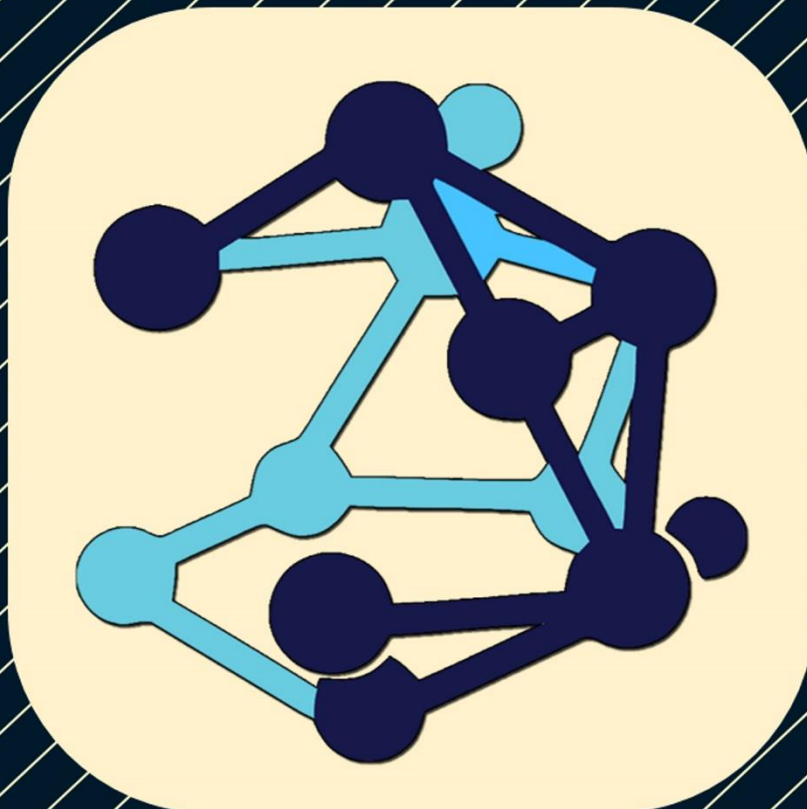


Señales, Circuitos y Sistemas Multidisciplinar

I. Campos Cantón
J. A. Vértiz Hernández



UASLP

Señales, Circuitos y Sistemas Multidisciplinar

Isaac Campos Cantón
Facultad de Ciencias

Juan Alberto Vértiz Hernández
Facultad de Ciencias
Instituto de Investigación en Comunicación Óptica

Tecnología y ciencias aplicadas

Colección: Señales Caóticas, Biológicas y Electrónicas.

© Isaac Campos Cantón, Juan Alberto Vértiz Hernández.
D. R. © Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2020.

Edición a cargo M. C. Juan Alberto Vértiz Hernández y Dr. Isaac Campos Cantón

Diseño editorial: M. C. Juan Alberto Vértiz Hernández

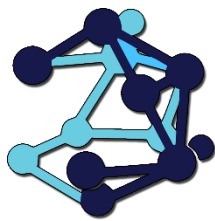
Señales, Circuitos y Sistemas Multidisciplinar by Isaac Campos Cantón y Juan Alberto Vértiz Hernández is licensed under CC BY-NC-ND 4.0



ISBN: 978-607-535146-9 (e-Libro)

Este libro es una publicación de acceso abierto, tiene la licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso, intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor (es) original (es) y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Este libro está incluido en la licencia Creative Commons del libro, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del libro y su uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor. El uso de nombres descriptivos generales, nombres registrados, marcas comerciales, marcas de servicio, etc. en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que dichos nombres estén exentos de las leyes y regulaciones de protección pertinentes y, por lo tanto, libres para uso general. Podemos asumir con seguridad que los consejos y la información de este libro se consideran verdaderos y precisos en la fecha de publicación. Ni el editor ni los autores o los editores dan garantía, expresa o implícita, con respecto al material contenido en este documento o por cualquier error u omisión que pueda haberse cometido. El editor se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y afiliaciones institucionales.

La obra de arte de la cubierta fue diseñada por Juan Alberto Vértiz Hernández. Esta versión es publicada por la Colección de Señales Caóticas, Biológicas y Electrónicas del laboratorio de electrónica no lineal, en la Facultad de Ciencias de Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



Comité Organizador del SCyS 2019.

Dr. Isaac Campos Cantón.

Dr. Roberto Martínez Montejano.

Dr. Luis Javier Ontañón García.

M. C. Juan Alberto Vértiz Hernández.

Prólogo	VI
1. Implementación de un Modelo Matemático y Electrónico de una Célula Excitable	1
2. Time Delay Electronic Circuit	12
3. Controlador PID en aplicaciones AFM	22
4. Estudio de Soportes Poliméricos de Poli(Ácido Láctico)/Quitosano para su Potencial uso en la Regeneración de Piel	31
5. Uso de Termografía en Pruebas de Calidad de Manufactura	49
6. Bifurcación Automática del Atractor Caótico Rössler Usando Ni MyDAQ y Arduino	58
7. Selección de Series Temporales Caóticas como Criterio de Seguridad para Sistemas de Cifrado	71
8. Introducción a Criptografía Post-cuántica y Algoritmos de Cifrado Lightweight	87
9. Electroluminescent Characterization of Commercial Solar Panels	91
10. Análisis Multiresolución y Aprendizaje Profundo para Detección de Patrones Característicos en la Navegación Aérea	97
11. Síntesis y análisis estructural del pigmento $Zr_{1-x} PrSiO_4$ a partir de óxidos precursores ZrO_2, SiO_2 y Pr_6O_{11}	106

Prólogo

El descubrir como interactúan átomos de una misma especie es sumamente fascinante; posteriormente tratar de comprender como sería la compatibilidad si es que la hay entre átomos A y átomos B, se vuelve un reto; o ¿cómo se transmite la información de neurona a neurona?, ¿cómo se puede inhibir esta comunicación?, son ejemplos de temas de hacer ciencia, como bien lo dice el tema de la Facultad de Ciencias de la UASLP: “Descubrir lo creado es crear la ciencia”. Posterior al realizar ciencia, se debe ver cómo hacerla útil, como la podemos manejar en beneficio de la sociedad, es decir, como hacer tecnología. Con esto en mente a partir del año 2011 se realiza una reunión anual entre investigadores y estudiantes de la Facultad de Ciencias, los diferentes campus de la UASLP: Salinas, Matehuala, Rio Verde, Tamazunchale, y otras universidades como la Universidad de Guadalajara y Universidad de Nuevo León, así como también el IPICYT que es un centro de investigación CONACyT. En esta reunión se busca fortalecer los lazos entre los diferentes campos de investigación y establecer un vínculo entre ciencia básica y la tecnología. Algunos de los temas de investigación y tecnología presentados son: Modelo a escala de laboratorio para el tratamiento físico-químico de agua residual doméstica para obtener una calidad de riego, uso de termografía en pruebas de calidad de manufactura, introducción a criptografía post-cuántica y algoritmos de cifrado lightweight, bifurcación automática del atractor caótico Rössler usando NI myDAQ y Arduino, instrumentación por superficies de circuitos lógicos, etc. Con los temas de investigación presentados se han creado lazos de cooperación entre los participantes y generando nuevas redes de investigación. Es por ello necesario documentar por escrito los diferentes temas presentados en esta reunión anual, y tener la bibliografía generada al alcance de otros grupos de investigación para reforzar o innovar nuevos esquemas de investigación o tecnologías aplicadas. Así en este documento quedan registrados los diferentes problemas de investigación y tecnología del año 2019 tratados por los expositores. Finalmente damos las gracias a todos los investigadores participantes presentes y no presentes, así como a los estudiantes que colaboraron para poder llegar a buen término el desarrollo de este evento.

1 | Implementación de un Modelo Matemático y Electrónico de una Célula Excitable

J. A. Vértiz Hernández¹, I. Campos Cantón², A. J. Rangel López³, A. A. Vértiz Hernández⁴.

Resumen

En este trabajo se implementa el comportamiento del potencial de acción de forma eléctrica generado por una neurona. Un punto importante de este trabajo es la propuesta experimental a través de circuitos RC asociados a los canales iónicos de Na^+ y K^+ . En este modelo eléctrico se incorporan las dendritas encargadas de excitar a la neurona también se modelan por circuitos RC. Por otro lado, el modelo matemático se toma como una función lineal por partes. Para comprobar lo anterior, es necesario recrear el comportamiento por simulación numérica o a través de simuladores electrónicos, la cual corroborará si el dispositivo propuesto es el adecuado.

Palabras clave: Potencial de acción, circuitos RC, Ecuaciones diferenciales.

¹J. A. Vértiz Hernández (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.

e-mail. vertizalberto@gmail.com

²A. J. Rangel López (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Coordinación Académica Región Altiplano Carretera Cedral km 5+600, Ejido San José de las Trojes, 78700, Matehuala, S.L.P., México.

e-mail. azahel.rangel@uaslp.mx

³A. A. Vértiz Hernández (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Coordinación Académica Región Altiplano Carretera Cedral km 5+600, Ejido San José de las Trojes, 78700, Matehuala, S.L.P., México.

e-mail. antonio.vertiz@uaslp.mx

⁴I. Campos Cantón (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Facultad de Ciencias, Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295, San Luis Potosí, S.L.P., México.

e-mail. icampos@fciencias.uaslp.mx

1. Introducción

Las neuronas son un tipo de célula especializada del cuerpo humano que tienen la capacidad de ser excitadas y de transmitir la información en forma de un impulso eléctrico. Estos impulsos son generados por el intercambio iónico entre el líquido extracelular y el intracelular. La curva eléctrica que genera este intercambio iónico se le conoce como potencial de acción. Este, consta de 3 fases principalmente: la fase de crecimiento o despolarización, la fase de caída o repolarización y la de post-hiperpolarización; y cada una de estas fases se caracteriza por la entrada o salida de un ion en específico [5].

Primero, en la fase de crecimiento se va a dar la despolarización de la membrana celular debido a la apertura de canales de sodio (Na^+) dependientes de voltaje. Como su nombre lo dice, estos canales se abren ante la presencia de un estímulo eléctrico. Consecuentemente a la apertura de estos canales, el Na^+ entra a la célula debido al gradiente eléctrico que existe para este ion. Al mismo tiempo que se abren estos canales, los canales de potasio (K^+) dependientes de voltaje se empiezan a abrir. Sin embargo, estos canales son más lentos que los del sodio. Por lo tanto, la entrada abrupta de sodio a través de sus canales es la responsable de la fase de crecimiento del potencial de acción de las neuronas [5].

Así mismo, antes de que el potencial de acción llegue al potencial de equilibrio para el Na^+ , estos se cierran abruptamente y los canales de K^+ dependientes de voltaje terminan de abrirse, indicándonos el comienzo de la fase de caída. La apertura de estos canales permite la salida del K^+ de la célula, lo cual ocasiona la caída del potencial de acción. A medida que este va cayendo, los canales de K^+ van cerrándose lentamente al acercarse al potencial de equilibrio del K^+ . Debido a la lentitud de cierre de estos canales, en la curva de potencial de acción se ve el descenso por debajo del potencial de reposo de la neurona, lo cual nos señala la permanencia de la permeabilidad de iones K^+ al espacio extracelular con el objetivo de llegar a su potencial de equilibrio. A este pequeño descenso del potencial por debajo del potencial de reposo se le conoce como hiperpolarización. Sin embargo, llega el punto en el que los canales de K^+ se cierran por completo y se detiene la salida de este ion, permitiendo que la membrana regrese a su potencial de reposo en la fase post-hiperpolarización y en espera del siguiente estímulo eléctrico [5].

Por otro lado, existen reportes en la literatura en los que se ha tratado de simular el funcionamiento de una neurona lo más apegado a la fisiología que conocemos. Por ejemplo, la Dra. Chay en 1985, trató de representar los comportamientos caóticos de los eventos iónicos que toman lugar en la membrana de las neuronas mediante un modelo que consistía en 3 ecuaciones diferenciales de primer orden no lineales [1]. También, en 2003, el Dr. Izhikevich presentó un modelo en el cual reprodujo los potenciales y el comportamiento de los diferentes tipos de neuronas corticales [3]. De igual manera, Nagumo et. al en 1962, reportaron una línea de transmisión en pulso utilizando diodos túnel [4]. Basados en estas ideas y en el trabajo de Hodgkin y Huxley [2] se toman como antecedente para este proyecto.

Basados en el trabajo de Hodgkin y Huxley [2] de modelar la neurona como circuito eléctrico, se realiza esta propuesta con apego a los perfiles en la capacitancia de la membrana celular y sus potenciales de reposo, así como en sus valores respectivos de conductancia para los canales de Na^+ y K^+ . La propuesta consiste en utilizar un circuito RC para modelar cada canal en la membrana celular, ello se verá reflejado en el modelado matemático como un circuito lineal por partes, una parte corresponde a la tiempo de despolarización, la otra al tiempo de hiperpolarización y la última al restablecimiento del potencial de acción. Así mismo, la señal eléctrica de entrada a la neurona se realiza a través de las dendritas.

2. Modelo propuesto

Este trabajo se basa en el modelo postulado por Hodgkin y Huxley (HyH) en 1952 [2]. De la tabla 3 de su artículo, se toman los valores de las conductancias del Na^+ y K^+ (g_{Na^+} y g_{K^+} respectivamente), y el valor de la capacitancia asociada a la membrana celular (C_M) calculados por estos autores. Los valores son: $g_{Na^+} = 120 \text{ m mho/cm}^2$, $g_{K^+} = 36 \text{ m mho/cm}^2$ y $C_M = 1 \text{ uF/cm}^2$. Como los datos se expresan por unidad de área, se tomó un mínimo y un máximo del diámetro del axón de calamar gigante cual se encuentra entre 0.5 mm y 1 mm . Con ello el área (A) está entre $\pi/16 \text{ mm}^2 < A < \pi/4 \text{ mm}^2$, por lo tanto: $0.2356 \text{ m mho} \leq g_{Na^+} \leq 0.9424 \text{ m mho}$, $0.0706 \text{ m mho} \leq g_{K^+} \leq 0.2827 \text{ m mho}$ y $1.96 \text{ nF} \leq C_M \leq 7.85 \text{ nF}$. Con estos valores y conociendo la respuesta del potencial de acción descrita en la Fig. 8.9 por Silverthorn en 2009 [5], se calcula el valor de la

conductancia de la membrana celular de la neurona (g_0). En su Fig. 8.9, Silverthorn describe el potencial de acción en el que se puede apreciar que en 3 ms los canales iónicos del Na^+ y K^+ tienen su actividad completa (Fig. 1).

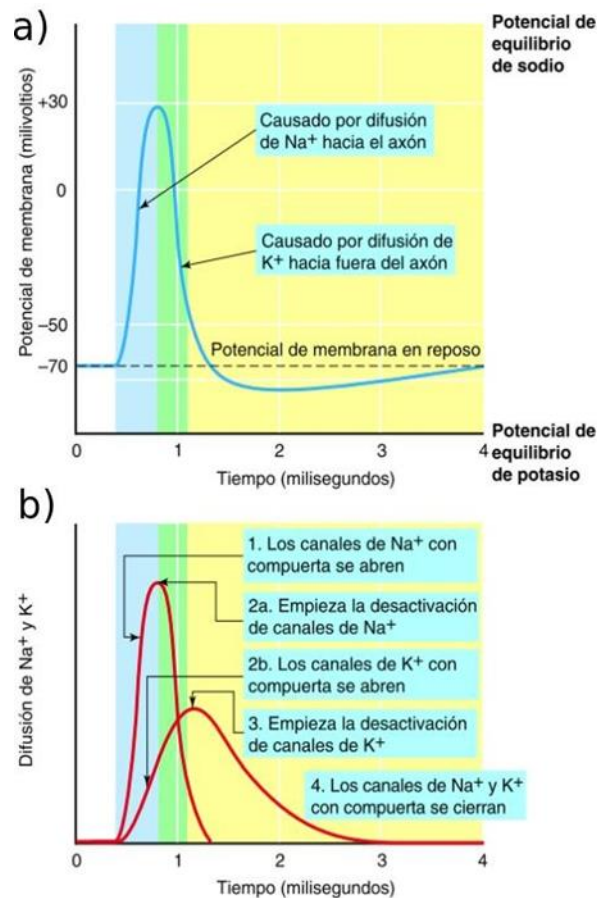


Fig. 1. a) Potencial de membrana, b) difusión de Na^+ y K^+ .

Por lo tanto, se utiliza el intervalo de 3 a 4 ms (que corresponde a la inactivación de los canales de Na^+ y K^+) y el modelo descrito por HyH (fig. 2) para calcular la conductancia de la membrana. Para esto, considere que la membrana celular funciona como un circuito eléctrico con un componente RC, entonces, su respuesta se compone de la respuesta natural y la respuesta forzada. Así, se puede describir el comportamiento de la membrana mediante la siguiente ecuación:

$$V_T = V_0 e^{-t/\tau} + V_f$$

Donde $\tau = RC, V_T(0) = -77mV$ y $V_f = -70mV$. Resolviendo la ecuación para τ y bajo la premisa de que la conductancia (g) de una resistencia es inversamente proporcional al valor de esta, se calcula el valor de g_0 como $0.024m mho$, para un valor promedio de la capacitancia.

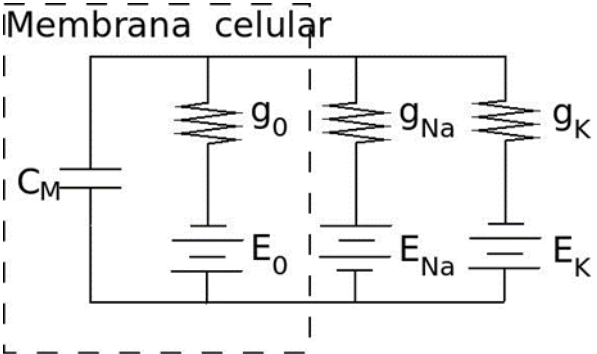


Fig. 2. Ilustración del modelo HyH; la línea punteada comprende la membrana celular.

Así mismo, basados en la curva del potencial de acción (Fig. 1a), se observa que la despolarización es causada por el transporte de Na^+ hacia el interior de la célula y la hiperpolarización es causada por el transporte de K^+ hacia el exterior de la célula. Por consiguiente, para cada ion existe una diferencia de carga extracelular e intracelular. Esto, hablando en términos de circuitos eléctricos, representa agregar un efecto capacitivo por cada elemento. Entonces, bajo estas suposiciones, el circuito eléctrico HyH es modificado como se muestra en la Fig. 3.

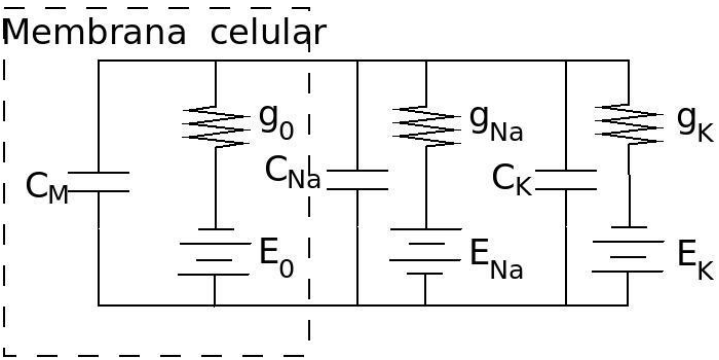


Fig. 3. Ilustración del modelo HyH incluyendo la capacitancia del canal de Na^+ y la del canal de K^+

A continuación, se calcula el valor de la capacitancia del Na^+ (C_{Na^+}) y la del K^+ (C_{K^+}) basándonos en el tiempo ilustrado en la Fig. 1. El tiempo de despolarización y repolarización se estima en $0.42ms$ y $1.12ms$ respectivamente. Para calcular C_{Na^+} se utiliza el tiempo de despolarización con lo cual se obtiene una capacitancia de $50.48nF$ en promedio. Por otro lado, para C_{K^+} se utiliza el tiempo de repolarización y se obtiene un valor de $39.74nF$ en promedio. Por lo tanto, el modelo propuesto puede verse como 3 estructuras base: 1) las dendritas y la membrana celular, 2) los canales de sodio tomando en cuenta su capacitancia y 3) los canales de potasio considerando su capacitancia como puede observarse en la Fig. 4.

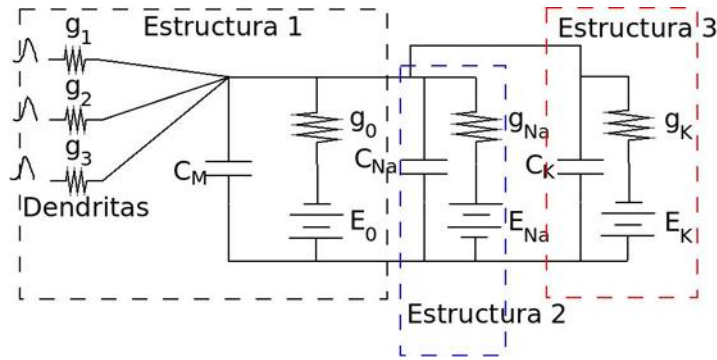


Fig. 4. Ilustración del modelo propuesto.

3. Modelo Matemático

a. Dendritas y Membrana Celular

El modelo eléctrico de la estructura 1 se muestra en la Fig. 5. Para obtener la ecuación representativa de esta estructura, se usa la Ley de Kirchhoff que dice; que la sumatoria de las corrientes es igual a cero.

$$C \frac{dV_M}{dt} + (g_1 + g_2 + g_0)V_M - g_1V_{DD1} - g_2V_{DD2} + g_0E_0 = 0 \quad (2)$$

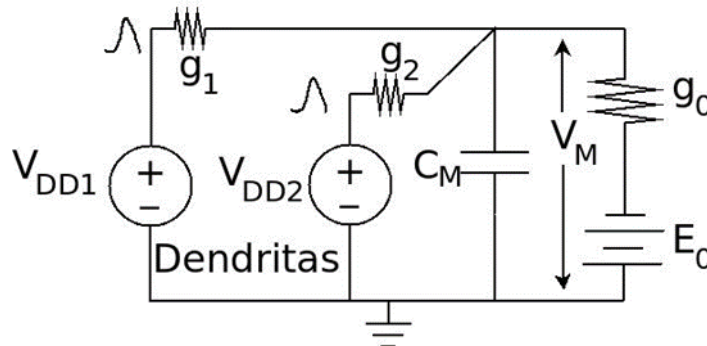


Fig. 5. Estructura 1: dendritas y membrana celular.

La respuesta natural (V_{Mn}) correspondiente será:

$$V_{Mn} = V_{M0}e^{-t/\tau} \quad (3)$$

Donde τ está representado por:

$$V_{MF} = \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0) \quad (5)$$

Ya con estas formulas (3) y (5), la solución para la ecuación diferencial (2) se conformaría como:

$$V_{MT} = V_{Mn} + V_{MF} = V_{M0}e^{-t/\tau} + \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0) \quad (6)$$

b. Canales de Sodio

Al agregar el componente de los canales de sodio (estructura 2), el diagrama será el que se ve en la Fig. 6.

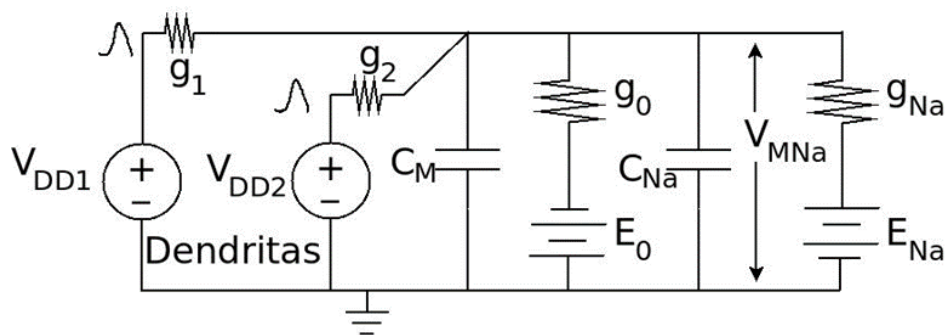


Fig. 6. Estructura 2: dendritas, membrana celular y canales de Sodio.

La ecuación diferencial que describe el comportamiento del circuito se da por (7)

$$(C + C_{Na^+}) \frac{dV_{MNa^+}}{dt} + (g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+}) V_{MNa^+} - g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{Na^+} E_{Na^+} = 0 \quad (7)$$

Su respuesta natural es

$$V_{MNa^+n} = V_{MNa^+0} e^{-t/\tau} ; \tau = \frac{C + C_{Na^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+}} \quad (8)$$

y la respuesta forzada es

$$V_{MNa^+F} = \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+}} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{Na^+} E_{Na^+}) \quad (9)$$

Así las ecuaciones, actuando los canales de sodio, se conforma con (8) y (9).

$$V_{MNa^+T} = V_{MNa^+0} e^{-t/\tau} + \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+}} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{Na^+} E_{Na^+}) \quad (10)$$

c. Canales de Potasio

Ahora tomando el componente de los canales de potasio (estructura 3), el diagrama será el que se muestra en la Fig. 7.

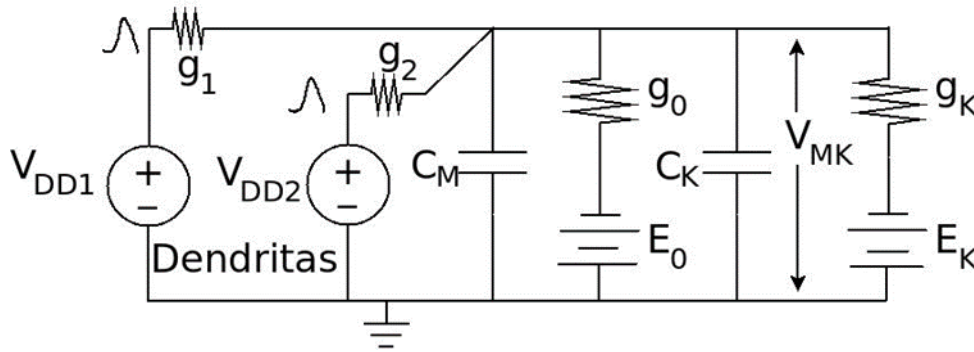


Fig . 7. Estructura 3: dendritas, membrana celular y canales de potasio.

