos que es utilizado para identificar aquellos que ya han pasado por el método de búsqueda local con el objetivo de evitar que individuos que ya se encuentran

en un óptimo local traten de volver a optimizarse localmente.

V. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

Para el desarrollo del algoritmo memético se utilizó lenguaje C, compilado con GCC 4.8.4, un conjunto libre de compiladores distribuidos bajo la licencia GPL, se utilizó la librería OpenMPI en su versión 1.6.4 para el paso de mensajes entre los procesos, sobre Linux Mint 17.3 de 64 bits.

Se eligieron nueve instancias de tamaño mediano (entre 150 y 1002 ciudades) de TSP para llevar a cabo las pruebas, dichas instancias se obtuvieron de la librería TSPLIB creada por el alemán G. Reinelt [13].

Las pruebas fueron llevadas a cabo en un clúster de 18 computadoras con procesadores i7-3770 con 8 GB de memoria RAM.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la tabla I se presentan las nueve instancias utilizadas para probar la implementación del algoritmo memético con el costo de su recorrido óptimo.

Tabla I
INSTANCIAS DE PRUEBA

Instancia	Distancia óptima
kroA150	26,524
kroB150	26,130
kroA200	29,368
kroB200	29,437
pr226	80,369
pr264	49,135
pr299	48,191
pr439	107,217
pr1002	259,045

En la tabla II se muestran los parámetros con los que se llevaron a cabo los experimentos, donde, G es el número de generaciones que se ejecuta el algoritmo, TP el tamaño de cada población, NP el número de subpoblaciones o islas. En todos los casos se utilizó una migración de un sólo individuo en un período de tres generaciones, tamaño de elite uno, con una probabilidad de adaptación de 80 % y una probabilidad de mutación de 1 %.

Tabla II
PARÁMETROS EXPERIMENTALES

Instancia	G	TP	NP
kroA150	25	15	32
kroB150	25	15	32
kroA200	20	20	64
kroB150	20	20	64
pr226	40	23	64
pr264	40	26	64
pr299	40	30	64
pr439	70	44	64
pr1002	300	30	144

Las tabla III y IV muestran los resultados obtenidos en [1] y con la implementación propuesta del algoritmo memético respectivamente, incluyendo en ésta última, la aceleración que produce respecto al tiempo de ejecución de la implementación anterior.

Tabla III
RESULTADOS EXPERIMENTALES VERSIÓN ANTERIOR

Instancia	ERP	Tiempo
kroA150	0.0 %	1.5s
kroB150	0.0 %	1.6s
kroA200	0.0 %	6.9s
kroB200	0.0 %	6.6s
pr226	0.0 %	14.8s
pr264	0.0 %	35.2s
pr299	0.0 %	30.8s
pr439	5.9e ⁻⁶ %	256.0s

Tabla IV
RESULTADOS EXPERIMENTALES NUEVA VERSIÓN

Instancia	ERP	Tiempo	Aceleración
kroA150	0.0 %	1.1s	36.6 %
kroB150	1.8e ⁻⁴ %	1.5s	6.6 %
kroA200	0.0 %	3.6s	91.6 %
kroB200	7.5e ⁻⁵ %	4.8s	37.5 %
pr226	0.0 %	3.3s	348.5 %
pr264	0.0 %	6.7s	425.3 %
pr299	0.0 %	20.4s	51 %
pr439	5.6e ⁻⁴ %	199.7s	28.2 %
pr1002	8e ⁻⁴ %	259.0s	N/A

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados demuestran que esta nueva implementación es mucho más eficiente que la anterior en las instancias evaluadas, ya que los tiempos de ejecución se reducen en todas las pruebas, en algunos casos hasta cuatro veces, de acuerdo a las tablas III y IV .

Cabe resaltar que la instancia pr1002 resultó intratable bajo la implementación anterior, sin embargo esta nueva versión permitió resolverlo en un tiempo similar al que le toma resolver la instancia pr439 al algoritmo original propuesto en [1] y con un error relativo menor a 1e - 3 %.

Actualmente se está trabajando en la implementación de este nuevo algoritmo en una arquitectura paralela distinta a los *clusters* como son las GPU, que recientemente han obtenido resultados prometedores con muchos algoritmos paralelos.

Otra cuestión que queda como trabajo futuro es la prueba de la implementación en instancias mayores de la TSPLIB.

VIII. REFERENCIAS

- [1] J. Morales, M.A. Castro Liera, Un algoritmo memético paralelo para TSP, Instituto Tecnológico de La Paz, La Paz BCS, 2016.
- [2] S. Arora, Polynomial time approximation schemes for Euclidean TSP and other geometric problems, J. ACM 45 (1998) 753–782.

- [3] G. Gutin, A.P. Punnen, *The Traveling Salesman Problem and its Variations*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [4] Y. Chen, P. Zhang, Optimized annealing of traveling salesman problem from the n th-nearest-neighbor distribution, *Physica A* 371 (2006) 627–632.
- [5] J.Q. Li, Q.K. Pan, Y.C. Liang, An effective hybrid Tabu search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems, *Comput. Ind. Eng.* 59 (2010) 647–662.
- [6] S.J. Louis, G. Li, Case injected genetic algorithms for traveling salesman problems, *Inform. Sci.* 122 (2000) 201–225.
- [7] K.S. Leung, H.D. Jin, Z.B. Xu, An expanding self-organizing neural network for the travelling salesman problem, *Neurocomputing* 62 (2004) 267–292.
- [8] M. Dorigo, L.M. Gambardella, Ant colonies for the traveling salesman problem, *Biosystems* 43 (1997) 73–81.
- [9] X.H. Shi, Y.C. Liang, H.P. Lee, C. Lu, Q.X. Wang, Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP, *Inform. Process. Lett.* 103 (2007) 169–176.
- [10] Nvidia, *Cuda C Programming Guide*, Des. Guid., p 228, 2014.
- [11] J. A. Castro, M. A. Castro Liera and I. Castro Liera, *Programación paralela aplicada en optimización*, 1st edition, La Paz, BCS 2012.
- [12] A. Blazinkas, A. Misevicius, *Combining 2-opt, 3-opt and 4-opt with k-swap-kick perturbations for the traveling salesman problem*, Kaunas University of Technology, Department of Multimedia Engineering, 2011.
- [13] G. Reinelt, TSPLIB, a traveling salesman problem library, *ORSA J. Comput.* 3 (1991) 376–384.

Generación de tabla de frecuencias para compresión por árbol de contexto con GPGPU

Vejar Romero, Ángel César
Maestría en Sistemas Computacionales
ITLP
La Paz, B.C.S, México
vectangel@gmail.com

Castro Liera, Marco Antonio
División de Estudios de Posgrado e Investigación
ITLP
La Paz, B.C.S, México
mcastro@itlp.edu.mx

Resumen— En este trabajo se presenta la implementación del algoritmo de compresión de datos de Huffman sobre la plataforma CUDA. Este algoritmo es ampliamente utilizado en el mundo de la criptografía por su alto nivel de compresión. Se describen los procesos que se llevan a cabo para la compresión. Además, se describe el procedimiento generación de tabla de frecuencias paralelizado mediante la GPU y secuencial haciendo comparativas de tiempo de ejecución con archivos de diferentes tamaños.

I. INTRODUCCIÓN

La compresión de datos se encuentra muy inmersa en la vida diaria de las personas, todos aprovechan los beneficios que brinda, ya sea tomando una fotografía, escuchando música o haciendo un respaldo de documentos. Desde el enfoque de las Ciencias de la Computación, la compresión de datos es la recodificación de cierta cantidad de información para que ocupe un menor espacio de almacenamiento que en su forma original.

En términos generales existen dos tipos de compresión, sin pérdida de información y con pérdida de información.

- Compresión con pérdida: cuando los datos son procesados se toma en cuenta uno o más criterios para poder prescindir de información que se encuentra albergada en el archivo original y que por su naturaleza no es importante su permanencia ya que con o sin ella la apreciación sería casi la misma que si no estuviera comprimido. Esto se presenta bastante en archivos multimedia donde son eliminados ciertos sonidos inaudibles al oído humano como es el caso de los archivos *.mp3, o calidad de imagen para su visualización más rápida en internet.
- Compresión sin pérdida: todos y cada uno de los datos que componen el archivo original son imprescindibles, ya que el archivo descomprimido debe ser idéntico al archivo original; Este método se usa en archivos como bases de datos o textos.

Dentro de los algoritmos sin pérdida, existen dos grandes familias:

- RLE (Run Length Encoding): Un algoritmo de funcionamiento sencillo que se encarga de tomar las secuencias de datos repetidas y cambiarlas por un

único valor más el recuento. Tienen la ventaja de ser más rápidos que los algoritmos que usan los árboles de contexto, sin embargo, no aseguran la mejor tasa de compresión.

- Árbol de contexto: Asegura una codificación de longitud mínima pero requiere más tiempo dado que hace un doble barrido de los datos, uno para crear la tabla de frecuencias que da origen al árbol y otra para recodificar.

En este trabajo, nos enfocamos en una versión en paralelo del algoritmo de Huffman, que utiliza un árbol de contexto. Este algoritmo, asegura la recodificación de longitud mínima de la información a costa de hacer dos lecturas de los datos originales. Se pretende, por medio del procesamiento paralelo, disminuir el tiempo que requiere el algoritmo para comprimir, lo cual es su principal desventaja.

Las tecnologías de procesamiento paralelo han alcanzado todas las esferas actuales de la computación. Desde las computadoras más poderosas del planeta, incluidas en el Top500 [1], hasta los teléfonos inteligentes confían en la capacidad de sus procesadores de ejecutar más de una instrucción de manera concurrente.

CUDA es una arquitectura de procesamiento paralelo que aprovecha la potencia de las GPU de NVIDIA la cual brinda a los desarrolladores de aplicaciones de diversas áreas del conocimiento como ingeniería, investigación, genética, etc. más recursos para realizar computación de propósito general sobre procesadores gráficos (GPGPU); incrementando el rendimiento de las aplicaciones.

Algunos trabajos anteriores han propuesto una manera de manipular la creación del árbol de contexto dividiendo el archivo de entrada para que cada unidad de procesamiento cree su propio árbol de contexto basándose en el segmento de datos que le fue asignado; esto haría que cada segmento fuera comprimido al máximo, haciendo que la secuencia de datos final también estuviera comprimida al máximo [2,3]. Sin embargo eso hace que el proceso de manipulación de cada segmento ya sea para comprimir o descomprimir, tenga que pagar el precio de utilizar un poco más de memoria para poder guardar la información para recuperar los árboles de contexto.

II. EL CÓDIGO DE HUFFMAN

David Albert Huffman (9 de Agosto de 1925 – 7 de Octubre de 1979) fue el creador del popular algoritmo en el año 1951 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), el cual, fue descrito en su trabajo “A Method For the Construction Minimum-Redundancy Codes” [2].

El primer paso que realiza el algoritmo para lograr la compresión de información es realizar la primera lectura del archivo que se desea comprimir para realizar el conteo de los caracteres que posee. Una vez que ha creado la tabla de frecuencias se ordena de menor a mayor y se crea una lista ligada que posea los elementos de la tabla, la cual servirá para crear el árbol de contexto. Se procede a crear un nodo que contenga la suma de las frecuencias de los primeros dos elementos de la lista creando un árbol binario entre el nodo recién creado (como padre) y los dos primeros elementos (como hijos), después, se ordena el mini-árbol como se ve en la figura 1, este paso se repite tantas veces como sea necesario hasta que la lista tome forma de árbol binario. A este árbol se le conoce como árbol de contexto de longitud de descripción mínima (DML context tree) [4].

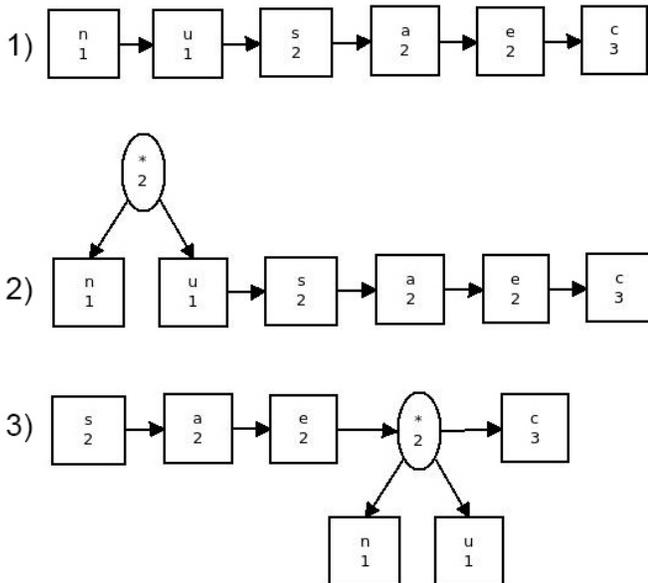


Fig. 1. Creación de árbol DML.

Una vez creado el árbol se realizan varios recorridos desde la raíz hasta cada una de las hojas del mismo donde se encuentran los distintos caracteres que conforman el archivo de entrada con el objetivo de crear una tabla que posea los códigos de longitud variable (VLC Variable Length Code) como se muestra en la figura 2. La característica que posee esta tabla es que a los símbolos que tienen una frecuencia más alta se les asigna un código más corto y a los que tienen menos frecuencia un código más largo.

Una vez que se tiene el árbol, se realiza la segunda lectura de los datos a comprimir y se hace la sustitución del símbolo por la del código de longitud variable que le corresponde creando un archivo que tiene un tamaño menor que el original.

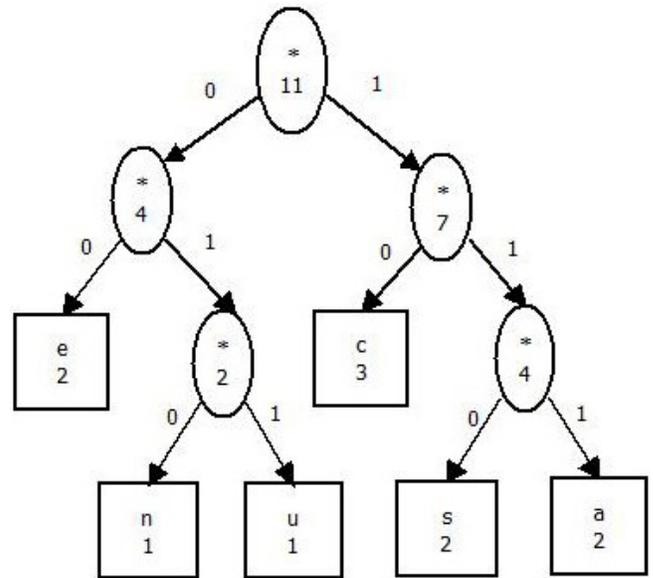


Fig. 2. Árbol VLC.

TABLA I. EJEMPLO DE TABLA DE FRECUENCIAS DE CÓDIGO VARIABLE (VLC)

Código ASCII	Símbolo	VLC
101	e	00
110	n	010
117	u	011
99	c	10
115	s	110
97	a	111

El proceso de descompresión inicia leyendo los datos comprimidos y la información de la tabla de frecuencias que fue previamente guardada en el proceso de compresión con el fin de recrear el árbol de contexto. Cuando se posee nuevamente el árbol, se realiza el proceso inverso que es cambiar el código de longitud variable por el símbolo original.

III. CUDA

Compute Unified Device Architecture (CUDA) es el nombre de la arquitectura desarrollada por la empresa NVIDIA para las tarjetas gráficas de su marca que tiene como propósito hacer accesible la tecnología para implementar cómputo de propósito general por medio de lenguajes de alto nivel.

CUDA brinda los beneficios de los lenguajes de alto nivel como son C, OpenCL, Fortran y C++ a los que se agregan algunas instrucciones sencillas. Las GPU están conformadas por varios multiprocesadores y unidades de memoria que son capaces de manipular información con los núcleos de cómputo que poseen. Los núcleos de cómputo (CUDA Cores) se

agrupan en bloques y se encargan de ejecutar las instrucciones por medio de hilos; estas instrucciones se pueden categorizar en las de tipo SIMD (*Single Instruction Multiple Data*) donde cada unidad de procesamiento realiza la misma función sobre datos diferentes [5-8].

Los elementos principales de CUDA son:

Host, es el nombre que se le da a la computadora donde se encuentra instalada la tarjeta gráfica, cuando una sección de código se ejecuta del lado del *host*, se entiende que es manejada por la CPU (Unidad Central de Procesamiento).

Device, con este nombre se conoce a la tarjeta gráfica, se entiende que cuando una función se ejecuta del lado del *device*, es manejada por la GPU (Unidad de Procesamiento Gráfico).

Kernel, son funciones que se ejecutan del lado del *device* y equivalen a un hilo de ejecución manejado por un *CUDA core*.

Bloque, conjunto de hilos que son procesados en el mismo multiprocesador.

IV. ESTRATEGIA DE PARALELIZACIÓN

La estrategia que se siguió para realizar la fase de conteo fue dividir el archivo a comprimir en el número total de hilos disponibles en la tarjeta (el producto del número de bloques por el número de hilos en cada bloque) para que a cada hilo de ejecución se le asigne la misma cantidad de bytes a manipular, como se muestra en la figura 3. Como no en todos los casos se pueden tener todos los hilos con la misma cantidad de carga de trabajo en el peor de los casos un hilo trabajaría con menos carga que el resto, de tal suerte que no los retrase.

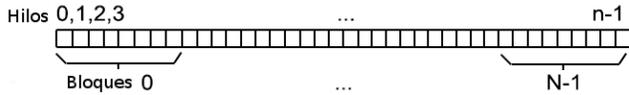


Fig. 3. Distribución de memoria por bloques e hilos.

V. GENERACIÓN DE LA TABLA DE FRECUENCIAS EN PARALELO

Al inicio de la ejecución se obtiene la longitud total de caracteres a procesar y esta cantidad se copia a una variable global del *device* junto con el contenido del archivo. Del lado del *host* se crea un arreglo de enteros de dimensión 256 (los posibles valores de cada byte) donde se guarda el conteo total de cada símbolo y del lado del *device* se crea un arreglo que tiene dimensiones del número de bloques por el número de hilos en cada bloque por 256, para, en primera instancia, realizar un conteo parcial.

Cuando se ejecuta el *kernel* que realiza los conteos, a cada hilo se le asigna una porción del archivo cuya longitud se calcula mediante (1), donde l es la longitud en bytes de la porción a contabilizar por cada hilo, f es el tamaño total del archivo, b el número de bloques con que se ejecutó el programa y t el número de hilos de cada bloque. De esta forma, cada hilo genera su propia tabla de conteo parcial.

$$l = \text{ceil} \left(\frac{f}{b * t} \right) \tag{1}$$

Una vez que se ha concluido la ejecución de todos los hilos de la primera fase, en un segundo *kernel*, que se ejecuta con un bloque y 256 hilos se realiza la sumatoria de cada una de las tablas de conteos parciales, como lo muestra la figura 4. Primero se suman las tablas de los hilos por cada bloque y después las de cada uno de los bloques, ubicando el conteo total en la primera tabla del arreglo de sumas parciales.

Finalizados los dos *kernels*, debido a la diferencia de memoria entre las variables del *host* y del *device* se copia sólo el segmento de memoria que tiene el conteo total y se aloja en un arreglo del lado del *host*.

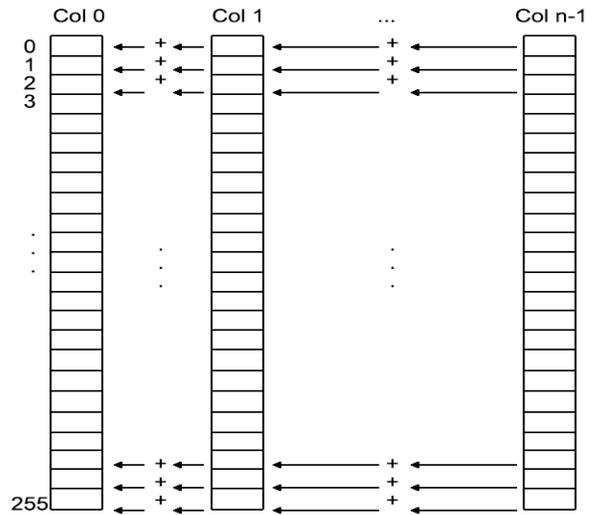


Fig. 4. Sumatoria de conteos parciales por hilo.

VI. PRUEBAS

Las pruebas se llevaron a cabo en una computadora que tiene las siguientes características:

TABLA II. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS.

Nombre	Descripción
Sistema operativo	Linux Mint 17.3 Cinnamon 64 bit
Procesador	Intel Core™ i7-4790 CPU @ 3.60 GHz x 8
Disco duro	Kingston (240GB) estado sólido SSD NOW
Tarjeta de gráfica	GTX Titan X (12 GB)
Placa base	Gigabyte Technology Co.
Version de gcc	Version 4.8.4
Version de CUDA	7.5

Se realizaron conteos con diversos tamaños de archivos, las tablas III y IV, muestran los resultados obtenidos para archivos entre 100 y 800 megabytes y entre uno y dos gigabytes respectivamente.

TABLA III. TIEMPOS DE EJECUCION EN SECUENCIAL Y CON GPU.

Tamaño(MB)	Tiempo		Aceleración(s)
	Secuencial(s)	GPU(s)	
100	1.35	0.23	5.87
200	2.46	0.33	7.45
400	4.89	0.50	9.78
600	7.20	0.69	10.43
800	9.51	0.88	10.81

TABLA IV. TIEMPOS DE EJECUCION EN SECUENCIAL Y CON GPU.

Tamaño(GB)	Tiempo		Aceleración(s)
	Secuencial(s)	GPU(s)	
1.0	12.17	1.13	10.77
1.2	14.59	1.39	10.50
1.4	17.09	1.70	10.05
1.6	19.52	2.05	9.52
1.8	21.77	2.26	9.63
2.0	24.36	2.60	9.37

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se puede observar que los tiempos de ejecución obtenidos en las pruebas de conteo, para comparar la versión secuencial y la paralela, son prometedores. Al aumentar el tamaño del archivo, se incrementa la diferencia entre los tiempos, consiguiéndose una aceleración cercana a 10 veces menos tiempo en paralelo que en secuencial.

Hasta el tamaño de 2.0 GB, se puede constatar que el tiempo de transferencia de los datos del *host* al *device*, no constituyo un cuello de botella para la fase de generación de la tabla de frecuencias.

Cabe señalar que en la fase de recodificación no será necesario hacer una nueva transferencia del *host* al *device*, dado que los datos permanecen en la memoria de la tarjeta gráfica.

Como trabajo futuro se desarrollará el módulo de la recodificación de la información tanto para compresión como para descompresión de datos.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Top500, "TOP500 Supercomputing Sites," <http://www.top500.org/>. 2010.
- [2] N. Krishnan and D. Baron, "A universal parallel two-pass MDL context tree compression algorithm," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process*, vol. 9, no. 4, pp. 741–748, 2015.
- [3] D. A. Huffman, "A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes," *Proc. IRE*, vol. 40, no. 9, pp. 1098–1101, 1952.
- [4] M. Nelson and J. Gailly, *The Data Compression Book*, 2nd edition. 1995.
- [5] J. Sanders and E. Kandrot, *CUDA by Example*, 1st ed., vol. 54, no. 2. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2010.
- [6] J. Cheng, M. Grossman, and T. KcKercher, *Professional CUDA C programming*, Wrox, 2014.
- [7] D. Kirk and W. Hwu, *Programming massively parallel processors : a hands-on approach*, 3rd ed. Morgan Kaufmann, 2016.
- [8] N. Wilt, *The CUDA handbook : a comprehensive guide to GPU programming*, 1st ed. Addison-Wesley Professional, 2013.

Segmentación de células del ciclo estral, Comparativa entre: Otsu, Media Aritmética, Máxima Entropía y Entropía Cruzada.

Leonardo Delgado Toral*[§], Aldrin Barreto Flores*, Veronica Edith Bautista Lopez[†],
Salvador E. Ayala Raggi* y Francisco Ramos Collazo[‡]

*Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Puebla, México.

[†]Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Puebla, México.

[‡]Bioterio Claude Bernard, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Puebla, México.

[§]Email: leonardo.delgadot@alumno.buap.mx

Resumen—El presente trabajo muestra una comparación entre algoritmos clásicos de umbralización (Otsu, Media Aritmética, Máxima Entropía, Entropía Cruzada) aplicados en los espacios de color CIELAB en el canal A, HSI en el canal I y en la escala de grises, con el objetivo de segmentar las células del ciclo estral (epiteliales nucleadas, epiteliales cornificadas y leucocitos) en roedores en muestras teñidas con eosina y hematoxilina. La segmentación se aplica en las cuatro etapas del ciclo: Estro, Proestro, Metaestro y Diestro.

Index Terms—Ciclo Estral, CIELAB, Entropía Cruzada, Máxima Entropía, Media Aritmética, Otsu.

Abstract—The present work shows a comparison between classical algorithms of thresholding (Otsu, Arithmetic Mean, Maximum Entropy, Cross-Entropy) applied in CIELAB color spaces in channel A, HSI in channel I and grayscale, this for segmented estrous cells (nucleated epithelial, cornified epithelial and leukocyte) in rodents in samples stained with eosin and hematoxylin. The segmentation is applied in the four stages of the cycle: Estro Proestro Metaestro and Diestro.

Index Terms—Arithmetic Mean CIELAB, Cross-Entropy, estrous cycle, Maximum Entropy, Otsu.

I. INTRODUCCIÓN

El ciclo estral es el ciclo reproductor de la rata, dura de 4 a 5 días. Las fases del ciclo son: proestro, estro (al final de la cual ocurre la ovulación), metaestro y diestro [1]. La identificación del ciclo estral es un proceso manual sujeto a errores de interpretación. La importancia de este radica en la programación de la fertilización de los roedores, esto se traduce en un control de población lo cual conlleva a tener roedores de edades controladas para las distintas actividades de investigación o capacitación. Para la identificación del ciclo estral la persona debe realizar observación en el microscopio de las muestras tomadas donde debe observar:

- Proestro. Abundan las células epiteliales de gran tamaño y con núcleo, no hay leucocitos. Dentro de esta fase se pueden distinguir varias subfases según el número de células y tamaño de los núcleos. En proestro tardío las células epiteliales superficiales empiezan a transformarse en células cornificadas, con aspecto escamoso, anucleadas y transparentes de forma irregular, que aparecerán en el

frotis claramente distinguibles de las células nucleadas [1].

- Estro. Hay gran abundancia de células anucleadas escamosas, que pueden aparecer formando masas blancas e irregulares. Proceden de la descamación del epitelio superficial. [1].
- Metaestro. Se caracteriza por la presencia de algunos leucocitos además de células cornificadas anucleadas. Los leucocitos se reconocen bien por su pequeño tamaño y la forma irregular de su núcleo, que aparece fuertemente teñido. [1].
- Diestro. Los leucocitos invaden el epitelio y son las células predominantes en los frotis. Empiezan a aparecer células epiteliales nucleadas, más abundantes cuanto más avanzado sea el diestro [1].

En las figuras 1, 2, 3 y 4 se observan las cuatro etapas del ciclo estral.

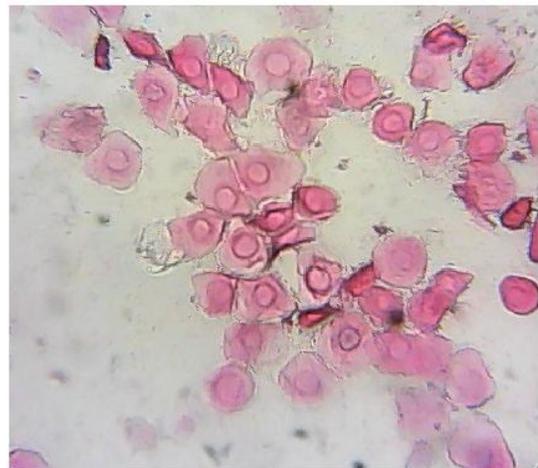


Figura 1. Proestro. Abundan las células epiteliales de gran tamaño y con núcleo, no hay leucocitos. Muestras proporcionadas por el bioterio Claude Bernard de la BUAP. La imagen fue tomada con la cámara Logitech c170 acoplada a un microscopio con un objetivo de 40 y un ocular de 10.



Figura 2. Estró. Abundancia de células anucleadas escamosas irregulares. Muestras proporcionadas por el bioterio Claude Bernard de la BUAP. La imagen fue tomada con la cámara Logitech c170 acoplada a un microscopio con un objetivo de 40 y un ocular de 10.

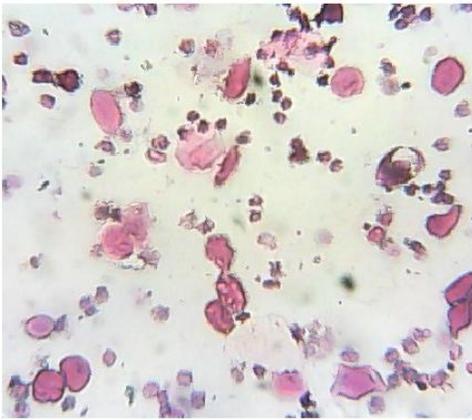


Figura 3. Metaestro. Presencia de algunos leucocitos además de células cornificadas anucleadas. Muestras proporcionadas por el bioterio Claude Bernard de la BUAP. La imagen fue tomada con la cámara Logitech c170 acoplada a un microscopio con un objetivo de 40 y un ocular de 10.

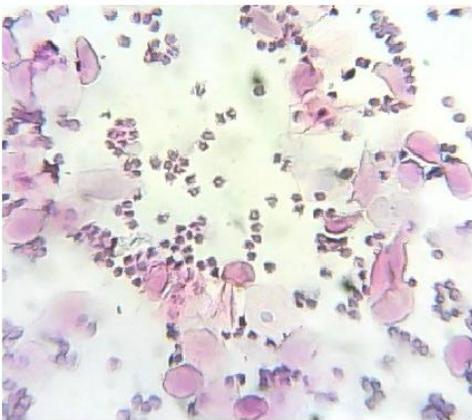


Figura 4. Diestro. Los leucocitos invaden el epitelio y son las células predominantes. Muestras proporcionadas por el bioterio Claude Bernard de la BUAP. La imagen fue tomada con la cámara Logitech c170 acoplada a un microscopio con un objetivo de 40 y un ocular de 10.

A. Segmentación

La clasificación del ciclo estral presenta dos dificultades la primera tiene que ver con el proceso de la toma de las muestras en el cual la tinción HE (hematoxilina y eosina) en ocasiones no se aplica de manera correcta lo cual lleva a falta de definición. El segundo problema está sujeto a la interpretación de la muestra en el microscopio. En este trabajo se presenta una primera etapa para la clasificación automática del ciclo estral la cual consiste en la segmentación de las células. Para la segmentación de las células del ciclo estral no se tienen referencias directas, sin embargo, por la tinción HE y el tipo de células se considera como referencia las células cancerígenas. Para la segmentación de las células cancerígenas se han utilizado diferentes métodos tales como Superpixel [2], Grafos [3], Watershed [4], Otsu [5], entre otros. Estos son aplicados generalmente en la escala de grises con un filtro gaussiano para la eliminación de ruido. Una contribución de los trabajos revisados fue la sustitución de la escala de grises por el espacio de color CIE LAB en donde se toma el canal A para aumentar el contraste [3]. El espacio de color CIE LAB es una aproximación a una escala uniforme de color, en una escala uniforme de color la diferencia de los puntos graficados corresponde a la diferencia visual [6]. En [7] se aborda una clasificación sin segmentación a través de un análisis de las imágenes por bloques en los espacios de color HSI canal I, RGB canal R y en escala de grises. Por lo anterior este trabajo aborda la segmentación de las imágenes del ciclo estral partiendo de algoritmos clásicos citados en [8] y [5].

II. MARCO TEÓRICO

En este trabajo se presenta una comparación entre los métodos Otsu, Media Aritmética, Máxima Entropía y Entropía Cruzada. Los cuales son utilizados para la determinación de umbrales de manera no supervisada.

A. OTSU

El algoritmo de OTSU se basa en maximizar la separabilidad de las clases, esto se logra maximizando la ecuación 1

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (1)$$

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L ip_i \quad (2)$$

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^K p_i \quad (3)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=K+1}^L p_i \quad (4)$$

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^K \frac{ip_i}{\omega_0} \quad (5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=K+1}^L \frac{ip_i}{\omega_1} \quad (6)$$

$$p_i = n_i/N \quad (7)$$

Donde n_i es el valor del histograma para la intensidad i , N es el número total de píxeles, L es la intensidad máxima y K el umbral a evaluar [5].

B. Media Aritmética

La expresión matemática para la umbralización por media aritmética está dada por:

$$\mu_{Umbra} = \sum_{n=1}^N L_n P(L_n) \quad (8)$$

Donde L_n es el n -ésimo valor de gris de la imagen y $P(L_n)$ es la distribución de probabilidad de L_n [8].

C. Máxima Entropía

La expresión matemática para la umbralización por máxima entropía está dada por:

$$H(S) = -p_1 \ln p_1 - p_0 \ln p_0 \quad (9)$$

Donde p_1 y p_0 son las densidades de probabilidad de 1 y 0 de la imagen segmentada y S es el umbral a evaluar el método selecciona el valor S que maximice la expresión 9 [8].

D. Entropía Cruzada

La expresión matemática para la umbralización por Entropía Cruzada está dada por:

$$C(P, Q : t) = \sum_{f=1}^t \left[fh(f) \ln \frac{f}{\mu_1(t)} + \mu_1 h(f) \ln \frac{\mu_1(t)}{f} \right] + \sum_{f=t+1}^F \left[fh(f) \ln \frac{f}{\mu_2(t)} + \mu_2 h(f) \ln \frac{\mu_2(t)}{f} \right] \quad (10)$$

$$\mu_1(t) = \frac{1}{\sum_{f=0}^t h(f)} \sum_{f=0}^t fh(f) \quad (11)$$

$$\mu_2(t) = \frac{1}{\sum_{f=t+1}^F h(f)} \sum_{f=t+1}^F fh(f) \quad (12)$$

Donde f es valor en el espacio de color, F es el máximo valor de f , t es el valor del umbral a evaluar, $h(f)$ es el valor del histograma, μ_1 y μ_2 son el promedio del valor en el espacio de color del objeto y el fondo respectivamente. El objetivo es buscar el valor de t que minimice 10 [8].

III. IMPLEMENTACIÓN

Los algoritmos fueron implementados utilizando la plataforma MATLAB versión 2016b. Para la correcta implementación de cada espacio de color se realizaron adecuaciones descritas en 13, 14 y 15.

$$G = |G - 255| \quad (13)$$

Donde G es la matriz en escala de grises esta operación se realiza para dejar el fondo negro y las células de color claro.

$$A = \text{round}(A + |\text{minimo}(A)|) \quad (14)$$

Donde A representa el canal A en el espacio CIELAB y el operador round redondea los valores.

$$I = \text{round}(|I - 255|) \quad (15)$$

Donde I representa el canal I del espacio HSI y el operador round redondea los valores.

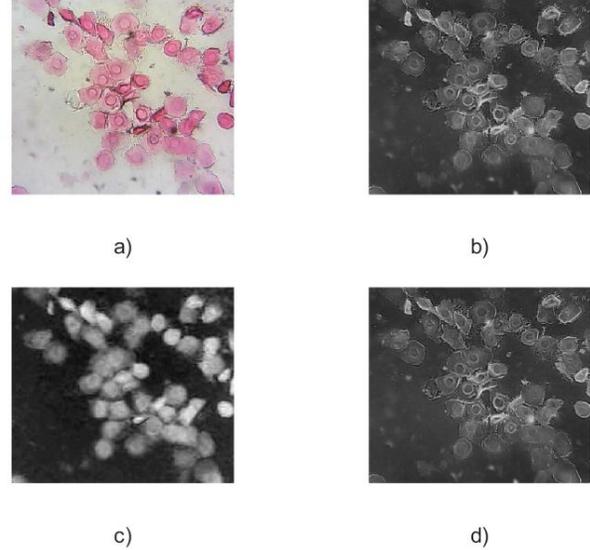


Figura 5. Proestro. a) Imagen original, b) Imagen utilizando la ecuación 13, c) Imagen utilizando la ecuación 14, d) Imagen utilizando la ecuación 15.

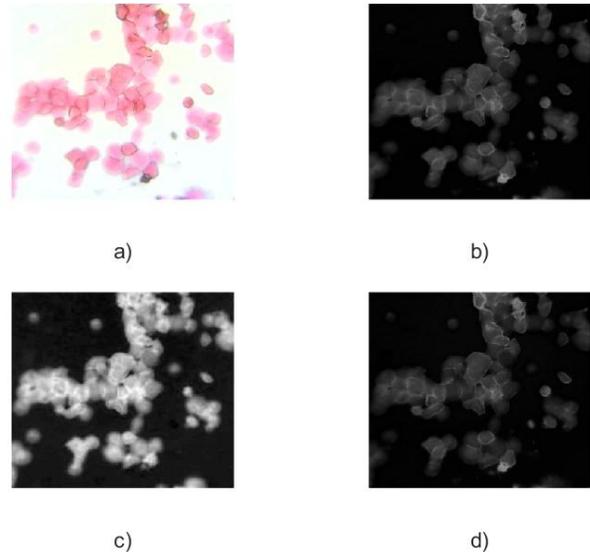


Figura 6. Estro. a) Imagen original, b) Imagen utilizando la ecuación 13, c) Imagen utilizando la ecuación 14, d) Imagen utilizando la ecuación 15.

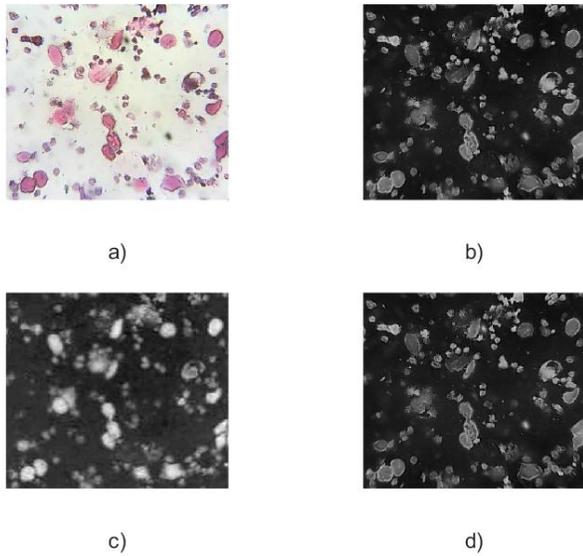


Figura 7. Metaestro. a) Imagen original, b) Imagen utilizando la ecuación 13, c) Imagen utilizando la ecuación 14, d) Imagen utilizando la ecuación 15.

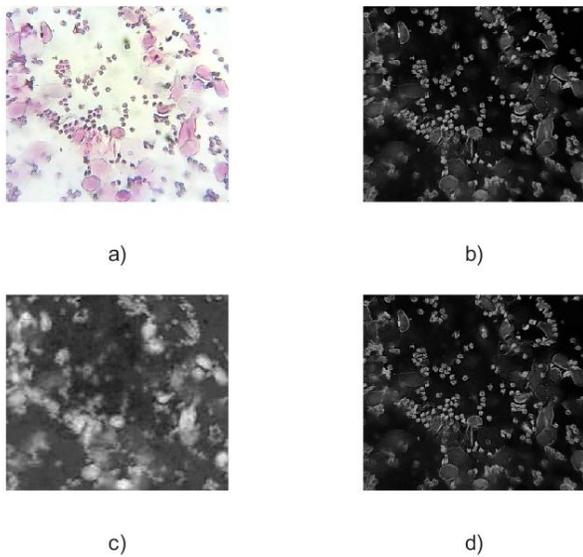


Figura 8. Diestro. a) Imagen original, b) Imagen utilizando la ecuación 13, c) Imagen utilizando la ecuación 14, d) Imagen utilizando la ecuación 15.

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se observan las cuatro etapas del ciclo estral al aplicarle los 3 espacios de color Gray, CIELAB canal A, HSI canal I bajo las consideraciones de las ecuaciones 13, 14 y 15 respectivamente.

IV. RESULTADOS

En la tabla I se observa que no se posee una diferencia entre *HSI* canal *I* y la escala de grises para ninguno de los cuatro métodos de umbralización, se observa que los umbrales con valores más pequeños fueron los obtenidos por el método de máxima entropía, siendo este método el que mostro el resultado menos favorable al no lograr segmentar las células.

El canal *A* de *CIELAB* mostro un mejor desempeño para las etapas Proestro y Estro, pues estos son teñidos de color rojizo lo cual resulta óptimo para el canal *A* que representa una variación entre el color verde y el rojo. Para las etapas Metaestro y Diestro el desempeño fue mejor en los espacios de color *HSI* canal *I* y la escala de grises, esto se debe a que los leucocitos presentes en estas etapas del ciclo estral son teñidos de color azul por lo cual algunos son omitidos cuando se umbraliza sobre el canal *A* del espacio *CIELAB*.

E.C.E	Algoritmo	Gris	CIELAB	HSI
Proestro	Media Aritmética	75	20	74
Estro	Media Aritmética	22	17	20
Metaestro	Media Aritmética	47	16	47
Diestro	Media Aritmética	37	19	36
Proestro	Entropía Cruzada	81	20	80
Estro	Entropía Cruzada	19	17	19
Metaestro	Entropía Cruzada	60	20	60
Diestro	Entropía Cruzada	37	19	38
Proestro	Entropía	62	11	62
Estro	Entropía	2	5	4
Metaestro	Entropía	28	10	29
Diestro	Entropía	21	13	21
Proestro	Otsu	86	24	85
Estro	Otsu	31	22	28
Metaestro	Otsu	72	22	71
Diestro	Otsu	56	21	56

Tabla I
UMBRALES.

En la figure 9 se observan los resultados de la umbralización por máxima entropía esta figura muestra como el algoritmo no es capaz de aislar las células en ninguno de los 3 espacios de color dejando una cantidad considerable de fondo en la segmentación.

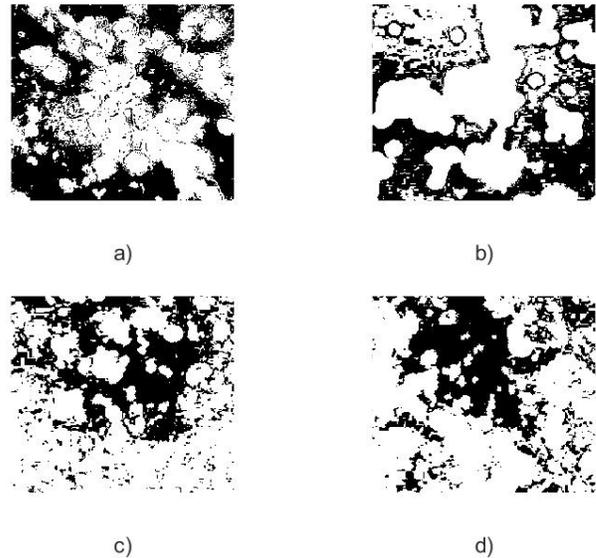


Figura 9. Umbrales obtenidos por máxima entropía a) Proestro canal *I* de *HSI*, b) Estro escala de grises, c) Metaestro canal *A* de *CIELAB*, d) Diestro canal *A* de *CIELAB*.

La figura 10 muestra una mejor segmentación para los casos donde se utiliza el canal *A* de *CIELAB*. Esta muestra los

resultados obtenidos en Otsu y Entropía Cruzada para los ciclos Proestro y Estro.

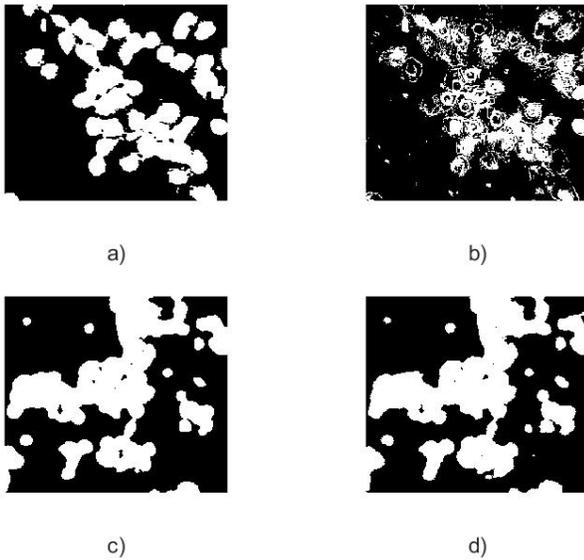


Figura 10. a) Proestro en CIELAB canal A con umbral OTSU b) Proestro HSI canal I con umbral OTSU c) Estro en CIELAB canal A con umbral por Entropía Cruzada d) Estro en escala de grises con umbral por Entropía Cruzada

La figura 11 muestra la segmentación para las etapas Metaestro y Diestro. En esta se observa como en el espacio de color CIELAB canal A algunos leucocitos no son correctamente segmentados lo cual si se logra en los espacios de color HSI canal I y en la escala de grises.

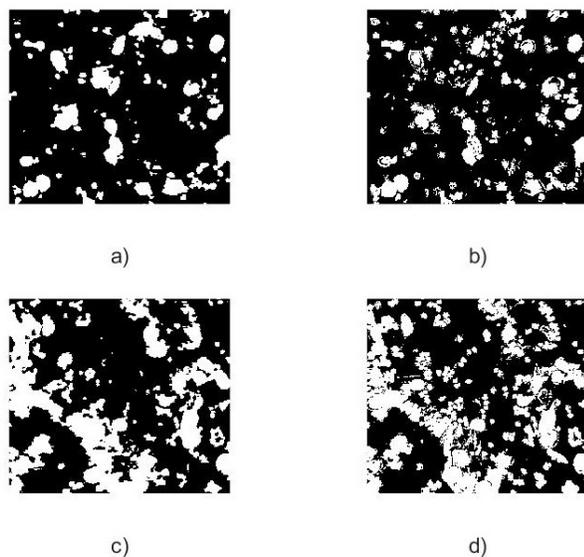


Figura 11. a) Metaestro en CIELAB canal A con umbral OTSU b) Metaestro HSI canal I con umbral OTSU c) Diestro en CIELAB canal A con umbral por Media Aritmética d) Diestro en escala de grises con umbral por Media Aritmética

V. CONCLUSIÓN

Aun cuando los algoritmos son clásicos presentan un buen desempeño con excepción del algoritmo de máxima entropía. De los tres espacios de color no se notó una diferencia entre el canal I del espacio HSI y la escala de grises. El espacio de color CIELAB en el canal A presento un mejor desempeño en las etapas Proestro, Estro. Para las etapas Metaestro y Diestro aun cuando la segmentación en CIELAB no fue adecuada esta se puede usar para extraer características al combinarla con alguno de los otros espacios de color, para de esta manera aislar los leucocitos.

RECONOCIMIENTO

Se le agradece al M.V.Z. Cesar Olivera Pérez trabajador del Bioterio Claude Bernard por su ayuda en la capacitación para la toma de muestras del ciclo estral y por la capacitación para la identificación manual de cada etapa del ciclo estral.

REFERENCIAS

- [1] R. R. de la Cruz, R. Pásaro, *Control endocrino del ciclo reproductor en la rata: Una experiencia docente utilizando un método de caracterización citológico*, 1998 Revista de Enseñanza Universitaria, Sevilla, 1998, pp. 545-554.
- [2] E. M. Plissiti, M. Vrigkas, C. Nikou, *Segmentation of cell clusters in Pap smear images using intensity variation between superpixels*, IEEE 184-187 (2015)
- [3] L. Zhang, H. Kong, C.T. Chin, T. Wang, S. Chen, *Cytoplasm segmentation on cervical cell images using graph cut-based approach*, Bio Medical Materials and Engineering, 1125-1131 (2014)
- [4] E. Mariana, N. Christophoros, C. Antonia, *Watershed-based segmentation of cell nuclei boundaries in Pap smear images* IEEE (2010)
- [5] N. Otsu, *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. Vol. 9 No. 1, 62-66 (1979)
- [6] HunterLab, *CIE L*a*b* Color Scale. Applications Note*, Vol. 8 No.7, 1-4 (1996)
- [7] M. Zhao, A. Wu, J. Song, X. Sun, N. Dong, *Automatic screening of cervical cells using block image processing*, Biomedical Engineering OnLine, 1-20 (2016)
- [8] Y. Ma, K. Zhan, Z. Wang, *Applications of Pulse-Coupled Neural Networks* Springer (2010)

Autenticación y Auto-recuperación de una Región de Interés en Imágenes a Color empleando la DCT

Javier Molina-García, Rogelio Reyes-Reyes, Volodymyr Ponomaryov,
Clara Cruz-Ramos, Margarita Tellez-Balderas

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Culhuacán
Maestría en Ingeniería en Seguridad y Tecnologías de la Información
Av. Santa Ana No. 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP. 04430, México, D.F.
Tel. (55) 5729-6000 Ext. 73264 Fax (55) 56562058 email: jmolinag1001@alumno.ipn.mx, rreyesre@ipn.mx

Resumen—Actualmente el uso y distribución de imágenes digitales a través de la internet a crecido vertiginosamente durante los últimos años, y aunado a la creación de múltiples herramientas para el procesamiento de imágenes, las cuales permiten cambiar fácilmente la información contenida en la imagen sin que el espectador final note la presencia de las alteraciones realizadas, esto se convierte en un problema grave con diversas implicaciones tanto legales como sociales, si las imágenes modificadas se difunden. Debido a esta problemática surge la necesidad de llevar a cabo un proceso de autenticación de la imagen digital y la auto-recuperación de la información original, la cual fue alterada. El presente trabajo muestra una técnica de marcado de agua semi-frágil en imágenes a color en la cual una ROI (*Region Of Interest*) es insertada en una ROE (*Region Of Embedding*) dentro de la misma imagen a color, en el dominio de la 2D-DCT y utilizando la matriz de cuantización JPEG, realizando la inserción con el método LSB. Adicionalmente se utilizan las técnicas de súper-resolución, halftoning y halftoning-inverso para procesar la imagen ROI que se inserta y extrae. Los resultados obtenidos demuestran que las imágenes protegidas no son degradadas visualmente y el algoritmo es robusto ante ataques de procesamiento de imágenes como lo son la inserción de ruido y compresión JPEG.

keywords—Autenticación de imagen, Auto-recuperación, DCT, Halftoning, Halftoning-inverso, Marca de agua semi-frágil.

I. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de las tecnologías de información las imágenes digitales han tomado un rol muy importante en diversas áreas como son: la industria del entretenimiento, las redes sociales, la preservación de recuerdos, etc., también son utilizadas para la presentación de evidencia en casos legales, datos utilizados en análisis forense, etc. De la misma manera en la que estos archivos digitales han tomado gran importancia por sus aplicaciones, han surgido múltiples herramientas utilizadas para el procesamiento de imágenes las cuales pueden alterar ciertas regiones de la imagen sin que el espectador note la presencia de las modificaciones realizadas provocando daños económicos y sociales hacia las personas o empresas.

Así, surge la necesidad de autenticar las imágenes digitales y en dado caso que la misma haya sido alterada se pueda recuperar la región modificada. Uno de los métodos utilizados para la autenticación y auto-recuperación de contenido digital son las marcas de agua, las cuales consisten en insertar

información dentro del contenido digital [1-5].

Las características principales de una marca de agua digital son: robustez, imperceptibilidad y capacidad de inserción. Estas tres características están ligadas entre sí, es decir, al momento de modificar una característica las otras se pueden ver afectadas.

Dentro de los métodos para autenticación y auto-recuperación de contenido digital es necesaria una alta capacidad de inserción e imperceptibilidad de la marca de agua; y debido a que la mayoría de las herramientas de procesamiento de imágenes llevan a cabo la compresión JPEG al momento de guardar la imagen modificada, es importante que el sistema sea robusto ante compresión JPEG y ataques de adición de ruido. Para verificar la imperceptibilidad de la marca de agua insertada existen métricas de calidad objetivas que permiten comparar la imagen marcada con la imagen original, estas métricas son el PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*), el MAE (*Mean Absolute Error*) y el SSIM (*Structural Similarity Index Metric*).

Sawiya K. y Toshiaki K. [1] proponen una técnica de marcado de agua en imágenes a color la cual es insertada en el dominio espacial utilizando el método LSB, a la imagen original se le aplica un sub-muestreo para que la marca de agua sea 0.25 veces más pequeña que la imagen portadora, este sistema no reporta la calidad de la imagen marcada y al ser en el dominio espacial utilizando el método LSB no soporta ataques de compresión por lo cual tienden a utilizar imágenes en formato “bmp”. Yuhang Li y Ling Du [2] presentan una técnica de autenticación y auto-recuperación de una imagen en el dominio de la DWT la cual es robusta ante ataques como la compresión JPEG y adición de ruido impulsivo, sin embargo, el sistema es aplicado a imágenes en escala de grises. Sajjad et al. [3] proponen un método de detección y auto-recuperación de regiones alteradas en imágenes a color utilizando una marca de agua frágil, se obtiene buena imperceptibilidad en la imagen marcada y buena calidad en la recuperación de las regiones alteradas pero el sistema no soporta ataques no intencionales como compresión JPEG. Emmanuel Tom y Premanand B. [4] desarrollan una técnica la cual está basada en *Compressed Sensing* y DCT para comprimir la imagen, la inserción de la marca de agua está basada en el método LSB en el dominio espacial, insertando los 4 bits MSB de la imagen comprimida en los 4 bits LSB de la imagen portadora; el sistema no reporta resultados de la calidad de la imagen marcada, está basado en

imágenes en escala de grises obteniendo una imagen recuperada con mucho ruido.

Otro método propuesto por Y.F. Chang y W.L. Tai [5] muestra la inserción mediante el método LSB en el dominio espacial de una marca de agua para la autenticación y auto-recuperación de regiones alteradas en imágenes en escala de grises el cual es un método frágil ante ataques de compresión.

En el presente trabajo se propone un sistema de marcado de agua semi-frágil para autenticar y auto-recuperar una región de interés en imágenes a color. La imagen a color es segmentada en dos regiones: ROI la cual se utiliza como marca de agua para proteger una región importante de la imagen y ROE la cual es utilizada como la región portadora para insertar la marca de agua. El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describe el método de inserción, extracción y autenticación; en la sección III se muestran los resultados experimentales, en la sección IV las discusiones generadas a partir de los resultados, y en V se exponen las conclusiones.

II. MÉTODO PROPUESTO

El sistema propuesto cuenta con tres etapas: inserción de la marca de agua, extracción de la marca de agua y autenticación.

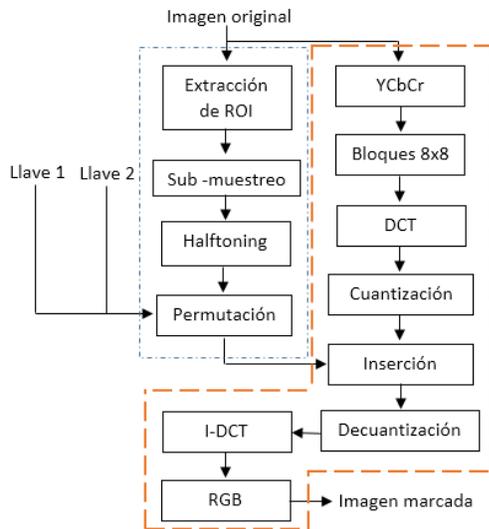


Figura 1. Diagrama a bloques del proceso de inserción de la marca de agua

A. Inserción de la marca de agua.

La figura 1 muestra el diagrama a bloques del sistema propuesto para la inserción de la marca de agua. La etapa de inserción consta de dos fases, la primera consiste en un pre-procesamiento para preparar la marca de agua y la segunda fase consiste en el algoritmo para insertar la marca de agua.

Para generar la marca de agua I^W se aplica el siguiente pre-procesamiento a la imagen a color original denominada I_h .

1. A I_h se le extrae la ROI definida como I^{ROI} la cual debe ser máximo el 18.75% del tamaño de I_h .
2. Se aplica un sub-muestreo a I^{ROI} utilizando el filtro lanczos3 [6], obteniendo I^{Sub} para reducir su tamaño equivalente a $(1/2) * [x, y]$ donde x y y representan el tamaño total de filas y columnas de I^{ROI}

respectivamente.

3. A I^{Sub} se le aplica Halftoning por el método Jarvis [7], para obtener I^{half} .
4. Utilizando dos llaves (Llave 1, Llave2) se permutan las filas y columnas de I^{half} para obtener I^W utilizando dos vectores pseudoaleatorios.

El algoritmo para insertar I^W en ROE consiste en los siguientes pasos.

1. Se convierte I_h del espacio de color RGB al espacio de color YCbCr, tomando el canal de luminancia I^Y en el cual se insertará la marca de agua dentro de la ROE.
2. I^Y es dividida en bloques no traslapados de 8×8 , obteniendo I_B^i donde i representa cada bloque para $i = 1, 2, 3, \dots, B$; donde B representa el número total de bloques.
3. Se aplica la 2D-DCT a cada I_B^i obteniendo I_B^{i-DCT} .
4. Se cuantiza cada I_B^{i-DCT} utilizando la matriz de cuantización JPEG con factor de calidad 70.
5. En cada I_B^{i-DCT} cuantizado se insertan 12 bits de I^W dentro de las regiones mostradas en la Figura 2 por el método LSB obteniendo I_B^{i-DCTW} , lo que equivale a cuatro pixeles de I^W por cada I_B^{i-DCT} cuantizado.
6. A cada I_B^{i-DCTW} se decuantiza utilizando la matriz de cuantización JPEG con factor de calidad 70.

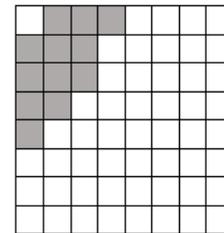


Figura 2. Region de los coeficientes DCT en donde se inserta I^W

7. Se aplica la 2D-IDCT a cada I_B^{i-DCTW} obteniendo todas las I_B^{i-W} marcadas, conjuntando la totalidad de los bloques se obtiene el canal de luminancia marcado I^{YW} .
8. Se transforma la I^{YW} del espacio de color YCbCr al espacio de color RGB para obtener la imagen marcada I^{RGBW} .

B. Extracción de la marca de agua.

La figura 3 muestra el diagrama a bloques de la extracción de la marca de agua.

La etapa de extracción también consta de dos fases, la primera consiste en la extracción de la marca de agua insertada, la cual es una secuencia de bits que componen la imagen halftoning permutada y la segunda fase consiste en obtener una aproximación a la imagen a color por medio de un algoritmo de halftoning inverso, ver figura 4.

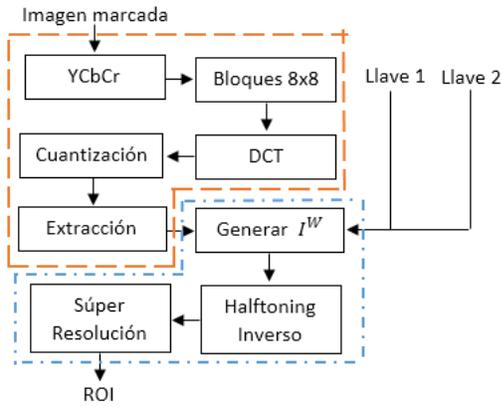


Figura 3. Diagrama a bloques del proceso de extracción de la marca de agua

El algoritmo de Halfoning inverso consiste en cuatro fases:

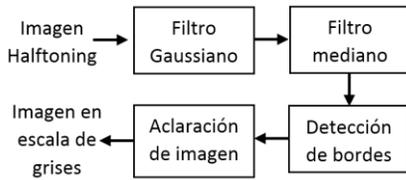


Figura 4. Método halfoning inverso utilizado

1. A la imagen Halfoning I^{half} se le aplica un filtro gaussiano con ventana de 9×9 [8] para obtener una aproximación a la imagen en escala de grises o a color.
2. Se aplica un filtro de mediana con ventana de 3×3 para remover el ruido de la imagen generada.
3. Se aplica una técnica de detección de bordes como en [9].
4. Se aplica la técnica de Enmascaramiento Suavizado para aclarar los bordes más importantes de la imagen de acuerdo a un umbral T usando (1), después de aclarar los bordes más importantes la imagen de salida es llamada I^{SubW} .

$$if \text{borde} \geq T \text{ aclarar_borde} \quad (1)$$

Los pasos para extraer I^{ROI} son los siguientes (Figura 3):

1. A partir de la imagen marcada I^{RGBW} con o sin procesamiento previo se pasa al espacio de color YCbCr y se utiliza el canal de luminancia I^{YW} .
2. I^{YW} es dividida en bloques no traslapados de 8×8 obteniendo I_B^{i-W} .
3. Se aplica la 2D-DCT a cada I_B^{i-W} obteniendo I_B^{i-DCTW} .
4. Se cuantiza cada I_B^{i-DCTW} utilizando la matriz de cuantización JPEG con factor de calidad 70.
5. En cada I_B^{i-DCTW} cuantizado se extraen 12 bits y se construye I^W .
6. Utilizando las dos llaves (Llave 1, Llave2) se genera I^{half} .
7. Se aplica un algoritmo de halfoning inverso mostrado en la Figura 4 para obtener I^{SubW} .
8. Se aplica el algoritmo de super-resolución lanczos3 a

I^{SubW} para obtener una aproximación a I^{ROI} denominada I^{ROIW} .

C. Autenticación

Se compara I^{ROI} de la imagen marcada con o sin procesamiento previo, contra I^{ROIW} utilizando una ventana de 2×2 y calculando el PSNR. Si el PSNR obtenido es mayor a un umbral α se intercambia el bloque de I^{ROIW} por el bloque I^{ROI} de la imagen marcada.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evaluar el sistema propuesto se utilizaron las imágenes mostradas en la figura 5, y la ROI seleccionada para cada una se muestra en la figura 6. Las imágenes portadoras son de tamaño 1024×1024 pixeles y las ROI extraídas de tamaño 384×512 pixeles.



Figura 5. Imágenes host utilizadas a)Airplane b)SailBoat c) Lena d) Girl



Figura 6. ROI utilizadas a)Airplane, b)SailBoat, c) Lena y d) Girl

Para evaluar el método propuesto se realizaron tres pruebas. La primera prueba fue determinar la imperceptibilidad de la marca de agua insertada. En la segunda prueba se evaluó la capacidad de autenticar y auto-recuperar áreas modificadas dentro de la ROI. En la tercera prueba se evaluó la robustez ante ataques de inserción de ruido, y compresión JPEG.

A. Imperceptibilidad de la marca de agua

La imperceptibilidad de la marca de agua fue evaluada utilizando las imágenes mostradas en la figura 5. La tabla 1 muestra los valores de PSNR, MAE y SSIM de la imagen marcada contra la imagen original.

Tabla 1. PSNR, MAE y SSIM de la imagen marcada vs la imagen original

Imagen	PSNR (dB)	MAE	SSIM
Airplane	38.07	2.18	0.9112
SailBoat	37.58	2.35	0.9350
Lena	38.42	2.14	0.9251
Girl	41.56	1.49	0.9542

B. Autenticación y Auto-recuperación

La autenticación y auto-recuperación del sistema propuesto es evaluado quitando regiones de la imagen utilizando GIMP® y realizando compresión JPEG con factor de calidad 85 al momento de guardar la imagen modificada. Se utilizaron las medidas de calidad PSNR, MAE, SSIM y BER (Bit Error Rate) para observar la fidelidad de los resultados obtenidos.

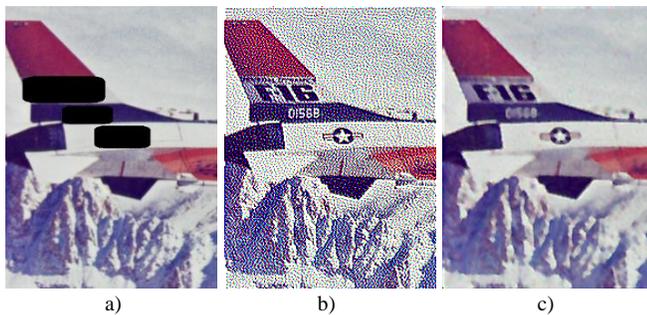


Figura 7. Resultados para la extracción en Airplane. a) ROI alterada, b) Imagen halftoning extraída y c) Imagen halftoning inversa

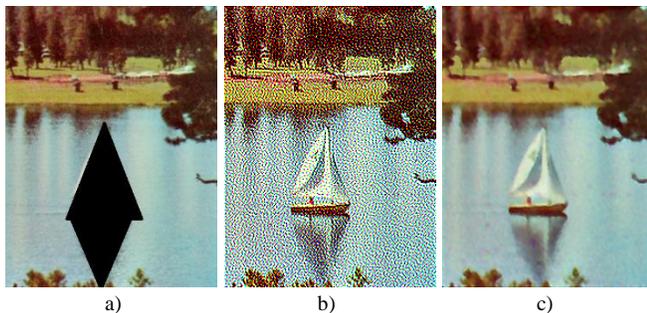


Figura 8. Resultados para la extracción en SailBoat. a) ROI alterada, b) Imagen halftoning extraída y c) Imagen halftoning inversa

Las figuras 7, 8, 9 y 10 muestran los resultados obtenidos en la fase de extracción para las imágenes ROI. Como se puede observar, el presente sistema extrae de manera correcta los bits insertados como marca de agua, los cuales representan la representación de la imagen halftone. Por otra parte, el procesamiento inverso de halftoning permite generar una imagen ROI de aproximación a la ROI original.

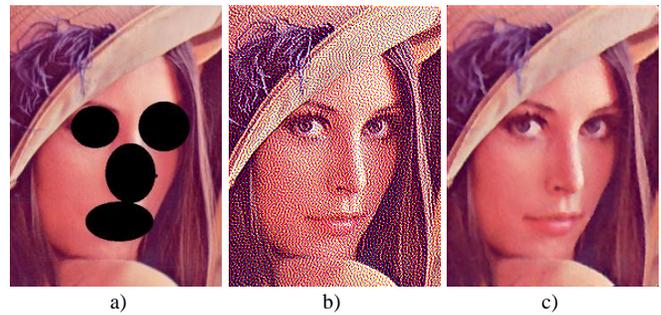


Figura 9. Resultados para la extracción en Lena. a) ROI alterada, b) Imagen halftoning extraída y c) Imagen halftoning inversa

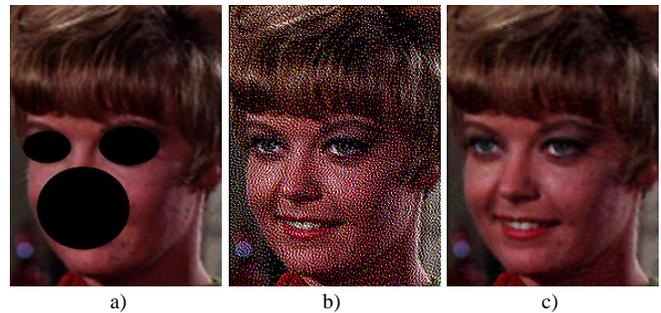


Figura 10. Resultados para la extracción en Girl. a) ROI alterada, b) Imagen halftoning extraída y c) Imagen halftoning inversa

La tabla 2 muestra el PSNR (dB), MAE y SSIM de la imagen halftoning inverso extraída contra la imagen halftoning inverso insertada y el BER de la imagen halftoning extraída contra la imagen halftoning insertada. En la fase de halftoning inverso se utilizó un valor umbral $T=37$ para aclarar los bordes y en el algoritmo de Enmascaramiento Suavizado se utilizó una ventana de 9×9 con un valor para aclarar la imagen de $C=2$.

Como se puede observar, en la imagen ROI extraída después del post-procesamiento aplicado para generar una aproximación a la imagen ROI original, se obtuvieron valores de PSNR mayores a 39 dB, valores de SSIM promedio de 0.99, valores MAE menores a 0.5. Por otra parte, la tasa de bits erróneos promedio es de 0.1% lo cual indica una correcta extracción de la información aunque el sistema sea evaluado ante compresión JPEG con factor de calidad 85.

Tabla 2. PSNR, MAE y SSIM de la imagen extraída vs la imagen insertada y BER del halftoning extraído vs el halftoning insertado.

Imagen	PSNR (dB)	MAE	SSIM	BER
Airplane	39.94	0.44	0.9900	0.0017
SailBoat	41.59	0.36	0.9910	0.0015
Lena	48.86	0.07	0.9983	0.0002
Girl	43.05	0.28	0.9917	0.0011

Durante la etapa de autenticación se utilizó un umbral $\alpha=19$ dB. La tabla 3 muestra los resultados para la etapa de autenticación de la imagen alterada, comparando la ROI recuperada después de la autenticación contra la ROI original.

La calidad de los resultados obtenidos depende directamente de la cantidad de alteraciones realizadas, ya que al recuperar esta información alterada, la calidad de la imagen digital disminuye considerablemente, esto se debe a que durante el procesamiento de reducción de información (halftoning) y el procesamiento inverso existe una pérdida de información. Otro

factor que afecta en la calidad de la imagen reconstruida es la cantidad de texturas que contiene, debido a que existe una cantidad de detecciones falsas en las partes de bordes, las cuales son reemplazadas por la imagen extraída.

Tabla 3. Imágenes obtenidas después de la autenticación

	Imagen de error	Imagen recuperada	
Airplane			PSNR (dB) 26.99 MAE 4.56 SSIM 0.8999
SailBoat			PSNR (dB) 29.08 MAE 4.88 SSIM 0.8421
Lena			PSNR (dB) 30.56 MAE 3.66 SSIM 0.8987
Girl			PSNR (dB) 34.02 MAE 2.44 SSIM 0.9347

C. Robustez ante inserción de ruido y compresión JPEG

La robustez del método propuesto ante ataques intencionales y no intencionales se evaluó utilizando inserción de ruido impulsivo, ruido gaussiano y compresión JPEG. Las figuras 11, 12 y 13 muestran el PSNR entre la imagen recuperada después de la autenticación contra la ROI original para los ataques compresión JPEG, ruido impulsivo y ruido gaussiano respectivamente. Debido a que el sistema está basado en la DCT, presenta una mayor robustez a compresión JPEG. La robustez a ruido impulsivo es de hasta un valor de densidad de ruido de 0.4×10^{-3} , por otra parte, la robustez a adición de ruido gaussiano es de hasta con un valor de varianza de 1×10^{-4} , obteniendo un valor en PSNR de 30 dB aproximadamente.

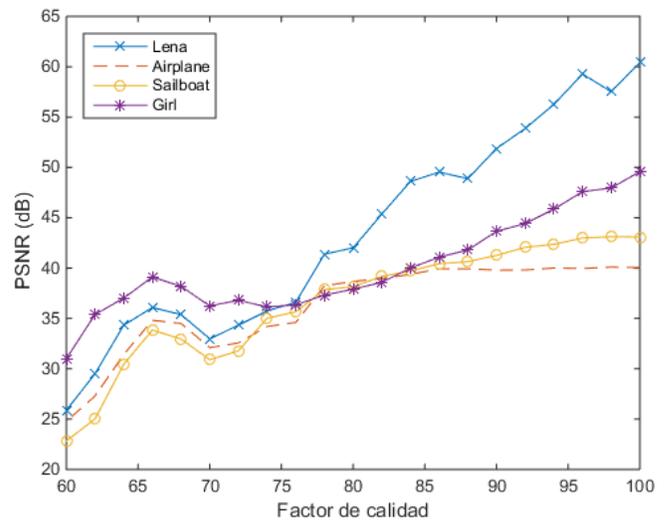


Figura 11. PSNR entre la imagen halftoning inversa extraída contra la imagen halftoning inversa insertada para el ataque de compresión JPEG

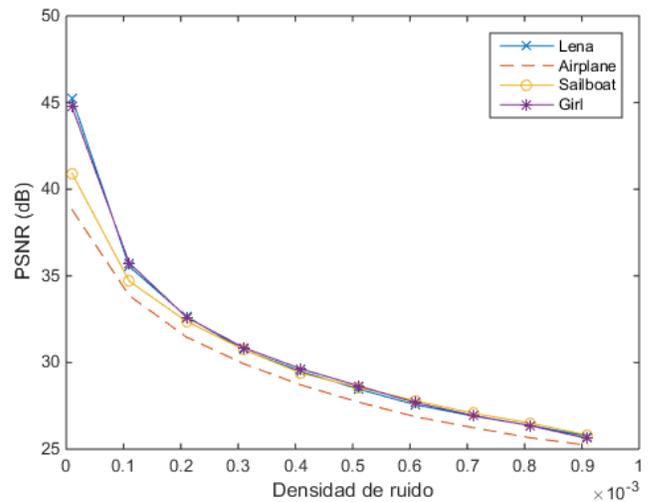


Figura 12. PSNR entre la imagen halftoning inversa extraída contra la imagen halftoning inversa insertada para el ataque de ruido impulsivo

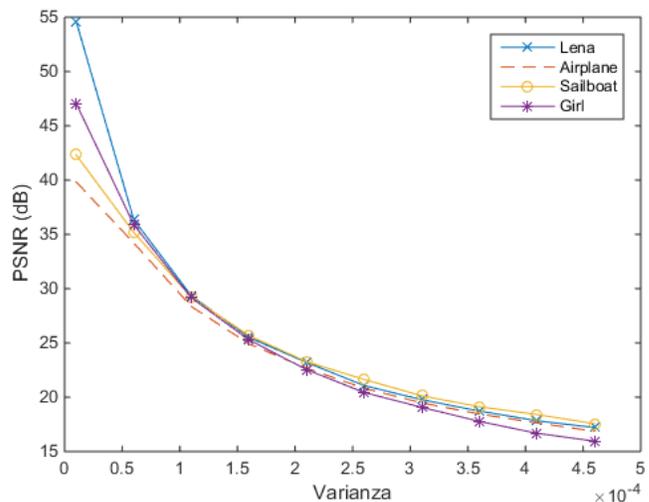


Figura 13. PSNR entre la imagen halftoning inversa extraída contra la imagen halftoning inversa insertada para el ataque de ruido gaussiano

Las figuras 14, 15 y 16 muestran el BER entre la imagen halftoning insertada contra la imagen halftoning extraída para los ataques de compresión JPEG, ruido impulsivo y ruido gaussiano respectivamente. La tasa de bits erróneos ante compresión JPEG obtiene valores satisfactorios para factores de calidad de hasta 65, ya que para un valor menor a este la tasa de bits erróneos aumenta significativamente. La tasa de bits erróneos ante ataques de adiciones de ruido muestra resultados similares a los mostrados en PSNR, SSIM y MAE, donde se puede observar que el sistema propuesto soporta adición de ruido a diferencia de otros sistemas los cuales están basados en su totalidad en el método de inserción LSB.

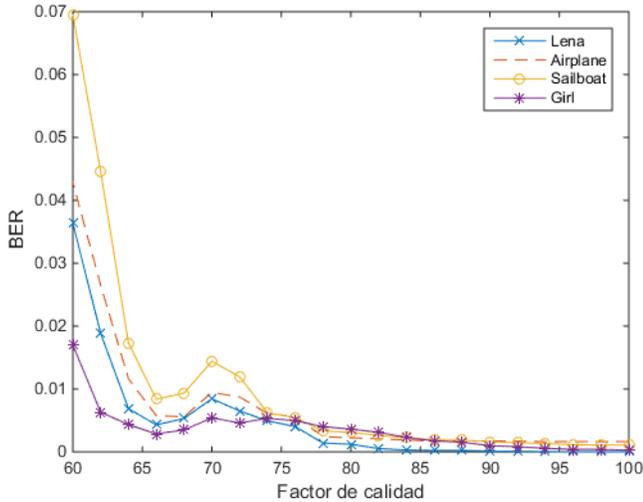


Figura 14. BER entre la imagen halftoning insertada contra la imagen halftoning extraída para el ataque de compresión JPEG.