La ecuación diferencial que describe el comportamiento del circuito se da por (11)

$$(C + C_{K^+}) \frac{dV_{MK^+}}{dt} + (g_1 + g_2 + g_0 + g_{K^+}) V_{MK^+} - g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{K^+} E_{K^+} = 0 \quad (11)$$

Su respuesta natural es

$$V_{MK^+n} = V_{MK^+0} e^{-t/\tau} ; \tau = \frac{C + C_{K^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{K^+}} \quad (12)$$

y la respuesta forzada corresponde a la siguiente ecuación

$$V_{MK^+F} = \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{K^+}} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{K^+} E_{K^+}) \quad (13)$$

Así la ecuación total, actuando los canales de potasio, se conforma con (12) y (13),

$$V_{MK^+T} = V_{MK^+0}e^{-t/\tau} + \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{K^+}} (g_1V_{DD1} - g_2V_{DD2} + g_0E_0 + g_{K^+}E_{K^+}) \quad (14)$$

d. Canales de Sodio y Potasio

Finalmente tomando la neurona propuesta, el diagrama será el que se muestra en la Fig. 4. Y la ecuación diferencial que describe el comportamiento del circuito se da por (15).

$$(C + C_{Na^+} + C_{K^+}) \frac{dV_{MNa^+K^+}}{dt} + (g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+} + g_{K^+})V_{MNa^+K^+} - g_1V_{DD1} - g_2V_{DD2} + g_0E_0 + g_{Na^+}E_{Na^+} + g_{K^+}E_{K^+} = 0 \quad (15)$$

Su respuesta natural es

$$V_{MNa^+K^+n} = V_{MNa^+K^+0}e^{-t/\tau} ; \tau = \frac{C + C_{Na^+} + C_{K^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+} + g_{K^+}} \quad (16)$$

y la respuesta forzada es

$$V_{MNa^+K^+F} = \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+} + g_{K^+}} (g_1V_{DD1} - g_2V_{DD2} + g_0E_0 + g_{Na^+}E_{Na^+} + g_{K^+}E_{K^+}) \quad (17)$$

Así la ecuación total actuando los canales de sodio y potasio se conforma con (16) y (17).

$$V_{MNa^+K^+T} = V_{MNa^+K^+0}e^{-t/\tau} + \frac{g_1V_{DD1} - g_2V_{DD2} + g_0E_0 + g_{Na^+}E_{Na^+} + g_{K^+}E_{K^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+} + g_{K^+}} \quad (18)$$

e. Modelo RC

Con las ecuaciones (6), (10), (14) y (18) el modelo matemático se puede expresar como:

$$V(t) =$$

(19)

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_{M0}e^{-t/\tau} + \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0) & \forall 0 < 0.39ms < t < 2ms \\ V_{MNa^+0}e^{-t/\tau} + \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+}} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{Na^+} E_{Na^+}) & \forall 0.39ms < t < 0.46ms \\ V_{MNa^+K^+0}e^{-t/\tau} + \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+} + g_{K^+}} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{Na^+} E_{Na^+} + g_{K^+} E_{K^+}) & \forall 0.46ms < t < 0.82ms \\ V_{MK^+F} = \frac{1}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{K^+}} (g_1 V_{DD1} - g_2 V_{DD2} + g_0 E_0 + g_{K^+} E_{K^+}) & \forall 0.82ms < t < 2ms \end{array} \right.$$

con

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{C}{g_1 + g_2 + g_0} & \tau &= \frac{C + C_{Na^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+}} \\ \tau &= \frac{C + C_{Na^+} + C_{K^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{Na^+} + g_{K^+}} & \tau &= \frac{C + C_{K^+}}{g_1 + g_2 + g_0 + g_{K^+}} \end{aligned} \quad (20)$$

Los resultados por simulación numérica del modelo propuesto se realizaron usando el software Octave de uso libre bajo la plataforma ubuntu en linux. Este se muestra en la Fig. 8, donde puede apreciarse el tiempo de despolarización y repolarización cuyos estimados se encuentran entre 0.42ms y 1.12ms respectivamente. En cuanto a la amplitud la elevación máxima se encuentra alrededor de 20mV y la mínima en 77mV.

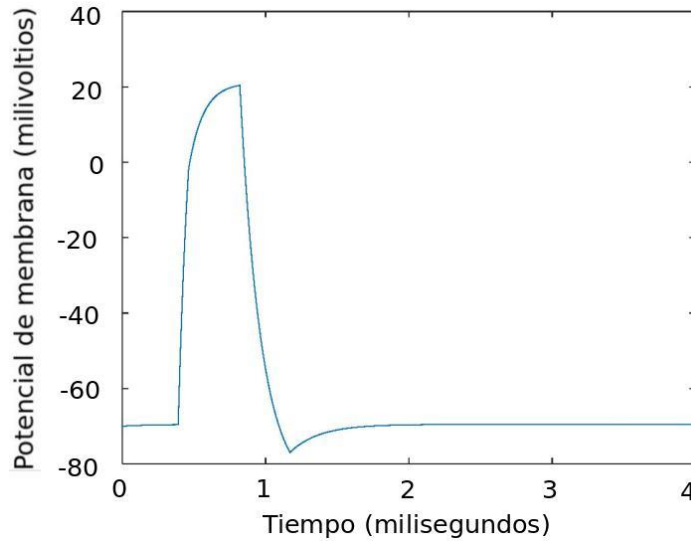


Fig. 8. Señal obtenida por la membrana celular in silico.

4. Conclusiones

Se logra obtener la señal de la célula excitable de manera *in silico*, en donde la señal es muy similar a la célula excitable biológica, lo cual nos indica que las ecuaciones y programación cumple con el perfil que se estaba buscando. Respecto al modelado electrónico se está trabajando en ello y en el armado del circuito en físico.

Referencias

- [1]. Silverton DU. (2009), *Fisiología Humana: un enfoque integrador*. Argentina: Panamericana.
- [2]. Kandel ER, H. Schwartz J, M. Jessell T. (2001). *Principios de neurociencia*. España: McGraw-Hill.
- [3]. Serway RA, Jewett JW. (2014). *Physics for scientists and engineers with modern physics*. 9th ed. United States of America: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- [4]. Marieb E. N. (2008). *Anatomía y fisiología Humana*. 9th ed. España: Pearson.
- [5]. Hoyt R. C. (1963). The squid giant axon-mathematical models. *Biophysical journal*; 3: p. 399-431.
- [6]. Chay T. R. (1985). Chaos in a three-variable model of an excitable cell. *Physica*; 16(16): p. 233-242.
- [7]. Izhikevich E. M. (2003). Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on neuronal networks*; 14(6): p. 1569-1572.
- [8]. Naugumo J, Arimoto S, Yoshizawa S. (1962) An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*; p. 2061-270.
- [9]. Vértiz Hernández J. A. (2018). *Modelado Matemático de una Célula Excitable* [Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- [10]. Hodgking A. L., Huxley A. F. A. (1990). quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *Bulletin of mathematical biology*; 52(1/2): p. 25-71.
- [11]. Moore J. W., Cole K. S. (1960). Resting and Action Potentials of the Squid Giant Axon in Vivo. *The journal of general physiology*; 43: p. 961-97.

2 | Time Delay Electronic Circuit

C. Jiménez Calvillo⁵, I. Campos Cantón⁶.

Abstract

This paper analyzes the time delay effect on the first order differential equation. This linear time delay in association with the amplitude of the first order differential equation is responsible for three responses: a response of type first order differential equation without delay, a response as a second order differential equation, and finally a response of a harmonic oscillator. The software Simulink-Matlab is used to implement the time delay and simulate. The differential equation. The simulation results agree with the theoretical results. In the same way, the experimental results are according to the theory. The proposed electronic circuits are comprised of three blocks: An Integrator block, a phase shift block, and gain block. The electric circuit is composed by resistors, capacitors, and operational amplifiers.

⁵C. Jiménez Calvillo (✉)
Tecnológico Nacional de México.
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Av. Tecnológico, S/N Col UPA, 78437, Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México.
e-mail. cesarjc68@gmail.com

⁶I. Campos Cantón (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Facultad de Ciencias, Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. icampos@fciencias.uaslp.mx

Keywords: Time delay, phase shift, analog circuits, differential equation, circuit theory.

1. Introduction

The models that reproduce the best behaviour, must take account the last system state. In this sense, the use of time-delay differential equation is a good candidate for this purpose. For example, in population dynamics is usually supposed that interaction response between different organisms are instantaneously in aggression presence. But nevertheless, we have to consider a time for this response; plants that are attacked by herbivores need time to recover their foliage, the predator needs some time to consume its prey, etc. In addition, populations generally do not approach asymptotically to the equilibrium point, but rather oscillate around it. This behavior can be modeled by introducing delays in the reaction time. The time-delay differential equations are a special case of non-linear differential equations, in general, they can be very complicated, although in certain situations it is possible to perform a fairly complete qualitative or geometric study.

The study of time-delay systems has been of great interest in the science area. The industrial and investigation systems usually need to include delay effects in your process for a good performance. To model thermal effects, we must always consider the effects provided by a time delay for a better approximation. In electronic area, the time-delay is considered in the design and fabrication of systems. Other examples are in feedback control, to stabilize a linear system, in study of signals, to model the noise effects in radio frequency (RF), and in all-pass lters [1]-[6]. So far, most of the existing results reported on time-delay is theoretical and normally no circuit is built.

In this work, and with the aim of developing experiments for time-delay processes, we implemented an electronic circuit of the time-delay device, and we study the stability problem of a first order differential equation with time delay. We construct a solution for each interval where the behavior changes. Conditions for stability are obtained. The obtained result is illustrated numerically in software Matlab and implemented experimentally in an electronic circuit.

This paper is addressed as follows: in Section 2 time-delay first order differential equation solution is given with their demonstrations. In section 3, the time-delay proposed circuit is developed through Kirchhoff's laws. In section 4, the numerical solutions using the software Matlab are shown as well as experimental results of the circuit, discussion and conclusions are exposed in Section 5.

2. Time delay first order differential equation

Based on the time-delay first order differential equation [7], we infer possible solutions with a time delay τ . Technically, if we tune τ , we have different solutions: solution from a first order system without time-delay, damped solution from a second order system without time-delay and an oscillatory response.

The time-delay differential equation theory is concerned with the variation of state x , whose depend on time instant t , and previous moments τ .

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), x(t - \tau_1), \dots, x(t - \tau_n)) \quad (1)$$

where f is a given function, and the time delay τ_j satisfies $\tau_j > 0$.

A particular case of a time-delay first order differential equations with constant coefficients, is when only a one time-delay exists:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), x(t - \tau)) \quad (2)$$

In this work we study the next differential equation, with amplitude a and time-delay τ .

$$\dot{x}(t) = ax(t - \tau) \quad (3)$$

where $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ and $\{a, \tau\} \in \mathbb{R}$.

a. Characteristic equation

Assume an exponential solution, like the first-order differential equation without delay,

$$x(t) = x_0 e^{zt} \quad (4)$$

with $x_0 = x(0)$ the initial condition and $z = p + iq \in \mathbb{C}$.

Derivate (4) with respect to time,

$$\dot{x} = x_0 z e^{zt} \quad (5)$$

and substituting (4) and (5) in (3) to get z

$$z = a e^{-zt} \quad (6)$$

and the characteristic equation is

$$z e^{zt} - a = 0 \quad (7)$$

b. Solution

Therefore, the problem moves to find the roots of (7), or its equivalent equation

$$(p + iq)e^{(p+iq)\tau} - a = 0 \quad (8)$$

from where we get the real and imaginary part

$$\text{Real} \rightarrow e^{p\tau}(p \cos q\tau - q \sin q\tau) - a = 0 \quad (9)$$

$$\text{Imaginary} \rightarrow e^{p\tau}(p \sin q\tau - q \cos q\tau) = 0 \quad (10)$$

from (10) we get p

$$p = -q \cot q\tau \quad (11)$$

$$\text{substituting (11) in (9)} p = -a \sin q\tau e^{q\tau \cot q\tau} \quad (12)$$

multiplying (12) by τ and changing the variable $x = q\tau$

$$x = -a\tau \sin x e^{x \cot x} \quad (13)$$

therefore, when the values of the left side of the equality coincide with those on the right side in (13) the solution has been found. In Fig. 1 is sketch this situation at the interval between -3 to 3 if $a < 0$.

The Fig. 1 shows 3 solutions, they are found in $x = \pm \pi/2$ and 0. If $x = 0$ and $q \neq 0$ then $\tau = 0$, that corresponds to a system without time delay. For another one, if $x = \pi/2$ and using (11) and (12).

$$p = -q \cot \pi/2 = 0$$

$$q = -a \sin \pi/2 e^{\pi/2 \cot \pi/2} = -a$$

thus

$$z = -ai$$

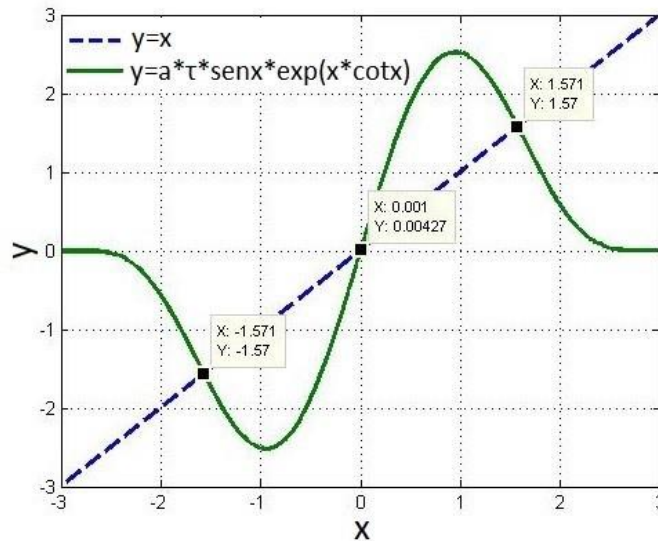


Fig. 1. The solution is satisfied in the cross point of two curves, in this case at interval 2 to 2.

and

$$x = x_0 e^{iat}$$

concerning to an oscillatory system. The relationship between a and τ is getting form (13),

$$a\tau = \pi/2 \quad (14)$$

Now, if x is small, we approximate $\sin x$ by x , $\cos x$ by 1 and $\cot x$ by $1/x$. Under these assumptions, from (11) and (12)

$$p = -1/\tau$$

$$q = 0$$

and

$$a\tau = -1/e \quad (15)$$

thus

$$z = -1/\tau$$

and

$$x = x_0 e^{-\frac{1}{\tau}t}$$

concerning to a first order system without delay if

$$-1/e < a\tau < 0$$

If we take values between $-\pi/2 < a\tau < -1/e$, then $p \neq 0$. Thus $z = -p + iq$ and $x = x_0 e^{-(p+iq)\tau}$. Getting the answer of a second-order underdamped system. For example, if $x = \pi/4$ and using the change of variable and (11)

$$p = -\pi/4\tau$$

$$q = \pi/4\tau$$

thus

$$z = -\pi/4\tau (1 - i)$$

and

$$x = x_0 e^{-\pi/4\tau (1-i)t}$$

applying (13)

$$a\tau = -\pi\sqrt{2}/4e^{\pi/4} \quad (15)$$

With these results, an electronic circuit is designed in the next section.

3. Modeling time-dalay circuit

The target is to design an electronic circuit based on (3), for this, we are considering in two parts this equation: left side and right side of the equality. The left side has been taken as a first-order differential equation without delay (see Fig. 2a), and the right side corresponds to delayed signal (Fig. 2b). Due to the fact that the left- and right-hand side are equal, this creates a close loop as it shows in Fig. 2c.

Using considerations of block diagram Fig. 2, the next electronic circuit is proposed Fig. 3.

Using Kirchhoff laws in the electronic circuit

$$v_1 = \frac{R_3}{R_1 R_2 C_1} \int v_3 dt \tag{17}$$

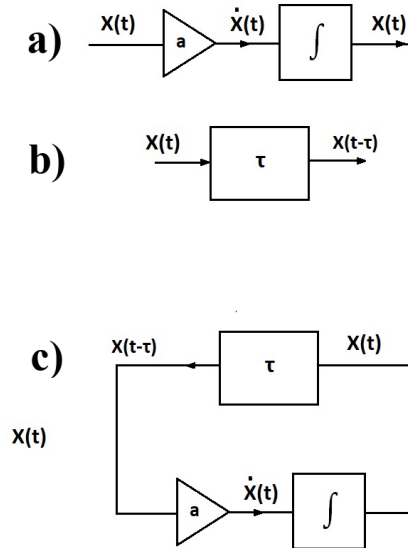


Fig. 2. Time-delay block diagram: a) first-order differential equation without delay ($x_{\cdot}(t) = ax(t)$), b) delayed signal ($x(t - \tau)$), c) close loop.

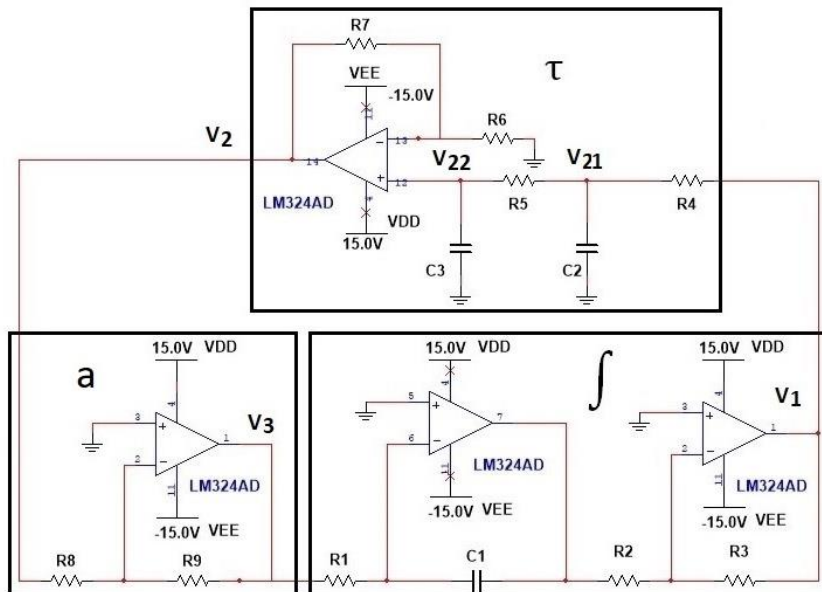


Fig. 3. The proposal electronic circuit is comprised of: gain circuit "a", integrated circuit "∫" and time-delay circuit "τ".

Table 1. Parameters.

a	τ	initial condition	response
-1	$\frac{1}{2e}$	5	first order
-1	1	5	damping second order
-1	$\frac{\pi}{2}$	5	oscillatory motion

$$v_1 = \frac{R_9}{R_8} v_3 \quad (18)$$

and v_2 as impedance function, considering $R = R_4 = R_5, C = C_2 = C_3, z = \frac{1}{j\omega C}$,

$$v_2 = \left(\frac{R_7}{R_6} + 1\right) \frac{Z^2}{R^2 + 3RZ + Z^2} v_1 \quad (19)$$

as frequency

$$v_2 = \left(\frac{R_7}{R_6} + 1\right) \frac{(1 + R^2 C^2 \omega^2) + j3R\omega}{(1 - R^2 C^2 \omega^2) + 9R^2 C^2 \omega^2} v_1 \quad (20)$$

from where

$$|v_2/v_1| = \frac{\frac{R_7}{R_6} + 1}{(1 - R^2 C^2 \omega^2) + 9R^2 C^2 \omega^2} \sqrt{R^4 C^4 \omega^4 + 7R^2 C^2 \omega^2 + 1} \quad (21)$$

$$\angle v_2/v_1 = \theta = \arctan \frac{3RC\omega}{1 - R^2 C^2 \omega^2} \quad (22)$$

4. Numeric and Experimental Results

First, we carried out a Matlab-Simulink simulation, using the parameters in table 1. The response is shown in Fig. 4. The oscillatory response, Fig. 4c) has a period of 2π . Using this time and the parameters of table 1, we calculate the resistor and capacitance values on the proposed electronic circuit.

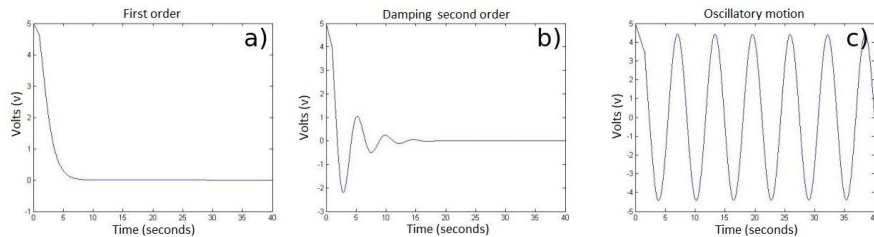


Fig . 4. Response: a) first order, b) damping second order, c) oscillatory motion.

a. Gain a

From (18), $a = -\frac{R_9}{R_8}$, if $R_8 = R_9 = 10K\Omega$, then $a = -1$.

b. Integrator

Let $V_3 = \cos wt$, and using (17),

$$v_1 = \frac{R_3 \sin wt}{R_1 R_2 C_1 w}$$

from were, we tune $\frac{R_3}{R_1 R_2 C_1 w}$ to unity gain. Like $T = 2\pi$, and if $R_2 = R_3 = 10K\Omega$ and $C_1 = 1\mu F$, we get $R_1 = 1M\Omega$.

c. Time-delay

From (22),

$$R = \frac{-3 \pm \sqrt{9 + 4\tan^2\theta}}{2Cw \tan\theta}$$

and using $C = 1\mu F$, and the fact that time-delay is directly proportional to the phase ($\tau = \theta$), we get R values shown in Table 2 column two.

d. Magnitude

The magnitude of (21) must be unity, for this purpose, we get R_7 of this equation,

$$R_7 = \left(\frac{(1 - R^2 C^2 w^2)^2 + R^2 C^2 w^2}{\sqrt{R^4 C^4 w^4 + 7R^2 C^2 w^2 + 1}} \right) R_6$$

and using $R_6 = 10K\Omega$, $C = 1\mu F$ and R given in Table 2 column two, we get R_7 values as shown in Table 2 column three.

Table 2. Magnitude and phase.

θ	R	R_7
$\frac{1}{2e}$	59.12 K	121.65
1	425.25 K	5.16 K
$\frac{\pi}{2}$	1 M	20 K

With these values calculated the experiment is performed, and the results are shown in Fig. 5.

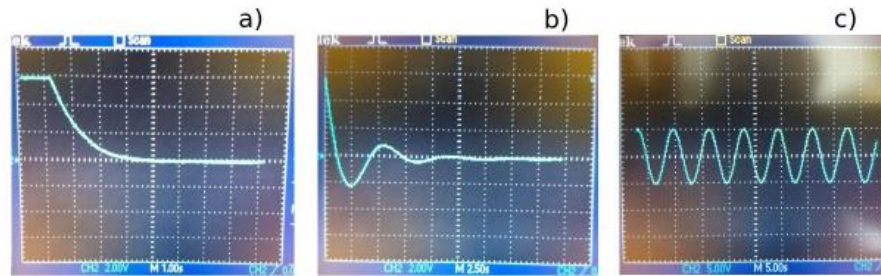


Fig . 5. Response: a) first order, b) damping second order, c) oscillatory motion.

5. Conclusions

In this article, a first order differential equation with time-delay has been developed in a theoretical and experimental way. The corresponding solutions are dicted in Sec. 2.1. Different software tools can be used to and the solution of a first order differential equation with time-delay. In this paper, we used Matlab R14 running on the Ubuntu-Linux platform (see Fig. 1).

To design and manufacture the electronic proposed circuit, a block diagram in Simulink-Matlab is performed. The R_i and C_i values from different blocks: gain, Integrator, and time-delay; are tuned according to Simulink-Matlab and theoretical results. The electronic circuit is made experimentally, and the results are shown in Fig. 5, giving a correspondence with the results by simulation Fig. 4, and the theoretical calculations, Table 1.

References

- [1] Shujaee, K., Lehman, B., 1997. Vibrational feedback control of time delay systems, *IEEE Trans. Autom. Control*, 42 (11), 1529-1545.
- [2] Fridman, E., Shaked, U., 2002. An improved stabilization method for linear systems with time-delay, *IEEE Trans. Autom. Control*, 47, 1931-1937.
- [3] Heyde, E.C., 1995. Theoretical methodology for describing active and passive recirculating delay line systems, *Electron. Lett.*, 31 (23), 2038-2039.
- [4] Groenewold, G., 2007. Noise and group delay in active lters, *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Regul. Pap.*, 54 (7), 1471-1480.
- [5] Wijenayake, C., Xu, Y., Madanayake, A., et al., 2012. RF analog beam-forming fan lters using CMOS all-pass time delay approximations, *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Regul. Pap.*, 59 (5), 1061-1073.
- [6] Fridman, E., 2014. Introduction to Time-Delay Systems-Analysis and Control. (Springer).
- [7] Munguía, G., García M., 2007. Ecuaciones diferenciales conretardo, *Memorias de la XVII semana regional de investigación y docencia en matemáticas*, 20, 137-142.