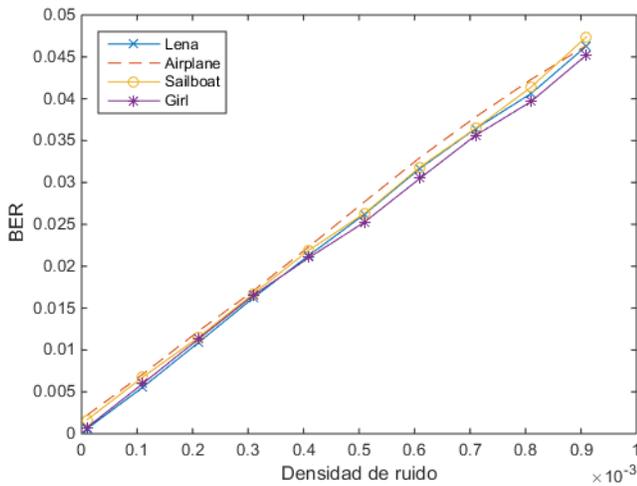


Figura 15. BER entre la imagen halftoning insertada contra la imagen halftoning extraída para el ataque de ruido impulsivo.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la tabla 1 muestran un PSNR mayor a 35 dB el cual es aceptable, la marca de agua insertada se puede considerar invisible al ojo humano. Los resultados en la tabla 2 demuestran una buena calidad al recuperar la imagen a color para posteriormente autenticar la imagen alterada, la tabla 3 muestra la imagen de error de cada ROI alterada, en la

cual los falsos positivos detectados se deben a la compresión utilizada al momento de guardar la imagen modificada y a la pérdida de información que se tiene al momento de realizar el algoritmo halftoning – halftoning inverso, pero de manera general, se observa una buena recuperación de las regiones modificadas.

La compresión JPEG máxima soportada es utilizando un factor de calidad QF=65; sin embargo, se puede emplear una tabla de cuantización de una calidad menor, haciendo posible mejorar la robustez del sistema ante compresión JPEG, pero la calidad de la imagen marcada puede disminuir. Se eligió el factor de calidad 70 debido a que la mayoría de los programas de edición de imágenes comprimen por defecto con calidad mayor a 70. Por último, es posible proteger una ROI mayor a la utilizada de 18.75% en la cual se insertaron 12 bits en cada bloque de 8x8, esto mediante la inserción de una mayor cantidad de datos en cada bloque, lo que afectara la calidad de la imagen marcada protegida.

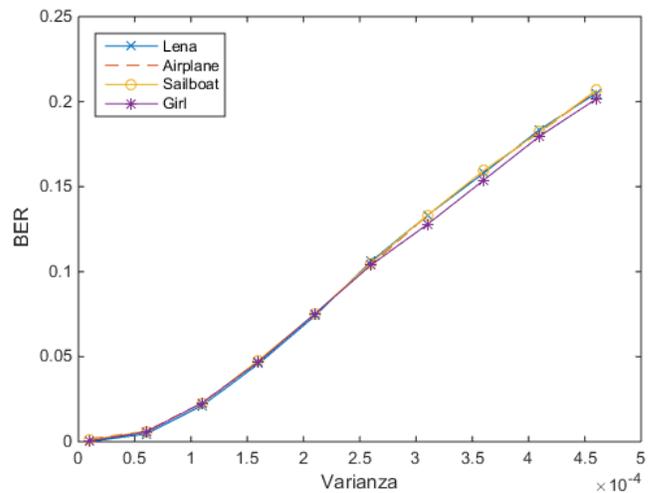


Figura 16. BER entre la imagen halftoning insertada contra la imagen halftoning extraída para el ataque de ruido gaussiano

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propone un algoritmo de autenticación y auto-recuperación de una región de interés para imágenes digitales a color, utilizando una marca de agua semi-frágil la cual es insertada por el método LSB en el dominio de la 2D-DCT, utilizando una matriz de cuantización JPEG para que el sistema sea robusto ante compresión. La compresión de la región de interés a proteger para ser insertada es basada en una técnica de súper-resolución y halftoning; así mismo, se utiliza el proceso de halftoning inverso para recuperar la región de interés.

La eficiencia del sistema quedo demostrada mediante la realización de tres pruebas: imperceptibilidad de la marca de agua insertada, robustez ante ataques de adición de ruido y compresión JPEG y la capacidad de autenticar las áreas modificadas y auto-recuperar la información. Los resultados experimentales muestran que la marca de agua insertada es invisible ante el HVS, es robusto ante ataques intencionales y

no intencionales de adición de ruido y compresión JPEG.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA) del IPN y a la Beca de Estimulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI) del IPN por el apoyo otorgado para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Kiatpapan, S., Kondo, T. (2015 June) An image tamper detection and recovery method based on self-embedding dual watermarking. *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. Hua Hin Thailand.
- [2] Yuhang Li, Ling Du. (2014 October) Semi-fragile watermarking for image tamper localization and self-recovery. *Security, Pattern Analysis, and Cybernetics (SPAC)*. pp. 328-333.
- [3] Sajjad Dadkhah, Azizah Abd Manaf, Somayeh Sadeghi. (2014 October) An Efficient Image Self-recovery and Tamper Detection Using Fragile Watermarking. *11th International Conference, ICIAR 2014, Vilamoura, Portugal*. pp. 504-513.
- [4] Tom, E., Premanand, B. (2013 December) Watermarking for self-recovery of tampered images using compressed sensing. *Control Communication and Computing (ICCC)*. pp. 479 – 484.
- [5] Y.-F. Chang y W.-L. Tai. (2013 June) A block-based watermarking scheme for image tamper detection and self-recovery. *Opto-Electronics Review*. Volume 21, Issue 2, pp. 182-190.
- [6] *Graphics Gems I*. Andrew S. Glassner. Academic Press, Inc. 1990.
- [7] J. F. Jarvis, C. N. Judice, and W. H. Ninke, (1976). A survey of techniques for the display of continuous-tone pictures on bilevel displays, *Comput. Graph. Image Process*, vol. 5, pp. 13–40.
- [8] N. Damera-Venkata, T. D. Kite, M. Venkataraman, y B. L. Evans (1998 October) Fast Blind Inverse Halftoning. *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing*.
- [9] Thomas D. Kite, Niranjan Damera-Venkata. (2000 September) A fast, high-quality inverse halftoning algorithm for error diffused halftones. *Image Processing, IEEE Transactions on* (Volume: 9, Issue: 9) pp. 1583 – 1592.

Watermarking scheme based on digital image preprocessing

Delgado Guillen L.A., Esquivel Salas A., Salas Guzmán M. I., Arredondo Salcedo D., Molina Wong M. R.
 Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte
 Km. 3 Carr. a González Ortega, Río Grande, Zacatecas, 98400, México
 e-mail: {lorenzo.delgado, abraham.esquivel, ignacio.salas, daniel.arredondo, molina.wong}@itszn.edu.mx

Abstract— This paper present watermarking implementation scheme based on image preprocessing using a mobile device. The proposed system is able to detect, extract and recover the watermark on digital images after desynchronization attacks. To improve the recovery of the watermark, the image captured by the mobile device is preprocessed. Fourier Discrete Transform (DFT) is used for inserting and detecting digital watermark. The Hamming distance is used to correct the errors in the recovery of the watermarking. Experimentation results show the effectiveness of the proposed approach.

Keywords; *Preprocessed; Watermarking; DFT; Hamming distance.*

I. INTRODUCTION

Currently there are many technologies that can be used to add information to a digital image; some of the most common are QR codes (Quick Response Codes), bar codes and digital watermarks. Each of these technologies presents different characteristics either strength, safety, imperceptibility, etc. Addition of additional information to the images to make them more attractive to producers and consumers may be of interest in agricultural production areas such as greenhouses, or commercial interest advertising applications, although, for this task are currently used QR codes, watermarks can be another alternative with the advantage of being invisible to the user.

The preprocessed of the image and detection algorithm is implemented on a mobile device. The experimental results demonstrated greater robustness and better level of imperceptibility of the watermark. The distortions can be caused by either intentional or unintentional attacks. Intentional attacks are those manipulations carried out deliberately to remove, modify or delete a watermark. On the other hand, unintentional attacks are those where it is not known that the watermark exists and this is subject to almost inevitably, for example, JPEG compression, digital-analog (D/A) and analog-digital (A/D) conversion, among others. In this context, is necessary to implement techniques that ensure correct recovery of the original message.

Watermarking technology in digital images must meet several requirements, some of them are: imperceptibility of the watermark embedded in the digital image, robustness against attacks and not ambiguity. A digital watermark is

called imperceptible if the watermarked image does not present visual distortion due to the insertion of the watermark. A digital watermarking called robust if it is resistant to intentional and unintentional attacks. No ambiguity in watermark means that the watermark extracted or detected should be sufficiently clear and unmistakable.

In this paper we propose preprocess the image captured by the mobile device for improve the recovery of the original message. On other hand, the image captured by the mobile device is preprocessed to improve the recovery of the watermarking. Even after of digital-to-analog and analog-to-digital conversion process. The proposed insertion method is non-invasive to the marked image and message recovery is transparent to the user.

This paper is organized as follows: in section II, we describe some of the most relevant works in the literature. Section III contains the description of the process of insertion and detection of the watermark. Experimental results are presented in section IV. Finally, section V concludes this paper.

II. RELATED WORK

Many watermarking schemes have been proposed in the past few years, the use of digital watermarking in the mobile devices is an idea that is currently being explored, there are some commercial applications that work with watermarking, which have an added value, some of them developed by Digimarc Corporation [3]. Watermarks are applied in different areas of science. Cox et al. [4] proposed a scheme of digital watermarking in images using the Discrete Cosine Transform (DCT). Other scheme is proposed by Poljicak et al. [5], they insert the watermark in the medium frequency of an image, using the DFT. In the context of mobility Nakamura et al. [6] used a cell phone camera to detect the watermark in an image, in their scheme, a frame is placed around the image to rectify geometric distortion that occurs when photographing. On other hand, Kim et al [7], proposed an image fingerprinting scheme, the model is performed by a photo printer and digital camera, which embed information into spatial domain of color image. Wong [8], Proposed an algorithm of verification of image integrity using a public key of watermarking, Which is able to detect any changes made to the image, Including changes in pixel values and image size. Christopher et al. [9]

implement digital watermarking in medical images using mobile devices for data authentication. Many proposed watermarking systems include an ECC stage. Jeedella [10] proposed a scheme for embedding phone numbers into color image captured by a mobile device, they propose the use of an error correction code (BCH) to protect the embedded phone number digit. In this paper, preprocessing of image for recuperation exact of the watermark using a mobile device is proposed.

III. THE PROPOSED WATERMARKING ALGORITHM

The proposed algorithm is divided into two parts: the insertion and extraction of the watermark, which is based on the scheme proposed by Kang et al. [12]. On the other hand, in the extraction process a preprocessing of the image captured by the mobile device is performed, which improves the recovery of the watermark. The preprocessing of the image consists in selecting only the marked image, then correcting any possible geometrical distortions that the image may have. The results obtained are shown in the experimentation phase. Using the validation module proposed by L. Delgado-Guillen et al. [13] where implements a technique for threshold selection based on Neyman-Pearson criterion. The system implements an error correction technique based on Hamming distance. The technique is used in the detection process of a watermark embedded in an image subject to a screen-cam process [11]. Fig. 1 shows a general scenario for insertion and detection of a watermark in a digital image using a mobile device.

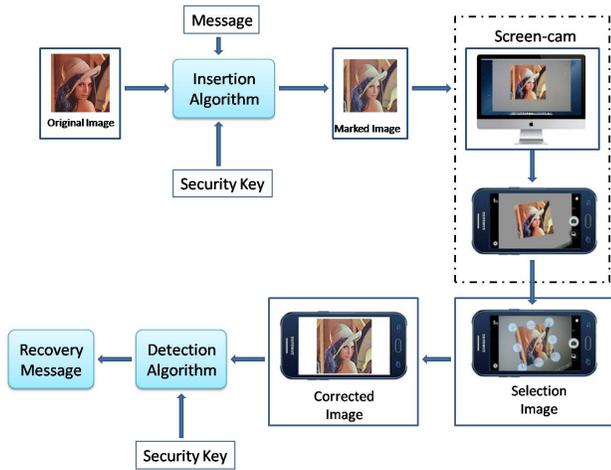


Fig1. General scenario for insertion and detection of a watermark.

3.1 Watermark Embedding Scheme

The digital watermark W of size $M \times N$ composed of a tracking sequence and informative message (payload), is arranged in the log-polar Fourier domain. First, a message of 12 bits is encoded using an error correction code (Message

redundancy) to obtain a message of 60 bits. After, each bit of message is direct sequence spread-spectrum encoded. Second, using a secret key that represent the seed of the pseudorandom number generator, the pattern tracking and PN-sequence \mathbf{p} of p_i elements is obtained, using the Lehrer's algorithm [1] based on (1) and (2). The tracking sequence is used to resynchronize the watermark. Then we arrange all bits into a 1D vector, with which subsequently form an $M/2 \times N/2$ matrix, where $M=64$ and $N=360$. The obtained matrix is upsampled, along the rows and columns, respectively, by a factor of 2 to obtain an $M \times N$ 2D matrix W . The insertion algorithm was implemented in MatLab, it is important to mention that the marked image is saved in BMP file format. Fig. 2 shows the interface of the embedding algorithm in MatLab.

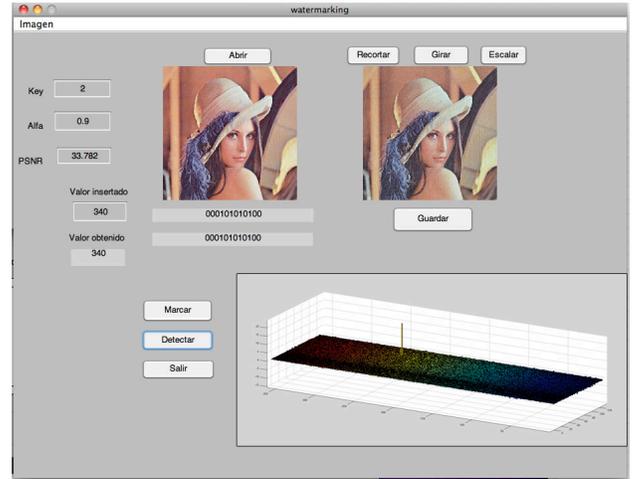


Fig 2. Interface of the watermark insertion algorithm

$$\begin{cases} z_1 = \frac{kz_{i-1}}{m} \text{ fmod } 1, i \geq 1 \\ z_0 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_i = \begin{cases} +1 & \text{if } z_i \geq 0.5 \\ -1 & \text{if } z_i < 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

Where k is the seed and m is real value, 0.9 in this work. Note that z_i only takes real values in $[0,m]$. fmod returns the floating-point remainder of the division.

The luminance values of the original image are transformed in the Fourier domain, and the low frequency components are moved to the center, the center is used as the origin of the Cartesian plane. The watermark is embedded in DFT coefficients according to its discrete log-polar coordinate (l_1, l_2) which is obtained with (3).

$$l_1 = \left\lceil \left(\log_a \frac{r}{R} \right) + \frac{M}{2} \right\rceil \quad (3)$$

$$l_2 = \left\lceil \left(\frac{N \cdot \phi}{\pi} \right) \right\rceil$$

Where $r = \sqrt{u^2 + v^2}$, $\phi = \arctan(u/v)$, the base a is defined as $a = 2^{1/M}$, R is referred to as the base frequency, u and v are the rectangular coordinates.

The watermark is inserted in the magnitude coefficients of the original image applying a multiplication as shown below:

$$c'(u, v) = c(u, v) \times (1 + \alpha \cdot w(l_1, l_2)) \quad (4)$$

Where $c(u, v)$, $c'(u, v)$ are the Fourier magnitude coefficients before and after embedding. α is the embedding strength; after abundant experiments α is determinate to be 0.9 in this work. Finally, the watermarked magnitude coefficients $c'(u, v)$ are combined with the phase coefficients of the original image and the inverse DFT is applied to obtain the watermarked image. To evaluate the quality of the image after the embedding process the PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) [14] was used. The embedding scheme is shown in Fig. 3.

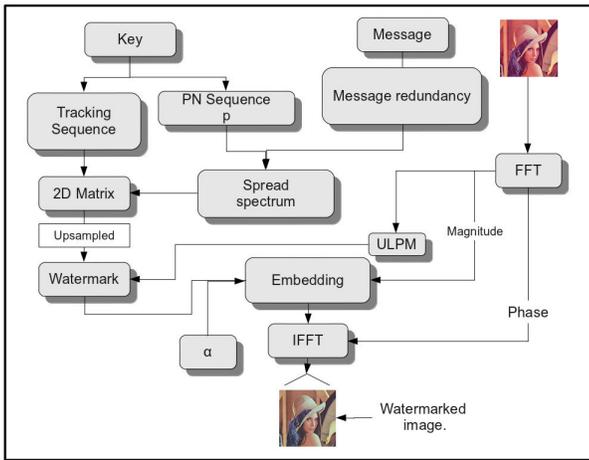


Fig. 3. Embedding scheme based on ULPM.

3.2 Scheme for detection/extracton and correction of watermark

The watermark detection/extracton does not require the original image, the only requirement is the key used for the generation of the tracking sequence and the PN-sequence \mathbf{p} . The watermark detection/extracton and correction process is illustrated in Fig. 4, divided into four steps.

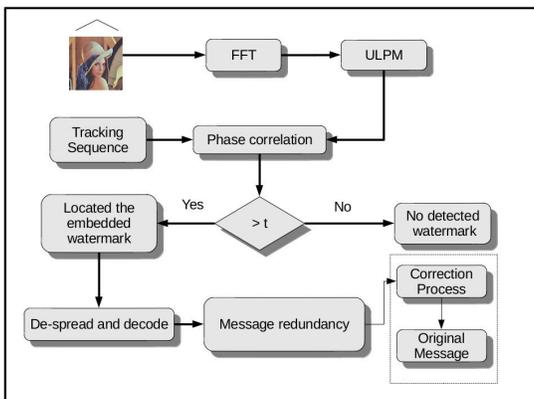


Fig. 4. Detection/extracton and correction process.

1) *Preprocessing of image.* The main contribution of this work is focused primarily on the preprocessing of image, which consists of in selecting only the marked image, subsequently correcting possible unintentional geometric attacks included in the image, such as rotation and translation. For selection and correction of the image is used ScanLibrary, built on OpenCV Framework, this library is used to scan the image captured by the mobile device, using this library is possible select the exact edges and crop the image exactly from the selected four edges and change the perspective transformation of the cropped image. This preprocessing has positive effects on the detection and extraction of the watermarking and the recovery the original message. An example of a selected image and the result obtained after being processed is shown in Fig. 5.



Fig. 5. Image preprocessing scheme.

2) *Detection process.* The watermark detection is positive if the maximum value of phase correlation exceeds the threshold value t [13]. To calculate an approximate value of the threshold, we considered the following alternative hypotheses:

- H_0 : Watermark is not actually present.
- H_1 : Watermark is present.

According to the Neyman-Pearson criterion, the detection threshold consists in trying to minimize the overall error probability when the watermark is not actually present, the False alarm probability P_{fa} . From the statistical point of view, if a threshold t and the variance σ^2 of the correlation values are given, the P_{fa} is calculated as follow:

$$P_{fa} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{t}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \quad (5)$$

Where $\operatorname{erfc}(\cdot)$ is the complementary error function defined as:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2) du \quad (6)$$

Therefore, the threshold t is given by.

$$t = \sqrt{2\sigma^2} \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{fa}) \quad (7)$$

In this paper $P_{fa} = 10^{-3}$.

In the scheme of detection/extracton proposed by Kang [12], first, the pattern of tracking and PN-sequence \mathbf{p} are generated by a key (1) and (2), which is known by the detector, to obtain \mathbf{W}_2 matrix. Then the log-polar transformation in (3) is applied to the frequency index, to obtain the log-polar coordinate (l_1, l_2) . $F(l_1, l_2)$ ($0 \leq l_1 < 2M, 0 \leq l_2 < N$). \mathbf{W}_2 is padded with 0s to obtain a new matrix $g(l_1, l_2)$ of the same

size than \mathbf{F} . The watermark is resynchronized using phase correlation to find the matching location as follows:

$$\begin{aligned} r(k_1, k_2) &= IDFT[\bar{F}_\theta(u, v)G^*(u, v)] \\ \bar{F}_\theta(u, v) &= e^{j\theta} \bar{F}(u, v) \end{aligned} \quad (8)$$

Where $\bar{F}(u, v) = DFT(F(l_1, l_2))$, $\theta_{\bar{F}}(u, v)$ is the phase of $\bar{F}(u, v)$, $G(u, v) = DFT(g(l_1, l_2))$, and $G^*(u, v)$ represents the complex conjugate of $G(u, v)$.

After, we find the maximum phase correlation of $r(k_1, k_2)$ and compare the value obtained from the matching position (Fig. 6) with a threshold t defined above, to determine if the watermark is present or not. The extraction process is performed only if the maximum value of phase correlation exceeds the threshold value t .

3) *Extraction process.* In this process we obtain the resynchronized magnitude coefficients matrix $\hat{F}_u(l_1, l_2)$ ($0 \leq l_1 < M, 0 \leq l_2 < N$). $\hat{F}_u(l_1, l_2)$ is down-sampled to obtain the magnitude coefficients matrix $\hat{F}(l_1, l_2)$ ($0 \leq l_1 < M/2, 0 \leq l_2 < N/2$) and form a sequence W_i , which corresponds to the embedded spread spectrum sequence, and correlate it with the original PN-sequence \mathbf{p} . If the value of correlation is greater than 0, we estimate that the extracted bit is a "1", otherwise a "0". The value correlation is obtained as follows:

$$\begin{aligned} W_i^* \cdot \mathbf{p} &= \sum_{w^* \in w_+^*} w_j^* - \sum_{w^* \in w_-^*} w_j^* \\ &= \frac{N_p}{2} (E\{f(c'_{j+})\}) \\ &= \frac{N_p}{2} (E\{f(c_j) + \alpha c_j f'(c_j)\} - E\{f(c_j) - \alpha c_j f'(c_j)\}) \\ &= N_p \alpha E\{c_j\} (E\{f'(c_j)\}) > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Where $w_+^* = \{w^*(j) | p_j = 1\}$, $w_-^* = \{w^*(j) | p_j = -1\}$, $E\{\}$ denotes the statistical operator of the expected value.

The correlation matrix of the watermarking is shown in Fig. 6.

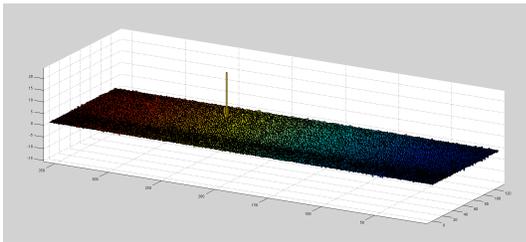


Fig 6. Correlation matrix.

4) *Process Correction.* Message correction is performed after extraction the watermark in the domain DFT Y-component on color images using a mobile device. The watermark detection algorithm is resistant to geometric distortion, digital-analog (D/A) and analog-digital (A/D) conversion.

After recovering the informative message $\{X\}$ of K bits (payload), the lowest Hamming distance is calculated between

code words X and X_i , where $K = 12$, X_i is an alphabet of N sequences generated (Table I), $i=1 \dots N$, of these sequences is the original informative message inserted into the digital image, $N=256$. The alphabet has been generated with a minimum distance of 3 between each code, because a minimum distance of 1 or 2 is inconvenient to generate a code to detect an error. With a minimum distance of 1 no values for whether or not an error, and a minimum distance of 2 may be erroneous data that can be passed as correct data. In other words, to detect n -bit errors between two words, a code is needed with a minimum Hamming distance of $n + 1$, and to correct n -bit errors need a code with a minimum Hamming distance $2n + 1$. In the decoding of the message we selected the code word of the alphabet with the minimum Hamming distance between alphabet Coding Sequences and the received code [11].

IV. EXPERIMENTS AND RESULTS

The proposed scheme, was firstly tested with data obtained in a controlled environment, that is, the images were not subject to the process of digital-analog and analog-digital conversion, which is based on the scheme proposed by L. Delgado-Guillen et al. [13]. The implementation was done in MATLAB programming language. Fig. 4 shows one example of watermarked image.

For the experiments in a D/A-A/D scenario, the screen of a Mac computer was used to display the image. An application in Java and C programming languages using JNI (Java Native Interface) was developed and a mobile phone (SM-G318ML) with a 3.1 megapixel resolution camera (2048x1536) running the Android 4.4.4 OS, processor Spread rum 1.2 GHz (Dual Core), is utilized as validation platform. The test image was scaled to 512 x 512 pixels. In order to compute the Discrete Fourier Transform, the FFTW3 [15] library is used. Due to hand movements and the inclination of the mobile device, the rotation of the image was approximately $\pm 5^\circ$. The distance between mobile device camera and the image was approximately 40 \pm 5 cm. These conditions were determinate according L. Delgado-Guillen et al. [13]. Detection is carried out on pictures captured with the cell phone camera; moreover, the screen of a Mac computer is used to display the digital image with the watermark. Therefore, the images are subject to process of digital-analog conversion and analog-digital in a screen-cam process. Several attacks as digital-analog (D/A) and analog-digital (A/D) conversion, rotation, scaling and translation are presented in these images. Results of scaling and rotation attacks for a set of 15 images after D/A and A/D conversion are shown in Table I. From Table I. is possible to observe the high percentage of correlation, implementing a preprocessing to the image, improving the recovery of the original message. This behavior shows that the proposed system can be useful in mobile applications as shown in Fig. 1.

TABLE I. RESULT OF RECOVERY OF THE ORIGINAL MESSAGE.

N.Img	% Corr	% Scaling	Grad. Rot	Errors	Rec. Msg.
1	10.660	0	0	1	Yes
2	10.847	0	0	1	Yes
3	12.244	0	0	0	Yes
4	9.861	0	0	2	No
5	11.035	0	0	1	Yes
6	9.355	0	0	0	Yes
7	11.027	0	0	0	Yes
8	7.936	0	0	0	Yes
9	7.723	0	0	0	Yes
10	9.356	0	0	0	Yes
11	11.027	0	0	0	Yes
12	7.936	0	0	0	Yes
13	10.743	0	0	0	Yes
14	7.208	0	1	0	Yes
15	8.264	-1	1	1	Yes

V. CONCLUSIONS

This paper presents the evaluation of a watermarking system for color images using a mobile platform for the detection and extraction of data after a process of segmentation and correction of some possible geometric attacks in a marked image. The proposed system is able to detect and correct an error in the recovered data. Moreover, the values of PSNR of watermarked image are perceptually acceptable. The results obtained are shown in to the chapter IV Table I, which validate the performance of the proposed scheme.

ACKNOWLEDGMENTS

The work reported in this paper was partially sponsored by Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte and Tecnológico Nacional de México, (Projects 358.15-PD and 359.15-PD). In addition, our recognition to the “Laboratorio de Inteligencia Ambiental de la Universidad Autónoma de Madrid”.

REFERENCES

[1] B. Mauro and B. Franco, *Watermarking Systems Engineering. Signal Processing and Communications.*, rev. ed. CRC Press, 2004.

[2] L. Delgado-Guillen, J. Garcia-Hernandez, and C. Torres Huitzil, “Digital watermarking of color images utilizing mobile platforms,” in *Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on, Aug 2013, pp. 1363–1366.

[3] G. Rhoads, “Digimarc Corporation,” 1994, last access: June 29, 2012. [Online]. Available: <http://www.digimarc.com/>

[4] I. J. Cox., T. L. Killian, and T. Shamoan., “Secure spread spectrum communication for multimedia,” *Tech. Rep.*, 1995.

[5] A. Poljicak, L. Mandic, and D. Agic, “Robustness of a DFT based image watermarking method against am halftoning,” *Technical Gazette*, vol. 18, no. 2, Jun 2011, pp. 161–166.

[6] T. Nakamura, A. Katayama, M. Yamamuro, and N. Sonehara, “Fast watermark detection scheme for camera-equipped cellular phone,” in *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile and ubiquitous multimedia*, ser. MUM ’04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 101–108.[Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1052380.1052395>

[7] W.-g. Kim, S. Lee, and Y.-s. Seo, “Image fingerprinting scheme for print-and-capture model,” in *Advances in Multimedia Information Processing - PCM 2006*, ser. Lecture Notes in Computer Science, Y. Zhuang, S.-Q. Yang, Y. Rui, and Q. He, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, vol. 4261, pp. 106–113.

[8] P. W. Wong, “A public key watermark for image verification and authentication, in *Image Processing*,” *ICIP 98. Proceedings. 1998 International Conference on*, vol. 1, oct 1998, pp. 455-459.

[9] N. Christopher, K. Gautam, C. V. Ramesh, and W. Taehyung (George), “Digital watermarking of medical images for mobile devices,” in *Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC)*, 2010 IEEE International Conference on, June 2010, pp. 421 – 425.

[10] J. Jeedella and H. Al-Ahmad, “An algorithm for watermarking mobile phone colour images using BCH code,” pp. 303–306, February 2011.

[11] Delgado Guillen L.A., Esquivel Salas A., Salas Guzmán M. I., Arredondo Salcedo D., Salas Torres J.M., “Algorithm for Watermarking Mobile Phone Colour Images Using Hamming Distance,” *IV Congreso Internacional de Robótica y Computación (CIRC)*, May 2015, pp. 42-46.

[12] X. Kang, J. Huang, and W. Zeng, “Efficient general print scanning resilient data hiding based on uniform log-polar mapping,” *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 1, march 2010, pp. 1–12.

[13] L. Delgado-Guillen, J. Garcia-Hernandez, and C. Torres Huitzil, “Validating the existence of watermarks on digital images using a mobile phone,” in *Internet Technology And Secured Transactions*, 2012 International Conference for, Dec 2012, pp. 51–55.

[14] S. Ghannam and F. Abou-Chadi, “Enhancing performance of image watermarks using wavelet packet,” in *Computer Engineering Systems*, 2008. ICCES 2008. International Conference on, Nov. 2008, pp. 83–87.

[15] M. F. and S. G. Johnson, “The design and implementation of fftw3,” *Proc. IEEE*, vol. 93, , 2005, pp. 216–231.

Criptografía Visual Extendida Mediante el Método Esteganográfico Estocástico de Difusión de Error

Pamela L. Nieves-de-la-Cruz, Margarita E. Ordoñez-Mendoza, Clara Cruz-Ramos, Rogelio Reyes-Reyes

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Culhuacan
Departamento de Ingeniería en Computación
Av. Santa Ana No. 1000, Col. San Francisco Culhuacan, CP. 04430, México, D.F.
Email: pnievesd1000@alumno.ipn.mx, ccruzra@ipn.mx, rreyesre@ipn.mx

Resumen- Hoy en día la alteración de imágenes digitales puede realizarse con gran facilidad gracias a herramientas de software sin la necesidad de ser un experto en el uso de estas, provocando que el robo de información digital aumente, el cuál es uno de los principales problemas que se enfrenta al compartirse la información, ya que esta puede contener datos valiosos de diferente índole (social o privada), por lo tanto, existe la necesidad de asegurar los datos mediante protocolos de protección como lo es la criptografía visual. Basado en esta problemática se propone una solución mediante un algoritmo que asegure la información utilizando el secreto compartido entre una entidad (grupo de personas). El algoritmo propuesto brinda confidencialidad y seguridad al momento de transmitir la información para que personas ajenas a ella no puedan tomarla y utilizarla para fines maliciosos como la extorsión, las estafas, el lucro, el fraude por Internet o robo de información, etc., los cuales pueden causar graves consecuencias legales. Los resultados obtenidos de la propuesta de solución muestran una alta calidad en la imagen portadora, en los secretos compartidos y en la imagen oculta recuperada con respecto a la imagen oculta original, obteniendo un valor promedio de PSNR entre la imagen oculta recuperada y la imagen oculta de 44 dB.

Palabras clave—criptografía visual, esteganografía, halftoning, difusión de error, secreto compartido.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la comunicación es muy esencial entre los seres humanos; gracias al desarrollo tecnológico, el Internet ha tenido una evolución significativa, convirtiéndose en el primer medio de distribución de las imágenes digitales; sin embargo, la generación, copiado, transmisión y modificación de estas se realiza de una manera sencilla, sin necesidad de ser expertos en el manejo de ciertas herramientas (software), debido a esto, surge la necesidad de mantener segura y privada la información en las imágenes digitales que deseamos transmitir por algún medio electrónico evitando que hagan mal uso de ella. Existen técnicas que proporcionan seguridad a la información como lo son las marcas de agua, esquemas criptográficos visuales y técnicas esteganográficas, las cuales cubren algunos de los requisitos antes mencionados [1-3].

La criptografía se basa principalmente en el intercambio seguro de información entre un grupo de personas por medio de un mensaje compartido el cual es irreconocible y cuenta con una clave de cifrado (conocida también como llave) que recupera la información original, de tal forma que ninguna persona ajena a este grupo (no autorizada) pueda acceder y hacer uso de la información que está siendo transmitida; así, el objetivo principal de cifrar los datos es hacerlos ilegibles garantizando su protección y evitando que la información esté disponible para personas mal intencionadas.

Los esquemas criptográficos visuales (véase la figura 1), son protocolos criptográficos que codifican un mensaje formado mediante una imagen definida por píxeles en vez de codificar un mensaje de texto definido por letras y números. Los esquemas visuales se definen a partir de los esquemas umbrales y han dado lugar al nacimiento de la criptografía visual [4].



Fig. 1. Esquema general de cifrado.

donde I_D es la imagen digital que se desea proteger por medio de un algoritmo de cifrado, I_C es la imagen cifrada que pasa por un medio de transmisión e I_{DR} es la imagen I_D recuperada.

La esteganografía es una técnica que es utilizada para ocultar información en un medio portador (video, imagen, etc.), de tal manera que la calidad perceptual del material digital portador no se vea afectada; dicha información oculta puede ser recuperada posteriormente por algoritmos de extracción [5]. Su principal objetivo es la privacidad de la información oculta dentro de un archivo (en este caso imagen digital) llamada "portadora". La figura 2 muestra el esquema general esteganográfico.



Fig. 2. Esquema general esteganográfico.

donde I_P es la imagen portadora, I_{AO} es la imagen a ocultar, I_{CDO} es la imagen con datos ocultos e I_{AOR} es la imagen I_{AO} recuperada.

En el campo de la seguridad, confidencialidad y privacidad de las imágenes digitales existen diversas propuestas de solución, algunas de las más populares se enuncian a continuación.

Moni Naor y Adi Shamir, proponen un nuevo tipo de esquema criptográfico para imágenes digitales binarias, el cual puede decodificar imágenes ocultas sin ningún método criptográfico matemático [6]. En su propuesta realizan una representación visual del esquema de secreto compartido; en dicho esquema una llave numérica es considerada como un secreto (imagen binaria), el cual se comparte entre dos participantes quienes son las personas autorizadas para poder obtener la información original. Cada participante recibe una

sombra, generada con el objetivo de revelar la imagen secreta, utilizando únicamente su propia sombra, es decir, sobreponiendo ambas sombras de tal forma que el sistema visual humano (SVH) pueda decodificar el mensaje por medio de una representación visual, sin la necesidad de tener que utilizar una PC para que la imagen secreta pueda ser revelada [7].

Claudia O. Gallegos y Nahui R. Ramírez, proponen una técnica la cual procesa imágenes monocromáticas para su transferencia segura a dispositivos portátiles sin pérdidas. El sistema, cifra imágenes digitales utilizando la Transformada de Wavelet (Fractional Wavelet Transform, FWT), y máscaras de fases aleatorias [8]. Los resultados presentan una alta robustez ante los intentos de usuarios no autorizados que desean visualizar la información sin la llave correcta, sin embargo el algoritmo presenta una alta complejidad computacional.

S. M. Poonkuzhali y M. Therasa, describen el concepto de ocultamiento de datos usando criptografía visual por medio de la herramienta FFMPEG [9]. Este concepto se basa en imágenes a escala de grises, las cuales son convertidas a imágenes binarias por medio de un algoritmo de medios tonos, dividiendo esta imagen en dos imágenes binarias iguales, aplicandoles una marca de agua invisible aleatoriamente para el ocultamiento de la imagen huésped y utilizando un algoritmo de descifrado que extrae exitosamente la imagen huésped que anteriormente fue resguardada.

En la presente propuesta de solución, se desarrolla un algoritmo para cifrar y ocultar imágenes digitales por el método esteganográfico estocástico de difusión de error (Data Hiding By Stochastic Error Diffusion, DHSED) [10], el cual es un método de ocultamiento de imágenes, donde una imagen (huésped), se ocultara en una imagen base a medios tonos (portadora) la cual permite ocultar la información que se desea proteger. Esta imagen huésped es cifrada antes de su inserción a la imagen portadora con la finalidad de aumentar la seguridad de la información, haciendo uso de criptografía visual en conjunto con la esteganografía. Cabe mencionar que los datos ocultos son procesados con un filtro para eliminar el posible ruido en ellos.

II. DIAGRAMA A BLOQUES DEL SISTEMA PROPUESTO

A. Diagrama a bloques del proceso para la obtención de los secretos.

En el diagrama que se muestra en la figura 3, se puede observar que el primer paso a realizar, es la lectura de la imagen digital portadora I_D , para posteriormente someterla al proceso del algoritmo de halftoning, teniendo como salida el secreto compartido S_1 . Posteriormente la imagen X es sometida al proceso del algoritmo de cifrado basado en el esquema de umbral, donde la imagen es dividida en 3 transparencias T_1, T_2 y T_3 ; a las cuales se les aplica una operación lógica booleana XOR , para finalmente obtener como salida la imagen X_C . Esta imagen en conjunto con la imagen S_1 se someten al proceso esteganografico para el ocultamiento de la información (X_C será la imagen a ocultar en la imagen portadora en formato halftone S_1), para finalmente obtener el secreto compartido S_2 .

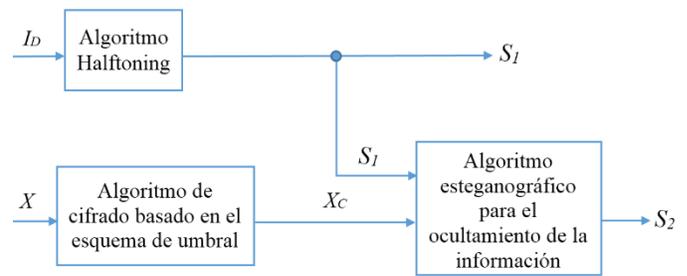


Fig. 3. Diagrama a bloques de la obtención de los secretos.

En la figura 3, I_D es la imagen portadora, X es la imagen a ocultar, X_C es la imagen oculta cifrada, S_1 es la imagen portadora en formato halftone la cual es utilizada como el secreto compartido número 1 y también es la imagen que va a fungir como imagen portadora en la cual se ocultara la imagen X_C , y S_2 es la imagen en formato halftone con datos ocultos que es utilizada como el secreto compartido número 2.

B. Diagrama a bloques del proceso para la recuperación de la información oculta.

El diagrama a bloques que se muestra en la figura 4, describe el proceso para la recuperación de la información oculta, donde inicialmente se leen las imágenes utilizadas como secretos compartidos S_1 y S_2 , a las cuales se les aplica el algoritmo de extracción de la información oculta mediante una operación lógica booleana $XNOR$, obteniendo la imagen X_{CR} ; a la que posteriormente se le aplica el proceso de descifrado mediante un cambio de umbrales, generando la imagen recuperada X_R con alta legibilidad.

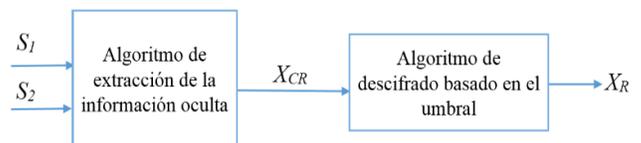


Fig. 4. Diagrama a bloques de la recuperación de la Información Oculta.

Basándonos en el diagrama a bloques de la figura 4, a continuación se describen las variables involucradas en el proceso de recuperación de la información oculta: S_1 es la imagen en formato halftone la cual es utilizada como el secreto compartido número 1, S_2 es la imagen en formato halftone la cual es utilizada como el secreto compartido número 2, X_{CR} es la imagen X_C recuperada y X_R es la imagen X recuperada.

III. SISTEMA PROPUESTO

Para el sistema propuesto se realiza el análisis del algoritmo esteganográfico estocástico de difusión de error [10]. A continuación se analizara a detalle cada uno de los procesos involucrados.

A. Proceso para la obtención de los secretos.

El sistema considera como entrada una imagen a escala de grises I_D la cual es convertida en una imagen base a medios tonos por el algoritmo de halftoning, el cual consiste en una técnica de binarización de imágenes digitales en escala de grises. A diferencia de otros algoritmos de binarización, los algoritmos halftoning aprovechan las deficiencias del sistema visual humano (SVH) al representar imágenes a escala de grises únicamente con valores binarios, lo que permite utilizar una menor cantidad de bits para representar aproximadamente la misma información visual [11].

Una binarización convencional es aquella que convierte 1 pixel con 8 bits de información en un solo bit (0 ó 1) utilizando un valor de umbral fijo para toda la imagen [1].

El algoritmo halftoning está basado en la técnica de difusión de error, esta se utiliza en imágenes base a medios tonos, la cual mide la cantidad de error que contiene un pixel y la distribución con sus pixeles vecinos como se muestra en la figura 5. Mide esta cantidad de error en cada pixel que pasa por medio de un filtro, en este caso se utiliza el filtro propuesto por *Floyd-Steinberg*, que calcula la distribución con sus 4 pixeles vecinos volviendo a la imagen de entrada con el objetivo de que el error sea difundido.

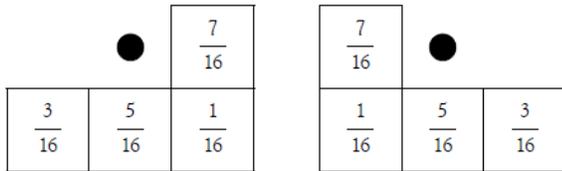


Fig. 5. Coeficientes del filtro Floyd-Steinberg [1].

La calidad de la imagen halftone generada por el método de difusión de error, se mejora enfatizando los bordes, este método agrega una porción de valor de pixel de entrada antes del proceso de cuantificación Q .

En la figura 6, se muestra la estructura del algoritmo halftoning basado en el esquema del método de difusión de error, donde $x(i, j)$ se refiere a la imagen de entrada, Q es el proceso de cuantificación que binariza usando un valor de umbral, el cual se calcula a partir de (1) y $e(i, j)$ es el error que se produce en el proceso de cuantificación el cual se calcula mediante (2)

$$b(i, j) = Q(u(i, j)) = \begin{cases} 0 & u(i, j) < Th \\ 1 & u(i, j) \geq Th \end{cases} \quad (1)$$

$$e(i, j) = b(i, j) - u(i, j). \quad (2)$$

H es un filtro 2D que calcula la cantidad de error que se difunde a los vecinos usando el error de cuantificación $e(i, j)$.

Antes de la cuantificación del pixel siguiente, el algoritmo se encarga de recibir la cantidad que le corresponde de error causado por el pixel anterior, este proceso se calcula mediante (3) donde el operador $*$ significa convolución

$$u(i, j + 1) = x(i, j + 1) - (H * e(i, j)). \quad (3)$$

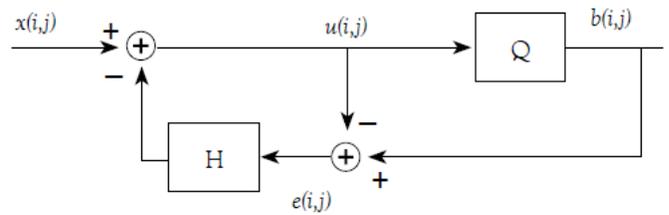


Fig. 6. Estructura de halftoning basado en el método de difusión de error [1].

Como resultado del proceso descrito anteriormente se obtiene la imagen base a medios tonos la cual es utilizada como el secreto compartido número 1 (S_1) y también como imagen portadora en el proceso del algoritmo esteganográfico para el ocultamiento de la información.

Para generar el secreto compartido número 2 (S_2), se utiliza la imagen a ocultar X a la cual se le aplica un algoritmo de cifrado basado en el esquema de umbral, que consiste en tomar X y dividirla en 2 transparencias diferentes T_1, T_2 (una por cada subconjunto vacío $T \subseteq \{1,2\}$). Este conjunto esta descrito por multiconjuntos C^3 de matrices booleanas de tamaño $n \times m$ con $\mathfrak{S} \subseteq S$ (dado \mathfrak{S} para cada matriz booleana en C^3 el cual describe la distribución de los subpixeles en cada transparencia, donde el pixel correspondiente en la imagen X_T es negro, si y solo si $\mathfrak{S} \in T$; para cifrar cada matriz, C^3 se selecciona con la misma probabilidad) [5].

A partir de la obtención de las transparencias T_1, T_2 , estas se suman para obtener la transparencia T_3 , las cuales se conjuntan posteriormente en una sola imagen por medio de una operación lógica booleana XOR como se aprecia en la figura 7, consiguiendo la imagen cifrada X_c .

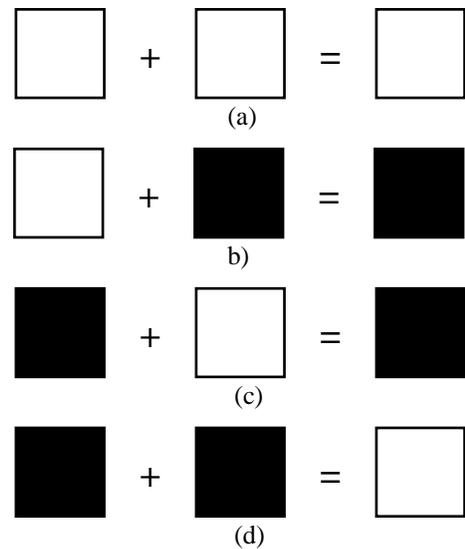


Fig. 7. Operación lógica booleana XOR

(a) 0+0=0 (b) 0+1=1 (c) 1+0=1 (d) 1+1=0.

A continuación se realiza el proceso esteganográfico ocultando la imagen X_c en la imagen S_1 utilizando una inserción aditiva de la imagen X_c sobre la imagen portadora S_1 , como se describe en (4) haciendo que estos datos sean imperceptibles, para finalmente generar el secreto compartido número 2 (S_2).

$$S_2 = S_1 + \alpha \cdot X_c. \quad (4)$$

donde α es el factor de ocultamiento de la información en la imagen portadora, el cual determina la invisibilidad de la información. En la propuesta se utiliza un factor de ocultamiento $\alpha = 0.01$.

B. Proceso para la recuperación de la información oculta.

Para la recuperación de la información oculta el sistema considera como entrada dos imágenes S_1 y S_2 a las cuales se les aplica un algoritmo de extracción, que esta basado en una operación lógica booleana XNOR (véase la figura 8), la cual elimina los pixeles iguales haciendo que solo quede la imagen cifrada X_{CR} .

Finalmente a la imagen cifrada recuperada X_{CR} se le aplica un algoritmo de descifrado basado en el umbral, que consiste en ajustar los valores del umbral en la imagen X_{CR} obteniendo como resultado final la imagen oculta recuperada X_R muy similar con respecto la imagen oculta X .

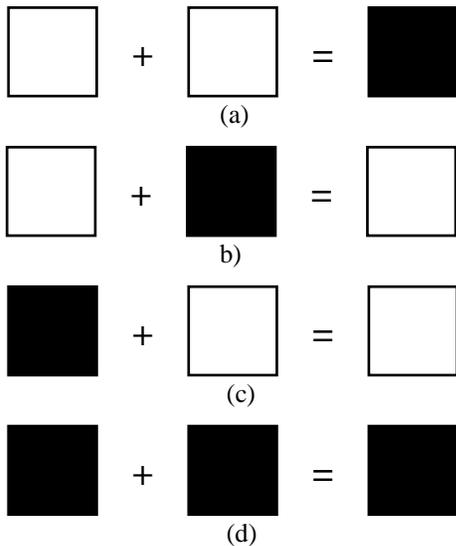


Fig. 8. Operación lógica booleana XNOR
(a) 0+0=1 (b) 0+1=0 (c) 1+0=0 (d) 1+1=1.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

El sistema se desarrolló utilizando la plataforma de MathWorks Matlab® R2013a (8.1.0.604), en una computadora con procesador Intel (R) Core(TM) i3-2350M CPU 2.30GHz 2,30GHz, memoria RAM de 4.00GB (3.85GB utilizable) y Sistema Operativo Windows 7 Home Basic.

Las imágenes digitales utilizadas para realizar las pruebas con el algoritmo propuesto tienen resoluciones desde 1200x1000 hasta 1600x1200 en formato JPEG en escala de grises. Dichas imágenes presentan características variadas en luminosidad, textura y contraste.

Los resultados obtenidos para cada uno de los procesos que realiza el algoritmo se presentan en la figura 9. La imagen 9(a) muestra a la imagen portadora I_D , las imágenes 9(b) y 9(h) son los secretos compartidos S_1 y S_2 respectivamente, la imagen 9(c) es la imagen a ocultar X , las imágenes 9(d), 9(e) y 9(f) son las transparencias obtenidas de X , 9(g) es la imagen cifrada X_C , 9(i) es la imagen cifrada recuperada X_{CR} y finalmente 9(j) muestra la imagen oculta recuperada X_R .

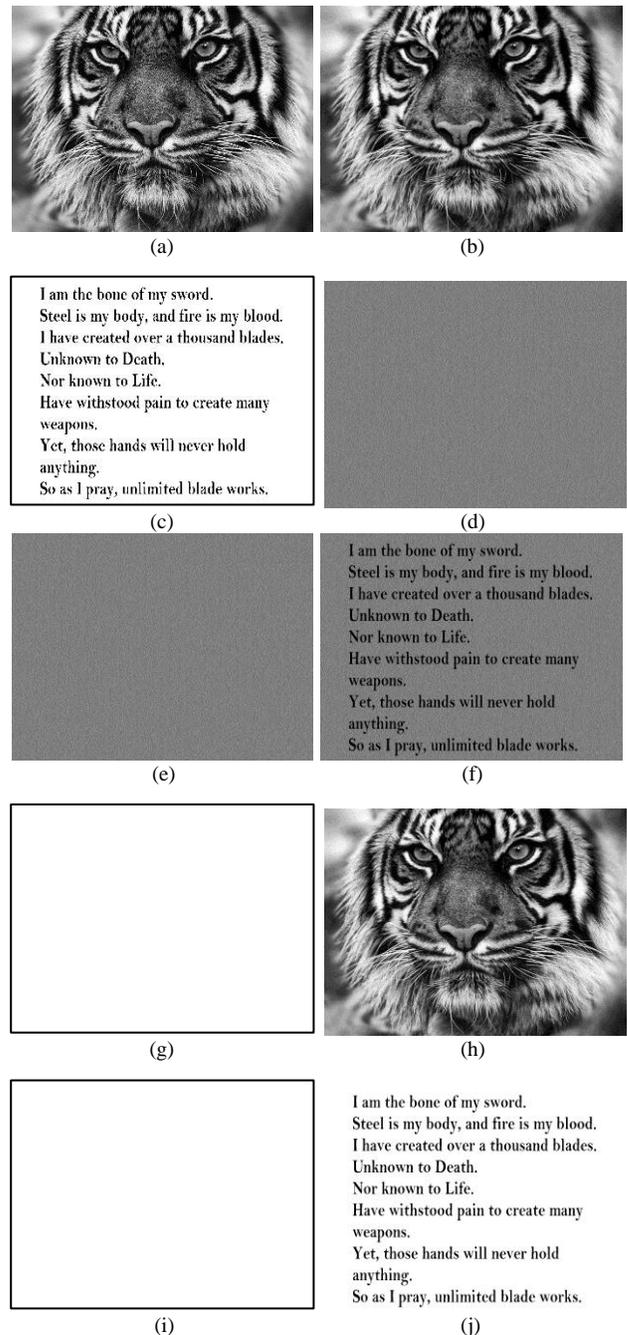


Fig. 9. Imágenes resultantes de cada uno de los procesos del algoritmo propuesto.

Para medir la calidad de la imagen oculta recuperada X_R con respecto a la imagen oculta original X , se tomaron en cuenta los siguientes parámetros de calidad: Mean Square Error (MSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) y Mean Absolute Error (MAE), los cuales se calculan mediante (1)-(3).

$$MSE = \frac{1}{NM} \cdot \sum_{i=1}^N \cdot \sum_{j=1}^M \cdot (X(i,j) - X_R(i,j))^2, \quad (1)$$

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right), \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{NM} \cdot \sum_{i=1}^N \cdot \sum_{j=1}^M \cdot |X(i, j) - X_R(i, j)| \quad (3)$$

donde, M y N son las dimensiones de la imagen, $X(i, j)$ y $X_R(i, j)$ denotan la imagen oculta X y la imagen oculta recuperada X_R .

<p>I am the bone of my sword. Steel is my body, and fire is my blood. I have created over a thousand blades. Unknown to Death. Nor known to Life. Have withstood pain to create many weapons. Yet, those hands will never hold anything. So as I pray, unlimited blade works.</p>	<p>I am the bone of my sword. Steel is my body, and fire is my blood. I have created over a thousand blades. Unknown to Death. Nor known to Life. Have withstood pain to create many weapons. Yet, those hands will never hold anything. So as I pray, unlimited blade works.</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(a)

(b)

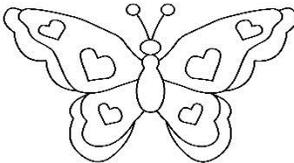
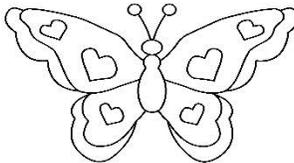
Prueba 1



(a)

(b)

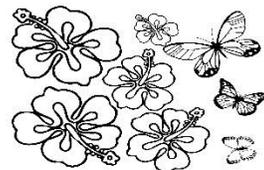
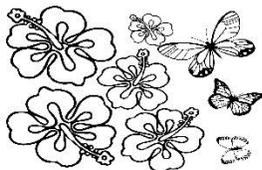
Prueba 2



(a)

(b)

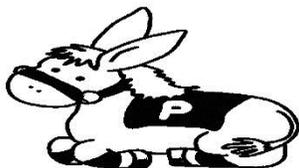
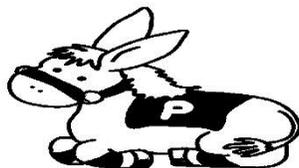
Prueba 3



(a)

(b)

Prueba 4



(a)

(b)

Prueba 5

Fig. 10. (a) Imágenes ocultas originales y (b) Imágenes ocultas recuperadas.

La figura 10 muestra la comparativa entre la imagen original que se desea ocultar y la imagen oculta recuperada, para diversas imágenes. En la tabla 1, se muestran los resultados obtenidos para el cálculo del MSE de las imágenes la figura 10.

Tabla 1. Cálculo de MSE

Prueba	MSE
1	1.4394
2	5.5010
3	1.8749
4	4.1070
5	1.8443

La tabla 2, muestra los resultados obtenidos para el cálculo del PSNR de las imágenes la figura 10.

Tabla 2. Cálculo del PSNR

Prueba	PSNR (dB)
1	46.54
2	40.72
3	45.40
4	41.99
5	45.47

La tabla 3, muestra los resultados obtenidos para el cálculo del MAE de las imágenes la figura 10.

Tabla 3. Cálculo de MAE

Prueba	MAE
1	0.2469
2	1.3732
3	0.5527
4	0.4772
5	0.4521

Finalmente, en la tabla, 4 se presenta la evaluación promedio de las tres medidas de calidad mencionadas anteriormente MSE, PSNR y MAE.

Tabla 4. Valores Promedio del MSE, PSNR(dB) y MAE

Medida de Calidad de Filtrado	Calculo Promedio
MSE	0.4521
PSNR	2.9533
MAE	44.0288

V. CONCLUSIONES

En presente artículo se propone y desarrolla un algoritmo que asegura la información al momento de compartirla, unas de las principales técnicas utilizadas para la protección de este tipo de información, son la criptografía y la esteganografía ya que si la información solo se oculta y no se cifra, es más sencillo obtener la información oculta mediante un análisis de la información; sin embargo, si los datos se cifran y posteriormente se ocultan, se obtiene mayor seguridad al momento de transmitirlos. Cabe mencionarse que el algoritmo propuesto presenta una baja complejidad computacional comparado con propuestas similares, además de que los resultados obtenidos demuestran la alta imperceptibilidad de los mensajes ocultos y la alta calidad de la imagen recuperada, obteniendo en promedio valores de PSNR de 44dB.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Instituto Politécnico Nacional y a la COFAA del IPN, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

VII. REFERENCIAS

- [1] F. Pelcastre, L. Peregrina, M. Garcia, A. Ochoa, U. Juárez, E. Rios, G. Benitez y M. Nakano, "Halftoning: Revisión y Análisis", Revista Ingenierías, Universidad de Medellín., vol. 11, pp. 161-174, Junio 2012.
- [2] J. Villar, C. Padró, G. Sáez, "Compartición de Secretos en Criptografía", Universidad Politécnica de Catalunya, Dpto. de Matemática y Telemática, Diciembre 1997.
- [3] A. Movahedian, O. Taheri, S. Sadri, M. Javad, "Data Hiding in Halftone Images Using Error Diffusion Halftoning Method with Adaptive Thresholding", Conference of Electric Engineering, Khomeyni Shahr, Irán, 1995.
- [4] L. Hernández, F. Montoya, J. Muñoz, "Esquemas Criptográficos Visuales", presentado en el Instituto de Física Aplicada, Dpto. Tratamiento de la Información y Codificación, Serrano 133.28006, Madrid 2000.
- [5] N. P. Palmas Vanegas, "Un esquema de criptografía visual con un efecto cocktail party artificial", Tesis de Maestría, Matemática Aplicada, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia 2011.
- [6] M. Naor, A. Shamir, "Visual Cryptography II: Improving the Contrast via the Cover Base", In Proceedings of Security Protocols workshop LNCS 1189, pp. 197-202, 1996.
- [7] M. Nakano, E. Escamilla, H. Pérez, M. Iwamoto, "Criptografía Visual Basada en el Esquema de Umbral: Una Revisión Tutorial", Información Tecnológica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Departamento de Ingeniería en Informática y Comunicaciones, Instituto Politécnico Nacional, vol. 22(5), pp. 107-120, Febrero 2011.
- [8] C. I. Olguín, N. O. Rivera, "Cifrado de Imágenes con Enfoque Asociativo", Tesis de Ingeniería, Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, IPN, Distrito Federal, México 2012.
- [9] S. M. Poonkuzhali, M. Therasa, "Data Hiding Using Visual Cryptography for Secure Transmission", vol. 4, Issue 4, April 2015.
- [10] M. Sun Fu, O. C. Au, "Data Hiding in Halftone Images by Stochastic Error Diffusion", Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China, February 2001.
- [11] A. M. Attar, M. J. Omid, S. Sadri, and O. Taheri, "Data hiding in Halftone images using error diffusion halftoning method with adaptive thresholding", Proc. 14th Iranian Conference on Electric Engineering (2006).

Análisis y Cálculo de la Distorsión Binocular Perceptible en Imágenes Estereoscópicas

Luis Noriega-Galeana, Volodymyr Ponomaryov, Rogelio Reyes-Reyes

Instituto Politécnico Nacional
Maestría en Ingeniería en Seguridad y Tecnologías de la Información, ESIME Unidad Culhuacán
Av. Santa Ana No. 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP. 04430, México, D.F.
Tel. (55) 5729-6000 Ext. 73264 Fax (55) 56562058 email: lnoriegag1200@alumno.ipn.mx

Resumen— Los modelos convencionales 2D-JND (*Just-Noticeable Distortion*, Distorsión Apenas Perceptible) miden la distorsión perceptible de la señal visual basada en las propiedades de la visión monocular representada por una sola imagen para ambos ojos. Sin embargo, no es aplicable para contenidos digitales 3D, en el que se presenta una imagen para el ojo izquierdo y otra para el ojo derecho del espectador. Por lo tanto, es necesario tomar en consideración las características de la visión binocular tales como: la combinación y la rivalidad binocular para realizar modelos BJND (*Binocular Just-Noticeable Distortion*, Distorsión Binocular Apenas Perceptible). En este artículo se analizan las características del Sistema Visual Humano, principalmente la luminancia y el contraste, y la forma en cómo éstas afectan en la estimación del valor BJND. Los resultados obtenidos del modelo BJND analizado, demuestran la validez del mismo para diferentes tipos de imágenes con características variadas de contraste y luminancia de acuerdo a las características locales de la imagen.

Palabras Clave— Contenido 3D, Imágenes Estereoscópicas, Sistema Visual Humano, JND, BJND.

I. INTRODUCCIÓN

Los modelos de distorsión apenas perceptible (*JND*, por sus siglas en inglés), han sido desarrollados con la finalidad de determinar la máxima distorsión de la señal que resulta imperceptible para el espectador. En ellos, se toma en cuenta la visualización de una imagen para ambos ojos, sin embargo, con el surgimiento de la tecnología 3D, estos modelos resultan obsoletos en el análisis de la distorsión, ya que este tipo de contenido se caracteriza por el empleo de dos imágenes, una para cada ojo, por lo que se ha motivado el estudio y desarrollo de nuevos modelos que contemplen las características de la visión binocular, tales como la combinación y la rivalidad binocular, sin excluir las propiedades del Sistema Visual Humano (*HVS*, por sus siglas en inglés), que es el único capaz de percibir el cambio en los píxeles por encima de un determinado umbral de visibilidad. Al análisis de la distorsión máxima en la tecnología 3D, en la que el ojo humano no puede distinguir cambios se le ha denominado modelos *BJND*, y para poder desarrollarlos, es necesario realizar una serie de experimentos fisiológicos y psicofísicos en el que al menos el 75% de los encuestados cumplan con los parámetros establecidos en la prueba [1].

El artículo se presenta con la siguiente estructura: en la *sección II*, se estudian las características de la visión estereoscópica realizando la similitud con el proceso de visión humana, así como también se describen los procesos de combinación y rivalidad binocular. En la *sección III*, se presenta el modelado de las características de HVS: adaptación de luminancia y enmascaramiento de contraste, así como el comportamiento que tienen en el modelo. En la *sección IV*, se presenta la integración del modelo BJND. En la *sección V*, se muestran las pruebas realizadas con las imágenes de la base de datos *Middlebury*, así como el análisis de los mismos. En la *sección VI*, se presentan las conclusiones del trabajo. Finalmente, en la *sección VII* los agradecimientos y las referencias que sustentan el trabajo.

II. LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

La visión estereoscópica, es el principio que basa a la visión humana, y se define como una facultad psico-física que posee el ser humano, que le permite observar en tercera dimensión aquellos objetos que contempla mediante su visión binocular, es decir, se percibe una misma escena para ambos ojos, la diferencia radica en la perspectiva que posee cada ojo tal y como se muestra en **Fig. 1** [2].

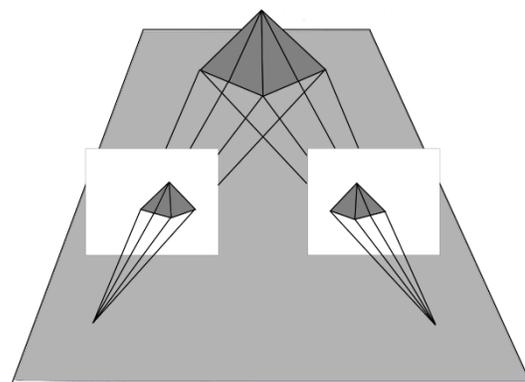


Figura 1.- La Visión Estereoscópica contempla dos imágenes de la escena con perspectiva diferente.

Lo anterior es sólo el primer paso en el proceso de visión, posteriormente el cerebro, casi de forma automática, se encarga de “fusionar” ambas imágenes y con ello es capaz de interpretar la diferencia que existe entre ambas, reconstruyendo la escena y adquiriendo la estimación de la profundidad en la misma. Según

Marr y Poggio, en el proceso de reconstrucción de una escena se presentan tres etapas: la primera etapa consiste en seleccionar un punto característico de un objeto en una vista, posteriormente en la segunda etapa se requiere encontrar el punto característico seleccionado anteriormente en la otra vista, para finalizar midiendo la diferencia relativa entre la posición de estos dos puntos en la tercera etapa [3]. Dada la similitud con la visión humana, el formato de datos para imágenes 3D que ha tenido mayor difusión es la *tecnología estereoscópica* y ha permitido el desarrollo de aplicaciones enfocadas a distintas áreas del entretenimiento, de la salud, así también se ha inmiscuido en el desarrollo de sistemas de navegación autónomos y sistemas de reconocimiento de objetos. [4].

A. Combinación y Rivalidad Binocular

Como se mencionó anteriormente, en el caso de la visión estereoscópica se consideran dos imágenes, una para el ojo izquierdo y otra para el ojo derecho, siendo la misma imagen, capturada desde perspectiva diferente. El cerebro, al tratar de "fusionar" dicha imagen y poder establecer la profundidad de los objetos en la escena, realiza los procesos de **Combinación y/o Rivalidad Binocular**, los cuales describen la forma de interpretar las imágenes, es decir, cuando la retina es estimulada por imágenes diferentes, no se produce la *combinación binocular*, sino la rivalidad entre los estímulos que percibe cada ojo. A esta alternancia perceptual entre estímulos no fusionables se conoce como *rivalidad binocular* [5].

III. SISTEMA VISUAL HUMANO

En diversas aplicaciones de procesamiento de imágenes, las características del Sistema Visual Humano suelen ser explotadas, para mejorar el rendimiento desde el punto de vista de la calidad visual. Tales enfoques basados en los modelos HVS están reemplazando lentamente a los esquemas "clásicos", en el que la métrica de calidad consiste en una sencilla medida de diferencia basada en píxeles, como el Error Cuadrático Medio (MSE, por sus siglas en inglés).

El HVS contempla dos aspectos fundamentales que son importantes y se deben tomar en consideración para apreciar la distorsión en las imágenes: *Adaptación de Luminancia* y *Enmascaramiento de Contraste*.

A. Adaptación de Luminancia

Luminancia es un concepto *psico-visual* que puede ser descrito como la sensación de intensidad del estímulo de luz. La adaptación de la luminancia se refiere al ajuste de sensibilidad visual para diferentes niveles de luz. El HVS es sensible al contraste de luminancia en lugar de la luminancia absoluta, la adaptación de luminancia es usualmente modelada midiendo el incremento del umbral o el contraste de acuerdo a un fondo con cierta luminancia [6].

De acuerdo a los experimentos realizados en [1] y partiendo del análisis del peso que tiene cada ojo en el proceso de visión binocular, así como de las pruebas de inserción de ruido realizadas, el umbral de luminancia se define como:

$$A_{limit}(bg) = \begin{cases} 0.0027(bg^2 - 96bg) + 8, & \text{si } 0 \leq bg < 48 \\ 0.0001(bg^2 - 32bg) + 1.7, & \text{si } 48 \leq bg < 255 \end{cases} \quad (1)$$

a partir de (1) se puede deducir que en zonas donde la luminancia de fondo bg es cercana a 0 o a 255 en el rango de intensidad, el factor de adaptación es alto, en comparación con valores bg intermedios que oscilan entre 30 y 180, tal como se muestra en la **Fig. 2**; en otras palabras, en zonas de muy alta o muy baja luminancia, el espectador tiene menores probabilidades de percibir algún cambio o incremento en el estímulo a comparación de los valores intermedios de luminancia.

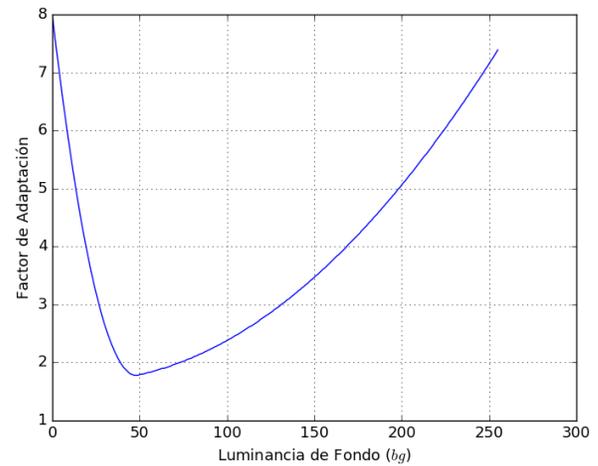


Figura 2. - Comportamiento del factor de adaptación para los diferentes valores de luminancia de la imagen.

B. Enmascaramiento de Contraste

En general, el enmascaramiento ocurre donde hay un cambio significativo en la luminancia, por ejemplo, un enmascaramiento espacial es obvio en áreas con textura, donde la actividad de la imagen es intensa y, por otro lado, el enmascaramiento temporal se presenta cuando existe un cambio brusco en la escena, originando un cambio considerable en la intensidad. De esta manera, el enmascaramiento de contraste (también conocido como enmascaramiento espacial), se refiere a la reducción de la visibilidad de uno de los componentes de la imagen (objetivo) en presencia de otro componente de la misma (máscara).

En el modelado del enmascaramiento de contraste, la detección del umbral del estímulo objetivo es medido cuando se sobrepone a una máscara con un contraste variable [7-8].

En [1], se modela el enmascaramiento de contraste tomando en cuenta una función de fijación K para el factor de elevación, el cual origina que los umbrales de visibilidad sean generalmente elevados en presencia de bordes, sin embargo, este efecto decrece conforme incrementa el valor de bg . Los valores que se

obtienen de dicha función de fijación K , tienden a ser relativamente mayores en zonas de la imagen con valores de luminancia bg cercanos a 0, sin embargo, conforme la intensidad bg incrementa el valor de K tiende a ser 0, tal como se muestra en **Fig. 3**.

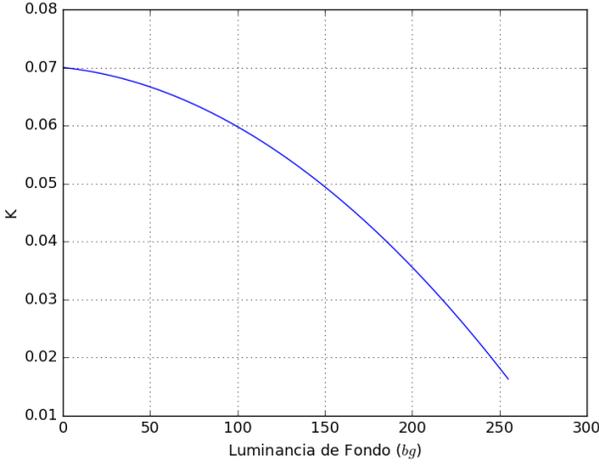


Figura 3.- Comportamiento de la función de fijación K para los diferentes valores de luminancia bg .

Por tanto, considerando el umbral de visibilidad mostrado en (1) y el comportamiento de la función de fijación K , el enmascaramiento de contraste es modelado mediante (2) y (3).

$$A_{c,limit}(bg, eh) = A_{limit}(bg) + K(bg) \cdot eh \quad (2)$$

$$K(bg) = -10^{-6} \cdot (0.7 \cdot bg^2 + 32 \cdot bg) + 0.07 \quad (3)$$

IV. DISTORSIÓN BINOCULAR EN IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS

En [1] se propone un modelo BJND, que incorpora los modelos de combinación binocular de la inserción de ruido y los efectos de enmascaramiento de contraste y luminancia; el modelo se describe a continuación:

$$BJND(bg(i), eh(i), A_1(i)) =$$

$$A_{c,limit}(bg(i), eh(i)) \cdot \left(1 - \left(\frac{A_1(i)}{A_{c,limit}(bg(i), eh(i))}\right)^\lambda\right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (4)$$

donde, λ es el valor obtenido del modelado de la combinación de ruido binocular; que de acuerdo a las pruebas realizadas en [1], los resultados sugieren que dicho valor se encuentra dentro del rango [1.0, 1.5] y por ende se determinó a $\lambda = 1.25$, ya que este valor presenta el mejor comportamiento, $bg(i)$ representa un filtro promedio de la luminancia de fondo bg con una ventana de 5×5 , $eh(i)$ es la magnitud de los bordes de la imagen, calculada por medio de los Operadores de Sobel con máscaras de 5×5 en la región i tal como se expresa en (5) y (6).

$$eh(i) = \sqrt{E_H^2(i) + E_V^2(i)} \quad (5)$$

$$E_k(i) = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^5 \sum_{v=1}^5 p(x_i - 3 + h, y_i - 3 + v) \cdot G_k(h, v) \quad (6)$$

$$G_H = \begin{pmatrix} -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \\ -2 & -3 & 0 & 3 & 2 \\ -3 & -5 & 0 & 5 & 3 \\ -2 & -3 & 0 & 3 & 2 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$G_V = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 5 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -3 & -5 & -3 & -2 \\ -1 & -2 & -3 & -2 & -1 \end{pmatrix}$$

De acuerdo a (4), cuando A_1 es igual que el valor $A_{c,limit}(bg(i), eh(i))$, el valor BJND a modificar tiende a ser nulo, sin embargo, cuando existe un valor A_1 pequeño, el valor BJND calculado tiende a ser $A_{c,limit}(bg(i), eh(i))$. Dado que, para efectos de este estudio, se considera una imagen libre de ruido, (4) puede reescribirse como (7).

$$BJND(bg(i), eh(i)) = A_{c,limit}(bg(i), eh(i)) \quad (7)$$

así, el comportamiento del modelo BJND prácticamente queda acotado a la variación entre los valores de luminancia de fondo bg y la magnitud de bordes eh . Dicho comportamiento es mostrado en la **Fig. 4**, en la cual se muestra que el valor BJND es cercano a 20 en las zonas oscuras, donde la luminancia de fondo está en el rango de 0 – 50, pero estos valores disminuyen conforme la luminancia de fondo bg incrementa. Por otro lado, se percibe que la magnitud de bordes juega un papel importante para el modelo, ya que para zonas de la imagen oscuras y con magnitudes de bordes altas, el valor BJND incrementa linealmente, pero de igual manera, conforme incrementa la luminancia de fondo, dicho valor decrece en forma considerable.

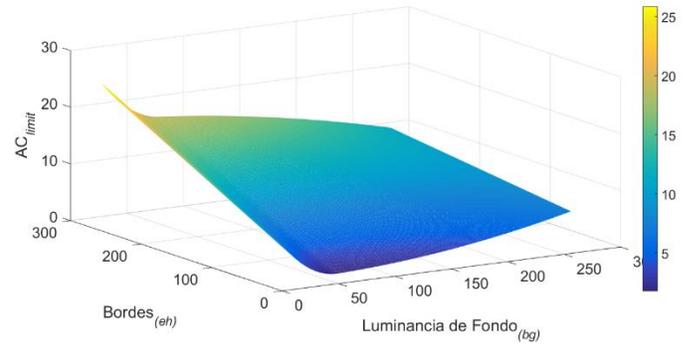


Figura 4.- Comportamiento de los valores $A_{c,limit}$ de acuerdo a los diferentes valores de luminancia de fondo bg y valores de magnitud de bordes eh .

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para elaborar las pruebas del modelo BJND descrito en este artículo, se utilizaron las imágenes de la base de datos *Middlebury* [9], las cuales se encuentran disponibles en diferentes resoluciones *Full*, *Half* y *Quarter*. Dichas imágenes presentan características variadas y a todas ellas se les aplicó el modelo BJND para observar su comportamiento.

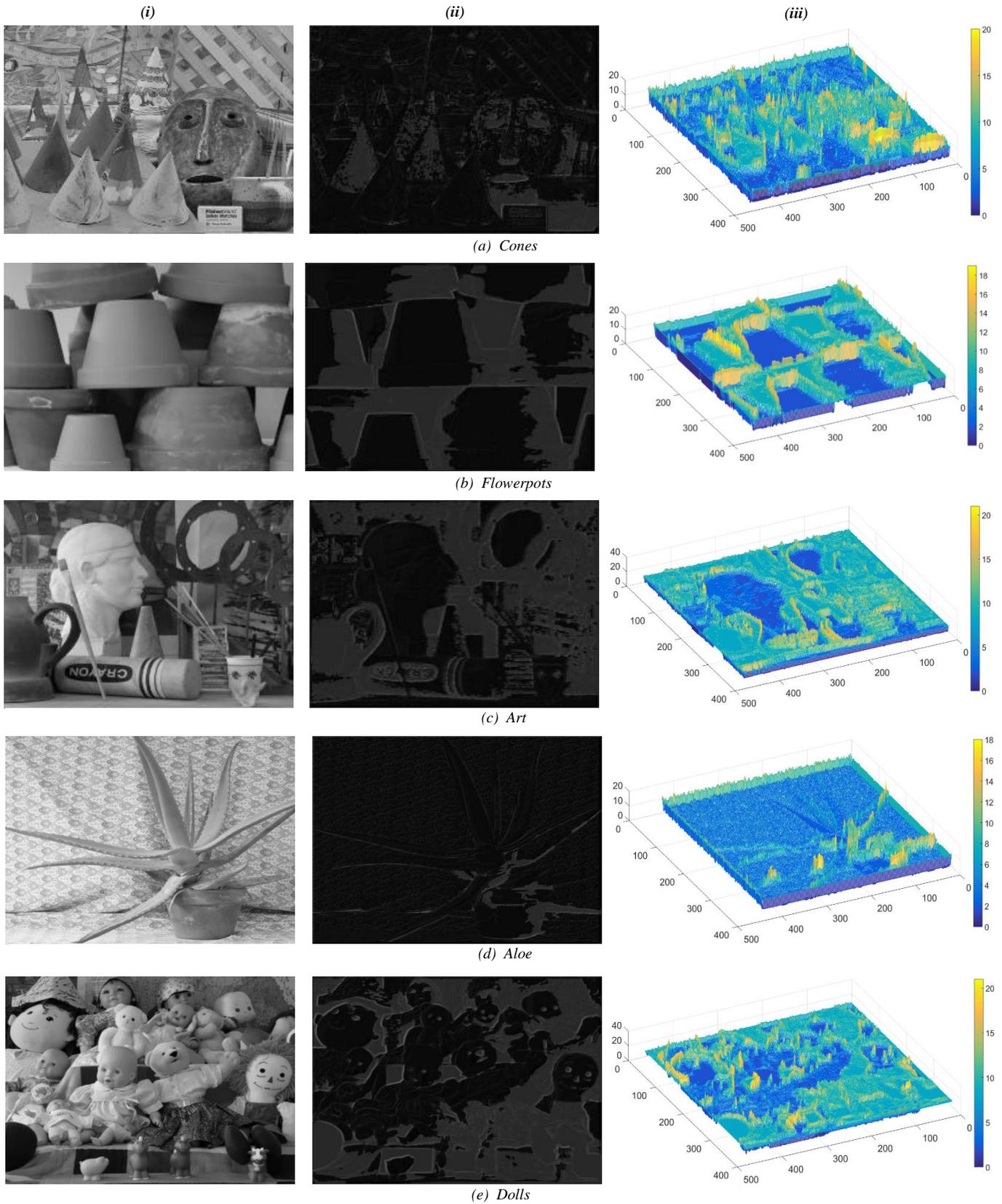


Figura 5. Imágenes prueba tradicionales de la base de datos *Middlebury*. *i)* Imagen Original. *ii)* Valores BJND multiplicados por un factor de 10. *iii)* Gráfico 3D que muestra la intensidad del valor BJND obtenido.

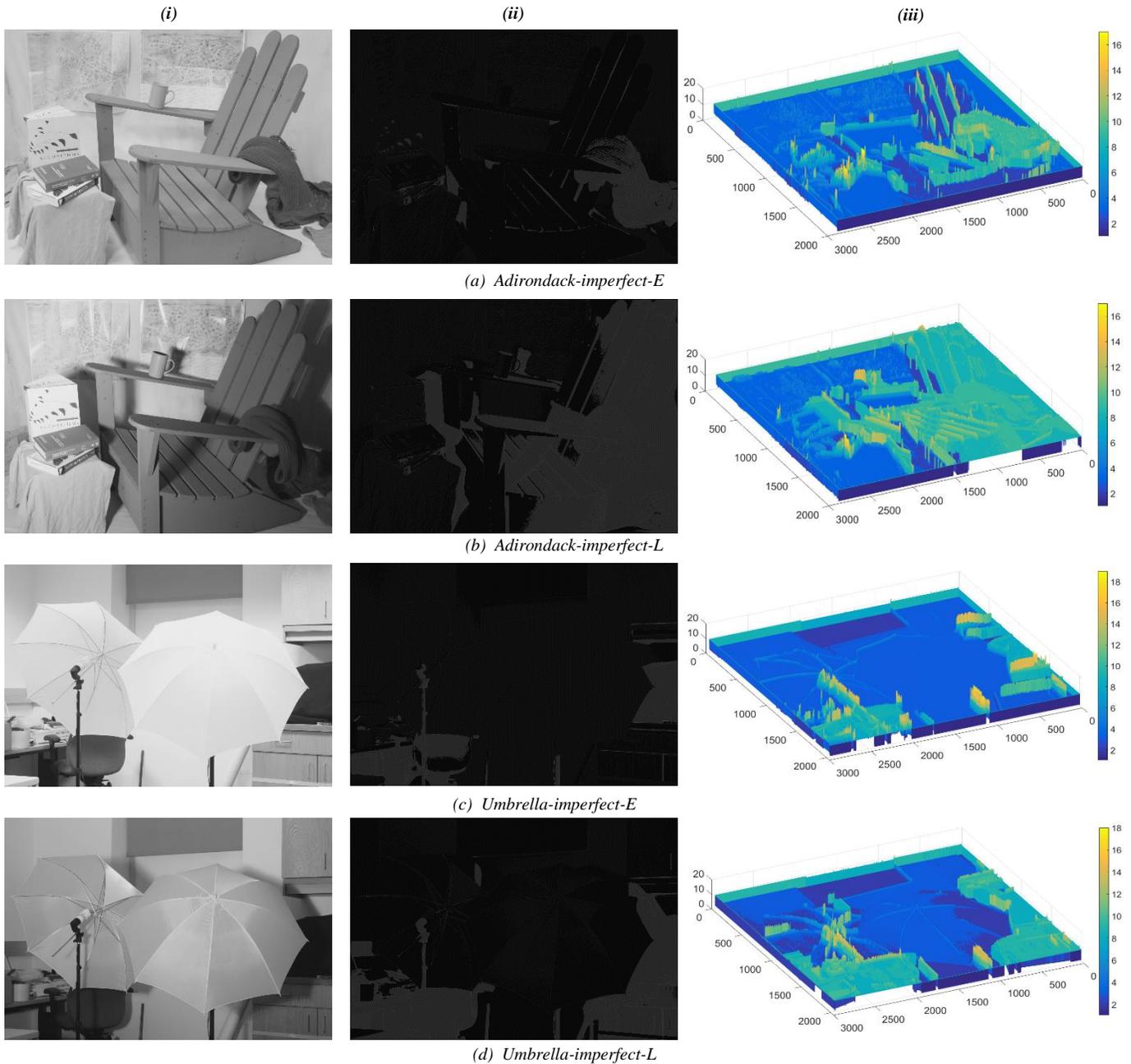


Figura 6. Imágenes prueba de la base de datos *Middlebury*, **a)** y **c)** con condiciones normales de iluminación, **b)** y **d)** imágenes con poca iluminación. **i)** Imagen Original. **ii)** Valores BJND multiplicados por un factor de 10. **iii)** Gráfico 3D que muestra la intensidad del valor BJND obtenido.

Los resultados obtenidos se presentan en la **Fig. 5** y **Fig. 6**. Las imágenes **(i)** muestran la imagen original, las imágenes **(ii)** representan los valores BJND obtenidos para cada pixel de la imagen multiplicados por un factor de 10, para que se pueda identificar visualmente el comportamiento del modelo para los diferentes valores BJND calculados y por último las imágenes **(iii)**, son los gráficos que denotan la magnitud del valor BJND en cada zona de la imagen.

En la **Fig. 5**, se muestran algunas de las imágenes prueba tradicionales de la base de datos antes mencionada, en las que se observa que el modelo BJND, arroja valores altos para zonas de la imagen con tonalidades oscuras, aproximadamente en un rango de valores de intensidad promedio, de entre 15 – 20 en escala de grises (0 - 255), dependiendo en gran medida de las características locales de cada una de las imágenes, lo que significa que dicha imagen puede ser modificable hasta en un 8% del rango original de intensidad.

Las imágenes muestran características variadas para evidenciar el comportamiento del modelo presentado en este artículo; podemos observar que en el caso de *Cones*, y *Aloe*, a pesar de ser imágenes donde predominan las tonalidades blancas, son muy pocas las zonas en donde el valor BJND es alto y en éstas, dicho valor puede ser modificable hasta un rango de intensidad no mayor a 20. Por su parte *Art* y *Dolls*, las cuales presentan muchos cambios entre tonalidades, el algoritmo detecta en buena medida todos los cambios bruscos de una tonalidad oscura a blanca o viceversa, prevaleciendo el 20 como el máximo valor permisible a ser modificado sin que el observador se percate de ello.

Otra prueba a la que el algoritmo fue sometido con el propósito de observar si el rango de valores BJND se modificaba, consistió en analizar imágenes con diferente iluminación, que asemeja las condiciones reales a las cuales son capturadas algunas fotografías, con miras a no sólo aplicar dicho algoritmo en imágenes con condiciones de iluminación idóneas. Dichos resultados se muestran en la **Fig. 6**, en ella, se presentan dos pares de imágenes tomadas desde la misma perspectiva, pero con condiciones diferentes de iluminación, se puede observar que en ambas, de acuerdo a las características de cada imagen, el rango de valores BJND altos, en donde se puede modificar más información, no difiere, manteniéndose en un rango no mayor a 16 en el caso de la imagen *Adirondack* y en un rango menor a 19 para *Umbrella*, presentándose estos valores principalmente en zonas oscuras al igual que las imágenes analizadas en la **Fig. 5**. También se observa que, al bajar la intensidad de iluminación, se generan sombras en la imagen, las cuales el algoritmo toma como zonas propensas a ser modificables en un rango de valores BJND medios, específicamente de entre 8 – 12 niveles de intensidad en el caso de las imágenes *b)* y *d)*.

VI. CONCLUSIONES

En el presente artículo se estudiaron las características del *HVS* y como estos afectan en la percepción de distorsiones para imágenes estereoscópicas. El modelo BJND analizado, el cual toma en consideración las características de luminosidad, contraste y bordes de una imagen digital, obtiene valores promedio en el rango de 0 – 20. Dichos resultados se obtuvieron al aplicar el algoritmo a las imágenes prueba que conforman la base de datos *Middlebury*. El modelo demuestra que, en las zonas de la imagen con tonalidades oscuras, el nivel de intensidad modificable es mayor, a diferencia de las zonas blancas y lisas. Por otro lado, al someter el algoritmo a las imágenes prueba con diferente iluminación, los resultados muestran que el rango de valores BJND en dichas imágenes es similar al obtenido con las imágenes que presentan iluminación normal, lo que garantiza que el algoritmo es funcional bajo cualquier condición, sin importar la cantidad de luz con la que sean adquiridas las imágenes que conforman el par estereoscópico. Como trabajo a futuro, se utilizará el modelo BJND analizado para la modificación de las imágenes estereoscópicas, las cuales serán evaluadas de manera objetiva

y subjetiva para determinar en qué grado se afecta la percepción de la tridimensionalidad.

VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Instituto Politécnico Nacional, al CONACYT y a la COFAA del Instituto, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Yin Zhao, Zhenzhong Chen, Ce Zhu, Yap-Peng Tan, Lu Yu, “*Binocular Just-Noticeable-Difference Model for Stereoscopic Images*”, IEEE Signal Processing Letters Vol. 18, pp. 19-22, 2011.
- [2] Zapata Oscar, “*Fundamentos de Fotogrametría para Imágenes de Contacto y Digitales*”. <http://www.bdigital.unal.edu.co/12562/6/70074527.2003.pdf> [16 Febrero 2017]
- [3] MARR D., POGGIO T. *A computational theory of human stereo vision*. Proc R Soc Lond, pages 301-328, Mayo 1979.
- [4] Xiaoming Li, Yue Wang. “*Joint Just Noticeable Difference Model Based on Depth Perception for Stereoscopic Image*”, Visual Communications and Image Processing (VCIP), 2011 IEEE, 6-9 Nov., 2011.
- [5] Pons Álvaro M., Martínez Francisco M. “*Fundamentos de Visión Binocular*”, Universidad de Alcalante, 2004.
- [6] Zhang X. H., Lin W. S., Xue P. “*Improved estimation for just-noticeable visual distortion*”, Journal: Signal Processing, vol. 85, no. 4, pp. 795-808, 2005.
- [7] G.E. Legge and J. M. Foley “*Contrast masking in human vision*”, journal of the Optical Society of America, Vol. 70, pp 1458-1471, 1980.
- [8] C. Carlson and R. Cohen, “*A simple psychophysical model for predicting the visibility of displayed information*”, in Proc of the Society for Information Display, vol 21, pp. 220-245, 1980.
- [9] Middlebury Stereo Vision [Online] Available: <http://vision.middlebury.edu/stereo>.

Marca de Agua Visible Adaptiva basada en el Análisis de Luminosidad y Contraste de la Imagen Digital

Juan M. Castellanos-Jiménez, Clara Cruz-Ramos, Volodymyr Ponomaryov

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Culhuacán
Maestría en Ingeniería en Seguridad y Tecnologías de la Información
Av. Santa Ana No. 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP. 04430, México, Ciudad de México
Tel. (55) 5729-6000, Ext. 73264 Fax (55) 56562058
e-mail: jmanuel.castellanos@live.com.mx, ccruzra@ipn.mx, vponomar@ipn.mx

Resumen – En años recientes, las imágenes digitales se han visto afectadas por la piratería, esto debido al crecimiento de usuarios en internet, la fácil manipulación y a la propagación de este tipo de contenido digital. Durante los últimos años las técnicas de marcado de agua han sido utilizadas para resolver esta problemática; sin embargo, estas técnicas resultan ser invasivas, provocando una pérdida en la calidad de la imagen huésped. Por lo tanto, nuevas investigaciones han implementado técnicas que contemplan las características del Sistema Visual Humano (SVH), debido a que estudios psicofísicos mencionan que existen dos factores importantes en la percepción de la distorsión en imágenes digitales, los cuales son: la adaptación de la luminosidad de fondo, y la función de sensibilidad al contraste. En el presente artículo se propone el análisis de la luminosidad y contraste en la imagen a proteger; ya que dependiendo de la finalidad de la aplicación, la marca de agua visible puede ser insertada en regiones donde pase lo más desapercibida posible, para afectar al mínimo al contenido original; o en caso contrario la marca de agua visible se inserta en una región en la cual sea perceptible a simple vista pero sin obstruir demasiado a la imagen a proteger. Los resultados obtenidos demuestran que la marca de agua visible insertada cumple con la finalidad de no ser obstructiva permitiendo observar el contenido en la imagen original.

Palabras Clave – *marca de agua, sistema visual humano (SVH), luminosidad, contraste, umbral de sensibilidad perceptible (USP).*

I. INTRODUCCIÓN

A través de los años la protección de los derechos de autor ha tomado mayor importancia debido a la problemática existente en el copiado ilegal de contenido digital (imágenes, video, audio), y a los diversos ataques informáticos que alteran la información. Esto conlleva a la realización de técnicas que protejan la propiedad intelectual y los derechos de autor. Una de las soluciones propuestas a esta problemática se basa en el desarrollo de diversas técnicas de marcado de agua. La marca de agua se define como el proceso de inserción de datos (etiqueta, imagen, logotipo, etc.) al contenido digital huésped, dicha marca puede ser detectada y extraída posteriormente.

Las principales aplicaciones de esta técnica son: la protección de los derechos de autor, el copiado ilegal y la

falsificación, de tal forma, que inhibe el plagio y el uso no autorizado por los creadores del contenido digital [1-3].

De acuerdo a las características y aplicaciones de las marcas de agua, es posible clasificarlas en dos grandes grupos principalmente: visibles e invisibles. La técnica de inserción de marcas de agua invisibles está basada en que los cambios sean imperceptibles para el ojo humano, logrando que la calidad perceptual de la imagen huésped no se vea deteriorada. Por otra parte, las marcas de agua visibles, se caracterizan por ser perceptibles a simple vista para cualquier persona con una agudeza visual normal, teniendo como ventaja sobre las primeras, que estas no necesitan un algoritmo de extracción, además de que se puede visualizar de manera directa quien es el propietario del contenido [2-5].

La marca de agua visible además debe cumplir con importantes requerimientos. El contenido de esta debe ser obvio y reconocible tanto en color como en imágenes monocromáticas; al ser insertada, los detalles de la imagen original deben ser conservados, y finalmente la marca de agua debe ser difícil de remover [2]. Algunas técnicas de marcado de agua visible consideran características adicionales, como el factor de obstrucción, así mismo, la importancia de abarcar una gran área de la imagen, para evitar su eliminación mediante algún ataque intencional o no intencional [4].

En los últimos años, en el procesamiento de imágenes digitales, se han implementado técnicas que contemplan el SVH, debido a que estudios psicofísicos demuestran que existen factores importantes en la percepción de la distorsión. Diversos algoritmos [6-8] realizan el cálculo de la distorsión apenas perceptible (JND), considerando aspectos del SVH, como la luminosidad de fondo, que se refiere a los cambios percibidos por el ojo humano para las diferentes tonalidades de colores, la función de sensibilidad al contraste la cual se refiere a la percepción de la variación de la luminosidad entre píxeles, y la textura. Los autores de dichos algoritmos solo estiman el valor de JND, mencionando las posibles aplicaciones, entre ellas el marcado de agua digital.

Por lo tanto, Mohanty et al. [9] propone la inserción de una marca de agua visible en el dominio de la DCT para imágenes en escala de grises, considerando el grado de textura como factor de inserción, ya que mencionan que el SVH tiene menor sensibilidad de percepción en zonas altamente texturizadas. Min-Jen [10] implementa una técnica más robusta en el dominio de la DWT, considerando la función de sensibilidad al contraste, y la función de ruido visible para el cálculo del grado de textura y una constante empírica.

La implementación de características del sistema visual humano para esquemas de marcado de agua visible, actualmente es un tema en investigación, por lo tanto, en el presente artículo se propone el análisis de la luminosidad y contraste en la imagen digital a proteger, para insertar una marca de agua visible, la cual no obstruya el contenido original. El análisis de la luminosidad y contraste para la inserción de la marca de agua es importante, debido a que estudios psicofísicos mencionan que estos dos factores influyen en la percepción de la distorsión para el bajo nivel de procesamiento del SVH [8], por lo tanto, dependiendo de la finalidad de la aplicación, la marca de agua visible puede ser insertada en regiones donde pase desapercibida, de esta manera, afectar al mínimo al contenido original; o en caso contrario, la marca de agua visible es insertada en una región en la cual sea perceptible a simple vista pero sin obstruir demasiado a la imagen original. Los resultados obtenidos demuestran que la marca de agua cumple con la finalidad de no ser obstructiva permitiendo observar el contenido en la imagen original, lo cual cumple las características mencionadas en la literatura.

II. ADAPTACIÓN DE LA LUMINOSIDAD DE FONDO

La luminosidad es la intensidad de luz (color) reflejada por un pixel, por lo tanto, el ojo humano es capaz de percibir una amplia gama de intensidades de luz. La adaptación de luminancia se refiere a la regulación de la sensibilidad visual para diferentes niveles de luz. En la Figura 1, se muestra la curva de adaptación de la luminosidad mediante la medición del umbral de incremento o variación contra un fondo de cierta luminancia, la cual fue propuesta por los físicos Weber-Fechner [6-8].

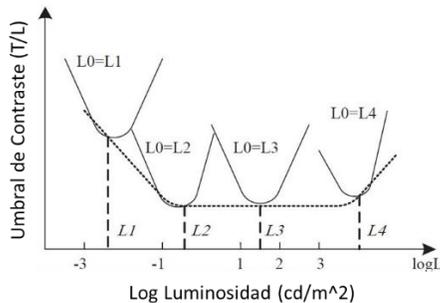


Figura 1. Adaptación de la Luminosidad [7].

La Figura 1 muestra el comportamiento de la luminosidad, la cual está dividida en cuatro secciones principales:

- Luminosidad oscura, que abarca la primera pendiente del gráfico.
- Ley de Vries-Rose, sección donde ocurre la primera variación.
- Ley de Weber, sección donde la curva se mantiene constante.
- Luminosidad clara (Saturación), sección donde ocurre la segunda variación.

En la sección de baja luminosidad (regiones oscuras), y en la zona de saturación (regiones luminosas), el ojo humano es incapaz de detectar los cambios realizados en esas regiones. La Ley de Vries-Rose implica un mecanismo complejo donde se comienza a percibir la distorsión de la luminosidad, mientras que la ley de Weber se refiere al fenómeno de que el contraste del umbral sigue siendo el mismo, independientemente de la luminosidad ambiente.

III. FUNCIÓN DE SENSIBILIDAD AL CONTRASTE.

La función de sensibilidad al contraste, se refiere a la agudeza visual variable del ojo humano hacia señales de diferentes frecuencias espaciales y temporales. Experimentos psicofísicos miden el umbral de visualización mediante rejillas de una onda sinusoidal a diferentes frecuencias espaciales (véase la Figura 2).

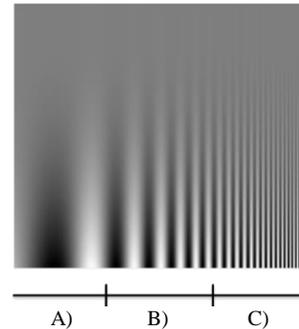


Figura 2. Frecuencias espaciales. A) Frecuencias Bajas, B) Frecuencias Óptimas, C) Frecuencias Altas.

La Figura 2 describe la influencia de la frecuencia espacial de la sensibilidad visual, donde el ojo humano percibe de mejor manera los cambios de contraste en las frecuencias espaciales óptimas. En la medición de la sensibilidad al contraste, las frecuencias espaciales se miden en unidades de ciclos por grado de ángulo visual; para un modelo visual se ha comprobado que el ojo humano percibe mejor los cambios en seis ciclos por segundo [6,8].

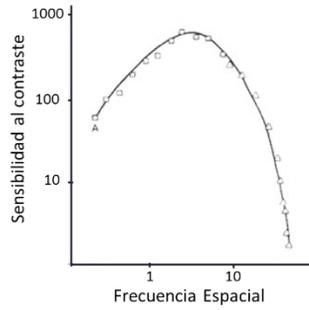


Figura 3. Percepción del contraste, utilizando frecuencias espaciales [6].

IV. DESARROLLO

En la Figura 4 se muestra el diagrama a bloques de la propuesta, el cual consta de dos etapas, la primera corresponde a la adaptación de la luminosidad para imágenes digitales, y la segunda etapa se refiere al desarrollo del algoritmo computacional.

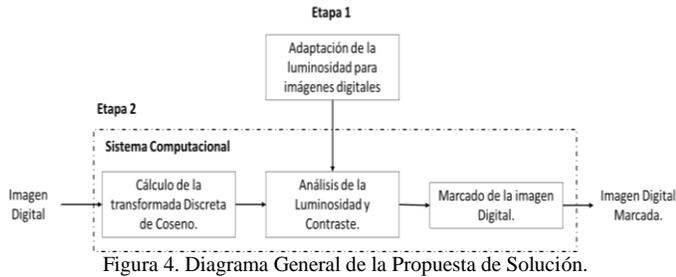


Figura 4. Diagrama General de la Propuesta de Solución.

A continuación se explican a detalle cada una de las etapas anteriormente mencionadas.

A. Adaptación de la luminosidad para imágenes digitales.

El proceso de la adaptación de la luminosidad para imágenes digitales comienza analizando las tonalidades de escala de grises (0-255), esto debido a que la luminosidad de fondo para cualquier imagen a color, independientemente del espacio de color en el que fue creada, puede ser representada en esta escala [6,7]. En la literatura no se han definido aún de manera concreta los rangos de distorsión mínimos en las tonalidades de grises que permiten al SVH percibir un cambio en la luminosidad de la imagen. Por tal motivo se aplicó una encuesta psicofísica, a un grupo de 50 personas (25 mujeres – 25 hombres), a las cuales se les mostraron 25 imágenes, donde a cada imagen con diferente luminosidad de fondo, se le realizó una alteración del 5% con respecto a su valor de intensidad en ciertos pixeles (véase Figura 5), con la finalidad de determinar los rangos en el que el SVH percibe un cambio en la luminosidad de la imagen.

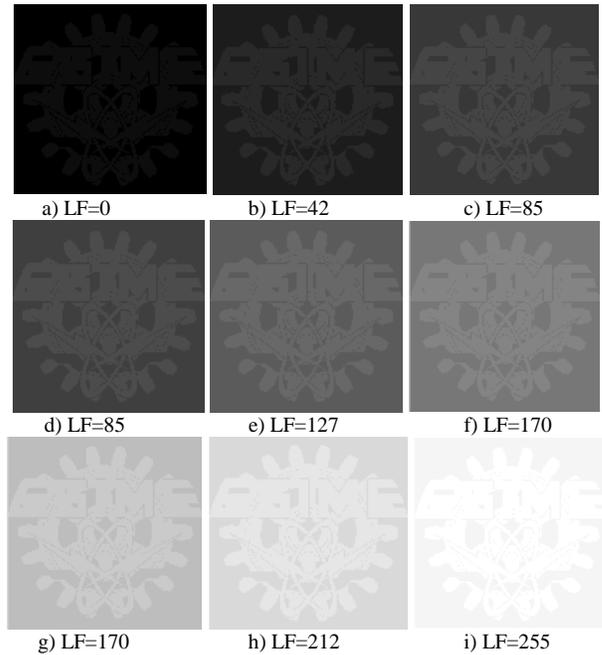


Figura 5. Muestras de las imágenes con variación de la luminosidad de fondo (LF). (a) - (c) imágenes con tonalidades negras, (d) - (f) imágenes con tonalidades grises y (g) - (i) imágenes con tonalidades blancas.

Los resultados de la encuesta psicofísica para determinar los rangos de la percepción de la distorsión en diferentes tonalidades de luminosidad se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. ENCUESTA REALIZADA A 50 PERSONAS PARA LA DETECCIÓN DE LA DISTORSIÓN.

Encuestados	Notaron un cambio en la Imagen		
	LF Oscuras	LF Grises	LF Blancas
Mujeres	7	25	13
Hombres	8	25	15

Con base a los resultados obtenidos, se propuso una adaptación de la luminosidad para imágenes digitales (véase Figura 6); en la cual la percepción de la distorsión en la luminosidad del SVH quedó definida de la siguiente manera:

- En el rango de 0 a 85 no es perceptible la distorsión provocada.
- En el segmento intermedio que abarca de 85 a 170 la distorsión provocada es altamente perceptible.
- Para el rango de 170 a 255 la distorsión provocada es casi imperceptible.

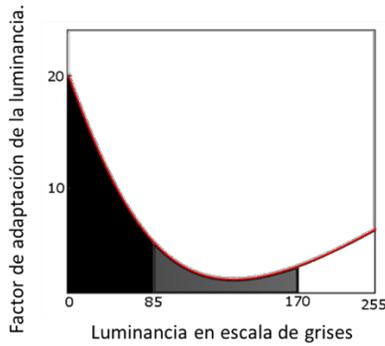


Figura 6. Adaptación de la luminancia para imágenes digitales.

B. Sistema Computacional

El diagrama a bloques del sistema computacional desarrollado se muestra en la Figura 7, el cual está conformado por tres módulos denominados: cálculo de la DCT, análisis de la luminancia y contraste, y marcado de agua de la imagen digital; a continuación se detallará cada proceso.

- 1) Primero se convierte una imagen digital I del espacio de color RGB al espacio $YCbCr$, utilizando solamente el canal Y perteneciente a la luminancia de la imagen, obteniéndose I^Y .
- 2) Posteriormente I^Y es dividida en bloques de 8×8 píxeles no traslapados, a los cuales se aplica la transformada discreta de coseno (DCT), obteniendo $DCT(I_m^Y)$.
- 3) Utilizando el coeficiente DC de cada uno de los bloques de 8×8 en $DCT(I_m^Y)$, se calcula el valor LF para el análisis de la luminancia mediante (1)

$$LF = \begin{cases} K_1 \left(1 - \frac{2C(n_1, n_2, 0, 0)}{GN}\right)^{\lambda_1} + 1 \\ K_2 \left(1 - \frac{2C(n_1, n_2, 0, 0)}{GN}\right)^{\lambda_2} - 1 \end{cases} \quad (1)$$

donde $k_1=2$, y $k_2=0.8$ son valores definidos para localizar la región de luminosidad perceptible; $\lambda_1=3$, $\lambda_2=2$ representan la distancia de visualización definida por estudios psicofísicos, G son las tonalidades de grises (0-255) y N es el tamaño del bloque analizado.

- 4) Se realiza el análisis del contraste, implementando la fórmula de la Función de Sensibilidad al Contraste utilizando (2); donde G son las tonalidades de luminosidad de la imagen digital (0-255), N es el tamaño del bloque, L_{max} y L_{min} , son valores que se ajustan de acuerdo al modelo de adaptación de luminosidad propuesto. $T^0(i,j)$ representa las frecuencias espaciales, los cuales están establecidos en 6 ciclos por segundo, tomando en consideración lo mencionado con anterioridad en la sección III

$$FSC = \frac{G}{N(L_{max}-L_{min})} T^0(i, j) \quad (2)$$

- 5) Utilizando los factores LF y FSC obtenidos para cada uno de los bloques en $DCT(I_m^Y)$, se calcula el umbral de sensibilidad perceptible (USP), mediante su multiplicación como en (3)

$$USP = LF \times FSC \quad (3)$$

- 6) Se inserta la marca de agua WM en la región con menor variación del USP $USP(I_{>V}^Y)$ de la imagen a marcar I^Y , tomando en consideración el tamaño de la marca de agua. La inserción de la marca de agua es llevada a cabo utilizando el método aditivo, como se muestra en (4)

$$IWM^Y = I^Y + \alpha WM \quad (4)$$

- 7) Finalmente la imagen de luminancia IWM^Y es concatenada con sus matrices de crominancia respectivas Cb y Cr , y posteriormente convertida al espacio de color original RGB .

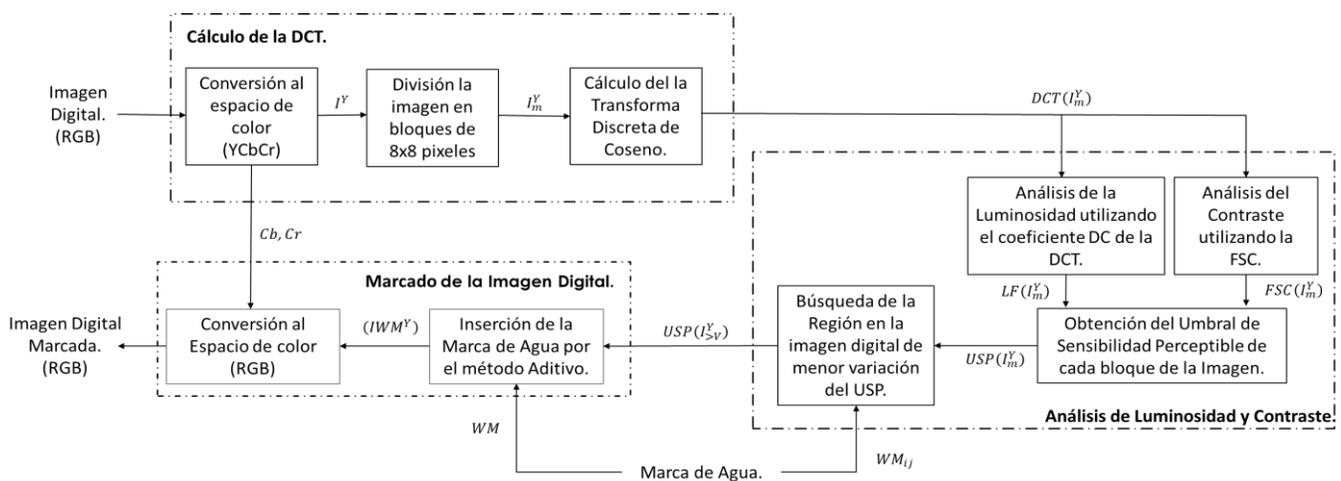


Figura 7. Diagrama a bloques del sistema computacional propuesto.

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

El sistema se desarrolló en el IDE de Matlab®2015b, utilizando una computadora con un procesador Intel® Core i5-5200U, memoria RAM de 4.00GB y Sistema Operativo Windows 10 Home Single Language de 64 bits.

Las imágenes digitales que se utilizaron para evaluar el sistema propuesto fueron: peppers, lena, y baboon, las cuales son comúnmente utilizadas en el procesamiento de imágenes por sus diversas características. Las imágenes antes mencionadas son de 24 bits de profundidad de color, con una resolución de 512 x 512 píxeles. Como marca de agua se utilizó el logotipo del IPN con de 8 bits de profundidad y resolución de 170 x 110 píxeles. Para comprobar la adaptación de la luminosidad en las imágenes digitales de prueba, se inserta la marca de agua tomando en consideración el umbral de sensibilidad perceptible calculado por el sistema propuesto, de esta manera para cada imagen prueba, la región de inserción de la marca de agua estará determinada por el USP. El factor de inserción de la marca de agua empleado para los diferentes experimentos fue de $\alpha = 0.5$.

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos utilizando $L_{max}=85$ y $L_{min}=1$, en estos casos es difícil para el SVH percibir los cambios realizados en la luminosidad, sin embargo, en la Fig.8(a) es importante resaltar que se alcanza a percibir mejor la marca de agua en comparación con las Figuras 8(b) y 8(c); debido a que la Figura 8(a) es una imagen lisa y no contiene demasiadas tonalidades oscuras.



Figura 8. Inserción de la marca de agua en tonalidades negras de acuerdo al USP localizado.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos utilizando $L_{max}=170$ y $L_{min}=86$, para los cuales el sistema visual humano percibe los cambios que se realizan en la imagen digital sin ningún esfuerzo, es decir, que para todos los casos la marca de agua es altamente perceptible.



Figura 9. Inserción de la marca de agua en tonalidades grises de acuerdo al USP localizado.

En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos utilizando $L_{max}=255$ y $L_{min}=171$, como se puede observar, la marca de agua es notoria para los 3 casos, esto se debe principalmente a que el valor promedio del USP se encuentra en el rango de 162 a 201, lo que impide que el SVH enmascare de manera adecuada la distorsión en la luminosidad aplicada al insertar la marca de agua.



Figura 10. Inserción de la marca de agua en tonalidades blancas de acuerdo al USP localizado.

En la Figura 11 con la finalidad de comprobar la validez de las pruebas subjetivas realizadas para alta luminosidad, se incrementó el valor promedio de estas para cada una de las imágenes utilizadas: peppers, lena y baboon, de esta forma obtener un USP mayor a 220, provocando que la marca de agua no se note en ninguno de los casos.



Figura 11. Inserción de la marca de agua en tonalidades blancas modificado de acuerdo al USP localizado.

Finalmente se comprobó la funcionalidad del sistema propuesto para cualquier imagen digital, mediante la inserción de una marca de agua en una fotografía capturada por un dispositivo móvil. La región de inserción de la marca se determinó por el USP calculado en la imagen, para diferentes rangos de luminosidad. Los resultados se muestran en las Figuras 12-14.



Figura 12. Inserción de la marca de agua en luminosidades oscuras

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Comisión de Fomento de Actividades Académicas por el apoyo otorgado para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Madhusudan, H. R. "Digital Watermarks: Authentication of Digital Data". *Resonance Journal of Science Education*, 1998, Vol 3, Issue 9, pp. 61 – 69.
- [2] Shradha S.K. "Digital Watermarking: Review". *IJEIT*. 2012, Vol. 1, Issue 2, pp. 143-153.
- [3] Pdilchuk, C. I. & Delp, E. J. "Digital Watermarking: Algorithms and Applications". *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001, pp. 33 – 46.
- [4] Meenu S., Abhishek S. & Ankur C. "Digital Image Watermarking Techniques". *IJCST*, 2013, Vol 4, Issue 6, pp.51 -55
- [5] Langelaar, G. C., Setyawan, I. & Lagendijk, R. L. "Watermarking Digital Image and Video Data". *IEEE Signal Processing Magazine*, 2000, pp. 20–46.
- [6] Jia Yuthing. "Just Noticeable Distortion Model and Its Application in Image Processing". 2005, M.E. thesis, Beijing, Universidad Nacional de Singapore.
- [7] X.H. Zhang, W.S. Lin, P. Xue. "Improved estimation for just-noticeable visual distortion", 2005, *Signal Processing*, pp. 795-808.
- [8] Zhenzhong Chen, Hongyi Liu. "JND Modeling: Approaches and Applications". *International conference on Digital Signal Processing*, 2014, pp 827 -830
- [9] Saraju P. Mohanty, K. R. Ramakrishnan & Mohan S. Kankanhalli. "A DCT domain visible Watermarking technique for images". *IEEE International Conference on Multi-Media and Expo*, New York, USA, 2000, Issue 2, pp. 1029-1032.
- [10] Min-Jen Tsai. "A visible watermarking algorithm based on the content and contrast aware (COCOA) technique". *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2009, Volume 20, Issue 5, pp. 323-338.



Figura 13. Inserción de la marca de agua en luminisidades intermedias



Figura 14. Inserción de la marca de agua en luminisidades de saturación

En las Figuras 12 y 13 la marca de agua es perceptible, sin embargo, se percibe de mejor manera Figura 13, debido a que la región localizada para el sistema visual humano es la óptima. Caso contrario en la Figura 14, la marca de agua es imperceptible ya que esta se insertó en la región de mayor luminosidad de la imagen.

VI. CONCLUSIONES

El análisis de los factores de luminosidad de fondo y el contraste en la imagen huésped, contribuye a localizar las regiones en el cual el sistema visual humano tenga la mejor percepción de la distorsión, por lo tanto, la marca de agua insertada no daña la calidad de la imagen digital.

Los rangos de luminosidad propuestos para la inserción de la marca de agua fueron los adecuados, debido a que cuando se obtiene una región de la imagen analizada con un umbral de sensibilidad perceptible en el rango de 85 a 170 la marca de agua es altamente perceptible para el ojo humano. Por otra parte en el rango de tonalidades oscuras (0-85) y de saturación (170-255) es recomendable aumentar el factor de inserción de la marca de agua, para que esta sea perceptible por el sistema visual humano, sin embargo, si el autor de la imagen digital desea que la marca no sea perceptible, la inserción puede realizarse en los rangos mencionados.

Ontología de estudios de diagnóstico de Radiología para la generación automática de mensajes HL7

M.S.C. Nancy Aracely Cruz Ramos
Instituto Tecnológico de Orizaba
 Veracruz, México
 nancy.cramos5@gmail.com

M.C.E. Beatriz Alejandra Olivares Zepahua
Instituto Tecnológico de Orizaba
 Veracruz, México
 bolivares@ito-depi.edu.mx

Resumen — Este trabajo presenta una ontología de conceptos de estudios de Radiología para la construcción automática de mensajes HL7. Estos mensajes permiten la comunicación entre un sistema de Expediente Clínico Electrónico (ECE) y equipos médicos de Radiología que soporten la versión 2.x del estándar HL7. El objetivo de dicha comunicación es la interoperabilidad entre los sistemas para integrar la información de los resultados de estudios de Radiología al ECE del paciente.

Durante el desarrollo de la ontología se determinaron los conceptos más relevantes dentro del dominio de estudios de diagnóstico y equipos médicos del área de Radiología y se consideraron los estándares en el área de salud: HL7 y la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA3-2012. Además, se identificaron los conceptos aplicables de la ontología sobre Seguridad y Privacidad HL7 para el caso de un sanatorio y se analizaron las ontologías existentes sobre interoperabilidad de equipos médicos del área de Radiología.

Para el manejo de la ontología se utilizó la API de Jena que es un marco de trabajo para la gestión y consulta de ontologías. A través de Jena se accede a la ontología para la búsqueda de información de los diferentes tipos de estudios de Radiología y los equipos médicos que los soportan; y se obtiene el tipo de mensaje HL7 que se requiere para comunicarse a cada tipo de equipo médico en particular.

Palabras clave: *Ontología, HL7, Radiología, Expediente Clínico Electrónico, equipo médico.*

I. INTRODUCCION

La comunicación de información es un componente fundamental de cualquier sistema. En el área de la salud se transfiere información entre instituciones, entre profesionales y sistemas informáticos. Una comunicación efectiva requiere que el emisor y el receptor de información compartan un “marco de referencia” común que permita la interacción. Los estándares proveen ese marco común, promoviendo una uniformidad en la denominación de los componentes del sistema de salud, ya sean objetos, diagnósticos, personas, intervenciones, entre otros.

Health Level Seven International (HL7) desarrolla distintos estándares para el intercambio electrónico de datos entre sistemas de información en el área de salud, y permite que las aplicaciones médicas se comuniquen entre sí

independientemente de su plataforma tecnológica o de su lenguaje de desarrollo.

HL7 permite crear mensajes estandarizados (sintaxis) que viajan a través de una única interface. Estos mensajes utilizan a la vez datos estandarizados (semántica), como la identificación del paciente, las órdenes de estudios de radiología y de laboratorio, y otros valores que se basan en un vocabulario estándar y controlado [1].

En el ámbito de intercomunicación entre equipos médicos y sistemas de información, HL7 también desarrolla distintos estándares. Como existe una gran variedad entre las implementaciones de los estándares por parte de los proveedores de equipos médicos, se crean ontologías que se relacionan con seguridad, interoperabilidad y estudios de laboratorio, entre otros [2,3,4,5,6,7].

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Ontología

Una ontología define los términos para la descripción y representación de un área de conocimiento. Los usuarios, las bases de datos y las aplicaciones que requieren compartir información específica utilizan ontologías.

Una ontología es el resultado de seleccionar un dominio, y aplicar sobre el mismo un método para obtener una representación formal de los conceptos que contiene y las relaciones que existen entre los mismos.

Componentes de una ontología

Las ontologías tienen los siguientes componentes para la representación del conocimiento de algún dominio:

- **Conceptos:** son las ideas básicas que se intentan formalizar. Los conceptos son clases de objetos, métodos, planes, estrategias, procesos de razonamiento, entre otros.
- **Relaciones:** representan la interacción y enlace entre los conceptos del dominio. Suelen formar la taxonomía del dominio. Por ejemplo: subclase-de,

parte-de, parte-exhaustiva-de, conectado-a, entre otras.

- Funciones: son un tipo concreto de relación donde se identifica un elemento mediante el cálculo de una función que considera varios elementos de la ontología. Por ejemplo, categorizar-clase, asignar-fecha, entre otros.
- Instancias: se utilizan para representar objetos determinados de un concepto.
- Axiomas: son teoremas que se declaran sobre las relaciones de los elementos de la ontología. Por ejemplo: “Si A y B son de la clase C, entonces A no es subclase de B”, “Para todo A que cumpla la condición C1, A es B” [8].

2.2 Ontologías médicas

El número de ontologías en el campo médico es amplio; existen algunas a nivel europeo LOA, RIHS y también algunas colecciones de ontologías biomédicas OWG, IO, OBO, TOBO, NCBO. Aproximadamente se cuenta con un repositorio de 60 ontologías biomédicas. Estas ontologías se editan y se muestran bajo un estándar de archivo de texto llamado formato OBO, aunque la mayoría tiene sus versiones en OWL [9].

En la tabla 1 se muestra un subconjunto de las ontologías médicas más representativas, de acuerdo a la cantidad de investigadores inmersos en el desarrollo de las mismas, su visualización en el mundo científico a través de congresos, *papers*, referencias bibliográficas y su utilidad en el campo médico [10].

TABLA 1. ONTOLOGÍAS MÉDICAS MÁS IMPORTANTES

Nombre	Lenguaje de modelado	Área de Especialización
TAMBIS	DAML + OIL	Información biológica y Bioinformática
RO	OWL	Secuencias RNA en sistemas biológicos
GO (Gene Ontology)	OWL, RDF	Genes
SO (Sequence Ontology)	OBO, OWL	Secuencias Biológicas
OBI (Ontology for Biomedical Investigations)	OBO, OWL	Investigaciones Biológicas y Clínicas
MGED	OWL, DAML + OIL, RDFS	Experimentos Microarray
Disease Ontology	OBO, OWL	Enfermedades
SNOMED (Systematized Nomenclature of Medicine Clinical Terms)	Lógica Descriptiva	Todo el campo médico
NCI (National Cancer Institute)	OWL	Cáncer
GALEN	OWL	Todo el campo médico

Como se muestra en la tabla anterior, existe poca o nula documentación acerca de ontologías específicamente para el área de estudios de Radiología.

2.3 Ontología sobre Seguridad y Privacidad HL7

El objetivo de esta ontología es apoyar a las descripciones de las políticas de seguridad, políticas de privacidad, las directivas de autorización, control de acceso resultante, e ideas relacionadas. Por lo tanto, la ontología núcleo comienza con conceptos del dominio del CSP-DAM (*Composite Security and Privacy Domain Analysis Model*, Modelo de Análisis del Dominio de la Privacidad y Seguridad).

Otras sub-ontologías se derivan del núcleo para propósitos de aplicación, basadas en vocabulario HL7, el Catálogo de Permiso Sanitario HL7 RBAC (*Role Based Access Control*, Control de Acceso Basado en Roles) y el HCS (*Healthcare Privacy and Security Classification System*, Sistema de Clasificación de Seguridad y Privacidad Sanitario) HL7.

La ontología sobre Seguridad y Privacidad HL7 aborda varios objetivos clave:

- Identificar los conceptos importantes en el área de la seguridad y la privacidad de las IT sanitarias.
- Establecer nombres estandarizados para conceptos en el área de seguridad y privacidad de las IT sanitaria.
- Dar definiciones textuales claras y precisas a los conceptos en el área de seguridad y la privacidad de las IT sanitaria.
- Constituir una ontología de autoridad, con conceptos que son:
 - definidos formalmente y sin ambigüedades utilizando OWL.
 - clasificados en una taxonomía bien organizada (jerarquía de clases).
 - conectados de maneras significativas y útiles.
 - coherentes entre sí.
- Apoyo consistente y efectivo a las implementaciones de software de las IT sanitarias [1].

III. DESARROLLO

Methontology es una metodología para construir ontologías tanto partiendo desde cero como reusando otras ontologías, o a través de un proceso de reingeniería.

En este apartado, se presentan las actividades que se realizaron en las fases de Especificación y Conceptualización de Methontology para el desarrollo de la ontología de este trabajo. Cabe mencionar, que en las tareas de la fase de Conceptualización sólo se mostrarán las relacionadas con los mensajes HL7, debido a que el contenido es extenso.

3.1 Fase de Especificación

El objetivo de la ontología que se presenta en este trabajo, es estructurar y facilitar la construcción de mensajes HL7, así como, la configuración de los elementos necesarios para el

envío y recepción de los mensajes a partir de la información de estudios y equipos del área de Radiología. Está dirigida a los estudiantes y profesionales interesados en el desarrollo de aplicaciones médicas que requieran interoperabilidad con equipos del área de Radiología.

3.2 Fase de Conceptualización

Tarea 1: Glosario de términos

El glosario incluye todos los términos relevantes del dominio (conceptos, atributos, relaciones, instancias), y sus descripciones. En la tabla 2 se muestra una parte de los conceptos que se identificaron.

TABLA 2. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Nombre	Tipo	Descripción
Campo	Concepto	Cadena de caracteres definida por un tipo de dato de HL7.
Componente	Concepto	Elemento que integra un Campo.
EscenarioIntegración	Concepto	Suceso que origina un mensaje HL7.
MensajeHL7	Concepto	Unidad mínima transferida entre sistemas informáticos.
ADT^A01, ADT^A08, ORM^O01, ORI^O24, ORU^R01	Concepto	Tipos de mensaje HL7.
Segmento	Concepto	Agrupación de campos HL7.
ERR, EVN, MSA, MSH, NTE, OBR, OBX, ORC, PID, PV1	Concepto	Tipos de segmento HL7.
SistemaPACS	Concepto	Sistema que almacena imágenes médicas.
Sistema RIS	Concepto	Sistema que administra los datos demográficos y toma de estudios del paciente.

Tarea 2: Jerarquía de clases

Para construir la jerarquía de clases, se seleccionaron del glosario aquellos términos que son conceptos. Lo anterior se muestra en la figura 1.

Equipo	MensajeHL7
Expediente	ADT^A01
Hospital	ADT^A08
Médico	ORM^O01
Paciente	ORI^O24
Repositorio	ORU^R01
Aplicación	Segmento
AplicaciónDeImagen	ERR
EscenarioIntegración	EVN
AceptaciónRechazoSolicitud	MSA
AdmisiónPaciente	MSH
Resultados	NTE
SolicitudPrueba	OBR
EstudioDiagnóstico	OBX
Radiología	ORC
Radiografía	PID
RayosX	PV1
Tomografía	SistemaPACS
Campo	SistemaRIS
CampoBD	Solicitud
Componente	Tabla

Fig 1. Jerarquía de clases

Tarea 3: Diagrama de relaciones binarias

El diagrama de relaciones binarias se obtuvo al encontrar las relaciones entre los conceptos que se identificaron en la tarea anterior, esto se muestra en la figura 2.

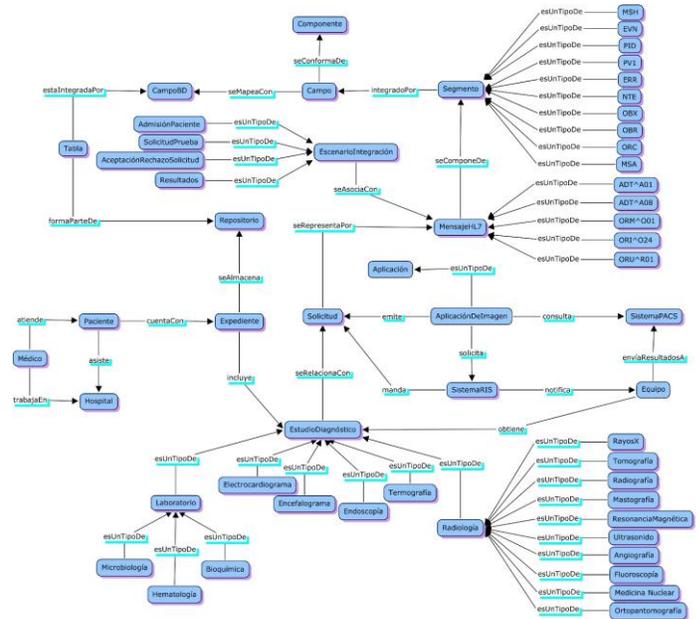


Fig 2. Diagrama de Relaciones Binarias

Tarea 4: Diccionario de Conceptos

En la tabla 3 se muestra el diccionario de conceptos que contiene todos los conceptos del dominio y sus relaciones. Las relaciones especificadas para cada concepto son aquellas en las que el concepto es el origen de la misma.

TABLA 3. DICCIONARIO DE CONCEPTOS

Concepto	Relaciones
Campo	seMapeaCon -> CampoBD seConformaDe -> Componente Segmento -> integradoPor
Segmento	integradoPor -> Campo ERR -> esUnTipoDe EVN -> esUnTipoDe MSA -> esUnTipoDe MSH -> esUnTipoDe NTE -> esUnTipoDe OBR -> esUnTipoDe OBX -> esUnTipoDe ORC -> esUnTipoDe PID -> esUnTipoDe PV1 -> esUnTipoDe MensajeHL7 -> seComponeDe
MensajeHL7	seComponeDe -> Segmento EscenarioIntegración -> seAsociaCon Solicitud -> seRepresentaPor ADT^A01 -> esUnTipoDe ADT^A08 -> esUnTipoDe ORM^O01 -> esUnTipoDe ORI^O24 -> esUnTipoDe ORU^R01 -> esUnTipoDe
EscenarioIntegración	seAsociaCon -> MensajeHL7 AceptaciónRechazoSolicitud -> esUnTipoDe

Concepto	Relaciones
	AdmisiónPaciente -> esUnTipoDe Resultados -> esUnTipoDe SolicitudPrueba -> esUnTipoDe
Solicitud	seRepresentaPor -> MensajeHL7 AplicaciónDeImagen -> emite SistemaRIS -> manda EstudioDiagnóstico -> seRelacionaCon

Tarea 5: Tabla de Relaciones Binarias

La tabla 4 describe a detalle las relaciones binarias que se identificaron en el diagrama de relaciones binarias.

TABLA 4. TABLA DE RELACIONES BINARIAS

Relación	Dominio	Rango	Cardinalidad
asiste	Paciente	Hospital	1:* ... 1:*
atiende	Médico	Paciente	1:* ... 1:*
componeA	Segmento	MensajeHL7	1:* ... 1:*
consulta	AplicaciónDeImagen	SistemaPACS	1:* ... 1:*
cuentaCon	Paciente	Expediente	1:1 ... 1:1
emite	AplicaciónDeImagen	Solicitud	1:* ... 1:*
envíaResultadosA	Equipo	SistemaPACS	1:* ... 1:1
esAtendidoPor	Paciente	Médico	1:* ... 1:*
estaIntegradaPor	Tabla	CampoBD	1:* ... 1:*
estaMapeadoCon	CampoBD	Campo	1:1 ... 1:1
formaParteDe	Tabla	Repositorio	1:* ... 1:*
incluye	Expediente	EstudioDiagnóstico	1:* ... 1:*
integradoPor	Segmento	Campo	1:* ... 1:*
manda	SistemaRIS	Solicitud	1:* ... 1:*
notifica	SistemaRIS	Equipo	1:* ... 1:*
obtiene	Equipo	EstudioDiagnóstico	1:* ... 1:*
seAlmacena	Expediente	Repositorio	1:* ... 1:*
seAsociaCon	EscenarioIntegración	MensajeHL7	1:1 ... 1:1
seComponeDe	MensajeHL7	Segmento	1:* ... 1:*
seConformaDe	Campo	Componente	1:* ... 1:*
seMapeaCon	Campo	CampoBD	1:1 ... 1:1
seRelacionaCon	EstudioDiagnóstico	Solicitud	1:1 ... 1:1
seRepresentaPor	Solicitud	MensajeHL7	1:* ... 1:*
solicita	AplicaciónDeImagen	SistemaRIS	1:* ... 1:*
trabajaEn	Médico	Hospital	1:* ... 1:*

Tarea 6: Atributos de instancia

En la tabla 5 se describen a detalle los atributos de instancia incluidos en el diccionario de conceptos.

TABLA 5. ATRIBUTOS DE INSTANCIA

Atributo	Concepto	Cardinalidad
tieneNombreTabla	Tabla	1:1
tieneNombreRIS	SistemaRIS	1:1
tieneNombreRepositorio	Repositorio	1:1
tieneNombrePACS	SistemaPACS	1:1
tieneNombreHospital	Hospital	1:1
tieneNombreEstudio	EstudioDiagnóstico	1:1
tieneNombreCampoBD	CampoBD	1:1
tieneNombreCampo	Campo	1:1
tieneIDRepositorio	Repositorio	1:1
tieneIDHospital	Hospital	1:1
tieneComponenteValor	Componente	1:1
tieneCampoValor	Campo	1:1

En las tareas 7 y 8 de Methontology, no se identificaron atributos de clase ni constantes respectivamente.

Tarea 9: Axiomas

En la tabla 6 se muestra la descripción precisa de uno de los axiomas que se identificaron en la ontología.

El nombre del axioma es: Imposibilidad de que varias solicitudes se representen por el mismo mensaje.

TABLA 6. AXIOMAS

Expresión	Conceptos	Relaciones	Variables
NO (EXISTE(Solicitud(?x) AND MensajeHL7(?y) AND MensajeHL7(?z) AND (Solicitud(?x) AND MensajeHL7(?z) AND seRepresentaPor (?x,?y) AND seRepresentaPor (?x,?z) AND ?y=?z)))	Solicitud MensajeHL7	seRepresentaPor	?x ?y ?z

Tarea 10: Reglas

En la tabla 7 se muestran las reglas necesarias en la ontología.

TABLA 7. REGLAS

Nombre	Descripción	Expresión	Conceptos/ Relaciones
Encontrar inversa de atiende	Si un Médico atiende un Paciente, entonces ese Paciente esAtendidoPor ese mismo Médico	Si Paciente(?x) AND Médico(?y) AND atiende(?y, ?x) entonces esAtendidoPor (?x, ?y)	Paciente, Médico, atiende, esAtendidoPor
Encontrar inversa de seComponeDe	Si un MensajeHL7 seComponeDe Segmento, entonces ese Segmento componeA ese mismo MensajeHL7	Si MensajeHL7(?x) AND Segmento (?y) AND seComponeDe (?x, ?y) entonces componeA (?y, ?x)	MensajeHL7, Segmento, seComponeDe, componeA
Encontrar inversa de seMapeaCon	Si un Campo seMapeaCon CampoBD, entonces ese CampoBD estaMapeadoCon ese mismo Campo	Si Campo(?x) AND CampoBD(?y) AND seMapeaCon(?y, ?x) entonces estaMapeadoCon (?x, ?y)	Campo, CampoBD, seMapeaCon, estaMapeadoCon

Tarea 11: Instancias

En la tabla 8 se muestran las instancias del diccionario de conceptos.

TABLA 8. INSTANCIAS

Nombre	Concepto	Valores de atributos
CampoBD01	CampoBD	tieneNombreCampoBD = idpid
CampoBD02	CampoBD	tieneNombreCampoBD = idpaciente
CampoBD03	CampoBD	tieneNombreCampoBD = apepaterno
CampoBD04	CampoBD	tieneNombreCampoBD = apematerno
CampoBD05	CampoBD	tieneNombreCampoBD = nombre
CampoBD06	CampoBD	tieneNombreCampoBD = fechanac
CampoBD07	CampoBD	tieneNombreCampoBD = sexo
Repositorio01	Repositorio	tieneNombreRepositorio = hrrbdb
Repositorio02	Repositorio	tieneNombreRepositorio = BDSHuerta
Tabla01	Tabla	tieneNombreTabla = Paciente
Tabla02	Tabla	tieneNombreTabla = EstudiosPaciente

3.3 Consultas a la ontología

La ontología se desarrolló con la herramienta Protégé versión 4.3 y se utilizó SPARQL como lenguaje de consultas.

En la figura 3 se muestra el código de la consulta para obtener los segmentos que componen a un mensaje HL7 de tipo ORM^O01 (solicitud de estudio), y en la figura 4 se presenta el resultado de la ejecución del código en la herramienta Protégé.

```

1 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
2 PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
3 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
4 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
5 PREFIX ito: <http://www.ito-depi.edu.mx/disonto/201501/interoperabilidad#>
6 SELECT ?clase
7 WHERE {
8   ?segmento ito:componeA ?mensaje.
9   ?mensaje rdf:type ito:ORMO01.
10  ?segmento rdf:type ?clase.
11  ?clase rdfs:subClassOf ?x
12 }

```

Fig 3. Consulta para obtener los segmentos que componen a un mensaje HL7 de tipo ORM^O01.

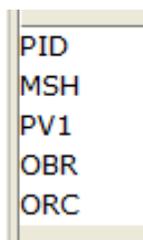


Fig 4. Resultado de la consulta para obtener los segmentos que componen a un mensaje HL7 de tipo ORM^O01.

En la figura 5 se muestra el código de la consulta para obtener el nombre de las bases de datos con el nombre de sus tablas, en la figura 6 se presenta el resultado del código mencionado.

```

1 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
2 PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
3 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
4 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
5 PREFIX ito: <http://www.ito-depi.edu.mx/disonto/201501/interoperabilidad#>
6 SELECT (str(?bd) as ?nombreBD) (str(?tablabd) as ?nombreTabla)
7 WHERE {
8   ?repositorio ito:tieneNombreRepositorio ?bd.
9   ?tabla ito:formaParteDe ?repositorio.
10  ?tabla ito:tieneNombreTabla ?tablabd
11 }

```

Fig 5. Consulta para obtener el nombre de las bases de datos con el nombre de sus tablas.

nombreBD	nombreTabla
"hrrbdb"	"Paciente"
"BDSHuerta"	"EstudiosPacientes"

Fig 6. Resultado de la consulta para obtener el nombre de las bases de datos con el nombre de sus tablas.

En la figura 7 se muestra el código para llenar el segmento PID de un mensaje HL7 el cual contiene los datos de identificación del paciente. Primero, se buscan los datos de la conexión al repositorio en la ontología, después se realiza una búsqueda para obtener el mapeo de los campos de la base de datos con los campos del mensaje HL7. Posteriormente, se busca la información del paciente de acuerdo al identificador ingresado. Al final, se llena cada uno de los campos del mensaje HL7 con los datos obtenidos del repositorio.

```

1 PID pid = message.getPATIENT().getPID();
2 try {
3   oPaciente.setIdPaciente(idPaciente);
4   oPaciente.buscarDatosConexion();
5   oPaciente.buscarMapeo();
6   oPaciente.buscar();
7 }catch (Exception ex) {
8   Logger.getLogger(ConsultaJB.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
9 }
10 pid.getSetIDPID().setValue(oPaciente.getIDPID());
11 pid.getPatientIdentifierList(0).getIDNumber().setValue(oPaciente.getIdPaciente());
12 pid.getPatientName(0).getFamilyName().getSurname().setValue(oPaciente.getApePaterno()+oPaciente.getApeMaterno());
13 pid.getPatientName(0).getGivenName().setValue(oPaciente.getNombre());
14 pid.getDateOfBirth().getTime().setValue(oPaciente.getFechaNac());
15 pid.getAdministrativeSex().setValue(oPaciente.getSexo());
16

```

Fig. 7 Código para llenar el segmento PID

En la Fig. 8 se presenta parte del código para realizar la búsqueda de información del paciente en la base de datos, los nombres de los campos de esa consulta se obtuvieron de la ontología a través de una consulta SPARQL.

```

1 if (this.getIdPaciente().equals("")) {
2   throw new Exception("Error de programación, faltan datos");
3 }
4 else {
5   sQuery = "SELECT t1." + this.getCamposBD().get(5)
6   + ", t1." + this.getCamposBD().get(2)
7   + ", t1." + this.getCamposBD().get(4)
8   + ", t1." + this.getCamposBD().get(0)
9   + ", t1." + this.getCamposBD().get(1)
10  + ", t1." + this.getCamposBD().get(6)
11  + ", t1." + this.getCamposBD().get(3)
12  + " FROM " + this.getTabla() + " t1"
13  + " WHERE t1." + this.getCamposBD().get(2)

```

```

14 + "="+ this.getIdPaciente() + """;
15 if (getoAD() == null){
10     setoAD(new AccesoDatos());
11     getoAD().setUrl("jdbc:postgresql://localhost/" + this.getBD());
12     if (getoAD().conectar()){
13         rst = this.getoAD().ejecutarConsulta(sQuery);
14         getoAD().desconectar();
15     }
16     setoAD(null);
17 }
18 else{
19     rst = this.getoAD().ejecutarConsulta(sQuery);
20 }

```

Fig 8. Código para buscar información del paciente en el repositorio.

IV. TRABAJO A FUTURO

El estándar HL7 ofrece una diversidad de mensajería en informática médica, por lo tanto, se seguirá trabajando para enriquecer los conceptos de la ontología para que soporte la creación de otros tipos de mensajes.

Se agregarán a la ontología capacidades para la construcción de mensajes del área de Laboratorio, y se crearán los canales de comunicación necesarios para interactuar con un Sistema Integral LIS el cual gestionará los resultados de estudios de Laboratorio a los equipos médicos de esta área.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se destaca la importancia del uso de ontologías y las especificaciones del estándar HL7 y la Norma Oficial Mexicana en el desarrollo de aplicaciones reales.

Las ventajas de contar con una ontología de conceptos para generar mensajes HL7 de forma automática son:

- facilita la obtención de los datos que requiere cada segmento de un mensaje HL7.
- ahorra tiempo en la creación de los mensajes HL7, ya que cada que se cambia de equipo médico se requiere adaptar de forma manual cada mensaje para realizar la comunicación entre el ECE y el equipo.
- permite agregar nuevos equipos o sistemas, haciendo mínimos o nulos cambios en la aplicación que explota la ontología.

Cabe mencionar que esta ontología es explotada por una aplicación Web para la comunicación con equipos médicos a través de mensajes HL7 e integra la información de estudios Auxiliares de Diagnóstico al ECE del paciente.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico otorgado para la realización de la investigación.

Al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba, por las facilidades otorgadas a través de la

División de Estudios de Posgrado e Investigación para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Sitio oficial de HL7. Disponible en: <http://www.hl7.org>
- [2] González C., Blobel B., López DM., Ontology-based interoperability service for HL7 interfaces implementation. *Studies in Health Technology and Informatics*. PubMed. 2010.
- [3] González, L. D., Álvarez, B. L. M., Fernández, O. A., Implementación de estándares DICOM SR y HL7 CDA para la creación y edición de informes de estudios imagenológicos.
- [4] I. De La Torre, R. Hornero, M. López, M. I. López., HL7-CDA and DICOM standards in electronic health records system in ophthalmology. *Telehealth/AT '08: Proceedings of the IASTED International Conference on Telehealth/Assistive Technologies*. Publisher: CTA Press. 2008.
- [5] Benjamin Jung, DICOM-X Seamless Integration of Medical Images into the EHR, pp.203-207, 18th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS'05), 2005.
- [6] Tinnakornsriruphap, T. Billo, R., An Interoperable System for Automated Diagnosis of Cardiac Abnormalities from Electrocardiogram Data, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=6809847&isnumber=6363502>
- [7] Fulvio Barbarito, Francesco Pincirolì, John Mason, Sara Marceglia, Luca Mazzola, Stefano Bonacina. Implementing standards for the interoperability among healthcare providers in the public regionalized Healthcare Information System of the Lombardy Region. *Journal of Biomedical Informatics*, Volume 45 Issue 4. Publisher: Elsevier Science. 2012. Disponible en: [http://www.j-biomed-inform.com/article/S1532-0464\(12\)00007-X/fulltext](http://www.j-biomed-inform.com/article/S1532-0464(12)00007-X/fulltext)
- [8] Departamento de Informática. Ontologías. Universidad de Valladolid. Disponible en: <http://www.infor.uva.es/~sblanco/Tesis/Ontolog%C3%ADas.pdf>
- [9] Revista Tecnología, Gerencia y Educación, Volumen 11 N° 21 Junio 2010. ISSN: 1317-2573
- [10] Vásquez Harold, Aguilera Ana, Tineo Leonid. Medical Ontologies: A Review. *Revista IUTET Tecnología, Gerencia y Educación*. Disponible en: http://revista.iutet.edu.ve/v11_21_1.pdf

Aplicación de Realidad aumentada (LUDE RAum)

Norma Verónica Ramírez Pérez
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato. México
norma.ramirez@itcelaya.edu.mx

Bruno González Sánchez
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato. México
brunogzsz@hotmail.com

Juan Pablo Arreguín Rodríguez
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato. México
juanpabloargrdz@gmail.com

Guadalupe Zavala Villalpando
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato. México
jgzavala@itcelaya.edu.mx

Martín Laguna Estrada
Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Guanajuato. México
martin.laguna@itcelaya.edu.mx

Resumen- Este artículo aborda la introducción de alternativas digitales a modelos físicos mediante las tecnologías de realidad aumentada a través del uso de una computadora y un sensor Kinect. La aplicación que se presenta lleva por nombre “LUDE RAum” y para su programación se utilizó el lenguaje AS3, el cual permite al usuario manipular modelos en 3D de los órganos humanos de tres formas distintas mediante movimientos corporales tales como mover las manos o cruzar los brazos. El usuario tiene la posibilidad de mover un órgano seleccionado en el plano de la cámara, así como modificar sus dimensiones y girarlo, todo esto es posible mediante el uso de la tecnología que ofrece el sensor Kinect Xbox 360. Esta tecnología también ha permitido detectar el esqueleto del usuario frente al sensor. LUDE RAum tiene el objetivo de servir de herramienta educativa para fomentar el interés por el estudio al utilizar elementos visuales atractivos que además se puedan operar.

Palabras clave: AS3; Kinect; realidad aumentada; elementos visuales.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversas estrategias para la enseñanza en escuelas de educación básica que buscan aumentar el interés del alumno por las distintas materias que le son impartidas en el aula, el uso de tecnologías actuales como apoyo para el aprendizaje se está convirtiendo en un tema al cual vale la pena invertir tiempo, ya que además de fomentar la educación, se está enseñando a los alumnos a familiarizarse con distintos dispositivos que le serán útiles en un futuro para su desarrollo. La realidad aumentada es la combinación de un

entorno físico con elementos virtuales en tiempo real. Basándonos en esto, se tiene el propósito de la creación de una aplicación capaz de interactuar con distintos modelos de órganos en tercera dimensión de manera dinámica para que el usuario pueda aprender, al mismo tiempo que interactúa, con la aplicación que adquiere la información a través de un sensor Kinect.

A pesar del gran avance tecnológico que se ha desarrollado en los últimos años, los métodos de enseñanza dentro del aula han ido evolucionando lentamente en la mayoría de las escuelas públicas de nivel básico. No se pretende exhibir que los métodos actuales de enseñanza sean o no obsoletos ya que éste no es el objetivo del proyecto, sin embargo, sabemos que en las aulas de educación básica se sigue enseñando a la vieja usanza, es decir mediante libros de texto y tomando notas o copiando ejercicios que el profesor apunta en el pizarrón. Algo que no es exclusivo de las nuevas generaciones es la notoria dificultad de aprender con los métodos clásicos, con este proyecto se busca disminuir las complicaciones que se presentan al enseñar anatomía humana. Utilizando como herramienta la realidad aumentada, el usuario además de escuchar la teoría de la anatomía humana en el aula, podrá aprender interactuando, al tratar de ubicar algunos elementos que comprenden al cuerpo en la posición correcta. Adicionalmente se utilizarán herramientas tecnológicas actuales con lo que se logrará que los estudiantes se familiaricen con el uso de esta tecnología. Este método de enseñanza permitirá mantener la interacción del alumno de una manera activa, logrando así despertar el interés y fomentar la actividad física gracias a este tipo de tecnología.

En primera instancia y como objetivo principal, se aplicó esta tecnología solamente al campo de la anatomía humana pero

a mediano plazo, se involucrará en otros campos de la educación básica tales como geografía, matemáticas o historia donde se podrá disponer de una aplicación más completa en el que se integren dinámicas para poder aprender de una manera más ilustrativa. Es más fácil aprender cuando se puede observar algún elemento que se relacione con aquellas definiciones o dictados los cuales pueden resultar tediosos además de aburridos para un alumno de educación básica.

Actualmente el uso de medios digitales como apoyo didáctico para los alumnos ha tenido un crecimiento considerable, sin embargo aún hace falta contribuir más en el desarrollo de material de apoyo y tomar las oportunidades que nos ofrece la tecnología en la educación. El catedrático de la Universidad de Sevilla Julio Cabero Almenara en su publicación titulada: “Las necesidades de las TIC en el ámbito educativo: oportunidades riesgos y necesidades”, (Cabero J., 2007), describe ampliamente las oportunidades y ventajas de aplicar las tecnologías de la información en la educación.

II. CONCEPTOS PRELIMINARES

• Realidad Aumentada

La Realidad Aumentada (RA), se puede considerar como un concepto tecnológico relativamente nuevo, y a pesar de que fue concebida a principios de los años 90, es en la actualidad es donde se puede aplicar de manera práctica dado el enorme avance que ha tenido la tecnología en los últimos años.

[1] menciona que es una tecnología capaz de complementar la percepción e interacción con el mundo real, brindando al usuario un escenario real, aumentado con información adicional generada por un ordenador. Se puede definir que la realidad se combina con elementos virtuales, por lo que al hacer eso, se obtienen objetos virtuales bidimensionales y/o tridimensionales superpuestos al mundo real.

En [3] recomienda que [...] no debe confundirse la realidad virtual con la realidad aumentada, aunque comparten algunas características, sobre la inserción de modelos virtuales 2D y 3D, la diferencia estriba en que la RA no reemplaza el mundo real por un mundo virtual. Por otro lado, [2] define que un sistema de RA tiene que cumplir las siguientes características: 1. Contenido real y virtual. 2. El sistema debe ser interactivo y ejecutarse en tiempo real y 3. El contenido virtual debe estar registrado en el mundo real.

En cuanto a su funcionamiento, las aplicaciones de RA tienen tres subsistemas fundamentales: visualización (salida), ubicación de objetos virtuales en el mundo real (registro) y métodos de interacción (entrada):

1. Visualización. Se logra con el uso de dispositivos de visualización similares a los de Realidad Virtual. Algunos de estos dispositivos son cascos y gafas. Estos se componen por pantallas de cristal líquido funcionando como si fueran lentes transparentes para que pueda observarse el mundo real y permitir adicionar los objetos virtuales.

2. Registro de objetos virtuales. Consiste en lograr que los objetos virtuales puedan “registrarse” con el mundo real, de tal forma que cuando el usuario se mueva, los objetos parezcan conservar su posición.

3. Interacción. Consiste en métodos para manipular o modificar tales objetos.

• Arquitectura de un Sistema de Realidad Aumentada

[6] Define que la arquitectura de cualquier sistema de RA tiene fundamentalmente dos elementos críticos: visualización y seguimiento, pues de ellos depende el grado de inmersión e integración en la realidad mixta. El sistema de seguimiento determina la posición y orientación exactas de los objetos reales y virtuales en el mundo real. El sistema de visualización, además de generar los objetos virtuales, combina todos los elementos de la escena, reales y virtuales, mostrándolos por pantalla. Podemos ver en la figura 1 un esquema conceptual de un sistema de RA.

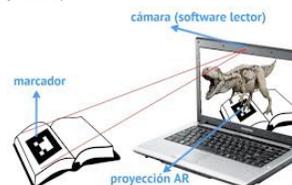


Fig. 1. Esquema conceptual de la Realidad Aumentada.