3 | Controlador PID en aplicaciones AFM

R. C. Martínez Montejano⁷, M. Martín Fernández⁸, B. Varga⁹, C. Gergely¹⁰, E. Pérez¹¹.

Resumen

Para el proceso de obtención de la litografía o detección de fuerzas a escalas nanométricas se puede utilizar la microscopía de fuerza atómica, el cual permite la interacción entre una muestra y un cantiléver, que oscila a una frecuencia de resonancia. Un láser apunta al extremo del cantiléver y mediante un fotodetector se mide la deflexión del mismo. Para una correcta medición, es necesario mantener una altura constante, la cual se logra mediante un controlador proporcional, integral, derivativo (PID). En este trabajo se propone un método para el cálculo de las ganancias del controlador PID basado en el modelado matemático del cantiléver. El funcionamiento del controlador propuesto es validado mediante simulaciones en Simulink de Matlab, obteniendo resultados satisfactorios.

⁷R. C. Martínez Montejano (✉)
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
 Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media, Carretera Rioverde-San Ciro, Km 4, El Carmen, 79615 Rioverde, S.L.P., México.
 e-mail. roberto.montejano@uaslp.mx

⁸M. Martín Fernández (✉)
 Universidad de Montpellier.
 Laboratorio Charles Coulomb, Montpellier, Francia.
 e-mail. fernandez@umontpellier.fr

⁹B. Varga (✉)
 Universidad de Montpellier.
 Laboratorio Charles Coulomb, Montpellier, Francia.
 e-mail. beduska@yahoo.co.uk

¹⁰ C. Gergely (✉)
 Universidad de Montpellier.
 Laboratorio Charles Coulomb, Montpellier, Francia.
 e-mail. csilla.gergely@umontpellier.fr

¹¹ E. Pérez (✉)
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
 Instituto de Física, Avenida Doctor Manuel Nava 6, Zona Universitaria, 78290 San Luis, S.L.P., México.
 e-mail. elias@ifisica.uaslp.mx

Palabras Clave: Control PID, Microscopía de Fuerza Atómica, Modelado Matemático, Matlab.

1. Introducción

La microscopía de fuerza atómica (AFM) es un dispositivo muy utilizado en imágenes en nano-escala, la cual permite la interacción entre una muestra y un cantiléver. El cantiléver oscila a una frecuencia de resonancia con una amplitud establecida por el usuario, mientras que una interfaz electrónica mide la deflexión del cantiléver. Usando esta información, es posible establecer la topografía de la muestra.

El AFM incorpora un controlador retroalimentado mediante el cual se mueve el escáner en la dirección z , manteniendo un punto de inicio basado en la interacción muestra-punta del cantiléver. Es común en la práctica usar un controlador PI, en donde las ganancias son determinadas variando la ganancia integral hasta que el sistema comienza a oscilar y se establece un valor previo antes de que esto suceda. Por cada muestra y punta, el proceso es similar y en algunas ocasiones puede tomar varios minutos la calibración y depende en gran medida de la experiencia del usuario para manipular las ganancias.

Se han encontrado en la literatura diferentes controladores para mejorar las imágenes del AFM en donde el objetivo principal es incrementar la velocidad con la que obtiene la foto [1]. Es fundamental obtener un modelo matemático adecuado para el cantiléver, de tal forma que se pueda establecer un controlador, y se ha propuesto modelarlo como un oscilador armónico forzado [2]. El software nativo del AFM usa ganancias proporcionales, integrales y derivativas (con sus combinaciones) y también en algunos casos se pueden implementar dispositivos externos como Arreglos Analógicos Programables de Campo (FPAA) [3]-[4], para incrementar el ancho de banda del controlador. Existen diversos métodos para el cálculo de las ganancias en la literatura, en donde la mayoría de ellos utilizan dispositivos externos para lograr el objetivo.

En este trabajo se propone una sintonización de las ganancias de un controlador PID basado en el modelo matemático del cantiléver de un AFM. El objetivo es que el controlador alcance el valor de referencia lo más rápido posible, minimizando el error y que además pueda ser implementado en el software nativo del AFM.

2. Desarrollo Matemático

El modelado matemático se obtiene considerando el cantiléver del AFM como un sistema de masa-resorte-amortiguador forzado [2], de la siguiente manera:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + kz + \frac{m\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} = F \quad (1)$$

En donde “m” representa la masa del cantiléver, “k” es la constante de resorte, “Q” es el factor de calidad y “ ω_0 ” es la frecuencia de resonancia en radianes por segundo. Mediante la aplicación de la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia de la ecuación (2).

$$L(s) = \frac{Z(s)}{F(s)} = \frac{1/m}{s^2 + \frac{m\omega_0}{Q}s + k/m} \quad (2)$$

Los siguientes valores de un cantiléver comercial son considerados: 2.23×10^{-12} , $k = 2N.m$, $f_0 = 70kHz$ y además $\omega_0 = 439,822.971$. Con lo cual la función de transferencia tiene la siguiente forma:

$$L(s) = \frac{4.4 \times 10^{11}}{s^2 + 2939.15s + 8.8 \times 10^{11}}$$

Con el polinomio característico se pueden obtener las raíces del sistema, las cuales son complejas con parte real negativa, como se muestra a continuación:

$$s_1 = -1470 + 938080i, \quad s_2 = -1470 - 938080i \quad (3)$$

De donde se puede concluir que el sistema oscilará, pero decrece en el tiempo, por lo tanto, es un sistema estable.

Dadas las características del sistema, se propone un controlador con la intención de cancelar polos del sistema con un cero del controlador y utilizando un error en estado estable con rampa (eer) de 0.1. Entonces el controlador corresponde a un PID de la siguiente forma:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_d \left(s^2 + \frac{k_p}{k_d} s + \frac{k_i}{k_d} \right)}{s} \quad (4)$$

Se proponen las ganancias del controlador para poder cancelar la dinámica del sistema, por lo que quedan de la siguiente manera:

$$\frac{k_p}{k_d} = 2939.15, \quad \frac{k_i}{k_d} = 8.8 \times 10^{11} \quad (5)$$

Al realizar la multiplicación de $L(s)$ por $C(s)$ se obtiene lo siguiente:

$$H(s) = L(s) * C(s) = \frac{4.4 \times 10^{11} k_d}{s} \quad (6)$$

Enseguida, se aplica el teorema del valor final, con la finalidad de obtener un límite de la ganancia derivativa.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s * H(s) = \frac{1}{s \cdot s} = s * \frac{4.4 \times 10^{11} k_d}{s} = 10 \quad (7)$$

Por lo que se obtiene que $k_d = 2.27 \times 10^{-11}$.

El sistema es retroalimentado, para obtener lo que a continuación se muestra:

$$G(s) = H(s) + 1H(s) = \frac{4.4 \times 10^{11} k_d}{s + 4.4 \times 10^{11} k_d} \quad (8)$$

Se propone $\tau = 1 \times 10^{-8}$, por lo que se puede obtener otro límite para la ganancia derivativa, de la forma $k_d = 4400$. Esto quiere decir que la ganancia derivativa puede tomar valores en el rango:

$$k_d = 1.3 \times 10^{-7} \text{ y } k_i = 40 \quad (9)$$

3. Metodología

Para verificar el correcto funcionamiento del controlador propuesto y sintonización de las ganancias, se llevaron a cabo simulaciones en Simulink de Matlab. En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de la función de transferencia sin controlador, con una entrada escalón.

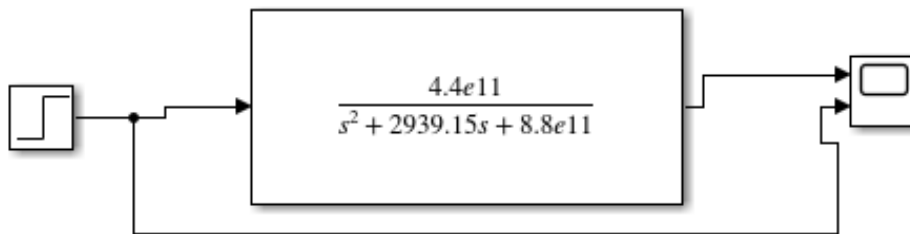


Fig. 1. Sistema sin control.

Enseguida, en la figura 2 se muestra la respuesta del sistema cuando la entrada simula un escalón de 100nm de amplitud.

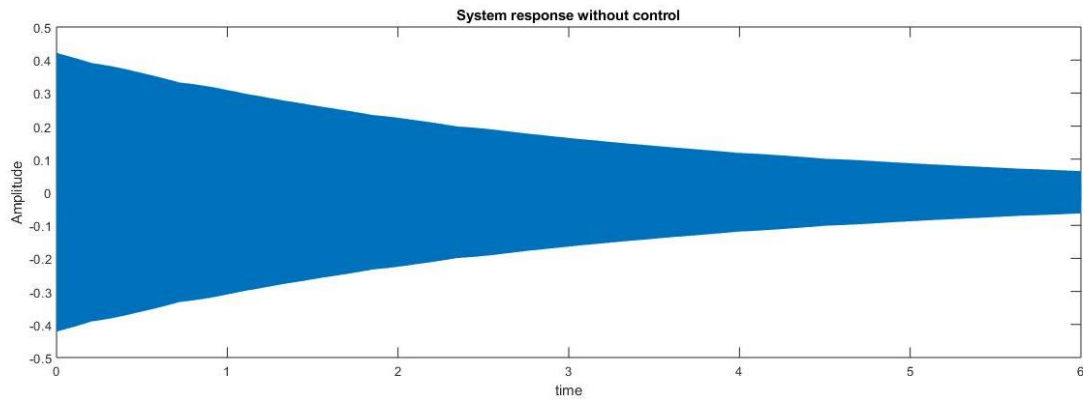


Fig. 2. Respuesta del sistema a entrada escalón.

La respuesta del sistema concuerda con las raíces calculadas, en donde se tiene una respuesta oscilatoria que decrece con el tiempo, hasta volverse cero, sin embargo, la amplitud de esta alcanza 0.4m. A continuación, en la figura 3 se muestra el diagrama de bloques del sistema con el controlador PID propuesto, en donde se probarán distintas entradas para corroborar el funcionamiento de este.

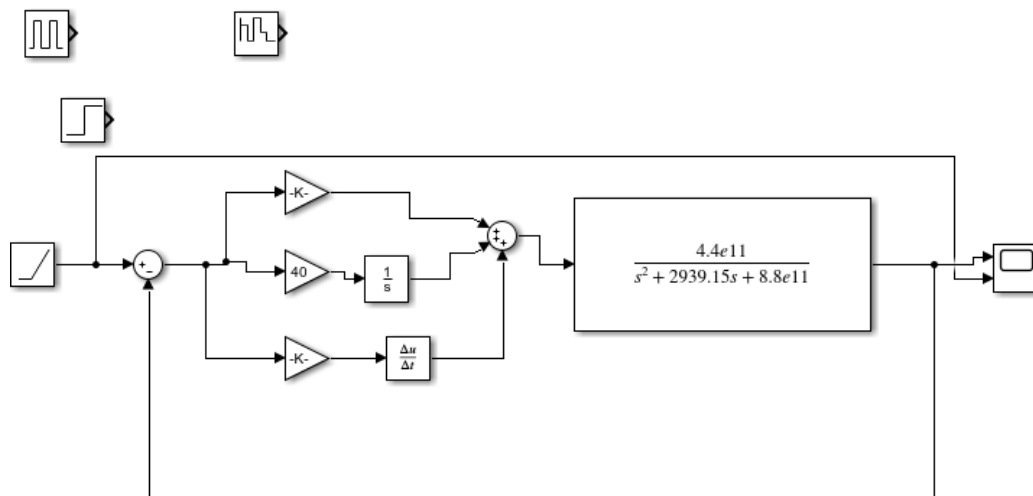


Fig. 3. Sistema con control PID.

En la figura 4 se muestra la respuesta del sistema a una entrada de tipo rampa, en color azul es la entrada y en amarillo la salida.

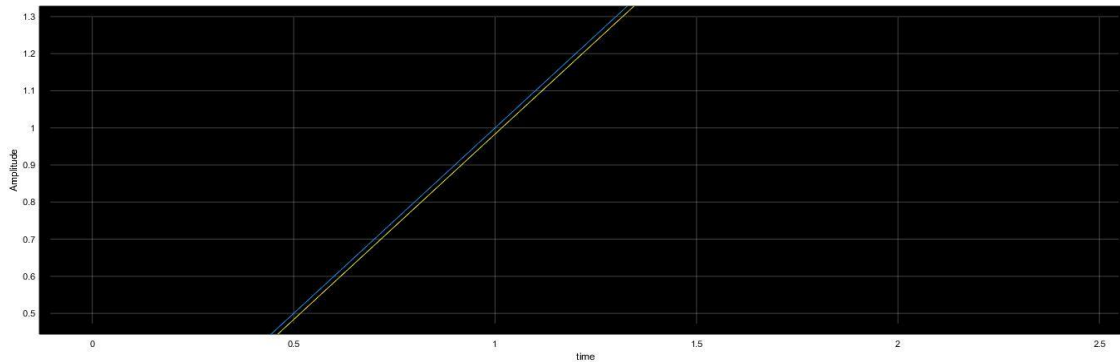


Fig. 4. Respuesta con entrada rampa.

El control propicio que el sistema responda con un error mínimo, a una entrada tipo rampa. Enseguida se evalúa una entrada escalón de 100 nm de amplitud, y la respuesta se aprecia en la figura 4 (color azul entrada, color amarillo salida).

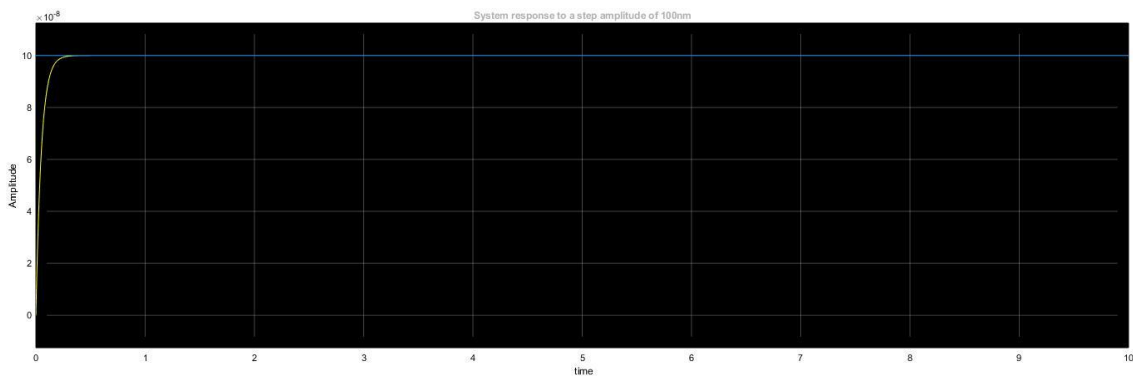


Fig. 5. Respuesta del sistema con entrada escalón.

Se puede apreciar que el sistema ya no presenta dinámica oscilatoria, que alcanza la referencia en un tiempo de 0.2 segundos y se estabiliza en un valor de 100 nm, con una respuesta críticamente amortiguada. A continuación, se propone un tren de pulsos como entrada con una frecuencia de 1 kHz, para evaluar la rapidez del controlador, y el resultado se muestra en la figura 6 (color azul entrada, amarillo salida).

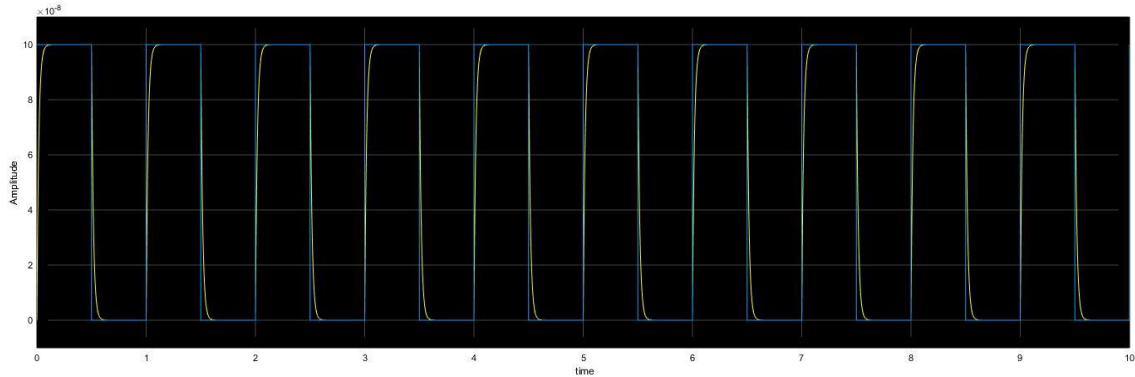


Fig. 6. Respuesta del sistema a tren de pulsos.

Teniendo una respuesta rápida del sistema y un correcto seguimiento. Finalmente, en la figura 7 se muestra la respuesta del sistema cuando se tienen múltiples cambios de amplitud en los escalones de entrada, simulando así los cambios de altitud en el piezoeléctrico del AFM.

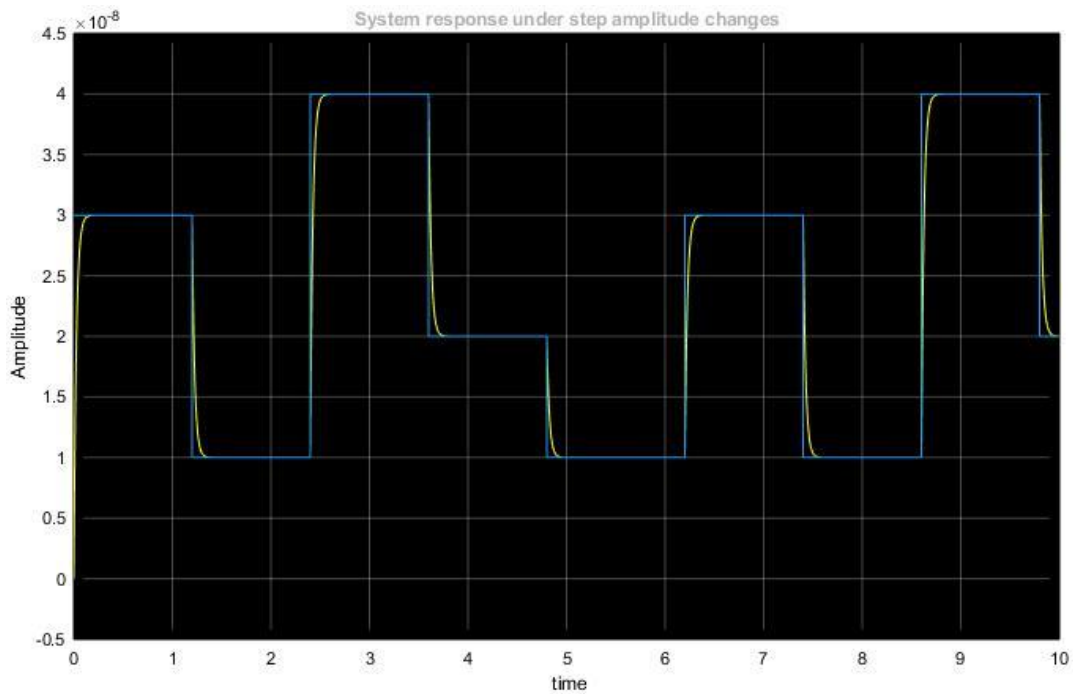


Fig. 7. Respuesta del sistema con diferentes valores de amplitud.

De donde se puede concluir que el controlador propuesto, es capaz de responder a diferentes valores de altitud, con una rápida respuesta y de forma precisa.

4. Conclusiones

El cantiléver de un AFM puede ser modelado como un oscilador armónico forzado, compuesto por parámetros de masa-resorte-amortiguador. Se utilizaron valores comerciales de un cantiléver en la función de transferencia del Sistema, obtenida a través de una transformada de Laplace. Se utilizó el polinomio característico de la función de transferencia para obtener las raíces del sistema, las fueron imaginarias con parte real negativa, lo cual indica que el sistema oscilará y decrecerá en el tiempo porque es un sistema disipativo, por lo tanto, es estable.

Se propuso un controlador PID para el modelo matemático obtenido, en donde se establece que debe de seguir una señal de referencia lo más rápido posible, y tener un error en estado estable mínimo, además con un cero del controlador se canceló la dinámica del sistema, por lo que se obtuvo la respuesta de un sistema de primer orden. Con base a las restricciones previamente propuestas se calcularon las ganancias del controlador, teniendo parte la parte proporcional y la parte derivativa valores muy bajos, y la parte integral un valor en el rango que se usa en el software nativo del AFM.

Si la ganancia integral es muy baja, la respuesta del sistema se vuelve lenta, en cambio, si la ganancia es muy alta el sistema comienza a oscilar. Con un valor ligeramente más alto de la parte derivativa, alrededor de 6×10^{-11} , es posible alcanzar valores más grandes de la parte integral y mejorar el funcionamiento del controlador.

Como trabajo a futuro, las ganancias del controlador obtenidas mediante el método analítico descrito en este trabajo se probarán en un AFM con la finalidad de obtener resultados experimentales que concuerden con lo obtenido de forma simulada.

Referencias

- [1] M. Dukic, V. Todorov, S. Andany, A.P. Nierverglet, C. Yang, N. Hosseni, G. Fantner, “Digitally controlled analog proportiona-integral-dreivative (PID) controller for high-speed scanning probe microscopy,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, No. 12, 2017.
- [2] J. Matamoros, J. Vega-Baudrit, “Modelando la dinámica de un cantiléver de Mricoscopía de Fuerza Atómica AFM,” *Revista Científica*, vol. 23, no. 1, pp. 78-85, 2017.
- [3] G. Schitter, N. Phan, “Field programmable analog array (FPAA) based control of an Atomic Force Microscope,” *IEEE 2008 American Control Conference*, 2008.
- [4] Y.K. Yong, B. Bhikkaki, S.O. Moheimani, “Design, modeling, and FPAA-based control of a high-speed Atomic Force Microscope Nanopositioner,” *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 3, pp. 1060-1071, 2013.

4 | Estudio de Soportes Poliméricos de Poli(Ácido Láctico)/Quitosano para su Potencial uso en la Regeneración de Piel

J. Z. Hernández Olguín¹², M. Gutiérrez Sánchez¹³, D. M. Escobar García¹⁴, M. A. Waldo Mendoza¹⁵, V. A. Escobar Barrios¹⁶.

Resumen

En el estudio se evaluó la estructuración 2D y 3D de soportes poliméricos con base a poli(ácido láctico) y quitosano, con uso potencial en la regeneración de piel. Se caracterizaron propiedades morfológicas, químicas, físicas y biológicas.

Estos se obtuvieron mediante la técnica de electrohilado para los soportes 3D y por un engomador para los soportes 2D; la caracterización química y térmica de los soportes se efectuó mediante las técnicas de espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR), y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Por otro lado, la caracterización morfológica fue evaluada por microscopía electrónica de barrido (SEM) para los soportes 3D y microscopía de fuerza atómica (AFM) para los soportes 2D.

¹²J. Z. Hernández Olguín (✉)

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

Laboratorio de polímeros, Camino a la Presa San José 2055. CP 78216. San Luis Potosí, México.

¹³M. Gutiérrez Sánchez (✉)

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

Laboratorio de polímeros, Camino a la Presa San José 2055. CP 78216. San Luis Potosí, México.

¹⁴D. M. Escobar García (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Facultad de Ciencias, Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295, San Luis Potosí, S.L.P., México.

¹⁵M. A. Waldo Mendoza (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Laboratorio de Ciencias Básicas, Facultad de Odontología, 78000 San Luis Potosí, México.

Tecnología Sustentable Greennova S. A. de C. V.

Parque de innovación y Emprendimiento del ITESM, Carretera San Luis Potosí-Guadalajara # 1510, Piso 2, Oficina 10. Lomas del Tecnológico, C.P. 78211, San Luis Potosí, S.L.P., México.

¹⁶V. A. Escobar Barrios (✉)

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

Laboratorio de polímeros, Camino a la Presa San José 2055. CP 78216. San Luis Potosí, México.

Finalmente se evaluó el efecto del soporte sobre la viabilidad, proliferación y adhesión celular.

Los resultados indicaron que los materiales no son citotóxicos por lo que pueden utilizarse en la ingeniería de tejidos.

Palabras Clave: Poli (Ácido Lactico), Quitosano, Soportes.

1. Introducción

La piel es considerada el órgano más extenso en el ser humano, el cual tiene una compleja estructura que cumple con funciones específicas, y que consta de tres capas:

a) Epidermis, que es la parte superficial y delgada compuesta de tejido epitelial, b) Dermis, tejido conjuntivo denso de sostén mecánico, resistencia y espesor c) Hipodermis, tejido conectivo laxo, rico en células adiposas. Cabe mencionar que la piel es un órgano capaz de auto regenerarse, y forma parte de procesos biológicos, tales como la regulación de la temperatura, detección sensorial, soporte de los vasos sanguíneos, nervios, entre otros [1]. Por otro lado, se estima que debido a quemaduras mueren 180,000 personas al año y que aproximadamente el 1% de la población mundial sufrirá una quemadura seria en algún momento de su vida relacionada a incidentes domésticos o industriales, en los que incluye derrame de líquidos calientes, llama directa o electricidad [2].

En cuanto a la regeneración natural del tejido, ésta solo es posible cuando se tiene un daño ligero; mientras que en daños más severos el tratamiento estándar consiste en el trasplante de tejido, cuya demanda excede por mucho a la disponibilidad existente [3]. Bajo este contexto, la ingeniería tisular surge como una alternativa; donde la obtención de soportes dimensionales y tridimensionales tiene un papel importante, cuya función principal es dar soporte temporal para el crecimiento y proliferación celular para la regeneración del tejido [4] y [5]. Dichos soportes deben presentar biocompatibilidad, biodegradabilidad, y una porosidad tal que permita el intercambio de nutrientes [6]. Es por eso por lo que los materiales mayormente utilizados son los polímeros naturales como el quitosano (Q) y el polímero sintético de Poli (ácido láctico) (PLA); este último pertenece a

la familia de los poliésteres alifáticos, y es un polímero termoplástico fácil de procesar con propiedades mecánicas adecuadas para este fin.

Sin embargo, su naturaleza hidrofóbica lo limita durante el proceso de la adhesión celular por lo que se realiza la incorporación de materiales naturales, así como tratamientos superficiales con péptidos. Por otro lado, el quitosano es un polisacárido natural que tiene la capacidad de mejorar la adhesión y crecimiento celular debido a su naturaleza hidrofílica. Es por ello que la combinación de estos dos polímeros, y el diseño del soporte permitirán mejorar las propiedades mecánicas y de biocompatibilidad, por lo que diferentes configuraciones de soportes (2D y 3D) son evaluadas.

2. Materiales y Métodos

A. Reactivos.

Poli (ácido lactico): $\overline{Mn} = 7,487 \text{ g/mol}$, quitosano: $\overline{Mw} = (310000 - 375000) \text{ g/mol}$ con desacetilación >75%, cloroformo 98% de pureza, ácido 2-hidroxi-propanoico > 85% natural.

B. Preparación de soluciones.

Para la obtención de los soportes poliméricos, se prepararon soluciones en cloroformo al 8% en peso del polímero. En relación con la mezcla de PLA/quitosano al 1%, fue necesario disolver de manera previa el quitosano en ácido 2-hidroxi-propanoico durante 2 h a 60°C en una placa de agitación. Mientras que, de manera paralela e independiente, el PLA se disolvió en cloroformo en las mismas condiciones que el quitosano, para posteriormente ser incorporadas y mezcladas con agitación por un periodo de 24 h, previo al proceso de la obtención del soporte.

C. Obtención de los soportes.

Los soportes con estructuras 2D y 3D fueron obtenidos mediante diferentes métodos.

1) Fabricación de soporte 3D (proceso de electrohilado).

Para el proceso de fabricación de los soportes 3D, se utilizó la técnica de electrohilado. Para ello, una solución polimérica al 8% en peso en cloroformo se colocó dentro de la bomba de jeringa TL-01 que alimenta al sistema con flujo de 2 mL/h . Esta jeringa, se encuentra conectada al extremo del capilar metálico (DI de 100 μm y longitud de 235 mm) y a un brazo mecánico que se desplaza dentro del sistema con una velocidad axial de $1 - 15 \text{ mm/s}$. Posteriormente, se aplicó un voltaje de 7.5 KV dentro del sistema de electrohilado (Electrospinning TL-01) con una distancia de 15 cm entre la punta del capilar y el colector rotatorio (ver figura 1). Siendo la velocidad del colector de 100 rpm.

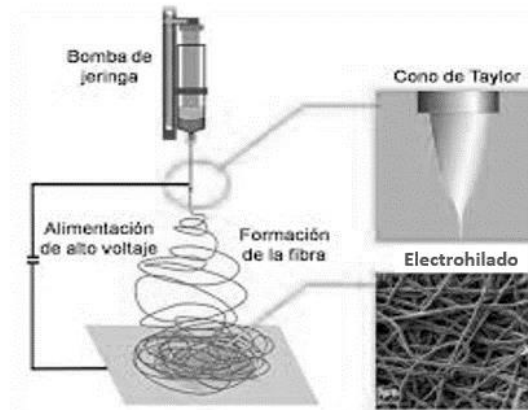


Figura 1. Diagrama de proceso de electrohilado.

2) Obtención de soportes 2D por uso de equipo engomadora.

Los soportes 2D se obtuvieron mediante el equipo Chem Instrument 510 LC-100 el cual contiene controladores para ajuste manual del espesor de la película a obtener. Dicho sistema permite tener mayor precisión y reproducibilidad, del espaciamiento de los rodillos de acero inoxidable que proporcionan control sobre el espesor del material depositado en el papel encerado de respaldo (sustrato). Este proceso es sencillo y consiste en verter la solución sobre el sustrato y hacerla pasar por los rodillos para obtener capas delgadas del material con espesor definido.

D. Caracterización fisicoquímica de los materiales.

1) *Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR).*

Es una técnica espectroscópica de análisis químico cualitativo que, principalmente, da información a partir de las vibraciones de los enlaces y proporciona evidencia de los grupos funcionales presentes. Los soportes se analizaron por medio de la técnica de espectroscopia de infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR) con un equipo Thermo Scientific Nicolet iS50. El estudio se realizó por el método de reflectancia total atenuada (ATR) utilizando un cristal de diamante. Las muestras fueron evaluadas con resolución de 4cm^{-1} y con 64 barridos por muestra en un intervalo de 650 a 4000cm^{-1} .

2) *Ángulo de contacto.*

La humectabilidad de los materiales es una propiedad superficial que puede ser evaluada a través de la medición del ángulo de contacto que se forma entre la fase sólida y la gota de un líquido cuando ésta entra en contacto con la superficie del material. El ángulo formado determinará el carácter hidrofílico (<90) o hidrofóbico (>90) que presenta debido a la interacción química de los grupos funcionales de los materiales en la superficie. La humectabilidad de las superficies de los soportes 2D y 3D, fueron evaluados a temperatura ambiente con un goniómetro a través de la técnica sessile drop (Biolin Scientific, Theta Lite), el cual se encuentra equipado con el software de análisis de imágenes One Attention. Para ello, una gota de aproximadamente $2.5\ \mu\text{L}$ de agua desionizada fue colocada sobre la superficie de los diferentes materiales y posteriormente una imagen es capturada, y el ángulo de contacto del agua (WCA) formado sobre la superficie se obtuvo mediante la ecuación de Young-Laplace. Cabe mencionar que para el experimento se realizaron 10 mediciones de cada uno de los soportes y los valores promedios y las desviaciones estándar fueron calculados.

3) *Calorimetría diferencial de barrido (DSC).*

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica que mide la diferencia entre la cantidad de calor absorbido o liberado de una muestra con respecto a una referencia cuando ambas son sometidas a un programa de temperatura controlada en un determinado intervalo de temperatura. La morfología de los diferentes soportes fue

evaluada mediante un Microscopio Electrónico de Barrido Dual Beam (FIB/SEM) FEI-Helios Nanolab 600. Para ello, los materiales fueron previamente colocados sobre un pin y recubiertos con oro durante 25s, a 4 mA en condiciones de vacío.

4) *Microscopio de fuerza atómica (AFM).*

Es una técnica que es utilizada para la caracterización de superficies a escalas atómicas y moleculares. La medición topográfica de los soportes se realizó utilizando un NAIOS AFM en modo contacto intermitente (tapping), un cantiliever (micropalanca) tipo Tap 190AI a una frecuencia de 161 KHz. El barrido se efectuó en diferentes puntos de la muestra en un área de 30 μm . El tiempo de análisis de cada placa fue 7 min y los resultados arrojados fueron imágenes topográficas de la superficie de los materiales.

5) *Microscopio electrónico de barrido (SEM).*

Es una técnica de caracterización superficial no destructiva que proporciona información sobre la morfología de los materiales. La cual es producida por la interacción de electrones y la superficie del material. La morfología de los diferentes soportes fue evaluada mediante un Microscopio Electrónico de Barrido Dual Beam (FIB/SEM) FEI-Helios Nanolab 600. Para ello, los materiales fueron previamente colocados sobre un pin y recubiertos con oro durante 25s, a 4 mA en condiciones de vacío.

E. Pruebas biológicas.

1) *Prueba MTS (prueba de viabilidad celular).*

El ensayo de proliferación celular no radiactivo CellTiter 96[®] es un método colorimétrico para determinar el número de células viables en ensayos de proliferación, citotoxicidad y quimiosensibilidad. El experimento consta de una placa de 96 pozos en la que se deposita el material y se añade 20 μL de solución MTS por pozo, envuelta en aluminio para evitar su reacción con la luz. Acto seguido, la placa es evaluada en un lector de microplacas con un filtro de 493 nm y un blanco de medio de cultivo.

2) *Prueba de vida y muerte.*

La prueba se basa en la evaluación simultánea de células vivas y muertas mediante sondas que reconocen dos parámetros de viabilidad celular, la actividad de esterasa intracelular (Calceína AM) y la integridad de la membrana (Etidio H-1). El experimento se realizó con 200 μL de solución de trabajo, el cual fue preparado con 20 μL de etidio y 5 μL de calceína por cada 10 mL de solución de trabajo en PBS, posteriormente los materiales con presencia de células de fibroblastos fueron incubados bajo condiciones atmosféricas de 95% de humedad a 37°C y 5% de CO_2 .

3) *Adhesión celular.*

La adhesión celular se evaluó a través de la morfología de las células sobre los materiales. Para ello, se utilizó la microscopía electrónica de barrido. Sin embargo, cabe destacar que, para dicha evaluación, los soportes con las células cultivadas deben ser previamente fijadas y colocadas sobre pines para ser evaluadas en el microscopio de barrido, en el cual se deposita una película de oro por la técnica de sputtering con un espesor de alrededor de 25 a 30 nm y posteriormente se procede a la evaluación mediante SEM.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los soportes 2D y 3D a partir de las diversas técnicas de caracterización utilizadas, así como los resultados de las pruebas *in vitro* para la biocompatibilidad de los soportes y la viabilidad, proliferación y adhesión celular de fibroblastos.

A. Caracterización química.

En relación con la caracterización química de los materiales, la espectroscopia de infrarrojo fue utilizada para validar la incorporación del quitosano dentro de la matriz de los soportes de PLA. Para ello, en primera instancia en la figura 1.1 a) y c) se muestran los espectros de los materiales puros (PLA y quitosano) con la finalidad de realizar la

identificación de los grupos funcionales característicos de cada uno de dichos materiales. En tanto que en la tabla 1 se encuentran reportados los grupos característicos de cada uno de ellos y el número de onda en la que se presenta su vibración correspondiente.

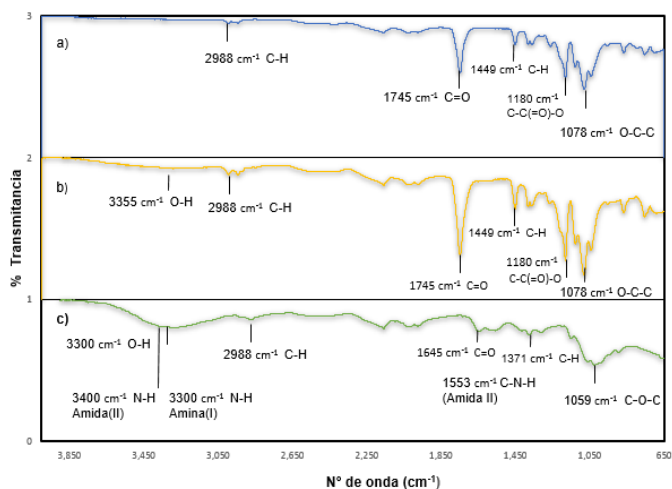


Fig. 1.1. Espectros FTIR: a) PLA b) PLA/Q y c) quitosano.





Tabla 1. Principales bandas características del PLA y quitosano.

Material	Grupo funcional	Enlace	Intervalo [cm ⁻¹]
PLA	Alcano (grupo metilo)	Enlace C-H	2840-3000
		Enlace C-H	1375-1450
	Carbonilo de éster alifático saturado	Enlace C=O	1735-1750
	Éster alifático saturado	Enlace C-C(=O)-O	1163-1210
	Éster alifático saturado	Enlace O-C-C	1030-1100
quitosano	Alcano (grupo metilo)	Enlace C-H	2840-3000
		Enlace C-H	1375-1450
	Carbonilo de amida alifático saturado	Enlace C=O	1640-1680
	Alcohol (hidroxilo)	Enlace O-H	3300- 3550
	Éter cíclico saturado	Enlace C-O-C	1085-1150
	Amina primaria	Enlace N-H	3300-3500
	Amida secundaria	Enlace N-H	3400-3520
	Enlace C-N-H	1515-1570	

B. Humectabilidad de los soportes.

La humectabilidad de los materiales a utilizar en el área de la ingeniería de tejidos es una de las principales características a evaluar, ya que de ella depende en gran medida la afinidad celular hacia el material. Para ello se determinó el ángulo de contacto mediante un goniómetro. Los resultados promedio obtenidos de 10 mediciones de cada uno de los soportes se encuentran reportados en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. *Ángulos de contacto de los diferentes soportes 2D y 3D.*

Tipo de Soporte	Material	Ángulo de contacto	Imagen
2D	PLA	71.4± 4.63	
	PLA/quitosano	72.8± 2.53	
3D	PLA	111± 9.0	
	PLA/quitosano	82± 9.63	

Se puede observar que el soporte 3D de PLA /quitosano, tiende a tener un comportamiento hidrofílico lo cual lo hace el mejor candidato, con estructura 3D, como soporte celular dado a su construcción y su carácter hidrofílico.

C. Caracterización térmica de los materiales.

Las propiedades térmicas de un material son importantes de evaluar durante la caracterización de un material, ya que dan cuenta de la “ventana de operación”, es decir del intervalo de temperaturas en el que el material puede utilizarse; además de las temperaturas en las que sufre alguna transición térmica importante como su transición vítrea (T_g) o su fusión (T_m).

Los termogramas de los materiales puros y la mezcla de PLA/quitosano al 1%, se presentan en la figura 2.

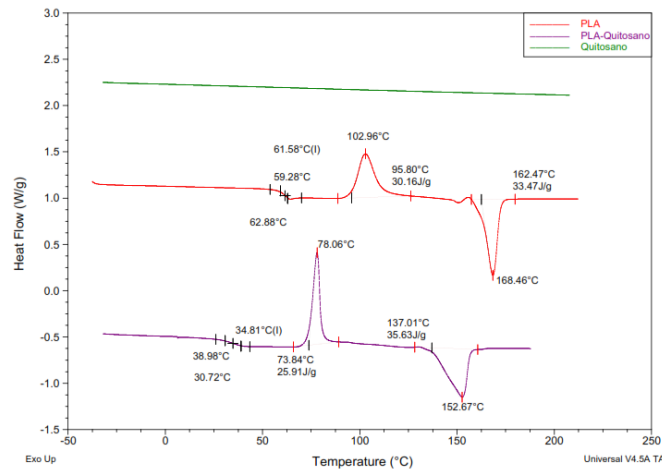


Fig. 2. Termogramas de los materiales: a) quitosano, b) PLA y c) PLA/quitosano.

En el termograma de la mezcla de PLA /quitosano(línea morada), podemos observar que su comportamiento es de un material semicristalino presentando una Tg a 34.81°C, seguido de un pico exotérmico de cristalización a 78.06°C y un endoterma de fusión a 152.67°C. Dichas transiciones estarían asociadas directamente al PLA, que respecto a los valores de dicho material puro son menores, lo cual podría ser indicativo de que existe una adecuada interacción, es decir compatibilidad con el quitosano y que éste tiene su transición térmica a valores de temperatura menores a la temperatura menor de análisis (-40 °C). Por ello se desplazan hacia valores más bajos. Lo anterior también nos indica que la mezcla es un material menos rígido y más flexible.

D. Caracterización morfológica y topográfica (SEM y AFM).

La caracterización de los materiales a través de técnicas como lo es SEM y AFM nos brinda información de las características morfológicas y texturales de los soportes poliméricos PLA/Quitosano, mediante la obtención de imágenes en el cual se analiza la porosidad y características de su morfología superficial.

1) Morfología de los soportes.

La morfología de los andamios 2D y 3D fueron evaluados por SEM (figura 3). En primera instancia respecto a las imágenes de los andamios obtenidos por la técnica de electrohilado, en la figura 3.1 a) y b), se puede observar que los soportes se encuentran

constituidos por fibras aleatorias que generan estructuras 3D con canales interconectados para cada una de las composiciones probadas (PLA y PLA/quitosano al 1%). En tanto que la Fig.3 c) y d) se presentan las imágenes de los andamios 2D, obtenidos mediante la engomadora. Se aprecia claramente que se trata de morfologías densas y, en el caso de la muestra de PLA/quitosano mayor porosidad que la muestra con únicamente PLA.

Con base a las micrografías obtenidas por SEM se realizaron diversas mediciones para las muestras 3D. Una de ellas, es el diámetro promedio de las fibras dentro de los soportes con construcción 3D (electrohilado).

En la figura 3.1 a) se puede observar el histograma correspondiente al soporte de PLA y se puede inferir que los valores más comunes de diámetro de fibra se encuentran en el intervalo de $6.324 - 7.531 \mu m$ con una frecuencia del 40%.

Por otro lado, en la figura 3.1 b) se presenta el histograma correspondiente a la distribución de diámetro de fibras del soporte de PLA/quitosano al 1%. En él se puede observar que los valores más comunes de diámetro de las fibras oscilan entre $0.55 - 1.74 \mu m$ con una frecuencia del 24%

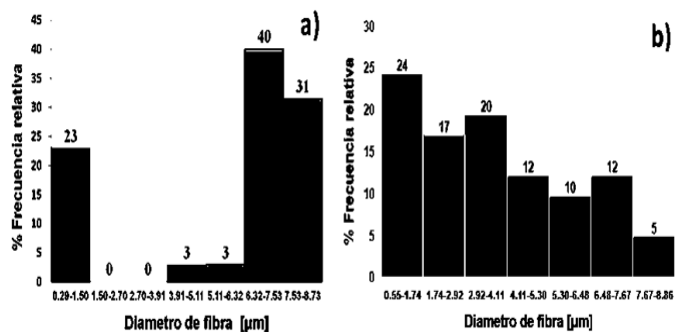


Figura 3. Distribución de diámetro de fibras del soporte obtenido por la técnica de electrohilado: a) PLA y b) PLA/quitosano.

En relación con los soportes 2D, se observó por medio de SEM la presencia de poros en una capa densa, como se mencionó previamente, por lo que la topografía de los materiales fue evaluada mediante la técnica de AFM (ver figura 3.2).

En ella se puede apreciar una superficie regular con una distribución de poros homogénea las cuales fueron evaluadas y reportadas en los histogramas de la figura 3.3

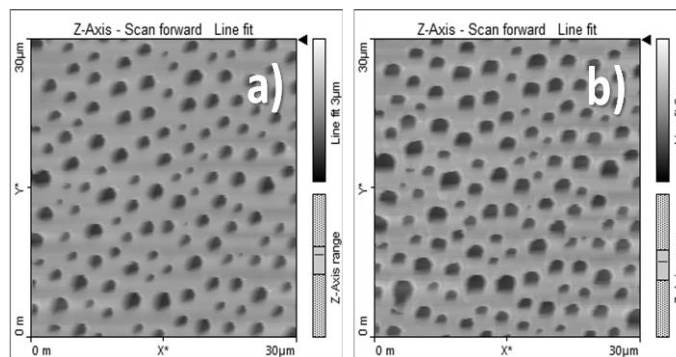


Fig. 3.3. Soporte 2D caracterizado mediante AFM: a) PLA y b) PLA/quitosano.

En los histogramas de la figura 3.4 a) se presentan los valores obtenidos de la distribución de tamaño de poro promedio para el soporte de PLA, mientras que en la figura 3.4 b) se presentan los resultados del soporte de PLA/quitosano.

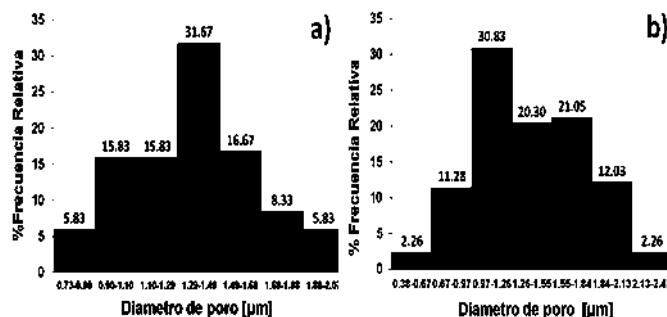


Figura 3.4. Distribución de diámetro de poro de soportes 2D: a) PLA y b) PLA/quitosano.

A partir de dichas figuras se puede decir que los valores más comunes de diámetro de poro se encuentran en el intervalo de 1.29 – 1.49 μm con una frecuencia del 31.67% para el caso del PLA. En tanto que para el PLA/quitosano el diámetro de poro se encuentra en el intervalo de 0.97 – 1.26 μm con una frecuencia del 30.83%. Es decir, los soportes 2D de PLA/quitosano presentan un diámetro de poro más pequeño y con una distribución más amplia.

Con relación al porcentaje de porosidad de los materiales, se utilizaron dos metodologías diferentes dependiendo del tipo de construcción. Para el caso de los soportes 3D que fueron obtenidos por la técnica de electrospinning la porosidad fue determinada acorde a la metodología propuesta por Shao y col. mediante la siguiente ecuación:

$$Porosidad = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad promedio del soporte 3D y ρ_0 la densidad del polímero.

Con relación a la porosidad de los soportes 2D obtenidos mediante la engomadora, se utilizaron los datos obtenidos por AFM (diámetros de poro, porosidad y las dimensiones del área) para determinar su valor mediante la siguiente expresión:

$$Pososidad = \frac{\sum Area\ de\ poro}{Area\ de\ la\ imagen} \times 100 \quad (2)$$

Los valores obtenidos de las porosidades de cada uno de los materiales se encuentran reportados en la tabla 2.

Tabla 2. Porosidad de los soportes.

Material	Engomadora	Electrospinning
	Porosidad [%]	
PLA	20	76
PLA/quitosano	23	70

En la tabla anterior se puede observar que, como era de esperarse, la técnica de electrohilado presenta estructuras más porosas que los soportes obtenidos mediante la engomadora.

a) *Pruebas in vitro.*

Los materiales fueron sometidos a diferentes técnicas de ensayos in vitro que permitirán evaluar el potencial uso del material en la regeneración de piel.

1) *Prueba MTS (prueba de viabilidad celular).*

El ensayo de MTS es una prueba que permite determinar el número de células viables mediante la tinción de una sal de tetrazolio. Los resultados del ensayo son presentados en la figura 4, donde se muestra el porcentaje de proliferación celular, que es debida a la actividad metabólica de las células al estar en contacto con cada uno de los materiales utilizados.

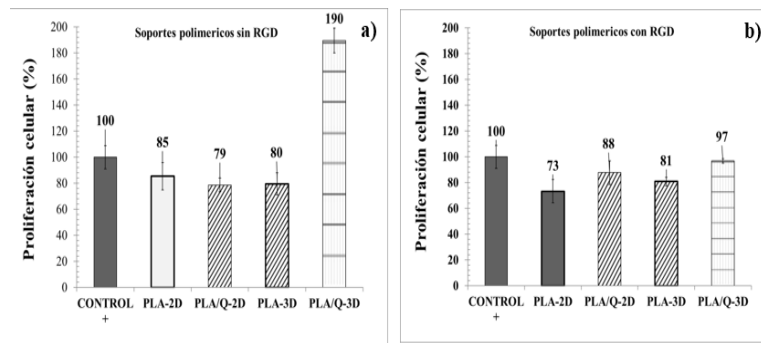


Fig. 4. Proliferación celular (MTS): a) Soportes poliméricos sin RGD y b) Soportes poliméricos con RGD.

En la figura 4 se observa el porcentaje de proliferación celular respecto a la muestra control, y se puede apreciar que los soportes no presentan efectos citotóxicos, incluso cuando éstos no fueron previamente tratados con RGD, ya que la viabilidad celular no decayó más del 30%, que es el valor que está estipulado en la norma ISO 10993-5.

2) Vida/muerte.

En relación con los resultados obtenidos de los ensayos de vida/muerte, las imágenes presentan de una manera clara la biocompatibilidad del material, esto debido a la tinción de color verde fluorescente de las células viables (células vivas) y de color rojo fluorescente de las células no viables (células muertas).

Cabe señalar que la prueba se realizó con el uso de un control positivo y control negativo los cuales se pueden observar en la figura 5 a) y d), respectivamente

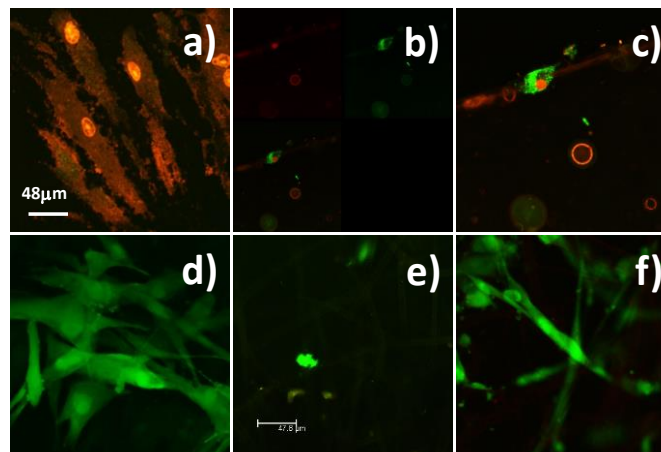


Fig. 5. Ensayos de vida/muerte de soportes sin tratamiento de RGD: a) Control negativo, b) soporte de PLA y c) PLA/quitosano con construcción 2D, d) Control positivo, e) soporte de PLA y f) PLA/quitosano con construcción 3D.

En primera instancia, en la figura 5 b) y c), se pueden apreciar los soportes con configuración 2D y se puede observar una alta densidad celular en la muestra de PLA/quitosano con células viables y extendidas. Mismas que pueden también ser apreciadas en los soportes con construcciones 3D, en especial con quitosano figura 5 f). Esta prueba está en concordancia con la de proliferación celular, ya que el soporte 3D con PLA/quitosano, exhibe notoriamente la viabilidad celular. Además, aquí es notorio el efecto del quitosano, el cual promueve justamente la viabilidad de las células.

En segundo término, en la figura 5.1 se presentan los soportes con tratamiento RGD.