Par generar un escenario de RA, se requiere de una cámara para captura la información del mundo real, después el sistema de seguimiento establece la posición y orientación del usuario en cada momento. Se puede decir que con éste se genera el escenario virtual que, combinado con la señal procedente de la videocámara, conforma ya la realidad aumentada. Al relacionarse objetos reales y virtuales, se podría presentar ya al usuario un entorno completo por medio de un dispositivo de visualización, sin embargo, un aspecto medular en la RA es la interfaz del usuario, ya que será la que realmente ocupará en forma de aplicación. Por todo lo anterior, se podría considerar que la RA es de vital importancia en la elaboración de materiales de estudio para el aprendizaje de los alumnos.

Existen muchas posibilidades de aplicar la realidad aumentada en la educación sobre todo que hoy en día contamos con mucha información visual, la cual es una manera mucho más atractiva de aprender, pues el uso de la tecnología está a la orden del día. Esta tecnología va muy a la par con las políticas gubernamentales en programas dirigidos a la generación de escuelas más digitales. Las tablets, las pizarras digitales y los materiales interactivos, constituyen una fuente de recursos didácticos que dotan de un componente motivacional añadido a las actividades escolares, lo que favorece la atención a la diversidad. Estas nuevas herramientas mejoran el aprendizaje y favorecen la realización de actividades cooperativas, ya que permiten el desarrollo de habilidades cognitivas, así como la adquisición de las competencias básicas digitales que permitan el aprovechamiento de los recursos que se han otorgado a los alumnos de todos los niveles. Se necesitan realizar aplicaciones móviles que permitan a los estudiantes tener acceso real a dichos dispositivos y a un aprendizaje real más visual. En la actualidad existe poco interés de los alumnos a aprender de una manera clásica, es decir, de la manera tradicional que por lo regular todo el profesorado realiza. Debido a esto, se pretende

que tanto los alumnos y docentes tengan nuevas alternativas de enseñanza-aprendizaje, como la realidad aumentada y la creación y utilización de objetos de aprendizaje. Concretamente, se puede decir que la realidad aumentada es una técnica de visualización que superpone información virtual sobre un escenario real. Toda esta gama de tecnologías que tenemos a la mano, son fundamentales para el crecimiento de la educación, sin embargo se puede citar como lo mencionaba Bravo C.(1993) [4] la Tecnología Educativa es la aplicación de manera creadora de las técnicas y procedimientos para el mejoramiento del sistema educativo y para la prevención y solución de los problemas en la que juegan un papel importante el enfoque sistémico, la eficiencia de gestión y dirección educativa, la selección adecuada de los medios de enseñanza y las investigaciones en el área pedagógica. Por lo tanto, no basta con tener la tecnología a la mano si no que se tiene que trabajar con la selección de métodos adecuados para que esta tecnología no solo apoye al docente si no que beneficie a los alumnos también. Existen en la actualidad algunos proyectos de educación como CONNECT, CREATE, ARISE, AMIRE todos ellos relacionados en la educación y citados por [3].

III. DESARROLLO

La metodología para el desarrollo de la aplicación se muestra en el siguiente diagrama de bloques.

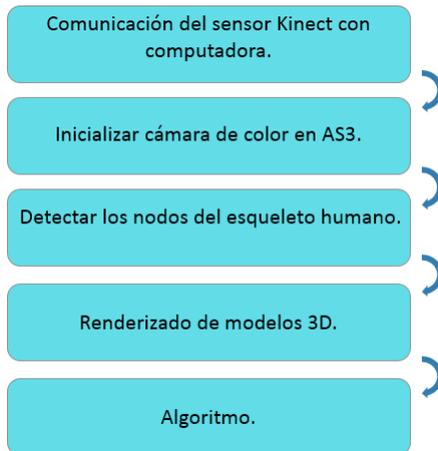


Figura 2. Diagrama de bloques.

El sensor Kinect es un dispositivo fabricado por Microsoft que inicialmente fue utilizado para la consola Xbox 360 Kinect [5] permite a los usuarios controlar e interactuar con Xbox 360 sin contacto directo con la consola (NUI), posteriormente Microsoft permitió a desarrolladores de software crear aplicaciones utilizando el dispositivo de forma libre, además de conseguir el dispositivo para el desarrollo de LUDE RAum, es necesario instalar en la computadora los controladores del dispositivo.

Para la comunicación del sensor Kinect con la computadora, se utilizó Kinect for Windows SDK v1.8 (Software Development Kit), disponible de forma gratuita desde la página

de Microsoft, que son los controladores necesarios para que la computadora haga el reconocimiento del sensor (ver figura 3). Para poder utilizar el sensor se consiguió el adaptador USB para Kinect, ya que la versión del dispositivo que se utilizó fue la de Xbox 360 el cual no posee una salida USB directa, este adaptador permite conectar el sensor a uno de los puertos USB de la computadora. Mediante la experimentación se comprobó que es más pertinente utilizar un puerto USB 3.0 a uno 2.0 para la comunicación del dispositivo.

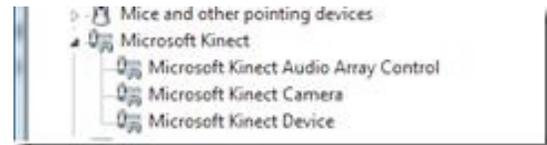


Figura 3. Drivers Kinect.

Adobe flash builder es un entorno de programación para construir juegos y aplicaciones usando lenguaje de programación ActionScript y la fuente abierta Flex framework. En este entorno de programación se desarrolló LUDE Raum para utilizar la extensión AIRKinect y permitir a los desarrolladores usar el sensor Kinect para generar aplicaciones de escritorio Adobe AIR 3.0. Otra alternativa presente fue el desarrollo de la aplicación en lenguaje C# pero debido a las características que ofrece el compilador de Adobe, se realizó el desarrollo bajo esta plataforma.

El primer paso para la generación de la aplicación fue el reconocimiento y habilitación de las cámaras del sensor mediante la declaración de un objeto del tipo Kinect que representa a una clase, a dicho objeto posteriormente se agrega un “Listener” cuya función consiste en detectar un evento de cambio en la cámara de color, cada vez que esto pase se actualizará el mapa de bits encargado de mostrar la imagen de la cámara de color captada por el dispositivo (ver figura 5), en caso de que se ejecute sin tener el sensor Kinect conectado a la computadora, no se mostrará nada en pantalla, de una forma muy similar se obtuvo la imagen de profundidad (ver figura 4).

Figura 4. Imagen de profundidad captada por el sensor Kinect.



Fig. 5 Imagen RGB captada por el sensor Kinect

Una vez que obtenido el conocimiento sobre como mostrar en pantalla las cámaras del sensor, se puede conseguir modificar algunas propiedades de la cámara, como lo son resolución de la imagen. Para la aplicación aquí presentada, se estableció un tamaño de 640x480 pixeles que es el mismo tamaño de la ventana y, aunque se realizaron pruebas con una resolución mayor de 1260x980 pixeles, los resultados que se obtuvieron fue un retraso en la actualización de la imagen.

El dispositivo Kinect para Xbox 360 es capaz de detectar hasta 20 nodos del esqueleto humano (ver figura 6), de los que obtiene su posición en el espacio

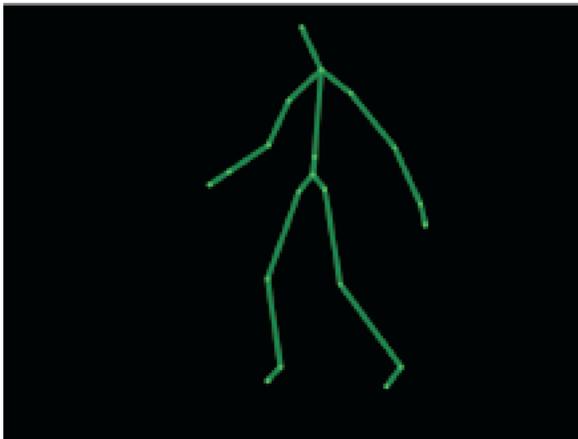


Fig. 6 Esqueleto

Cada nodo del esqueleto, tiene ya un nombre predefinido (ver figura 7), de esta manera podemos hacer uso de ellos. Con la información que proporciona el dispositivo Kinect de cada uno de los nodos, es posible identificar la posición del usuario así como de sus extremidades. Con esta información disponible se realizó la restricción de la posición del usuario en un rango de 2 a 2.5 metros, además de utilizar las coordenadas en los ejes X y Y de las extremidades para la manipulación de los modelos e interacción con algunos elementos.

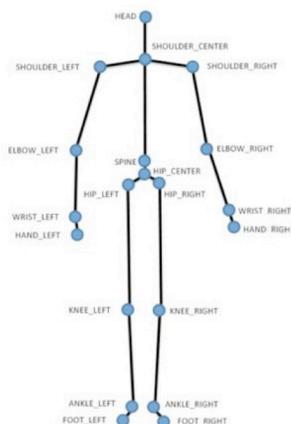


Fig. 7 Identificadores de los nodos

Una vez que se obtuvieron los modelos 3D de los órganos, se realizó un tratamiento previo a éstos para su uso posterior dentro de la programación. Como herramienta principal se utilizó el software 3DS MAX de AUTODESK que es un software de renderización, animación y modelado en 3D (fig. 8). Dentro de 3DS MAX, se produjo una animación de 100 frames en donde el elemento gira 360° de forma horizontal. Una vez que se obtuvo la animación, se realizó el renderizado de los 100 frames en un formato de imagen “.png” característico de los logotipos y que por sus características elimina el fondo de las imágenes.

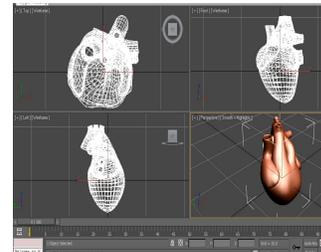


Figura 8. Animando el corazón.

Posteriormente los 100 archivos con extensión *.png fueron exportados a Adobe Flash CS6 y se manejó como un símbolo del tipo Movie Clip (fig. 9). Aquí se asignó a cada uno de los órganos su nombre de clase que será el mismo con el que se declararán objetos en el compilador, entonces el símbolo se publicó con formato *.SWC el cual es compatible con la programación AS3, este archivo es importado desde el compilador, luego mediante líneas de código se declaran objetos de las diferentes clases de órganos.

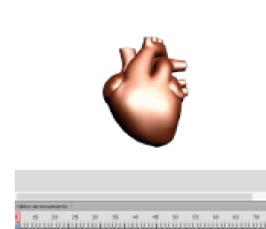


Figura 9. Archivos en Adobe AS6

Este procedimiento se llevó a cabo con siete órganos básicos que integran la aplicación: corazón, cerebro, estómago, intestino delgado, intestino grueso, pulmones y riñones. AS3 reconoce las animaciones y permite modificar propiedades de la misma porción en pantalla como tamaño (alto y ancho), además de permitir reproducir la animación, en cualquier momento se puede hacer el llamado al método .play() o pararla .stop(). También existe la opción de modificar la velocidad (frames por segundo) que se le asigna a la animación desde Adobe Flash AS6, así como la posibilidad de mostrar un frame de animación determinado.

Dentro del entorno de programación se utilizaron las propiedades de los nodos de las manos para la manipulación de los modelos y tomar de esta manera la posición correcta del usuario en un rango de 2 a 2.5 metros. Se utilizó la distancia en

el eje Z a partir del Kinect al nodo de la cabeza del usuario (fig. 10).

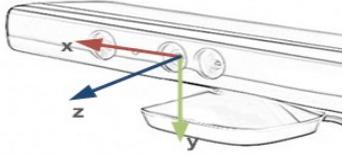


Figura 10. Sistema de coordenadas en modo world.

Para el cambio de órganos se utilizó el movimiento de las manos de un lado al otro. En el caso de la mano derecha, ésta tiene que ir de izquierda a derecha pasando estrictamente por enfrente del usuario, la condición en las líneas de código es que el nodo de la mano derecha deberá estar a la izquierda del nodo de la cabeza y después a la derecha del mismo para detectar un gesto de cambio. Del mismo modo pero en sentido contrario, ocurre con la mano izquierda, teniendo ésta que ir de derecha a izquierda, teniendo ésta que ir de derecha a izquierda.

Para mover un órgano se tiene como condición que la mano izquierda del usuario esté sobre el nodo de la cabeza, y cuando esto ocurra, se modificarán los parámetros de posición del órgano para que este se ubique en las coordenadas de la mano derecha del usuario, siempre y cuando se cumpla la condición mencionada. Al bajar la mano izquierda, el modelo del órgano dejará de posicionarse sobre las coordenadas X,Y del nodo de la mano derecha y se quedará fijo en las últimas coordenadas X,Y del nodo de la mano derecha antes de que ya no se cumpla la condición de movimiento. Del mismo modo se utilizaron otros gestos para tener la posibilidad de agrandar modelos y también rotarlos.

IV. RESULTADOS

Una vez que se integraron todos los elementos mencionados en el desarrollo de la aplicación, fue posible crear una interface con diferentes modalidades que pueden ser seleccionadas desde la pantalla de inicio (Ver figura 11). La aplicación también contiene dos botones que permiten iniciar la modalidad o ir a la sección de información de los desarrolladores e instrucciones de uso. Entre las distintas modalidades de presentación de los componentes, se encuentra un apartado de ayuda para apoyar al usuario cuando desconoce la posición del órgano y se incluye también la posibilidad de girar y modificar sus dimensiones así como la de mostrar información cuando el órgano se coloca o no en la posición correcta.

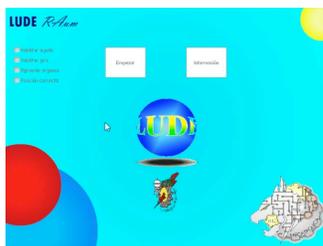


Figura 11. Pantalla de inicio de la aplicación.

Al presionar el botón de comenzar, la aplicación requiere que el usuario se coloque a una distancia óptima para el escaneado indicándolo con letreros (Ver figura 12), una vez calibrada la distancia, el usuario deberá mantener su mano sobre una imagen en pantalla y esperar a que cargue la animación para desplegar el menú de los órganos(Ver figura 13).



Figura 12. Indicaciones de posición.



Figura 13. Calibración de distancia.

Una vez que se realizó el paso anterior, es posible desplazarse por el menú de los siete modelos de órganos incluidos en la aplicación. Para poder moverlos a una posición es necesario mantener la mano izquierda levantada a una altura mayor de la cabeza. Para indicarle a la aplicación que la posición en la que está el órgano es la supuesta respuesta correcta, es necesario bajar la mano izquierda e inmediatamente si el usuario acertó se muestra una imagen con información acerca del órgano con el cual se estaba interactuando (Ver Figura 14).

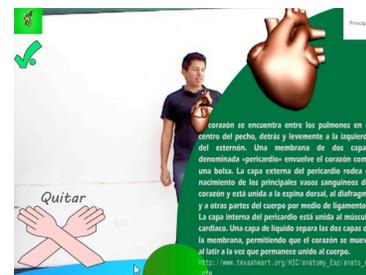


Figura 14. Modelo del corazón en posición correcta

Si el intento del usuario es erróneo, la aplicación mostrará un mensaje indicándole al usuario que se equivocó (Ver Figura 15)



Figura 15. Respuesta errónea por parte del usuario.

V. CONCLUSIONES

En la actualidad, la tecnología que tenemos es útil en los entornos educativos, sin embargo, existen cada día más modalidades como la RA considerada una herramienta que llevará a una nueva generación de aplicaciones y aunque todavía no se tiene la cultura de utilizarla al 100%, lo cierto es que se ha intentado motivar el uso de ésta con estrategias como crear ambientes virtuales, aplicaciones educativas y plataformas para estudiar a distancia, entre otras. La propuesta de esta aplicación ha motivado a realizar extensiones a la misma y llevarla a otras áreas de educación básica, con la creación de objetos de enseñanza para que los alumnos generen conocimiento a través de esta aplicación y que no se queden rezagados con la enseñanza actual, donde solo es protagonista el maestro y no los alumnos.

Como parte del trabajo futuro de esta aplicación, se pretende extender a todas las materias del nivel básico y se trabajará para la creación de objetos de aprendizaje con metodologías de diseño instruccional que nos lleven a crear ambientes educativos con materiales claros y efectivos que ayuden a un mejor desarrollo de las competencias en los estudiantes.

REFERENCIAS

- [1] Azuma, R. T. (1997). *A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, N. 4, pp. 355 – 385.
- [2] Azuma, R.T. (2001). *Augmented Reality: Approaches and Technical Challenges, Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*, W. Barfield, Th. Caudell (eds.), Mahwah, New Jersey, pp 27-63.
- [3] Basogain X. y otros, (2007), “*Realidad Aumentada en la Educación: una tecnología emergente*”, ONLINE EDUCA MADRID 2007: 7a Conferencia Internacional de la Educación y la Formación basada en las
- [4] Cabero, J. (2007), *Las necesidades de las TIC en el ámbito educativo: oportunidades riesgos y necesidades*. Tecnología y Comunicación Educativas Año 21, No. 45.
- [5] Microsoft (2016). *Kinect for Windows*. Recuperado de <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>
- [6] Ruiz, T. D. (2011). Realidad Aumentada, educación y museos. *Revista ICONO14. Revista científica de Comunicación y Tecnologías emergentes.*, 9(2), 212- 226.

Serket: Sistema de protección de datos para dispositivos móviles.

Alejandro Vega Salas, Alan Adolfo Astudillo
Olivares, Juan Antonio Olivares Ramírez, Samantha
Itzel De los santos Tinajero.
Tecnológico Nacional de México.
Instituto Tecnológico de Matamoros.
H. Matamoros, Tamaulipas.
samantha@serketprotectionsystem.com

Reynaldo Mata González.
Tecnológico Nacional de México.
Instituto Tecnológico de Matamoros.
H. Matamoros, Tamaulipas.
reynaldo.mata@itmatamoros.edu.mx

Resumen—En la actualidad las personas manejan grandes volúmenes de información sensible en sus dispositivos móviles. En manos equivocadas dicha información podría representar un gran riesgo para la integridad de cada individuo o de una organización. En el presente documento se presenta *Serket*, una propuesta de solución a ésta problemática, la cual consiste en una aplicación para dispositivos móviles con sistema operativo Android que brinda a los usuarios los tres aspectos fundamentales para el resguardo de su información: protección de la privacidad, respaldo de información y estrategias antirrobo.

Palabras clave—Seguridad móvil; Protección de información; Respaldo de información; Estrategias antirrobo; Protección de privacidad;

I. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, el uso de teléfonos inteligentes se ha convertido en una práctica creciente tanto a nivel personal como empresarial debido a las múltiples funcionalidades que estos ofrecen y a la facilidad para el manejo de grandes volúmenes de información.

De acuerdo a un artículo publicado en la red de sitios de tecnologías de información TechTarget [1], uno de los aspectos más importantes con respecto a la seguridad móvil es la autenticación de los usuarios para la protección de los datos en contra de intrusos y ladrones.

En un artículo publicado en el tomo número 21 de la revista Seguridad [2], se ve reflejada la gran importancia que representa la seguridad en los dispositivos móviles, no solo en el aspecto personal, sino también dentro del ámbito empresarial. Entre varios aspectos, se resalta la importancia de realizar respaldos de la información para evitar pérdidas, así como la protección de la misma en contra de software malicioso como troyanos, spyware, keyloggers, entre otros.

Además de los aspectos antes mencionados, y de acuerdo al artículo publicado en Pymes y Autónomos [3], otro aspecto relevante en la seguridad móvil es la localización del dispositivo en caso de robo o extravío y, como último recurso, el borrado seguro de la información de forma remota.

De acuerdo a la información recopilada de los diversos artículos y a encuestas realizadas en la localidad, se inició el

desarrollo de este proyecto tomando como base los tres aspectos fundamentales que se requieren para crear una aplicación de seguridad móvil que brinde las herramientas necesarias para un óptimo resguardo de la información.

II. TRABAJOS RELACIONADOS.

Cuando se comenzó con el desarrollo de *Serket* se analizaron diversas aplicaciones ya existentes en el mercado, la idea fue crear una aplicación que brinde al usuario los tres aspectos más importantes para mantener resguardada su información: protección de la privacidad, respaldo de información y estrategias antirrobo.

En el 2016 la corporación HTC desarrollo una aplicación para sus nuevos celulares que consistían en una pantalla de bloqueo sencilla con la opción de colocar un fondo de pantalla [4]

En el 2014 surgió Next Lock Screen, una pantalla de bloqueo con la opción de mostrar información creada por un grupo de estudiantes pertenecientes al *Microsoft Garage*, un área creada por Microsoft para el apoyo a nuevos talentos [5].

Applock una aplicación de DoMoblie que proporciona la opción de poder colocar cerraduras virtuales a otras aplicaciones, manteniendo segura la información de usuario [6].

Cerberus anti-robo es una aplicación ofrecida por LSDroid en la plataforma Google Play, volviéndose una aplicación de seguridad muy conocida en el 2011 por contener varios métodos de seguridad muy innovadores para dispositivos móviles centrados en una sola aplicación [7].

Rastrear Celular GPS es una aplicación enfocada a la utilización del GPS como una estrategia para localizar la ubicación del dispositivo móvil de amigos, familiares y conocidos para que así de esta manera se pueda conocer su ubicación, esta aplicación es ofrecida en Google Play por Family Safety Production, una organización que se encarga del desarrollo de aplicaciones móviles enfocadas en la seguridad y recuperación de dispositivos móviles [8].

Encuentra mi teléfono es una aplicación que utiliza el GPS como una herramienta para localizar la ubicación de un

celular en caso de pérdida o robo, con la ayuda de otro dispositivo móvil esta aplicación la ofrece Family Safety Production, una organización que se encarga del desarrollo de aplicaciones móviles enfocadas en la seguridad y recuperación de dispositivos móviles [8].

Siendo la seguridad móvil un tema tan importante, era obvio que ya existiesen aplicaciones en el mercado que ofrecieran este servicio. La desventaja es que la mayoría de estas aplicaciones van enfocadas a un solo aspecto, ya sea la protección de privacidad, el respaldo de información o estrategias antirrobo, lo cual hace necesario descargar más de una de ellas para una protección más completa.

Por ello se decidió diseñar e implementar un sistema de protección de datos para dispositivos móviles llamado *Serket*, que considera aspectos importantes de seguridad previamente mencionados y dispone de herramientas que son fáciles de utilizar para cualquier usuario que desee proteger su información, tanto personal como empresarial.

III. SERKET:

A. Pantallas de bloqueo aleatorias.

El Método *Bitmap* especifica los atributos de la *Bitmap*, es decir las características que tendrá la imagen definida en la pantalla de bloqueo, su tamaño y su tamaño de pixel. Cabe destacar que se pueden almacenar tantas contraseñas como el usuario desee y pueda recordar.

```
Bitmap imageBitmap = BitmapFactory.decodeByteArray(currentImage, 0,
currentImage.length);
imageHint.setImageBitmap(imageBitmap);
```

Se inicializa el método *ConnectPatterView* también llamado el desbloqueo por patrón, después de haberse colocado la *bitman*, se colocará una contraseña que acompañará a la imagen ya antes seleccionada, como otro método de seguridad, esta imagen se rotará aleatoriamente cada que se bloquee el teléfono.

```
view = (ConnectPatternView) findViewById(R.id.connect);
view.animateIn();
```

Se inicia el evento *Listener* que será el encargado de monitorear, las actividades que se realizan en lo que concierne a la pantalla de bloqueo, el método lo que hará será estar al tanto de los patrones o intentos de contraseñas que se utilizan para poder tener acceso al teléfono, comparando cada intento, con los datos previamente registrados por el usuario, en caso de que la contraseña que se ingresó coincida con la imagen, el dispositivo le permitirá avanzar a los servicios de su dispositivo.

```
view.setOnConnectPatternListener(new
ConnectPatternView.OnConnectPatternListener() {
@Override
public void onPatternEntered(ArrayList<Integer> result) {

for(int i = 0; i < result.size(); i++){
password+= result.get(i);
}
Log.d(TAG, password);
if (password.equals(currentPassword)) {
view.animateOut();
new Handler().postDelayed(new Runnable() {
@Override
public void run() {
finish();
}
}, 1000);
}, 1000);
```

Y como todo, en caso contrario de que los datos previamente insertados, no coincidan con los almacenados en la memoria del teléfono, no permitirá avanzar a los servicios del teléfono. Al momento de que el usuario ingresa datos erróneos, el método *Listener* manda una llamada al método *Pattern*, indicándole que los datos ingresados no coinciden con algún registro en la memoria, es ahí cuando se inicializa el proceso del contador, este contador lo que hace es llevar una cuenta interna de los intentos fallidos en el dispositivo. A su vez se definió una condición, que al cumplirse dicha sentencia, es decir al ingresar 3 veces datos erróneos, se manda una llamada al método *Camera*, que activa la cámara en proceso de segundo plano, y sin que pueda ser detectada por el usuario que posee el dispositivo, y toma una foto por medio de la cámara frontal.

```
} else {
error++;
if(error >= 3) {
checkAndSetCamera();
camera.startPreview();
new Handler().postDelayed(new Runnable() {
@Override
public void run() {
camera.takePicture(null, null, new
PhotoHandler(getApplicationContext());
}
}, 1000);
}
}
password = "";
}
```

B. Bloqueo de aplicaciones.

Después de haber pasado el filtro de bloqueo de pantalla aleatorio, la interfaz de *Serket*, permite utilizar la función de bloqueo de aplicaciones. Este método lo que realiza es buscar mediante el nombre del componente, la aplicación que coincida con la búsqueda, se extrae el nombre y se compara con la lista de procesos en ejecución y registrados que tiene el dispositivo, en caso de ser seleccionado algún proceso se activa la clase *AppLockScreen* que será la encargada de bloquear la aplicación. Esta podrá ser desbloqueada, con el previo registro de un patrón para el bloqueo de apps.

```
for(int i = 0; i < apps.length; i++) {
if (componentName.getPackageName().equals(apps[i]) && !processFound[i] &&
locked[i] && !userPassword.equals("") && serviceOn) {
Intent intent = new Intent(this, AppLockScreen.class);
intent.setFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_NEW_TASK);
intent.putExtra("package", componentName.getPackageName());
intent.putExtra("class", componentName.getClassName());
intent.putExtra("id", i);
intent.addFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_EXCLUDE_FROM_RECENTS);
intent.addFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_CLEAR_TASK);
startActivity(intent);
}
}
```

C. Estrategias antirrobo.

Las estrategias de recuperación del dispositivo funcionan mediante un método dentro de la app que se ejecuta en segundo plano, este activa o no la aplicación, este servicio monitorea la recepción de mensajes de texto, en busca de encontrar coincidencia con alguno de los códigos previamente registrados en el dispositivo, los servicios son, activación de alarma remota, envío de la ubicación actual del dispositivo,

activación de cámara espía y el envío de la foto, y por último el formateo de la información del dispositivo. Estos servicios se ejecutan mediante la recepción de un SMS, y se activarán siempre y cuando se cumpla la condición de que el SMS que llega al receptor sea de un número registrado en la base de datos del dispositivo, para evitar conflictos con la recepción de otros números no registrados.

```
switch(message) {
    case "00001":
        Intent alarmIntent = new Intent(context, AlarmService.class);
        alarmIntent.addFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_NEW_TASK);
        context.startService(alarmIntent);
        break;
    case "00002":
        Intent locationIntent = new Intent(context, LocationService.class);
        locationIntent.putExtra("number", phoneNumber);
        locationIntent.setFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_NEW_TASK);
        context.startService(locationIntent);
        break;
    case "00003":
        Intent pictureIntent = new Intent(context, PictureService.class);
        pictureIntent.setFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_NEW_TASK);
        context.startService(pictureIntent);
        break;
    case "00004":
        Intent formatIntent = new Intent(context, FormatService.class);
        formatIntent.setFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_NEW_TASK);
        context.startService(formatIntent);
        break;
    default:
        break;
}
```

En el caso de que el código del emisor sea 0001 y el SMS haya sido recibido por el receptor, se ejecuta un el proceso que activara la alarma, aun cuando el dispositivo este en silencio o tenga el volumen al mínimo nivel, los métodos se ejecutaran y cumplirán su cometido siempre y cuando el código especificado sea correcto, y este no vaya acompañado de algún carácter extra.

El proyecto planteado ofrece diversas funcionalidades, pero para acceder a ellas es necesario completar una etapa de registro (en caso de ser un nuevo usuario) o de inicio de sesión (en caso de ser un usuario registrado).

A continuación se describen, mediante diagramas de casos de uso, la etapa de registro y las tres funcionalidades que se pueden efectuar:

D. Etapa de registro y login.

Desde su aplicación móvil, el usuario deberá iniciar sesión para poder tener acceso al sistema. En caso de no poseer una cuenta, tendrá que pasar antes por una etapa de registro, en la cual se le pedirá que llene un breve formulario con algunos datos. En la figura 1 se pueden apreciar las acciones que deberá realizar el usuario, dependiendo el caso, para poder efectuar el inicio de sesión.

E. Acceso al sistema.

Una vez haya iniciado sesión, el usuario tendrá acceso a las tres funcionalidades: Protección de la privacidad, respaldar información y estrategias antirrobo; ésta última es manipulada mediante la página web oficial; tal y como se muestra en la figura 2.

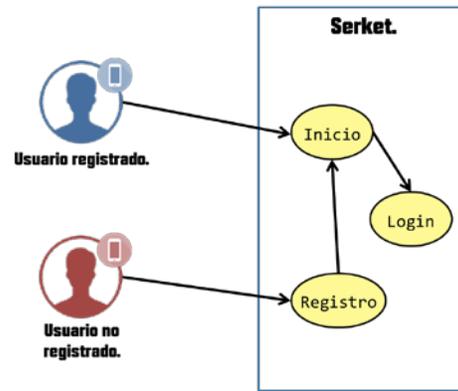


Figura 1. Login del usuario, dependiendo si está registrado o no.

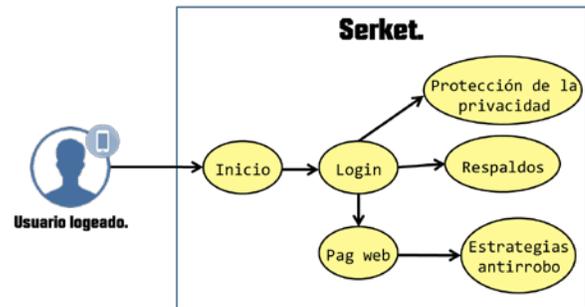


Figura 2. Muestra las tres funciones principales de Serket.

A continuación se presentan los diagramas de casos de uso que describen paso a paso cada una de las funciones que ofrece el sistema de protección Serket.

F. Protección de la privacidad.

Ésta función tiene como meta impedir el acceso a personas ajenas al dispositivo, requiriendo una autenticación del usuario para acceder a algunas aplicaciones e inclusive al propio dispositivo. En la figura 3 se pueden observar las herramientas que forman parte de ésta sección:

a) *Bloqueo de aplicaciones:* Una vez se accede a la sección de protección de privacidad, se puede tener acceso a ésta herramienta, la cuál permite asignar una contraseña a las aplicaciones seleccionadas por el usuario.

b) *Pantallas de bloqueo aleatorias:* Ésta herramienta brinda la opción de establecer varios patrones de contraseña junto a una imagen pista, los cuales se rotarán aleatoriamente; dependiendo de la imagen pista que aparezca, será el patrón que deberá introducirse. En caso de errar tres veces, se activa la cámara espía que toma una fotografía y la almacena en una carpeta que permanece oculta.

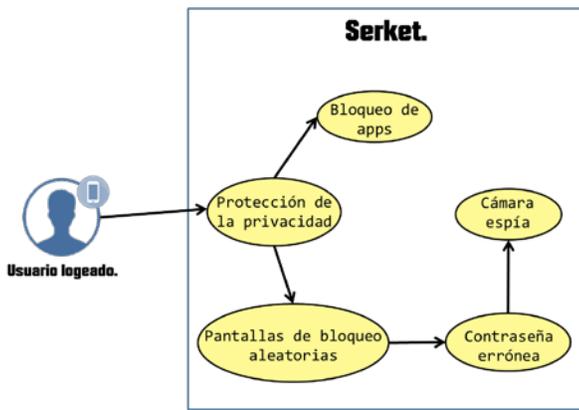


Figura 3. Herramientas implementadas en la sección de protección de la privacidad.

G. Respaldo de información.

Lo que ésta función pretende es evitar la pérdida de información realizando respaldos de la misma en la nube, cada cierto periodo de tiempo o cuando el usuario lo requiera. También ofrece la opción de descargar los archivos del último respaldo realizado. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas junto a su diagrama de casos de uso (figura 4):

a) *Realizar respaldo (manual)*: Al implementar ésta herramienta se realiza un respaldo en la nube de todos los archivos multimedia, notas, contactos, etc., de manera inmediata.

b) *Configurar respaldo (automático)*: Permite la configuración de tiempos para que se realicen respaldos de la información de manera automática cada cierto periodo de tiempo, según lo estipule el usuario.

c) *Descargar archivos respaldados*: Ésta opción permite obtener los archivos guardados durante el último respaldo realizado.

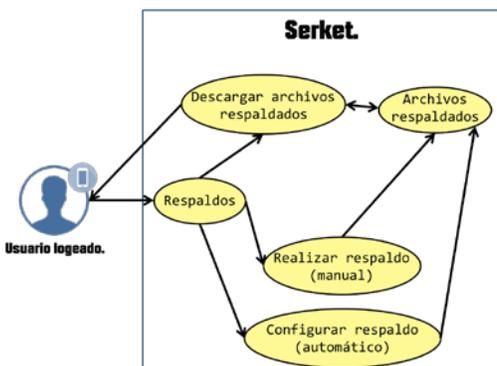


Figura 4. Muestra las dos formas de efectuar el respaldo de información y la manera en que se obtiene dicha información respaldada.

H. Estrategias antirrobo (página web).

Se podrá tener acceso a las herramientas antirrobo mediante la página web oficial de Serket o vía mensaje de texto. Lo que se pretende con ésta función es brindar herramienta que permitan al usuario una posible recuperación del dispositivo, en caso de robo o extravío. Se podrá acceder a la página web desde cualquier dispositivo, introduciendo el nombre de usuario y contraseña para tener acceso a las herramientas.

En la figura 5 se muestra el diagrama de casos de uso y se describe el funcionamiento de cada una de las opciones, siendo monitoreadas desde la página web:

a) *Activar alarma*: Una vez que el usuario se haya logeado desde la página web, podrá activar una alarma que hará sonar su dispositivo extraviado, sin importar que se encuentre silenciado o en modo vibrador.

b) *Formateo de memoria*: Brinda al usuario la opción de hacer un formateo de la memoria interna de su dispositivo.

c) *Obtener ubicación*: Se obtiene la ubicación del dispositivo extraviado vía GPS y después se visualiza mediante la página web.

d) *Obtener fotos de la cámara espía*: Al implementar ésta herramienta se obtienen las fotografías que han sido capturadas mediante la cámara espía. Dichas fotografía podrán ser visualizadas mediante la página web.

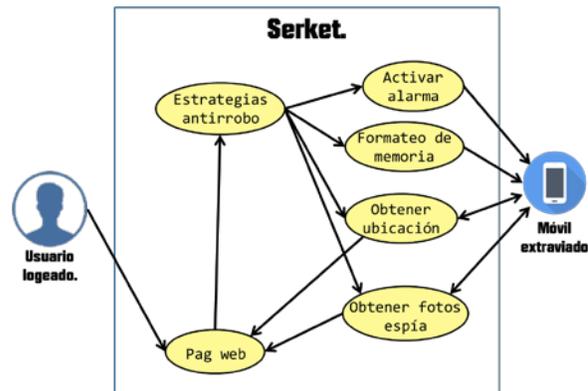


Figura 5. Acceso a las estrategias antirrobo desde la página web.

I. Estrategias antirrobo (mensaje de texto).

Otra de las maneras de acceder a las herramientas antirrobo es mediante mensajes de texto. Para ello el usuario deberá contar con un número móvil autorizado que, al enviar cierto código vía SMS, se implementará una de las herramientas anteriormente planteadas. El funcionamiento es muy similar que mediante la página web, con la diferencia de que la ubicación y las fotografías de la cámara espía se visualizan mediante un mensaje de texto.

Los códigos para activar las herramientas sólo funcionarán si el SMS ha sido enviado desde el número que el usuario haya registrado como autorizado.

Para un funcionamiento eficaz, es necesario implementar las tecnologías de envío de SMS que ofrecen las compañías móviles, tal y como puede apreciarse en la figura 6.

IV. TECNOLOGÍAS DETRÁS DE SERKET.

Serket ha sido desarrollada en el lenguaje de programación Java, para ello se hizo uso del entorno de desarrollo integrado Android Studio.

La funcionalidad de Serket en los sistemas Android comienza a partir del nivel API 17, el cual es el equivalente a la versión 4.2 de los sistemas operativos Android. Las primeras pruebas se llevaron a cabo en un dispositivo móvil Samsung Galaxy Grand prime que contaba con el sistema operativo Android 5.1.1, los resultados fueron exitosos ya que la aplicación pudo correr perfectamente y las herramientas de Serket cumplían con su función. La segunda prueba fue en un ZTE KIS 2 que poseía un sistema operativo Android versión 4.2.2, la intención de esta prueba era corroborar que la aplicación funcionara en un sistema operativo que entrara en el nivel API 17, el resultado fue que la aplicación funcionó como se esperaba y se comprobó que incluso aquellos usuarios que contaran con un dispositivo equipado con Android 4.2 no tendrían ningún problema al utilizar esta aplicación.

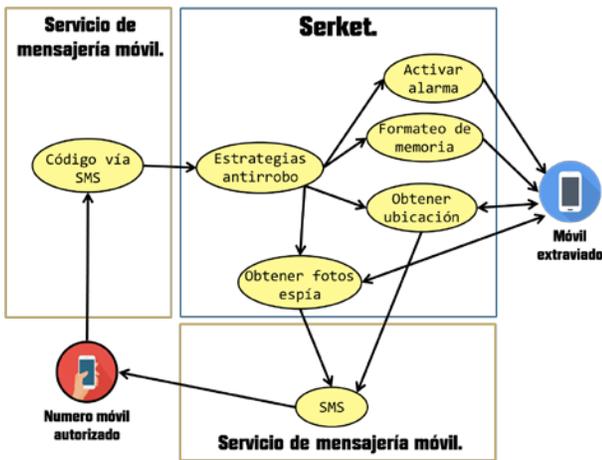


Figura 6. Funcionalidad de Serket en conjunto con el servicio de telefonía móvil, para un óptimo monitoreo de las estrategias antirrobo vía SMS.

V. PRUEBAS Y RESULTADOS.

Serket cuenta con una interfaz amigable y fácil de utilizar. En los siguientes párrafos se da una breve descripción de las pantallas y funciones pertenecientes al prototipo de Serket.

A. Registro y login.

Antes de comenzar a utilizar Serket es necesario iniciar sesión introduciendo el nombre de usuario y su contraseña. En la figura 7 se muestra el seguimiento que deberá llevar cada usuario; si aún no se encuentra registrado, basta con hacer clic

sobre el botón “¿No tiene cuenta?”, el cual dará paso a la pantalla de registro. Una vez se haya completado el registro, se retornará a la pantalla inicial para efectuar el inicio de sesión.

B. Administrador del dispositivo.

En la figura 8 se puede observar la opción de administrador de dispositivo. Al activar éste botón, se vuelve imposible desinstalar la aplicación de la manera que habitualmente se conoce, esto con la finalidad de que una persona ajena intente desinstalar la aplicación. Si el usuario decidiera en un futuro desinstalar Serket, basta con desactivar ésta función.



Figura 7. Pantalla de inicio de sesión (izquierda) y pantalla de registro (derecha).



Figura 8. Opción de administrador de dispositivo, para evitar la desinstalación de la aplicación.

C. Protección de la privacidad.

En ésta sección se muestran las dos herramientas para restringir el acceso a terceros: El bloqueo de aplicaciones y el bloqueo de pantalla con contraseña aleatoria (figuras 10 y 11).

a) *Bloqueo de aplicaciones:* Al oprimir el botón de “Seleccionar aplicaciones” se mostrará la siguiente pantalla en la cual el usuario podrá definir el patrón de desbloqueo para las aplicaciones y las aplicaciones que desee proteger.

a) *Pantallas de bloqueo aleatorias:* Al oprimir el botón de “Pantalla de bloqueo” se despliega la siguiente pantalla, en donde permite al usuario seleccionar una contraseña de bloqueo y asociarla con una imagen a modo de pista. Se pueden introducir desde una hasta cien contraseñas con su imagen pista y eliminarlas cuando el usuario lo desee.



Figura 9. Pantalla principal del bloqueo de aplicaciones.

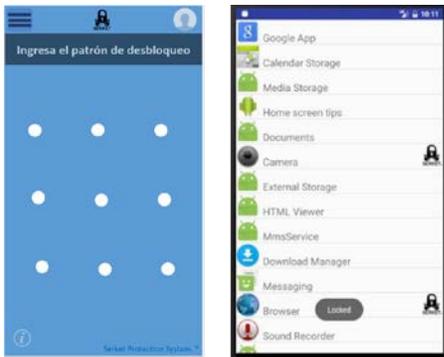


Figura 10. Se define la contraseña para las aplicaciones (izquierda). Y se seleccionan las aplicaciones que se desea bloquear (derecha).



Figura 11. Se selecciona la imagen pista (izquierda) y después se le asigna un patrón de contraseña (derecha).

D. Estrategias antirrobo.

Actualmente el monitoreo de las estrategias antirrobo mediante la página web aún se encuentra en desarrollo. El prototipo funcional cuenta con el manejo de dichas herramientas mediante mensajes de texto. En la figura 12 se muestra la vista principal de la página web.



Figura 12. Página oficial www.serketprotectionsystem.com

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Matamoros y al Departamento de Sistemas y Computación por el apoyo ofrecido para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS.

- [1] C. Mathias. “La autenticación de los usuarios móviles es más importante que nunca”. Red TechTarget de sitios de tecnologías de información, Abril 2015. <http://searchdatacenter.techtarget.com/es/consejo/La-autenticacion-de-los-usuarios-moviles-es-mas-importante-que-nunca>
- [2] M. Sánchez Saavedra. “Dispositivos móviles: un riesgo de seguridad en las redes corporativas”. Revista.Seguridad, Junio 2014. <http://revista.seguridad.unam.mx/numero-21/dispositivos-moviles-riesgo-seguridad-redes-corporativas>
- [3] Carlos Roberto. “La seguridad de los dispositivos móviles”. Pymes y autónomos, Septiembre 2011. <https://www.pymesya autonomos.com/tecnologia/la-seguridad-de-los-dispositivos-moviles>
- [4] Pagina de ventas HTC, <http://www.htc.com/es/> información de la aplicación en Google play, play.google.com , articulo Pantalla de bloqueo de HTC .
- [5] Next Lock Screen Artículo escrito por el usuario Cosmos para el blog Xatak Android, página oficial del Microsoft Garage <http://www.microsoft.com/en-us/garage/> .
- [6] Applock información de la aplicación en play google.com, página oficial de DoMoble <http://www.domobile.com/#android> .
- [7] Artículo ¿Ha dejado de ser Cerberus una alternativa interesante para recuperar un móvil robado? Escrito por Jakub Motyka, <https://www.elandroidelibre.com/2016/06/cerberus-alternativa-recuperar-movil-robado.html>
- [8] Aplicaciones de seguridad proporcionadas por Family Safety Production para Android, droid.informer <http://family-safety-production.android.informer.com/es/>

Mecanismos de seguridad en una aplicación de *eBanking* para una entidad financiera no bancaria bajo arquitectura orientada a servicios

L.I. Nadia Guzmán Hinojosa¹, M.C.E Beatriz Alejandra Olivares Zepahua¹, M.C. Celia Romero Torres¹,
M.C. Luis Ángel Reyes Hernández¹, Dr. José Luis Sánchez Cervantes¹

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba.
Orizaba, Veracruz, México.

nguzmanh@gmail.com, bolivares@ito-depi.edu.mx, cromero@ito-depi.edu.mx, l.a.reyes.h@gmail.com,
jsanchezc@ito-depi.edu.mx

Resumen — El presente trabajo muestra los mecanismos de seguridad contemplados en una aplicación Web de *eBanking* para una entidad financiera no bancaria que utiliza servicios Web basados en SOAP para realizar operaciones básicas en las cuentas de los clientes. El uso de los mecanismos de seguridad reduce en gran medida ataques durante el despliegue y el consumo de los servicios de aplicación que contienen información sensible.

Palabras clave: amenazas, *eBanking*, seguridad, SOA, Sociedad financiera no bancaria, WS.

I. INTRODUCCION

Las entidades financieras no bancarias o instituciones de la banca social ofrecen fuentes alternativas de ahorro y financiamiento dentro del sector financiero de México, principalmente en los segmentos de la población desatendidos por la banca comercial. El hecho de contar con instrumentos de pagos seguros, al alcance de la población y fáciles de usar es indispensable; acorde con esto, es necesario garantizar una buena infraestructura y medios eficientes y seguros que permitan la transferencia de recursos.

En este sentido, la banca electrónica y la banca móvil son alternativas eficientes para funcionar como medios de pago, sin embargo, en México, un estudio de BBVA Research [1], reveló que, del total de las transacciones bancarias que se realizan, sólo 16% son a través de Internet y apenas 6.4% por telefonía móvil, lo cual muestra un panorama en el que es necesario invertir en las tecnologías basadas en Web. Este estudio se refiere a instituciones financieras tradicionales; sin embargo, en México gran parte de los servicios los ofrecen organismos como las micro-financieras, cooperativas de ahorro y/o crédito entre otras, orientadas a un mercado muy amplio; tales instituciones por lo general adquieren o contratan sistemas computacionales para su operación diaria, mismos que es común que carezcan de elementos orientados a *eBanking*.

Ahora bien, al contar con sistemas financieros de escritorio y añadir una solución basada en Web se requiere garantizar la

interoperabilidad entre estas aplicaciones. Existen mecanismos que permiten la comunicación entre aplicaciones de diversas organizaciones; uno de los mecanismos más utilizados para asegurar la interoperabilidad entre empresas son los WS (*Web Services*, Servicios Web) basados en SOAP (*Simple Object Access Protocol*) bajo una Arquitectura SOA (*Service Oriented Architecture*) [2]. Estas tecnologías, en un caso como el presente, permiten que la aplicación Web de *eBanking* despliegue operaciones usuales con las cuentas de los clientes, sin tener contacto directamente con la base de datos que contiene la información de los mismos.

Por otra parte, una aplicación Web requiere contemplar mecanismos de seguridad ya que, dada su naturaleza de alcance público, está propensa a ataques de defraudadores o de programas desarrollados para robar información delicada. Aunque existe un sin número de riesgos de seguridad es indispensable cubrir al menos las amenazas más importantes. En este sentido, el presente trabajo se remitió, entre otras bibliografías, a la fuente de información que brinda OWASP (*Open Web Application Security Project*) [3]. OWASP es un proyecto de código abierto dedicado a determinar las causas que hacen que el software sea inseguro. Dentro de sus documentos más exitosos se incluye OWASP Top 10, que contempla las diez vulnerabilidades más importantes en las aplicaciones Web.

Por todo lo anterior, se abordó el desarrollo de una aplicación Web de *eBanking* orientada a completar una aplicación computacional ya existente, dirigida a instituciones financieras no bancarias. Dicha aplicación Web interactúa con una aplicación principal de escritorio a través del uso de WS y en su diseño se contempló la implementación de mecanismos de seguridad que cubrieran los riesgos más comunes descritos por OWASP.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Entidades financieras no bancarias

El sistema financiero es la base de la economía de un país. En México el sistema financiero abarca un conjunto de

organismos e instituciones que autoriza el estado para captar, administrar, canalizar y regular los recursos económicos públicos o privados, nacionales e internacionales. Las entidades financieras no bancarias son organismos auxiliares del crédito dentro del sistema financiero y su objetivo es ofrecer servicios financieros a gran escala y brindar inclusión financiera [4].

2.2. *eBanking*

Es un medio que permite a las instituciones bancarias brindar servicios financieros, los usuarios acceden a estos servicios mediante una computadora a través de Internet, desde cualquier sitio, sin tener que acudir personalmente a la sucursal física. Este término también se usa para referirse a la banca telefónica, a los cajeros automáticos, quioscos, PDA (*Personal Digital Assistant*, Asistente Personal Digital), a las transferencias electrónicas y al dinero plástico, a través de cualquier dispositivo electrónico inteligente mediante el cual los usuarios tienen acceso a sus cuentas bancarias [5].

2.3. WS e interoperabilidad

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) define interoperabilidad como la habilidad de dos o más sistemas o componentes, para intercambiar información de forma consensuada y luego utilizarla para lograr objetivos comunes. La interoperabilidad pasa por el desarrollo de estándares de tecnología abiertos que hacen posible que productos y plataformas heterogéneas se comuniquen entre sí [6]. La WS-I (*Web Services Interoperability Organization*) es una organización que establece mejores prácticas para la interoperabilidad de los WS [7]. Un WS es una tecnología que consiste de hardware y software y sirve para comunicar diferentes aplicaciones desarrolladas en lenguajes de programación diferentes. Los WS basados en SOAP se basan en estándares abiertos y protocolos para el intercambio de mensajes en redes de computadoras, utilizan un formato XML para los mensajes y otro formato XML para los contratos; SOAP cumple con los estándares contemplados en WS-I.

2.4. SOA (*Service Oriented Architecture*)

Se refiere al estilo arquitectónico de una aplicación en la que la orientación a servicios es un principio organizacional, por lo que una parte significativa de la funcionalidad es implementada por servicios [8].

2.5. Seguridad en los datos

La “privacidad de los datos en Internet” se refiere a que un negocio en la Web debe responder a la confianza que un individuo o un grupo de individuos ponen en él, al compartirle cierta información personal o confidencial. La seguridad de la información y datos consiste de tres partes: la integridad (completitud de la información), la confidencialidad (la información es accesible solo para aquellos que tienen permiso) y la disponibilidad (acceso a la información cuando los usuarios autorizados lo requieran). Las tres partes se ven

afectadas por fallas técnicas, fallas naturales o por errores humanos, ya sean accidentales o deliberados [5].

2.6. JavaServer Faces y PrimeFaces

JavaServer Faces (JSF) es un marco de trabajo del lado del servidor para construir aplicaciones Web con tecnología basada en Java. Consiste en una API (*Application Programming Interface*, Interfaz de Programación de Aplicaciones) para representar componentes y administrar su estado, eventos, validación del lado del servidor y conversión de datos [9]. Por su parte, PrimeFaces es un marco de trabajo para aplicaciones enriquecidas que funciona directamente con JSF y permite, además de una mejor experiencia de usuario, validaciones del lado del cliente[10].

2.7. Riesgos más comunes en aplicaciones Web

Las aplicaciones *eBanking* son susceptibles de recibir ataques en línea [11] los cuales tratan de capturar credenciales, interceptar la información y/o desviar fondos, sin la posibilidad de que sus propietarios obtengan el reembolso de las instituciones financieras. En una aplicación Web, la manera en que un cliente realiza el proceso de autenticación debe asegurar que la confirmación y verificación de su identidad se lleva a cabo de manera segura. Las vulnerabilidades en la seguridad más comúnmente usadas por los *hackers* son: 1) las secuencias de órdenes en sitios cruzados (*cross site scripting*), 2) la inyección de código de SQL (*SQL Injection*), 3) falsificación de la petición en sitios cruzados (*Cross site request forgery*), 4) la inyección de código HTML (*HTML injection*), 5) romper esquemas de autenticación, 6) abusar de las deficiencias del diseño de los sitios Web, 7) abusar de las debilidades de la plataforma y 8) los ataques al visualizador y a la privacidad de los datos [12]. OWASP es una comunidad abierta dedicada a capacitar a las organizaciones para concebir, desarrollar, adquirir, operar y mantener aplicaciones Web confiables. En un apartado especial establece las diez vulnerabilidades más comunes en una aplicación Web, así como la severidad de cada una a nivel técnico y a nivel del negocio, en el caso de esquemas de autenticación lo divide en dos situaciones específicas y además considera como deficiencia la configuración inadecuada de los servidores[13].

En el presente trabajo se explican los mecanismos de seguridad contemplados para una aplicación Web *eBanking*, para una entidad financiera no bancaria, que utiliza WS basados en SOAP para la comunicación con el sistema informático principal, dichos mecanismos se consideraron tanto en clientes como proveedores, cubriendo las vulnerabilidades consideradas de impacto más grave en la lista de amenazas publicada en OWASP *Top 10*.

III. ARQUITECTURA

La arquitectura de software bajo la cual se desarrolló la solución Web de *eBanking* consiste en a) la aplicación Web que ve el cliente financiero y b) la aplicación proveedora de

WS que funciona como intermediario entre el repositorio de la aplicación de escritorio actual y la aplicación Web, ésta que se conecta mediante funciones almacenadas a la base de datos del sistema principal. La figura 1 muestra los componentes de la arquitectura.

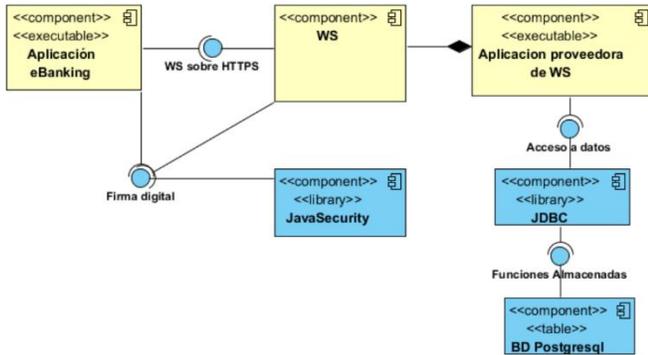


Fig. 1 Arquitectura de la solución de eBanking

- Aplicación eBanking: Representa la aplicación Web mediante la que el cliente accede a sus cuentas para realizar operaciones, utiliza JSF y PF.
- WS: representa los WS que ofrece la aplicación proveedora y que consume la aplicación eBanking.
- La aplicación proveedora de WS: es la aplicación Web, sin interfaz gráfica, responsable de exponer las funciones de negocio y es la única que accede al repositorio de la aplicación original a través de funciones almacenadas.
- JDBC: representa la biblioteca que permite la conexión entre la aplicación Proveedora de WS y la base de datos de PostgreSQL.
- Componente BD PostgreSQL: representa la base de datos de la aplicación original, la cual contiene los datos del cliente y sus cuentas.

IV. DESARROLLO

Una vez expuesta la arquitectura, se presenta la seguridad contemplada para las dos aplicaciones Web (aplicación eBanking y aplicación proveedora de WS).

De acuerdo a las listas de vulnerabilidades más importantes que aquejan a las aplicaciones de Internet según [9] y [10], los ataques pueden utilizar muchos caminos a través de la aplicación para causar daños en la organización o a los usuarios. Cada uno de estos caminos representa un riesgo que puede o no ser lo suficientemente serio como para justificar la atención. A continuación, se indican las amenazas consideradas, así como los mecanismos para controlarlas.

a) Inyección (injection)

Considera la posibilidad de que cualquier persona envíe datos no confiables al sistema, incluidos usuarios externos, usuarios internos y administradores:

Descripción	El hacker envía ataques basados en texto, que explotan la sintaxis del intérprete destino.
-------------	--------------------------------------------------------------------------------------------

Debilidades que la originan	La inyección ocurre cuando una aplicación envía datos no confiables a un intérprete. A menudo se encuentran en consultas SQL, LDAP, Xpath o NoSQL, entre otros.
-----------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Para solventar este punto se aplicaron las capacidades de validación de JSF y PrimeFaces para características como tipo de dato, rango de valores, límites de valores entre otros; además, para los campos de texto se construyó un validador propio que funciona de la siguiente manera: cuando los datos se capturan en los formularios de la aplicación, se envían a una clase que valida que los datos cumplan con los requerimientos del negocio y que se interpreten como cadenas y no como instrucciones que pudieran ejecutar alguna acción no deseada dentro de la aplicación.

b) Broken Authentication and sesión management

Esta amenaza considera a los atacantes externos anónimos, a los clientes reales que intentan robar cuentas de otros y a clientes autenticados que tratan de usar funciones no permitidas.

Descripción	El atacante usa fugas o fallas en las funciones de autenticación o administración de sesiones (por ejemplo, cuentas expuestas, contraseñas, ID de sesión) para suplantar usuarios.
Debilidades que la originan	No se implementan sesiones, o la sesión no se mantiene entre todas las capas de la arquitectura o no se verifican los permisos una vez autenticado el usuario

Contra esta amenaza se consideraron varios mecanismos:

- i. Control de autenticación: mediante clave y contraseña.

Una vez que la contraseña es capturada por el cliente en su formulario de inicio de sesión, se le aplica un algoritmo de cifrado

- La aplicación proveedora de WS recibe los datos cifrados.
- La aplicación proveedora de los WS consultará si esa clave existe y de ser así, entrega los datos del cliente firmado.

- ii. Evitar robo de credenciales:

- Una vez que inició sesión, un cliente puede solicitar consultas y/o transacciones de transferencia o pago. Específicamente en las operaciones que alteran los saldos de las cuentas, la aplicación de eBanking solicita un código de autorización, el cual es generado por una aplicación móvil o bien por la propia aplicación y enviado por correo electrónico para el caso de clientes que no cuenten con teléfonos inteligentes.
- El código se ingresa en el campo requerido, se verifica y, si es correcto, se autoriza la transacción y se envía al proveedor de WS, el cual procesará la

petición. De lo contrario se rechaza la solicitud desde la misma pantalla Web.

- Después de realizar una transacción el cliente recibe un correo electrónico con la notificación de la misma.



Fig. 2 Solicitud del código de autorización recibido, para efectuar la transacción

iii. Mantener sesión entre capas

Después de que el cliente introduce sus credenciales, (usuario y contraseña) se genera un ID de sesión en el cliente y se envía durante el login hacia el proveedor de WS.

- Si el proveedor de WS verifica que el usuario existe y el proceso de autenticación fue exitoso, entonces el ID de sesión se almacena en el proveedor de los WS.
- Posteriormente, cuando el usuario solicite una petición al proveedor de WS, la aplicación cliente siempre enviará el ID de sesión y el proveedor de WS siempre verificará dicho ID comparándolo con el que tiene almacenado. Si no coinciden, el proveedor de WS rechazará cualquier petición.

iv. Usuarios anónimos

En este punto, se implementó una característica contenida en el API de Java Servlet, con la cual se usa un filtro que no permite visualizar las páginas de transferencias y pagos si no se ha iniciado sesión correctamente. De tal manera que si un usuario no firmado escribe en el navegador la ruta de la página de “transferencias”, intentando saltarse la autenticación, el filtro enviará un aviso de que debe de iniciar sesión correctamente.

c) Sensitive Data Exposure

Considera quién puede acceder a datos confidenciales y a cualquier copia de seguridad de esos datos. Esto incluye los datos en reposo, en tránsito e incluso en los navegadores de sus clientes. Incluye tanto amenazas externas como internas.

Descripción	Los atacantes suelen robar claves, intervenir la comunicación o robar datos de texto explícitos del servidor, mientras están en tránsito o desde el navegador del usuario.
Debilidades que la originan	La falla más común es simplemente no cifrar datos confidenciales. Los atacantes externos tienen dificultades para detectar fallas en el lado del servidor debido al acceso limitado.

Mecanismos implementados:

i. Exposición de datos sensibles en general:

A través del uso de un certificado digital (autogenerado para efecto de pruebas), se configuró un enlace seguro SSL (Secure Socket Layer) para desplegar HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure) que permite obtener un canal cifrado, como una manera de garantizar que, si las credenciales y demás datos son interceptados en tránsito, el atacante no verá más que una serie de información cifrada.

ii. Exposición de datos de autenticación

Se implementó el algoritmo MD5 que cifra las contraseñas antes enviarlas al proveedor de WS, de tal manera que de ser interceptada no sea posible obtener la contraseña real.

iii. Alteración de datos:

Se implementó la generación de un segundo certificado digital autofirmado (figura 8), el cual permite realizar la generación de una firma digital. Dicha firma digital se incluye entre los parámetros de entradas de los WS con el objetivo cuidar la integridad de los mensajes.



Fig. 3 Certificado autogenerado para firmar mensajes

El flujo de las acciones aplicadas para generación de firma y verificación de la integridad se muestra en la figura 9.

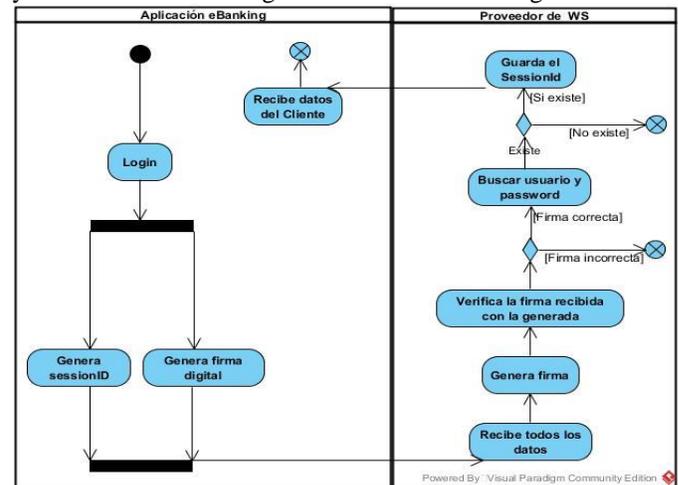


Fig. 4 Secuencia de acciones para validar la integridad de los mensajes mediante firma digital

El mensaje SOAP que contempla la generación de la firma digital, a través del uso de un certificado almacenado en el almacén de claves se presenta en la figura 5.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><S:Envelope xmlns:S="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
<SOAP-ENV:Header/>
<S:Body>
<ns2:wslogin xmlns:ns2="http://waprovider/">
<usr>nguzmanh@gmail.com</usr>
<pwd>usuariolc/pwd</pwd>
<session>af332ash</session>
<firma>
YmX0XN3U1Ibanh7RvWt2opRA6xpTfz/GUBKlmlQqXyo2P4tVAkvrB8ZSxXn636U7/szmGM3lRzK
pd80vanOuKo4HhS5x7k6REv/1/Yzh5NT1yh/487YxAQoaJW698cmK61x4DVHbvyH4HkXJ56n1+1X/b6Qks
qNulL9m7SxmYbzreQ7miSxvqgK3S+gdMHc84370vc7/q3aY9BYtQ0VzNHhjg5kb2Hn7cpYNFcCvE73RA
zX3aXb05CIW1RQQvQ5AHKXezJ0ER4R3ulwaU1DzrT8+RZt3q1QresPwrd28M61gpm0z6doJA+YMDspJp+P
Mg3v+2m7e=
</firma>
</ns2:wslogin>
</S:Body>
</S:Envelope>
SOAP Response
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><S:Envelope xmlns:S="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
<SOAP-ENV:Header/>
<S:Body>
<ns2:wsloginResponse xmlns:ns2="http://waprovider/">
<return>
<apemat/>
<apemat/>
<b32>2MKL2B6YHC4DRMA</b32>
<encontrado>true</encontrado>
<idcliente>1</idcliente>
<nombre>Maria</nombre>
</return>
</ns2:wsloginResponse>
</S:Body>
</S:Envelope>
    
```

Fig. 5 Mensaje SOAP que recibe la firma digital y regresa los resultados después de verificar que es correcta

Cada vez que la aplicación proveedora de los WS reciba una petición, dicha petición contendrá, además de los datos propios de la petición, una firma digital y el número de la sesión del cliente. El ID de sesión almacenado en la aplicación proveedora de los WS será requerido y comparado contra la que se recibe de la aplicación cliente, así mismo será verificada la firma digital en cada una de las ocasiones en que la aplicación de eBanking efectúe peticiones. Si durante el tránsito de los datos, el mensaje fuera alterado, el proveedor de WS no admitirá la petición.

La información sensible tal como contraseñas, rutas, o archivos de configuración se incluyen en un archivo de configuración XML (eXtensible Markup Language), dentro de la ruta que el servidor asegura no son expuestos (WEB-INF) y no se han encontrado reportes de vulnerabilidades conocidas del servidor de aplicaciones en ese sentido.

Las clases de la aplicación proveedora de los WS usan el archivo de configuración para obtener los datos de conexión con la base de datos que contiene la información de los clientes, evitando colocar datos de conexión en las clases de la aplicación. El mismo caso se aplica para establecer los parámetros de conexión hacia el almacén de claves para acceder al certificado digital que genera las firmas digitales.

V. RESULTADOS

Se obtuvo la posibilidad de disminuir los riesgos de seguridad descritos, para que los usuarios puedan realizar sus operaciones con mayor confianza. De tal manera que el funcionamiento respecto a las diferentes amenazas es el siguiente:

a) Respecto a los problemas de injection

La aplicación se valida del lado del cliente de forma que no permite ingresar datos que no cumplan con patrones, aceptando solamente cantidades y validando que lo que se

recibe por parte del usuario sea tratado únicamente como texto o número, mas no como secuencia de comandos que se puedan ejecutar.

b) Respecto a la amenaza de Broken authentication

Se evitó la intrusión de usuarios anónimos, asegurando que solo los usuarios debidamente firmados en la aplicación son los únicos que pueden acceder hacia las páginas que contienen información propia del titular de la cuenta, así como las páginas que contienen los formularios para realizar movimiento con cuentas o configuraciones personalizadas. Si un usuario no se ha identificado solo puede ver el menú inicial con la opción para iniciar la sesión y no puede ver enlaces hacia otras opciones; por otro lado, si el usuario conoce y escribe la ruta para acceder a una página de transferencias, si aún no se ha firmado será redirigido a la página de inicio de sesión. Adicionalmente el password que corresponde al usuario actual, se envía cifrado hacia el proveedor de WS. En la figura 6 se muestra la página hacia la que se redirige un usuario que intenta acceder sin autenticación.



Fig. 6 Página a la que se redirecciona un usuario que intenta acceder a otra página antes de firmarse en la aplicación.

Cómo medida al robo de credenciales el resultado obtenido es la utilización del envío de códigos de autorización generados en tiempo, que solicita la aplicación para la autorización de una transacción. En la figura 7 se muestra la generación de código en el celular y la validación en la aplicación de eBanking.

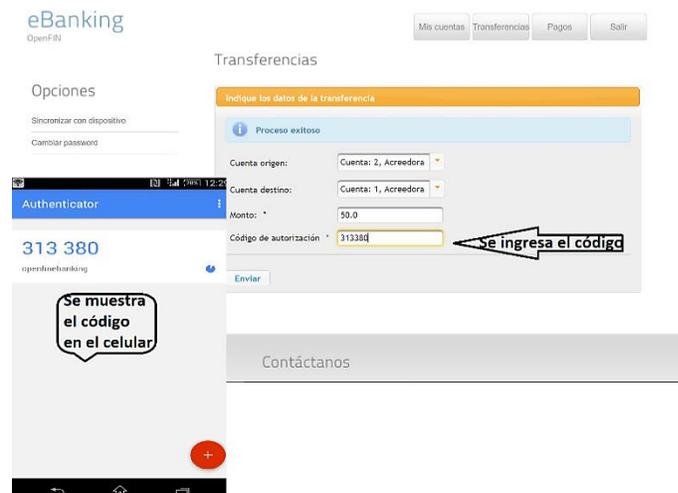


Fig. 7 Generación del código de autorización que debe ser ingresado y validado en la aplicación para permitir una transacción

Cada que se efectúa un movimiento se mantiene notificado al cliente sobre las transacciones realizadas con sus cuentas, a través de un mensaje de correo electrónico. En la figura 8 se

muestra la notificación de transacción efectuada recibida en el correo del cliente.

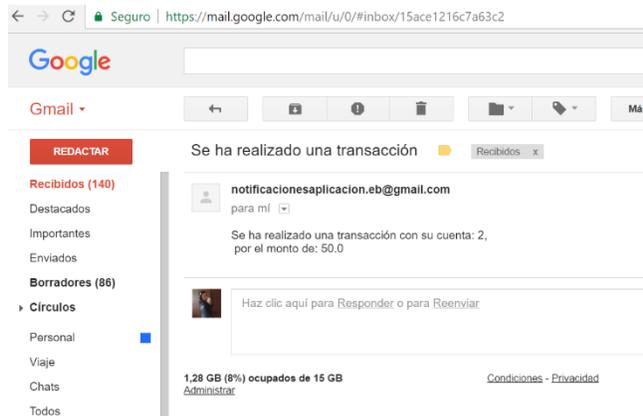


Fig. 8 Notificación de transacción efectuada con la cuenta del cliente vía correo electrónico

Para prevenir que un agente externo interfiera a la mitad del envío de los datos intentando alterarlos, se mantiene ID de sesión entre aplicaciones Cliente y proveedora de WS, en ambas se verifica que la sesión sea igual a la iniciada por el cliente firmado, si no es correcta, no se permite la ejecución de ningún proceso.

c) Referente a la amenaza de *Sensitive Data Exposure*

Se utilizó el uso de HTTPS, el cual asegura que la página que está utilizando el usuario final es auténtica y pertenece a un sitio seguro, al mismo tiempo que proporciona un canal seguro que brinda aislamiento a los datos mientras se encuentran viajando por la red.

Por otra parte, se garantiza la integridad de los mensajes que se envían mediante WS a través del uso de firmas digitales en los mensajes que contienen información de cualquiera de las diferentes transacciones, para poder asegurar que la información importante no es alterada durante el tránsito hasta que ésta llega a su destino mientras viaja por la red.

Respecto a las credenciales que la propia aplicación utiliza para acceder a los certificados, o hacia las bases de datos, rutas de archivos de configuración y demás datos confidenciales necesarios para el despliegue de la aplicación, éstas se mantienen a salvo en un archivo XML en una ruta del servidor que es inaccesible al cliente.

Por todo lo anterior tanto la aplicación proveedora de WS como la aplicación de *eBanking* se protegen de los riesgos más recurrentes en aplicaciones Web para lograr que los datos de los clientes estén a salvo y se pueda operar con confianza.

VI. TRABAJO FUTURO

Cómo trabajo a futuro se pretende la adquisición, configuración y sustitución de un certificado digital emitido por una Autoridad Certificadora para habilitar el canal HTTPS, en un ambiente de producción real; así como el

despliegue de la aplicación para pruebas, primero en un ambiente controlado y luego en producción.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se destaca la importancia que tiene cubrir las áreas más vulnerables de la seguridad de una aplicación Web de *eBanking*, debido a que la información almacenada es muy delicada, así mismo que la entidad financiera no bancaria, asume la responsabilidad de administrar los recursos de los clientes. Por lo tanto la implementación de los mecanismos vistos permite el ofrecer la confianza a los usuarios finales de que sus datos serán gestionados y almacenados con el debido cuidado.

AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado para la manutención durante el tiempo de la investigación.
- A la empresa Servicios de Informática Colegiada por las facilidades otorgadas para la realización del caso de estudio y estancias en sus instalaciones, mismas que permitieron enriquecer el presente trabajo

REFERENCIAS

- [1] E. Juarez, "La banca digital inicia su despegue en México," CD. Mexico, p. 4, 01-Jun-2015.
- [2] D. k. Barry, *Web Services, Service-Oriented Architectures and Cloud Computing*. Waltham Estados Unidos, 2013.
- [3] "About OWASP." [Online]. Available: https://www.owasp.org/index.php/About_OWASP. [Accessed: 02-Feb-2017].
- [4] H. E. Martínez, "Situación actual del sistema de ahorro," 2008.
- [5] Z. B. Omariba and N. B. Masese, "Security and Privacy of Electronic Banking," *Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 3, no. 3, p. 262, 2013.
- [6] Microsoft, "Interoperabilidad. Apertura tecnológica para el progreso," 2016. [Online]. Available: https://www.microsoft.com/spain/responsabilidad_corporativa/prioridades/interoperabilidad/. [Accessed: 14-May-2016].
- [7] "About WS-I," 2009. [Online]. Available: <http://www.ws-i.org/about/Default.aspx>.
- [8] "Service Oriented Architecture." [Online]. Available: http://www.omg.org/news/meetings/workshops/MDA-SOA-WS_Manual/00-TI_Newcomer/CH5-SOAandWS_V9-Standard.pdf.
- [9] Javier Alex Torres Rojas, "La Tecnología Java Server Faces," Perú, 2005.
- [10] "Why PrimeFaces." [Online]. Available: <http://www.primefaces.org/whyprimefaces>.
- [11] M. Hosburgh, "Protecting small Bussines Banking", InfoSec Reading Room. *SANS Inst.*, p. 16, 2014.
- [12] M. Shema, *Haking Web Apps*. Waltham MA 02451: Syngress, 2012.
- [13] "Top 10 2013-Top 10." [Online]. Available: https://www.owasp.org/index.php/Top_10_2013-Top_10.

Aplicación Web de seguimiento de publicaciones de Facebook, Twitter y Google+, utilizando el protocolo OAuth

Franz Dayit López Cruz¹, Luis Ángel Reyes Hernández², Giner Alor Hernández³, Beatriz Alejandra Olivares Zepahua⁴, Celia Romero Torres⁵

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba,
Oriente 9 número 952, Col. Emiliano Zapata,
Orizaba, Veracruz, México.

¹lopezcruzf@acm.org, ²L.a.reyes.h@gmail.com, ³galor@ito-depi.edu.mx, ⁴bolivares@itodepi.edu.mx, ⁵cromero@ito-depi.edu.mx

Resumen— Las Redes Sociales se encuentran en gran apogeo y cada vez incrementa el número de personas que las utilizan para comunicarse. OAuth es un protocolo de seguridad destinado a aquellas aplicaciones Web que necesitan obtener datos de suma importancia de los usuarios de algunas Redes Sociales. Se desarrolló una aplicación que utiliza el protocolo de seguridad OAuth en las Redes Sociales Facebook™, Twitter™ y Google+™ mediante sus API's, para administrar de manera segura las publicaciones de los usuarios autenticados, utilizando bibliotecas para su conexión con el lenguaje de programación PHP. La aplicación desarrollada permite realizar una conexión óptima entre el lenguaje de programación PHP y las API's que proporcionan las redes sociales Facebook, Twitter y Google+, para consultar y realizar publicaciones en nombre del usuario autenticado.

Palabras clave—API, Facebook™, Google+™, OAuth, Redes Sociales, Twitter™

I. INTRODUCCIÓN

1. Internet es el medio de comunicación más importante y de gran alcance. La sociedad en la actualidad está mayormente influenciada por los medios digitales, ya que el uso de dispositivos móviles hace que el usuario esté conectado a la red en un tiempo prolongado, incluso de forma permanente. A partir de esta situación, publicitarse en Internet presenta las características para la obtención del posicionamiento deseado frente a los públicos, se trata de una red de millones de usuarios, donde cada uno se convierte en un público potencial si es tratado de la manera correcta. Una red social es un sitio orientado a la Web 2.0, que ofrece la posibilidad de la comunicación virtual para personas de todo el mundo a través de un servicio de Internet. En este servicio se intercambia información de suma importancia para la comunidad mediante las publicaciones, que visualizan los contactos del usuario. Las personas también visitan los perfiles o comentan sobre las marcas (por ejemplo, celebridades, institutos, organizaciones, compañías y productos). En la actualidad, de los más de 7.395 millones de habitantes del planeta, 3.419 millones tienen acceso a internet (un incremento del 10% en un año) y 2.307.000.000 usan regularmente las

Redes Sociales (+ 10% desde enero de 2015) [1]. La gestión de los medios de comunicación social es un campo emergente de la investigación académica y la práctica de la organización [2]. La colocación de publicidad en las Redes Sociales es una práctica común hoy en día, debido a que los consumidores están altamente involucrados con ellas. Por lo tanto, estos medios son una herramienta óptima y eficaz para promover sus productos y analizar el comportamiento del consumidor [3].

En el presente artículo se muestra el desarrollo de una aplicación Web que utiliza SDK's y bibliotecas de PHP para administrar de forma adecuada las publicaciones del usuario autenticado en las Redes Sociales Facebook, Twitter y Google+.

Este documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 presenta resúmenes de algunos artículos relacionados al tema. La sección 3 presenta a detalle las especificaciones del protocolo de autorización OAuth y alguna información relevante de las API's de Facebook™, Twitter™ y Google+™ y el desarrollo de la aplicación. La sección 4 muestra los resultados obtenidos con la aplicación desarrollada. La sección 5 especifica los comentarios finales y el avance que se desea realizar en el futuro sobre el mismo tema.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

En [3] se estableció que los medios sociales facilitan la comercialización de los productos. Se presentó una metodología, objetivos y desafíos de los medios sociales para comercializar productos. En [4] se estableció que la difusión selectiva es una contraparte de la radiodifusión. En dicho trabajo se presentó un estudio sobre la difusión selectiva para compartir publicidad en una red social en línea. El trabajo proporcionó implicaciones para compartir información sobre productos en línea. En [5] se investigó sobre las características de Twitter™ que afectan las percepciones de los usuarios hacia la credibilidad de los *Tweets*. Como resultado se descubrió que aumenta el impacto de los *Tweets* hacia los usuarios si se muestra la dirección original de su contenido. Se

desconoce la manera en la que los usuarios de Twitter™ perciben el uso de anuncios. En [6] se realizó un estudio de encuestas para evaluar las actitudes hacia la publicidad en Twitter™. Se encontró que el uso de Twitter™ para publicar anuncios facilitó la toma de decisiones a los clientes. No todo el contenido publicado en Twitter™ es útil para proporcionar información sobre algunos eventos. Las Redes Sociales crean grandes cantidades de datos que se utilizan para la toma de decisiones importantes a través de la minería de datos.

En [7] se presentó un caso de estudio sobre la influencia del modelo de negocio y sobre la privacidad detrás de una plataforma de Redes Sociales con los resultados de la minería de datos sobre sus datos. Se mostró una comparación entre Facebook™ y Twitter™ tomando en cuenta el modelo de negocio y la configuración de privacidad al aplicar minería de datos. Los medios sociales son fundamentales para facilitar la comunicación de las marcas; sin embargo, se necesitaba una nueva manera de planificar las interacciones con el fin de monitorear y responder a los consumidores de manera eficiente.

En [8] se examinaron las maneras en que las marcas se comunican a través de los medios sociales, analizando 44 de las marcas más grandes del mundo para descubrir la forma en que se comunican a través de publicaciones en el muro de Facebook™ y Twitter™. Como resultado se demostró la importancia que no solamente se basa en publicar contenido interesante para una página Web, si no en la creación de una experiencia participativa y atractiva, donde los consumidores se sienten cómodos al momento de comunicarse con la marca y con otros consumidores de una manera honesta y auténtica. Google introdujo Google+™, el cual reportó un crecimiento significativo en su tamaño, mientras que otros lo llamaron un pueblo fantasma. En [9] se investigó si Google+™ atraería a gran cantidad de usuarios mediante la presentación de una caracterización detallada de la red social con base en mediciones de gran escala. Se identificaron los principales componentes de la estructura de Google+™, se estudiaron las características clave de sus usuarios y su evolución en el tiempo.

Existen pruebas de seguridad hacia OAuth 2.0, que se basan en la detección manual de nuevas vulnerabilidades en las implementaciones de OAuth 2.0 y en el ensayo de pruebas automatizadas específicas, vulnerabilidades conocidas previamente a través de un gran número de implementaciones de OAuth. En [10] se propuso un marco de pruebas basadas en modelos de adaptación, para llevar a cabo evaluaciones de seguridad automatizadas a gran escala para implementaciones de OAuth 2.0 en la práctica. Los autores revisaron y analizaron el protocolo OAuth 2.0 y algunos problemas de diseño de API's comunes que se encuentran en muchas Redes Sociales de más de un nivel.

En los artículos analizados se logró determinar que las Redes Sociales no solo permiten facilitar la comunicación digital a las personas de todo el mundo, sino que son utilizadas por las marcas para ofrecer publicidad sobre sus productos o servicios. Las Redes Sociales tuvieron éxito en el ámbito de la publicidad, ya que cada día incrementa el número de personas que acceden a este medio para comunicarse.

III. PROTOCOLO OAUTH

La seguridad en términos generales se refiere a la certeza de que algo funcionará de la manera correcta y sin la posibilidad de sufrir riesgos al ejecutar cierta acción. En la Web, la seguridad es la característica más importante que tiene que ofrecer una aplicación, debido a que los usuarios que almacenan sus datos en algunos sitios, sufren el riesgo de pérdida de estos o acceso a dichos datos por otras personas o aplicaciones sin autorización. Hoy en día se incrementaron las técnicas para el acceso mal intencionado a los datos en la Web. Sin embargo, existen diferentes tipos de métodos para asegurar la protección de los datos de los sitios Web. OAuth es un protocolo de seguridad destinado a aquellas aplicaciones Web que necesitan obtener datos sensibles de los usuarios de algunos sitios de Redes Sociales. Este protocolo les permite a las aplicaciones Web acceder a los datos de los usuarios de los sitios Web 2.0 sin guardar los datos de acceso, evitando así el conocimiento de éstos a personas o aplicaciones no autorizadas. Este protocolo disfrutó de amplia adopción por proveedores de Redes Sociales en línea desde su creación [11]. Algunos de estos proveedores son Microsoft, Facebook™, Twitter™, entre otros.

En la Fig. 1 se muestra el mecanismo de autorización del protocolo OAuth que sigue el siguiente proceso:

- El propietario dispone de una serie de recursos propios en un servidor de recursos
- Un servidor externo (la aplicación cliente) desea acceder a un subconjunto de esos recursos.
- La aplicación cliente redirige al usuario hacia el servidor de autorización
- El propietario se autentica en el servidor de autorización (si no lo realizó previamente)
- El servidor de autorización pregunta al propietario si autoriza a la aplicación cliente que utilice esos determinados recursos
- El propietario autoriza a la aplicación a utilizar esos recursos.
- La aplicación cliente consigue acceso a esos recursos [12]



Fig. 1. Mecanismo de autorización del protocolo OAuth

Después de obtener un Token de acceso, el Consumidor utiliza ese atributo para obtener datos de la cuenta de usuario del sitio Web a la cual se inició sesión.

Las API's (*Application Programming Interface*) son bibliotecas que incluyen métodos, procesos y especificaciones para facilitar la comunicación entre las aplicaciones. Estas bibliotecas permiten la comunicación entre Sistemas Operativos, entre otros servicios. En la actualidad existen API's para facilitar la comunicación entre las Redes Sociales (como Twitter™, Facebook™, Instagram, entre otras) y otros sitios Web 2.0, para acceder a datos y funciones de las mismas. En el caso de Facebook™, Twitter™ y Google+™, las API's que ofrecen para proveer sus servicios utilizan el protocolo de autenticación OAuth. En la Tabla 1, se presenta la información general de cada una de estas API's.

Tabla 1. Información general de las API's de Facebook™, Twitter™ y Google+™

Nombre	Red social	Versión Actual	Fecha de lanzamiento	Fecha de expiración
Graph API	Facebook™	v2.8 v2.7	v2.8: 5 de octubre del 2016 v2.7: 13 de julio del 2016	v2.8: octubre del 2018 v2.7: octubre del 2018
REST API	Twitter™	v1.1	5 de marzo del 2013	Sin registro
REST API	Google+™	v1	Sin registro	Sin registro

A pesar de que las tres API's se conectan a las Redes Sociales, la información a la cual se accede no es la misma. La API de Twitter™ se encuentra limitada en este aspecto: cuando un usuario se registra en Twitter™, éste solicita atributos mínimos para tener información personal, sin embargo, algunos datos como Correo electrónico y fecha de nacimientos no son accesibles por medio de su API. En el caso de Google+™, los datos a los que accede su API dependen de la privacidad que configuró el usuario, y no permite publicar, modificar o eliminar contenido. La API de Facebook está más completa, y además de consultar, publicar, modificar y eliminar contenido, permite el manejo de otras cuentas vinculadas con los usuarios (grupos, páginas, entre otras).

IV. ARQUITECTURA DE LA APLICACIÓN

La arquitectura de Software es la estructura del sistema en función de la definición de los componentes y sus interacciones. Es considerada como puente entre los requisitos del sistema y la implementación [13]. La arquitectura de la aplicación presenta la manera en la cual son separados los componentes de software que se desarrollarán u ocuparán a lo largo del proyecto. Para el desarrollo de la aplicación, se eligió el diseño arquitectónico En capas aplicado por el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador. El patrón MVC es un paradigma que divide las partes que conforman una

aplicación en el Modelo, las Vistas y los Controladores, permitiendo la implementación por separado de cada elemento, garantizando así la actualización y mantenimiento del software de forma sencilla y en un reducido espacio de tiempo [14].

Modelo

Representan los componentes que acceden a los datos manejados por la aplicación. En esta capa se encuentran las clases PHP que están ligadas con una base de datos desarrollada en MySQL.

Vista

Representa la interfaz de usuario del sistema que incluye una clase principal PHP, validaciones en JavaScript y el tema de la aplicación mediante hojas de estilo (CSS). Esta capa no tiene interacción directa con los datos de la aplicación.

Controlador

En esta capa se encuentran los SDK's que permiten la comunicación del lenguaje PHP con las API's de Facebook, Twitter y Google+. Asimismo, en esta capa se incluyen las clases PHP encargadas de la lógica del negocio de la aplicación, es decir, la funcionalidad de la misma, que funcionan como intermediarias entre la Vista y el Modelo y requieren de las SDK's de las redes sociales. En la Fig. 3.1 se muestra la arquitectura de la aplicación.

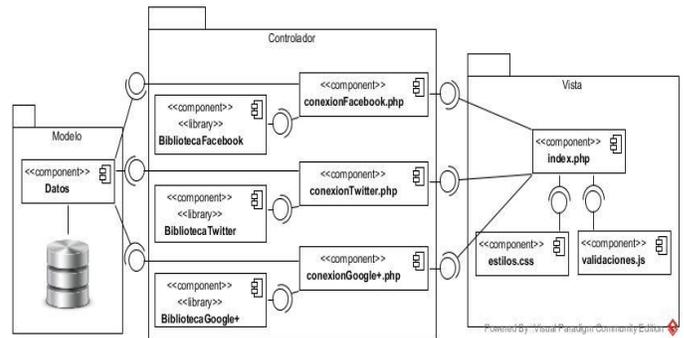


Fig. 2. Arquitectura de la aplicación

V. METODOLOGÍA

Una metodología propone una serie de pasos a seguir para desarrollar y documentar exitosamente un proyecto de software. Para ofrecer seguimiento al proyecto, se eligió la metodología XP (Xtreme Programming por sus siglas en inglés), que se centra en el desarrollo de procesos ágiles para el desarrollo de Software. Esta metodología se centra en potenciar las relaciones interpersonales como clave para el éxito en desarrollo de Software, promoviendo el trabajo en equipo, preocupándose por el aprendizaje de los desarrolladores, y propiciando un buen clima de trabajo. A continuación, se detallan los entregables de la metodología para la aplicación:

Historias de usuario

En la primera etapa de la metodología XP, se analizan y establecen los requerimientos del cliente para plasmarlos en la aplicación. Esto se realiza por medio de lenguaje natural, que después son documentadas mediante tarjetas como parte de la documentación. En el caso de la aplicación, se utilizó el lenguaje de modelado UML para comprender las historias de usuario mediante Diagramas de Casos de uso, que se especificaron mediante Diagramas de Secuencia y Tarjetas de Historia de Usuario.

Tarjetas de ingeniería

Se definen las tareas en las cuáles se dividen las historias de usuario, incluyendo las fechas de realización y el encargado de realizar dichas tareas.

Tarjetas CRC

En éste artefacto, se identifican las clases de la aplicación, las cosas que conocen y realizan las clases (responsabilidades) y la interacción entre dichas clases.

Pruebas de aceptación

Cuando se desarrolla un proyecto, es necesario conocer si las ventajas que le ofrecen al cliente funcionan de la forma esperada. Es por eso que se realizan las pruebas de aceptación, que evalúan la calidad del software desarrollado [15].

VI. RESULTADOS

Se realizó una aplicación Web que accede a las API's de Facebook, Twitter y Google+ mediante bibliotecas para el lenguaje de programación PHP. Esta aplicación permite iniciar sesión en las tres redes sociales para extraer datos personales de las cuentas y presentarlos.

La vista inicial de la aplicación muestra la opción de iniciar sesión en las tres Redes Sociales, como se visualiza en la Fig. 3.



Fig. 3. Vista inicial de la aplicación

Al momento de acceder a la opción de Iniciar Sesión para Facebook™, se muestra la página de inicio de sesión que

presenta la API. En el primer uso de la aplicación, al teclear los datos de acceso y pulsar el botón “Iniciar sesión”, se muestra las pantallas de autorización para el uso de la cuenta y la administración de la página vinculada a ella. Estas pantallas se visualizan en la Fig. 4 y Fig. 5.

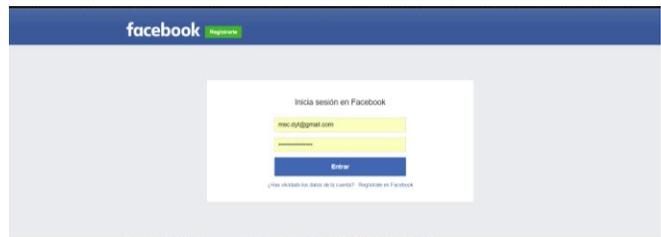


Fig. 4. Inicio de sesión en Facebook

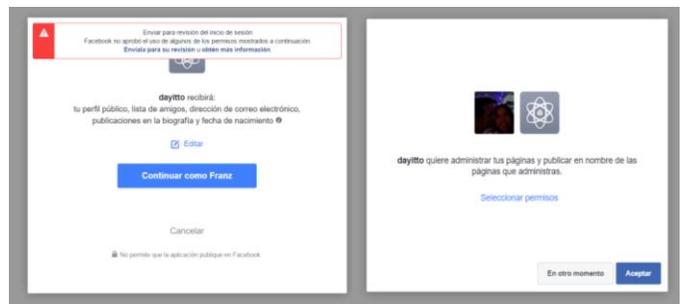


Fig. 5. Pantallas de autorización para la cuenta de Facebook

Cuando se introducen los datos y se inicia la sesión, se presentan algunos datos del usuario y de su página creada en Facebook, junto con los datos relevantes de las publicaciones realizadas en ella, como se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6. Muestra de datos relevantes de las publicaciones realizadas en Facebook

Asimismo, en la Fig. 7 se muestran las reacciones que tienen cada una de las publicaciones presentadas en la Fig. 6. Para la

muestra de las reacciones, éstas se dividen en positivas y negativas.

Reacciones positivas de las publicaciones					
Mensaje	👍	❤️	😄	😮	
Publicación para seminario	0	0	0	0	
Publicación 4	1	0	0	0	
Publicación 3 en Twitter y Google+	1	0	0	0	
Publicación realizada en tv y fb 2	0	0	0	0	
Publicación en fb y tv	0	0	0	0	
en las dos cuentas	0	0	0	0	
NaN	0	0	0	0	
Desde app (2)	0	0	0	0	
Prueba desde aplicación 2	0	0	1	0	FD Lopez

Reacciones negativas de las publicaciones		
Mensaje	😞	😡
Publicación para seminario	0	0
Publicación 4	0	0
Publicación 3 en Twitter y Google+	0	0
Publicación realizada en tv y fb 2	0	0
Publicación en fb y tv	0	0

Fig. 7. Muestra de las reacciones de las publicaciones

En el caso de Twitter, la pantalla de inicio de sesión y de autorización se presentan en una misma, como se muestra en la Fig. 8.

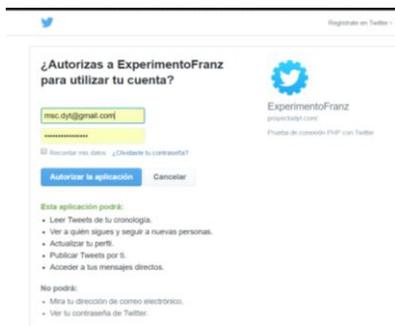


Fig. 8. Inicio de sesión y autorización en Twitter

Cuando la autenticación se realizó con éxito, se presentan los datos del usuario y de las publicaciones de ese perfil, como se muestra en la Fig. 9.

Mensaje	Fecha	👍	💬	🔄
Publicación 4	Fri Nov 25 03:47:56 +0000 2016	2	2	1
Publicación 3 en Twitter y Google+	Fri Nov 04 23:27:19 +0000 2016	0	0	0
Publicación realizada en tv y fb 2	Thu Nov 03 05:30:24 +0000 2016	0	0	0
Publicación en fb y tv	Sat Oct 22 03:46:04 +0000 2016	0	0	0

Fig. 9. Muestra de datos del usuario y de sus publicaciones en Twitter

En el caso de Google+™, se presenta la pantalla para ingresar el correo del usuario. Después de ingresar el correo y pulsar el botón Siguiente, se presenta una pantalla en donde solicita la contraseña. Estas pantallas se muestran en la Fig. 10.



Fig. 10. Pantallas de inicio de sesión en Google+

Al iniciar sesión con éxito, se muestra una pantalla para autorizar a la aplicación el acceso a los datos de la cuenta, como se visualiza en la Fig. 11.



Fig. 11. Pantalla de autorización de acceso a datos de la cuenta de Google+

Después de autorizar la aplicación, se presentan algunos de los datos de la cuenta y de las últimas publicaciones realizadas en ella. En la Fig. 12 se muestran dichos datos.



Fig. 12. Muestra de datos del usuario y de sus publicaciones en Google+

Al momento en que la sesión de Twitter y de Facebook se encuentre iniciada, se habilita la opción de Agregar publicación, como se muestra en la Fig. 13. Esta opción le permite al usuario capturar un mensaje y publicarlo en la página de Facebook creada por el usuario, y en el perfil de la cuenta de Twitter.



Fig. 13. Opción de agregar publicación

VII. CONCLUSIONES

Las Redes Sociales son fundamentales en la actualidad, debido a que conectan a gran número de personas que desean compartir información y comunicarse sin importar la lejanía en la que se encuentren. Las API's de las redes sociales Facebook, Twitter y Google+, a pesar de utilizar el protocolo de autorización OAuth, se manejan de una forma diferente y la información que pueden gestionar varía en cada red social. La API de facebook es la más completa, debido a que permite la gestión de cuentas del usuario (páginas, grupos, entre otras), y genera una información detallada de las publicaciones, como los comentarios y los usuarios que realizaron esos comentarios. La API de Twitter genera información relevante de las publicaciones, sin embargo, no es posible conocer el nombre de las cuentas que dieron Me gusta a las publicaciones. La API de Google+ solamente genera los números de comentarios y número de veces que se compartieron los tweets del usuario, sin conocer los usuarios que comentaron, el mensaje de los comentarios o las personas que los compartieron. Asimismo, se limita en consultar información ya existente en la cuenta.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Estudio sobre el estado de internet y las redes sociales en 2016 [En línea]. Disponible: <http://franbarquilla.com/estudio-sobre-el-estado-de-internet-y-las-redes-sociales-en-2016/>
- [2] Kristian Tørning, Zeshan Jaffari, and Ravi Vatrpu, "Current challenges in social media management" In Proceedings of the 2015 International Conference on Social Media & Society (SMSociety '15), Anatoliy Gruzd, Jenna Jacobson, Philip Mai, and Barry Wellman (Eds.). ACM, New York, NY, USA, 2015, Artículo 14, 6 pages.
- [3] Artur Lugmayr, "Social media marketing for financial products", In Proceeding of the 16th International Academic MindTrek Conference (MindTrek '12). ACM, New York, NY, USA, 2012, pp. 231-232.
- [4] Jorge Goncalves, Vassilis Kostakos, and Jayant Venkatanathan, "Narrowcasting in social media: effects and perceptions", In

Proceedings of the 2013 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM '13). ACM, New York, NY, USA, 2013, pp. 502-509.

- [5] Suliman Aladhadh, Xiuzhen Zhang, and Mark Sanderson, "Tweet Author Location Impacts on Tweet Credibility", In Proceedings of the 2014 Australasian Document Computing Symposium (ADCS '14), J. Shane Culpepper, Laurence Park, and Guido Zuccon (Eds.). ACM, New York, NY, USA, 2014, Pages 73, 4 pages.
- [6] Andrew L. Brooks and Coye Cheshire, "Ad-itudes: Twitter™ users & advertising", In Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work Companion (CSCW '12). ACM, New York, NY, USA, 2012, pp. 63-66.
- [7] Carsten Ellwein and Benedikt Noller, "Social Media Mining: Impact of the Business Model and Privacy Settings", In Proceedings of the 1st ACM Workshop on Social Media World Sensors (SIdEWaS '15). ACM, New York, NY, USA, 2015, pp. 3-8.
- [8] William Ryan, Adam Peruta, and Suzanne Chouman, "Social media and the transformation of brand communication", In Proceedings of International Conference on Making Sense of Converging Media (AcademicMindTrek '13). ACM, New York, NY, USA, 2013, Pages 146, 8 pages.
- [9] Roberto Gonzalez, Ruben Cuevas, Reza Motamedi, Reza Rejaie, and Angel Cuevas, "Google+™ or Google-?: dissecting the evolution of the new OSN in its first year", In Proceedings of the 22nd international conference on World Wide Web (WWW '13). ACM, New York, NY, USA, 2013, pp. 483-494.
- [10] Ronghai Yang, Guanchen Li, Wing Cheong Lau, Kehuan Zhang, and Pili Hu, "Model-based Security Testing: An Empirical Study on OAuth 2.0 Implementations", In Proceedings of the 11th ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security (ASIA CCS '16). ACM, New York, NY, USA, 2016, pp. 651-662.
- [11] Pili Hu, Ronghai Yang, Yue Li, and Wing Cheong Lau, "Application impersonation: problems of OAuth and API design in online social networks", In Proceedings of the second ACM conference on Online social networks (COSN '14). ACM, New York, NY, USA, 2014, pp. 271-278.
- [12] Jordi Sánchez, Computación Distribuida: Sistemas de Autenticación y Autorización en Internet [En línea]. Disponible: http://jordisan.net/proyectos/Autent_y_auth-J_Sanchez.pdf?3eb125.
- [13] Guillermo E. Badillo Astudillo, Arquitectura de Software II.- Conceptualizando la Arquitectura de Software [En línea]. Disponible: https://profesores.ing.unab.cl/~gbadillo/archivos/cursos/software-arch/Lectures%20Notes%201%20Conceptualizando_ArqSw_c1.pdf.
- [14] Yenisleidy Fernández Romero, Yanette Díaz González, Patrón Modelo-Vista-Controlador [En línea]. Disponible: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele/article/download/15/10>.
- [15] Artefactos XP [En línea]. Disponible: <http://www.abacovirtual.edu.pe/chiclayo/filedocente/140318-CEI2012203MB-000029-19072012-173247.pdf>.

Control de un Robot Móvil Tipo Ackerman por medio del Modelo Dinámico

Ramirez García Hermes Javier, Palomino Merino Amparo, Vargas Treviño Maria Aurora Diozcora

Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México

hermesjrg@outlook.com, palomino@ece.buap.mx, auroravargast@hotmail.com

Resumen— En este documento se presenta el control de un robot móvil tipo Ackerman, por su modelo dinámico, a diferencia de la gran mayoría de enfoques, dirigidos a partir del modelo cinemático; con el fin de llevar el robot a una posición deseada. En el modelado se establecen las restricciones a considerar para tal sistema y finalmente se presentan las pruebas realizadas mediante simulaciones en Matlab/simulink, las cuales arrojan resultados satisfactorios.

Palabras Clave—Ackerman, Cinemática, Dinámica, Control Punto a Punto

I. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la revolución industrial con la creación de máquinas que ayuden a aumentar la producción y velocidad de diferentes procesos, el hombre ha buscado la forma de mejorar estas máquinas lo cual ha llevado a la construcción de robots móviles.

Con la creación de los robots móviles se empezó la investigación de métodos de control para que ejecutaran una tarea deseada, una de las más básicas es que el robot móvil llegue a un punto fijo deseado. De la investigación de cómo controlar estos robots surgen los diferentes métodos de control que hoy en día existen y se siguen mejorando. El problema radica desde la concepción física del robot, para el caso en que se desea realizar una implementación real, o desde la concepción matemática del mismo, lo cual, en cualquiera de los dos casos, lleva al problema de modelar matemáticamente el robot. En este planteamiento se deben tomar en cuenta diversas consideraciones o restricciones, en función de la descripción del modelo.

En una gran cantidad de trabajos enfocados a robots móviles [1], [2] y [3] se presenta el control de robot móviles por medio de su modelo cinemático, lo cual presenta ciertos inconvenientes cuando se requiere una mayor precisión en cuando al desempeño general del sistema para llegar a la posición deseada, ya que dicho control no proporciona una fuerza o torque directamente aplicado a los motores que mueven las ruedas. Este tipo de control sólo se puede lograr en base al modelo dinámico del robot móvil. Algunas propuestas donde involucran el modelo dinámico se pueden encontrar en [4] y [5].

El objetivo de este trabajo es el estudio y análisis del comportamiento de las variables que determinan la posición del robot móvil para comprender el posible comportamiento del robot móvil al ejecutar la tarea deseada y así evitar accidentes durante la implementación implementando un control punto a punto en el modelo dinámico del robot móvil.

II. MODELADO

Modelar un sistema en sus ecuaciones cinemáticas y dinámicas permite comprender al investigador las propiedades y comportamiento del sistema a partir de diferentes parámetros definidos.

El modelo cinemático describe el movimiento del sistema sin considerar las fuerzas externas que lo causan, generalmente se toman en cuenta las siguientes consideraciones para obtener el modelo cinemático para robots móviles con ruedas:

- El robot se mueve sobre una superficie plana.
- No existen elementos flexibles en la estructura del robot (incluyendo las ruedas).
- Las ruedas poseen un eje de direccionamiento, que siempre es perpendicular al suelo.
- Se desprecia todo tipo de fricción en los elementos móviles del robot móvil contra el suelo.

En contra posición con el modelo dinámico, el cual describe el movimiento del robot a partir de las fuerzas externas que mueven al robot, comúnmente es el torque que proporcionan los motores a las ruedas del robot móvil.

III. MODELO CINEMÁTICO

En particular, este trabajo se enfocará al robot móvil tipo Ackerman por su semejanza a la configuración de un vehículo estándar, ya que proporciona una gran estabilidad y es aplicable a la vida cotidiana.

La configuración Ackerman se conforma de 4 ruedas distribuidas en 2 ejes que poseen la misma longitud b a una

distancia l entre ellos, con las llantas delanteras indicando la dirección en la que se moverá el robot móvil (Fig. 1).

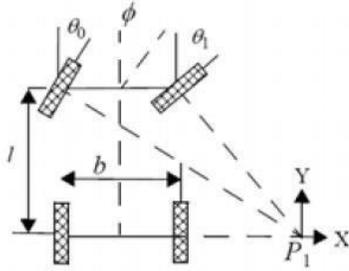


Fig. 1 Robot Móvil tipo Ackerman

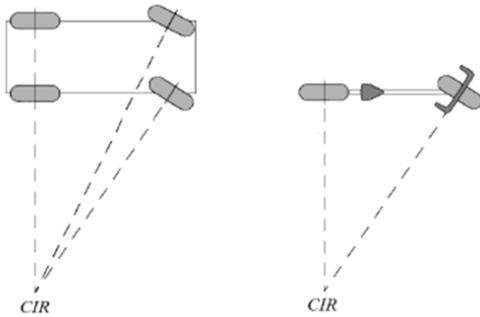


Fig. 2. Simplificación del modelo del robot móvil.

Para obtener el modelo cinemático de este tipo de robot móvil se emplean las restricciones no holonómicas del sistema, las restricciones asumen que no existe deslizamiento en las ruedas del robot móvil y las mismas se encuentran relacionadas con las velocidades del vehículo. Como resultado la ecuación general de las restricciones no holonómicas para un robot móvil tipo Ackerman queda [6]

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0 \quad (1)$$

donde \dot{x} y \dot{y} son las velocidades lineales de las llantas dentro del sistema de coordenadas (x, y) y θ es el ángulo del vehículo con respecto al eje x . Con las restricciones holonómicas establecidas se procede a modelar el robot móvil en el sistema de coordenadas (x, y) simplificando el modelo al de una bicicleta como se ilustra en la Fig. 2.

Bajo estas condiciones se plantean las coordenadas generales que permitirán describir al sistema en la Fig. 3.

Se plantea (x, y) como la posición del centro de gravedad del vehículo, θ la orientación del vehículo con respecto al eje x y α el ángulo de orientación de la rueda delantera con respecto al eje del cuerpo del robot. Sea (x_1, y_1) la posición de la rueda trasera y (x_2, y_2) la posición de la rueda delantera, definidas por (2) a (5)

$$x_1 = x - b \cos(\theta) \quad x_2 = x + a \cos(\theta) \quad (2)$$

$$y_1 = y - b \sin(\theta) \quad y_2 = y + a \sin(\theta) \quad (3)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x} + \dot{\theta} b \sin(\theta) \quad \dot{x}_2 = \dot{x} - \dot{\theta} a \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y} - \dot{\theta} b \cos(\theta) \quad \dot{y}_2 = \dot{y} + \dot{\theta} a \cos(\theta) \quad (5)$$

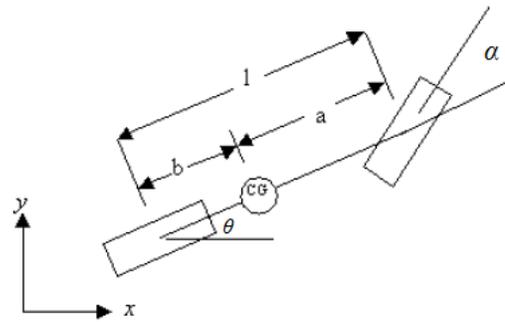


Fig. 3. Coordenadas Generales del robot móvil.

Las restricciones holonómicas para las ruedas trasera y delantera están descritas de la siguiente forma:

$$\dot{x}_1 \sin(\theta) - \dot{y}_1 \cos(\theta) = 0 \quad (6)$$

$$\dot{x}_1 \sin(\theta + \alpha) - \dot{y}_2 \cos(\theta + \alpha) = 0 \quad (7)$$

Substituyendo la definición de (\dot{x}_1, \dot{y}_1) y (\dot{x}_2, \dot{y}_2) en (6) y (7) obtenemos:

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) + b\dot{\theta} = 0 \quad (8)$$

$$\dot{x} \sin(\theta + \alpha) - \dot{y} \cos(\theta + \alpha) + a\dot{\theta} \cos(\theta) = 0 \quad (9)$$

Usando las coordenadas en el centro de masa del vehículo, definidas en la Fig. 3, se define el eje u a lo largo del eje central del robot móvil y el eje w perpendicular al eje u , ejemplificado en la Fig. 4, se obtienen (10) y (11).

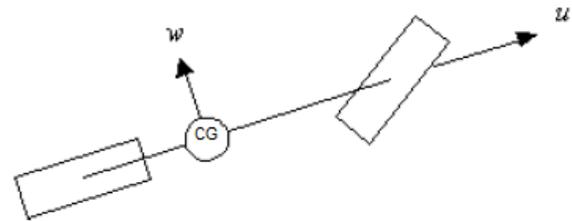


Fig. 4. Coordenadas del robot móvil.

$$\dot{x} = v_u \cos(\theta) - v_w \sin(\theta) \quad (10)$$

$$\dot{y} = v_u \sin(\theta) + v_w \cos(\theta) \quad (11)$$

donde v_u y v_w son las velocidades del centro de gravedad (CG) a lo largo de los ejes u y w respectivamente. Substituyendo (10) y (11) en (8) y (9) se obtienen (12) y (13).

$$v_w = b\dot{\theta} \quad (12)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_u}{l} \tan(\alpha) \quad (13)$$

IV. MODELO DINÁMICO

Con el modelo cinemático definido, se procede a determinar el modelo dinámico usando la metodología de Newton-Euler, donde se tienen las fuerzas longitudinales y laterales ejercidas sobre las llantas, dadas por F_{ui} y F_{wi} ($i = 1$ para las llantas delanteras e $i = 2$ para las llantas traseras) respectivamente. La fuerza de propulsión, F_p , es aplicada por medio de las llantas traseras en la dirección del eje u de las ruedas, m la masa del robot móvil, J el momento de inercia y las distancias a , b , l definidas en la cinemática; la dinámica del robot móvil están dadas por (14) a (19) [7]

$$\dot{x} = v_u \cos(\theta) - v_w \sin(\theta) \quad (14)$$

$$\dot{y} = v_u \sin(\theta) + v_w \cos(\theta) \quad (15)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_u}{l} \tan(\alpha) \quad (16)$$

$$\dot{v}_u = v_w \Omega + \frac{F_{u1} \cos(\alpha)}{m} - \frac{F_{w1} \sin(\alpha)}{m} + \frac{F_{u1} + F_p}{m} \quad (17)$$

$$\dot{v}_w = -v_u \Omega + \frac{F_{u1} \sin(\alpha)}{m} + \frac{F_{w1} \cos(\alpha)}{m} + \frac{F_{w2}}{m} \quad (18)$$

$$\dot{\Omega} = \frac{F_{u1} a \sin(\alpha)}{j} + \frac{F_{w1} a \cos(\alpha)}{j} - \frac{F_{w2} b}{j} \quad (19)$$

Este modelo dinámico se complementa con la dinámica de la rueda de dirección la cual se denota por $\dot{\alpha} = F_s$, donde F_s es la variable de control para modificar el ángulo de orientación del robot móvil.

Considerando que no existe deslizamiento en las ruedas, el modelo dinámico del robot móvil tipo Ackerman, queda descrito por (20) a (28):

$$\dot{v}_u = A_p F_p + A_s F_s \quad (20)$$

$$v_w = \frac{v_u b}{l} \tan(\alpha) \quad (21)$$

$$\Omega = \frac{v_u}{l} \tan(\alpha) \quad (22)$$

$$\dot{\alpha} = F_s \quad (23)$$

$$\dot{x} = v_u \cos(\theta) - v_w \sin(\theta) \quad (24)$$

$$\dot{y} = v_u \sin(\theta) + v_w \cos(\theta) \quad (25)$$

$$\dot{\theta} = \Omega \quad (26)$$

$$A_p = \left(m + \left(\frac{\tan(\alpha)}{l} \right)^2 (mb^2 + j) \right)^{-1} \quad (27)$$

$$A_s = \frac{mb^2 + j}{l \cos^2(\alpha)} \Omega A_p \quad (28)$$

V. CONTROL PUNTO A PUNTO

Para llevar a cabo el control punto a punto del robot móvil se plantea como variables de entrada las coordenadas de un punto fijo al cual se desea llegar (posición deseada) y como salida las fuerzas de control F_p y F_s , para ello se plantean (29) a (32) para llevar a cabo la tarea deseada [7] [8].

El control de dirección está dado por (29) y el control de propulsión por (28).

$$F_s(t) = -k_s [\theta_{os}(t) \ l_{os}(t) \ \alpha_{os}(t)]' \quad (29)$$

$$F_p(t) = F_{p1}(t) + F_{p2}(t) \quad (30)$$

$$F_{p1}(t) = A_p^{-1} (\dot{v}_{ud} - A_s F_s) \quad (31)$$

$$F_{p2}(t) = A_p^{-1} (k_{p1} v_{os}) \quad (32)$$

donde

\dot{v}_{ud} es la aceleración deseada del robot móvil

k_s es un vector de ganancias constantes positivas.

$\theta_{os}(t) = \theta(t) - \theta_d(t)$ es el error en theta

$\alpha_{os}(t) = \alpha(t) - \alpha_d(t)$ es el error de alfa

$l_{os}(t) = l(t) - l_d(t)$ es el error de posición

k_{p1} y k_{p2} son ganancias constantes positivas

para obtener los valores de θ_d , l_{os} y α_d se ocupan (33) a (36).

$$\alpha_d = k_\alpha \left(\tan^{-1} \left(\frac{y_d - y}{x_d - x} \right) - \theta \right) \quad (33)$$

$$\theta_d = \tan^{-1} \left(\frac{y_d - y}{x_d - x} \right) \quad (34)$$

$$l_{os} = -(((x - x_d) * \cos(\theta_d - \theta_{vd})) + ((y - y_d) * \sin(\theta_d - \theta_{vd}))) \quad (35)$$

donde

k_α es una constante de ganancia positiva

y es la posición actual del robot en el eje y

x es la posición actual del robot en el eje x

y_d es la posición deseada del robot en el eje y

x_d es la posición deseada del robot en el eje x

$$\theta_{vd} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\alpha_d)}{2}\right) \quad (36)$$

VI. SIMULACIÓN DEL MODELO DINÁMICO CON EL CONTROL PROPUESTO

que realiza el robot móvil hacia una posición deseada dada en coordenadas (x, y) . En base a las ecuaciones del modelo dinámico del robot móvil y del control propuesto se diseña el diagrama de bloques en simulink que se muestra en la Fig. 5.

Las simulaciones se desarrollan en el ambiente de programación de simulink de Matlab para simular el recorrido

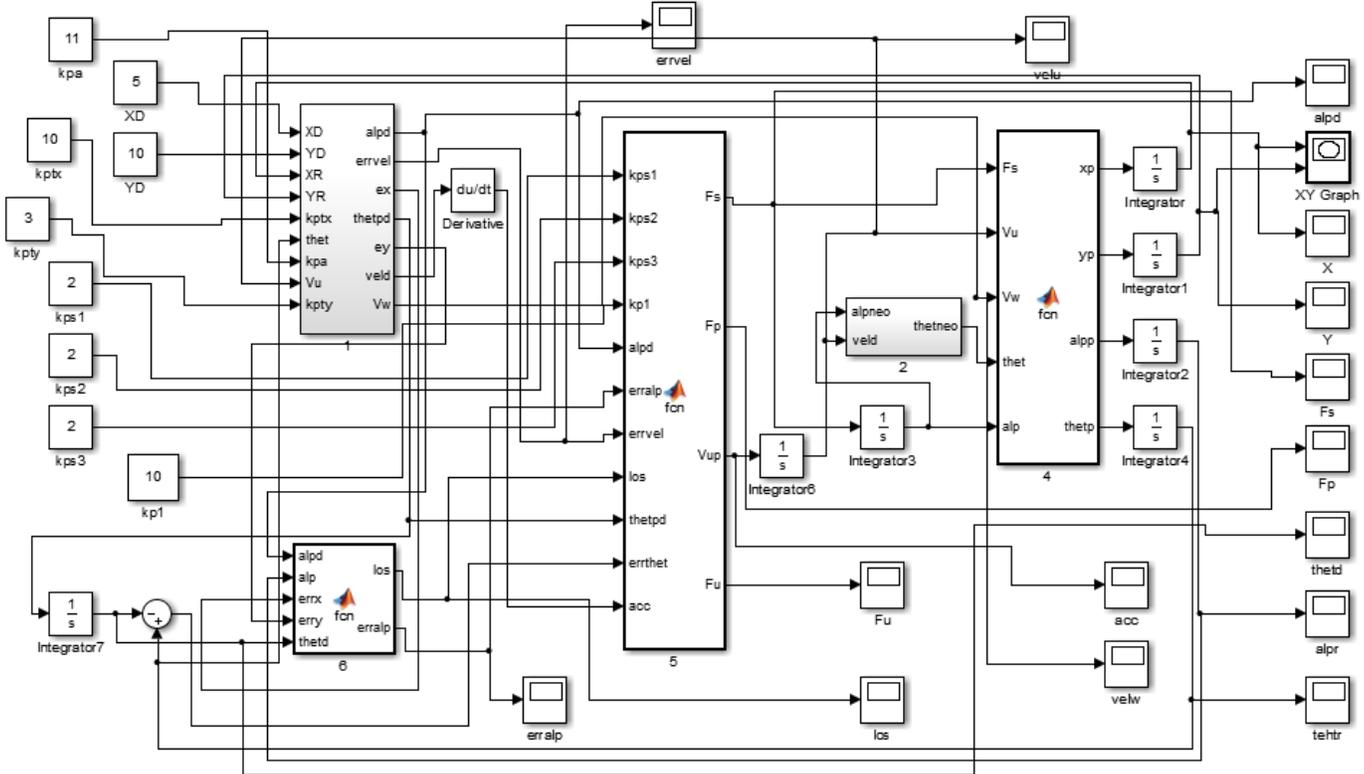


Fig. 5. Diagrama de bloques de simulación.

Para el análisis de resultados se grafica la posición del robot en un plano de coordenadas (x, y) , el comportamiento de los ejes x y y , el error en los ejes x, y y los ángulos α y θ del robot móvil.

A. Resultados de simulación

Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en un tiempo de 5 segundos con el vector de condiciones iniciales $[x \ y \ \theta \ \alpha] = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ para llegar al punto fijo deseado $P = (5,10)$, con las ganancias del control propuestas de tal forma que la trayectoria realizada del robot sea suave y en poco tiempo.

En Fig. 6 se muestra la trayectoria que siguió el robot móvil para llegar al punto deseado.

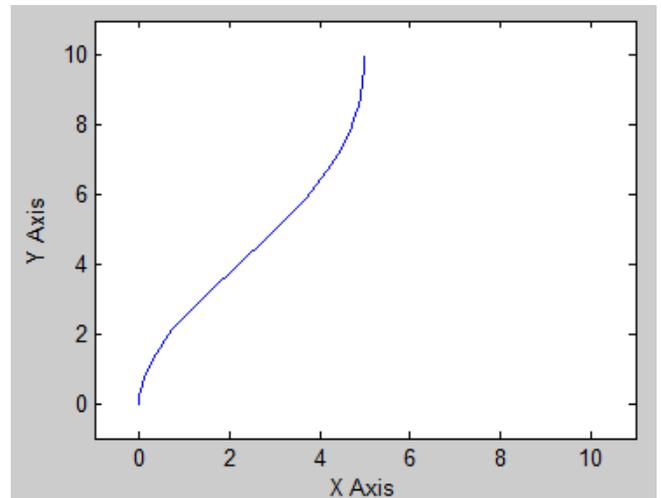


Fig. 6 Trayectoria realizada por el robot móvil a la posición deseada P.

En Figs. 7 y 8 se muestra el comportamiento de los ejes x y y y obtenidos del modelo dinámico.

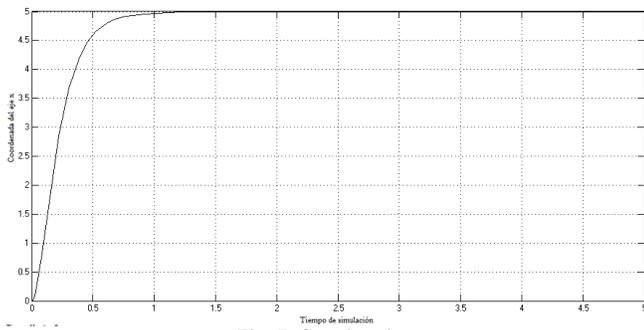


Fig. 7. Coordenada x.

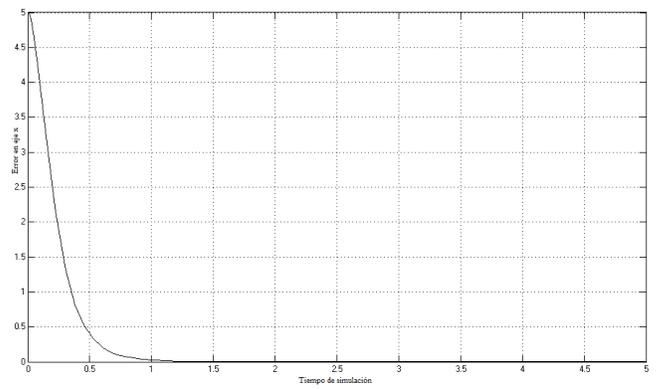


Fig. 11. Error en la coordenada x.

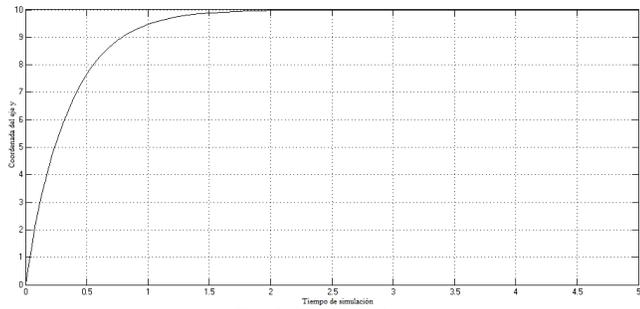


Fig. 8. Coordenada y.

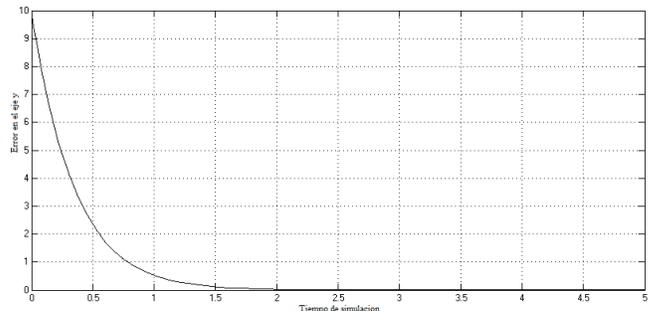


Fig. 12. Error en la coordenada y.

En Figs. 9 y 10 se presentan las gráficas del comportamiento de los ángulos α y θ .

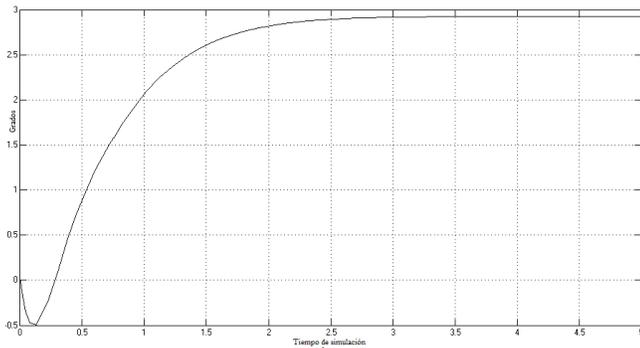


Fig. 9. Ángulo α .

En la Fig. 13 se presenta la gráfica de la velocidad lineal con la que se mueve el robot móvil.

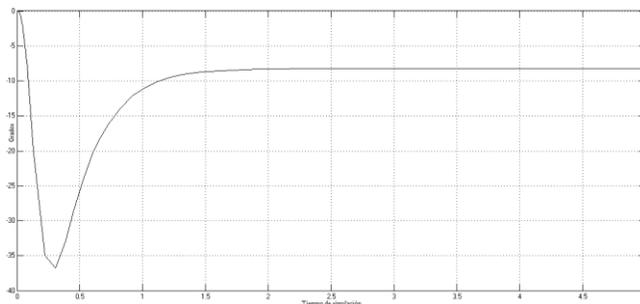


Fig. 10. Ángulo θ .

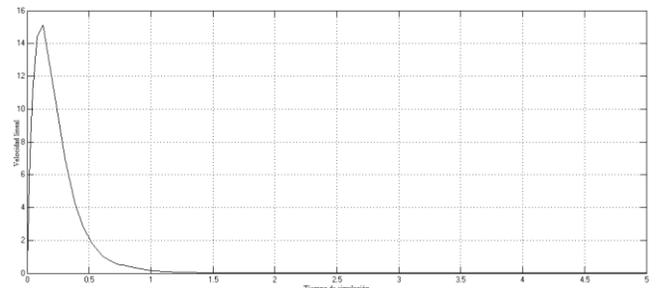


Fig. 13. Velocidad lineal

En Figs. 11 y 12 se presentan las gráficas de los errores de las coordenadas x y y .

Se realizaron más simulaciones con posiciones deseadas en coordenadas $(-x, y)$, $(x, -y)$ y $(-x, -y)$ con resultados de la misma naturaleza. En la Fig. 13 se muestra la trayectoria realizada con la posición deseada $G = (-8, -7)$ usando los mismos parámetros mencionados con anterioridad.

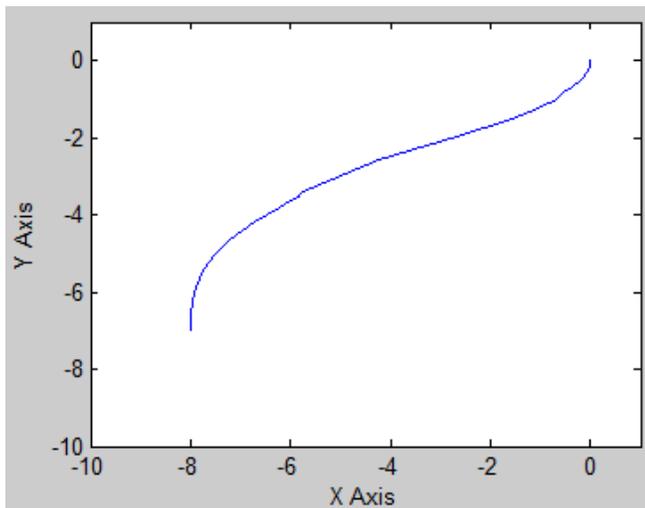


Fig. 13. Trayectoria realizada por el robot móvil a la posición deseada G.

VII. CONCLUSIONES

El desarrollo y obtención de los modelos cinemático y dinámico de un sistema ayuda a comprender, en el caso de los robots móviles, el movimiento a seguir por el sistema e identificar, con ayuda de la simulación si los datos que se están obteniendo como resultado son correctos o incorrectos con el fin de identificar los errores dentro de la simulación.

Al proponer diferentes valores en las ganancias en el control punto a punto permite analizar y entender la manera en que afectan las ganancias al modelo y así asegurar que el robot móvil realice la tarea deseada de la manera más eficaz posible. El desempeño del sistema depende de gran medida de la sintonización de las ganancias, lo cual no es una tarea fácil ya que se ven involucradas distintas ganancias en todo el proceso.

El control propuesto permite comprender de mejor forma el modo en que debe aplicarse a un modelo en la vida real con el propósito de evitar accidentes, tanto para la plataforma en la que se experimenta y el ambiente en el que se trabaja.

Se encuentra en desarrollo la implementación del control punto a punto propuesto en un robot móvil experimental [9].

REFERENCIAS

- [1] B. d'Andréa-Novet, G. Campion, G. Bastin; Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization; The International Journal of Robotics Research; 1995.
- [2] A. De Luca, G. Oriolo, C. Samson; Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot; Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes Centre National de la Recherche Scientifique; p. 83; 1998.
- [3] Giraldo Castillo Oscar, Duran Tolentino Eyner; Localización de un Robot Móvil de Configuración Ackerman usando el Filtro de Kalman; p. 9.
- [4] Noor Hafizah Amer, Hairi Zamzuri, Khisbullah Hudha, Zulkiffli Abdul Kadir; Modelling and Control Strategies in Path Tracking Control for Autonomous Ground Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges; p. 30; 2016.

- [5] Junmin Wang, Joe Steiber, Bapiraju Surampudi; Autonomous Ground Vehicle Control System for High-Speed and Safe Operation; p. 6; 2008.
- [6] Erick N Moret; Dynamic Modeling and Control of a Car-Like Robot; Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; p. 88; 2003.
- [7] R. M. DeSantis; Path-Tracking for Car-Like Robots with Single and Double Steering; TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY; IEEE; p. 12; 1995.
- [8] Peter Corke; Robotics, Vision and Control; Editorial Springer; p. 558; Año 2011.
- [9] Alfredo García Suarez; Control de Navegación de un Robot Móvil; Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP; p. 162; 2015.

Sobre Control de Velocidad en Tiempo Real de un Robot Móvil Omnidireccional de 4 Ruedas

Miguel Ángel Quintana García*, Iliana Marlen Meza-Sánchez[§],
José Luis Monay Arredondo*, Eddie Clemente*

* Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Ensenada
Ensenada, BC Mexico 22860

Email: mquintanagarci@gmail.com, luismonay@gmail.com, eclemente@ite.edu.mx

[§] Cátedra CONACYT – Instituto Tecnológico de Ensenada
Email: immezasa@conacyt.mx

Resumen—En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de sistema embebido, con la característica de ejecución en tiempo real, para algoritmos de control. Esta plataforma de desarrollo está basada en un microcontrolador AVR donde la implementación de controladores se realiza en lenguaje C sobre entornos de uso libre. También, se propone una librería con funciones dedicadas tanto a la estimación de velocidad por medio de la lectura de decodificadores ópticos, así como control por voltaje mediante PWM. La ejecución en tiempo real es garantizada debido a la implementación de tiempos de muestreos uniformes a partir de una señal externa de reloj. Para la validación de esta plataforma, se presentan resultados experimentales de la implementación de un controlador de velocidad sobre un robot móvil omnidireccional de cuatro ruedas.

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema embebido se puede definir como una combinación de hardware y software, además de otros elementos (mecánicos, eléctricos, entre otros) diseñados para una aplicación específica [1]. Una de las principales aplicaciones de este tipo de sistemas es en el área de la Robótica y Control y específicamente, en el área de la Robótica Móvil. Su principal fortaleza es su capacidad para desempeñarse en entornos que no poseen infraestructura y que por definición deben ser de bajo consumo de energía. Un sistema embebido aplicado sobre un robot móvil permite incorporar en su diseño una fusión de sensores, y de esta manera obtener información de su entorno. La extensión natural de este tipo de sistemas corresponde al desarrollo de plataformas embebidas de bajo costo que puedan ser incorporadas físicamente a cada robot, en forma de una red inalámbrica de sensores y actuadores (WSNAs – Wireless Sensor and Actuator Networks [2], [3]), para realizar tareas complejas tales como: generación de mapas (SLAM), redes complejas, trabajo colaborativo, sincronización, formación de robots, entre otros. Dentro de los esquemas propuestos para el diseño de sistemas de control se encuentran los sistemas embebidos basados en microcontroladores. Estos sistemas son de bajo costo y eficientes en su consumo energético; además, son reprogramables y contienen una unidad de procesamiento, memoria y periféricos integrados [4]. Una de las arquitecturas de controladores más utilizadas para este tipo de sistemas es AVR; algunos ejemplos de sistemas embebidos utilizando esta arquitectura son el controlador CM-5, CM-510 y los servo-

motores Dynamixel de la serie AX, ambos de Bioloid; otro ejemplo es la plataforma electrónica de código abierto llamada Arduino en los modelos Uno, Yún, Leonardo, Mega2560, Ethernet, Fio, Nano, Duemilanove, Diecimila, por mencionar algunos.

La implementación de controladores utilizando sistemas electrónicos implica la aplicación de un control discreto, que de manera inherente depende del tiempo de ejecución (i.e. tiempo de muestreo); por ejemplo, un análisis de desempeño y resultados experimentales de temporizadores periódicos basados en interrupciones sobre sistemas embebidos y sus ventajas sobre aquellos sistemas basados en eventos, se presenta en [5]. El desarrollo de sistemas embebidos de control necesitan garantizar ejecución en tiempo real. Este concepto puede definirse de acuerdo a la norma IEEE POSIX como “... *aquel en el que la exactitud de un resultado no solo depende de la exactitud lógica de los cálculos sino también del instante de tiempo en el cual el resultado está disponible*” [6].

Algunos de los aspectos más importantes sobre tiempo real han sido establecidos en [7] para el caso de sistemas y mecanismos de control en tiempo real basados en computadoras. Asimismo, [6] presenta un análisis general de los aspectos a considerar para la implementación de sistemas retroalimentados de control en tiempo real. La malinterpretación de el concepto de tiempo real está muy extendida: *computación rápida no equivale a tiempo real* [7]. Por esta razón, existen trabajos reportados en donde se da por hecho de que se trata de tiempo real pero no se especifican los mecanismos utilizados para garantizarlo (Véase por ejemplo, [8], [9], [10]). Para que una aplicación sea de tiempo real, debe existir un mecanismo que permita llevar un registro de tiempo. En los sistemas embebidos, la ejecución en tiempo real puede garantizarse utilizando una arquitectura por interrupciones generadas por osciladores de cristal, cuarzo o basados en MEMS (Sistemas Micro-Electro-Mecánicos). En algunos casos, es posible utilizar módulos de software para implementar ejecución en tiempo real; algunos ejemplos son QUARC, Simulink Coder y xPC Target, entre otros. Sin embargo, el fabricante los pone a disposición pero no hay manera de saber cómo garantiza la ejecución en tiempo real. En el caso de los sistemas embebidos, una implementación de control implica la configuración de

temporizadores bajo una arquitectura basada en interrupciones; esta arquitectura surgió originalmente para sistemas operativos en tiempo real [11].

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema embebido para la implementación de controladores para un robot móvil omnidireccional con ruedas tipo mecanum. Los robots móviles omnidireccionales ofrecen la capacidad de realizar movimiento en cualquier dirección sin importar su orientación, lo que permite maniobrabilidad y la consecución de tareas bajo escenarios congestionados. El sistema propuesto permite la estimación de velocidad a través de la lectura de los decodificadores ópticos de cada rueda, retroalimentación para el cálculo de una ley de control y su aplicación bajo un esquema de tiempo real periódico sobre los motores para generar movimiento. Comercialmente, existen varios sistemas que permiten la implementación de controladores bajo sistemas embebidos aplicados a robots móviles omnidireccionales; un ejemplo es el robot móvil omnidireccional de Nexus [12], el cual está basado en las librerías de Arduino. La construcción de un prototipo de robot móvil omnidireccional en donde se describen aspectos mecánicos del sistema, y los modelos cinemático y dinámico se presenta en [13]; sin embargo, el sistema no posee retroalimentación ni es posible implementar mecanismos de control. Existen sistemas más sofisticados, como el descrito en [10], el cual utiliza un microprocesador ARM y está basado en Linux. Sin embargo, este sistema no posee ningún mecanismo para garantizar ejecución en tiempo real. El desarrollo propuesto es de arquitectura abierta y posee conectividad inalámbrica, lo cual permitirá escalabilidad mediante la adaptación del sistema embebido hacia robots con diferente configuración y su futura extensión a redes colaborativas. Asimismo, se presentan resultados experimentales de la implementación de un controlador clásico para control de velocidad aplicado a cada una de las ruedas. Se utiliza un sistema de visión como mecanismo de medición para realizar una comparación entre el movimiento del robot móvil y la trayectoria deseada.

Este documento está organizado como se describe a continuación. En la Sección II se presenta la plataforma embebida desarrollada para la implementación de controladores en tiempo real; en la Sección III se describe el desarrollo e implementación de un controlador de velocidad para el robot móvil omnidireccional. Los resultados obtenidos del desempeño del sistema validados mediante un sistema de visión se muestran en la Sección IV. Finalmente, las conclusiones y trabajo futuro se presentan en la Sección V.

II. SISTEMA EMBEBIDO DE CONTROL DE VELOCIDAD EN TIEMPO REAL PARA ROBOT MÓVIL DE CUATRO RUEDAS

La plataforma propuesta es un sistema embebido autónomo reprogramable basado en el microcontrolador ATmega1284p. Este sistema permite la implementación de algoritmos de control utilizando tiempos de muestreo periódicos bajo una configuración como se muestra en la Figura 1. Esta plataforma es empleada para el control de velocidad de un robot móvil omnidireccional de cuatro ruedas tipo mecanum. Para lograr

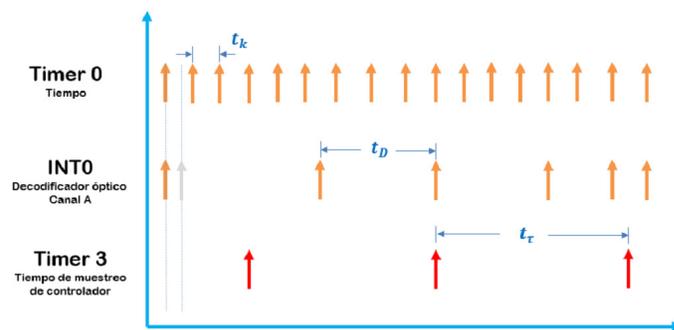


Figura 1: Diseño de la configuración utilizada en los temporizadores del microcontrolador para implementar el control de velocidad.

esta aplicación se utiliza: a) un temporizador para determinar la variable de tiempo t_k , b) cuatro interrupciones externas (t_{D_i} , $i = 1, \dots, 4$) para los canales A y cuatro entradas digitales para los canales B de los decodificadores de las ruedas, c) un temporizador t_τ para garantizar la implementación del controlador bajo un tiempo de muestreo periódico uniforme sobre el robot móvil, y d) cuatro salidas digitales PWM para implementar la ley de control a cada motor. El tiempo de ejecución es garantizado a través de interrupciones basadas en la señal de un oscilador de cristal. Asimismo, se trata de un sistema embebido autónomo donde se ejecuta el control y se implementa la retroalimentación sobre cada motor. Además, en su diseño se ha incorporado comunicación inalámbrica a través de una antena que maneja el protocolo ZigBee basado en el estándar IEEE 802.15.4. El esquema del sistema embebido propuesto, para control de velocidad sobre el robot móvil, se muestra en la Figura 2. Las características generales del sistema son

- **Ejecución en tiempo real t_k**

Para garantizar una ejecución en tiempo real del controlador se utiliza un mecanismo de conteo de pulsos basados en un oscilador de cristal de 16 MHz y se habilita un funcionamiento basado en interrupciones de reloj. El sistema propuesto está basado en el microcontrolador ATmega1284p sobre el cual se configura una fuente de reloj denominada Temporizador 0 (Timer0). El modo de operación utilizado es *modo normal*, con interrupciones por desbordamiento (*overflow*) cada $t_k = 128[\mu s]$. Este temporizador es el encargado de realizar el conteo de tiempo: con cada interrupción generada, se establece una Rutina de Servicio de Interrupción (*ISR -Interrupt Service Request*) para actualizar el tiempo de ejecución transcurrido.

- **Estimación de velocidad t_{D_i} , $i = 1, \dots, 4$**

Los decodificadores ópticos de cada motor generan un tren de pulsos en dos canales digitales con los que se realiza la estimación de velocidad mediante el cálculo basado en frecuencia. En el sistema prototipo, se habilitan dos canales digitales del microcontrolador para cada uno

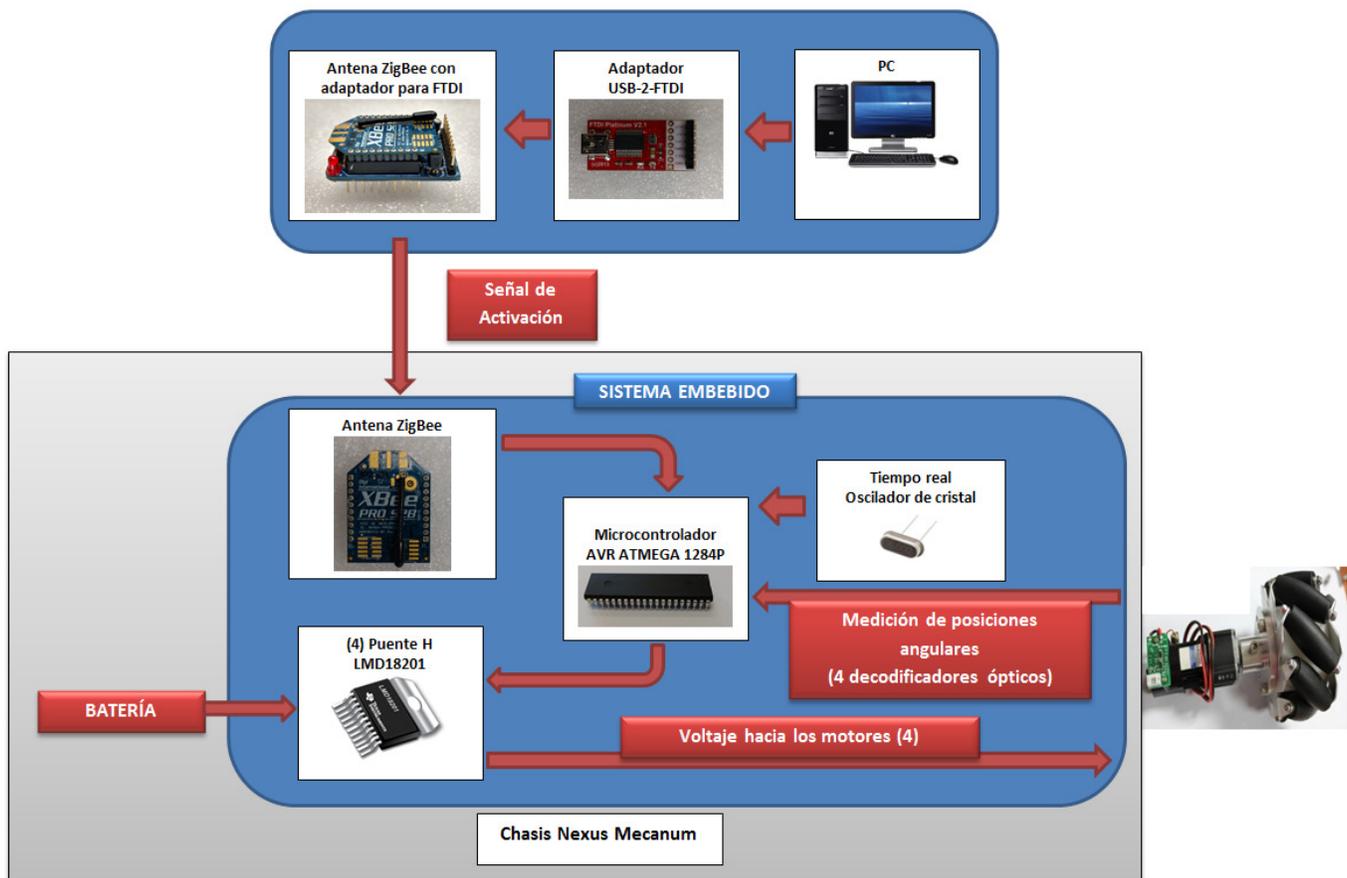


Figura 2: Diagrama esquemático de la plataforma experimental desarrollada para control de velocidad del robot móvil omnidireccional.

de los cuatro motores. Entonces, a través de un mecanismo basado en interrupciones externas se establece una *ISR* que requiere únicamente del periodo de tiempo t_{D_i} , $i = 1, \dots, 4$, como se muestra en la Figura 1. La estimación de velocidad para cada rueda está basada en las interrupciones generadas por cada decodificador óptico. El tiempo transcurrido entre interrupciones t_{D_i} , $i = 1, \dots, 4$ no son periódicos sino que dependen de la velocidad de cada rueda. El factor de conversión de la lectura de pulsos a velocidades angulares, en ambos sentidos, es a través de un láser y está sujeto a la resolución del disco decodificador.

- Tiempo de ejecución del controlador t_τ**
 Para la ejecución del controlador se ha configurado el Temporizador 3 (*Timer3*) del microcontrolador con una resolución de 16 bits, y dispuesto para operar en *modo normal* con interrupciones por desbordamiento. Con cada interrupción generada, se calcula la salida de control y se genera la señal de control a través de los canales de los temporizadores *Timer1* y *Timer2* configurados previamente en *modo PWM fase correcta*, para accionar los motores del robot móvil. El tiempo de muestreo está definido con respecto a la frecuencia del oscilador,

el modo de operación y preescalas predefinidas por el fabricante. Se ha seleccionado $t_\tau = 32[\text{ms}]$ por facilidad, considerando que es el tiempo de muestreo que le sigue al más pequeño posible de $1[\text{ms}]$. Es posible ajustar este tiempo cambiando el modo de operación pero implica la necesidad de implementar un algoritmo de corrección de tiempo. Este algoritmo deberá ajustar el conteo de los pulsos del oscilador para evitar derivas y errores de precisión.

- Etapa de potencia**

Esta parte del sistema embebido es la encargada de proveer la corriente necesaria para suministrar el voltaje de control especificado para los motores. Se compone de un Puente H basado en el circuito integrado Texas Instrument LMD18201T alimentado por la batería del robot. Una vez que se ha calculado la salida de control, ésta se alimenta al Puente H en forma de PWM para ser aplicada a cada motor del robot móvil.

- Activación inalámbrica**

Este sistema permite una conexión punto a punto donde el inicio de cada experimento es activado a través de un mensaje vía inalámbrica de una antena conectada a la PC hacia la antena del sistema embebido. Esto

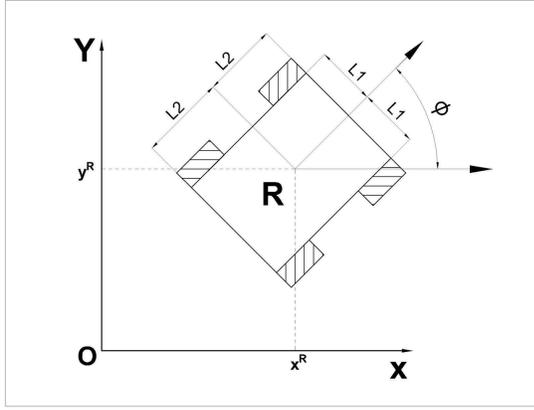


Figura 3: Postura del robot móvil omnidireccional definida por $R = [x^R \ y^R \ \theta^R]^T$ con respecto al marco fijo XOY .

permite activar y desactivar un experimento en progreso así como también alterar la ejecución de un algoritmo. Se utilizaron antenas de la marca XBee ZB Pro Series 2, compatibles con el protocolo inalámbrico ZigBee IEEE 802.15.4, las cuales fueron previamente configuradas para conectarse utilizando el software gratuito XCTU distribuido por el fabricante. Estas antenas han sido configuradas, en el proceso de validación experimental, para establecer una conexión punto-a-punto; sin embargo pueden configurarse bajo diversas topologías de red como mallas y árboles, así como también realizar tareas específicas para desempeñarse como coordinador, ruteador o dispositivo final.

III. SÍNTESIS DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD

El robot móvil omnidireccional bajo estudio consta de cuatro ruedas tipo mecanum como se muestra en la Figura 3; l_1, l_2 corresponden a las longitudes del robot y las coordenadas generalizadas están descritas por el vector de estados $R = [x^R \ y^R \ \theta^R]^T$. Las variables $x^R, y^R \in \mathbf{R}$ corresponden a las posiciones con respecto al plano XOY , y la orientación con respecto al eje X es descrito por el ángulo θ^R .

Sea $\Omega = [v_x^R \ v_y^R \ \omega^R]^T$, el vector de velocidades del robot móvil, donde v_x^R, v_y^R corresponden a las velocidades lineales con respecto a XOY , respectivamente, y ω^R es la velocidad angular de la orientación θ^R . La solución de la cinemática inversa para el robot móvil omnidireccional de cuatro ruedas tipo mecanum se define como [14]

$$\Omega = I\omega, \quad (1)$$

donde

$$\Omega = \begin{bmatrix} v_x^R \\ v_y^R \\ \omega^R \end{bmatrix}, \quad \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}, \quad \alpha = (l_1 + l_2)^{-1},$$

$$I = \frac{r^R}{4} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ \alpha & \alpha & -\alpha & -\alpha \end{bmatrix}.$$

Para imponer un movimiento deseado $\Omega_d = [v_{xd}^R \ v_{yd}^R \ \omega_d^R]^T$, es necesario calcular las velocidades angulares ω_d para las ruedas mediante la solución descrita en (1), y diseñar un algoritmo de control tal que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_d - \omega| = 0. \quad (2)$$

donde $\omega_d = [\omega_{d1} \ \omega_{d2} \ \omega_{d3} \ \omega_{d4}]^T$ es el vector de velocidades angulares deseadas para cada actuador del robot móvil. Dado el objetivo de control definido en (2), se propone el diseño e implementación de un controlador Proporcional (P) de velocidad basado en el análisis de la dinámica de los actuadores del robot móvil; en este caso, el movimiento está dado por motores de corriente directa con las mismas especificaciones, para cada una de las ruedas identificadas por un índice $i = 1, 2, 3, 4$.

Los motores del robot móvil omnidireccional poseen una caja de engranes para una reducción de 64:1. La descripción clásica de un motor de corriente directa con estas características, despreciando la inductancia de la armadura, está dada por [15]

$$\begin{aligned} \left[J_m + \frac{J_r}{\rho^2} \right] \dot{\omega}_i + f_{vm} \omega_i + \frac{f_{vr}}{\rho^2} \omega_i \\ + \frac{K_a K_b}{R_a} \omega_i = \frac{K_a}{\rho R_a} v_i \end{aligned} \quad (3)$$

donde $\omega_i \in \mathbf{R}$ es la velocidad angular del eje del motor correspondiente a una rueda i , ρ es la relación de engranes del motor a la rueda, $v_i \in \mathbf{R}$ es la entrada de voltaje; J_m, J_r corresponden a los coeficientes de inercia de rotor y de la rueda, respectivamente; f_{vm}, f_{vr} definen a los coeficientes de fricción viscosa del motor y de la rueda; K_a, K_b y R_a son los parámetros de las características eléctricas de los motores.

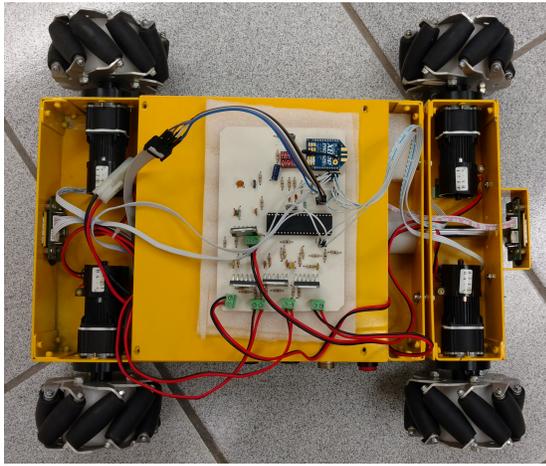
Defínase $\tilde{\omega}_i = \omega_{di} - \omega_i$ como el error entre la velocidad medida con respecto a una velocidad deseada ω_{di} para el motor de la rueda i . Se propone una ley de control clásica proporcional compensada dada por

$$v_i = \beta \dot{\omega}_{di} + \gamma \omega_{di} + K_p \tilde{\omega}_i \quad (4)$$

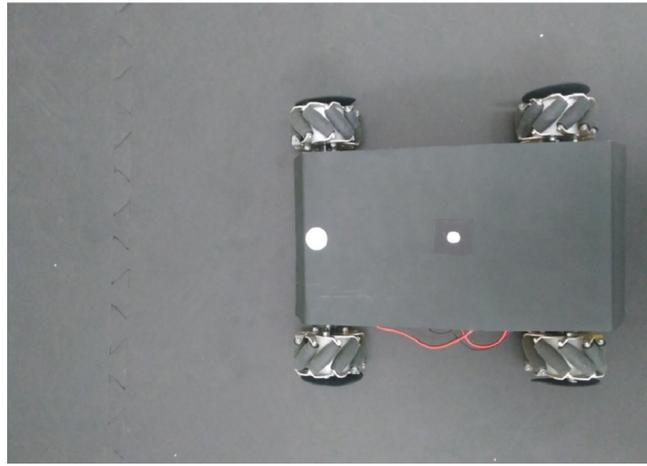
donde $\beta = \frac{\rho R_a}{K_a} \left(J_m + \frac{J_r}{\rho^2} \right)$, $\gamma = \frac{\rho R_a}{K_a} \left(f_{vm} + \frac{f_{vr}}{\rho^2} + \frac{K_a K_b}{R_a} \right)$. La ecuación en lazo cerrado se obtiene sustituyendo la ley de control (4) en el modelo del motor i descrito en (3), y está dado por

$$\dot{\tilde{\omega}} = - \left(\gamma + \frac{K_a}{\rho R_a \bar{J}} K_p \right) \tilde{\omega}_i, \quad (5)$$

donde $\bar{J} = \left[J_m + \frac{J_r}{\rho^2} \right]$. La condición suficiente para garantizar estabilidad del sistema en lazo cerrado aplicando el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz (Véase [16]).



(a)



(b)

Figura 4: Vista superior del robot móvil omnidireccional: (a) Conexiones de la tarjeta del sistema embebido reprogramable, (b) Configurado para validación del movimiento.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron experimentos para validar el desempeño del sistema embebido prototipo, implementando el controlador proporcional de velocidad (4) con una ganancia $K_p=3$, para cada uno de los motores de las ruedas del robot móvil. Se utiliza un sistema de visión solamente para realizar mediciones de trayectorias del robot móvil omnidireccional. Los motores de corriente directa del robot móvil son Faulhaber 12V DC Coreless Motor Serie 2342012CR con un par máximo de 16 Nm y una resolución de 768 cpr en la lectura del decodificador óptico. Los valores de los parámetros de este actuador se presentan en Tabla I. El prototipo de la tarjeta embebida sobre el robot móvil y la vista superior del robot para validar su trayectoria con el sistema de visión se muestran en la Figura 4.

Tabla I: Valores de los parámetros de los motores de corriente directa

Parámetro	Valor	Unidades
Inercia del rotor J_m	5.7×10^{-7}	$Kg\ m^2$
Inercia de las ruedas J_r	4.2×10^{-3}	$Kg\ m^2$
Constante contraelectromotriz K_b	13.36×10^{-3}	$V/s/rad$
Constante par del motor K_a	13.4×10^{-3}	Nm/A
Resistencia de armadura R_a	1.9	Ω
Coefficiente de fricción viscosa $f_{vm} + f_{vr}\rho^{-2}$	1×10^{-4}	Nm
Distancia l_1	0.1524	m
Distancia l_2	0.1505	m

El primer escenario definido es para un movimiento en línea recta; esto es, las velocidades lineales del robot móvil son constantes y la velocidad angular es igual a cero. Para el segundo escenario, se establece un movimiento deseado cíclico; esto es, las velocidades lineales están especificadas por funciones periódicas con respecto al tiempo y una velocidad angular constante. Los resultados medidos por el sistema de visión se muestran a continuación.

IV-A. Desplazamiento en línea recta

Las velocidades del robot móvil definidas para este escenario son

$$\begin{bmatrix} v_x^R \\ v_y^R \\ \omega^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1\ m/s \\ 0,1\ m/s \\ 0\ rad/s \end{bmatrix}. \quad (6)$$

El desplazamiento esperado del robot es un movimiento en línea recta. La condición inicial para este experimento está definido por

$$\begin{bmatrix} x^R(0) \\ y^R(0) \\ \theta^R(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ m \\ rad \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Las velocidades angulares deseadas ω_{di} para cada rueda i , se calculan sustituyendo las velocidades deseadas (6) en el modelo cinemático inverso del sistema (1), para obtener

$$\begin{bmatrix} \omega_{d1} \\ \omega_{d2} \\ \omega_{d3} \\ \omega_{d4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -4 \\ 0 \\ -4 \end{bmatrix} rad/s. \quad (8)$$

Las mediciones del sistema de visión para este escenario se muestran en la Figura 5. Observe que el error entre el movimiento realizado y el deseado es despreciable.

IV-B. Movimiento cíclico

Para este experimento, se define que el robot móvil presente un movimiento circular, para ello se propone un vector de velocidades deseadas con respecto al tiempo definidas por

$$\begin{bmatrix} v_x^R \\ v_y^R \\ \omega^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2 \sin(0,4\pi t)\ m/s \\ 0,2 \cos(0,4\pi t)\ m/s \\ 0\ rad/s \end{bmatrix}. \quad (9)$$

La condición inicial para este experimento está definido por

$$\begin{bmatrix} x^R(0) \\ y^R(0) \\ \theta^R(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ m \\ rad \end{bmatrix}. \quad (10)$$

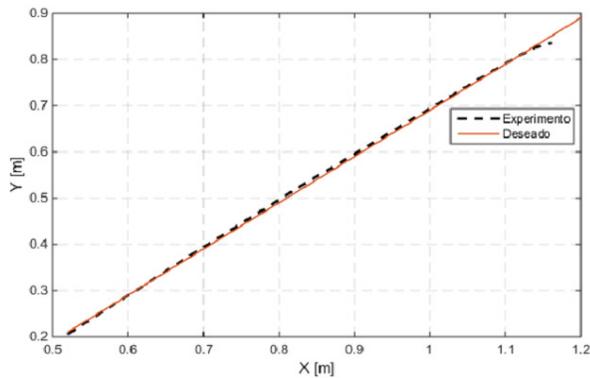


Figura 5: Medición obtenida por el sistema de visión para el experimento de desplazamiento en línea recta diagonal.

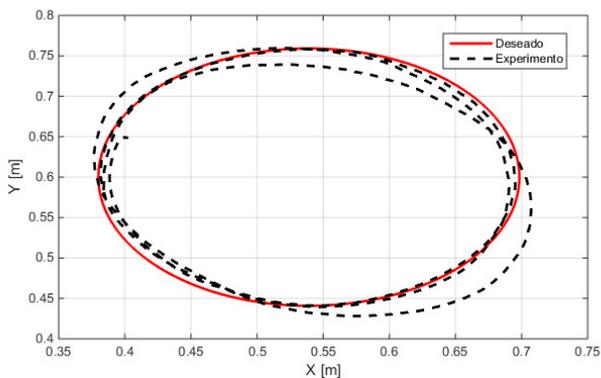


Figura 6: Medición obtenida por el sistema de visión para el experimento de seguimiento de trayectoria.

Las mediciones experimentales para este escenario se muestran en la Figura 6. Observe que para este caso existe el problema de deslizamiento en las ruedas, el cual puede reducirse significativamente modificando la superficie en la que se desplaza y compensando los errores de calibración de la cámara ante la medición de un sistema en movimiento. Por otro lado, también se tiene la presencia de zona muerta y juego mecánico, debido a las características eléctricas y las cajas de engranes de los motores del robot móvil, respectivamente. Sin embargo, aún con todos los factores antes mencionados, el error en la trayectoria generada por el robot es aceptable, dado que el control se realiza sobre la velocidad de cada rueda y no sobre la posición del robot móvil con respecto al marco XOY .

V. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se desarrolló un prototipo de sistema embebido que permite la implementación de algoritmos de control sobre un robot móvil omnidireccional. La plataforma construida permite la ejecución de controladores utilizando tiempos de muestreo periódicos uniformes. Los resultados obtenidos a través de la implementación de un controlador de velocidad, verifican el desempeño del sistema desarrollado considerando las mediciones obtenidas por el sistema de

visión. Se concluye que este sistema puede ser utilizado para validar experimentalmente propuestas de control sobre este tipo de mecanismos y se espera que se pueda extender a su adaptación para robots móviles con diferentes configuraciones. Asimismo, es necesario realizar un análisis de consumo de recursos y la carga computacional con la finalidad de establecer los límites de la plataforma propuesta. Actualmente, solo posee comunicación inalámbrica para activar/desactivar un experimento. Como trabajo futuro se pretende extender el resultado para implementar una retroalimentación utilizando antenas de comunicación inalámbrica para abordar problemas de control que impliquen la interacción de varios robots.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al CONACYT Proyecto Cátedras 2459 *Redes de robots móviles colaborativos*, al TecNM Proyecto 5748.16-P *Optimización de controladores aplicados a la navegación de un robot móvil, utilizando cómputo evolutivo*, al Instituto Tecnológico de Ensenada y a PRODEP.

REFERENCIAS

- [1] R. Faludi (2011). *Building Wireless Sensor Networks*, O'Reilly Media Inc., Sebastopol, CA, EUA.
- [2] D.I. Curiac (2016). "Towards wireless sensor, actuator and robot networks: Conceptual framework, challenges and perspectives", *Journal of Network and Computer Applications*, 63, pp. 14 – 23.
- [3] A. Nayak, I. Stojmenovic (2010). *Wireless sensor and actuator networks*, John Wiley & Sons.
- [4] S. Heath (2003). *Embedded Systems Design – Series in design for engineers*, 2da. Edición, Newnes – Elsevier Science.
- [5] A.A. Fröhlich, G. Gracioli, J.F. Santos (2011). "Periodic timers revisited: The real-time embedded system perspective", *Computers & Electrical Engineering*, 37:3, Mayo 2011, pp. 365 –375, ISSN 0045-7906, DOI: 10.1016/j.compeleceng.2011.03.003
- [6] A. Gambier (2004). "Real-time control systems: a tutorial", 5th Asian Control Conference, pp. 1024 – 1031.
- [7] J. A. Stankovic (1988). "Misconceptions about real-time computing: a serious problem for next-generation systems", *Computer*, 21(10), pp. 10 – 19, DOI: 10.1109/2.7053
- [8] G. Perez, G. Araguas, D. Gaydou, G. Steiner, L.R. Canali (2014). "RoMAA-II, an Open Architecture Mobile Robot", *IEEE Latin America Transactions*, 12(5), pp. 915 –921, DOI: 10.1109/TLA.2014.6872906
- [9] M. Kelemen, T. Kelemenová, I. Virgala, L. Miková, T. Lipták (2014). "Rapid Control Prototyping of Embedded Systems Based on Microcontroller", *Procedia Engineering*, 96, pp. 215 – 220, ISSN 1877-7058, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.146.
- [10] K. Azazi, R. Andrean, W. Atmadja, M. Handi, J. Lukas (2015). "Design of Mobile Robot with Navigation Based on Embedded Linux", *Procedia Computer Science* 59, pp. 473 – 482, DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.520
- [11] J. Cooling (2013). *Real-time Operating Systems (The engineering of real-time embedded systems)*, Lindentree Associates.
- [12] Fivebro International Corp (2011). "FB002 Mecanum 4WD Robotic Platform User Manual", http://www.robotmarketplace.com/products/images/0-FB002_Quick-Start.pdf
- [13] M.O. Tatar, C. Popovici, D. Mandru, I. Ardelean, A. Plesa (2014). "Design and development of an autonomous omni-directional mobile robot with Mecanum wheels", 2014 IEEE Int Conf on Automation, Quality and Testing, Robotics, pp. 1 – 6.
- [14] P.F. Muir, C. P. Neuman (1987). "Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirection Wheeled Mobile Robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1087767
- [15] R. Kelly y V. Santibáñez (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*, Ed. Pearson Educación, S. A.
- [16] R. Kelly y J. Moreno (2001). *Learning PID structures in an introductory course of automatic control*, *IEEE Trans. on Education*, 44(4), pp. 373 – 376.

Avance en el Desarrollo de una Interfaz para Planificación de Tareas del Robot Móvil Create 2

Omar Martínez, Nieves Juárez, Ricardo Campa y Juan Sifuentes
 TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna
 División de Estudios de Posgrado e Investigación
 Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de la Laguna S/N
 27000, Torreón, Coahuila, México

Resumen—El robot Create 2 es un robot móvil tipo diferencial producido por iRobot, el cual tiene la ventaja de que puede ser programado por el usuario vía puerto serie (USB). En este trabajo se describe el avance que se tiene en el desarrollo de una interfaz de software basada en Matlab para la planificación de tareas de movimiento en el Create 2. Al final se emplea la interfaz desarrollada para ejecutar una tarea simple de planificación y seguimiento de una trayectoria, incluyendo algoritmos de localización y evasión de obstáculos, en el robot Create 2 con el que se cuenta.

I. INTRODUCCIÓN

A diferencia de los robots manipuladores, los cuales tienen una base fija y por lo tanto un espacio de trabajo limitado, los robots móviles tienen una base móvil, que les permite moverse libremente en su entorno. Desde un punto de vista mecánico, un robot móvil está formado al menos por un cuerpo rígido (la base o chasis) e incluye un sistema de locomoción [1].