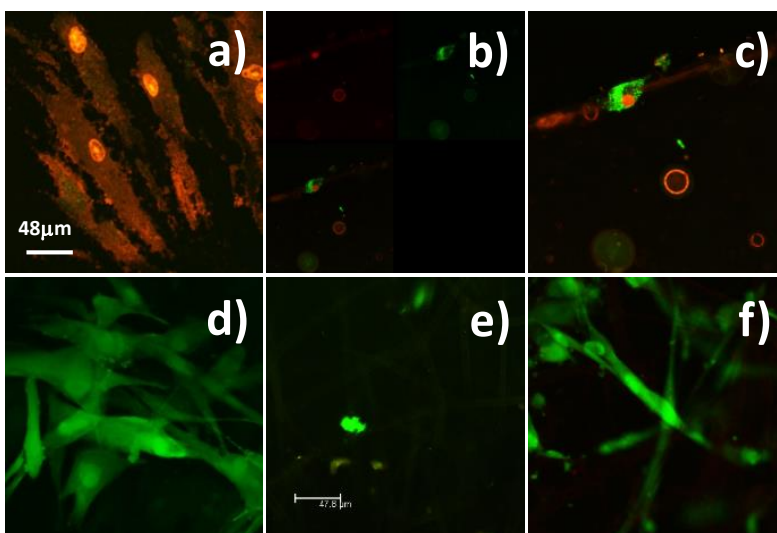


Fig. 5.1. Ensayos de vida/muerte de soportes sin tratamiento de RGD: a) Control negativo, b) soporte de PLA y c) PLA/quitosano con construcción 2D, d) Control positivo, e) soporte de PLA y f) PLA/quitosano con construcción 3D.

En la figura 5.1 b) la micrografía corresponde al soporte polimérico de PLA con construcción 2D, y en ella, se puede ver una baja densidad celular con células viables y extendidas, mientras que en la figura 5.1 c) se presenta la micrografía del soporte 2D de PLA/quitosano y se observan células con el núcleo teñido de rojo fluorescente, es decir que se encuentran células muertas, aunque la densidad celular de células viables es fácilmente apreciable. Así mismo, se aprecian células viables en las micrografías e) y f) aunque con una baja densidad celular en f). Lo anterior querría decir que el material presenta poca o nula toxicidad hacia las células de fibroblastos.

3) Adhesión celular (*Microscopia Electrónica de Barrido*).

La adhesión celular puede ser evaluada a través de la morfología que presentan las células de fibroblastos sobre los diferentes soportes mediante SEM. En primera instancia se muestran en la Fig 5. las imágenes de las muestras control. En ellas se observan las células de fibroblastos con la morfología típica, es decir, células extendidas y alargadas de alrededor de 200 μm . Además, se aprecian células con confluencia alta e incluso en la figura 6. b) y c) se puede apreciar que existe una buena adhesión celular y las células tienen ya comunicación entre ellas.

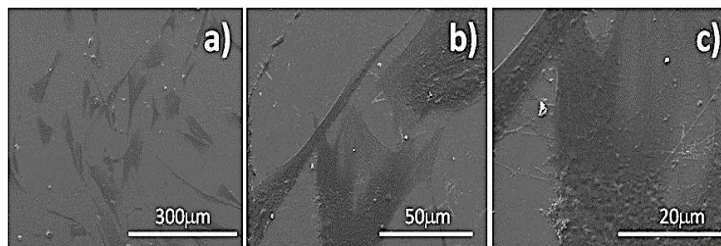


Fig. 6. Imágenes SEM de fibroblastos cultivados en la muestra control: a) 200 x, b) 1000 x y 3000x.

Con relación a las imágenes de las células de fibroblastos en los soportes 2D obtenidos y tratados con RGD, éstas se presentan en la figura 6.1. En dicha figura se aprecia un fibroblasto completamente extendido en donde incluso se puede apreciar el núcleo de la célula y las extensiones fibrosas con las que la conexión celular tuvo lugar.

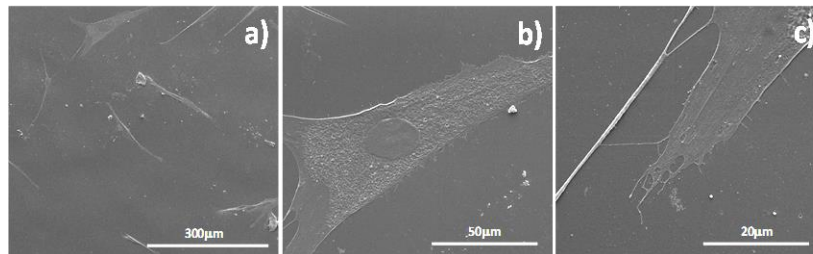


Fig. 6.1. Imágenes SEM de fibroblastos cultivados en la muestra control: a) 200 x, b) 1000 x y 3000x Imágenes SEM de fibroblastos soportados en muestras con estructura 2D y tratadas con RGD: a) 200x, b) 1000x y c) 2500x soportes de PLA.

En la figura 6.2 se puede apreciar la adhesión de una célula de fibroblasto sobre el soporte PLA/quitosano, la cual se encuentra extendida, sin embargo, se observa una baja densidad celular por lo que no es posible observar una conexión celular.

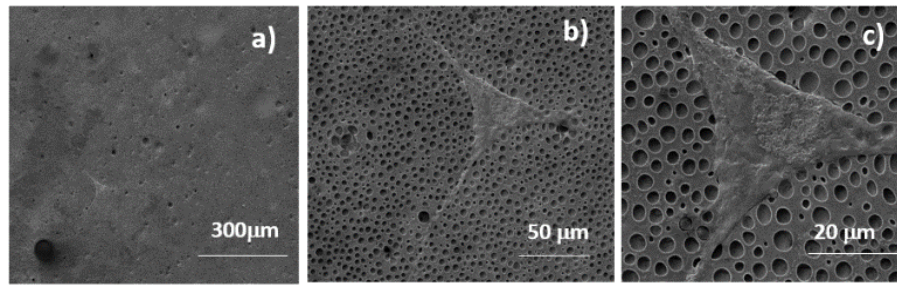


Fig. 6.2. Imágenes SEM de fibroblastos soportados en muestras con estructura 2D y tratadas con RGD: a) 200x, b) 1000x y c) 2500x soportes de PLA/quitosano.

Con relación a las imágenes de las células de fibroblastos en los soportes con estructura 3D obtenidos y tratados con RGD, éstas se presentan en la figura 6.3. En dicha figura se puede apreciar en la imagen a) la alta densidad celular que presenta este soporte, así como en la imagen b) y c) que incluso presenta conexión celular.

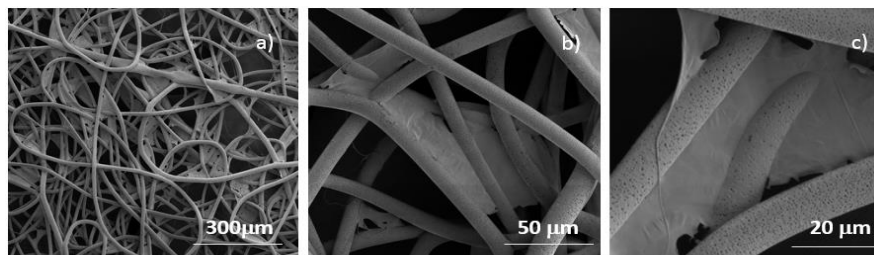


Fig. 6.3. Imágenes SEM de fibroblastos soportados en muestras con estructura 3D y tratadas con RGD: a) 200x, b) 1000x y c) 2500x soportes de PLA.

En la figura 6.4 se puede apreciar en la imagen c) una célula de fibroblasto completamente extendida y adherida en el soporte, sin embargo, este presenta una baja densidad celular que impide que se lleve a cabo una conexión celular.

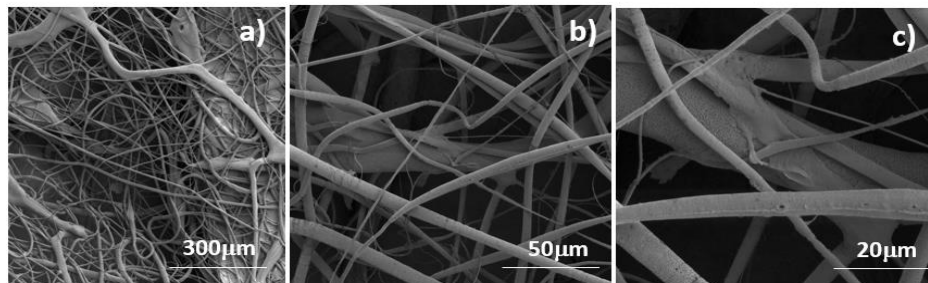


Fig. 6.4. Imágenes SEM de fibroblastos soportados en muestras con estructura 3D y tratadas con RGD: a) 200x, b) 1000x y c) 2500x soportes de PLA/quitosano.

La baja densidad celular en los soportes 3D puede deberse a su porosidad que limita la interconexión entre células, aunque ello no impide la adhesión de éstas al soporte, y probablemente sea cuestión de tiempo para incrementar la densidad celular en este tipo de soportes.

4. Conclusión

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- ✚ Es posible obtener soportes de poli (ácido láctico) y poli (ácido láctico) /quitosano con estructura 2D y 3D, mediante técnicas de engomado y electrohilado respectivamente.
- ✚ La estructura 2D de los soportes favorece un comportamiento hidrofílico, por lo que estos materiales, pudieran resultar ser atractivos en la ingeniería de tejido, dado que su hidrofiliidad, favorecería la adhesión celular.
- ✚ En tanto que la estructura 3D de los soportes parecería que tienden a exhibir un carácter hidrofóbico, aunque ello se debe más a la baja continuidad superficial que exhibe el soporte que a la interacción interfacial entre el agua y el soporte.
- ✚ La incorporación del quitosano modifica el comportamiento térmico del PLA, como consecuencia de la discontinuidad que se crea dentro de la matriz polimérica. No obstante, existe compatibilidad entre ambos materiales.
- ✚ Los soportes generados no presentan efectos citotóxicos, aun cuando las muestras no fueron previamente tratadas con RGD, sin embargo, se sabe que el tratamiento con RGD favorece la adhesión celular en la matriz polimérica mediante la interacción de los grupos funcionales de dicha sustancia con aquéllos presentes en los materiales poliméricos.
- ✚ Se comprobó, mediante la prueba de vida y muerte, la viabilidad que tienen las células de fibroblastos sobre los soportes 2D y en especial PLA 3D con RGD.
- ✚ La estructura 3D de los soportes facilita la viabilidad y proliferación celular, en especial en presencia de quitosano, el cual influye positivamente en ello.

Referencias

- [1] García,J., Adriana. (2016). Análisis del comportamiento micromecánico del asfalto. *Infraestructura Vial*, 18(31), 39-45.
- [2] Organización Mundial de la Salud (2008). Quemaduras. Recuperado de <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/burns>.(Verificado abril, 2019).
- [3] Sarvazyan, N. (2012). *Creation of Living Tissue: An Engineering Feat Cell and Tissue Engineering*, Springer, 1-18.
- [4] Vacanti, J, y Langer, R. (1999). Tissue engineering: the design and fabrication of living replacement devices for surgical reconstruction and transplantation. *The lancet*, 354, S32-S34.
- [5] Zilberman M. (2011) Novel Composite Antibiotic-Eluting Structures for Wound Healing Applications. In: Zilberman M. (eds) *Active Implants and Scaffolds for Tissue Regeneration. Studies in Mechanobiology, Tissue Engineering and Biomaterials*, Springer,8, 1-24.
- [6] Arslantunali, D, Dursun, T, Yucel, D, Hasirci, N, y Hasirci, V. (2014). Peripheral nerve conduits: technology update. *Medical Devices (Auckland, NZ)*, 7, 405.

5 | Uso de Termografía en Pruebas de Calidad de Manufactura

D. E. García Martínez¹⁷, E. S. Kolosovas Machuca¹⁸, J. J. Jaime Rodríguez¹⁹, R. C. Martínez Montejano²⁰.

Resumen

El proceso de control de calidad de una empresa es de las labores más importantes para garantizar el correcto funcionamiento de su producto y poder lanzarlo al mercado, además que asegura el generar la menor cantidad de residuos, y, por ende, ahorro de material, tiempo y dinero de producción. Los análisis de calidad en la producción de envases plásticos son realizados por sensores que miden la presión interna, los cuales no cuentan con una resolución de detección muy alta, además pueden dañarse con facilidad. Es por eso que en este trabajo se propone el uso de una cámara termográfica para mejora de la detección de daños estructurales a escala milimétrica. La visualización de los daños se realiza mediante un programa de procesamiento digital de imágenes elaborado en LabVIEW, los resultados arrojan una detección mínima de 0.4 mm, lo cual mejora el proceso de control de calidad y supera el nivel de detección de los sensores de presión.

¹⁷D. E. García Martínez (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.

¹⁸E. S. Kolosovas Machuca (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología (CIACYT), Sierra Leona #550, Lomas de San Luis, 78210 San Luis, S.L.P., México.
e-mail. samuel.kolosovas@uaslp.mx

¹⁹J. J. Jaime Rodríguez (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media, Carretera Rioverde-San Ciro, Km 4, El Carmen, 79615 Rioverde, S.L.P., México.
e-mail. jj.jaime@ieee.org

²⁰R. C. Martínez Montejano (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media, Carretera Rioverde-San Ciro, Km 4, El Carmen, 79615 Rioverde, S.L.P., México.
e-mail. roberto.montejano@uaslp.mx

Palabras Clave: Control de Calidad, Procesamiento Digital de Imágenes, Presión, LabVIEW.

1. Introducción

El desarrollo del comercio ha ocasionado que las industrias sean cada vez más competitivas. Cada empresa trata de lanzar al mercado un producto con la mejor calidad, para un uso efectivo por el consumidor, esto hace que la etapa de control de calidad sea un proceso crucial en cada empresa. Existen diversos parámetros a considerar para un control de calidad en la manufactura de envases para establecer la calidad del producto, el parámetro es elegido considerando cual es más relevante para instaurar el control. La geometría es un punto a analizar que puede depender solamente de la vista humana, sin embargo, existen factores donde el ojo humano no tiene la habilidad necesaria para solventar este problema. Como alternativa surgen los sistemas de visión artificial, capaces de detectar errores que el operador puede pasar por alto [1].

La vista es uno de los sistemas más complejos y especializados del cuerpo humano, es capaz de detectar formas, colores, luminosidad, tamaños y demás cualidades de uno o varios objetos en simultáneo. El ojo humano es un órgano fotorreceptor, cuya función, ya implícita, consiste en recibir los rayos luminosos procedentes de los objetos presentes en el mundo exterior y transformarlos en impulsos eléctricos que son conducidos al centro nervioso de la visión en la parte posterior del cerebro. La luz (energía electromagnética) incide en el ojo y es transformada en impulsos nerviosos por la retina. Para ello, la retina posee dos tipos de células especializadas en captar la luz (foto-receptores): los conos y los bastones. Los impulsos nerviosos son transmitidos al cerebro a través de los nervios ópticos. Finalmente, el córtex visual del cerebro (junto a otras áreas) da forma y sentido a la imagen [2].

Las computadoras obtienen la capacidad de ver a través de cámaras conectadas a ellas. Estas cámaras pueden tomar fotografías (una imagen) o animaciones (secuencia de imágenes, vídeo). Las imágenes son tratadas y procesadas para convertirlas en nuevas imágenes con mejor información, esto es conocido como procesamiento de imágenes. A continuación, se usa la información contenida en las imágenes procesadas para resolver un problema del mundo real [3].

Cuando se usan cámaras de visión artificial se puede trabajar con dos tipologías diferentes de imágenes con información sobre temperatura: las termográficas y las térmicas. La termografía proporciona una medida exacta del valor de temperatura real de los objetos. Son un mapa de la temperatura de los objetos y normalmente son datos en bruto que se han de procesar y no se pueden visualizar directamente. La térmica, son cualitativas, una imagen que representa, para la escena captada, las diferencias de temperatura existentes, pero sin ser capaces de determinar la temperatura exacta de un punto concreto de la misma. Son dos formas de trabajar con la misma información, pero con usos y finalidades diferentes [4].

El control de calidad es el conjunto de los mecanismos, acciones y herramientas realizadas para detectar la presencia de errores. Da una verdadera garantía de calidad, esta es posible desarrollarse en todos los pasos de todos los procesos y lograr una producción 100 por ciento libre de defectos. No basta encontrar los defectos y fallas y corregirlos, el plan de trabajo debe encontrar las causas de los mismos para lograr evitarlas en un futuro [5].

Pasos para la realización de un control de calidad:

- ✚ Probar la necesidad de mejora.
- ✚ Identificar los proyectos concretos de mejora.
- ✚ Organizar para la conducción de los proyectos.
- ✚ Organizar para el diagnóstico o descubrimiento de las causas.
- ✚ Diagnosticar las causas.
- ✚ Probar que la solución es efectiva bajo condiciones de operación.
- ✚ Proveer un sistema de control para mantener lo ganado.

Durante la manufactura de envases plásticos para productos básicos como lo pueden ser bebidas o hasta productos más delicados que contengan cierto tipo de medicamentos pueden presentar daños en su estructura física, los cuáles permitirían la entrada de agentes externos (polvo, luz, humedad, etc.) y dañar el producto interno del recipiente. Estos daños no son detectables a simple vista por un control de calidad o por medio de sensores que no cumplan con la resolución mínima necesaria para realizar una correcta detección.

El siguiente trabajo propone la implementación de la tecnología termográfica en el proceso del control de calidad en la manufactura de envases plásticos mediante un

programa de procesamiento digital de imágenes (PDI), mejorando notablemente la resolución de detección y así mismo, mejorando el control de calidad del proceso.

2. Desarrollo de Experimentación e Implementación de Programa de PDI

En el municipio de Rioverde, S.L.P. se encuentra una empresa productora en envases plásticos como los que se aprecian en la figura 1, la cual proporcionó los envases para la realización del proyecto.



Fig. 1. Envase de 1.89 litros.

Se perforaron envases con la ayuda de agujar quirúrgicas con los siguientes diámetros: 1.6 mm, 0.6 mm y 0.4 mm.

Posteriormente por medio de un circuito neumático que se visualiza en la figura 2, se realizó la inyección de aire a través de la botella, una electroválvula controlada por un sensor de presión regulaba la entrada de aire, el sensor estaba configurada que si se alcanzaba una presión interna de 1.4 bar detendría el ingreso de aire dentro del envase, confirmando que el mismo se encuentra en buen estado.



Fig. 2. Circuito neumático de inyección de aire.

El sensor solo fue capaz de hacer una detección con la fisura de 1.6 mm, mientras que en el resto detectaba que no existía fuga.

Mientras se inyectaba el aire en los envases, con ayuda de la cámara termográfica FLIR One Pro se hizo la captura de la imagen termográfica de los envases, posteriormente estas imágenes fueron introducidas en un programa de PDI desarrollado en el software de LabVIEW; el panel frontal del programa es apreciado en la figura 3.

El algoritmo con el que se desarrolló el programa es el siguiente:

- ✚ Obtención de la imagen original.
- ✚ Transformación a escala de grises.
- ✚ Corrección Flat-Field.
- ✚ Filtro pasa-bajas.
- ✚ Corrección del tipo BCG.
- ✚ Segmentación e inversión.
- ✚ Cálculo de distancias y filtro de partículas.
- ✚ Segmentación de objeto pequeños.
- ✚ Localización de daño y visualización.

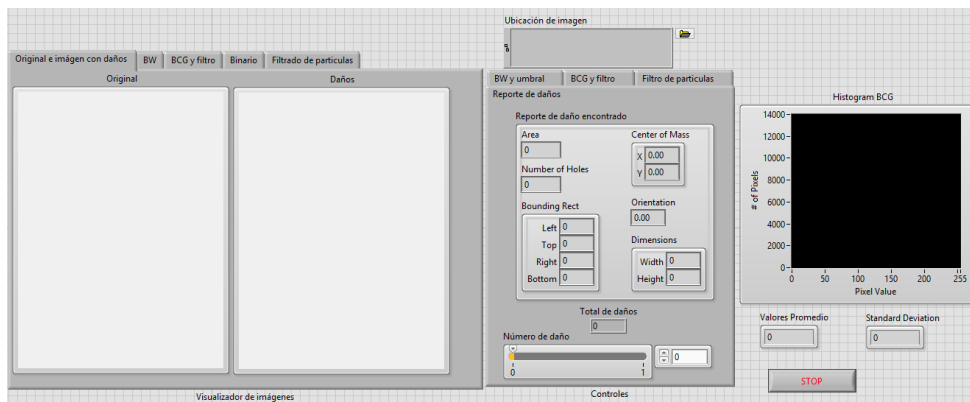


Fig. 3. Panel frontal de programa de PDI.

La detección de daños se presentaría debido a que la botella se encuentra a temperatura ambiente, mientras que el aire inyectado tiene una temperatura menor, al salir por la perforación genera un cambio de temperatura, siendo detectado por el cámara termográfica y finalmente visualizado por el programa de procesamiento digital de imágenes (PDI).

3. Resultados Otorgados por Programa de PDI en LabVIEW

Colocando las imágenes de las botellas con y sin daños, el programa arroja los siguientes resultados:

En la figura 4 se aprecia una botella sin daño, la cual fue comprobada con ayuda del sensor de presión, en la parte inferior se contabilizan los defectos encontrados por el programa, la primera imagen es la captura original, mientras que la segunda es una copia con una localización mediante rectángulos de la localización de daño. Se puede apreciar claramente que no se encontró algún desperfecto en la botella.

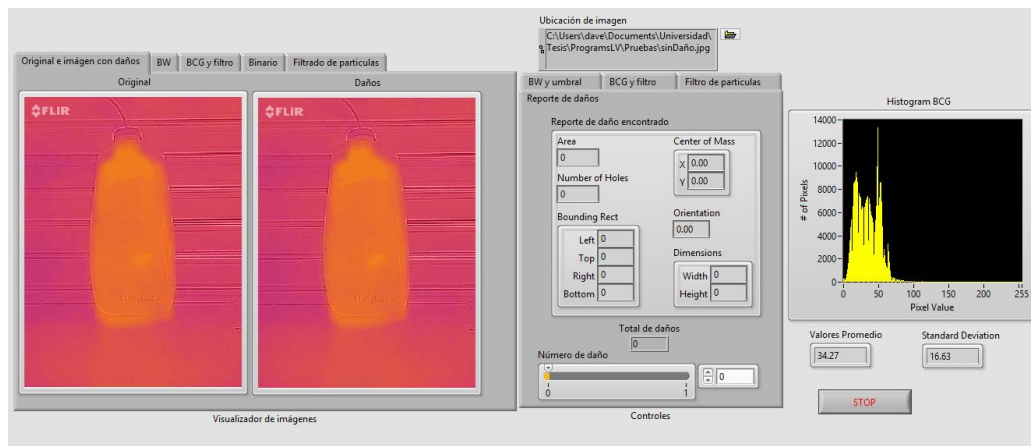


Fig. 4. Envase sin daños.

La figura 5 es una botella con un daño de 0.4 mm, el más pequeño que se pudo realizar, el sensor era incapaz de detectar el cambio en la presión interna del envase, debido a que era muy pequeña, al introducir la imagen al programa se pudo apreciar el lugar de la falla, además de identificar desperfectos de la dispersión de plástico en el interior del envase.

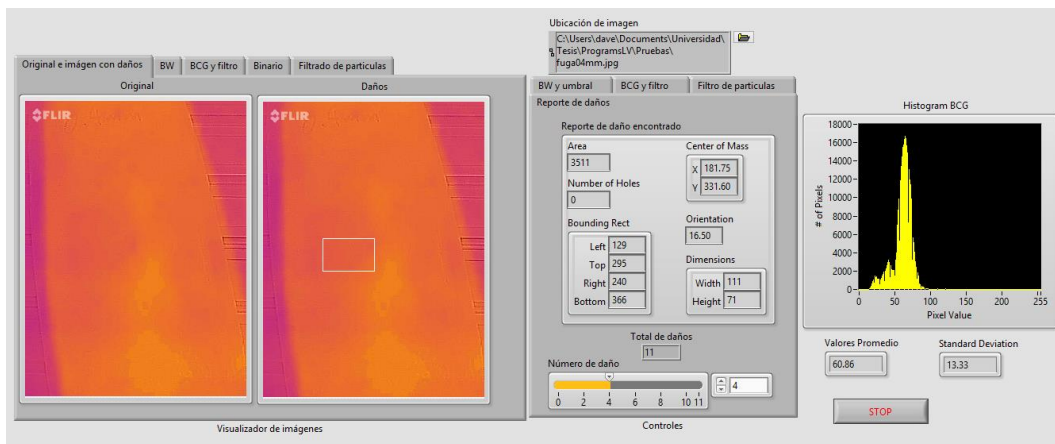


Fig. 5. Envase con daño de 0.4 mm.

La Figura 6 contiene un daño más grande en comparación del anterior, comprobando la detección con el sensor de presión, los resultados eran aleatorios, no se podía determinar con exactitud ya que variaba con cada prueba, mientras que la imagen termográfica fue capaz de detectar el daño y localizarlo mediante el recuadro blanco en la segunda imagen.

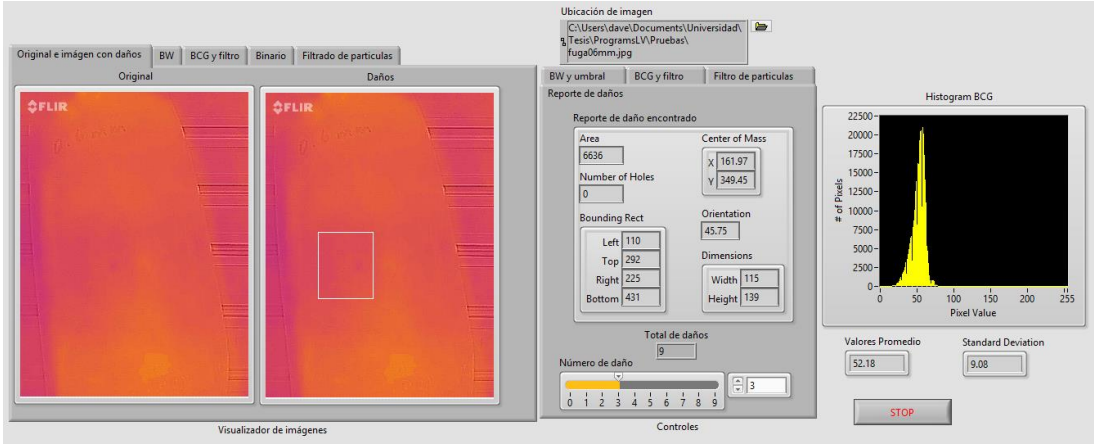


Fig. 6. Envase con daño de 0.6 mm.

La figura 7 es la imagen con el daño más grande provocado, el sensor en conjunto con el programa fue capaces de realizar la detección, esto porque la perdida de presión dentro del envase ya se encontraba en un margen detectable.

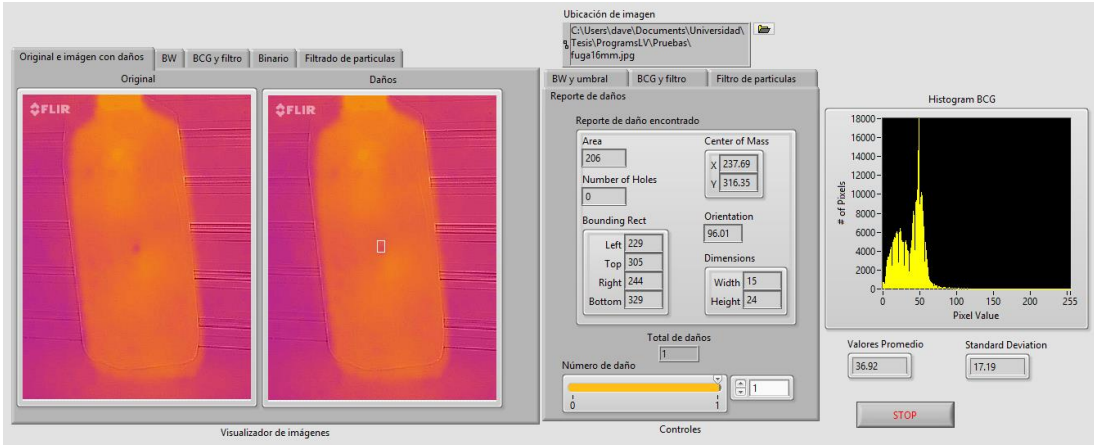


Fig. 7. Envase con daño de 1.6 mm.

4. Conclusión

Los daños provocados a los envases se hicieron con la intención que no pudieran ser detectados a simple vista, el sensor tuvo una precisión de 1.6 mm, mientras que la cámara termográfica en conjunto con el programa de PDI llegó a la precisión de 0.4 mm, un daño de este tamaño es extremadamente difícil de detectar por medio de la vista humana. La ayuda de la incorporación de sistemas de visión artificial crea una mejora sustancial en el nivel de control de calidad; la cámara termográfica entrega una gran ventaja en comparación de las cámaras convencionales, no se necesita un acondicionamiento de luz para su visualización, el sistema de visión artificial con cámara termográfica tiene la versatilidad de poder trabajar incluso en oscuridad.

En cuanto al control de calidad, la precisión de detección es mayor a comparación de un sensor, de esta forma una empresa tiene más certeza de asegurar que su producto se encuentra en condiciones óptimas para salir a mercado. El programa proporciona un informe de cuantos daños se encontraron dentro de la botella, incluyendo su posición, esto con ayuda de las herramientas de calidad ayuda a generar un diagnóstico de por qué los envases salen de producción con este daño, para de esta forma plantear una estrategia para eliminar los desperfectos de producciones futuras.

Como trabajo futuro se realizarán pruebas de detección con el programa de PDI en envases rechazados por el sensor usado en la empresa manufacturera de envases, además de realizar la detección en tiempo real con una cámara que permita la transmisión de su imagen, ya sea por comunicación Wireless o Ethernet para poder realizar pruebas en la línea de producción.

Referencias

- [1] M. Z. Rey, C. A. P. Rodríguez, M. R. M. Torres, and C. J. B. Medina, “Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador (CIM),” *Ing. y Univ.*, vol. 11, no. 1, 2007.
- [2] J. A. C. Osorio, F. A. M. Aguirre, and J. A. M. Vargas, “Sistema de visión por computador para el control de calidad en la producción,” *Sci. Tech.*, vol. 16, no. 45, pp. 130–134, 2010.
- [3] E. Cuevas, D. Zaldivar, and M. Pérez, “Procesamiento Digital de Imágenes usando Matlab & simulink (Primera edición ed.),” México Alfaomega Grup. Ed., 2010.
- [4] F. SISTEMAS, “Guía de termografía para mantenimiento predictivo.” Guía, 2011.
- [5] K. Ishikawa, “Que es el control total de calidad?,” 1986.

6 | Bifurcación Automática del Atractor Caótico Rössler Usando Ni MyDAQ y Arduino

L. R. Villa Salas²¹, L. J. Ontañón García²², M. T. Ramírez Torres²³.

Resumen

Se presenta la implementación electrónica del sistema de Rössler. Ajustado de tal manera que uno de sus parámetros se puede cambiar automáticamente mediante la programación de un Arduino. La adquisición de las señales del circuito se realiza a partir de una tarjeta de adquisición de NI-DAQ. La idea es poder controlar las bifurcaciones de forma directa mediante la implementación electrónica para ajustar los parámetros del sistema en valores deseados.

²¹L. R. Villa Salas (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, Carretera Salinas-Santo Domingo 200, 78600, Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.
e-mail. luis.villa.s@uaslp.alumnos.edu.mx

²²L. J. Ontañón García (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, Carretera Salinas-Santo Domingo 200, 78600, Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.
e-mail. luis.ontanon@uaslp.mx

²³M. T. Ramírez Torres (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, Carretera Salinas-Santo Domingo 200, 78600, Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.
e-mail. tulio.torres@uaslp.mx

1. Introducción

Los sistemas caóticos han sido implementados en diversas áreas a lo largo de las últimas décadas debido a las características que genera su comportamiento no lineal. En particular, se han implementado en el desarrollo de generadores aleatorios y pseudoaleatorios en criptografía, en el ajuste de trayectorias en robótica para cuestiones de seguridad, e incluso en cuestiones de redes de sistemas complejos para el análisis de conectividad entre nodos [1-4]. Dichos sistemas han sido analizados por diversos métodos a manera de determinar sus parámetros o criterios de estabilidad. Uno de los análisis más utilizados es el de bifurcación, mediante el cual se considera un parámetro dado un sistema y se aplica un amplio rango de variación. La intención es observar el comportamiento resultante en la estabilidad del sistema que depende intrínsecamente del valor que es asignado o del parámetro variado. Esto se puede representar por un diagrama que facilita ver las soluciones que se generan y como bifurcan los estados para dicho rango de valores que se generan al variar los parámetros del sistema [5]. De esta manera se pueden estudiar los valores de parámetros específicos para los cuales el sistema cambia (bifurca) su comportamiento, ya sea periódico repitiendo los valores de sus estados a lo largo del tiempo, caótico con un comportamiento aperiódico, estable si su dinámica se estabiliza en un punto fijo a lo largo del tiempo, o bien inestable.

2. Antecedentes

Generalmente los sistemas caóticos son estudiados mediante soluciones numéricas, como por ejemplo métodos de integración del tipo de Runge Kutta u otros más. Pero esto puede ser una gran desventaja considerando el estado finito de memoria de la computadora y la posibilidad de errores en las aproximaciones numéricas. Por lo cual, el diseño o implementación electrónica de dichos sistemas nos presenta una opción más real de la solución exacta que resulta en sus estados. Utilizando los métodos de Orponen [6] basados en componentes electrónicos de respuesta analógica, tales como los amplificadores operacionales, se puede diseñar un sistema dinámico en una implementación electrónica física, cuya respuesta sea completamente real y dependiente únicamente de las características de los dispositivos y de sus tolerancias.

Este ejercicio del diseño de implementaciones electrónicas se ha realizado en múltiples propuestas que involucran sistemas caóticos, véase por ejemplo [7] y las referencias que ahí se mencionen. Sin embargo, el estudio de la bifurcación ha sido analizado en menor detalle considerando esta parte física del sistema. De manera que existen pocas contribuciones al estudio de bifurcaciones en sistemas caóticos implementados electrónicamente, por ejemplo, las propuestas de Tse, C. K. [8] y Ricco, R. A. et. al. [9]. Sin embargo, estos sistemas presentan la característica de que los parámetros de bifurcación se tienen que realizar mediante funciones deslizantes como diente de sierra, o bien por medio de la variación de potenciómetros que cambian las ganancias o voltajes de ciertos elementos del sistema. Esto, resulta en una gran dificultad, ya que el ajuste de parámetros específicos deseados se vuelve en una actividad manual imprecisa que requiere en ciertas ocasiones la desconexión de los elementos del circuito con la intención de medir sus valores.

3. Propuesta

Tomando en consideración los métodos de bifurcaciones electrónicas mostradas anteriormente, se propone una solución alterna a la generación de valores específicos de parámetros de bifurcación para sistemas dinámicos implementados electrónicamente en este artículo. La idea es utilizar un sistema híbrido (parte digital parte analógica) para el control y ajuste de dichos parámetros. Esto es, utilizar resistencias con control digital que presentan una tolerancia baja y precisión ideal para la implementación electrónica analógica de este tipo de sistemas. Para ejemplificar la propuesta se usará el sistema de Rössler [10], como un sistema caótico de prueba conocido por su dinámica característica de bifurcación.

La intención sería variar uno de los parámetros del sistema mediante el voltaje que se genera de un potenciómetro digital y un amplificador operacional con ganancia variable. De tal manera que se generen voltajes precisos en un rango determinado de valores que resultarían en la ganancia de voltaje del parámetro a bifurcar. El sistema se implementaría de igual forma mediante cómputo analógico (véase [5,7]) para que la solución de sus ecuaciones de estado sean reales y no presenten discretización.

4. Justificación

Los sistemas para detección de bifurcación que se mencionaron previamente se realizan mediante un circuito que varía automáticamente el parámetro μ del sistema de Rössler, pero se hace mediante una señal de diente de sierra. Posteriormente, la señal obtenida del circuito es procesada y el osciloscopio se configura para retener estos valores y que se puedan visualizar.

La importancia de la propuesta que aquí presentamos es que al optar por variar el parámetro de bifurcación mediante un potenciómetro digital se tiene una mayor exactitud en los cambios. También este parámetro puede ser controlado con mayor libertad. El procesamiento de la señal se hace mediante una lectura realizada por una tarjeta NI myDAQ, la cual digitaliza la información del sistema y finalmente dentro de MATLAB se puede analizar y procesar la información obtenida para poder tomar los valores de los puntos del diagrama de bifurcación.

5. Descripción de Secciones

El artículo se conforma de la siguiente manera, en la Sección 2 se habla acerca de los sistemas caóticos y del sistema de Rössler que es el utilizado para la parte de bifurcación, se describe que es la bifurcación y los parámetros bajo los que se estudió, también se mencionan las características con las que un sistema dinámico debe cumplir para considerarse caótico. La Sección 3 describe cómo generar el circuito en base a las ecuaciones dadas, como se configuran los componentes usados, a su vez se indica los componentes utilizados extra para hacer las mediciones y el procesamiento de la información. En la Sección 4 se explica cómo se procesan las lecturas del sistema para detectar cuando el sistema está bifurcando y como se clasifican los datos para generar el diagrama de bifurcación, al igual que se describe como se conectan las tarjetas al circuito y cuál es su función, también se especifican los valores de las resistencias usadas en el circuito. En la Sección 5 se muestran y discuten los resultados de la parte experimental, y por último se presentan las conclusiones del trabajo.

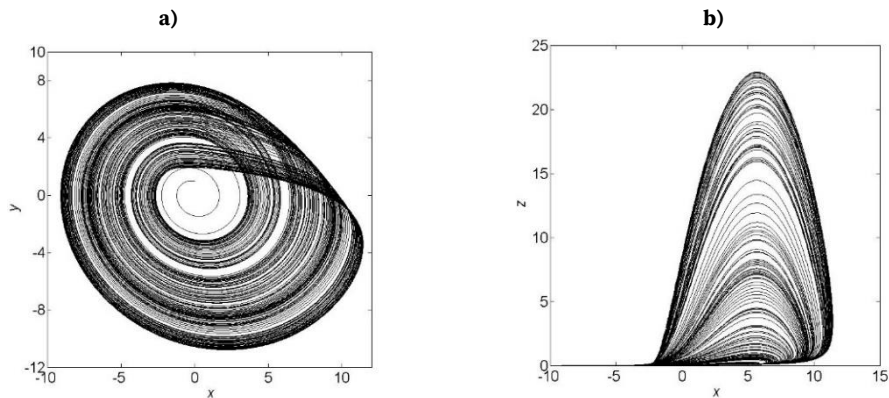


Fig. 1. Proyección del sistema dado por la ec. (1) en el plano a) (u, v) y b) (v, w) .

6. Sistemas Caóticos

Un sistema caótico se puede definir como un sistema dinámico el cual nunca pasa por el mismo punto 2 veces, por esto es obligatorio que un sistema caótico sea de 3 o más dimensiones, de esta manera la trayectoria nunca cruza por el mismo punto ya que pasa una detrás de otra.

El ejemplo más común y conocido de sistemas caóticos es el atractor estudiado por Edward Lorenz, mejor conocido como el atractor mariposa ya que esta toma la forma de un par de alas de mariposa, compuesto de 3 ecuaciones diferenciales ordinarias que representaban un modelo extremadamente simplificado de convección atmosférica.

“La mayoría de los sistemas dinámicos tienen movimientos tan complejos, con trayectorias tan erráticas, que resulta imposible toda predicción detallada para tiempos grandes” [11].

Un sistema dinámico se considera caótico al cumplir con las siguientes características:

2. En una zona determinada los puntos son densos: Es decir que, aunque nunca pasarán por el mismo punto 2 veces, si pueden pasar muy cerca unos de otros, como se puede observar en la fig.1a existen zonas con líneas de un color más oscuro que otras, esto quiere decir que existe una mayor cantidad de puntos conglomerados en estas zonas o bien las orbitas pasan muy cerca unas de otras.
3. El sistema depende de las variaciones mínimas en sus condiciones iniciales: A la variación más mínima, su comportamiento puede ser totalmente diferente,

como se menciona en el efecto mariposa “El aleteo de una mariposa en Brasil puede producir un tornado en Texas”.

4. El sistema es transitivo: Es decir que, dados dos puntos cualesquiera, se puede encontrar una órbita que se acerque a ambos.

A pesar de este comportamiento impredecible, el sistema es determinista, es decir, que para las mismas condiciones iniciales el sistema actuará siempre de la misma manera.

7. Sistema de Rössler

Uno de los sistemas caóticos más comunes es el de Otto Rössler (1976), quien propuso un sistema simple compuesto de 3 ecuaciones no lineales:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= -v - w \\ \frac{dv}{dt} &= u + av \\ \frac{dw}{dt} &= b + w(u - c)\end{aligned}\quad (1)$$

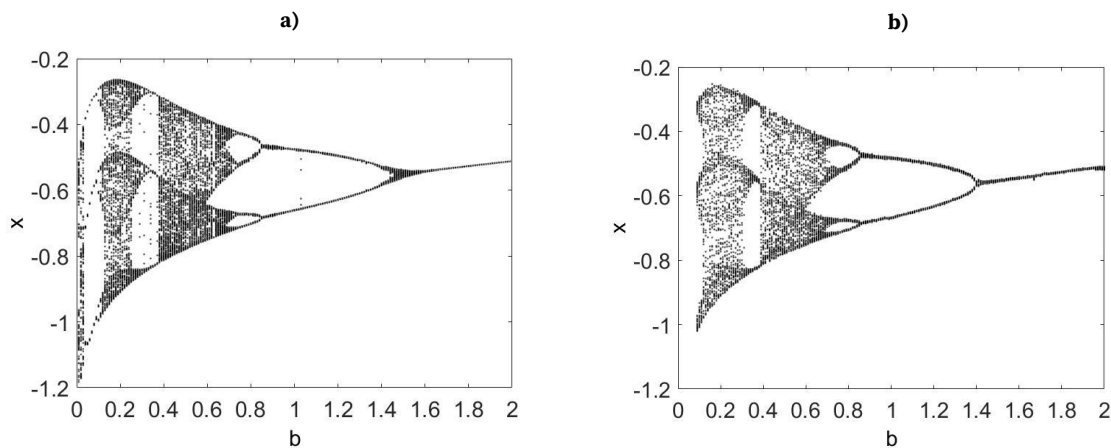


Fig. 2. Diagrama de bifurcación a) calculado y b) medido.

Los valores más comunes para los parámetros son: $a = b = 0.2, c = 5.7$. Para la representación en el circuito, los amplificadores operacionales serán alimentados con ± 15 voltios (V) por lo que el estado de saturación se alcanza en valores en aproximadamente 13 V, nótese que en la figura 1 los valores en u van de +10 hasta -10, en v de +10 hasta -12 y en w de 0 a 25, por lo que si los consideramos como voltajes esto satura el amplificador

operacional, para lo cual se le aplicó una reducción a las ecuaciones mediante un cambio de variable, nótese que en las ec. 2 ahora el parámetro b está siendo dividido por 10 (el factor de reducción), y en la no linealidad, x se multiplica por el factor de reducción para que el sistema sea el mismo, pero con los rangos de voltaje reducido.

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -y - z \\ \frac{dy}{dt} &= x + ay \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{b}{\theta} + z(\theta x - c); \theta=10.\end{aligned}\tag{2}$$

8. Bifurcación del Sistema

La dependencia en los parámetros es característica en los sistemas caóticos, al variar estos parámetros se aprecia un cambio en la estabilidad del sistema, a estos cambios se le conocen como Bifurcación. Para el caso de Rössler, el resultado de esta bifurcación para a , b y c están ya muy estudiados, y es por esto el más útil para trabajar la parte de bifurcación.

La variación de uno de sus parámetros se realizará de manera automática con un amplificador inversor, con un voltaje de 1V a la entrada de este y con potenciómetro digitales como resistencia de feedback para controlar la amplificación, conforme el valor que el potenciómetro tome la salida tendrá una ganancia de 1/100 hasta 2. Los estados del circuito serán leídos por una tarjeta NI myDAQ y se empleará una tarjeta arduino para la variación de los potenciómetros digitales.

Si capturamos todos los valores en x al momento que y cruce por el punto fijo 0 y graficamos respecto a la variación de un parámetro se obtiene un Diagrama de Bifurcación. Una vez generado el diagrama este nos ayuda a ver el comportamiento del sistema para ciertos valores de los parámetros, en la figura 2 se puede apreciar el diagrama de bifurcación, generado por a) Matlab en comparación por el diagrama generado mediante la adquisición de datos por la tarjeta b) Ni myDAQ, para los valores del parámetro b con $0 \leq b \leq 2$ note que para valores como $b = 0.3$ se presenta un periodo 3 (es por eso que se ven tres regiones delgadas), para $b = 0.8$ se aprecia un periodo 4, de 0.9 hasta 1.4 presenta

periodo 2 y desde 1.4 hasta 2 se aprecia un periodo 1, en valores para b como 0.2, 0.4 y 0.5 se puede ver que el sistema es caótico por una mayor conglomeración de puntos.

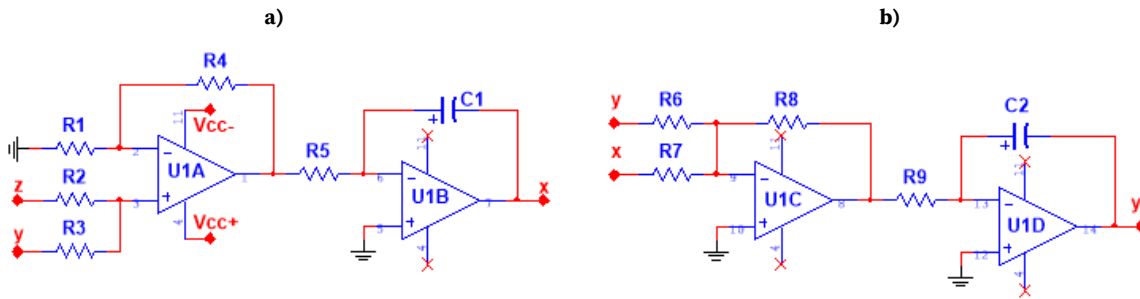


Fig. 3. Circuito para la ecuación de a) x y b) y .

9. Construcción del Circuito Basado en las Ecuaciones del Sistema

Para que el circuito pueda representar el comportamiento del sistema de ecuaciones es necesario configurar los amplificadores operacionales, o bien OpAmps, para que realicen cada operación que las ecuaciones contengan, dadas las ec. 2 del sistema de Rössler es necesario ordenar las resistencias para que las señales se amplifiquen, se sumen o se integren.

1) Configuración de OpAmps.

Para generar una ganancia a la salida de una OpAmp es necesario ordenar las resistencias según la siguiente forma R_f/R_{in} con esta proporción se calcula la ganancia que una señal tendrá a la salida del integrado.

Una configuración muy utilizada es el amplificador inversor ya que cuenta con retroalimentación negativa, y esto ayuda a que la señal se mantenga lo más estable posible, este suma las señales que entran en la terminal inversora en caso de que exista más de una e invierte el signo de entrada, como se puede apreciar en la fig. 4 el integrado U2D está configurado como amplificador inversor con una ganancia de $1/15$, es decir que si a la entrada hay x a la salida habrá $-x/15$.

Otra de las configuraciones usadas en el circuito es el amplificador integrador, como se puede observar en el integrado U1B a diferencia del amplificador inversor este en lugar de una resistencia de feedback tiene un capacitor, y ambos invierten el signo de las entradas.

2) Diseño de las Ecuaciones al Circuito.

Para representar las ecuaciones del sistema mediante los circuitos integrados es necesario calcular una resistencia de referencia (R_{ref}) para que el amplificador no invierta los signos a la salida, esta configuración se puede aplicar para ecuaciones de la forma $a_{1p}x_1 + a_{2p}x_2 + \dots + a_{np}x_n + a_{1n}x_1 + a_{2n}x_2 + \dots + a_{mn}x_m$ para valores tales que $a_{np} > 0$ y $a_{mn} < 0$.

Donde:

- ✚ $A_+ = \sum_{i=1}^n |a_{i+}|$ (Es el valor absoluto de la sumatoria de todos los coeficientes de cada término positivo de la ecuación en caso de que exista).
- ✚ $A_- = \sum_{i=1}^n |a_{i-}|$ (Es el valor absoluto de la sumatoria de todos los coeficientes de cada término negativo de la ecuación en caso de que exista).

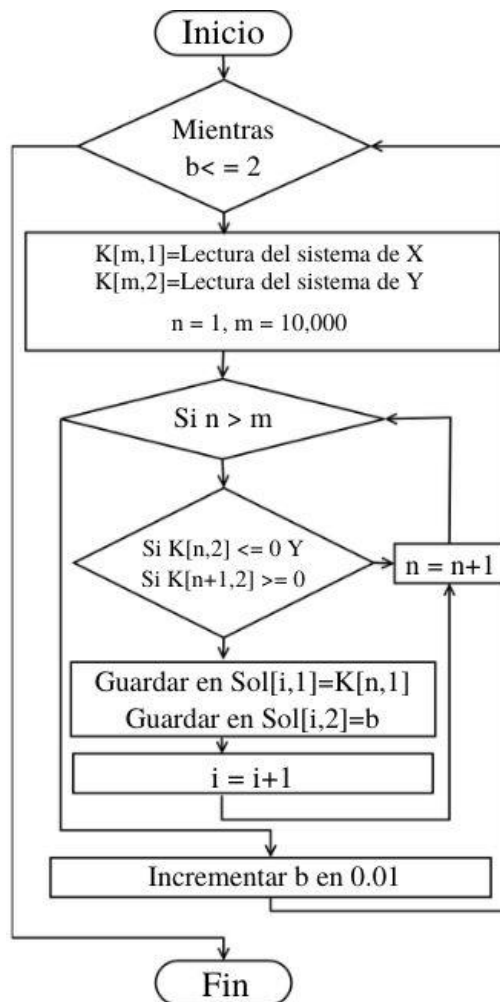


Fig. 3. Circuito para la ecuación de a) x y b) y .

Dependiendo del signo de la resistencia de referencia, es la terminal del OpAmp a la que se conectará (es decir que si R_{ref} es negativo se conectará a la entrada inversora), para sumar las señales con su respectivo coeficiente (a) es necesario calcular la resistencia de entrada (R_{in}) respecto a la resistencia de retroalimentación (R_f) con la siguiente proporción $R_{in} = R_f/a$, en la ec. 2 para x se suman los términos $-z$ y $-y$; Considerando que el OpAmp integrador invierte el signo, se multiplica la ecuación por un -1 para hacer el análisis, por lo tanto, queremos sumar z y y , usando la ec. 3 obtenemos que $A_- = 0$ y $A_+ = 2$ por lo que $R_{ref} = -R_f$, como podemos observar en la fig. 3a en el circuito U1A la resistencia de referencia ($R_{ref} = R1$) está conectado a la entrada inversora y las resistencias de entrada de z y y están conectadas a la entrada no inversora, lo que quiere decir que se están sumando, la ganancia se da por $R4/R2$ en el caso de z y $R4/R3$ para el caso de y .

10. Diseño de Detección de Bifurcación en un Circuito Caótico de Rössler

Mediante un programa en MATLAB como se aprecia en la figura 4 se analizan los datos adquiridos por la tarjeta NI myDAQ, se hace una lectura del sistema para cada variación del parámetro b , después a cada iteración se analizan los datos obtenidos del eje y , en un arreglo de soluciones se guarda el valor del parámetro b y el de x cuando y cruza por cero, de esta manera si se grafican todos los datos guardados en el arreglo de soluciones se generará el diagrama de bifurcación del sistema de Rössler para el parámetro b .