En el caso de los robots móviles con ruedas (RMR), que representan la gran mayoría de los robots móviles actualmente en uso, un sistema de ruedas acopladas al chasis proporciona el movimiento relativo con respecto al piso. El tipo y número de ruedas, así como su ubicación con respecto al chasis, determinan en gran medida la movilidad de un RMR.

Las llamadas ruedas convencionales (que permiten el movimiento sólo en la dirección perpendicular al eje de la rueda, la cual gira en un plano vertical) son por mucho las más comunes. Existen tres tipos básicos de ruedas convencionales:

- La *rueda fija* está unida al chasis de modo que su orientación relativa al mismo es constante. Sólo tiene un eje de rotación y generalmente está actuada.
- La *rueda direccionable* es similar a la rueda fija, pero posee además un segundo eje de rotación, actuado, el cual es vertical y pasa por el centro de la rueda; esto permite cambiar la orientación de la rueda con respecto al chasis.
- La *rueda orientable descentrada* tiene también dos ejes de rotación pero el vertical no pasa a través del centro de la rueda; tal arreglo permite que la rueda, aun sin contar con actuadores, gire alineándose con la dirección de movimiento del chasis; generalmente se emplea sólo como punto de soporte, ya que no afecta a la movilidad.

Un RMR con transmisión diferencial (o simplemente *robot diferencial*) es un vehículo con dos ruedas fijas que comparten

un mismo eje de rotación, y una o más ruedas orientables descentradas cuya función es mantener el robot estáticamente balanceado. Las dos ruedas fijas son controladas de manera independiente, lo que permite no sólo que el robot avance, sino también que pueda rotar sobre sí mismo (alrededor de un eje perpendicular al piso que pasa por el punto medio entre las ruedas). Tales características hacen de este tipo de robot móvil uno de los más utilizados.

La compañía iRobot fue fundada en 1990 por investigadores del área de robótica del MIT, con la finalidad de hacer realidad los robots prácticos. Actualmente es una de las empresas más reconocidas en la producción de robots para uso doméstico, siendo el robot aspiradora Roomba uno de sus modelos más vendidos. En 2007 iRobot introdujo su modelo Create, un RMR diferencial basado en el Roomba pero explícitamente diseñado para aplicaciones de desarrollo. En el 2014 el modelo Create fue reemplazado por el Create 2 (ver figura 1), el cual permite diferentes métodos de programación, empleando ya sea una plataforma de desarrollo básica como Arduino o una computadora personal ejecutando Matlab [2].



Fig. 1. Robot móvil iRobot Create 2

El objetivo de este trabajo es presentar el avance que se tiene hasta la fecha en el desarrollo de una plataforma de software, basada en Matlab, para la generación de tareas de movimiento en el robot Create 2 que ha sido recientemente adquirido por el Laboratorio de Mecatrónica y Control del Instituto Tecnológico de la Laguna. Mediante tal interfaz se pretende resolver los problemas básicos de navegación de los RMR,

tales como la localización, la planificación de trayectorias y el control en tiempo real.

II. PLANIFICACIÓN DE TAREAS EN LOS RMR

El objetivo del planificador de tarea en un robot es el de generar las señales necesarias para que el robot realice las diferentes tareas especificadas por el usuario. Pero en el caso de los RMR, debido a la complejidad de las tareas que se pueden llevar a cabo, la planificación de tareas generalmente se realiza a diferentes escalas o niveles. Por ejemplo, los robots repartidores de oficina tienen que determinar en que orden visitar las oficinas, planificar la ruta a esas oficinas, seguir esas rutas de manera confiable y evitar obstáculos estáticos y dinámicos en el proceso [3].

La figura 2 muestra esquemáticamente como un problema de **planificación de tarea** (“task planning”) puede ser analizado, a un nivel más bajo, como un problema de **planificación de movimiento** (“motion planning”) complejo, o bien como un problema de **planificación de ruta** (“path planning”) combinado con **navegación** (es decir, seguimiento de ruta); y todavía a un nivel inferior está la generación de las señales de referencia para los controladores en los actuadores del RMR.

Planificación de Tarea	
Planificación de Ruta	Planificación de Movimiento Complejo
Navegación	
Servo Control	

Fig. 2. Niveles de planificación de tareas en un RMR [3]

En general, la planificación de tarea determina a dónde el robot debería moverse en seguida, mientras que la planificación de movimiento lleva el robot ahí. De acuerdo con [3] la visión convencional del problema de planificación de tarea es que para movimientos complejos (tales como el problema de estacionamiento en paralelo) se usa un planificador de movimiento de escala completa, pero para movimientos simples (tales como la evasión de obstáculos) se usa una combinación de planificación de ruta y navegación.

La planificación de ruta considera un espacio de configuración de dimensión pequeña (por ejemplo, dado por las coordenadas del robot) y tiempos de anticipación medios para determinar la trayectoria nominal del RMR, a menudo ignorando obstáculos y las capacidades físicas del robot. La navegación considera un espacio de configuración de dimensión mayor (por ejemplo, dado por las coordenadas del robot, su orientación y su velocidad) y tiempos de anticipación menores para seguir la trayectoria, considerando obstáculos y las capacidades físicas del robot.

A. Problemas fundamentales

En el capítulo 2 del libro *Computational Principles of Mobile Robotics* [4] se describen los problemas fundamentales asociados con la planificación de tareas en robots móviles. El texto siguiente es tomado de esa referencia.

Quizás la abstracción teórica más simple de un RMR es el *robot puntual*. Un robot puntual abstrae el robot a un simple punto moviéndose en algún ambiente, típicamente un plano cartesiano continuo. Dentro de ese formalismo, el robot puede ser representado como un punto $(x, y) \in \mathbb{R}^2$. El punto (x, y) describe completamente el *estado* del robot y es también conocido como la *postura* o *configuración* del robot.

Mover el robot implica cambiar su estado de un valor (a, b) a otro (c, d) . El robot se mueve en el plano, pero no todo este dominio está necesariamente disponible para el robot. Algunos estados no son válidos; más bien corresponden a *obstáculos* u otros estados que el robot no puede ocupar. El conjunto de posturas válidas del robot es conocido como su *espacio libre*, y se representa por $C_l \subset \mathbb{R}^2$.

Ahora es posible establecer las siguientes preguntas, que definen los problemas fundamentales:

- ¿Es posible llevar el robot de una configuración inicial a una final sin salir de C_l ? Este es el problema de **planificación de ruta**, y es quizás el problema clave que debe ser abordado para lograr que un robot se mueva inteligentemente en su entorno.
- ¿Cómo puede el robot determinar su estado si tiene mediciones locales de C_l . Este es el problema de **localización**. El conocimiento completo del mundo del robot no es útil a menos que se sepa dónde está el robot dentro de él.
- ¿Cómo puede el robot determinar cuáles partes de su entorno están ocupadas? Esto es ¿cómo puede determinar C_l ? Este es el problema de **percepción** o **sensado**.
- ¿Cómo puede el robot determinar C_l , suponiendo que siempre sabe dónde está? Este es el problema de construcción de una representación del entorno del robot o **mapeo**.
- ¿Cómo puede el robot determinar su postura y C_l si no conoce ninguno? Esto es conocido como el problema de **localización y mapeo simultáneo** o **SLAM**, por sus siglas en inglés.

III. MODELADO CINEMÁTICO DEL ROBOT DIFERENCIAL

En la subsección II-A se explicó cómo un RMR puede ser considerado como un robot puntual. Esa es una idealización bastante útil, pero sobresimplifica el problema de modelado, ya que se pierde, por ejemplo, la información sobre las direcciones de movimiento instantáneo permitidas.

En esta sección se presentan los conceptos básicos del modelado cinemático de los RMR, que sí toma en cuenta las restricciones en el movimiento producidas por las ruedas. Para esto es importante suponer: (a) que el plano de cada rueda convencional permanece vertical; (b) que hay en todos los casos un único punto de contacto entre la rueda y el piso, y (c) que no se presenta deslizamiento en ese punto de contacto. Lo anterior lleva a que la rueda presenta un movimiento sólo bajo condiciones de rodamiento puro y rotación alrededor del eje vertical a través del punto de contacto. Al final, los movimientos posibles de cada rueda individual se combinan para calcular el movimiento del robot como un todo.

Un concepto geométrico de suma importancia en los RMR es el conocido como *centro instantáneo de rotación* o CIR. Para explicar este concepto, considérese una rueda girando y produciendo un movimiento en la dirección del eje de giro de la rueda y con su movimiento lateral restringido. Esta restricción puede ser mostrada dibujando una *línea de movimiento cero* (LMC) a través de su eje horizontal, perpendicular al plano de la rueda. En todo instante, el movimiento de la rueda a lo largo de la LMC debe ser cero. En otras palabras, la rueda debe moverse instantáneamente a lo largo de algún círculo de radio R tal que el centro de ese círculo esté localizado en la LMC. Cuando R es infinito, la rueda avanza en línea recta.

Para robots que cuentan con dos o más ruedas, el CIR se encuentra trazando la LMC de cada rueda de cada una de las ruedas, y entonces el punto en el que las líneas se encuentren será el CIR del robot. La movilidad de un RMR queda restringida al lugar donde pueda ser localizado el CIR, el cual puede ser ajustado cambiando la orientación de alguna de sus ruedas (por ejemplo empleando ruedas direccionables).

Un caso especial es el del RMR diferencial, donde el CIR sigue restringido a encontrarse a lo largo de la LMC pero no en un punto específico, sino que la posición de éste se mueve dependiendo de las velocidades de las dos ruedas fijas con las que cuenta. Por ejemplo, si ambas ruedas giran con la misma rapidez y en el mismo sentido, entonces el robot diferencial se moverá en línea recta, y si giran con la misma rapidez, pero en sentidos opuestos el CIR se encontrará en el punto medio entre ambas ruedas fijas, causando que el robot gire sobre sí mismo, alrededor de un eje vertical.

Un robot móvil diferencial es uno de los tipos más básicos pero más utilizados de RMR; esto se debe en gran medida a que el robot ocupa un área muy pequeña en comparación con otros tipos de RMR, y a que puede girar sobre su propio eje vertical, como ya se mencionó. Además de las dos ruedas fijas coaxiales, es común que un robot diferencial cuente con una tercera rueda, del tipo orientable descentrada; esta rueda no está actuada y solamente sirve como punto de apoyo, así que es común despreciarla en el modelo cinemático.

La figura 3 muestra el diagrama cinemático de un RMR diferencial. En la figura, las coordenadas (x, y) dan la posición del punto P (que se supone en el punto medio entre las ruedas fijas) con respecto al marco de referencia fijo (inercial) $\Sigma_o(X_o, Y_o)$. Por otra parte, el marco $\Sigma_m(X_m, Y_m)$ está unido al robot, tiene como origen el punto P y su eje X_m apunta hacia el frente del robot, de modo que el ángulo θ da la orientación con respecto al marco Σ_o . Los parámetros r y L corresponden al radio de las ruedas y a la distancia entre el punto P y cada una de las ruedas, respectivamente.

En un RMR diferencial generalmente se considera que las señales de entrada, las cuales producen el movimiento, son las rapidezces angulares (es decir, las magnitudes de las velocidades angulares) en las dos ruedas actuadas. Si φ_i y φ_d son los desplazamientos angulares de la rueda izquierda y derecha, respectivamente, entonces $\omega_i = \dot{\varphi}_i$ y $\omega_d = \dot{\varphi}_d$ serían las señales de entrada al robot. Cada una de estas rapidezces

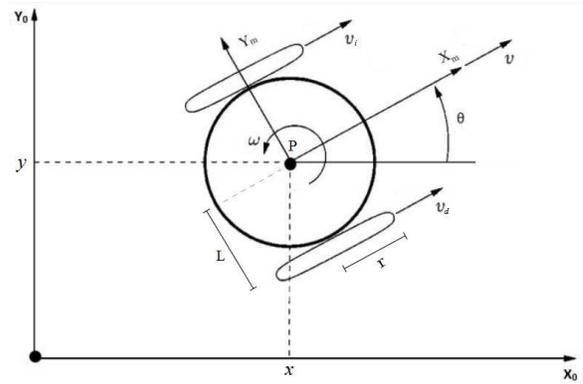


Fig. 3. Diagrama cinemático de un RMR tipo diferencial

angulares producen una velocidad lineal de avance en el punto de contacto entre la rueda y el piso; estas velocidades son representadas en la figura por los vectores v_i y v_r , y se verifica que su magnitudes están dadas por

$$v_i = r\omega_i, \quad v_d = r\omega_d \quad (1)$$

Se le llama *uniciclo* a todo vehículo que utiliza una sola rueda para moverse sobre el piso. Teóricamente, el uniciclo requiere de dos entradas: la rapidez lineal v en la dirección de la rueda, y la rapidez angular sobre el eje vertical ω , que permite generar un cambio de dirección. Y dado que la mayoría de los algoritmos de planificación de movimiento entregan una rapidez lineal y una rapidez angular, es conveniente trabajar con un modelo que emplee este tipo de entradas al sistema.

Afortunadamente, en el caso del robot diferencial, la transformación de las rapidezces lineales de avance de las ruedas a la rapidez lineal y angular del robot se obtiene fácilmente usando las siguientes expresiones:

$$v = \frac{v_d + v_i}{2}, \quad \omega = \frac{v_d - v_i}{2L} \quad (2)$$

Una vez hecha esta transformación de velocidades, el robot diferencial puede ser visto como un uniciclo (y por eso también se le conoce como *robot móvil tipo uniciclo*). Estas v y ω son las magnitudes de los vectores \mathbf{v} y $\boldsymbol{\omega}$, que pasan por el punto P y apuntan en la dirección de avance y de rotación del robot (ver figura 3).

El *modelo cinemático directo de velocidad* (MCDV) de un RMR permite obtener la variación de las variables que dan la postura del robot (es decir, \dot{x} , \dot{y} y $\dot{\theta}$) en términos de las señales de entrada al robot. Si esas señales de entrada son v y ω , entonces el MCDV para el robot uniciclo (o tipo uniciclo) es [6]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (3)$$

o, si se usan la transformaciones (2) y (1), se llega al MCDV en el que las entradas son ω_i y ω_d .

Más información sobre el modelado cinemático de los RMR en general, y en particular del robot diferencial, puede encontrarse, e.g., en [5] y [6].

IV. EL ROBOT MÓVIL CREATE 2

El robot Create 2 es un RMR desarrollado por iRobot; su chasis tiene una forma cilíndrica (ver figura 1) y cuenta con dos ruedas fijas coaxiales actuadas, con un encoder en cada una ellas, y una rueda orientable descentrada (o rueda loca) por lo que se trata de un RMR diferencial. En la tabla I se presentan algunas de sus características más relevantes.

TABLA I
ESPECIFICACIONES DEL ROBOT CREATE 2

Descripción	Valor	Unidad
Diámetro exterior	0.340	m
Altura	0.092	m
Peso	3.58	kg
Distancia entre las ruedas	0.235	m
Diámetro de las ruedas	0.072	m
Resolución del encoder	508.8	pulsos / rev

Para controlar el Create 2, iRobot desarrolló una interfaz de software conocida como *Roomba Open Interface* (OI). Esta interfaz contiene comandos que permiten manipular el comportamiento del robot a través del envío de paquetes de datos por el puerto serie. En la OI existen comandos para cambiar el modo de operación, enviar señales a los actuadores y leer información de los sensores, entre otros.

Para usar OI, un procesador capaz de generar comandos byte por byte a través del puerto serie, como una PC o un microcontrolador, debe ser conectado al conector Mini-DIN externo en el robot. Este conector proporciona una comunicación bidireccional por el puerto serie (USB) entre el robot y el procesador (o computadora de control).

Más información sobre el Create 2, y en particular de los comandos de la interfaz OI, se encuentra en la referencia [7].

A. Funciones para Matlab

Con el fin de simplificar el uso de los comandos de la interfaz OI, se ha desarrollado (ver referencia [8]) una caja de herramientas de Matlab (probada en la versión 2015a) que contiene una serie de funciones que básicamente encapsulan los comandos de la OI.

A continuación se explican brevemente algunas de estas funciones, las cuales fueron utilizadas en la interfaz para planificación de tareas que se describe en la sección siguiente.

- $[serPort]=RoombaInit(my_COM,mode)$
Inicializa la comunicación via puerto serie con el robot; my_COM es el número de puerto de comunicación (el cual normalmente se puede revisar en el Manejador de Dispositivos de Windows); $mode$ es un argumento opcional que indica si el robot será utilizado en modo seguro ($mode = 'safe'$) o en modo completo ($mode = 'full'$), donde se deshabilitan todas las funciones de seguridad del robot. La función regresa un objeto de puerto serie, el cual debe ser pasado como parámetro a cualquier otra función de la caja de herramientas.
- $[LeftCounts, RightCounts] = EncoderSensor(serPort)$
Lee los codificadores ópticos (encoders) de cada rueda del robot. La función regresa la cuenta del encoder en

la rueda izquierda (*LeftCounts*) y de la rueda derecha (*RightCounts*). La resolución de los encoders es 508.8 cuentas por revolución; al almacenarse en un entero de dos bytes, la cuenta se reinicia al excederse ± 32767 .

- $SetFwdVelAngVelRoomba(serPort, FwdVel, AngVel)$
Establece las velocidades lineal (de avance) y angular del robot. $FwdVel$ se da en metros por segundo y debe estar en el rango $[-0.5,0.5]$; $AngVel$ está en radianes por segundo y si es negativo el robot rota en sentido horario.
- $SetFwdVelRadiusRoomba(serPort, FwdVel, Radius)$
Mueve el robot estableciendo la velocidad lineal y el radio del círculo sobre el CIR. $FwdVel$ se da en metros por segundo y debe estar en el rango $[-0.5,0.5]$; $Radius$ en metros, dentro del rango $[-2,2]$, con los siguientes casos especiales: avance en línea recta ($Radius = inf$), rotación sobre sí mismo en sentido horario ($Radius = -eps$) y en sentido antihorario ($Radius = eps$).
- $SetWheelVelRoomba(serPort, rWheelVel, lWheelVel)$
Especifica la velocidad lineal de la rueda derecha ($rWheelVel$) y de la rueda izquierda ($lWheelVel$), las cuales deben estar en el rango $[-0.5,0.5]$; una velocidad negativa hace girar la rueda correspondiente hacia atrás.

V. INTERFAZ DESARROLLADA

En esta sección se describe la interfaz que está siendo desarrollada para la planificación de tareas en el robot móvil Create 2. En principio, se considera que esa interfaz está compuesta por tres módulos o subsistemas:

- Módulo de simulación.
- Módulo de visión.
- Módulo de planificación.

En las subsecciones siguientes se describen brevemente cada uno de estos módulos.

A. Módulo de simulación

Este módulo consiste básicamente en una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) para la simulación del movimiento del robot, empleando el modelo cinemático de velocidad descrito en la sección III. La figura 4 muestra la última versión de la GUI, desarrollada empleando la herramienta GUIDE de Matlab.

Como se puede apreciar en la figura 4, la GUI contiene una imagen que muestra el área de trabajo del robot (que se considera un cuadrado de 3×3 metros), en donde se pueden colocar arbitrariamente, empleando las cajas de texto del lado derecho, hasta tres obstáculos circulares, además del centro del área de trabajo (que se considera también un obstáculo). Las cajas de texto en la parte de abajo se usan para definir las posturas inicial y final del robot.

La GUI cuenta además con una sección con botones para simular el movimiento del robot de manera manual dentro de su área de trabajo. Los cuatro botones permiten los movimientos de rotación en sentido horario y antihorario, así como el desplazamiento hacia adelante y hacia atrás.

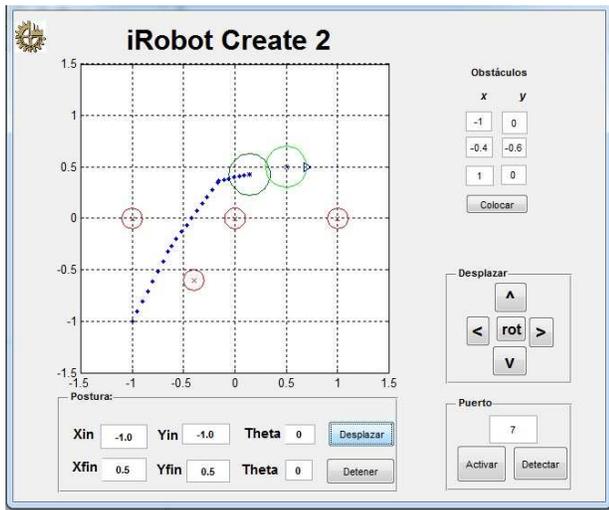


Fig. 4. Interfaz gráfica para simulación del movimiento

B. Módulo de visión

Con la finalidad de dotar al robot Create 2 de una mayor funcionalidad, se decidió acoplarle en la parte superior un sensor Kinect de Xbox 360; este sensor cuenta con una cámara RGB, con una resolución de hasta 640×480 píxeles y un campo de visión de 57° en horizontal y 43° en vertical; además cuenta con un sensor de profundidad que permite distinguir objetos en el rango de 1.2 a 3.5 metros.

El software empleado para utilizar el Kinect requiere la instalación de algunos paquetes de desarrollo (Kinect SDK, Kinect for Windows runtime y Open NI Windows); para más información sobre esto ver la documentación de Matlab. Además, para realizar la adquisición y el procesamiento de las imágenes obtenidas con la cámara de Kinect, se utilizan las cajas de herramientas correspondientes de Matlab 2015a.

El objetivo del módulo de visión es utilizar la cámara RGB del Kinect para encontrar la ubicación de un grupo de obstáculos puntuales (esferas de unicel), de color uniforme, colocados arbitrariamente dentro del espacio de trabajo del robot. Además se requiere ubicar el centro del espacio (otra esfera de unicel) que ha sido pintado con los tres colores primarios, de manera que se pueda determinar la posición relativa del robot con respecto a ese centro.

Para esto, considérese el siguiente procedimiento general:

- 1) Se toman diferentes imágenes de los objetos (el centro y los obstáculos) en el espacio de trabajo, a diferentes distancias y ángulos conocidos, generando una base de datos de imágenes;
- 2) Luego se aplican algoritmos de procesamiento de imágenes para identificar los diferentes colores de los objetos y estimar la distancia y la orientación de los mismos en cada una de las imágenes en la base de datos;
- 3) Finalmente, la información obtenida en el paso anterior se emplea para interpolar distancias y ángulos obtenidos desde puntos diferentes a los de la base de datos.

Al ejecutar una tarea de localización, lo que primero que hace el robot es girar sobre sí mismo 360° y tomar varias imágenes, que luego son procesadas para tratar de identificar los objetos en el espacio de trabajo (el centro y los obstáculos). Si después de realizar este primer escaneo se encuentra el total de obstáculos el algoritmo termina, si no (es decir si sólo se ven algunos objetos porque los faltantes quedan detrás de ellos), entonces el robot se mueve a nueva posición (la cual puede ser determinada empleando diferentes criterios) donde vuelve a hacer un escaneo. Esto continúa hasta que queda determinada la ubicación de todos los objetos.

Se podría decir que este módulo permite resolver, empleando visión, un caso simplificado del problema de SLAM que se mencionó en la sección II-A.

C. Módulo de planificación

Una vez que el robot ha determinado su ubicación y la de los demás objetos dentro del espacio de trabajo, se entra al módulo de planificación, el cual tiene como objetivo llevar al robot desde su postura inicial hasta una postura final dada por el usuario.

Existen varios algoritmos que permiten resolver el problema de planificación de trayectorias con evasión de obstáculos. El método que actualmente se emplea considera sólo desplazamientos lineales y angulares a velocidad constante (de modo que el robot avanza siempre en línea recta), aunque se tiene contemplado en el futuro implementar algún algoritmo de interpolación polinómica como el descrito en [9], que emplea curvas tipo *spline*.

La evasión de los obstáculos se resuelve actualmente empleando un algoritmo de búsqueda exhaustiva que determina la ruta con la distancia total más corta. Sin embargo, se pretende en el futuro implementar un algoritmo más inteligente, que haga uso de funciones recursivas.

VI. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Para evaluar el desempeño de la interfaz descrita en la sección V al resolver un problema real, se realizaron experimentos con el robot Create 2 de nuestro laboratorio. En la figura 5 se muestra una fotografía de este robot con el sensor Kinect en primer plano, mientras que al fondo se aprecia la laptop empleada como computadora de control; se trata de una computadora con un procesador Pentium N3710 a 1.60 GHz, ejecutando Windows 10 de 64 bits y Matlab 2015a.

Como espacio de trabajo se acondicionó un área cuadrada de 3×3 metros con piso de neopreno y se tapizó con paredes de color blanco. Se colocaron ahí cuatro esferas de unicel; una de ellas, pintada con los tres colores primarios indica el centro del cuadrado; las otras tres, pintadas cada una con un color secundario (cian, magenta y amarillo) representan obstáculos que se colocan arbitrariamente en el espacio de trabajo.

La figura 6 muestra la configuración inicial del espacio de trabajo para el experimento que aquí se reporta. La tabla II presenta las coordenadas reales (medidas visualmente), así como las estimadas empleando el módulo de visión (ver sección V-B), del robot y de los tres obstáculos.



Fig. 5. Robot Create 2, con el sensor Kinect y la computadora de control.

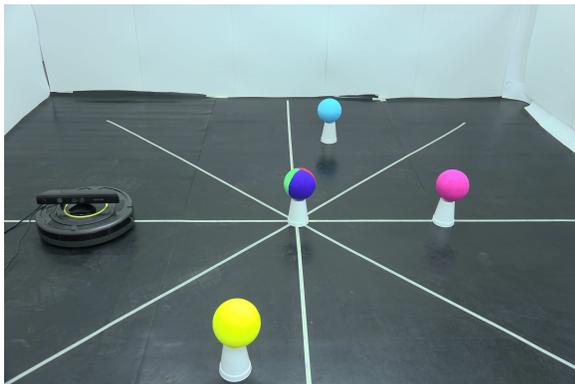


Fig. 6. Configuración inicial del espacio de trabajo para experimentación.

TABLA II
COORDENADAS REALES Y ESTIMADAS DE LOS OBJETOS EN EL EXPERIMENTO

Posición	Robot	Cian	Magenta	Amarillo
Real	(-0.8, 0.0)	(0.1, 0.7)	(0.6, 0.0)	(-0.2, -0.7)
Estimada	(-0.85, 0.03)	(0.07, 0.83)	(0.57, 0.04)	(-0.18, -0.75)

Nótese que debido a que desde la posición inicial el robot no es capaz de ver el obstáculo magenta, se mueve a una segunda posición desde donde hace un segundo escaneo, y cómo desde ahí ya se pueden ver los cuatro objetos es desde esta ubicación que se estiman las coordenadas de los obstáculos y se inicia la ejecución del módulo de planificación. A partir de ahí, el objetivo es llevar al robot a una configuración deseada, en este caso dada por (0.8,0.7), evadiendo los obstáculos.

La figura 7, muestra la traza seguida por el robot al ejecutar en forma consecutiva los programas correspondientes al módulo de visión y al módulo de planificación, desde la configuración inicial. Para obtener esa traza se almacenaron las cuentas de los encoders de las ruedas y el tiempo después de cada movimiento realizado por el robot, a partir de éstas se estimó la posición (x, y) del robot empleando un procedimiento estándar de odometría.

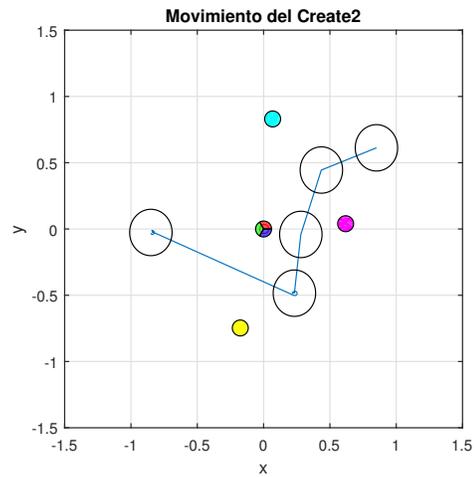


Fig. 7. Trazo del movimiento realizado por el robot durante el experimento

VII. CONCLUSION

En este documento se describe el avance que hasta la fecha se tiene en el desarrollo de una interfaz de software para la planificación de tareas de movimiento en el robot móvil Create 2. Después de repasar los conceptos sobre modelado cinemático y planificación de tareas en los RMR, se procede a describir la interfaz desarrollada. Al final se presentan los resultados obtenidos al ejecutar desde la interfaz los algoritmos para localización, planificación de trayectorias y evasión de obstáculos. Los resultados son satisfactorios, pero se pretende seguir trabajando para mejorar los algoritmos utilizados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado parcialmente por el CONACyT y el TecNM. El tercer autor quiere agradecer a Alfredo Delgado por su colaboración en la preparación de los experimentos.

REFERENCIAS

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer, 2009.
- [2] iRobot, "iRobot Create 2 Programmable Robot", web page (in <http://www.irobot.com/About-iRobot/STEM/Create-2.aspx>)
- [3] S. Koenig, "Creating a uniform framework for task and motion planning: A case for incremental heuristic search", in *Proc. of the 20th International Conference on Automated Planning and Scheduling (Workshop: Combining Action and Motion Planning)*, Toronto, Canada, May 2010.
- [4] G. Dudek and M. Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*, Cambridge University Press, 2010.
- [5] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, MIT Press, 2011.
- [6] C. Canudas de Wit, B. Siciliano, and G. Bastin (Eds.), *Theory of Robot Control*, Springer, 1997.
- [7] iRobot, "iRobot Create 2 Open Interface (OI) Specification based on the iRobot Roomba 600", online document (in https://www.usna.edu/Users/weapsys/esposito_files/roomba.matlab/MTIC2/Create2_Open_Interface_AUG_15_2015.pdf), 2015.
- [8] J. M. Esposito, "Matlab Toolbox for iRobot Create 2", online document (in https://www.usna.edu/Users/weapsys/esposito/_files/roomba.matlab/MTIC2/Matlab_Toolbox_iRobot_Create2_doc_V8_15_15.pdf), 2015.
- [9] D. Woo, R. Campa, F. García, "Generación de trayectorias usando interpolación polinómica para un prototipo de máquina CNC". Memorias del *Primer Congreso Nacional de Robótica*. León, Gto., agosto 1996.

Determining Artificial Neural Network Architecture for Directioning a Four-Wheeled Vehicle with a BCI

Marving O. Aguilar-Justo, Martín Montes Rivera, Alberto Barrera Martínez, Tania A. Ramirez-delreal, Araceli Gárate-García

Universidad Politécnica de Aguascalientes
Aguascalientes, México

{marving.aguilar, martin.montes, tania.aglae, araceli.garate}@upa.edu.mx
albertobmz@gmail.com

Abstract— A brain computer interface (BCI) is a device that measures brain activity in a person and with proper processing can be applied for controlling different devices, allowing external communication without the assistance of peripheral nerves or muscle activity. This helps people with severe motor disabilities, or people who wish to perform actions simultaneously supported with this type of interface. In this research, a BCI is implemented using the Emotiv EPOC device, which allows to measure electrical potentials in specific brain areas. These signals are processed in the LabVIEW NI platform, and later classified using an Artificial Neural Network (ANN), designed using MATLAB™. This paper, is focused in determine which is the better ANN architecture and training algorithm, when classifying three direction instructions, turn right, turn left, and neutral, expressed with the Wavelet Transform coefficients obtained from the electrical brain signals.

Keywords— Brain computer interface, Artificial Neuronal Networks, Discrete Wavelet Transform, Robot Prototype, Data Acquisition.

I. INTRODUCTION

Recent advances in sensors have let the acquisition of diverse physical variables; some of these with voltages in ranges of micro volts, like those required to detect the human brain activity [1] [2].

A brain-computer interface (BCI) is a device that helps people with a deficient motor system, because allows an external communication based on the electrical brain activity, without utilizing the peripheral nervous system. A BCI is a new way of human-machine interaction. With this, users can use their thoughts to manipulate several devices [3]. The development of BCIs has been used by the scientific community for driving autonomous vehicles, either for people with different abilities or people who require specific activities with this type of systems.

A block diagram of a usual BCI is presented in Fig. 1, where its stages can be observed.

Thanks to technological advances, new low-cost devices that show electrical activity in the cerebral cortex

This research was supported by the Master of Science in Engineering at Universidad Politécnica de Aguascalientes (UPA) and by the FOMIX program (AGS-2012-C01-198467) given to the UPA in 2016 by means of CONACYT. We are thankful to the Federal Government due to creation and execution of this type of programs.

(electroencephalographs, EEGs) have appeared on the market, making attractive the use of brain signals acquired from a person, such as devices developed by NeuroSky, Emotiv (Fig. 2, left), BCINet, among others [4].

The Emotiv EPOC electroencephalograph (EEG) allows to obtain brain signals for implementing a BCI. This device has a high resolution that allows to measure microvolt ranges. It consists of 14 sensors (Fig. 2, right), which record the electrical activity originated in the scalp. The resulting data is transmitted wirelessly to a receiving unit connected to a standard computer.

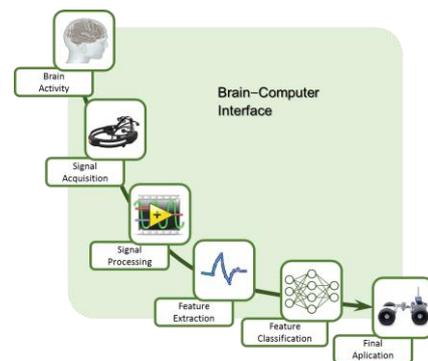


Fig. 1. Block diagram of a BCI.



Fig. 2. Emotiv EPOC EEG (<https://emotiv.com>) (left); sensors location in the Emotiv EPOC EEG (right).

In the acquisition and processing stages, which can be observed in Fig. 1, is captured the neurological phenomenon that reflects the intentions of a user, which requires the use of electrodes for acquiring brain electrical signals, which are amplified, filtered and digitized.

The step after the acquisition of signals through a BCI and the treatment of them is the extraction of their features. This is the most critical stage in the processing of the electroencephalography, as it directly determines both the performance and the accuracy of the classification algorithm to use; there are several criteria that can be implemented when carrying out this extraction process [5].

The most common methods for the extraction feature, are autoregressive parameters, Fast Fourier Transform (FFT), the average-time-window signal, independent component analysis, the Discrete Wavelet Transform (DWT), among others [5].

Wavelets are oscillating functions of space or time that can be defined as a short duration pulse with finite energy integrating at zero and allow simultaneous analysis of time and frequency [6].

The Wavelet transform, employs waves to separate the data into frequency components and later, each component can be studied with the appropriate resolution for its scale [6].

DWT is used to analyze spectral and temporal properties of non-stationary signals [7]. An application of the DWT capabilities, is the signal characteristics extraction from an EEG for classifying them according to their frequencies [8].

After characterizing the brain measured signals and identifying its corresponding instruction, the control actions required by their specific application should be generated [9]. The accuracy of the classification algorithm, determines if the correct control action is applied or not.

The correct classification of a recorded signal with the EEG will be determined by the appropriate choice of the parameters that characterize that signal, by the effectiveness of the classification algorithms and by the ability of the subject to produce or control those characteristics. If the subject is not clear on how he will produce an action, which will be based on his mental state and how he will manipulate it, the classification algorithms will not be able to associate the signal parameters to the wanted mental states and the BCI does not will produce favorable results [10].

Classification stage in a BCI use the extracted features for identifying the corresponding direction instruction.

In this paper is used DWT for the feature extraction stage and Artificial Neural Networks (ANN) as classifier algorithm for the classification stage.

An Artificial Neural Network (ANN) is a nonlinear classifier that emulates the learning ability of the nervous system, i.e. ANNs learn to identify a pattern with the values of a set of variables (inputs) and the dependent states on those values (outputs) [10].

The main advantage of working with ANN is the ability to solve a given task based on previous training or experience, which is known as adaptive learning [11].

II. STATE OF THE ART

BCIs have been studied for several decades. Their final applications are diverse, and there are several variations in the used techniques. The following works can be highlighted: [12], [13] and [14] use BCI for motor imagery tasks, such as those related to the movement of a cursor or other objects on a computer screen; in the first case, the steady-state visual evoked potential (SSVEP) is evaluated. On the other hand, in [5] and [15] the methods of EEG signal processing are studied specifically for applications corresponding to communication and control, in those works the techniques of Fast Fourier Transform, Adaptive Autoregressive Parameters and Spectral Signal Energy are compare as extraction feature methods. In the field of biometrics, there is research using the initial stages of BCI as shown in [16] and [17]. In the first case, a mobile biometric authentication system is developed using an EEG, which is based on the exploration and identification of characteristics extraction and classification techniques. Several studies to control electronic objects in intelligent homes can be found in [18], [19] and [20]. [18] reported the achievement of a BCI that reaches an effectiveness of up to 81% in people with disabilities controlling diverse electronic equipment (curtains, lamps, television, and coffee maker) in a home prototype.

About applications of a BCI in vehicles or robots, there are three works that can be highlighted. [21] shows the functionality of the use of electromyography (EMG) using the Emotiv EPOC EEG that detects the electrical activity from the cerebral cortex, to allow agricultural tractors driving. Here, the BCI relied on the detection of four muscular events: eyes that look to the right and the jaw open, the eyes looking to the right and the jaw closed, eyes that look to the left and the jaw open, and eyes that look to the left and the jaw closed. Another work to be highlighted is the presented in [22], which addresses the design and implementation of a system established in an EEG that sends instructions to a telepresence system, which executes actions to provide the user with the possibility of having representation in remote environments through a mobile robot with Internet access. Another important work in the field of robotics is that presented in [23], which consists of a mobile robot powered by a BCI with SSVEP, which is feedback by video; in this work, it is achieved an accuracy of 93% (following a predefined route).

III. DEVELOPMENT

A. Brain Activity

The direction instruction given to the vehicle prototype is through the thought of a person, that is, through a cognitive process. For this research work, all tests were taken only from one person, who will henceforth be defined as the user.

Instructions for changing the direction of the four-wheeled vehicle are 3: right, left and neutral. The BCI design work control the vehicle DC motors, by receiving 3 instructions, which require 3 different types of thinking obtained from the user brain signals. For this purpose, the direction of the vehicle is achieved in the following way:

- 1) For right-hand direction, the user must think in a predefined right arrow picture.

- 2) For left-hand direction, the user must think in a predefined left arrow picture.
- 3) For neutral addressing, the user must think in something different from the predefined right or left picture arrows.

B. Data acquisition

The electroencephalograph that was used in this study is the Emotiv EPOC, because its price since there are devices with higher resolution for medical proposes but considerably more expensive. It has 14 sensors, but only 6 were used, marked as F3, F4, AF3, AF4, FC5 and FC6 in the Fig. 2 (right), which are placed in the temporal lobe of any person, where major electrical activity is generated due to cognitive processes.

Wirelessly electrical signals captured by the Emotiv EPOC EEG are sent to a receiver connected to a computer via USB. This computer requires NI LabVIEW™, since the vehicle prototype routing instructions are generated with a NI MyRIO device.

For the acquisition of signals, a program based on LabVIEW Emotiv Toolkit V2 was developed, so that could receive the raw signals coming from the Emotiv EPOC EEG. The development of this program allows to achieve the independence of the software Emotiv, maximizing the BCI flexibility for modifying the BCI stages. Once the user brain signals are acquired in LabVIEW, the following process is generated:

1. The image generation program is executed in LabVIEW, while the user observes with high concentration. The images are displayed 90 times, corresponding to 30 right arrow, 30 left arrow and 30 empty images.
2. Signals from the sensors of interest in the Emotiv EPOC EEG are acquired.
3. Each sensor signal is stored for 3 seconds (in the case of the right and left arrows, 0.5 seconds before they appear, and 2.5 seconds after they appear).
4. A database is constructed, with the recorded information of each of the signals.

With this in mind, the memory arrays in equations (1) to (6) are created for storing the EPOC sensors data.

$$\mathbf{SI1}_i = \mathbf{AF3}_i = [AF3_{1i} \quad AF3_{2i} \quad \dots \quad AF3_{ni}] \quad (1)$$

$$\mathbf{SD1}_i = \mathbf{AF4}_i = [AF4_{1i} \quad AF4_{2i} \quad \dots \quad AF4_{ni}] \quad (2)$$

$$\mathbf{SI2}_i = \mathbf{F3}_i = [F3_{1i} \quad F3_{2i} \quad \dots \quad F3_{ni}] \quad (3)$$

$$\mathbf{SD2}_i = \mathbf{F4}_i = [F4_{1i} \quad F4_{2i} \quad \dots \quad F4_{ni}] \quad (4)$$

$$\mathbf{SI3}_i = \mathbf{FC5}_i = [FC5_{1i} \quad FC5_{2i} \quad \dots \quad FC5_{ni}] \quad (5)$$

$$\mathbf{SD3}_i = \mathbf{FC6}_i = [FC6_{1i} \quad FC6_{2i} \quad \dots \quad FC6_{ni}] \quad (6)$$

In these vectors, $\mathbf{SI1}_i$ contains the n magnitudes of the acquired signal in the AF3 sensor (left-sensor of the sensors pair 1) for the register i ; $\mathbf{SD1}_i$ contains the n magnitudes of the acquired

signal in the AF4 sensor (right-sensor of the sensors pair 1) for the register i ; $\mathbf{SI2}_i$, $\mathbf{SD2}_i$, $\mathbf{SI3}_i$, $\mathbf{SD3}_i$ are similar to $\mathbf{SI1}_i$ and $\mathbf{SD1}_i$, but using F3, F4, FC5 and FC6 sensors; n is the number samples obtained from the Emotiv EPOC EEG, which are 320 (106.67 samples per second), corresponding to 3 seconds per register; i is the generated register number, with a span from 1 to 90.

C. Features Extraction

Signals of brain activity in a human have similar shape to the wavelet functions. Due to this, the features extraction stage is based on calculating some data that are distinctive of the wavelet functions, making use of the DWT, by means of the following steps:

1. Once the user generates a stimulus, the acquisition system has 6 recorded signals, belonging to each of the 6 sensors of the Emotiv EPOC EEG.
2. The DWT of each signal is obtained, resulting in the reconstruction coefficients of each of the signals. This is done by using the "dwt" function of MATLAB™, applied with Daubechies Wavelets family as sampling kernel with 4 levels of decomposition, like is shown in equations (7) to (10) for the left sensor 1.

$$\mathbf{W}_1\mathbf{SI1}_i = DWT(\mathbf{SI1}_i) \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_2\mathbf{SI1}_i = DWT(\mathbf{W}_1\mathbf{SI1}_i) \quad (8)$$

$$\mathbf{W}_3\mathbf{SI1}_i = DWT(\mathbf{W}_2\mathbf{SI1}_i) \quad (9)$$

$$\mathbf{W}_4\mathbf{SI1}_i = DWT(\mathbf{W}_3\mathbf{SI1}_i) \quad (10)$$

where $\mathbf{W}_1\mathbf{SI1}_i$ contains the 160 magnitudes of the approximation coefficients of the DWT (level 1 of decomposition) of the acquired signal from the AF3 sensor in the register i . $\mathbf{W}_2\mathbf{SI1}_i$, $\mathbf{W}_3\mathbf{SI1}_i$, $\mathbf{W}_4\mathbf{SI1}_i$ are like $\mathbf{W}_1\mathbf{SI1}_i$, but with 80, 40 and 20 magnitudes, respectively (and as a consequence, they have a level 2, 3 and 4 of decomposition, respectively).

3. With this, the matrices in equations (11) to (13) can be constructed with the data of the three pairs of sensors in register i (DWT decomposition level 4), each with dimension (2x20).

$$\mathbf{W}_4\mathbf{S1}_i = [\mathbf{W}_4\mathbf{SI1}_i \quad \mathbf{W}_4\mathbf{SD1}_i] \quad (11)$$

$$\mathbf{W}_4\mathbf{S2}_i = [\mathbf{W}_4\mathbf{SI2}_i \quad \mathbf{W}_4\mathbf{SD2}_i] \quad (12)$$

$$\mathbf{W}_4\mathbf{S3}_i = [\mathbf{W}_4\mathbf{SI3}_i \quad \mathbf{W}_4\mathbf{SD3}_i] \quad (13)$$

D. Features Classification

Part of the BCI design is to determine when is better to use information from only 1 pair of sensors (and which of 3 pairs), 2 pairs of sensors (and which of 3 possible combinations), or 3 pairs of sensors, to achieve a successfully detection. The arrays for storing right, left and neutral outputs are expressed in equations (14) to (16), respectively.

$$\mathbf{ID} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{II} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{IN} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Where only one of them can be given by time.

For the design of the feature classification, 7 ANNs are developed, where each of them corresponds to each one of the configurations of sensors that can be used.

In each of the 7 ANNs a variation of the number of hidden layers (from 1 to 10 layers) is generated, and in addition, in each of these 10 configurations 5 different training methods are used. In every case, the performance of both, the ANN and the training time are analyzed.

The number of neurons in each hidden layer of each configuration of the ANN is equal to the number of existing layers. There are sigmoidal activation functions (equation (17)) in input and hidden layers, linear activation functions (equation (18)) in output neurons and 1000 training epochs are used.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (17)$$

$$f(x) = x \quad (18)$$

To identify the different ANNs, the following nomenclature is defined:

The 7 combinations of sensors used in the ANNs different configurations are following: F3-F4 sensors (A), F7-F8 sensors (B), FC5-FC6 sensors (C), F3-F4-FC5-FC6 sensors (D), F3-F4-F7-F8 sensors (E), F7-F8-FC5-FC6 sensors (F) and F3-F4-F7-F8-FC5-FC6 sensors (G).

The training methods used are based on MATLAB™ functions and give rise to the 5 different ANNs, this are: Bayesian regularization backpropagation (trainbr), scaled conjugate gradient backpropagation (trainscg), batch training with weight and bias learning rules (trainb), cyclical order weight/bias training (trainc) and random order weight/bias training (trainr).

E. Final Application

The final application of the BCI is implemented in a prototype vehicle, which is a small-scale land vehicle with 4 wheels powered by DC motors, which are controlled with a power circuit commanded using the coming signals from a NI MyDAQ data acquisition card. Left, right, or neutral directions are processed in a laptop plugged to the signal receiver from the Emotiv EPOC EEG.

IV. RESULTTS

A. Offline Tests

The results corresponding to the different ANN configurations tested (which are 7, depending on the sensors to be used) are shown in this section.

Configurations of the ANN are tested with the obtained direction signals using the EPOC device. These tests are called offline because not all stages of the BCI are in execution, but only the ANN, since the used training signals are previously acquired and stored using NI LabVIEW™ platform.

With the use of the 7 sensor configurations were tested 5 training algorithms available in MATLAB™ for supervised learning ANNs to determine which of these, is the most suitable for the system.

Essentially, the results were compared in terms of their training performance percentage i.e. the percentage of successfully classified training inputs.

The best performance achieved with the proposed method was exhibited with 6 hidden layers using *trainb* and its training time for complete 1000 epochs was 12 seconds, like is shown in Table I.

TABLE I. ANN PERCENTAGE EFFECTIVENESS PERFORMANCE (P) TRAINING TIME IN SECONDS (T), AGAINST DIFFERENT NUMBERS OF HIDDEN LAYERS AND TRAINING ALGORITHMS.

Hidden Layers	Training Algorithms									
	trainbr		trainscg		trainb		trainc		trainr	
	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T
4	17	46	47	0.5	76	12	47	1009	47	833
5	17	60	46	0.2	79	11	46	681	46	834
6	17	71	47	0.2	81	12	47	682	46	833
7	17	75	47	0.1	78	14	46	723	46	834
8	17	78	47	0.2	79	12	51	748	46	835
9	17	84	47	0.2	78	12	47	757	46	837
10	17	97	47	0.2	70	13	46	764	46	857

Since *trainb* obtained the best performance method for 6 hidden layers, it was selected for classification stage of the BCI.

In addition, confusion matrices of MATLAB™ show a statistical probe of the offline results. In these matrices are represented the performance evaluation of ANNs according to the total input registers [24].

Confusion matrices contain the results of comparing different signals that are provided as input (thoughts) to the different output possibilities (classified control orders). The main diagonal in this matrix contain the percentage and frequency of all the correctly classified inputs.

The confusion matrix of the combination of sensors A described in section III is shown in Fig. 3. In this work, the confusion matrix is based on the number of entities recorded from the brain activity of the user in the Thoughts Register (TR). TR with 300 entities is tested in the trained ANN with

trainb and in each case, is recorded whether the ANN input corresponds to the ANN output or not.

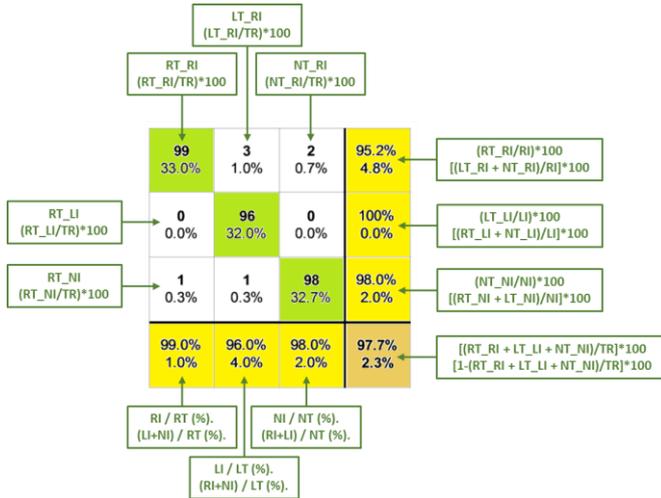


Fig. 3. Confusion matrix of the combination of sensors A (offline tests).

In cell (1,1) is displayed RT_RI, which is the frequency of right-direction instructions achieved when right-direction thoughts are introduced to the ANN; later, it is shown the percentage of RT_RI considering the TR total entities.

In cell (1,2) is displayed LT_RI, which is the frequency of left-direction instructions achieved when right-direction thoughts are introduced to the ANN; later, it is shown the percentage of RT_RI considering the TR total entities.

In cell (1,3) is displayed NT_RI, which is the frequency of neutral-direction instructions achieved when right-direction thoughts are introduced to the ANN; later, it is shown the percentage of RT_RI considering the TR total entities.

Similarly, in cells (2, x) and (3, x) with x = 1,2,3 are shown the classified outputs when left and neutral input thoughts are introduced respectively.

In cell (4,4) is displayed the percentage of the total correct instructions with respect to the total number of registers (TR); later, it is shown the complement of the percentage which is the percentage of the wrong classified inputs.

Like with combination of sensors A, the confusion matrices for the other 6 sensors using *trainb* were developed. Fig. 4 shows the concentration of cell (4.4) results of all the confusion matrices.

As shown in Fig. 4, the results of all the proposed configurations are above 97% of identification hits with the tested signals, it can be highlighted that the configuration of sensors G (using the 6 sensors) presents 100% of correctly identified signals.

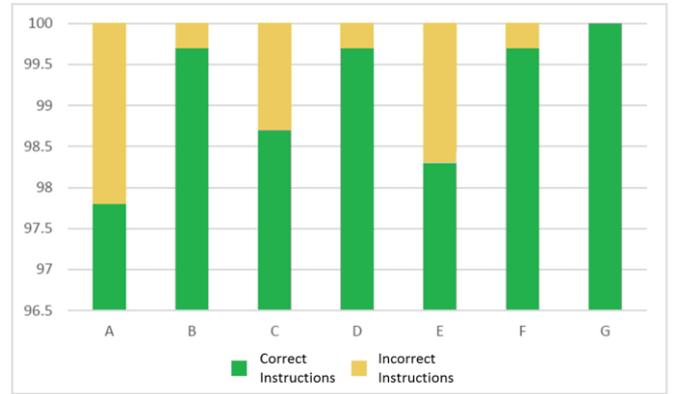


Fig. 4. Right and wrong results for all the combination of sensors (offline tests).

V. CONCLUSIONS

In this research, the possibility of implementing BCI with feature extraction and classification stages using Wavelet Transform and ANN rather than Emotiv software (but acquiring brain signals with the Emotiv EPOC EEG device) for later implementation in a four-wheeled mobile robot, was proposed and successfully implemented with offline tests using the feature extraction with Wavelet Transform and ANN architecture proposed in this work.

There is no other way for determining which ANN architecture is better for a specific problem, that testing several architectures and training algorithms like was applied in this work. After following this process, the best results were obtained using F3 and F4 sensors corresponding to A configuration and using ANN architecture with 6 hidden layers and 6 neurons per layer and batch training with weight and bias learning rules algorithm (*trainb*), with sigmoidal activation functions in neurons of the input and hidden layers, and linear activation functions in the output neurons, like was described in section III.

The idea that motivates the research work was to drive a vehicle using a BCI and the standard of distribution of sensors for the cognitive process, i.e. process signals obtained from the thoughts of a user.

It was found that activity produced with the cognitive process or imagination with intention to perform a movement is easily measured in two points where the Emotiv EPOC EEG does not have sensors, reason for using those sensors in the vicinity, for obtaining favorable results.

In the offline tests is achieved 100% successfully identified signals, nevertheless this only shows that the training algorithm together with the proposed architecture allows classification of thoughts for control directions, but since this are offline results there is required to implement online tests for including new not trained input data.

A. Future work.

Considering the obtained results in the training stage and the offline tests, next step will be to implement our proposed technique using the four-wheeled vehicle and online input data.

REFERENCES

- [1] E. García and G. Gentiletti, "Interfaz cerebro computadora (ICC) basada en el potencial relacionado con eventos P300: análisis del efecto de la dimensión de la matriz de estimulación sobre su desempeño," *Ingeniería Biomédica*, vol. 2, no. 4, pp. 26-33, July/Dec. 2008.
- [2] G. Pereira, J. D'Alotto, I. Sattolo, A. Guerrero, J. Iribarren and J. Ierache, "Control vía Internet de un Robot ubicado en un sitio remoto aplicando una Interfase Cerebro-Máquina," in *XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, La Plata, 2011, pp. 1373-1382.
- [3] A. Kübler and C.R. Müller, "An introduction to brain-computer interfacing," in *Toward brain-computer interfacing*, G. Dornhege et al, The MIT Press, London, England, 2007, pp. 1-26.
- [4] A.L. Stamatto, J. Nunes, L. Cunha de Miranda and E.E. Cunha de Miranda, "Understanding and Proposing a Design Rationale of Digital Games based on Brain-Computer Interface: Results of the AdmiralMind Battleship Study," *SBC Journal on Interactive Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 3-15, 2014.
- [5] S. Cordova, W.A. Perez and A. Román, "Implementación de métodos de procesamiento de señales EEG para aplicaciones de comunicación y control," *ECIPeru*, vol. 10, no. 1, pp. 24-33, Oct. 2013.
- [6] O. A. Mohammed, A. Arshan, A. Mohamed, A. Nejadpak and M.J. Roberts, "A wavelet filtering scheme for noise and vibration reduction in high-frequency signal injection-based sensorless control of PMSM at low speed," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 250-260, Jan. 2012.
- [7] G. Rosas-Cholula, J.M. Ramirez-Cortes, V. Alarcon-Aquino, P. Gomez-Gil, J.J. Rangel-Magdaleno and C. Reyes-Garcia, "Gyroscope-Driven Mouse Pointer with an EMOTIV® EEG Headset and Data Analysis Based on Empirical Mode Decomposition," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10561-10583, Aug. 2013.
- [8] C.E. Valderrama and G. Ulloa "Análisis espectral de parámetros fisiológicos para la detección de emociones" *Sistemas & Telemática*, vol. 10, no. 20, pp. 27-49, Jan./Mar. 2012.
- [9] P.A. Vélez, H. Saldarriaga and H. Loaiza, "Técnicas de clasificación para neuroseñales," *Scientia et Technica*, vol. 3, no. 46, pp. 153-156, Dec. 2010.
- [10] C.N. Enríquez, "Estudio de técnicas de análisis y clasificación de señales EEG en el contexto de sistemas BCI (Brain Computer Interface)", M.S. thesis, Dept. Informatics Eng., Autonomous Univ. of Madrid, Madrid, Spain, 2004.
- [11] W. Peña, "Detección de puntas epilépticas en señales EEG usando wavelets y redes neuronales," M.S. thesis, School of Sciences and Humanities, EAFIT Univ., Medellín, Colombia, 2013.
- [12] S. Wang, E.T. Esfahani and V. Sundararajan, "Evaluation of SSVEP as passive feedback for improving the performance of brain machine interfaces," in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, pp. 695-701.
- [13] D. Coyle, J. Garcia, A.R. Satti and T.M. McGinnity, "EEG-based continuous control of a game using a 3 channel motor imagery BCI: BCI game," in *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB)*, Paris, pp. 695-701.
- [14] H.J. Hwang, K. Kwon, C.H. Im, "Neurofeedback-based motor imagery training for brain-computer interface (BCI)," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 179, no. 1, pp. 150-156, Apr. 2009.
- [15] J.V. Gadekar, A.S. Hiwale, "A smart phone based BCI for secret remote communication using wireless sensor network," in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, Visakhapatnam, pp. 1-4.
- [16] J. Klonovs and C. Kjeldgaard, "Development of a mobile EEG-based feature extraction and classification system for biometric authentication," M.S. thesis, Aalborg Univ. Copenhagen, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [17] I. Jayarathne, M. Cohen and S. Amarakeerthi, "BrainID: Development of an EEG-based biometric authentication system," in *2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, Vancouver, pp. 1-6.
- [18] N. Kosmyna, F. Tarpin-Bernard, N. Bonnefond and B. Rivet, "Feasibility of BCI Control in a Realistic Smart Home Environment," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 10, no. 416, pp. 1-10, Aug. 2016.
- [19] R. Carabalona, F. Grossi, A. Tessadri, A. Caracciolo, P. Castiglioni and I. de Munari, "Home smart home: brain-computer interface control for real smart home environments categories and subject descriptors," in *Proceedings of the 4th International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology*, Shanghai, 2010, pp. 7-10.
- [20] G. Edlinger, C. Holzner and C. Guger, "A hybrid brain-computer interface for smart home control," in *Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction: Interaction Techniques and Environments*, Orlando, 2011, pp. 417-426.
- [21] J. Gomez-Gil, I. San-Jose-Gonzalez, L.F. Nicolas-Alonso and S. Alonso-Garcia, "Steering a tractor by means of an EMG-based human-machine interface," *Sensors*, vol. 11, no. 7, pp. 7110-7126, Jul. 2011.
- [22] C. Escolano, J.M. Antelis, J. Minguez, "A telepresence mobile robot controlled with a noninvasive brain-computer interface" *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 42, no. 3, pp. 793-804, Dec. 2014.
- [23] P. Stawicki, F. Gemblar and I. Volosyak, "Driving a Semiautonomous Mobile Robotic Car Controlled by an SSVEP-Based BCI," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2016, pp. 1-14, Jun. 2016, Art. ID 4909685.
- [24] D. Basso, D. Rodríguez, and R. García-Martínez, "Propuesta de métricas para proyectos de explotación de información," in *XIX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, Mar del Plata, 2013, pp. 1-10.

Study of Stepper Motor Performance in a Cartesian Robot with chaotic injections

Humberto Velasco-Arellano, Felipe de Jesús Becerra-Woo, Jorge Augusto Chávez-Noriega, Marving Omar Aguilar-Justo, Araceli Gárate-García

Postgraduate and Research Department
Universidad Politécnica de Aguascalientes
Aguascalientes, Ags., Mexico

{mc160006,mc160005,mc160003}@alumnos.upa.edu.mx, {marving.aguilar, araceli.garate}@upa.edu.mx

Abstract—A stepper motor-driven Cartesian robot manipulator is injected with chaotic signals. The idea is to take advantage of the properties of chaos, which has a fast dynamic behavior, to prove the motor performance with a variable speed.

Keywords— Cartesian Robot, Chaos signal, Lorenz equations, Stepper motors.

I. INTRODUCTION

Robotics is a branch of the engineering with a wide variety of applications as welding, space missions, handling materials and many tasks which are dirty, dull, dangerous or difficult for humans [1].

A manipulator robot is composed of a number of rigid links connected with several joints that can be moved by actuators to get a desired position in the end effector [2]. There exist several kinds of actuators, but the use of stepper motors represents advantage in open-loop operation. Its position can be achieved without shaft position feedback. The shaft can be stopped in any position with a high degree of accuracy [3].

Since the stepper motor can be manipulated without feedback it is not too hard to consider a chaotic input.

Chaos is a field of the mathematics that is used in too many branches of science. Particularly, in robotics research, chaotic signals have been used as a control parameter in manipulator robots [4] – [7].

There exist some works in the literature that inject a chaotic signal to mobile robots with the purpose of covering all the possible trajectories [8] – [11], or to avoid obstacles and getting a simulation behavior at irregular maps in military missions [12] – [13].

In this paper, a Cartesian robot designed with stepper motors is considered as a test bed. The performance analysis of these kind of actuators is done via the injection of chaotic signals in the axis x and y of the robot, modifying their velocity parameter. The goal is to compare the experimental results with simulations to see the capability to draw the given trajectory even if the motors have variable speed.

Some preliminaries to understand this work are given in Section II. The Cartesian robot characteristics are presented in Section III. The methodology to communicate and inject the

chaotic signal is explained in Section IV. Finally, some concluding remarks are stated in Section V.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

This section states definitions as well as the mathematical background considered throughout the paper.

A. Stepper motors

A stepper motor is a special type of synchronous motor, which is designed to rotate a specific number of degrees for every electrical pulse [1]. These motors have many applications in control systems because their precision and repeatability in an open loop control, what makes them very helpful. This kind of electric machine is commonly used to make movements point to point in a constant velocity, and typically try to follow certain positions [14] – [15].

B. Cartesian robot

A manipulator robot is defined as a programmable functional mechanism, with some degrees of freedom, that is capable to manipulate material, pieces, tools and some other devices, following the trajectory given to realize a specific work [16].

The Cartesian robot has three prismatic joints in their morphology, it needs a big space to operate, and it give a precisely position in the end effector [17].

C. Signal sampling

The sampling process is the conversion of a continuous-time into a discrete-time signal by taking samples of the analog signal. These samples are usually equidistant and saved as a vector representing a discrete-time signal [18].

According to the Nyquist Theorem, the sampling rate, which is the number of samples per second, must be at least twice the highest analog frequency component, to recreate the sampling signal [18].

D. Chaos and Lorenz equations

Chaotic systems have high sensitivity to the initial conditions which does not allow to practically determining their future evolution; this fact allows generating a rich class of signals used for communications, remote sensing and a wide variety of signal processing applications [19].

The study of chaos started in 1963 when Edward Lorenz, an american meteorologist, studied the stability of fluid flows in the atmosphere and found the nonlinear autonomous third order system

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= s(-x_1 + x_2), \\ \dot{x}_2 &= r x_1 - x_2 - x_1 x_3, \\ \dot{x}_3 &= -b x_3 + x_1 x_2. \end{aligned} \quad (1)$$

These equations are now commonly referred to as Lorenz equations and they get a chaotic behavior under particular initial conditions, having a global attractor that is a compact. Lorenz found a beautiful way to analyze the dynamics directing the attention in a particular view of the attractor, this signal, represented in Fig. 1, is a phase portrait in two dimensions and it is known as the Lorenz butterfly [19].

Nowadays the chaos theory is able to provide rich and nontrivial information and a real understanding of the dynamics of this class of systems.

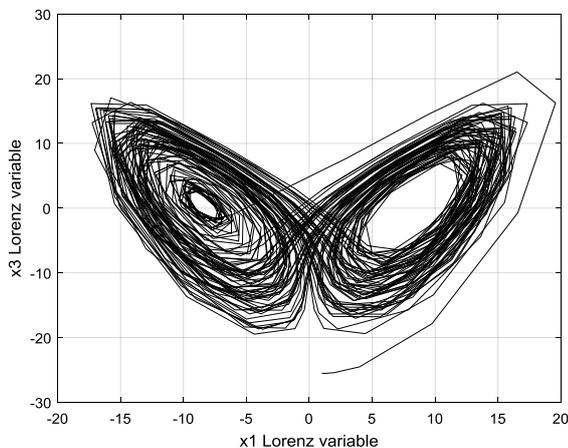


Figure 1. Two dimension Lorenz mapping.

III. EXPERIMENTAL SETUP

The design of the Cartesian robot was created in aluminum. The Fig. 2 shows the robot design in Solid Works; the general assemble is defined by the dimensions and mechanical characteristics.

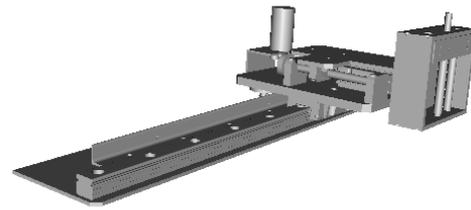


Figure 2. Robot simulation.

The motors used are Nema 23, with a 2.4 N-m rated torque and an angle response of 1.8° by step, which is a high precision. The maximum value given in time is $10000 \mu\text{s}$, which represents the slower speed that the motor will get, and $1000 \mu\text{s}$ express the minimum value, i.e. the fastest speed in the motor. The driver used to control the motors is a pololu driver A4988, it gives the possibility to control the speed between step frequencies from 1 Hz to 50 kHz and to support a current demand of 2 A.

The Arduino ATmega2560 was used to establish the communication between a Matlab GUI and three microcontrollers Arduino ATmega328 which controls each joint. The use of the Arduino platform is because it is a low-cost open-source platform that let us work without restrictions.

The robot has a working space of 8 cm in the y axis, and 20 cm in the x axis. The Fig. 3 shows the robot drawing a random signal. The end effector is a pen that is used to draw.

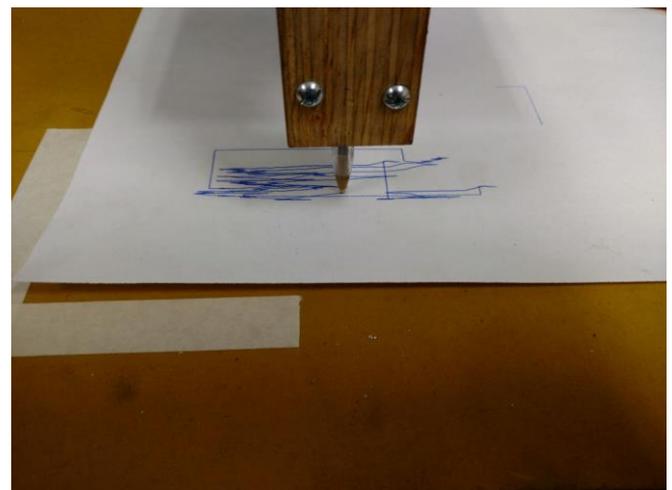


Figure 3. End effector.

IV. METHODOLOGY

The Cartesian robot that is reported in this work was made with the use of stepper motors, which is not common because the control applied is in open loop, avoiding the monitoring of

the error. The test is to induce chaotic signals as velocity coefficients.

The signals are sampled to get discrete instant values. The experiments were done using Matlab® 2015, a sampling time of 1ms and the numerical solver ODE 3 (Bogacki-Shampine). The values are stored in a vector and are sending to the motor using Arduino devices, as is explained in the next section.

A. Hardware communication

The communication is developed using one Arduino ATmega2560 and three Arduinos ATmega328, as is shown in Fig. 4.

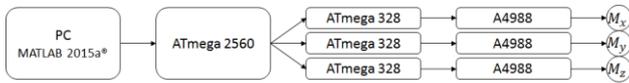


Figure 4. Block diagram communication.

The Arduino ATmega2560 has four serial communication ports, the port zero receives data from the Matlab interface then the device address information to each axis controller. Each controller transforms the streaming data into frequency pulses considering the sign, making possible to change the direction, then the pololu driver A4988 receives them and manage to output the proper sequence for the stepper motor.

The system’s interface is shown in Fig 5. It gives the possibility to choose between all the available ports in the computer to connect the hardware and to assign the baud rate, as well as to plot the motor’s input.

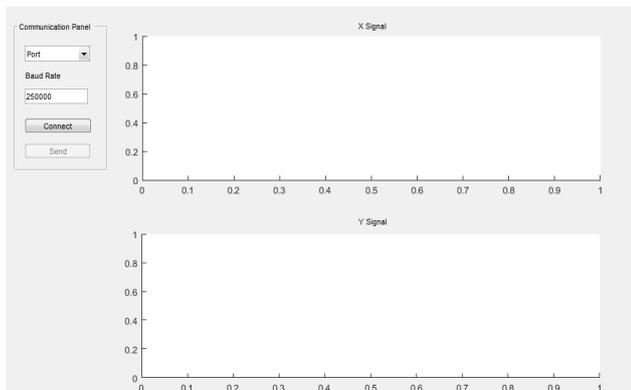


Figure 5. Matlab interface.

B. Signal injection

The considered input was produced with a chaotic signal given by (1) with the parameters $s=10$, $r=28$ and $b=8/3$. These equations were modeled in Simulink; the general block diagram is shown in Fig. 6.

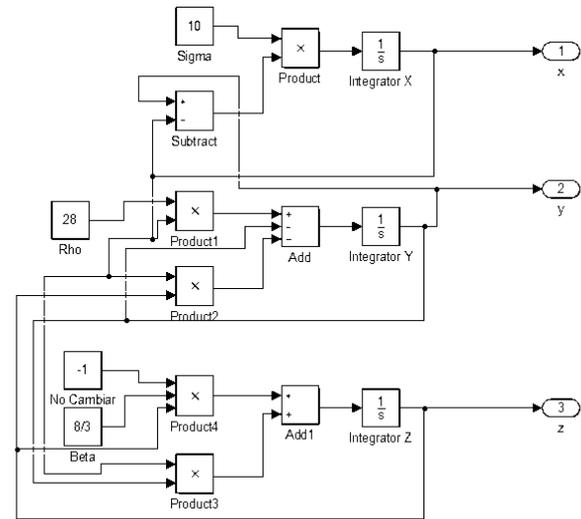


Figure 6. Block diagrams for the Lorenz equations.

Figures 7 and 8 show the signals x_1 and x_3 of the Lorenz equations, which have a chaotic behavior.

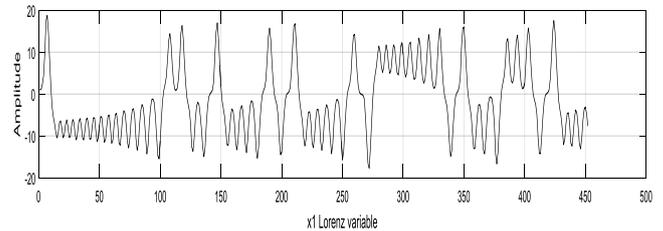


Figure 7. Chaotic signal x_1 .

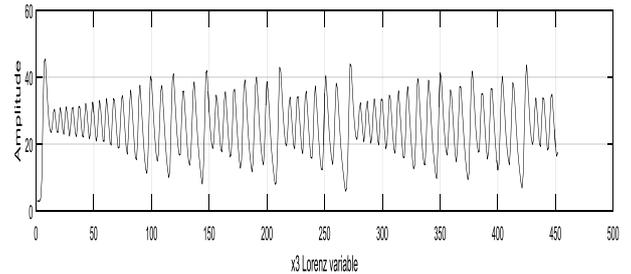


Figure 8. Chaotic signal x_3 .

We select these two signals to illustrate the phase portrait of the x_1 - x_3 , expecting the Lorenz butterfly attractor. Both signals are constructed by 1154 samples that indicate the number of changes that will have the motor when the signal is injected.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

The main results of this work are given in this section. The considered system is a stepper motor-driven Cartesian robot manipulator which is injected with a chaotic signal in each actuator. The idea is to take advantage of chaos properties to prove the motor behavior with a variable speed.

Consider the Lorenz equations (1), the variable x_1 is sent to the x-axis of the Cartesian robot and x_3 to the y-axis. The Fig. 9 shows the signal sent to the x-axis, the signal sent to the y-axis and the phase portrait generated by both chaotic signals.

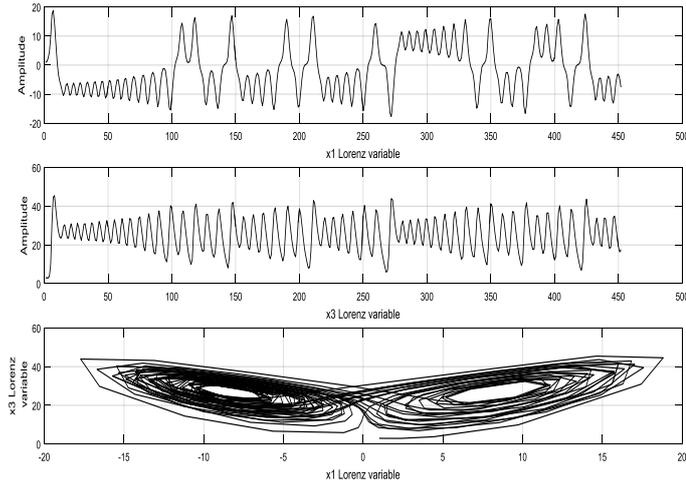


Figure 9. x_1 , x_3 signals and its phase portrait.

The kinematic of the Cartesian robot can be represented by the following equations

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{d}_3, \\ \dot{y} &= -\dot{d}_2, \\ \dot{z} &= \dot{d}_1. \end{aligned} \tag{2}$$

Note that the velocities in the final effector are the same as the signals injected as velocity in each motor, which are the variables x_1 and x_3 of the Lorenz equations. It means that it can be considered that the phase portrait in Fig. 1 describes the motor velocities and naturally the integration of these variables will be the trajectory (position) of the end effector. The simulation of this signal (trajectory) is shown in Fig. 10.

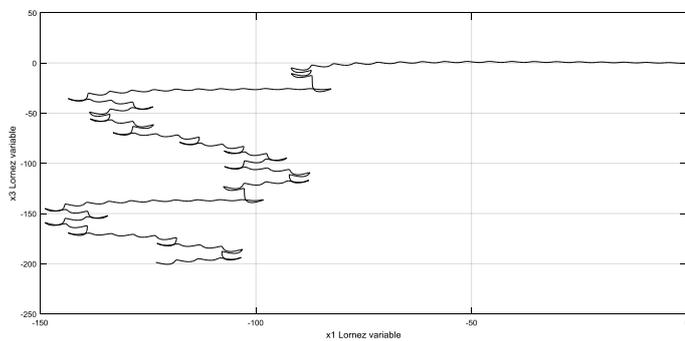


Figure. 10 End effector trajectory.

The Fig. 11 shows the image drawing of the real robot trajectory. It can be seen that is similar to the expected trajectory of the end effector described in Fig. 10. Note that when the chaotic signal is applied, there exist instants with a

zero value in x_1 and x_3 , and as these values are converted into the motor frequency, when it tends to zero there is a pause in the test execution, after that the end effector continue the trace.



Figure 11. Resultant draw.

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The stepper motors used in this work were capable to recreate the integral of the chaotic signal injected as it was shown in the physical experiments. However, it exists a difference produced by a gap error in time with high velocities and the looseness produced by the death zone in motors, mechanical interaction of the end actuator and the transmission mechanism gives restricted precision movements.

This kind of experiments are useful to understand and to compare the behavior of trajectories, movements and physical reaction given by the chaotic inputs in a Cartesian manipulator, which is useful for future implementations in other type of robots.

It is important in future work to prove the results given by other kind of motors like direct current motor in a closed loop or a hybrid stepper motor in open loop to prove and measure the final draw.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the Master of Science in Engineering and the PFCE program given to the Universidad Politécnica de Aguascalientes (UPA) in 2016 and the project FOMIX AGS-2012-01-207544. We are thankful to the Federal Government, IDSCEA and CONACyT due to creation and execution of this type of programs.

REFERENCES

- [1] S. K. Saha, Introducción a la robótica, México D.F.: McGraw-Hill, 2010.
- [2] ISO 8373:1994, "Manipulating industrial robots - vocabulary", Switzerland, 1994.
- [3] J. Reiss, F. Alin, M. Sandler and B. Robert, A Detailed Analysis of the Nonlinear Dynamics of the Electric Step Motor, London: Dept. of Electronic Engineering, Queen Mary, University of London, 2002.
- [4] T. Suzuki, M. Koinuma, Y. Nakamura, "Chaos and Nonhear Control of a Nonholonomic Free-Joint Manipulator", International Conference on Robotics and Automation, pp. 2668-2675, 1996.

- [5] F.B. Duarte and J.A. Tenreiro Machado, "Chaos Dynamics in the Trajectory Control of Redundant Manipulators", International Conference on Robotics & Automation, pp. 4109-4114, 2000.
- [6] Z. Yin. a. X. Ge, "Chaotic Self-motion of a Spatial Redundant Robotic Manipulator", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, vol. 9, n° 3, pp. 993-999, 2011.
- [7] F.B.M. Duarte, J.A. Tenreiro Machado, "Chaotic Phenomena and Fractional-Order Dynamics in the Trajectory Control of Redundant Manipulators", Nonlinear Dynamics, vol. 29, p. 315-342, 2002.
- [8] L.S. Martins-Filho, E.E.N. Macau, R. Rocha, R.F. Machado, L.A. Hirano, "Kinematic control of mobile robots to produce chaotic trajectories", ABCM Symposium Series in Mechatronics, vol. 2, pp. 258-264, 2006.
- [9] L. Martins-Filho, S. R. Figueiredo Machado, R. Rocha, and V. S. Vale. "Commanding mobile robots with chaos." In ABCM Symposium Series in Mechatronics, vol. 1, pp. 40-46. 2004.
- [10] U. Nehmzow, and K. Walker. "The behaviour of a mobile robot is chaotic." AISB journal 1, no. 4, pp. 373-388 (2003).
- [11] Y. Nakamura and A. Sekiguchi. "The chaotic mobile robot." IEEE Transactions on Robotics and Automation 17, no. 6 (2001): 898-904.
- [12] I. Ranó. "The bio-inspired chaotic robot." In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 304-309. IEEE, 2014.
- [13] Ch.K. Volos, N. Doukas, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, and T.G. Kostis. "Chaotic autonomous mobile robot for military missions." In Proceedings of the 17th International Conference on Communications. 2013.
- [14] J.H. Comtois, and V.M. Bright. "Applications for surface-micromachined polysilicon thermal actuators and arrays." Sensors and Actuators A: Physical 58.1, pp. 19-25 (1997).
- [15] M. Bodson, J.N. Chiasson, R.T. Novotnak, R.B. Rekowski "High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor." IEEE Transactions on Control Systems Technology 1.1, pp. 5-14 (1993).
- [16] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, New York: McGraw - Hill, 2005.
- [17] A. O. Baturone, Robótica Manipuladores y robots móviles, Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 2001.
- [18] J. G. Proakis & D. G. Manolakis, Introduction to digital signal processing, Prentice Hall Professional Technical Reference, 1988.
- [19] S. H. Strogatz, Nonlinear Dynamics and Chaos, Perseus Books, 1994.

Detección de Objetos Sobresalientes en Imágenes Digitales Utilizando Cadenas de Markov

Marlon A. Cuevas-Olvera, Rogelio Reyes-Reyes, Clara Cruz-Ramos

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Culhuacán

Maestría en Ingeniería en Seguridad y Tecnologías de la Información

Av. Santa Ana No. 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP. 04430, México, Ciudad de México.

Tel. y Fax (55) 56562058 email: marloncuolvera@hotmail.com, rreyesre@ipn.mx

Resumen- En la actualidad existen distintos algoritmos computacionales que intentan asemejar el comportamiento del Sistema Visual Humano (SVH) y con ello a la detección y delimitación de objetos sobresalientes en imágenes digitales a color. Estos algoritmos han tomado gran relevancia debido a que dichas técnicas realizan la detección de manera automática, esta característica permite su uso en múltiples aplicaciones potenciales como son: navegación autónoma de vehículos no tripulados, técnicas de protección de información mediante marcas de agua, auto-enfoque en cámaras digitales, compresión de imágenes digitales, etc. Este artículo realiza un análisis de una técnica que ha presentado muy buenos resultados comparado con otras técnicas. La propuesta analizada se basa principalmente en el uso de las cadenas de Markov y los Súper-píxeles. Los resultados muestran una detección correcta de los objetos sobresalientes los cuales fueron evaluados mediante una prueba subjetiva *Mean Opinion Score* (MOS) la cual esta basada en métricas cualitativas.

Palabras Clave— Detección de Objetos Sobresalientes, Prominencia, Súper-píxel, Sistema Visual Humano, Atención Visual, Cadenas de Markov.

I. INTRODUCCIÓN

Los humanos tienen la capacidad de detectar visualmente ciertas partes de una imagen digital que son más atractivas para ellos, es decir, existe una captación más fuerte y rápidamente en estas áreas al ser detectadas por el ojo (llamadas regiones u objetos sobresalientes o prominentes). Recientemente este término ha sido ampliamente estudiado en el área de la visión por computadora, debido a que estas regiones contienen información que representa eficientemente toda la escena en la imagen, para con ello poder dar diferentes aplicativos en el campo del procesamiento de imágenes.

La base de estos trabajos fue el modelo de Itti [1], el cual realiza una serie de diferencias para así obtener 3 mapas de prominencia con base a 3 características principales (color, textura y orientación), obteniendo mediante su concatenación un mapa de prominencia final. Los modelos posteriores fueron perfeccionando esta técnica implementando nuevas metodologías, tanto en el procesamiento y manejo de las características de las imágenes, así como en la obtención de sus mapas de prominencia.

II. SISTEMA VISUAL HUMANO

Mediante el Sistema Visual Humano (SVH) podemos saber que el ojo humano funciona gracias a ciertos tipos de células, las cuales permiten la interpretación de una imagen en el cerebro, es decir, el SVH se encarga de convertir las ondas electromagnéticas dentro del espectro visible, las cuales son detecta-

das por el ojo humano, y pasan a convertirse en señales nerviosas, para ser procesadas por el cerebro con base en una serie de parámetros dados por ciertas partes del ojo, dentro de estas partes se encuentran los conos y los bastones. Los conos son células fotorreceptoras de la retina que se encargan de interpretar la visión en colores, mientras que los bastones son los responsables de la visión en condiciones de baja luminosidad [2]. La figura 1 muestra la distribución de estas células en el ojo humano.

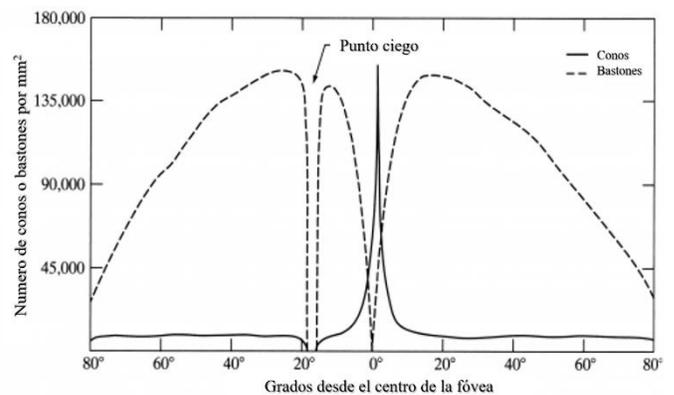


Fig 1. Distribución de conos y bastones en el ojo humano [2].

A. Atención Visual

La atención visual ha sido un problema fundamental en múltiples áreas de investigación, entre las que se encuentran la neurociencia, la psicología, y el procesamiento digital de imágenes. Cabe mencionar que existen varios factores que hacen a la atención visual aún más difícil de simular, como lo es el estado de ánimo de las personas, las condiciones de luminosidad, la combinación de colores y texturas dentro de la escena, etc. [3]. Los estímulos visuales de cada persona son distintos, por lo tanto, realizar un algoritmo computacional que asemeje el comportamiento del Sistema Visual Humano se vuelve una tarea difícil de realizar, debido a que los resultados subjetivos obtenidos podrían variar de acuerdo a la percepción visual de cada persona.