1) Estructura del Hardware.

El circuito completo se aprecia en la figura 3 y 4 en las cuales se muestran las conexiones necesarias para que cada ecuación se vea representada a la salida del OpAmp integrador los cuales son U1B, U1D y U2C.

Para poder hacer la lectura del sistema y calcular el diagrama de bifurcación se emplea una tarjeta Arduino UNO para controlar la variación del parámetro de bifurcación b esto mediante dos potenciómetros digitales X9C104P conectados en serie para generar una resistencia variable de 0 a 200 K Ω y además una tarjeta NI myDAQ para la lectura del sistema conectada a las salidas x y y del circuito, esta tarjeta tiene una frecuencia de muestreo de 10K Hz, es decir 10 mil datos por segundo.

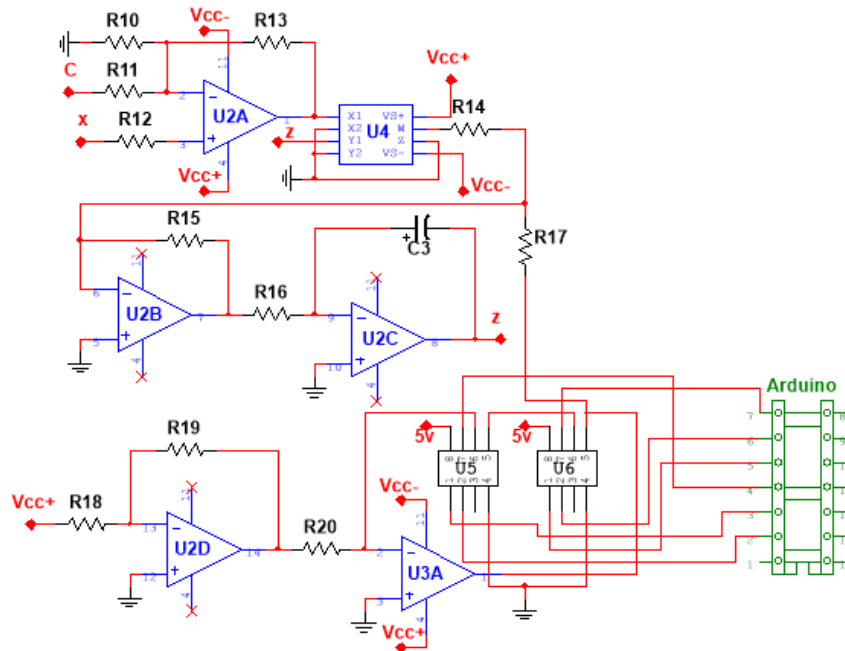


Fig. 5. Circuito para la ecuación z .

Casi todos los circuitos son alimentados con una fuente de poder a $\pm 15 V$, únicamente los integrados $U5$ y $U6$ (Potenciómetro digital) son alimentados por la placa Arduino con $5 V$.

Tabla 1. Valores de Resistencias.

Resistencia	Valor	Resistencia	Valor
R17	$1M\Omega$	R18	$150K\Omega$
R6, R15 y R20	$100K\Omega$	R11 y R13	$120K\Omega$
R1, R2, R3, R4, R7, R8, R14 y R19	$10K\Omega$	R10	$15K\Omega$
R5, R9 y R16	$1K\Omega$	R12	$12K\Omega$

Se emplearon las resistencias de los valores de la tabla anterior todas con tolerancia de $\pm 5\%$, los elementos $C1$, $C2$ y $C3$ son capacitores de poliéster de $1\mu F$

11. Resultados y Discusión

Como se muestra en la figura 2b el diagrama generado de las mediciones es muy parecido al calculado en Matlab, a diferencia de que este tiene menos calidad, es decir que el tamaño de paso empleado en el diagrama medido es menor al calculado por factores

como el tiempo de procesamiento ya que la medición requería de cierto tiempo para obtener los datos y al aumentar la resistencia era necesario esperar un momento para que el valor del potenciómetro se estabilizara, el ruido que se generaba en el circuito cambio ligeramente la forma del diagrama esperado.

Los potenciómetros digitales solo cuentan con 100 pasos cada uno por lo que en este diseño si se requiere mayor resolución para la generación del diagrama es necesario agregar más potenciómetros digitales y cambiar la resistencia de entrada para que los valores estén dentro del rango de voltaje analizado.

Para ver el funcionamiento en un osciloscopio es necesario no variar el parámetro b muy abruptamente ya que las lecturas generan cierto ruido y esta variación hacía que el circuito se saturase. Es posible cambiar este medio para la variación del parámetro, pero se optó por los potenciómetros digitales ya que es más fácil y uniforme la variación del parámetro.

12. Conclusiones

En caso de querer analizar y manipular los datos de la bifurcación del sistema de Rössler este método es muy efectivo, ya que se digitaliza la señal y se guardan dentro de Matlab facilitando así el manejo de los datos, incluso se puede controlar las resistencias del potenciómetro digital para analizar un punto en específico de las variaciones del parámetro b , se puede adaptar a cualquier parámetro solo es necesario calcular el valor de la resistencia de entrada, y el voltaje de entrada para obtener la variación deseada, con un número de pasos fijo dependiendo de la cantidad de potenciómetros digitales con los que se cuenten.

El problema que surge en el uso de los potenciómetros digitales es la resolución del muestreo, ya que, si fuese necesario mayor resolución para el tamaño de paso en el análisis, será necesario agregar más potenciómetros digitales para generar más posibles estados, y a su vez serán necesarias más señales de control.

Referencias

- [1] García-Martínez, M., Ontañón-García, L. J., Campos-Cantón, E., & Čelikovský, S. (2015). Hyperchaotic encryption based on multi-scroll piecewise linear systems. *Applied Mathematics and Computation*, 270, 413-424.
- [2] Nakamura, Y., & Sekiguchi, A. (2001). The chaotic mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(6), 898-904.
- [3] Anzo-Hernández, A., García-Martínez, M., Campos-Cantón, E., & Ontañón-García, L. J. (2019). Electronic implementation of a dynamical network with nearly identical hybrid nodes via unstable dissipative systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 127, 272-282.
- [4] Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. CRC Press.
- [5] Drazin, P. G., & Drazin, P. D. (1992). *Nonlinear systems* (Vol. 10). Cambridge University Press.
- [6] Orponen, P. (1997). A survey of continuous-time computation theory. In *Advances in algorithms, languages, and complexity* (pp. 209-224). Springer, Boston, MA.
- [7] Ontañón-García, L. J., Campos-Cantón, E., & Femat, R. (2016). Analog electronic implementation of a class of hybrid dissipative dynamical system. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 26(01), 1650018.
- [8] Tse, C. K. (2002). Experimental techniques for investigating chaos in electronics. In *Chaos in Circuits and Systems* (pp. 367-384). and digital signal processing, 40(10), 626-633.
- [9] Ricco, R. A., Verly, A., & Amaral, G. F. V. (2016). A Circuit for Automatic Measurement of Bifurcation Diagram in Nonlinear Electronic Oscillators. *IEEE Latin America Transactions*, 14(7), 3042-3047.
- [10] Rössler, O. E. (1976). An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 57(5), 397-398.
- [11] Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. CRC Press.

7 | Selección de Series Temporales Caóticas como Criterio de Seguridad para Sistemas de Cifrado

L. E. Reyes López²⁴, J. S. Murguía Ibarra²⁵, H. González Aguilar²⁶.

Resumen

En este trabajo, las series de tiempo (ST) de diferentes versiones del sistema Chua se analizan a través del análisis wavelet; el cual consiste en el análisis de escala y de energía en función de la transformada wavelet. Los resultados muestran tres tipos diferentes de comportamiento en las ST: frecuencia portadora, ruido Gaussiano y fractal. De acuerdo con las características presentadas en los diferentes comportamientos, se introduce un criterio de selección de series de tiempo para ser utilizado como herramienta auxiliar en un sistema de cifrado de imágenes. Se observa que el esquema de cifrado de imágenes, considerando el criterio del análisis de escala con la dinámica caótica inherente, exhibe resultados comparables a algunas pruebas estadísticas diferentes. Creemos que este criterio de escala puede ser útil para elegir la mejor combinación de series temporales en un sistema de cifrado de imágenes.

²⁴L. E. Reyes López (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. eduardo.reyes@uaslp.mx

²⁵J. S. Murguía Ibarra (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Facultad de Ciencias, Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. ondeleto@uaslp.mx

²⁶H. González Aguilar (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Facultad de Ciencias, Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. hernan.gonzalez@uaslp.mx

1. Introducción

Desde la antigüedad, la búsqueda de algoritmos o procedimientos para proteger diferente tipo de información ha sido un tema complejo. En la actualidad se ha mostrado un mayor interés por hacer más eficientes estos algoritmos, y a su vez más flexibles, con la finalidad de mantener segura la diferente información que esté relacionado a sus necesidades.

Actualmente, existen un gran número de sistemas de cifrado, tales como el DES (“Data Encryption Standard”), AES (“Advanced Encryption Standard”), IDEA (“International Data Encryption”), entre otros. Su principal objetivo es proteger la información por medio de un algoritmo que hace uso de una o más llaves. Con la finalidad de hacer más robusto el sistema de cifrado se hace uso de transformadas tiempo frecuencia, mapeos caóticos, entre otros procedimientos, o bien la conjunción entre ellos. Asimismo, muchos de estos sistemas sacrifican el tiempo de procesamiento para tener un cifrado más confiable o viceversa, el cifrado es menos confiable, pero se logra un menor tiempo en el proceso de cifrado y descifrado. Por otra parte, se debe tomar en cuenta que algunos procesos o algoritmos para cifrar la información son mejores que otros, y que al combinarlos puede aumentar la seguridad del sistema de cifrado, ya que se podrían tener diferentes niveles de seguridad y no uno solo. De ahí el interés de buscar un sistema que tenga un balance “óptimo” que considere todas las situaciones posibles. Además, cuando se combinan técnicas o procedimientos solo se han tomado en cuenta que el cifrado cumpla con ciertas pruebas estadísticas sin establecer nada referente al tipo de transformación y sus características, el tipo de sistema con dinámica caótica, criterios de energía, entre otros. De ahí la imperiosa necesidad de plantear un sistema de cifrado que contemple las previas interrogantes, así como el considerar que sea eficiente y flexible con un buen desempeño.

2. Transformada Wavelet

El uso de una transformada matemática tiene como uno de sus principales objetivos encontrar una representación alternativa en un dominio diferente que muestre características que en el dominio original serían difíciles o casi imposibles de detectar. Además, en muchas situaciones con las propiedades de la transformación pueden facilitar o realizar de manera más flexible operaciones de carácter analítico o numérico. En el caso

de la transformada Wavelet (TW), como se observará, tendremos la descomposición de una señal en términos tanto del tiempo y en el dominio de la escala mediante los procesos de dilatación y traslación. En este trabajo se considera la versión discreta de la TW, la cual considera un conjunto de funciones wavelet que conforman una base de carácter ortogonal (u ortonormal) en $L^2(\mathbb{R})$. En este caso, la TW se lleva a cabo en una versión discreta de los parámetros de dilatación y traslación a y b , respectivamente. Dentro de este contexto, una señal arbitraria $x(t)$ de energía finita se puede expresar en términos de una base ortonormal wavelet como:

$$x(t) = \sum_m \sum_n d_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (1)$$

donde los coeficientes de la expansión se dan por la expresión

$$d_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}(t) dt \quad (2)$$

En la ecuación (2) la familia de funciones wavelet con dilataciones y traslaciones discretas son definidas de la forma

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{m/2} \psi(2^m t - n) \quad (3)$$

con m y n denotando los índices de dilatación y traslación, respectivamente. Asimismo, la contribución de la señal en un nivel particular m esta dado como

$$d_m(t) = \sum_n d_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (4)$$

el cual provee información del comportamiento de la señal dentro de diferentes bandas de escala.

De acuerdo con [3], el espectro de potencia $P(\omega)$ para procesos aleatorios autosimilares, que corresponde a la 2 transformada de Fourier de la función de autocorrelación, presenta el siguiente comportamiento [4].

$$P(\omega) \sim |\omega|^{-\beta} \quad (5)$$

donde ω corresponde a la frecuencia angular y es el parámetro espectral. El exponente se relaciona con los procesos aleatorios autosimilares estadísticamente denominados procesos $1/f$ mediante la expresión $\beta = 2H + 1$, donde H es denominado como parámetro de autosimilaridad [3]. Debido a la estructura tiempo-escala (frecuencia) que presenta la transformada wavelet discreta (TWD), ha resultado apropiado estudiar o

analizar funciones, distribuciones o procesos que tienen características autosimilares. Aún más importante, la varianza de los coeficientes wavelet, $var\{d_{m,n}\}$, está relacionada con los niveles de descomposición m a través de la siguiente ley de potencia [3]

$$var\{d_{m,n}\} \sim (2^m)^{-\beta} \quad (6)$$

Este resultado ha sido usado para encontrar niveles dominantes asociado con la señal y por ende tratar de caracterizarla. Con la finalidad de estimar el exponente de escala β , se utiliza el ajuste por mínimos cuadrados del siguiente modelo lineal

$$\log_2\{var(d_{m,n})\} = -m\beta + (K + v_m) \quad (7)$$

donde K y v_m son constantes relacionadas con el procedimiento lineal. La Ecuación (6) presenta tres tipos de comportamiento, que se describen a continuación:

- a. Si en la gráfica de la varianza se muestra un máximo en un nivel particular de transformación, o bien en un conjunto pequeño de niveles de transformación, implica que tiene una alta concentración de energía, lo cual indica que se tienen estructuras coherentes en tal escala o nivel de transformación.
- b. Si en la gráfica de la varianza se presenta una recta con pendiente negativa, entonces la señal presenta un comportamiento *fractal*, y el exponente β (o H) caracterizan tal señal.
- c. Si en la gráfica de la varianza se presenta una recta con pendiente cero, entonces la señal presenta un comportamiento tipo *ruido Gaussiano*, es decir, la señal presentará características similares a las de ruido en el espectro de potencia.

3. Sistemas Dinámicos de Chua

Desde la década de los noventa se han incrementado el uso de osciladores caóticos en diferentes aplicaciones, por ejemplo; sistemas de comunicación, de cifrado, entre otras [1]. Por otra parte, el hipercaos fue definido por Rössler como la dinámica en un atractor caótico que cuenta con más de un exponente positivo de Lyapunov, indicando que en su dinámica pueden exhibir una expansión multidimensional [2]. Por lo que, los sistemas hipercaóticos tienen una gran aplicación en sistemas que involucren seguridad, debido a su alta complejidad y aleatoriedad.

En la referencia [6], se presenta una versión del sistema caótico de Chua, el cual se describe con el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha(y - h_a(x, z)) \\ \dot{y} &= x - y + z \\ \dot{z} &= -\beta y\end{aligned}\tag{8}$$

donde α y β son parámetros del sistema. La función $h_a(x, z)$ se define como

$$h_a(x, z) = \begin{cases} f_1(x) & |z| \geq a \\ -f_1(x) & |z| \leq a \end{cases}\tag{9}$$

donde a es un parámetro positivo. Este modelo tiene la ventaja de modificar el comportamiento del sistema dinámico al cambiar este parámetro [6].

Tal sistema presenta un parámetro a , cual al fijarlo en diferentes valores.

La función $f_1(x)$ es de carácter lineal a trozos definida por $f_1(x) = m_1x + 1/2(m_0 - m_1)(|x + 1| - |x - 1|)$ con m_0 y m_1 como parámetros de la función.

Por otro lado, en [7] se presenta la versión fraccional del sistema caótico de Chua mediante un conjunto de tres ecuaciones diferenciales descrito por

$$\begin{aligned}\frac{d^q x}{dt^q} &= \alpha(y - f_2(x)) \\ \frac{d^q y}{dt^q} &= x - y + z \\ \frac{d^q z}{dt^q} &= -\beta y - \gamma z\end{aligned}\tag{10}$$

donde, α, β, γ son constantes del sistema y q ($0 < q \leq 1$) representa el orden de la derivada fraccional. Para el valor $q = 1$ se considera la definición de derivada convencional.

La función $f_2(x)$ también es de carácter lineal a trozos y es similar a la función definida en el sistema (8), es decir $f_2(x) = f_1(x)$.

Por último, una versión hipercáotica del sistema de Chua, se describe mediante las ecuaciones [1]

$$\dot{x} = 30(y - f_3(x))\tag{11}$$

$$\dot{y} = x - y + z$$

$$\dot{z} = -50y - 0.32z + w$$

$$\dot{w} = -0.5 + yz$$

4. Simulaciones Numéricas

Como primer paso, se llevó a cabo la implementación numérica de los tres sistemas descritos en la sección III, en su versión caótica, caótica fraccional e hipercáotica. Para ello, los sistemas de orden entero, es decir, donde se considera la derivada convencional se consideró el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Mientras que para los sistemas caóticos fraccionales se consideró la implementación numérica presentada en [8], la cual utiliza la definición de derivada fraccional de Grünwald-Letnikov.

Se realizó la simulación del sistema (8), en la figura 1 se muestran algunas proyecciones de dicho sistema con los parámetros $\alpha = 10$, $\beta = 14$, $a = 0:1$ con condiciones iniciales $x(0) = 0.1$, $y(0) = -0.5$ y $z(0) = 0$ y un paso de tiempo $h = 0.01$. Cabe mencionar que, con estos parámetros, se obtiene el atractor caótico de Chua de dos enroscados.

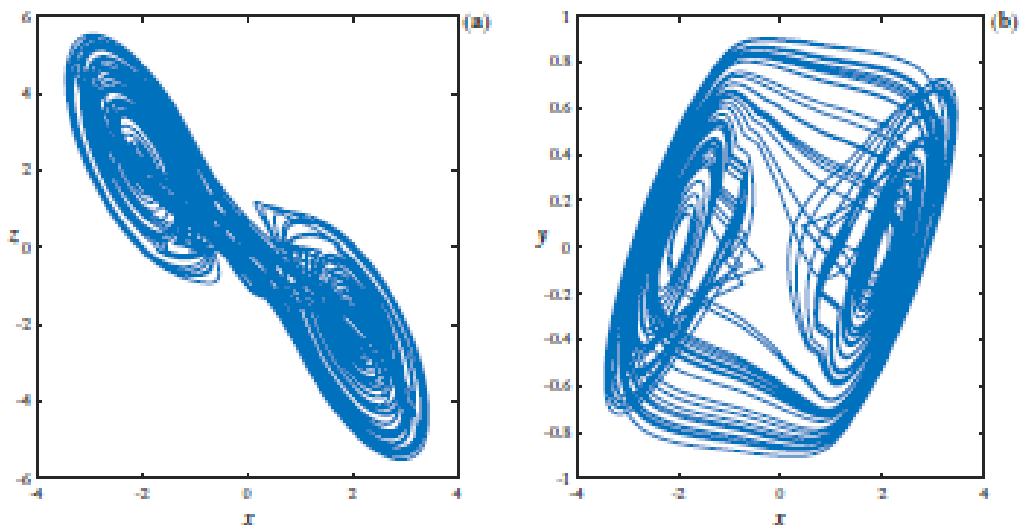


Fig. 1. Proyecciones en los planos (a) $x - z$ y (b) $x - y$ del sistema caótico de Chua.

Por otro lado, se obtuvo la simulación numérica del sistema (10) con los parámetros $\alpha = 10.3$, $\beta = 10.7$, $\gamma = 0.2$, pero con $q = 0.94$ y con condiciones iniciales $x(0) = -0.1$, $y(0) = 0.1$, $z(0) = 0.6$ y un paso de tiempo de $h = 0.005$. En la figura 2 se presentan algunas proyecciones del atractor resultante.

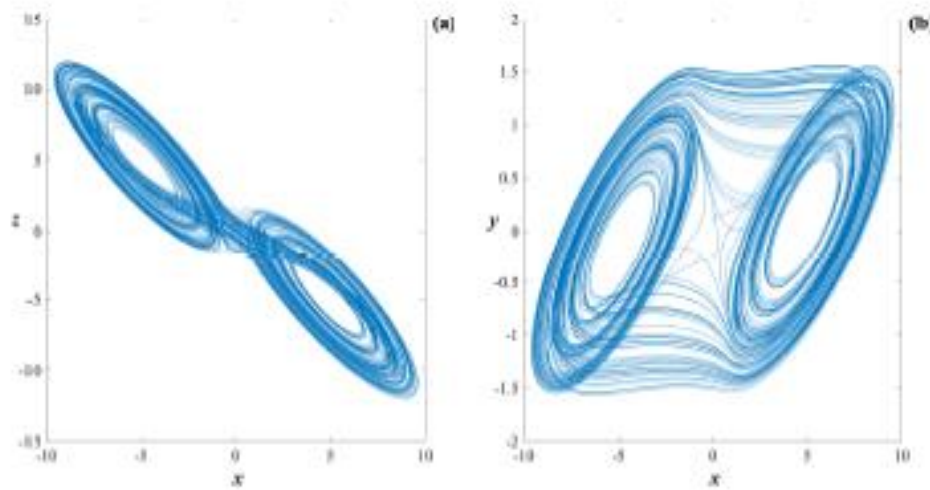


Fig. 2. Proyecciones en los planos (a) $x - z$ y (b) $x - y$ del sistema caótico de Chua.

Asimismo, en la figura 3 se muestra algunas proyecciones del sistema (11). En este caso las condiciones iniciales fueron $(x(0), y(0), z(0), w(0)) = (0, 0.1, 0.3, 0.4)$ y $h = 0.006$ como paso de tiempo.

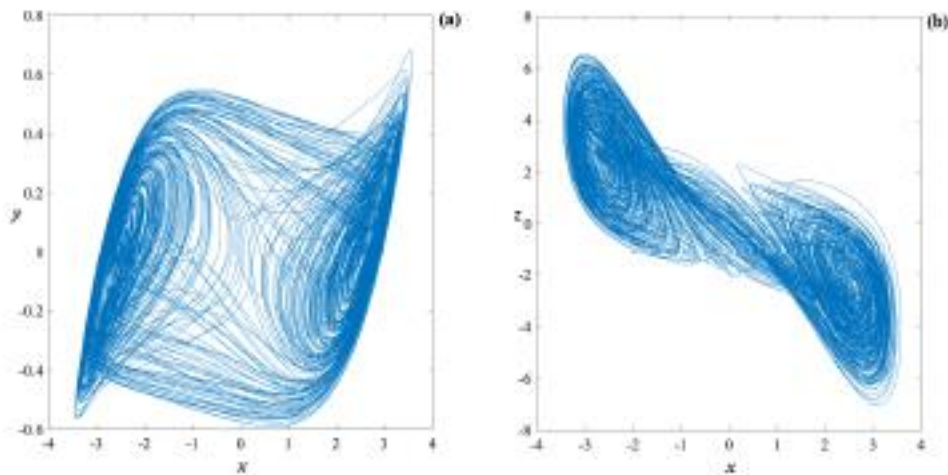


Fig. 3. Proyecciones en los planos (a) $x - y$ y (b) $x - z$ del sistema hipercaótico de Chua.

5. Análisis Wavelet

Se aplicó el análisis wavelet, el cual consta del análisis de escala y de energía a cada una de las series temporales obtenidas utilizando la función wavelet db2 para calcular la transformada wavelet. Cabe mencionar que se consideraron series temporales numéricas 65,536 muestras correspondiendo a $m = \log_2(65,536) = 16$ niveles de la TWD.

En principio se analizó la serie temporal del estado y del sistema caótico (8). En la figura 4 (a) se presenta una parte de la serie temporal original del estado y , el logaritmo de la varianza de los coeficientes wavelet en función de los niveles de transformación m se ilustra en la figura 4 (b), en la figura 4 (c) se presenta la distribución de energía en función del nivel m wavelet. En ambas graficas se puede observar que dentro de los niveles $m = 9, \dots, 11$ se tiene una alta concentración de energía, a partir de estos niveles se realizó la reconstrucción de la serie, ver figura 4 (d). Con la finalidad de verificar el error que se tiene entre la serie temporal y su reconstrucción, en la figura 4 (e) se muestra la gráfica de error entre la serie temporal y su respectiva reconstrucción. Con lo anterior se puede deducir que la serie temporal del estado y del sistema caótico de Chua (8) presenta un comportamiento del tipo frecuencia portadora.

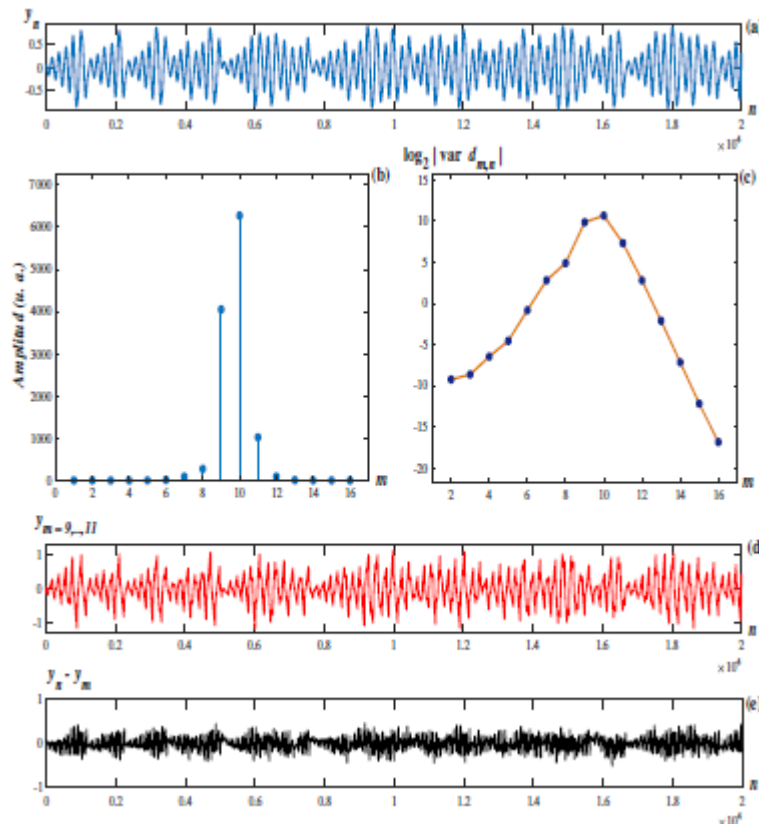


Fig. 4. Resultados del análisis de escala del sistema caótico de Chua.