Según Van der Heijden, la Atención Visual se define como un sistema de selección de información dentro del SVH, en el que, aunque todos los estímulos visuales sean totalmente procesados, se produce una selección atencional temprana de la situación que se está visualizando, en función de una serie de parámetros [4].

Debido a que existen ciertas características que son de mayor importancia para el SVH, las imágenes digitales pueden ser manipuladas y procesadas con el fin de encontrar objetos de prominencia. En los últimos años se han desarrollado diferentes algoritmos computacionales los cuales intentan detectar objetos

de prominencia dentro de las imágenes, empleando distintas características.

B. Modelos para la Detección de Objetos Sobresalientes

La detección de un objeto sobresaliente es comúnmente interpretada en el campo de la computación y del procesamiento de imágenes como un proceso que incluye dos etapas: 1) detectar el objeto más sobresaliente y 2) encontrar los límites exactos de ese objeto. Sin embargo, en raras ocasiones los modelos actuales hacen una distinción entre estas dos etapas, ya que la primera etapa no significa necesariamente que un objeto tenga que delimitarse, y la segunda etapa cae en el ámbito de la problemática al momento de realizar el procesamiento de la segmentación y la delimitación del objeto prominente.

Como se puede observar en la figura 2, los trabajos dedicados a la detección de objetos prominentes comparten los siguientes atributos [5]:

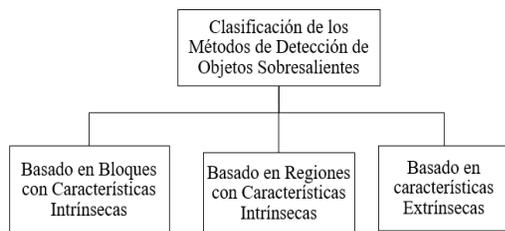


Fig 2. Clasificación de los métodos de Detección de Objetos Sobresalientes

i) Segmentación basada en bloques con características intrínsecas vs segmentación basada en regiones con características extrínsecas.

Dentro de los trabajos existentes, hay principalmente 2 tipos de segmentaciones en las imágenes que hacen uso de características intrínsecas, es decir, utilizan propiedades de la imagen como lo son los colores, las luminosidades, las texturas, etc., los cuales son la segmentación por *bloques* y por *regiones*. Los primeros consisten básicamente en dividir la imagen en una cantidad “*n*” de bloques, para que de esta manera cada bloque pueda ser procesado con base a sus características, haciendo una serie de diferencias entre cada uno de los bloques y así asignarles un valor de prominencia (véase la figura 3 (a)). Mientras que los segundos intentan agrupar regiones de píxeles de acuerdo a propiedades comunes de la imagen, los cuales son llamados comúnmente Súper-píxeles, para posteriormente darles un valor de prominencia (véase la figura 3 (b)).

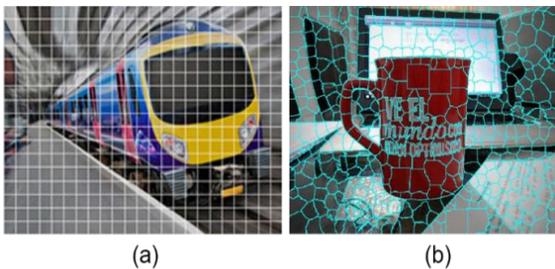


Fig 3. (a) Segmentación basada en bloques y (b) Segmentación basada en regiones.

ii) Modelos con características extrínsecas

Los modelos en el tercer grupo toman en consideración características extrínsecas, es decir, aquellas que provienen de fuera de la imagen a procesar, por ejemplo, se pueden utilizar *imágenes prueba*, las cuales sean comparadas con la imagen

huésped, para así saber si existe un objeto con características parecidas a un objeto comparado. Otro método es utilizar mapas de profundidad.

Algunas técnicas pertenecientes a este tercer grupo se mencionan a continuación:

- Detección de objetos prominentes supervisado [6].
- Detección de objetos prominentes con imágenes similares [7].
- Detección de objetos co-sobresalientes [8].
- Detección de objetos prominentes en video [9].
- Detección de objetos prominentes con profundidad [10].
- Detección de objetos sobresalientes sobre un campo de luz [11].

C. Mapas de Prominencia

La manipulación de las características de las imágenes, empleando los distintos métodos existentes para la detección de objetos sobresalientes, tiene como finalidad una nueva imagen digital a escala de grises, la cual representa a través de tonalidades blancas (valores cercanos a 255 en imágenes de 8 bits de profundidad) las regiones más sobresalientes de la imagen, mientras que las regiones oscuras (valores cercanos a 0 en imágenes de 8 bits) representan aquellas zonas que no lo son. La figura 4 muestra un mapa de prominencia ideal, el cual denota la perfecta delimitación del objeto prominente.



Fig 4. Representación de un mapa de prominencia ideal [12].

D. Cadenas de Markov

De manera conceptual, una cadena de Markov son una serie de eventos que se desarrollan en el tiempo, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior, en otras palabras, este tipo de cadenas guardan en memoria el último evento para después condicionar las posibilidades de los eventos futuros [13].

El principio de la *Detección de objetos sobresalientes mediante las cadenas de Markov* dice que dado un conjunto de estados $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, una cadena de Markov puede ser especificada completamente por una matriz de transición \mathbf{P} de tamaño $m \times m$, en donde p_{ij} es la probabilidad de moverse desde un estado s_i al estado s_j . Esta probabilidad no depende del estado en el que se encuentra la cadena antes del estado actual. La cadena comienza en algún estado y se mueve de un estado a otro sucesivamente.

III. ANÁLISIS DEL ALGORITMO

La figura 5 muestra el diagrama a bloques del modelo de detección de prominencia a través de las cadenas de Markov [14].

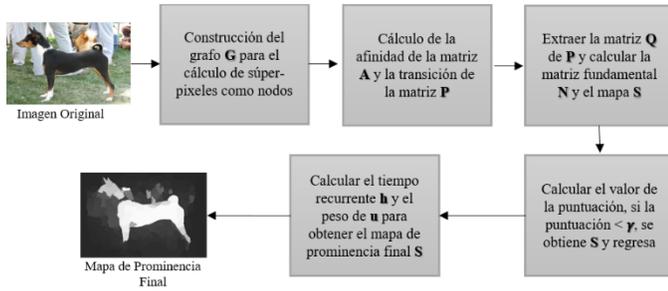


Fig 5. Diagrama a bloques del modelo de detección de la prominencia mediante las cadenas de Markov.

El algoritmo estudiado requiere como entrada una imagen digital y un parámetro k que se refiere al número de súper-píxeles en el cual se segmentará la imagen para posteriormente ser procesada. Una vez dada la imagen y el parámetro k se procede a la construcción de un grafo G , el cual denomina a cada uno de los súper-píxeles como nodos (véase la figura 6).

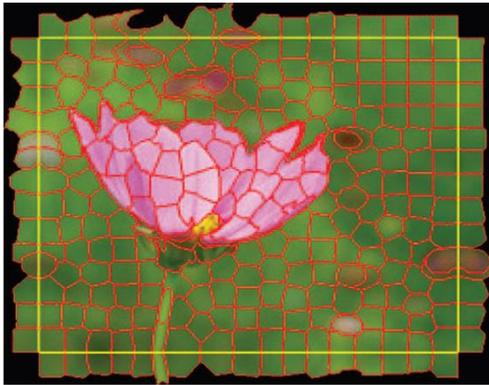


Fig 6. Súper-píxeles como nodos, y creación de nodos de absorción (fuera de la línea amarilla) [14].

Los súper-píxeles que se convierten en nodos son construidos haciendo uso del algoritmo SLIC (Simple Linear Iterative Clustering, por sus siglas en inglés).

Posteriormente se calcula la afinidad de la matriz A mediante (1)

$$f(x) = \begin{cases} w_{ij}, & j \in N(i), 1 \leq i \leq t \\ 1, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{otra} \end{cases} \quad (1)$$

donde w_{ij} es el peso que tiene cada uno de los bordes y es calculado utilizando (2)

$$w_{ij} = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|}{\sigma^2}}. \quad (2)$$

A su vez, se calcula la matriz de transición mediante (3)

$$P = D^{-1} x A \quad (3)$$

El siguiente paso es hacer la extracción de la matriz Q de P , esta extracción se puede calcular a través de (4).

$$P \rightarrow \begin{pmatrix} Q & R \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (4)$$

donde Q son las probabilidades de transición entre cualquier par de estados transitorios, R son las probabilidades de moverse desde cualquier estado transitorio a un estado de absorción, 0 es una matriz de ceros e I es la matriz identidad.

Después se calcula la matriz fundamental con $N = (I - Q)^{-1}$ y el mapa S mediante (5)

$$S(i) = y(i) \quad i = 1, 2, \dots, t \quad (5)$$

donde i indexa los nodos transitorios en el grafo; por otro lado, y es un vector de tiempo absorbido normalizado.

Debido a que para algunas imágenes ciertos nodos cercanos al objeto prominente mantienen niveles de grises intermedios en el mapa de prominencia, es necesario suprimir estos nodos, lo cual se realiza mediante un ajuste en los niveles de prominencia por medio del cálculo del histograma el cual es recuantizado a solo diez niveles de intensidad del mapa de prominencia, como se muestra en (6)

$$score = \sum_{b=1}^{10} g(b) \times \min(b, 11 - b). \quad (6)$$

Posteriormente se realiza el cálculo del tiempo h con (7) y (8), en donde se utiliza la distribución de equilibrio π para la cadena ergódica de Markov a través de la matriz de afinidad A

$$\pi_i = \frac{\sum_j a_{ij}}{\sum_j a_{ij}}, \quad (7)$$

donde i, j indexan todos los nodos transitorios. En (8) i indexa todos los estados en una cadena de Markov ergódica

$$h_i = \frac{1}{\pi_i}. \quad (8)$$

Además, se calcula el peso de u por (9)

$$u_j = \frac{k_j}{\sum_k h_k} \quad (9)$$

dónde j, k indexan todos los nodos transitorios en el grafo.

Finalmente se calcula el mapa de prominencia S haciendo uso de (5) y (10).

$$y_w = N x u \quad (10)$$

dónde u se refiere al tamaño del vector.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

El proceso de la detección de objetos sobresalientes es un término subjetivo, por lo tanto, para poder evaluar los resultados de este algoritmo, se implementaron diversas pruebas subjetivas MOS, las cuales son una medida aritmética que contiene una escala predefinida, donde cada encuestado asigna un valor con base a su opinión y a su percepción [15]. La prueba MOS

fue aplicada a 40 personas de entre 20 y 40 años, haciendo uso de 12 imágenes, de entre las cuales, 5 de ellas son imágenes “benchmark” obtenidas de una base de datos del MIT [16] enfocada a la detección de prominencias en imágenes digitales, y los 7 restantes son imágenes capturadas de manera natural por los autores del presente artículo, utilizando una cámara fotográfica convencional, con una resolución de 3.7 megapíxeles.

La prueba consistió en mostrar al auditorio la imagen original durante un lapso de 5 segundos, inmediatamente después se les mostro el mapa de prominencia obtenido por el sistema analizado; posteriormente el auditorio debía seleccionar alguna de las 5 opciones mostradas en la Tabla 1, las cuales determinan que tan correcta fue la detección del objeto prominente en la imagen con respecto a lo que en la fotografía ellos consideraron el objeto prominente, donde malo se refiere a una nula similitud, pobre a poca similitud, justo a media similitud, bueno que es similar pero no igual y excelente que es exactamente igual.

TABLA 1.- CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA PRUEBA MOS

VALORES DE PRUEBA MOS	
Puntuación	Criterio
5	Excelente
4	Bueno
3	Justo
2	Pobre
1	Malo

Mediante estas pruebas, se pudo observar que los resultados son mejores cuando el fondo en la imagen a analizar contrasta de manera significativa con respecto al objeto prominente, como se puede observar en la figura 6 en la cual el mapa de prominencia obtuvo un promedio de 4.8 en la prueba MOS, lo que es muy cercano a una evaluación excelente.

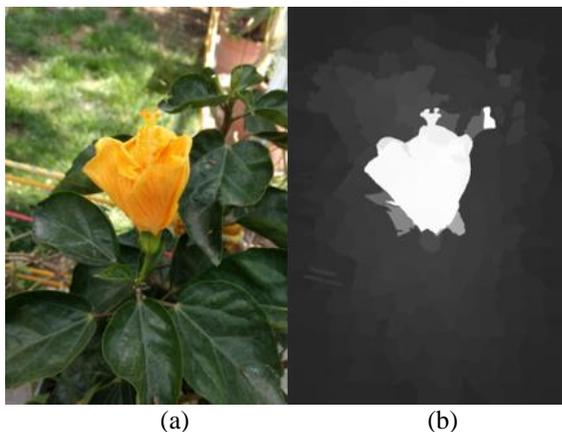


Fig 6. (a) Imagen capturada por los autores; (b) Mapa de Prominencia.

La figura 7 presenta una imagen que pertenece a la base de datos del MIT, en la cual se puede observar que el objeto prominente contrasta notoriamente con el fondo, por lo tanto el sistema reconoce de forma efectiva el objeto prominente, lo cual quedo también demostrado al obtener un promedio de 3.7 acercándolo a una calificación de bueno.



Fig 7. (a) Imagen original; (b) Mapa de Prominencia

Sin embargo, cuando el objeto prominente en la imagen a analizar no contrasta de manera significativa con respecto al fondo, y/o, los colores, las intensidades o las texturas son similares en toda la imagen, la efectividad en los resultados disminuye significativamente, como fue el caso de la figura 8, donde se puede apreciar que existen varias regiones con intensidades similares, y también la mayor parte de la imagen contiene únicamente color verde, por lo que los resultados del sistema disminuyen al no tener un fondo evidente.



Fig 8. (a) Imagen capturada por los autores; (b) Mapa de Prominencia.

El promedio de los valores en la prueba MOS aplicada a la figura 7 fue relativamente baja en comparación con la imagen de la figura 6, ya que obtuvo una puntuación de 3.0, no obstante, esta puntuación no es un indicativo de que el sistema sea ineficiente, ya que para diversas personas resulta difícil determinar de manera rápida cual es el objeto prominente, lo cual quedo demostrado en la prueba MOS, debido a que la mayoría de las personas tuvo que analizar a detalle la imagen en un proceso posterior para determinar el objeto prominente.

Las figuras 9 y 10 corresponden a los logos de la institución, y como se muestra en el mapa de prominencia la detección y delimitación de estos escudos es notoriamente buena. Es importante recalcar que la complejidad de hacer una delimitación de objeto prominente es alta, estas figuras muestran variaciones de colores, intensidades y texturas; sin embargo, obtuvieron buenos resultados en la prueba MOS con promedios de 4.3 y 4.7 respectivamente.



Fig 9. (a) Imagen capturada por los autores; (b) Mapa de Prominencia.

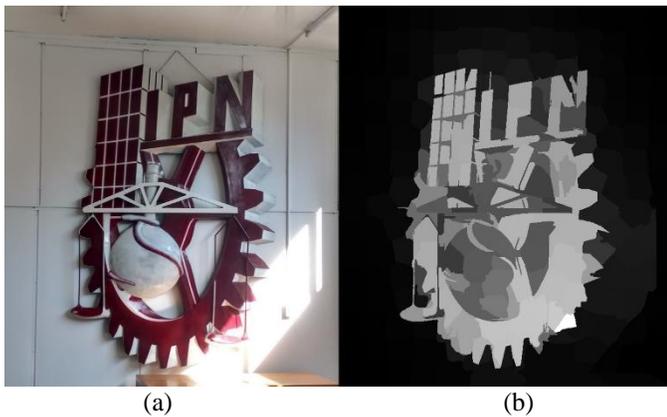


Fig 10. (a) Imagen capturada por los autores; (b) Mapa de Prominencia.

A continuación, en la figura 11 se muestra una gráfica la cual representa los valores obtenidos en la prueba MOS para cada una de las imágenes sometidas al algoritmo.

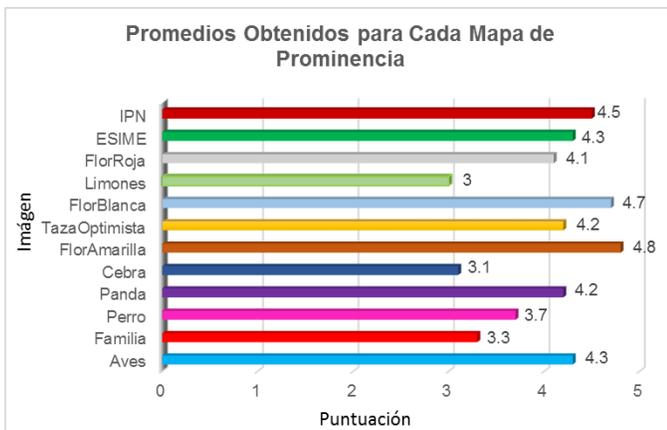


Fig 11. Puntuaciones de la prueba MOS aplicada.

El promedio general obtenido en la puntuación de la prueba MOS para las diferentes imágenes evaluadas fue de 3.94, lo que indica que no importando la variación en las características de la imagen, la mayoría de las veces el sistema detecta correctamente las regiones de prominencia.

El uso de las Cadenas de Markov presentó mejores resultados en la detección de objetos prominentes en imágenes digitales como se puede observar en la figura 12, la cual muestra una comparativa entre los resultados obtenidos para el sistema analizado y otros trabajos existentes en el estado del arte.

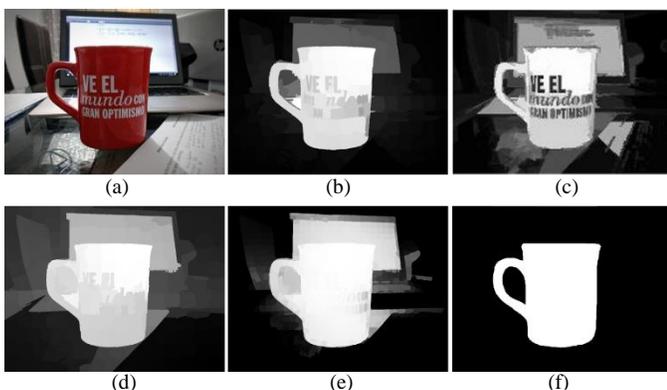


Figura 12. Comparación con otros métodos en el estado del arte. a) Imagen de prueba, b) MC Sistema Analizado [14], c) DRFI [17], d) CHBCP [18], e) RBD [19] y f) Ground Truth

Como se observa en la figura 12, los modelos propuestos en [17], [18] y [19] presentan mayor cantidad de Súper-Píxeles con niveles medios de grises comparado con el sistema analizado, lo que conlleva a una detección y delimitación del objeto prominente menos precisa. De acuerdo a estos resultados podemos determinar que la detección del objeto prominente utilizando las cadenas de Markov tiene mejores resultados.

CONCLUSIONES

El proceso de la atención visual de los humanos es subjetivo, por lo tanto, es difícil el poder unificar los parámetros que todos los seres humanos toman en cuenta durante este proceso. Además, si el proceso de obtener los parámetros con los cuales se pueda encontrar una zona de prominencia es difícil, la delimitación misma del objeto lo vuelve aún más complicado. Sin embargo, mediante los estudios e investigaciones llevados a cabo durante los últimos años, es posible generar modelos que asemejen el comportamiento del ojo humano. Estos modelos se pueden perfeccionar mientras más características de las imágenes sean tomadas en consideración. La implementación de las cadenas de Markov para la detección de objetos sobresalientes obtuvo buenos resultados al someterlo a diversas pruebas. Estas pruebas mostraron que no importando si el objeto prominente contrasta con el fondo de la imagen, y que, además, aunque el objeto prominente se encuentre en cualquier parte de la imagen, el sistema en general da resultados correctos en comparación con el estado del arte.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Itti, L., Koch, C., Niebur, E., A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE TPAMI* 20(11), 1254–1259 (1998).
- [2] http://content.provideocoalition.com/uploads/cookies_and_rods_distrib_in_eye_2_thumb.png
- [3] Curtis, Helena & Schnek, Adriana. *Curtis Biología*. Editorial Panamericana, 2008.
- [4] Munar., Rosselló., Sánchez A., *Atención y Percepción*, Ed. Alianza, 2014, p 132.
- [5] A. Borji, M.-M. Cheng, H. Jiang, and J. Li, “Salient object detection: A survey,” *arXiv preprint arXiv:1411.5878*, 2014.
- [6] T. Liu, J. Sun, N. Zheng, X. Tang, and H.-Y. Shum, “Learning to detect a salient object,” in *CVPR*, 2007, pp. 1–8.
- [7] M.Wang, J. Konrad, P. Ishwar, K. Jing, and H. Rowley, “Image saliency: From intrinsic to extrinsic context,” in *CVPR*, 2011.
- [8] H. Li and K. N. Ngan, “A co-saliency model of image pairs,” *IEEE TIP*, vol. 20, no. 12, pp. 3365–3375, 2011.
- [9] Y. Zhai and M. Shah, “Visual attention detection in video sequences using spatiotemporal cues,” in *ACM Multimedia*, 2006, pp. 815–824.
- [10] C. Lang, T. V. Nguyen, H. Katti, K. Yadati, M. S. Kankanhalli, and S. Yan, “Depth matters: Influence of depth cues on visual saliency,” in *ECCV*, 2012, pp. 101–115.
- [11] N. Li, J. Ye, Y. Ji, H. Ling, and J. Yu, “Saliency detection on light fields,” in *CVPR*, 2014.

- [12] A. Borji, D. N. Sihite, and L. Itti, "Salient object detection: A benchmark," in ECCV, 2012, pp. 414–429.
- [13] http://www.ingenieria.unam.mx/javical/ingsistemas2/Simulacion/Cadenas_de_Markov.htm
- [14] B. Jiang, L. Zhang, H. Lu, C. Yang, and M.-H. Yang, "Saliency detection via absorbing markov chain," in ICCV, 2013.
- [15] Streijl, Robert C., Stefan Winkler, and David S. Hands. "Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives." *Multimedia Systems* 22.2 (2016): 213-227.
- [16] http://saliency.mit.edu/submission_mit300.html
- [17] H. Jiang, J. Wang, Z. Yuan, Y. Wu, N. Zheng, and S. Li, "Salient object detection: A discriminative regional feature integration approach," in IEEE CVPR, 2013.
- [18] Chuan Yang, Lihe Zhang, and Huchuan Lu, "Graph-Regularized Saliency Detection with Convex-Hull-Based Center Prior", IEEE SPL, 2013.
- [19] W. Zhu, S. Liang, Y. Wei, and J. Sun, "Saliency optimization from robust background detection," in CVPR, 2014.

Matching entre puntos similares para medición de deformación laminar

Alejandro Israel Barranco Gutiérrez
Cátedras CONACyT – Instituto Tecnológico de Celaya
Guanajuato, México
israel.barranco@itcelaya.edu.mx

Agustín Ramírez Agundis
Instituto Tecnológico de Celaya
Guanajuato, México
agustin.ramirez@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Padilla Medina
Instituto Tecnológico de Celaya
Guanajuato, México
alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx

Ismael Ruíz López
PEMSA, Celaya
Guanajuato, México
ismael.ruiz@autometal.mx

Abstract—Se presenta una heurística para el emparejamiento de puntos de imágenes estereoscópicas utilizadas para la medición de deformación laminar. Las hojas de metal son estampadas con círculos antes de ser deformadas con un patrón uniforme; por lo que al medir la posición 3D de los puntos se calcula la deformación superficial. El método propuesto toma en cuenta las características del problema para aumentar la eficiencia del emparejamiento de puntos, dicha eficiencia es comparada con la eficiencia arrojada por FLANN.

Keywords—Emparejamiento de puntos; deformación de láminas metálicas; visión estereoscópica por computadora.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la medición de deformación de láminas de metal es un tema ampliamente estudiado, debido a la calidad requerida por las empresas fabricantes de automóviles y aviones; aunque existen avances en las técnicas de visión por computadora alrededor de este problema, continúan los esfuerzos en muchos proyectos de investigación para mejorar los resultados que reflejen mejores soluciones en términos de precisión, velocidad y bajo costo [1] es aquí donde la reconstrucción tridimensional cobra gran importancia. Desde el siglo pasado se ha progresado significativamente en la simulación numérica para investigar el proceso de deformación de láminas como reporta [2, 3]. Aunque, las técnicas de modelado físico han avanzado con relativa lentitud, ahora hay software de procesamiento de imágenes [4] que estima de forma experimental la deformación plana en cada punto de una lámina, de acuerdo con la resolución de un patrón circular estampado sobre la superficie del material antes de ser formado. Muestra de esos avances es evidente en algunos desarrollos realizados por diferentes equipos de trabajo son: El sistema *Argus* de la empresa alemana *GOM*, el sistema *German Auto Grid* de la compañía *Vía Lux*, el *American Grid Analyzer Model 100U* de la *FMTI Systems Inc.*, el *American Target Model, 2D Mode*, el *GPA system* de la empresa *ASAME* y el *XJTUSM* de la Facultad de Ingeniería mecánica de Universidad de *Xi'an Jiaotong* [5, 6].

El procedimiento de estimación de la deformación en este trabajo comienza con el estampado de la lámina de metal (sin deformar) con una matriz de círculos. El grabado de marcas se realiza con un proceso de oxidación del metal para que estas sean invisibles después de que la lámina sea pintada. Posteriormente la lámina es sometida a un proceso de embutido, lo que de manera natural arroja diferentes grados de deformación. Por este hecho, la distancia entre estampillas cambia y con esto se puede medir la deformación, el estado inicial y final respecto al embutido de la lámina es ilustrado en la Fig. 1.

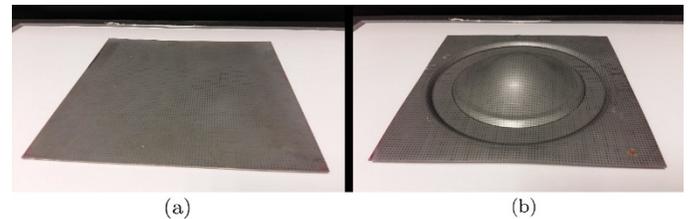


Fig. 1. (a) Lámina con la malla de círculos estampada sobre su superficie. (b) Lámina después de someterla a un proceso de embutido y que todavía conserva el estampado de círculos para hacer la comparación y estimar su deformación en cada punto de la malla.

A. Formado de la lámina de metal

El proceso de formado de láminas de metal implica la obtención de una forma final después de aplicar operaciones elementales como: troquelado, embutido, doblado, extrusión y recorte. Ya sea individualmente o combinados. Particularmente, el proceso de embutido en técnicas de formado de láminas consiste en colocar la lámina de metal sobre un dado y luego presionarlo hacia la cavidad con ayuda de un punzón que tiene la forma en la cual quedará formada la lámina como muestra la Fig. 2. El número de etapas de embutición estriba de la relación que existe entre la magnitud del disco y de las dimensiones de la pieza, de la destreza de embutición, del material y del grosor de la lámina. Es decir,

cuanto más complejas sean las formas y más hondura sea necesaria, el número de fases comprendidas en dicho tratamiento también crece.

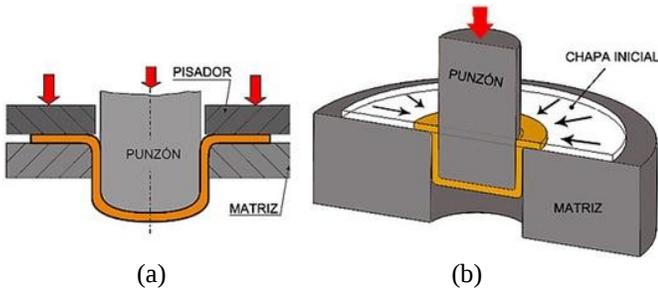


Fig. 2. (a) Vista frontal de un punzón embutiendo una lámina (en color amarillo). (b) Vista isométrica de un punzón embutiendo una lámina (en color amarillo).

Cada una de las fases de formado significa deformar el material sin fracturarlo hasta un momento plano de deformación general plástica. Por esta razón, los principales criterios utilizados para determinar la capacidad de deformación de lámina de metal antes de la fractura se basan en la obtención de los estados de deformación dada por las Curvas límite de deformación (FLC) [7]. Aunque los metales deben ser conformados en la zona plástica del material, es necesario superar el límite de fluencia para que la deformación sea permanente. Por lo cual, el material es sometido a esfuerzos superiores a sus límites elásticos, estos límites se elevan consumiendo así la ductilidad como se ilustra en la Fig. 3.

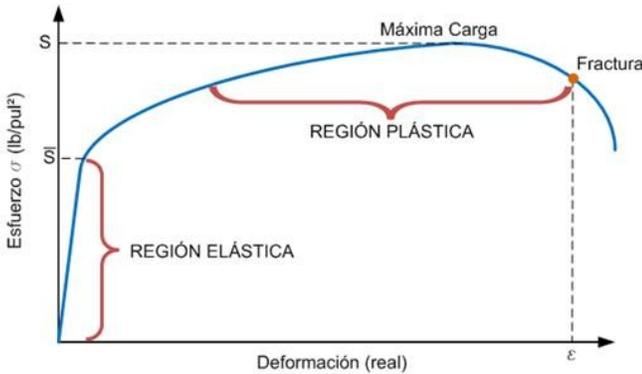


Fig. 3. Curva de deformación típica de metales donde se resaltan las regiones elásticas y de carga.

B. Visión estereoscópica

La visión estereoscópica es una técnica de la visión por computadora que utiliza dos cámaras de video o fotografía para interpretar las escenas capturadas en las imágenes proporcionadas por los dispositivos de video o fotografía. La ventaja natural que presentan este tipo de sistemas es la fácil descripción de los puntos en tres dimensiones (3D) debido a la existencia de la triangulación de puntos. La Fig. 4 muestra la disposición de cámaras en modo estereoscópico [8].

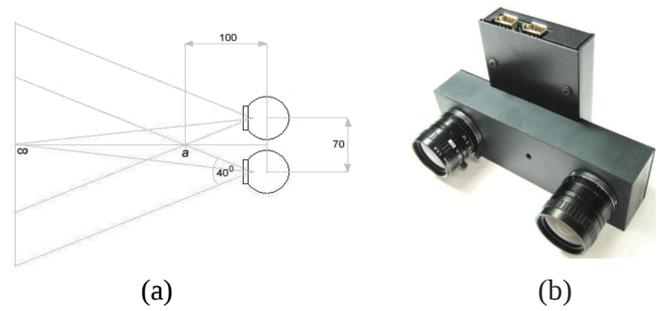


Fig. 4. (a) Muestra como con dos cámaras se puede triangular la posición en tres dimensiones de puntos vistos por ambas cámaras, conociendo la posición de una cámara respecto de la otra. (b) Muestra un sistema de cámaras estereoscópico fabricado especialmente para fines de medición.

Existen varias técnicas para configurar un sistema de visión estereoscópico. La más utilizada es; la que parte de la calibración de cámaras modelando a cada una de estas, con el modelo *PinHole*. Éste modelo parte de la idea que se tiene una caja cerrada con solo un orificio en la parte central de una de sus caras. Por dentro, en la cara posterior de la tapa que tiene el orificio se encuentra una matriz de sensores de luz que captura los rayos que provienen del exterior a la cámara. En la Figura 5. Se muestra la geometría antes mencionada.

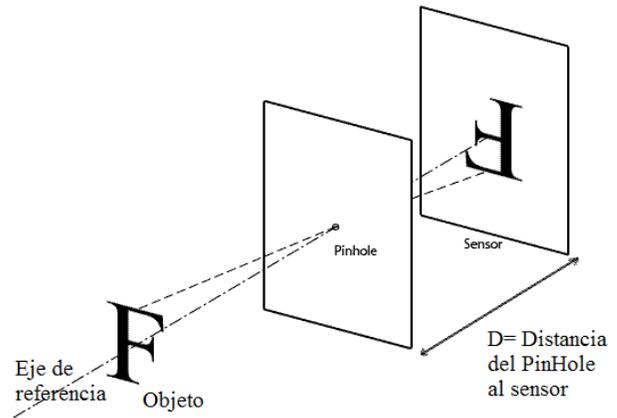


Fig. 5. Geometría del modelo PinHole donde la cámara de video es modelada como una caja con un pequeño orificio y un sensor en la parte posterior de la caja.

Al analizar dicha geometría obtenemos un esquema como el mostrado en la Figura 6. El sistema de referencia O , tiene fijado su origen en el Orificio (PinHole) de la cámara mostrada en la Figura 5. Todos los rayos que provienen del exterior de la cámara pasan por la coordenada $(0, 0, 0)$ del sistema de referencia O . Un punto P de un objeto es proyectado en el plano Π' y es nombrado como P' . El centro del Plano Π' tiene coordenadas C' . f' es la distancia entre el plano XY del sistema de referencia O y el plano Π' ; también llamada distancia focal.

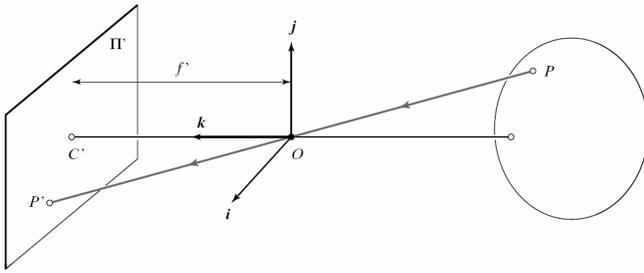


Fig. 6. Sistema de referencia del modelo PinHole montado en el plano donde se encuentra el orificio (PinHole) del sistema.

Este tipo de modelado es llamado proyección en perspectiva, debido a que el punto P del objeto se proyecta en el plano Π' solo con un escalamiento λ que depende directamente de la distancia focal f' y de la distancia entre el objeto y el plano del PinHole descrito en el conjunto de igualdades (1).

Considerando que el punto P del objeto tiene coordenadas (x, y, z) y el punto P' tiene coordenadas (x', y', z') , también que los rayos de luz (o el rayo de luz) PO y OP' son colineales.

$$\begin{cases} x' = sx \\ y' = sy \\ z' = sz \end{cases}, \text{ Debido a que } f' \text{ tiene la misma dirección de } k$$

$$s = \frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z}$$

entonces:

$$\begin{cases} x' = f' \frac{x}{z} \\ y' = f' \frac{y}{z} \end{cases} \quad (1)$$

A la correspondencia entre un punto del espacio y el mismo punto de la fotografía se le puede modelar con una transformación lineal. Existe una transformación rígida de 3D a 2D, que es muy utilizada para analizar este fenómeno propuesta por Fougeras [22], la transformación propuesta por este autor es la que se muestra continuación (2).

$$s \tilde{m} = A [Rt] \tilde{M} \quad (2)$$

donde:

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} : \text{ Es un punto 3D del objeto en coordenadas}$$

homogéneas expresado en metros.

$$\tilde{m} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} : \text{ Es el mismo punto 2D anterior del objeto en}$$

coordenadas homogéneas expresado en píxeles.

s : El escalar definido en la ecuación (1).

[Rt] : Matriz de parámetros extrínsecos de la cámara.

A : Matriz de parámetros intrínsecos de la cámara.

De manera detallada:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & c & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde f_x y f_y tienen unidades expresadas en píxeles / metros, u_0, v_0 en píxeles y c es adimensional.

El punto en coordenadas homogéneas \tilde{M} representa a un punto 3D del objeto en el espacio y este es proyectado en el punto \tilde{m} de la fotografía, en coordenadas de la cámara (2D), como se muestra en la Figura 6. La ecuación (2) modela esta correspondencia. Esta ecuación utiliza 2 matrices muy importantes; la matriz A llamada matriz de parámetros propios de la cámara y la matriz [R t] de parámetros externos de la cámara, específicamente la posición de la cámara con respecto al objeto. Entonces para encontrar el punto de la fotografía que corresponde con el punto del espacio fotografiado se utiliza la ecuación (2) pero ésta puede ser simplificada para utilizar sólo una matriz en lugar de utilizar dos. Este paso se muestra en la ecuación (9).

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & c & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para obtener un sistema estereoscópico calibrado es necesario calibrar a cada una de las cámaras y obtener los parámetros intrínsecos de cada una (A) y conocer el vector de traslación que relaciona la posición y orientación de una cámara respecto de la otra, como muestra la Fig. 7.

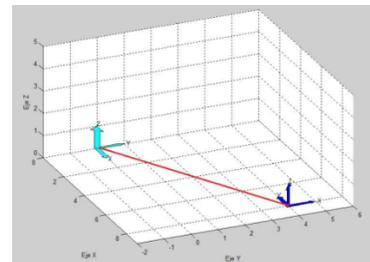


Fig. 7. Vector de posición entre las posiciones de las cámaras y sus

orientaciones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

En cuanto a la configuración del sistema, es importante tener en cuenta que se utiliza un sistema de visión estereo calibrado, montado sobre una estructura metálica que permite el control de iluminación (se utiliza un paño que cubre toda la cabina). La Fig. 8. muestra el arreglo de las cámaras, la fuente de iluminación y la probeta metálica utilizada para probar nuestro método. Para obtener un sistema de visión estereo calibrado, primero cada cámara se calibra independientemente, como lo indican las referencias [9-12]. Así, la matriz de calibración de la cámara proporciona los siguientes coeficientes llamados parámetros intrínsecos: punto focal de la imagen, sesgo de los píxeles, longitud focal de los ejes x e y, y los coeficientes de un polinomio que caracteriza la distorsión radial de las lentes de la cámara. Midiendo 11 datos el proceso de calibración estereo genera como salida un vector que describe la posición de la cámara derecha respecto a la izquierda, este último es la referencia espacial para todo el sistema.

La cámara utilizada es la PosilicaGT con sensibilidad en el rango de 400 nm a 670 nm. Esta cuenta con comunicación ethernet, y una tasa de captura máxima de 33 fps y amplio rango de percepción y resolución de 2750 a 2200 píxeles a 230-250 luxes. La iluminación del sistema se eligió probando con diferentes leds azul, verde y rojo. Del cual se obtuvo un mejor contraste con el LED azul de 640 nm., como muestra la Fig. 8.

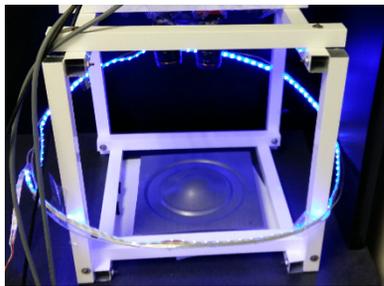


Fig. 8. Prototipo experimental de sistema de medición de deformación laminar con visión estereoscópica.

B. Métodos

En general el método tiene el objetivo de medir la deformación de una lámina de metal formada por un proceso de embutido, que específicamente es desarrollado por la industria automotriz para fabricar carrocerías. El método propuesto utiliza el marco de trabajo utilizado por el software existente para realizar las mediciones antes mencionadas. Las etapas son detalladas a continuación:

1. El primer paso reside en calibrar el sistema de visión estereoscópico.
2. El segundo consiste en estampar la lámina de metal con una matriz de puntos. El estampado utilizado en este método utiliza un proceso de oxidación ligero para que, al pintar la lámina, las marcas sean imperceptibles.
3. El siguiente paso es iluminar la pieza a medir con la iluminación antes mencionada y tomar dos imágenes con el sistema estereoscópico calibrado.
4. Posteriormente se seleccionan dos puntos por cada imagen para guiar al sistema sobre las dimensiones y la localización de puntos de referencia.
5. El software realiza el procesamiento de imágenes y emparejamiento de puntos de la zona deseada.

C. Preprocesamiento digital de imágenes

Con la finalidad de obtener los rasgos deseados de las imágenes se aplican varias etapas de pre-procesamiento digital de imágenes. Inicialmente se aplica una operación de complemento de las imágenes para obtener las marcas circulares más iluminadas que el resto de la lámina. Si consideramos que las imágenes son extraídas de un par de cámaras a color (RGB) con una resolución de $N \times M$ y una resolución de pixel de b bits lo podemos indicar como (5) y (6).

$$I^i(x, y, z) \in \{0 \leq Z \leq 2^b\} \forall \{1 \leq x \leq M\}, \{1 \leq y \leq N\}, \{1 \leq z \leq 3\} \quad (5)$$

$$I^i(x, y, z) \in \{0 \leq Z \leq 2^b\} \forall \{1 \leq x \leq M\}, \{1 \leq y \leq N\}, \{1 \leq z \leq 3\} \quad (6)$$

Por lo que un método simple para convertir la imagen a escala de grises es (7):

$$I_a^s(x, y) = \text{redondeo} \left(\frac{I^s(x, y, 1) + I^s(x, y, 2) + I^s(x, y, 3)}{3} \right) \quad (7)$$

Donde s referencia a la foto derecha o izquierda

El proceso de inversión antes mencionado se indica en (8).

$$C^s(x, y) = 2^b - I_a^s(x, y) \quad (8)$$

Para utilizar el rango de operación de imágenes se normalizan las mismas como indica (9).

$$\hat{c}^s(x, y) = 2^b \frac{C^s - \min(C^s)}{\max(C^s) - \min(C^s)} \quad (9)$$

Una dificultad que se presenta por la naturaleza del problema, es la iluminación no uniforme en la superficie de la lámina. Se utiliza un filtro adaptivo de ventana promedio, donde el tamaño de la ventana es 3 veces la media de los radios de las marcas circulares. El filtro se indica en (10) y (11).

$$SM^s(x, y) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \hat{c}^s(k, l) \frac{1}{(3r)^2} J_{3r, 3r}^s(x-k, y-l) \quad (10)$$

$$SI^s(x, y) = \hat{c}^s(x, y) - k * SM^s(x, y) \quad (11)$$

A partir de las imágenes ya compensadas, se aplica una umbralización con el método de Otsu para obtener una versión binarizada $B^s(x, y)$ de $SI^s(x, y)$.

El siguiente paso consiste en etiquetar a los elementos de la imagen binarizada $O_i^s(x, y) = \text{labeling}(B^s(x, y))$. Donde cada *blob* es independiente $O_i^s \cap O_j^s \in \emptyset \quad \forall j \neq i$ para $i, j = 1, 2, \dots, \ln$. Sin embargo es común que manchas pequeñas no representativas aparezcan en ese conjunto de blobs encontrados $O_i^s(x, y)$. Por lo que se aplica un filtro de área (12):

$$L_i^s(x, y) = \{O_i^s(x, y) \quad \forall \text{area}[O_i^s(x, y)] < a^s\} \quad (12)$$

D. Búsqueda de círculos

El sistema de búsqueda de marcas circulares, tiene una etapa de inicialización, donde manualmente se seleccionan dos círculos continuos de la misma fila, con el objetivo de que el sistema conozca las dimensiones del problema y la orientación inicial de búsqueda. En la imagen izquierda damos click sobre

los puntos \hat{c}_0^i, y_0^i y \hat{c}_1^i, y_1^i , mientras que en la

imagen derecha en puntos (x_0^i, y_0^i) y (x_1^i, y_1^i) . Para trabajar con valores discretos redondeamos los valores de cada punto en cada imagen (13) y (14).

$$\tilde{x}_i^s = \text{round}(x_i^s) \quad (13)$$

$$\tilde{y}_i^s = \text{round}(y_i^s) \quad (14)$$

A partir de las coordenadas redondeadas proporcionadas por el usuario, el número blob es recuperado para proporcionar

las coordenadas del centroide, también redondeado; como un índice de la imagen etiquetada (15).

$$nb_i^s = L^s(\tilde{x}_i^s, \tilde{y}_i^s) \quad (15)$$

Después de esto, el centroide de blob C se calcula usando los momentos estadísticos para 2 dimensiones.

$$C_i^s = (xc_i^s, yc_i^s) = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (16)$$

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l x^p y^q BO^s(x, y) \quad (17)$$

$$BO^s(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } L^s(x, y) = nb_i^s \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (18)$$

Para iniciar un proceso iterativo automático de estimación de posición 2D de blobs, se calculan la distancia y la pendiente entre dos centroides (19) y (20) para tener una condición inicial y estimar la posición del siguiente blob en el lado derecho yc_1^s, yc_0^s, xc_1^s y xc_0^s .

$$\tilde{d}_t^s = \sqrt{(yc_t^s - yc_{t-1}^s)^2 + (xc_t^s - xc_{t-1}^s)^2} \quad (19)$$

$$\tilde{m}_t^s = \frac{(yc_t^s - yc_{t-1}^s)}{(xc_t^s - xc_{t-1}^s)}$$

Para $t = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$(20)$$

a partir de (19) y (20) se estima la pseudo-fila de marcas utilizando (21) y (22)

$$\tilde{xc}_t^s = \tilde{xc}_{t-1}^s + \tilde{d}_{t-1}^s \cos(\tilde{m}_{t-1}^s) \quad (21)$$

$$\tilde{yc}_t^s = \tilde{yc}_{t-1}^s + \tilde{d}_{t-1}^s \sin(\tilde{m}_{t-1}^s) \quad (22)$$

Mientras que para encontrar la siguiente fila usamos (23) y (24).

$$\tilde{xc}_t^s = \tilde{xc}_{t-1}^s + \tilde{d}_{t-1}^s \cos(\tilde{m}_{t-1}^s + \pi/2) \quad (23)$$

$$\tilde{yc}_t^s = \tilde{yc}_{t-1}^s + \tilde{d}_{t-1}^s \sin(\tilde{m}_{t-1}^s + \pi/2) \quad (24)$$

III. RESULTADOS

Los resultados del estudio se pueden ver en la Fig. 9 y la Fig. 10. En primer lugar, se ilustra el resultado del proceso cuasi-automático de detección de puntos. El tamaño de la ventana de búsqueda en ambas direcciones es de 13 puntos, aunque esto puede cambiarse según lo requiera el problema.

Se eligió un área donde se puede apreciar la deformación incrementada del metal.



Fig. 9. Marcas detectadas por la etapa de procesamiento de imágenes.

En la Fig. 10 se muestra un par de imágenes estéreo, las diferentes líneas de colores relacionan cada marca en la imagen izquierda con su marca correspondiente en la imagen derecha. Como se muestra, todas las relaciones son correctas por lo que el método tiene un alto grado de eficiencia. Los valores de las constantes en el experimento llevado a cabo son: $N = 960$, $M = 1280$, $b = 10$ y $k = 0,8$. Mientras la Fig. 11 muestra las coincidencias arrojadas por FLANN.

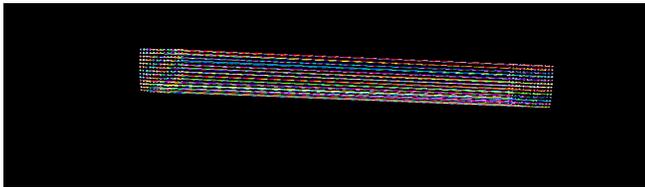


Fig. 10. Puntos coincidentes entre los centroides de marcas de imagen izquierda e imagen derecha al utilizar el método propuesto.

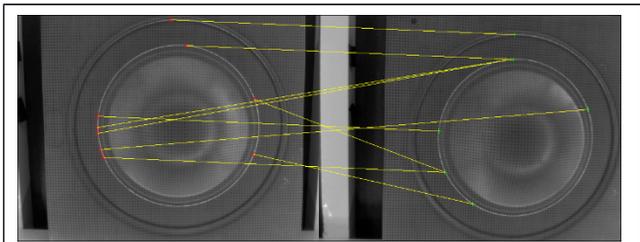


Fig. 11. Puntos coincidentes entre los centroides de marcas de imagen izquierda e imagen derecha al utilizar FLANN.

IV. DISCUSIÓN

El principal problema resuelto en este trabajo consiste en hacer coincidir puntos entre imágenes tomadas por un sistema de visión estéreo que se utiliza para medir la deformación de una chapa mediante la estimación de la distancia entre las marcas después del proceso de formación de la lámina. Principalmente lo que se ha encontrado es que, al dar condiciones iniciales a las marcas de búsqueda, la eficiencia

aumenta notoriamente, entendiendo la eficiencia como la cantidad de marcas encontradas y relacionadas dividida por la cantidad total de marcas capturadas en ambas imágenes. Se puede considerar que hay un alto beneficio en el sistema de coincidencia indicando una distancia entre marcas de círculo. La Figura 11 muestra el promedio de eficiencia del sistema propuesto en este trabajo como una función del número de puntos clave utilizados para el proceso de coincidencia. La capacidad de concordancia de FLANN se dibuja con la línea punteada y la eficiencia heurística propuesta con la línea continua.

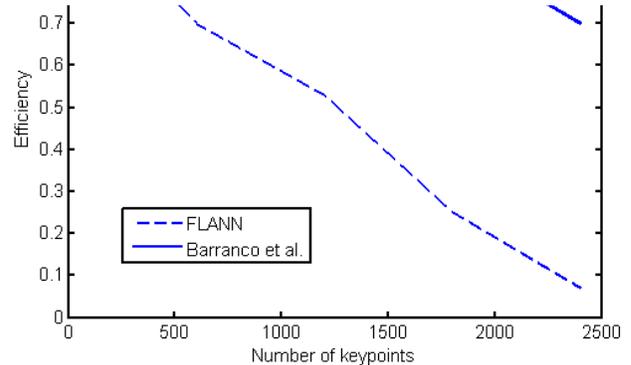


Fig. 12. Comparación de la eficiencia propuesta con la mostrada al usar FLANN.

V. CONCLUSIÓN

Este artículo presenta una nueva heurística para la correspondencia de puntos entre dos imágenes estéreo utilizadas para medir la deformación de láminas de metal. Esta metodología toma ventaja de las características del problema para reducir su falibilidad. Los resultados se comparan con uno de los algoritmos más poderosos de emparejamiento de puntos llamado FLANN, esto muestra que este método puede utilizarse con un alto grado de fiabilidad y un bajo costo computacional. Esta manera de resolver el problema puede ser utilizada en sistemas que requieran patrones de coincidencia entre dos imágenes; como cuadrados, hexágonos y otros. Como trabajo futuro, se sugiere automatizar totalmente la correspondencia de puntos sin perder los beneficios obtenidos.

RECONOCIMIENTOS

A Cátedras CONACyT, PRODEP, CONCyTEG y al Instituto Tecnológico de Celaya por el apoyo otorgado para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

[1] Mei Q., Gao J., Lina H., Chena Y., Yunboa H., Wang W., Zhanga G., Chena X., "Structure light telecentric stereoscopic vision 3D measurement system based on Scheimpug condition", Optics and Lasers in Engineering, 295 Vol. 86, November, p. 8391 (2016)

- [2] Gayubo F., Gonzalez J. L., De la Fuente E., Miguel F., Pern J. R., "On-line machine vision system for detect split defects in sheet-metal", 18th International Conference on Pattern Recognition, Hong Kong, p. 723-726 (2006)
- [3] Piironen T., Silven O., Pietikinen M., Laitinen T., Strmmer E., "Automated visual inspection of rolled metal surfaces", Machine vision and applications, Vol. 3, No. 4, p. 247-254 (1990)
- [4] Orteu J.-J., "3-D computer vision in experimental mechanics", Optics and Lasers in Engineering, vol. 47, p. 282291 (2009)
- [5] Bao-Quan S., Jin L., "Circular grid pattern based surface strain measurement system for sheet metal forming", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, p. 1186-1195 (2012)
- [6] GOM mbH: ARGUS - Optical Forming Analysis, GOM mbH company, 260 Braunschweig (2014)
- [7] Kalpakjian S., Schmid S. R., "Manufactura, ingeniería y tecnología", Pearson, México, 2002.
- [8] Barranco-Gutierrez A. I., Martínez D. S., Gómez T. J. L., "Visión estereoscópica por computadora con Matlab y OpenCV", Lulu, UK, 2013.
- [9] Cofaru C., Philips W., Paepegem W. V., "A novel speckle pattern Adaptive digital image correlation approach with robust strain calculation", Optics and Lasers in Engineering, vol. 50, p. 187198 (2012).
- [10] Garcia D., Orteu J. J., Penazzi I., "A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming", Journal of Materials Processing Technology, vols. 125-126, p. 736742 (2002)
- [11] Rosten E., Drummond T., "Machine learning for high-speed corner detection", In Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, Springer-Verlag, p. 430443 (2006)
- [12] Shi J., Chen F., Lu J., Chen G., "An evolutionary image matching approach", Applied Soft Computing, vol. 13, p. 3060-3065, (2013)

Algoritmo paralelo en GPU para el rastreo de armas de fuego tipo pistola

Saúl Martínez Chavelas, Saúl Martínez Díaz e Iliana Castro Liera

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Instituto Tecnológico de La Paz

La Paz, México

e-mail: m16310001@itlp.edu.mx, saulmd@itlp.edu.mx, icastr@itlp.edu.mx

Resumen—El rastreo de objetos es el proceso de estimar la ubicación de uno o más objetos dentro de una secuencia de imágenes mediante el uso de una cámara. Existen varios problemas relacionados con la detección de objetos tales como distorsiones geométricas, diferencias en los niveles de iluminación, presencia de objetos similares, objetos parcialmente ocultos, ruido aleatorio y el alto costo en tiempo de cómputo. En este trabajo se propone un algoritmo robusto para el rastreo de armas de fuego tipo pistola utilizando discriminación por color, forma y tamaño del objeto. Para clasificar los objetos se utiliza una red neuronal. El principal propósito es implementarlo posteriormente en un sistema de video-vigilancia que responda en tiempo real. Debido a lo anterior se propone ejecutar en paralelo el proceso que consume más tiempo, utilizando una unidad de procesamiento gráfico (GPU).

Palabras clave— GPU, visión artificial; algoritmos de rastreo; programación paralela; video vigilancia; redes neuronales

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de muchas ciudades en el mundo es la inseguridad. Para reducir el número de crímenes cometidos es necesario contar con sistemas de video-vigilancia que detecten de forma automática cualquier actividad sospechosa. En un sistema así, uno de los principales retos es lograr, en tiempo real, el rastreo de objetos de interés que se encuentren en movimiento. La tarea de entender el movimiento de un objeto consta de dos componentes principales: identificación y modelado. La identificación trata de encontrar el objeto de interés de un cuadro a un cuadro subsecuente de la fuente de video. En la literatura se han reportado varios métodos de identificación de armas; algunos ejemplos son: uso de un detector de esquinas para obtener las características de un arma y compararlas con las almacenadas en una base de datos, pertenecientes a diferentes armas [1]; en [2] los autores propusieron un sistema que realiza un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) y, con esta información, se alimenta una red neuronal la cual realiza la clasificación; en [3] se utilizaron los momentos estadísticos invariantes de Hu para alimentar una red neuronal que determinaba la presencia o ausencia del arma.

Por otro lado, desde la aparición de la Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo (CUDA, por sus siglas en inglés), ha sido posible desarrollar aplicaciones de

procesamiento paralelo en las Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU, por sus siglas en inglés). Algunos ejemplos son: el cálculo la distancia en un espacio multidimensional para un clasificador de k-vecinos más cercanos [4]; implementación de un algoritmo de Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO, por sus siglas en inglés) [5]; también se han utilizado para el rastreo de múltiples objetivos en un sistema de video-vigilancia [6].

En este artículo se propone un algoritmo para el rastreo de armas tipo pistola en una secuencia de video. Para la detección del arma el algoritmo de rastreo utiliza tres características: la forma, el tamaño y el color de los objetos. Para representar la forma se utilizan los momentos invariantes de Hu. La discriminación por color se realiza utilizando el esquema de color YO_1O_2 [7]. El tamaño del objeto se estima con dos rasgos dimensionales obtenidos con un sistema estereoscópico de cámaras calibradas. Por último, la clasificación de los objetos se lleva a cabo con una red neuronal. Para acelerar el procesamiento de las imágenes, como principal contribución de este trabajo, parte del algoritmo se implementó en una GPU.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la sección II presenta los conceptos básicos que soportan el trabajo, la sección III presenta el método propuesto, en la sección IV se presentan algunos resultados experimentales y en la sección V se resumen nuestras conclusiones.

II. CONCEPTOS BÁSICOS

A. Calibración de Cámaras

Para la configuración del sistema estereoscópico de cámaras se utiliza el modelo de Ojo de Aguja. La calibración de las cámaras se realizó con la técnica propuesta por Zhang [8]. Con esta técnica de calibración solamente se requiere que la cámara observe un patrón plano mostrado en al menos dos diferentes orientaciones. El patrón o la cámara pueden ser movidos libremente y no es necesario conocer el movimiento realizado.

$$\mathbf{sm} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]\mathbf{M} \quad (1)$$

Donde \mathbf{M} es un punto del objeto en 3D, en coordenadas homogéneas; \mathbf{m} es el mismo punto del objeto en coordenadas

2D; $[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ es una matriz de parámetros extrínsecos (rotación y traslación); s es un factor de escala arbitrario y \mathbf{A} es una matriz de parámetros intrínsecos. Mediante el proceso de calibración se obtienen las matrices de parámetros intrínsecos y extrínsecos.

B. Momentos de Hu

En una imagen digital el momento estadístico de orden $(p+q)$ se puede calcular por:

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y), \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Debido a que p y q pueden tomar un número infinito de valores, se genera un conjunto infinito de momentos. Dicho conjunto determina unívocamente cada función y viceversa. Para obtener invariancia a la traslación, se definen los momentos centrales:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y), \quad (3)$$

$$\text{Donde } \bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

Hu define siete momentos normalizados que son suficientes para representar de forma unívoca una función. Estos momentos son invariantes a rotación, traslación y escala, y se calculan por [9]:

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02},$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \quad (4)$$

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \left[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right]$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02}) \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] + (3\eta_{12} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \left[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right]$$

$$\text{Donde } \eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma}, \quad \gamma = \frac{p+q}{2} + 1, \quad p+q = 2, 3, 4, \dots$$

C. Espacio de Color YO₁O₂

El esquema tradicional de color Rojo-Verde-Azul (RGB por sus siglas en inglés) es muy sensible a cambios de iluminación. Un espacio de color que ha mostrado ser robusto a cambios de iluminación es el llamado YO₁O₂. Por esa razón en este trabajo se optó por utilizar dicho esquema. Los componentes de color en esta aproximación se pueden calcular a partir de los componentes RGB por:

$$Y = 2*R/7 + 4*G/7 + B/7 \quad (5)$$

$$O_1 = R - G \quad (6)$$

$$O_2 = 2*B - (R + G) \quad (7)$$

D. Redes Neuronales Artificiales

En los últimos años, las redes neuronales artificiales (RNA) han sido utilizadas ampliamente en problemas de clasificación. Una RNA implementa funciones discriminantes lineales en un espacio donde las entradas han sido mapeadas no-linealmente [10]. En gran medida su popularidad se debe a que la forma de la no-linealidad puede ser aprendida a partir de un conjunto de muestras de entrenamiento. Uno de los métodos más sencillos para entrenar la red es el llamado retropropagación, el cual es un algoritmo que se basa en el descenso de gradiente. La arquitectura de la red depende en gran medida del problema a resolver, pero en general suelen construirse con una capa de entrada, una capa oculta (aunque pueden ser más) y una capa de salida. Cada unidad en una capa se conecta con las unidades de la siguiente capa por medio de pesos, los cuales se modifican en la etapa de entrenamiento.

E. Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU)

Las GPU contienen una gran cantidad de unidades aritmético-lógicas, lo cual posibilita la ejecución de algunas tareas en paralelo. Bajo este esquema, parte del procesamiento se puede realizar en la unidad central de proceso (host) y la parte que requiere más tiempo puede ejecutarse en la GPU (device), siempre y cuando se puedan paralelizar. Para comparar la velocidad de procesamiento de diferentes arquitecturas suele utilizarse el factor de aceleración (speedup) el cual, con base en la Ley de Amdahl, se puede calcular por [11]:

$$t_s / t_p \quad (8)$$

Donde t_s es el tiempo de procesamiento secuencial y t_p es el tiempo de procesamiento paralelo.

III. SISTEMA PROPUESTO

A. Descripción general

En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques del método propuesto. Primero se calibran las cámaras como se describió previamente. Después las imágenes son convertidas de RGB a YO_1O_2 utilizando las ecuaciones (5)-(7). De forma experimental se determinó que la mejor discriminación de color se obtiene al Combinar las componentes O_1 y Y , de la siguiente manera:

$$I_g = Y + O_1 \tag{9}$$

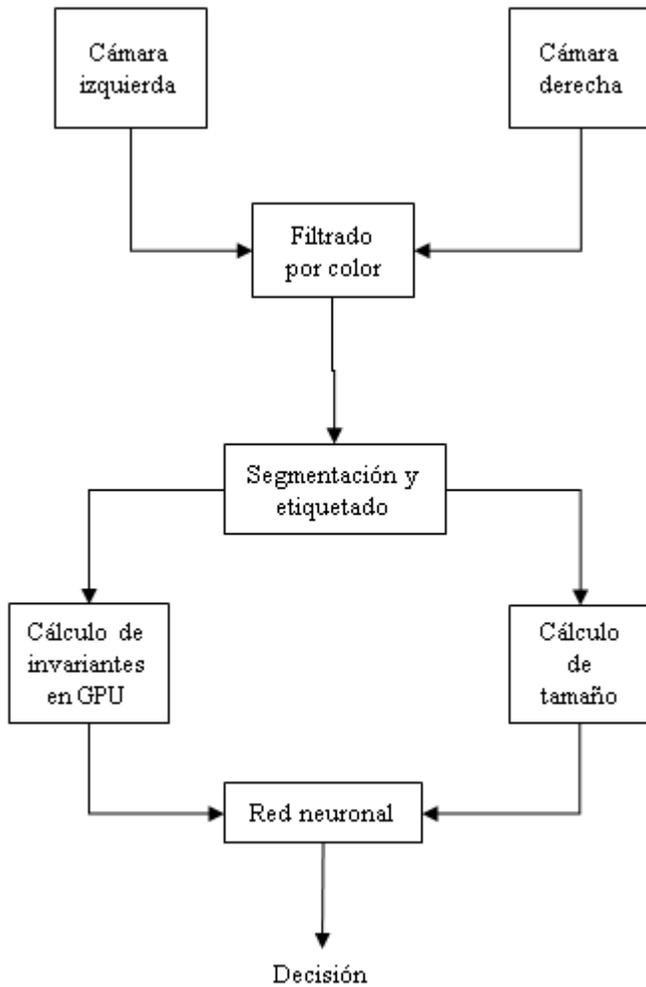


Fig. 1. Sistema propuesto.

Una vez obtenida la imagen I_g se aplica un umbral para eliminar el fondo y otros objetos encontrados que no están en el rango de colores buscados. Este umbral permite obtener una imagen binaria a la cual se le aplican la apertura y cierre morfológico, con el propósito de eliminar ruido y rellenar los pequeños huecos. La imagen binaria es sometida a un proceso de etiquetado de componentes y cada componente binario es

separado. Estos componentes binarios son utilizados como plantillas para extraer los objetos en escala de grises. Después, a cada objeto encontrado se le calculan los momentos de Hu con el conjunto de ecuaciones (4). Para este caso se utilizaron únicamente los cinco primeros momentos, los cuales proporcionaban la mayor parte de la información. Para dimensionar los objetos se calculó el alto y el ancho del mínimo rectángulo que circunscribe el objeto. Las dimensiones reales se obtienen por triangulación entre ambas cámaras. Con las siete características obtenidas (cinco invariantes de Hu y dos dimensiones) se alimenta una red neuronal. La red neuronal que proporcionó los mejores resultados se construyó con seis unidades de entrada, una capa oculta conteniendo diez unidades y una unidad de salida. Todas las funciones de transferencia son del tipo sigmoide. La figura 2 muestra la configuración de la red utilizada. Con los datos de entrada normalizados se entrenó la red utilizando el algoritmo de retropropagación.

De los experimentos hechos se determinó que el cálculo de los invariantes de Hu es el que consume más tiempo. Esto se debe a la gran cantidad de objetos que se obtienen en la segmentación de la imagen, pues cada objeto debe ser procesado individualmente. Por esa razón, se seleccionó esta parte del algoritmo para ejecutarse en paralelo en la GPU.

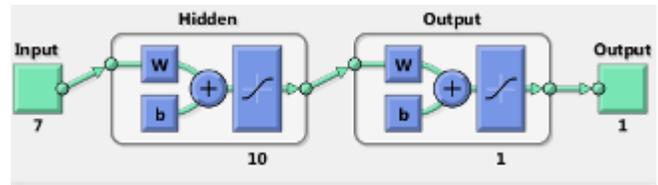


Fig. 2. Configuración de la red neuronal

B. Algoritmo paralelo

A continuación, se describe el algoritmo de procesamiento paralelo propuesto:

1. Se manda la imagen en escala de grises de un objeto a la memoria global de la GPU. Todos los pasos a continuación se realizan dentro de la tarjeta gráfica.
2. Se hace el cálculo de cada elemento de m_{00} haciendo uso de 320 bloques y 480 x 2 hilos. Con esto se logra trabajar en los 307,200 pixeles a la vez.
3. La sumatoria de los elementos de m_{00} se hace con el séptimo algoritmo de reducción binaria propuesto en [12].
4. Los pasos 2 y 3 se repiten dos veces más para calcular m_{01} y m_{10} .
5. Se calculan “x” testada y “y” testada.
6. Se repiten los pasos 2 y 3 pero ahora para calcular cada μ_{pq} .
7. Con estas μ_{pq} se calculan las η_{pq} . Al final estas η_{pq} se mandan a la CPU para que en ella se haga el proceso final para la obtención de las ϕ_p .

IV. RESULTADOS

Para entrenar la red neuronal se clasificaron manualmente los objetos segmentados de 80 imágenes de entrenamiento conteniendo 993 objetos (80 eran armas y el resto otros objetos). Una vez entrenada la red se probó el algoritmo propuesto con una secuencia de video.

Para probar el sistema se utilizaron imágenes extraídas de una secuencia de video. Las imágenes son de 640x480 pixeles de resolución. La figura 3 muestra un ejemplo del tipo de imágenes de prueba, la figura 4 muestra los objetos obtenidos después del proceso de segmentación y etiquetado, y en la figura 5 se señala el objeto que el algoritmo reconoció como arma de fuego. El programa paralelo se desarrolló en CUDA C++.

Las pruebas se hicieron en dos equipos diferentes. El primero cuenta con un procesador Intel Core i7-2670QM y una GPU Nvidia GeForce GT 540M con 96 núcleos CUDA. El segundo tiene un procesador Intel Core i7-2600 y una GPU Nvidia GeForce GTX TITAN Black con 2880 núcleos CUDA.

Para obtener una mejor estimación del tiempo de ejecución, la imagen de prueba se procesó diez veces en cada GPU y 10 veces en cada procesador secuencial. En la tabla I se muestra una comparativa de los tiempos de ejecución en el equipo 1 para el cálculo de los momentos de HU usando un algoritmo secuencial y el algoritmo en paralelo. La tabla II muestra los tiempos de comparación para el equipo 2.



Fig 3. Ejemplo de escena de prueba



Fig 4. Objetos identificados después del etiquetado



Fig 5. Escena de prueba con arma identificada

TABLA I. COMPARACIÓN DE TIEMPOS EN EL EQUIPO 1

Número de prueba	Tiempo (segundos)		
	Intel i7-2670	GeForce GT 540M	Factor de aceleración
1	6.036386528	1.5054088349	4.009798792
2	5.803068916	1.394139871	4.16247253
3	5.746165253	1.395487452	4.117676046
4	5.674389573	1.3986367949	4.057085867
5	5.674310268	1.383002049	4.102893609
6	5.653071926	1.409433002	4.010883751
7	5.691795619	1.391921527	4.089164158
8	5.67614128	1.379130566	4.115738872
9	5.693439098	1.389596025	4.097190115
10	5.646144401	1.419509867	3.97753093
Promedio	5.7294912862	1.4066265988	4.0732140930

TABLA II. COMPARACIÓN DE TIEMPOS EN EL EQUIPO 2

Número de prueba	Tiempo (segundos)		
	Intel i7-2600	GTX GeForce TITAN Black	Factor de aceleración
1	5.679217685	0.148924048	38.13499405
2	5.682934203	0.153003288	37.1425626
3	5.699312260	0.157430239	36.20214449
4	5.672015734	0.155554751	36.46314688
5	5.678553749	0.161698615	35.11813474
6	5.676212008	0.148535296	38.21456691
7	5.690515651	0.151610385	37.53381176
8	5.678077403	0.162369763	34.97004182
9	5.687574523	0.160254392	35.49091199
10	5.683144524	0.158978625	35.74785305
Promedio	5.682755774	0.15583594	36.46627194

Comparando la velocidad de procesamiento promedio del algoritmo en paralelo contra el algoritmo secuencial se obtuvo un factor de aceleración de 4 en el equipo 1 y un factor de 36 en el equipo 2. Cabe señalar que, aunque el procesador secuencial del equipo 1 es de 2.2 GHz. y el del equipo 2 es de 3.4 GHz., el tiempo de procesamiento es casi el mismo en ambos procesadores secuenciales.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Sólo se obtuvo una mejora significativa en los tiempos de ejecución del cálculo de los invariantes de HU en el equipo 2 ya que está cuenta con una GPU de última generación con una cantidad mucho mayor de núcleos CUDA comparado con la GPU del equipo 1.

Como trabajo futuro se planea desarrollar un algoritmo adaptativo para considerar el tamaño de cada objeto y de esta forma procesar imágenes más pequeñas para el cálculo de los invariantes de Hu.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ITLP-TNM y al CONACyT por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

[1] M. L. K.Kasemsan, "The classification of gun's type using image recognition theory," *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 4(1), pp. 54-58, 2014.

- [2] M. Grega, A. Matiolanski, P. Guzik and M. Leszczuk, "Automated detection of firearms and knives in a CCTV image," *Sensors*, vol. 16, pp. 1-16, 2016.
- [3] C.A, Palacios Alvarado, S. Martínez Díaz, "Reconocimiento de armas de fuego tipo pistola utilizando visión artificial", in *Investigación y Desarrollo en Robótica y Computación*, vol. I, Eds. ITLP 2016, pp. 44-48.
- [4] R. Bresler Camps, and R. Gil García, "Clasificación kNN de documentos usando GPU", *Computación y Sistemas*, vol. 15(1), pp. 63-77, 2011
- [5] D. Leal Souza, T. Carvalho Martins, V. Alexandrovich Dmitriev, and O. Noura Teixeira, "PSO-GPU: Accelerating particle swarm optimization in CUDA-based graphics processing units", in *GECCO'11*, pp. 837-838, 2011.
- [6] M. Elbahri, N. Taleb, K Kpalma and J. Ronsin, "Parallel algorithm implementation for multi-object tracking and surveillance", *IET Computer Vision*, vol. 10(3), pp. 202-2011, 2016.
- [7] I. Santillan, I. R. Terol Villalobos and G. Herrera Ruiz, "Color morphological image segmentacion on a new opponent color space based on the notio of critical funtions," in *Seventh Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 2008.
- [8] Z. Zhang "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," *IEEE*, 1999.
- [9] M. K Hu. "Visual pattern recognition by moment invariants," *IRE Trans. Info. Theory*, vol. IT-8, 1962.
- [10] R. O. Duda, P. E. Hart and D. G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd ed. Wiley, Nov. 2000.
- [11] J. L. Hennessy and D. A. Patterson, *Arquitectura de Computadoras, un Enfoque Cuantitativo*, Mc. Graw Hill, 1st ed. 1993.
- [12] M. Harris. *Optimizing Parallel Reducion in CUDA*. NVIDIA Developer Technology.

Técnicas de visión artificial aplicadas a la detección de baches

Hugo Iván Rivera Trasviña
 Instituto Tecnológico de La Paz
 ITLP
 La Paz, Baja California Sur, México
 hurive90@gmail.com

Dr. Saúl Martínez Díaz
 Instituto Tecnológico de La Paz
 ITLP
 La Paz, Baja California Sur, México
 smdiaz06@hotmail.com

Resumen—En este trabajo se presenta un sistema para el reconocimiento de baches utilizando visión artificial. La visión artificial es una rama de la inteligencia artificial que permite la obtención, procesamiento y análisis de información obtenida a través de imágenes. En este caso, para llevar a cabo la detección de baches, la imagen es sometida a diferentes combinaciones de algoritmos para el tratamiento de imágenes, cada combinación tiene sus características establecidas y es útil para diferentes escenarios, mientras que cada algoritmo utilizado tiene un propósito en específico (binarizar, segmentar, ecualizar, entre otros). Una vez que la imagen es totalmente procesada es posible determinar si existe en ella un bache. El sistema propuesto fue probado con imágenes obtenidas en condiciones no controladas en las calles de la ciudad de La Paz BCS, México.

Palabras clave— *visión artificial; procesamiento de imágenes; segmentación*

I. INTRODUCCIÓN

Desde que comenzó el uso masivo de los autos, los baches son un problema muy común para los conductores, puede traer consecuencias para el vehículo, o en el peor de los casos, poner en riesgo la vida de las personas. Solo en unas cuantas ciudades de México existen cifras sobre las condiciones de las calles, en 2016 se tiene datos solo de 2 de las 3 principales ciudades de nuestro país; en la Ciudad de México en el segundo semestre del año (2016) se tiene registro de más de 26 mil baches [1][2], mientras que en la ciudad de Guadalajara, tan solo ese año se contabilizaron 219 mil baches reparados [3][4]. En la mayoría de las ciudades del país, no existen datos sobre la cantidad de baches ni su localización o sistema alguno que permita saber con exactitud la cantidad y localización de estos, el proceso de detección se hace de forma manual (tanto reportes de ciudadanos como brigadas de bacheo por parte del gobierno), lo cual aumenta mucho más el tiempo de reporte y reparación.

Actualmente existen diferentes sistemas que tratan el problema de detección de baches. Estos pueden ser divididos en sistemas de detección basados en vibración, sistemas basados en reconstrucción tridimensional y sistemas basados en visión [5][6]. Cada uno de los grupos tiene diferentes

características, que dependiendo de la aplicación, puede beneficiar o perjudicar el resultado; los sistemas basados en vibración pueden detectar irregularidades en la carretera con pocos componentes y con algoritmos sencillos, pero estos generan una cantidad alta de falsos positivos y su detección se limita a las zonas donde pisan las ruedas del coche; los sistemas de reconstrucción 3D resuelven este último problema sin dificultad. Pero el costo de los componentes lo hace inaccesible; los sistemas basados en visión, pueden tener menos falsos positivos y para lograr la captura de imágenes no es necesario equipo especializado (cámaras convencionales pueden realizar el trabajo), su problema recae en el ruido generado en la captura de las imágenes y en la complejidad que pueden tener los algoritmos utilizados. El objetivo del trabajo es obtener un sistema que sea lo suficientemente rápido y eficaz para trabajar en tiempo real y a la vez accesible para el usuario final.

II. TRABAJO PREVIO

Actualmente se encuentran en desarrollo una cantidad considerable de sistemas enfocados a la detección de baches. Como se menciona anteriormente, estos sistemas se dividen en 3 grupos, estos son:

A. *Sistemas basados en vibración*

Es la técnica más común, utiliza un conjunto de acelerómetros instalados en diferentes zonas del vehículo, con lo cual se mide la intensidad de los movimientos a los que es sometido el coche, aunque es un sistema en el que sus componentes son accesibles y los algoritmos utilizados, comparados con otros sistemas, son sencillos; estos sistemas son propensos a la detección de falsos positivos causados por movimiento (movimiento de pasajeros, frenar bruscamente, topes, banquetas, etc.) y solo perciben los baches que las llantas del auto pisan. En la actualidad, esta técnica se ha popularizado gracias al uso de dispositivos móviles, ya que por medio de una aplicación y utilizando los componentes presentes en estos aparatos es posible implementar el sistema, actualmente google tiene en fase de desarrollo una aplicación que cumple este propósito. Trabajos relacionados tenemos muchos, entre los primeros sistemas desarrollados tenemos The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring [7], en esta propuesta se utilizan

un conjunto de acelerómetros repartidos por todo el automóvil, a modo de establecer una comparación de movimiento entre sensores y tratar de descartar falsos positivos.

B. Sistemas basados en reconstrucción tridimensional

Estos sistemas están compuestos por diferentes sensores (sensores laser, infrarrojos, ultrasónicos). Su funcionamiento consiste en la reflexión de impulsos (haz de luz, sonido) en superficies, de esta forma son creados modelos tridimensionales muy precisos, al procesar la información obtenida es posible determinar la elevación y medida de ciertas áreas, estos métodos son muy eficaces, pero el costo de sus componentes es elevado al igual que la complejidad de sus algoritmos. Sistemas basados en reconstrucción tridimensional son utilizados en diferentes modelos de la marca de automóviles Land Rover. Entre los trabajos que abordan este tipo de sistema encontramos An intelligent system to detect, avoid and maintain potholes: a graph theoretic approach [8], en el cual se utiliza un transmisor laser que se mueve en dos dimensiones, de esta manera desplaza el rayo de luz por toda la escena, cuenta con un receptor que captura los rayos de luz que regresan y su intensidad, una vez que la información es procesada se obtiene un mapa tridimensional del área, con lo que podemos determinar la profundidad de los baches localizados en la escena.

C. Sistemas basados en visión

Sistemas compuestos principalmente por una o más cámaras, consisten en capturar imágenes y procesarlas para obtener información de ellas. Al utilizar un par de cámaras estas pueden configurarse para procesar imágenes en visión estéreo, lo que permite obtener más datos, como la profundidad y el tamaño del bache. Los componentes de estos sistemas son más accesibles que los de reconstrucción tridimensional, y aunque los algoritmos utilizados pueden ser más complejos que en los sistemas basados en vibración, ofrece una detección rápida, y en un área mayor que estos últimos. Entre los trabajos basados en estos sistemas tenemos Detecting potholes using simple image processing techniques and real-world footage [9], en el cual se propone un algoritmo para eliminar los elementos de la imagen que no pertenecen a la carretera y llevar a cabo el procesamiento en la imagen resultante.

Aunque es mencionado que los sistemas basados en visión pueden ser implementados con dispositivos de fácil acceso, muchos de estos utilizan componentes de alta resolución, El propósito de este trabajo es utilizar componentes accesibles para facilitar su mantenimiento y acceso al usuario.

La mayoría de sistemas desarrollados tienen, sin importar en que grupo se encuentren, un objetivo en común, el obtener la posición de los baches y registrarlos en un sistema de base de datos.

III. METODOLOGÍA

El primer paso para el desarrollo de este proyecto fue la obtención de un banco de imágenes, para esto se recurrió a tomar fotografías de diferentes calles de la ciudad, actualmente el banco de imágenes cuenta con más de 500 imágenes (Las imágenes se encuentran disponibles para descarga en [10]), estas se dividen en:

a) *Imágenes en movimiento: imágenes capturadas en un auto en movimiento. En estas se capturan detalles a los que se tendrá que enfrentar el sistema constantemente.*

b) *Imágenes ideales: imágenes obtenidas sin movimiento, enfocando solo al bache o a partes de la calle, estas imágenes son necesarias para la realización de pruebas en la fase de desarrollo del sistema.*

El sistema que se desarrolló se enfoca en la visión artificial, la técnica utilizada en este tipo de sistemas consiste en llevar a cabo el procesamiento de imágenes para resaltar zonas de importancia, para lograr esto se utilizaron diferentes algoritmos de procesamiento de imágenes, todos con resultados y propósitos diferentes, se crearon combinaciones de algoritmos, variando su posición y repetición en el conjunto. Para obtener grupos de algoritmos que nos fueran útiles, primero se escogieron imágenes de nuestro banco, las cuales tuvieran diferentes características (efectos de sombras, imágenes con y sin vehículos, diferentes tipos de pavimento, etc.) y se crearon grupos de algoritmos personalizados para las imágenes de prueba, al obtener un conjunto funcional para la imagen este era probado en otras imágenes del banco, si el algoritmo funcionaba no solo en la imagen de origen, era tomado en cuenta para someterlo a futuras pruebas.

Para calificar los métodos obtenidos se determinaron tres calificaciones (Fig. 1):

- 0: El método no detectó el bache.
- 1: Fueron detectadas algunas líneas relacionadas con el bache.
- 2: El bache fue detectado, completa o parcialmente.

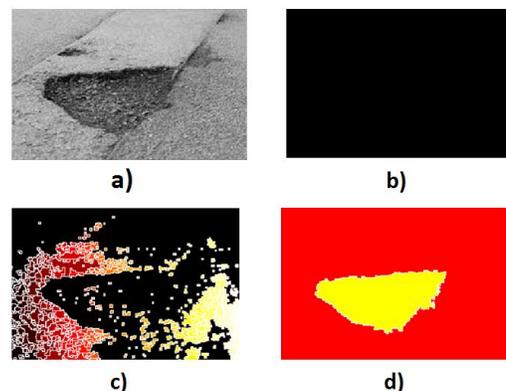


Fig. 1. Ejemplo de resultados de diferentes métodos con una misma imagen, en a) se tiene la imagen original, b) el método no detectó nada, c) fueron detectadas algunas líneas relacionadas al bache y d) el bache fue detectado.

Los métodos fueron descartados si en las imágenes de prueba obtuvieron menos del 60% de aciertos. El objetivo de la búsqueda de diferentes métodos es el seleccionar aquellos que tengan una tasa alta de aciertos y formar un banco de algoritmos que sean capaces de detectar la mayor cantidad posible de baches. Las imágenes que procesará el sistema tendrán diferentes elementos interactuando, por lo que es muy probable que las características de estas puedan ser diferentes, por lo tanto un solo método no es capaz de funcionar de igual manera en dos imágenes. Al utilizar diferentes métodos enfocados a diferentes características en las imágenes, la capacidad de reconocimiento del sistema se amplía.

A pesar de que los métodos resultantes para procesar las imágenes son diferentes, están compuestos por grupos de procesos muy similares, los pasos a seguir por los métodos obtenidos se muestran a continuación:



Fig. 2. Estructura de los métodos para detección de baches del banco de algoritmos.

A. Mejora y realce de la imagen

Consiste en mejorar la apariencia de la imagen para las operaciones siguientes, como primer paso tenemos la eliminación de color de la imagen, esto se realiza al transformar la imagen a escala de grises (media ponderada de los valores RGB de cada pixel de la imagen original), luego la imagen resultante es convertida al modelo HSV, ya que, a diferencia del modelo RGB en el que los 3 componentes que lo integran corresponden a la intensidad de los colores primarios rojo, verde y azul; el modelo HSV separa el matiz (Hue), la Saturación (Saturation) y el brillo (Value o Brightness) en tres componentes independientes, lo cual en el procesamiento de la imagen nos facilitara ciertas operaciones [11][12], por ejemplo, para realizar la segmentación se busca similitudes entre pixeles para determinar si corresponden a una misma región o no, esto se logra con la comparación de características entre ellos, algunas de las características son el color y la intensidad, por lo cual la detección de colores es necesaria para la segmentación, en el modelo RGB este procedimiento se ve directamente afectado por la cantidad de luz, mientras que en el modelo HSV esta afectación disminuye pues la cantidad de luz y el color son dos componentes diferentes. Además de la conversión al modelo HSV en este paso son utilizados procedimientos para

simplificar y destacar los objetos encontrados en la imagen, los algoritmos utilizados para cumplir este objetivo y una breve descripción de su utilidad para este proceso se listan a continuación:

a) *Dilatación*: El valor de cada pixel dependera de sus vecinos, cada pixel tomará el valor que tiene el mayor de sus vecinos [13]. Este proceso es utilizado para la eliminación de ruido, en el caso de imágenes binarias es utilizado para la eliminación de ruido pepper.

b) *Erosión*: El pixel inspeccionado tomará el valor del menor de sus vecinos, este método adelgaza las zonas a las que se aplica [13]. Es utilizado tambien para la eliminación de ruido y la definición de objetos o zonas en la imagen, es efectivo para la eliminación del ruido salt [14].

c) *Apertura*: Es un proceso de erosión y dilatación (esta es aplicada al resultado de la erosión) [15], es utilizado para suavizar contornos y redondear bordes afilados.

d) *Cierre*: Se aplica la dilatación y erosión [16], elimina huecos pequeños en las imágenes y puede unir zonas cercanas.

Como complemento a los métodos anteriores son utilizadas otras técnicas que mejoran la obtención de información, estos algoritmos se basan en la modificación del contraste de la imagen. En ocasiones un mal contraste en la escena da como resultado que no todos los detalles que esta contiene sean revelados, por lo cual una mejora de contraste es útil en estos casos [17]. Los procedimientos utilizados son:

a) *Ecualización de histograma*: Proceso que trata de repartir los valores del histograma de una forma uniforme, es decir que exista la misma cantidad de pixeles para cada nivel de gris en el histograma [18].

b) *Estiramiento de histograma*: Este método consiste en aumentar el contraste de la imagen [19], aumentar el contraste tiene como consecuencia una mejor distinción entre objetos.

B. Segmentación y eliminación de zonas

En este paso se llevan a cabo procesos de segmentación, es decir, la imagen es dividida en diferentes partes, estas partes o grupos son compuestos por pixeles que comparten características entre ellos (como por ejemplo su posición en la imagen), el objetivo de este paso es facilitar el análisis, pues es posible obtener mejores resultados cuando una imagen está compuesta por regiones aisladas. Los algoritmos utilizados para lograr esta meta son el método de Otsu [20][21] y gradiente morfológico [22]. Después del proceso de segmentación se lleva a cabo la binarización de la imagen (en el caso del método de Otsu la imagen resultante es binaria), esta consiste en comparar el valor de cada uno de los pixeles conforme un umbral establecido, si el valor del pixel es menor, este es igualado a 0, en caso contrario se iguala a 255. Terminado el proceso anterior se realiza una

búsqueda y eliminación de zonas segmentadas con área muy pequeña [23], de esta manera es suprimido un poco del ruido generado en la imagen.

C. Obtención de zonas de interés

En esta parte son utilizados algunos de los algoritmos implementados en los pasos anteriores, aquí se hace lo necesario para tener una mejor separación de zonas de interés, por lo general los métodos utilizados en este proceso son los de dilatación, erosión y divisoria de aguas [24]. En este punto son consideradas como zonas de interés todas aquellas partes de la imagen que están coloreadas (por el algoritmo de divisoria de aguas), por lo tanto algunas o todas las zonas de interés obtenidas pueden o no ser falsos positivos (partes de un coche, sombras, objetos como alcantarillas, banquetas, entre otros). El algoritmo es más susceptible a detección de falsos positivos en imágenes que involucren muchos objetos.

D. Discriminación de zonas de interés

Como se menciona en el paso anterior a este punto pueden existir falsos positivos en la imagen, por lo tanto esta operación se encarga de descartar todas aquellas áreas que no tengan las características de un bache. Esta parte es importante pues descarta los errores que se pueden generar al aplicar los métodos en imágenes que tienen muchos objetos. El proceso es el siguiente:

a) *Unión de las zonas de interés: todas las zonas coloreadas en la imagen se unen, para lograrlo se igualan a 255 los píxeles con un color diferente al negro, de tal forma que la imagen regresa a la binarización, como último paso son eliminadas las zonas blancas con área muy pequeña.*

b) *Filtrado de zonas de interés por saturación: En este punto es necesario comprender la saturación; la saturación es la fuerza o intensidad de un color, es el grado en que alguno de los colores primarios predomina, a medida que los colores primarios se igualan la saturación disminuye, por lo tanto colores grises y muy oscuros tienen niveles muy bajos de saturación. Teniendo en cuenta esta definición utilizamos la saturación para detectar las zonas de la imagen que corresponden al pavimento. Para lograr esto se realizaron pruebas en diferentes imágenes, con lo cual se obtuvo un rango de saturación entre 0 y 0.2 (todos los valores de saturación están contenidos entre 0 y 1). Estos valores serán utilizados para discriminar zonas de interés que no correspondan a la carretera.*

Para llevar a cabo el filtrado se utiliza la capa de saturación de la imagen original (S del modelo HSV) y se realiza un recorrido en la imagen resultante del proceso anterior, en el cual se ignorarán todas las partes en negro de la imagen procesada (imagen binaria) y solo las partes blancas serán utilizadas. Las zonas blancas se comparan con el componente S de la imagen original, si el valor de S del píxel es mayor a 0.2 o igual a 0, el píxel se coloreará negro

en la imagen resultante, si por el contrario está entre esos valores, el píxel permanecerá igual (blanco). Una vez terminado, es ejecutado una vez más el algoritmo de eliminación de zonas pequeñas, logrando con este último paso que zonas muy pequeñas sean detectadas como baches. A continuación se muestra el algoritmo que realiza la discriminación de zonas de interés.

Algoritmo 1 Pseudocódigo para unión de las zonas de interés y filtrado por saturación

```

procedure unión_zonas(imagen imgproc, imagen original)
  imgZonas = imgproc
  imgS = Componente_saturacion(original)
  ancho = ancho_img(imgproc)
  alto = alto_img(imgproc)
  for i = 1 : ancho do
    for j = 1 : alto do
      if imgZonas(i,j) > 0
        if imgS(i,j) > 0 && imgS(i,j) < 0.2
          imgZonas(i,j) = 255
        else
          imgZonas(i,j) = 0
        end if
      end if
    end for
  end for
  return imgZonas
end procedure

```

Terminados los pasos anteriores, se han discriminado con éxito una cantidad considerable de falsos positivos, aumentando las posibilidades de que las zonas restantes sean realmente baches. Como se ha mencionado anteriormente, se han desarrollado diferentes métodos que conforman el banco de algoritmos, estos métodos están compuestos por los algoritmos mostrados anteriormente (otsu, erosión, dilatación, etc.) la diferencia entre ellos (los métodos que componen el banco) recae en la repetición, orden y presencia de los algoritmos que los conforman; por ejemplo, supongamos que tenemos los métodos A y B, mientras el método A (conformado por los siguientes algoritmos en orden: otsu, dilatación, erosión, gradiente morfológico y divisoria de aguas) es útil para imágenes con ciertas características (por ejemplo escenas con mucha iluminación) el método B (estiramiento del histograma, otsu, dilatación, erosión, gradiente morfológico y divisoria de aguas) funciona mejor en otro tipo de imágenes. El objetivo es conformar un banco de algoritmos con diversos métodos que permitan un correcto funcionamiento en diferentes escenas, si un bache es detectado por alguno de los métodos el sistema considera el resultado como verdadero.

IV. RESULTADOS

La implementación de los algoritmos se realiza en MATLAB 2013. En este momento las pruebas realizadas utilizan únicamente el banco de imágenes. El banco de imágenes está compuesto por 300 imágenes ideales y 200 imágenes en movimiento, todas con una resolución de 600x400. Las pruebas se realizaron para evaluar tanto el banco de algoritmos como los métodos por separado. Al probar los métodos de forma individual se obtuvieron resultados de hasta un 80% de efectividad, mientras que la evaluación del banco de algoritmos se obtuvo un 93% de efectividad. La efectividad del banco de algoritmos es mayor, pues al estar compuesto de diferentes métodos si uno de ellos detecta un bache el resultado es positivo sin importar el resto de resultados. En la figura 3 se muestra la aplicación de uno de los métodos que componen el banco de algoritmos, como primer paso se aplica el proceso de erosión a la imagen original, luego es aplicado el método de Otsu, en el cual la imagen es convertida a binaria, después con la dilatación se logra la eliminación de zonas pequeñas y con el proceso de gradiente morfológico y divisoria de aguas se obtiene la división de la imagen en zonas de interés.

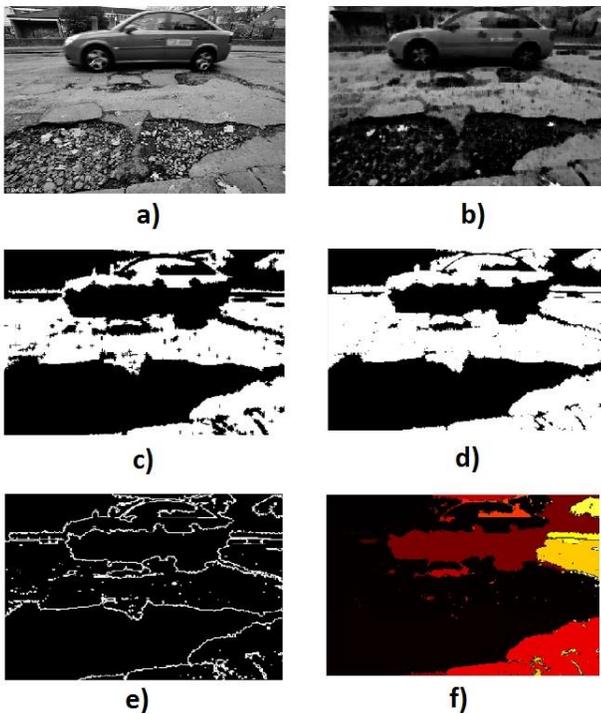


Fig. 3 Procedimiento del banco de imágenes sin discriminación de zonas de interés. a) Imagen original, b) Erosión, c) Método de Otsu, d) Dilatación, e) Gradiente morfológico y f) Divisoria de aguas (watershed).

La figura 4 muestra el proceso de discriminación de la imagen del procesamiento anterior, primero se colorean de blanco todas las zonas que no sean de color negro, luego se recorre la imagen descartando las zonas negras, las zonas blancas son comparadas con la imagen original y son descartadas si estas áreas tienen una saturación igual a 0 o

mayor a 0.2, por último, para asegurar un mejor resultado se aplica el algoritmo de eliminación de zonas pequeñas.

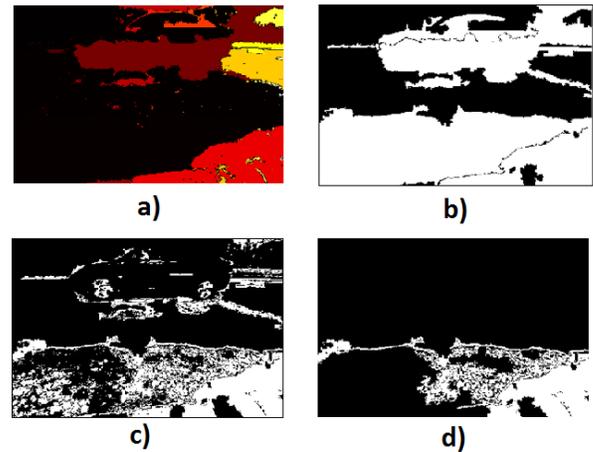


Fig. 4 Discriminación de zonas de interés. a) Imagen resultante del proceso anterior, b) Unión de zonas de interés, c) Filtrado por saturación, d) Eliminación de zonas pequeñas y resultado.

La imagen final de la figura 4 muestra en color blanco la zona que el algoritmo detecto como un bache, en este ejemplo la detección del bache es parcial. A simple vista se muestra una diferencia de resultados antes y después de aplicar el método para discriminación de zonas de interés.

V. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo muestra una propuesta para un sistema de detección de baches basado en visión artificial, los resultados obtenidos hasta el momento son aceptables; el sistema mostró una disminución de falsos positivos al incluir la discriminación de zonas de interés. Aun así los métodos obtenidos muestran errores al utilizar imágenes con demasiados objetos presentes en ellas. Al aplicar los métodos existen ocasiones en que las zonas de interés son localizadas sin terminar el proceso; lo que se intenta es obtener un banco de algoritmos que permitan identificar baches con la menor cantidad de procesos posible.

Como trabajo futuro se pretende disminuir la cantidad de métodos que componen el banco de algoritmos, mejorar la discriminación de objetos y la detección en imágenes con muchos elementos. Este proyecto es posible llevarlo a una aplicación real, para que esto suceda, se debe poner especial cuidado en lograr una ejecución en tiempo real exitosa, pues una localización exacta de los baches sería necesaria, para esto es posible utilizar FPGA's para el desarrollo de los métodos (principalmente aquellos que requieren un alto poder computacional) y la detección en tiempo real, así como una aplicación que permita registrar los datos de los baches detectados.

REFERENCIAS

- [1] I. Zamarrón, "Bache 24 ha obligado a tapar casi 30 mil hoyos en la CDMX," *Publimetro*, 06-Feb-2017. [Online]. Available: <https://www.publimetro.com.mx/mx/ciudad/2017/02/06/bache-24-obligado-tapar-casi-30-mil-hoyos.html>.
- [2] S. Hernández, "Se han atendido 14 mil baches en vías primarias," *El Universal*, 06-Nov-2016. [Online]. Available: <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/cdmx/2016/11/6/s-e-han-atendido-14-mil-baches-en-vias-primarias>.
- [3] V. Arenas, "En 2016, Guadalajara ha tapado 219 mil baches," *Informador*, 29-Dec-2016. [Online]. Available: <http://www.informador.com.mx/jalisco/2016/699344/6/en-2016-guadalajara-ha-tapado-219-mil-baches.htm>.
- [4] F. López Andalón, "Guadalajara, Guadalajara, tienes tus calles llenas de baches," 29-Dec-2016. [Online]. Available: <http://pagina24jalisco.com.mx/2016/12/29/guadalajara-guadalajara-tienes-tus-calles-llenas-de-baches/>.
- [5] S. K. Ryu, T. Kim, and Y. R. Kim, "Image-Based Pothole Detection System for ITS Service and Road Management System," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, 2015.
- [6] Y. Jo and S. Ryu, "Pothole detection system using a black-box camera," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, pp. 29316–29331, 2015.
- [7] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan, "The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring," *Proceeding 6th Int. Conf. Mob. Syst. Appl. Serv. - MobiSys '08*, p. 29, 2008.
- [8] S. Balakuntala and S. Venkatesh, "An Intelligent System to Detect, Avoid and Maintain Potholes: A Graph Theoretic Approach," *2014 Seventh Int. Conf. Mob. Comput. Ubiquitous Netw.*, vol. abs/1305.5, pp. 80–80, 2013.
- [9] S. Nienaber, M. Booyesen, and R. Kroon, "Detecting Potholes Using Simple Image Processing Techniques and Real-World Footage," no. Satc, pp. 153–164, 2015.
- [10] "Banco de imágenes," 2017. [Online]. Available: http://45.55.77.223/img_baches/.
- [11] L. Shapiro and G. Stockman, "Computer vision," 1st ed., Prentice Hall, 2000, pp. 217–218.
- [12] J. D. F. Student, E. Engineering, P. State, S. Luis, O. June, and J. Fulton, "Autonomous Golf Cart Vision Using HSV Image Processing and Commercial Webcam," no. June, pp. 1–14, 2011.
- [13] "Morphological dilation and erosion," *Mathworks*, 2016. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/morphological-dilation-and-erosion.html>.
- [14] L. Shapiro and G. Stockman, "Computer vision," 1st ed., Prentice Hall, 2000, pp. 151–152.
- [15] L. Shapiro and G. Stockman, "Computer vision," 1st ed., Prentice Hall, 2000, p. 81.
- [16] C. Busch and M. Eberle, "Morphological Operations for Color??Coded Images," *Comput. Graph. Forum*, vol. 14, no. 3, pp. 193–204, 1995.
- [17] V. Magudeeswaran and M. Krishnamurthy, "Low-complexity Histogram Modification Algorithm for Contrast Enhancement," vol. 2, no. April, pp. 1–6, 2013.
- [18] S. S. Bagade and V. Shandilya, "Use of Histogram Equalization in Image Processing for Image Enhancement," *Int. J. Softw. Eng. Res. Pract.*, vol. 1, no. 2, pp. 6–10, 2011.
- [19] S. S. Al-amri, N. V. Kalyankar, and S. D. Khamitkar, "Contrast Stretching Enhancement in Remote Sensing Image," *BIOINFO Sens. Networks*, vol. 1, no. 1, p. 4, 2011.
- [20] H. Makkar, "Image Analysis Using Improved Otsu's Thresholding Method," pp. 2122–2126, 2014.
- [21] M. H. J. Vala and A. Baxi, "A review on Otsu image segmentation algorithm," *Int. J. Adv. Res. Comput. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 387–389, 2013.
- [22] B. Swathika, K. Anandhanarayanan, B. Baskaran, and R. Govindaraj, "Radius Bone Fracture Detection Using Morphological Gradient Based Image Segmentation Technique," *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 1616–1619, 2015.
- [23] L. Shapiro and G. Stockman, "Computer vision," 1st ed., Prentice Hall, 2000, pp. 152–153.
- [24] N. La, S. Palomino, and N. G. Hilaes, "Implementación del algoritmo Watershed para el análisis de imágenes médicas," vol. 8, no. 2, pp. 67–74, 2011.

Caracterización de superficie mediante vistas ortogonales simultáneas para inspección automatizada de productos

Carlos Raed Mayoral Gutiérrez, Alfonso Rojas Domínguez[†]✉

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de León
 Av. Tecnológico S/N - Frac. Industrial Julián de Obregón, León, Gto. 37290
[†] Catedrático CONACYT, ✉ Alfonso.Rojas@gmail.com

Resumen – Se describe un sistema para inspección visual automatizada de productos basado en un arreglo de espejos que genera dos vistas ortogonales entre sí y simultáneas de un objeto. De tales vistas se deriva información para corregir distorsiones en la superficie aparente del objeto causadas por curvaturas en su forma. El sistema propuesto es económico para favorecer la adopción de esta tecnología por empresas pequeñas y medianas con niveles básicos de automatización. Se logra la caracterización de la superficie de objetos mediante tres métodos alternativos de procesamiento de imágenes. Experimentos realizados sobre una base de datos elaborada para este propósito muestran que es posible una mejora en la estimación del área de defectos presentes en la superficie de los productos inspeccionados, comparada con métodos tradicionales de inspección que no consideran la distorsión descrita.

Palabras clave – inspección automatizada; reconstrucción 3D; visión artificial

I. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente el control de la calidad y la inspección visual son tareas que han sido llevados a cabo por humanos, quienes a pesar de que en general poseen mayores capacidades que las máquinas, en dichas tareas son más lentos y pueden distraerse frecuentemente y sufrir de cansancio, lo cual disminuye su efectividad. Además requieren entrenamiento y sus habilidades pueden tomar tiempo en desarrollarse [1]. Por este motivo es que empresas con altos estándares de control de calidad utilizan, al menos para ciertas tareas, sistemas de inspección automatizada basados en técnicas de inspección y visión artificial. El objetivo de estos sistemas es que las máquinas sean capaces de tomar decisiones. Desde una perspectiva más general, la visión artificial es la capacidad de las máquinas para observar el mundo que les rodea, más precisamente para deducir la estructura y las propiedades del mundo tridimensional a partir de una o más imágenes bidimensionales [2].

En este trabajo se describe el prototipo de un sistema que combina un montaje sencillo de espejos con técnicas de procesamiento de imágenes para la caracterización precisa de la superficie de objetos tridimensionales. El objetivo del montaje es proporcionar al sistema con vistas múltiples del objeto que se inspecciona. Esto permite extraer información que sirve para corregir las deformaciones de la superficie observada causadas por la curvatura del objeto mismo y que en una única imagen sería muy difícil estimar debido a la perspectiva, o la relación entre las posiciones del objeto y la cámara.

El sistema que se presenta es económico y robusto, pues requiere una única cámara para adquisición de las imágenes y de espejos planos de bajo costo. Este diseño tiene la finalidad de que pequeñas y medianas empresas locales puedan adoptar la tecnología de inspección automatizada sin tener que hacer una cuantiosa inversión en el equipo requerido.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Eifert *et al.* indican que la estimación del área superficial de alimentos en crudo puede tener una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo para optimizar el almacenamiento de dichos productos. En su trabajo, secuencias de imágenes de una fruta rotada sobre su eje vertical fueron generadas con un ángulo entre imágenes de 6 grados. Sus resultados muestran gran repetitividad con error cercano a 3% [3].

En 2009 Reese *et al.* elaboraron un sistema para adquisición de imágenes de diferentes perspectivas de manzanas utilizando para ello arreglos de espejos planos y parabólicos [4]. En sus pruebas se utilizó una manzana suspendida por un cordel delgado; los espejos fueron colocados a su alrededor y la fruta fue rotada en diferentes direcciones para examinar la eficacia de los diferentes arreglos

de espejos. Los autores concluyen que la configuración del arreglo de espejos no produce una diferencia significativa, no así la posición del fruto.

En 2013, Delwich *et al.* realizaron un análisis de granos de trigo para encontrar defectos mediante el procesamiento de imágenes de alta velocidad adquiridas durante la caída libre de los granos, apoyados de espejos para obtener distintas vistas de los mismos [5]. Se extrajeron 7 propiedades básicas como área, volumen proyectado, perímetro, etc. Afirman que 82% de la superficie del grano es examinada por la combinación de las vistas frontal y laterales.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Sistema de adquisición de imágenes

Partiendo del estudio de diversos arreglos existentes en la literatura, dentro de los cuáles destaca la patente US 20100155580A1 [6], se diseñó un arreglo de cuatro espejos (y un 5to auxiliar) para lograr dos vistas perpendiculares entre sí de un objeto simultáneamente. El diseño se presenta en la Fig. 1. Y su realización física en la Fig. 4.

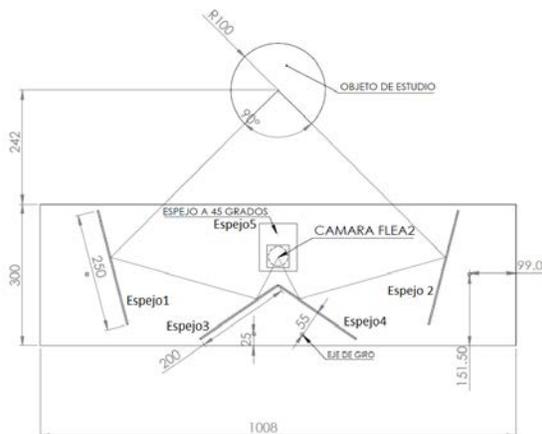


Figura 1 Diseño del montaje de espejos, vista superior. Se identifica la posición de los espejos, la cámara y el producto a ser examinado (dimensiones en mm).

Definido el arreglo de espejos, se diseñó una base giratoria motorizada para rotar objetos de prueba alrededor de su eje vertical. El diseño se muestra en la Fig. 2. El mecanismo de la base incluye un motor a pasos con una precisión de una fracción de grado/pulso. El accionamiento de la base giratoria es controlado por una tarjeta de potencia PCB diseñada para recibir los datos provenientes de un dispositivo Arduino.

El tercer elemento del sistema de adquisición consiste de un par de luces que proporcionan ilu-

minación uniforme y regulable y que fueron colocadas una al centro, de manera colineal al eje de visión de la cámara para iluminar el perfil del objeto y otra a un lado del espejo izquierdo (respecto del diagrama mostrado en la Fig. 1) para iluminar la parte frontal del objeto. Además, también se utilizó un proyector de una línea de luz láser que permitió un mecanismo alternativo para observar el perfil de los objetos examinados con una forma caprichosa.



Figura 2 Sistema de base giratoria. Modelo del mecanismo (izquierda) e implementación final (derecha).

El sistema en su totalidad (arreglo de espejos, set de cámara, base giratoria, luces y fondo opaco), genera un entorno controlado con el cual se obtienen imágenes con buena calidad en cuanto a iluminación, ruido despreciable y ángulo entre capturas preciso. Para las pruebas reportadas, se usa un valor de aprox. 5.5 grados de rotación entre imágenes. El tipo de imágenes capturadas se ilustra en la Fig. 3 para uno de los objetos de prueba.



Figura 3 Ejemplo de imagen de un objeto de prueba mostrando doble vista simultánea.

Por cada imagen en color también se obtuvo una imagen de dos vistas utilizando el proyector de línea de luz láser (Fig. 5). A partir de tales imágenes es posible recuperar el perfil del objeto cuando éste no se observa debido a alguna curvatura caprichosa del objeto.

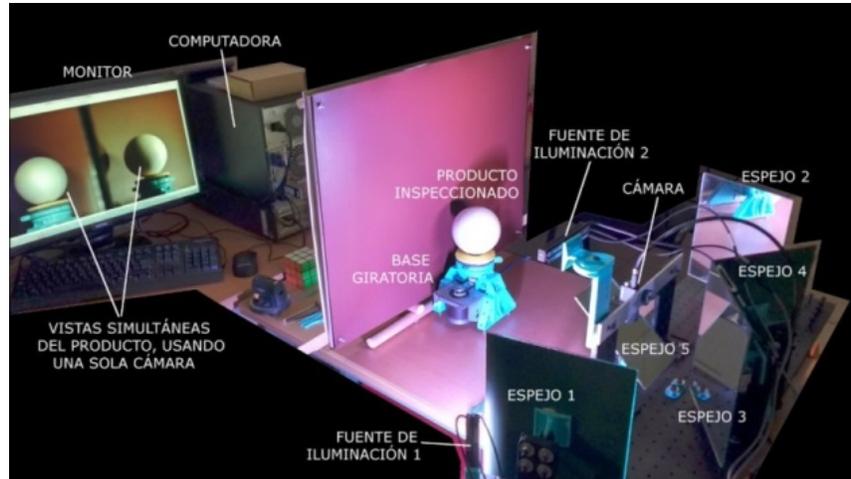


Figura 4 Disposición física del montaje de espejos.

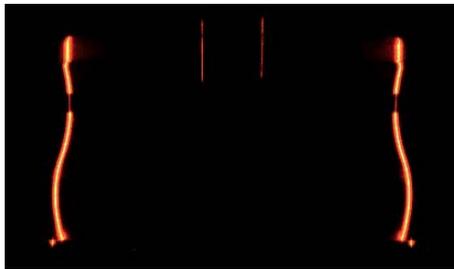


Figura 5 Contorno obtenido con láser correspondiente al objeto en la Figura 3.

B. Interfaz de programa

Se desarrolló una interfaz gráfica para el usuario (Fig. 6) que permite la presentación de la superficie reconstruida del producto inspeccionado y seleccionar por medio de botones métodos de estimación de área (se describen más adelante) así como dar datos del producto.

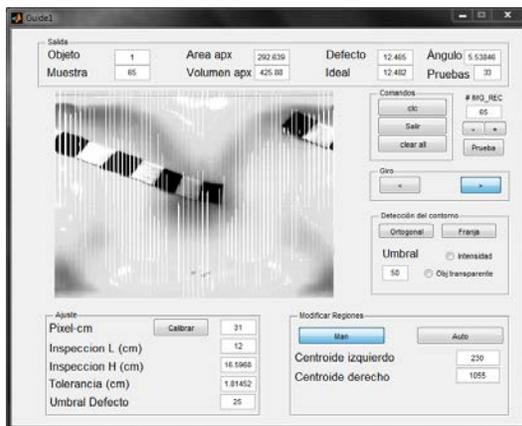


Figura 6 Interfaz de usuario desarrollada.

IV. RUTINAS PARA ESTIMACIÓN DE ÁREA

Para obtener un estimado objetivo del área superficial es necesario aplicar correcciones a las regiones observadas como se ilustran en la Fig. 7. Obsérvese que el tamaño real del segmento $\overline{12}$ (vista superior) es mayor que el aparente (vista frontal) y una corrección llamada horizontal debe realizarse. Similarmente, el tamaño del segmento \overline{AB} requiere una corrección vertical. Tras aplicar las correcciones requeridas a los segmentos $\overline{12}$, $\overline{23}$, $\overline{34}$ y $\overline{14}$, puede estimarse el área real de la región contenida por los mismos. Esto se hace para toda la superficie del objeto examinado, de modo que se estima su área superficial total y el área del defecto simulado. Esta última se compara con su valor real conocido para medir la precisión de cada método presentado.

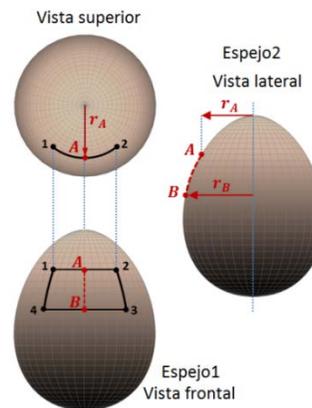


Figura 7 Relación geométrica entre puntos sobre un objeto en distintas vistas. La curvatura del objeto oculta el verdadero tamaño de su superficie.

En la siguiente exposición, nótese que cada método produce un estimado del contorno (perfil de objeto en vista lateral) por cada imagen para la reconstrucción; dicho valor es almacenado en un vector identificado como \mathbf{x} .

A. *M1: Por imagen de vista lateral*

El método M1 extrae el borde o perfil del objeto (vector \mathbf{x}) en cada imagen a partir de la vista lateral (Fig. 7) mientras que simultáneamente dispone de la vista frontal para extraer la textura usada para caracterizar la superficie. La curvatura existente en el perfil establece la corrección necesaria. La ventaja de este método es estimar un borde sin la necesidad de agregar más herramientas al sistema. La Fig. 8 presenta el pseudocódigo de este método.

M1: Estimar contorno por vista lateral

Entrada: imagen de vista lateral de un objeto.

- 1- Remover elementos internos de la imagen (aproximación al contorno).
- 2- Aplicar filtro de media, tamaño 9×9 .
- 3- Aplicar umbral para binarizar las regiones difuminadas por el filtro de media. Se genera la secuencia de píxeles que definen el contorno del objeto.

Salida: Contorno estimado (vector \mathbf{x}) del objeto

Figura 8 Pseudocódigo del método M1.

B. *M2: Mediante línea de luz láser*

El método M2 parte del mismo principio que el M1. Sin embargo, en este caso se utiliza una línea de luz láser para determinar el perfil del objeto de prueba. La ventaja de este método es que puede extraer el perfil del objeto aun cuando éste posee una forma caprichosa con concavidades y protuberancias que dificultan la observación directa del perfil en la vista lateral. El pseudocódigo se presenta en la Fig. 9.

C. *M3: Redundancia de línea láser*

El método M3 es muy similar al M2, puesto que también utiliza una línea de luz láser. La diferencia consiste en que M3 es más robusto pues extrae el perfil del objeto de ambas vistas (frontal y lateral); es decir, usa redundancia de información para extraer el vector \mathbf{x} de manera más confiable. La ventaja de este método es más clara cuando se examinan objetos translúcidos, en donde es posible perder secciones de la línea de luz en alguna vista. El pseudocódigo del método M3 se presenta en la Fig. 9. Los métodos M1, M2 y M3

estiman el contorno del objeto examinado en cada imagen de una secuencia. A pesar de utilizar un principio en común, muestran resultados distintos. Cada vector de borde \mathbf{x} , es almacenado en una matriz de contornos, \mathbf{X} . En adelante, nos referimos al número total de imágenes en una secuencia para reconstrucción por N , de modo que en general \mathbf{X} es de tamaño $N \times C$. El número de columnas C se establece a partir de la altura del objeto inspeccionado.

M2 y M3: Estimar contorno por línea láser

Entrada: imagen de la base de datos (2 vistas).

- 1- Generar una imagen que fusione ambas vistas de la línea de luz láser combinándolas en un único haz.
- 2- Determinar contorno mediante:
 - a. M2: valor de máxima intensidad.
 - b. M3: punto lateral derecho.
- 3- Filtro de media, tamaño 9×9 .
- 4- Aplicar umbral para binarizar las regiones difuminadas por el filtro de media. Se genera la secuencia de píxeles que definen el contorno del objeto.

Salida: Contorno estimado (vector \mathbf{x}) del objeto

Figura 9 Pseudocódigo de los métodos M2 y M3

A continuación se describen las funciones que generan las correcciones para la caracterización de superficie y cálculos de área y volumen.

• $[\mathbf{R}, \mathbf{M}, A] = VLength_Correction(\mathbf{X}, \theta)$ recibe los argumentos \mathbf{X} y θ (ángulo entre imágenes de una secuencia) y regresa las variables \mathbf{R} , \mathbf{M} , y A , que se describen a continuación. La matriz \mathbf{A} almacena los valores de cada segmento circular (Fig. 7), es decir, contiene la medida de los arcos a partir de los cuáles se realizará la reconstrucción (función *outputImage*):

$$\mathbf{R}(j, k) = \frac{\pi\theta}{180} \mathbf{X}^T(j, k) \quad (1)$$

El vector \mathbf{M} de longitud N almacena el tamaño máximo de cada sección de reconstrucción (cada fila) de la matriz \mathbf{R} ; con esto se reservan las dimensiones necesarias para la construcción de la imagen de salida \mathbf{I} :

$$\mathbf{M}(j) = \max\{\mathbf{R}(j, k)\}_{k=1}^K \quad (2)$$

Con esto, pueden definirse las dimensiones, ancho y largo (X, Y), necesarias para la construcción de \mathbf{I} , mediante $X = H$, y:

$$Y = \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{M}(i) \quad (3)$$

Finalmente, A es el valor del área total de la sección de inspección, en pixeles de modo que $A_{cm2} = A/(PixPerCm^2)$. El valor de A es:

$$A = \sum_{j=1}^H \sum_{k=1}^{N-1} \mathbf{A}(j, k) \quad (4)$$

- $V = volume(\mathbf{X}, \theta)$ recibe como argumentos \mathbf{X} y θ , y a partir de estos estima un volumen V . Comienza por dividir la sección de inspección establecida por el usuario en H cortes, cada uno con altura $h = 1$ pixel. Cada corte está compuesto por sectores de disco definidos por un ángulo θ fijo y un radio establecido por la distancia del borde respecto del eje de rotación, disponible en los vectores de contorno almacenados en \mathbf{X} . Con esto es posible determinar el área de cada sector, después, el área por corte y finalmente estimar volumen total en pixeles mediante la sumatoria del área de cada corte:

$$V = \sum_{j=1}^H \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\pi\theta}{360} (\mathbf{X}^T)^2(j, k) \quad (5)$$

- $\mathbf{C}_H = HLength_correction(\mathbf{X}, N)$; toma como argumentos la matriz de vectores de borde, \mathbf{X} y el número de imágenes consideradas por reconstrucción, N . Con esto se determina la distancia entre los valores del vector de contorno, mediante el uso de la distancia Euclídea; esto es, la distancia aproximada real pixel a pixel en el contorno de la imagen.

- $\mathbf{P} = Polar_correction(\mathbf{X}, \theta, N)$ produce una matriz \mathbf{P} que, a diferencia de \mathbf{C}_H no representa una corrección dentro de la imagen del objeto en una posición particular, sino una corrección calculada entre imágenes del objeto en distintas posiciones. Se calculan las correcciones definidas por el ángulo θ y los valores de los contornos detectados y disponibles en \mathbf{X} .

- $Output_Image(img, A)$ ejecuta el proceso final para obtener la imagen \mathbf{I} que presenta la superficie del objeto. También produce los conteos de área del defecto: $PixCount$, $PixCount_V$, y $PixCount_{VH}$ en pixeles, que corresponden a dicha área estimada con tres variaciones: conteo directo ($PixCount$), conteo ajustado por corrección ver-

tical ($PixCount_V$) y por corrección vertical y horizontal ($PixCount_{VH}$).

V. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La metodología adoptada en este trabajo consiste en la realización de varios experimentos en donde se obtienen medidas del área de defectos simulados por medio de los distintos métodos descritos en la sección anterior. La Fig. 10 muestra el pseudocódigo del proceso general de estos experimentos, en donde se ubican las funciones descritas en la sección anterior. Como se aprecia además de cambiar los métodos de estimación del área, también se estableció como variable la cantidad de imágenes, N usadas en la caracterización de la superficie de cada objeto; esto es, se realizó la caracterización usando subconjuntos desde 2 hasta 65 imágenes por objeto. Además, para cada variante de estos experimentos, se realizaron 33 réplicas usando una imagen inicial distinta seleccionada de forma aleatoria, para dar soporte estadístico a nuestros resultados.

Procedimiento general de la metodología empleada en los experimentos

```

1  Usuario establece región para caracterizar.
2  For  $N=2$  to 65 (número de imágenes) do:
3    For  $p=1$  to 33 (total de pruebas) do:
4      Asignar al azar imagen de inicio  $Img$ .
5      For  $r=1$  to  $N$  do:
6        Obtener Matriz de Contornos  $\mathbf{X}$ 
          por un método (M1, M2 o M3).
7        % Aplicar correcciones:
           $VLength\_correction(\mathbf{X}, \theta)$ .
           $HLength\_correction(\mathbf{X}, R)$ .
8        % Procesar la siguiente imagen
           $Img = Img + step$ .
9      End (ciclo de línea 5).
10     % Dar resultados de  $p$ -ésima prueba.
11     Calcular área y volumen total
           $V = volume(\mathbf{X}, \theta)$ .
          Calcular área de defecto.
13    End (ciclo de línea 3)
14    Calcular medidas estadísticas sobre
          las 33 réplicas realizadas con  $N$  fijo.
15  End (ciclo de línea 2)
```

Figura 10 Pseudocódigo del proceso realizado por el sistema propuesto para pruebas experimentales.

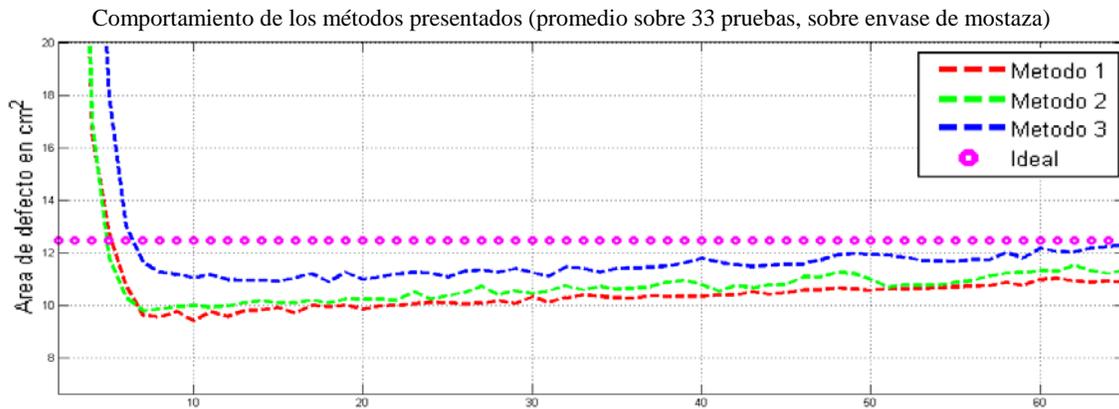


Figura 11 Gráfica del área del defecto simulado en la superficie de un objeto como función de las imágenes usadas

La Fig. 11 ilustra los resultados obtenidos con los distintos métodos para un objeto de prueba. Se grafica el área estimada del defecto como función de la cantidad de imágenes usadas. Esta gráfica es un ejemplo muy representativo de los resultados obtenidos para el resto de los objetos de prueba.

TABLA 1 RESUMEN DE RESULTADOS DE ESTIMACIÓN DE ÁREA DE DEFECTOS CON LOS DISTINTOS MÉTODOS DESCRITOS.

Área ideal de defectos: 12.48 cm ²						
Obj.	Envase de Mostaza		Vaso cónico		Botella Tupperware	
	Área (cm ²)	Dif (%)	Área (cm ²)	Dif (%)	Área (cm ²)	Dif (%)
Ref.*	9.01	27.7	10.18	18.4	7.07	43.3
Método M1						
C	10.16	18.6	11.03	11.6	7.16	42.6
R	10.24	17.9	11.22	10.1	7.55	39.5
V	11.51	7.7	12.07	3.3	8.26	33.8
VH	13.02	4.3	12.26	1.7	8.39	32.7
Método M2						
C	10.93	12.4	10.72	14.1	7.14	42.7
R	11.12	10.9	11.2	10.2	7.47	40.1
V	11.84	5.1	12.02	3.7	8.30	33.4
VH	12.21	2.1	12.05	3.4	8.56	31.3
Método M3						
C	10.71	14.1	10.81	13.3	7.14	42.7
R	10.74	13.9	10.89	12.7	7.25	41.9
V	11.69	6.3	12.29	1.5	8.27	33.7
VH	12.20	2.2	12.36	0.9	8.88	28.8

* Área de error con 4 imágenes para reconstrucción

C: conteo directo, **R:** en reconstrucción, **V:** corrección vertical, **VH:** con corrección vertical y horizontal

Como puede observarse en la gráfica presentada en la Fig. 11, los tres métodos presentados muestran un comportamiento similar entre sí. En todos los casos se observa que cuando la cantidad

de imágenes usadas en la caracterización de superficie es pequeña (menor a 7), la estimación del área carece de precisión. Sin embargo, cuando se aumenta la cantidad de imágenes (mayor a 10), el error en la estimación está acotado a aproximadamente 20% pero generalmente es menor.

El resumen de los resultados generados, considerando las 33 réplicas realizadas sobre la selección de tres objetos de prueba se muestra en la Tabla 1. Se muestran los valores promedio obtenidos del área de defecto y el error absoluto contra el área ideal conocida, como porcentaje. Se presenta también el efecto de variar el método de conteo utilizado dentro de cada método de estimación. Puede apreciarse que el método M2 (con línea de luz láser) es más efectivo en el caso del 1er objeto de prueba (envase de mostaza); esto se debe a que su perfil es obstruido en ocasiones por su misma forma y la línea de luz láser ayuda a evitar este problema. En cambio, el método M1 es en promedio mejor para el 2do objeto (vaso cónico) pues en este caso sus bordes son claramente detectables visualmente. En el caso del tercer objeto (botella de plástico) el menor error se obtiene con el método M3. Este objeto es translúcido y de forma caprichosa, por lo que otros métodos tienen problemas en la extracción de su perfil, mientras que M3 fue diseñado para superar esas dificultades.

La precisión de los métodos presentados aumenta a medida que se emplean más imágenes, sin embargo el costo computacional crece significativamente. La experimentación determinó una mejora del 9.6% (vs método tradicional) utilizando 15 imágenes y de 19.6% utilizando 50. El menor

error en todos los casos se obtuvo con el método de conteo que incluye correcciones vertical y horizontal, destacando la importancia de realizar ambas correcciones.

La medición obtenida para la reconstrucción precisa de la superficie de un objeto de prueba (envase de mostaza) se muestra en la Fig. 12, donde los colores cálidos representan regiones de la superficie más alejadas del eje de rotación del objeto y los colores fríos indican regiones más cercanas a dicho eje. Nótese que esto efectivamente corresponde a las zonas de la superficie del objeto con curvatura convexa y cóncava, respectivamente.

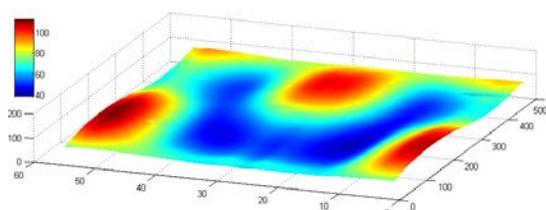


Figura 12 Corrección necesaria calculada para reconstrucción de superficie (envase de mostaza).

Finalmente, la Fig. 13 muestra un ejemplo de la reconstrucción tridimensional de la forma de un objeto de prueba (envase de mostaza). Como se discutió anteriormente, la medición de las características superficiales del objeto (en este caso los defectos simulados) se llevan a cabo previamente a la presentación de la superficie reconstruida, pero de ser requerido, el sistema puede presentar la reconstrucción de la forma 3D, como se ilustra en la Fig. 13

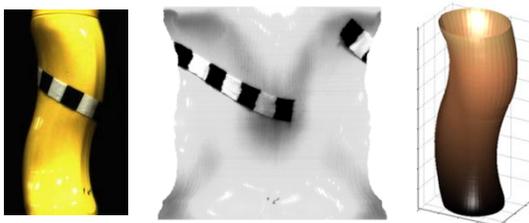


Figura 13 Reconstrucción 3D de objeto de prueba (envase de mostaza) mediante sistema de vista múltiple. Objeto real (izq.), superficie medida (centro) y reconstrucción 3D (der.)

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se diseñó e implementó un sistema integral para inspección visual de productos a través de dos vistas simultáneas y se presentaron tres métodos para llevar a cabo la caracterización de la superficie de los productos. Un aspecto importante fue experimentar en un rango del número de imá-

genes por revolución del producto, desde 2 imágenes hasta 65, pues los resultados nos indican que no es necesario exigir una cantidad muy superior a 10 imágenes para obtener medidas confiables que cumplan con requerimientos típicos de inspección.

Los experimentos presentados nos ofrecen conocimiento respecto a parámetros y rangos operativos del sistema que posibilita tomar decisiones informadas para su mejora y utilización, lo cual no era posible antes de la realización de este trabajo. A futuro se considera estudiar el efecto de la distancia entre la superficie del objeto respecto al foco de la cámara así como mejorar el sistema para un entorno real.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias a los apoyos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT): CÁTEDRAS-2598 (A. Rojas) y 415352 (C. R. Mayoral).

REFERENCIAS

- [1] J.-D. L. Elias N. Malamasa, Euripides G.M. Petrakisa, Michalis Zervakisa, Laurent Petitb, "A survey on industrial vision systems, applications and tools," 2003.
- [2] J. M. de la C. G. Gonzalo Pajares Martinsanz, "Visión por computador: Imágenes digitales y aplicaciones," p. 768, 2008.
- [3] J. D. Eifert, G. C. Sanglay, D. Lee, S. S. Sumner, and M. D. Pierson, "Prediction of raw produce surface area from weight measurement," vol. 74, pp. 552–556, 2006.
- [4] D. Reese, A. M. Lefcourt, M. S. Kim, and Y. Martin Lo, "Using parabolic mirrors for complete imaging of apple surfaces," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 19, pp. 4499–4506, 2009.
- [5] S. R. Delwiche, I. C. Yang, and R. A. Graybosch, "Multiple view image analysis of freefalling U.S. wheat grains for damage assessment," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 98, no. 5, pp. 62–73, 2013
- [6] R. Kwinrandt, "Bottle Inspection Apparatus with Image-Corrected Mirror Cabinet", Patent US20100155580 A1, App. 12/641, 445, 2010.