De forma análoga, la serie temporal del estado z de la versión caótica fraccional del sistema (10) es presentada en la figura 5 (a), mientras que en la figura 4 (b) se puede observar la energía por nivel m de transformación wavelet, por otro lado el logaritmo de la varianza de los coeficientes wavelet en función del nivel de transformación m se ilustra en la figura 5 (b), se puede visualizar que se presenta una alta concentración de energía dentro de los niveles $m = 5, \dots, 10$, por lo que al realizar la reconstrucción de la serie temporal se logra una aproximación representativa de la serie temporal original, ver figura 5 (c). Sin embargo, el error que se obtuvo entre ambas series aún es considerable, como se ilustra en la figura 5 (d). De hecho, al observar la figura 5 (b), se podría considerar que se presentan dos tipos de comportamientos, el de ruido Gaussiano para los primeros niveles, mientras que el comportamiento fractal para los últimos niveles, pero con base al error obtenido predomina el comportamiento del tipo ruido Gaussiano.

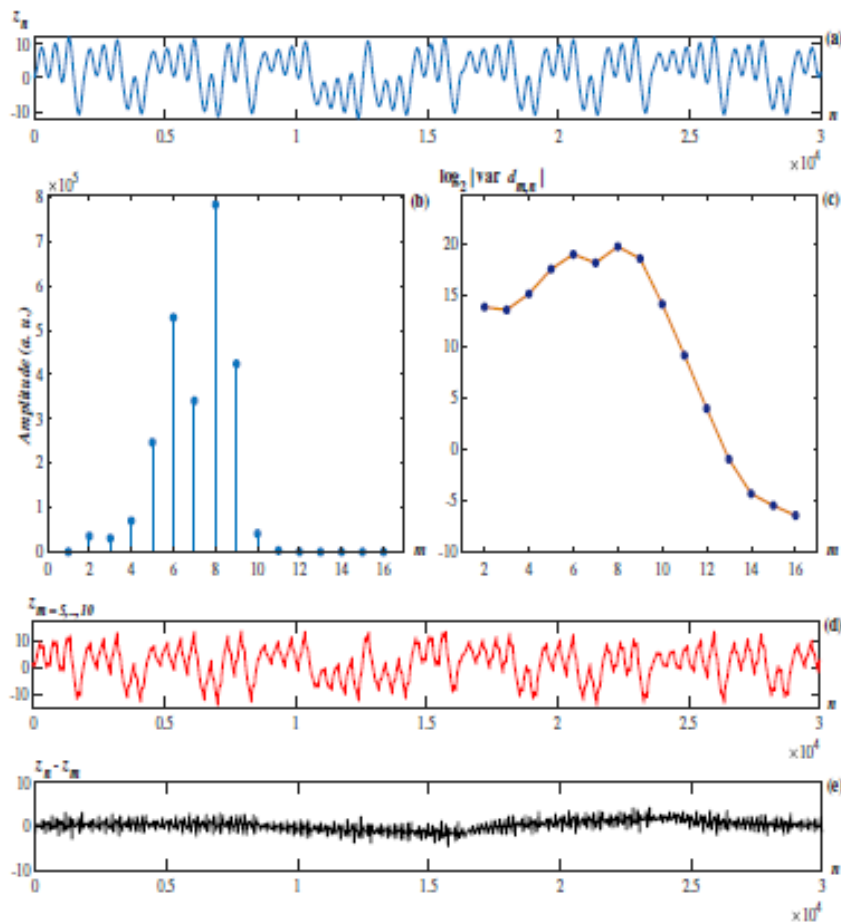


Fig. 5. Resultados del análisis de escala del sistema caótico fraccional de Chua.

Al analizar el estado w de la versión hipercaótica del sistema (11), se obtuvieron resultados que no se presentaban en sistemas con dinámica caótica de tres estados. En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos del estado w del sistema hipercaótico (11), en la figura 6 (a) se muestra la serie temporal del estado, mientras que en la figura 6 (b) se muestra la distribución de energía en función de los niveles wavelet, en la figura 6 (c) se presenta el logaritmo de la varianza de los coeficientes wavelet en función de los niveles wavelet m . En esta gráfica se puede observar una línea con pendiente negativa, denotada por β , por lo que se puede deducir que la serie temporal presenta un comportamiento del tipo *fractal*, donde $\beta \approx 2.48$. Cabe mencionar que en este tipo de comportamiento no se puede llegar a obtener una reconstrucción de la serie temporal.

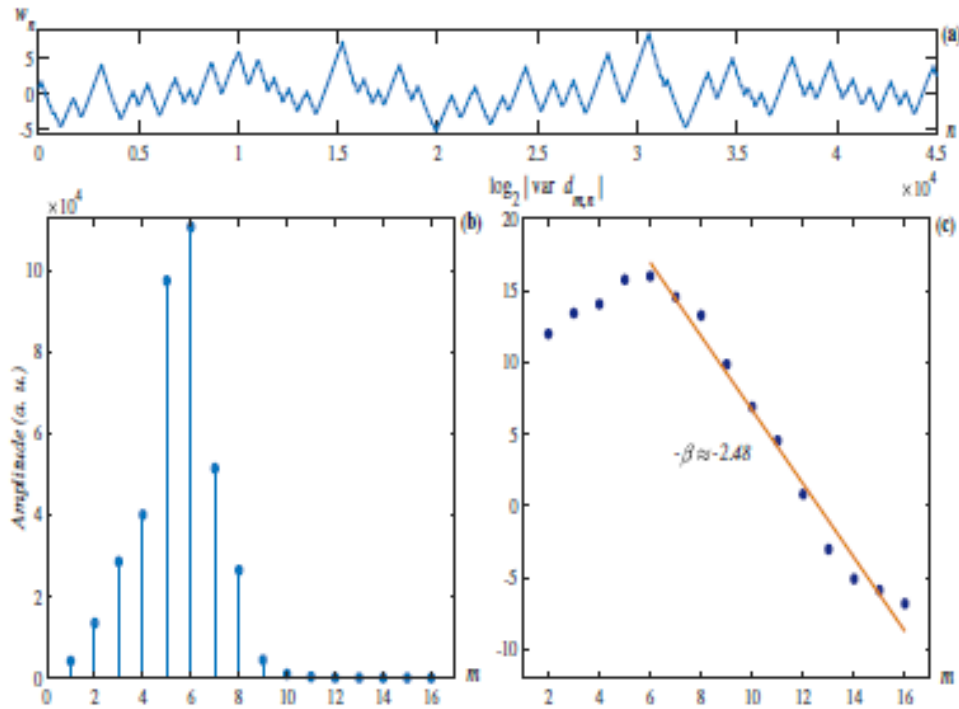


Fig. 6. Resultados del análisis de escala del sistema hipercaótico de Chua.

Se obtuvieron los siguientes tipos de comportamiento: (1) *frecuencia portadora (FP)*, (2) *ruido Gaussiano (RG)* y (3) *fractal (F)*. Los resultados obtenidos en cada uno de los estados de los sistemas considerados se muestran en la tabla I.

Tabla 1. Tipos de comportamientos de las series temporales.

Sistemas de Chua										
	Caótico			Fraccional			Hipercaótico			
<i>Sistema dinámico</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>W</i>
Chua	FP	FG	RG	RG	FP	RG	RG	FP	RG	F

6. Aplicación a Sistemas de Cifrado

Tomando en cuenta los resultados obtenidos mediante el análisis wavelet, se puede llegar a tener un criterio de selección con base al tipo de comportamiento que presentan las series temporales. Por ejemplo, si se quiere tener una mejor seguridad al momento de cifrar se recomendaría la serie temporal que presente comportamiento del tipo *ruido Gaussiano* debido a que, la información se distribuye en la mayoría de sus niveles de descomposición. Pero si quiere llegar a tener una buena recuperación de datos se recomienda tomar una serie temporal que presenta un comportamiento de *frecuencia portadora*.

Debido a lo anterior, se implementó el sistema de cifrado de datos presentado en [5]. El esquema de cifrado considerado se compone en las etapas de generación de secuencias pseudoaleatorias, donde se toma en cuenta un sistema con dinámica caótica e hipercaótica, etapa de confusión y etapa de difusión, ver figura 7.

Al esquema de cifrado de imágenes original [5], se le añade el criterio basado en los resultados del análisis de escala y de energía. En particular en dicho esquema se empleó el sistema hipercaótico de Chua (11), pero en específico solamente se tomaron en cuenta los estados *x* y *z* debido a que estos estados presentaron un comportamiento del tipo ruido Gaussiano y de acuerdo a las características que presenta este comportamiento la información se distribuye de forma más uniforme en los diferentes niveles de transformación y para poder recuperar la información se tendrían que tomar el su totalidad los niveles de transformación para poder llegar a una recuperación satisfactoria de la señal. Por lo que este tipo de comportamiento es el ideal para obtener un mejor nivel de seguridad en el esquema de cifrado de imágenes aunado a los diferentes aspectos de seguridad con el cual consta el esquema.

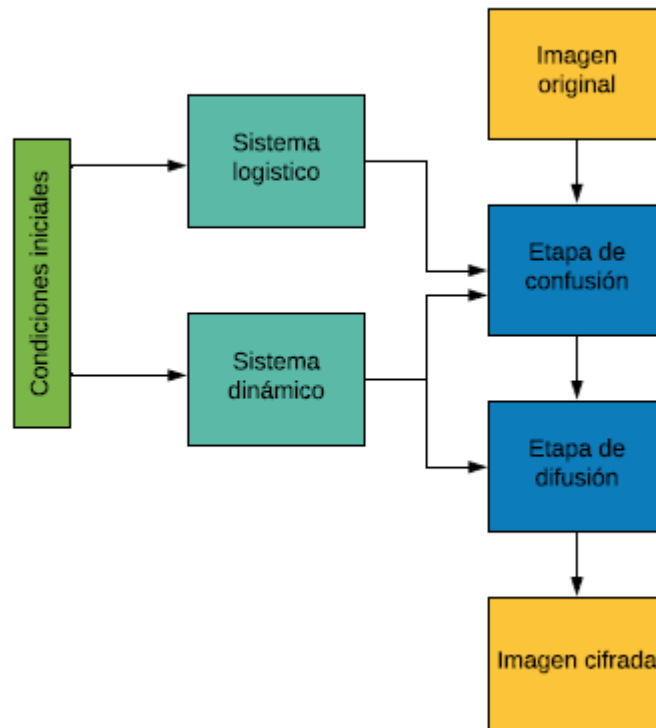


Fig. 8. Diagrama a bloques del sistema de cifrado.

Se realizó el cifrado de una imagen de 512 x 512 píxeles en escala de grises. Con el fin de poder visualizar gráficamente la distribución de valores en los píxeles, se calculó el histograma de la imagen original. En la figura 8 (a) se presenta la imagen original “Lena”, mientras que en la figura 8 (b) se muestra el histograma de la imagen original. Por lo general, los histogramas de las imágenes simples se distribuyen de manera desigual y muestran diferentes patrones. Esto indica que los histogramas de las imágenes simples se distribuyen de manera no uniforme y diferentes entre sí.

La imagen cifrada correspondiente se muestra en la figura 9 (a), así como su imagen cifrada, ver figura 9 (b). Se observa que en el histograma de la imagen cifrada se tiene una distribución uniforme, por lo que se puede concluir con esta prueba que el cifrado es aceptable, debido a que al menos visualmente no se puede detectar algún tipo patrón en su histograma correspondiente.

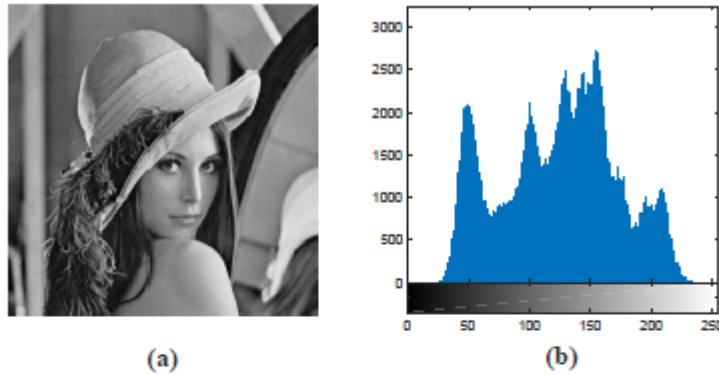


Fig. 8. (a) *Imagen Original* y (b) *Histograma de imagen Original*.

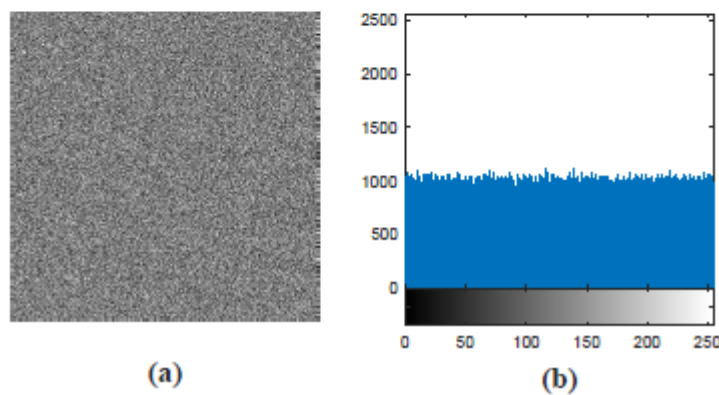


Fig. 9. (a) *Imagen cifrada* y (b) *Histograma de imagen cifrada*.

Uno de los principales aspectos que debe de cubrir un sistema cifrado de imágenes suficientemente seguro es el deshacerse de la alta correlación entre píxeles adyacentes. Dicha prueba se realiza al seleccionar aleatoriamente 10, 000 pares de píxeles adyacentes (horizontalmente, vertical y diagonal) dentro de una imagen, los coeficientes de correlación se calculan para determinar la fuerza de la relación lineal entre estos.

La figura 10 presenta las correlaciones de los píxeles adyacentes en diferentes direcciones de la imagen original, mientras que en la figura 11 se muestran las diferentes correlaciones para la imagen cifrada.

De la figura 10 se desprende que los coeficientes de correlación de la imagen original son cercanos a uno y el coeficiente de correlación de la imagen cifrada es cercano a cero. Por lo tanto, se concluye que los píxeles adyacentes de la imagen original están altamente correlacionados, mientras que las correlaciones entre píxeles adyacentes son muy cercanas a cero dentro de la imagen cifrada correspondiente. Por lo tanto, el sistema de

cifrado de imágenes considerando el sistema hipercaótico de Chua ha logrado tener un cifrado eficiente.

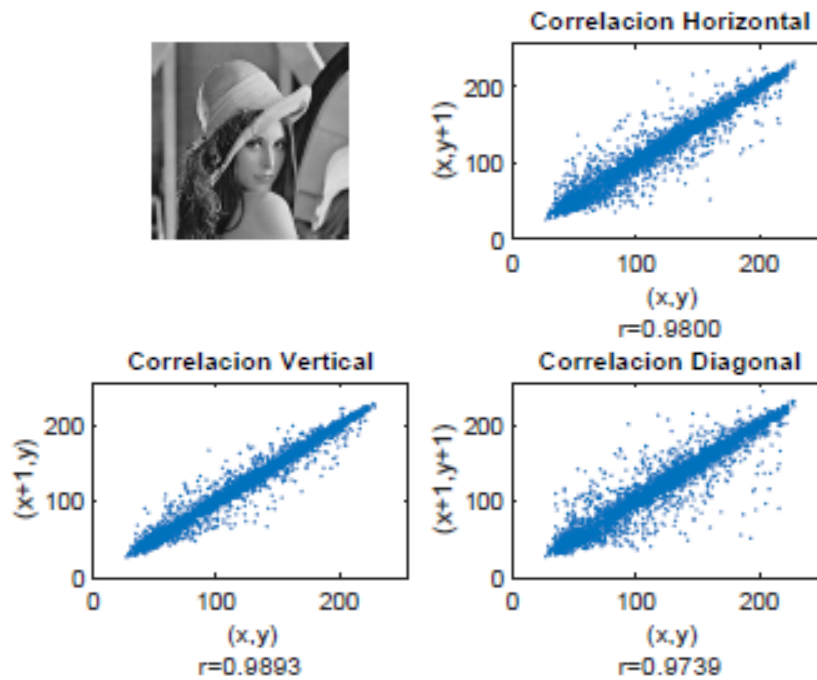


Fig. 10. Correlación de dos píxeles adyacentes de la imagen original.

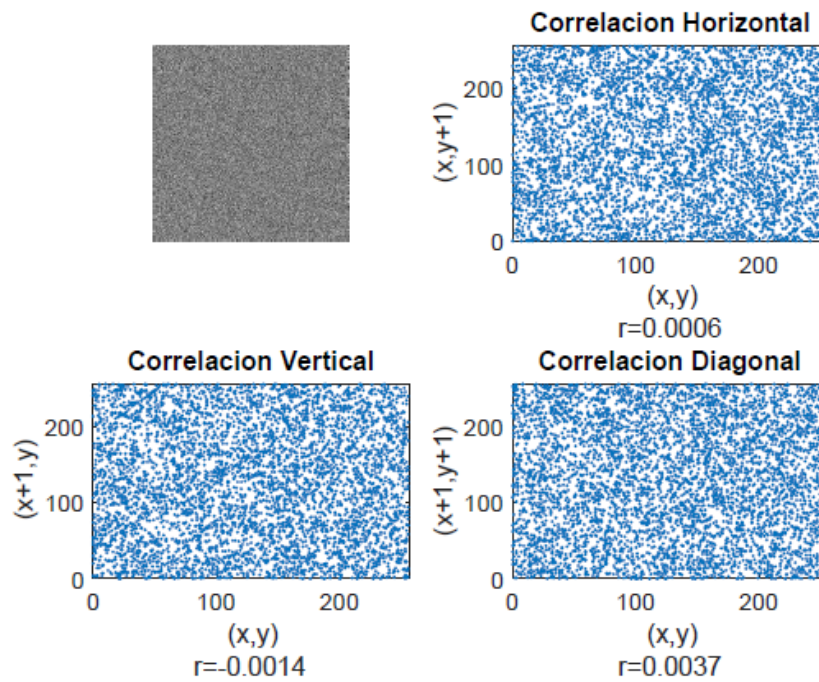


Fig. 11. Correlación de dos píxeles adyacentes de la imagen cifrada.

7. Conclusión

Primero se llevó a cabo la implementación numérica de los cuatro sistemas en sus versiones caótica, caótica fraccional e hipercáotica, esto con el fin de generar la base de datos de las series temporales correspondientes. Para la implementación de los sistemas caóticos e hipercáóticos se utilizó el método de Runge-Kutta de cuarto orden; para la simulación de los sistemas caóticos fraccionales se usó la definición de derivada fraccional de Grünwald-Letnikov que fue la implementada.

Después de obtener las simulaciones numéricas, usando la TWD se procedió a realizar un análisis de la distribución de la energía en los diferentes niveles de transformación de las series temporales y el análisis de escala correspondiente. Así se obtuvieron los siguientes tipos de comportamiento: (1) frecuencia portadora (FP), (2) ruido Gaussiano (RG) y (3) fractal (F).

En los sistemas dinámicos considerados se obtuvo que presenta comportamiento del tipo *ruido Gaussiano* y *frecuencia portadora* en los sistemas caótico y caótico fraccionario. Por otra parte, en la versión hipercáotica predominó el comportamiento del tipo *ruido Gaussiano*, sin embargo, en el estado w de la versión hipercáotica se presentó el comportamiento del tipo fractal.

Se implementó el sistema de cifrado considerado, en el cual se consideró el sistema hipercáotico de Chua tomando en cuenta únicamente los estados que presentaron un comportamiento del tipo ruido Gaussiano, obteniendo un funcionamiento óptimo en el cifrado resultante con base a las pruebas presentadas en este trabajo.

Referencias

- [1] Shen, C., Yu, S., Lü, J., & Chen, G. (2015). Constructing hyperchaotic systems at will. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 43(12), 2039-2056.
- [2] Rossler, O. E. (1979). An equation for hyperchaos. *Physics Letters A*, 71(2-3), 155-157.
- [3] [3] Staszewski, W. J., & Worden, K. (1999). Wavelet analysis of time-series: coherent structures, chaos and noise. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 9(03), 455-471.
- [4] Murguía, J. S., & Rosu, H. C. (2011). Discrete wavelet analyses for time series. In *Discrete Wavelet Transforms-Theory and Applications*. InTech.
- [5] Yuan, H. M., Liu, Y., Lin, T., Hu, T., & Gong, L. H. (2017). A new parallel image cryptosystem based on 5D hyper-chaotic system. *Signal Processing: Image Communication*, 52, 87-96.
- [6] Elhadj, Z., & Sprott, J. C. (2010). Generating 3-scroll attractors from one Chua circuit. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(01), 135-144.
- [7] Petráš, I. (2008). A note on the fractional-order Chua's system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 38(1), 140-147.
- [8] Petráš, I. (2011). *Fractional-order nonlinear systems: modeling, analysis and simulation*. Springer Science & Business Media.

8 | Introducción a Criptografía Post-cuántica y Algoritmos de Cifrado Lightweight

M. T. Ramírez Torres ²⁷.

Resumen

En este trabajo se exponen dos líneas de investigación, que son tendencia en el área de ciberseguridad ante las demandas de la industria 4.0. La computación cuántica cada vez se consolida más e incluso la supremacía ha sido proclamada recientemente por Google. Las computadoras cuánticas se basan en propiedades de física cuántica y su unidad son los qubits. Debido al desarrollo de algoritmos cuánticos como el de Peter Shor, para encontrar los factores primos de un entero dado, la seguridad de algunos sistemas de seguridad convencionales se ve amenazada. Para lo cual se ha desarrollado lo que hoy se conoce como criptografía post-cuántica, cuyos algoritmos prometen resistir el ataque de computadoras cuánticas.

Por otra parte, los algoritmos criptográficos ligeros (lightweight) se caracterizan por garantizar la seguridad de la información con un bajo consumo de energía. No existen aún limitaciones para poder clasificar un algoritmo como ligero. La seguridad, costo y rendimiento son aspectos a evaluar en estos algoritmos, los cuales son muy utilizados en la industria del Internet de la Cosas (IoT).

²⁷M. Tulio Ramírez Torres (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, Carretera Salinas-Santo Domingo 200, 78600, Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.
e-mail. tulio.torres@uaslp.mx

1. Introducción

Actualmente vivimos una transición de tecnología, modo de vida, tipos de industria; que nos demanda nuevas necesidades a ritmos acelerados. El internet de las cosas ha revolucionado el diseño de dispositivos permitiendo nuevas funciones en dispositivos convencionales. Sin embargo, su rápido desarrollo ha dejado un hueco de seguridad enorme, como se ha demostrado en los vehículos autónomos [1] y en otros dispositivos como cámaras inalámbricas, monitores para bebés, cerraduras entre otros [2]. Por lo que organizaciones como OWASP han surgido para informar a productores y consumidores acerca del tema de seguridad relacionado con el IoT (Internet of Things) [3].

Para resolver problemas en esta área (no de forma exclusiva) se ha desarrollado un nuevo enfoque llamado *lightweight algorithms* o algoritmos ligeros. Estos algoritmos, deben lograr un nivel de seguridad alto o suficiente para la aplicación, con un consumo bajo de energía.

Por otro lado, la computación cuántica ha dejado de ser solo modelos y se han logrado propuestas sólidas, como es el caso de Google y su microprocesador Sycamore [4], el cual ha resuelto en 200 segundos un problema que le llevaría 10,000 años a un equipo de cómputo convencional. Aún queda en duda la supremacía, debido a observaciones que ha hecho la empresa IBM, sin embargo, la realidad es que debemos estar preparados para una nueva era computacional. Donde los algoritmos de seguridad podrían ser vulnerados por equipos cuánticos.

Es por esta razón que surgen los denominados algoritmos criptográficos post-cuánticos, que deben resistir ataques de computadoras cuánticas y deben ser ejecutables en computadoras convencionales e incluso en sistemas con recursos limitados.

En este trabajo se describen conceptos generales de ambas áreas, así como algunos de los trabajos y propuestas.

2. Criptografía Post-Cuántica

Las computadoras cuánticas utilizan los fenómenos de la mecánica cuántica para resolver problemas matemáticos difíciles o intratables para las computadoras convencionales. En la actualidad, muchas investigaciones se centran en esta área y los

desarrollos muestran un significativo avance. Si alguna vez se construyen computadoras cuánticas a gran escala, éstas serían capaces de romper muchos de los criptosistemas de clave pública que están actualmente en uso. Comprometiendo la confidencialidad e integridad de información almacenada o que viaja a través de alguna red de información.

El objetivo de la criptografía post-cuántica (también llamada criptografía cuántica resistente) es desarrollar sistemas criptográficos que sean seguros contra computadoras cuánticas y clásicas, y que puedan interactuar con los protocolos y redes de comunicaciones existentes.

Por lo que es importante trabajar antes de que se realice una computadora cuántica a gran escala, y tener a disposición sistemas de seguridad informática capaces de resistir la computación cuántica y sus ataques.

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés) anunció el día 30 de enero de 2019, los candidatos de la 2ª Ronda. Actualmente se encuentra disponible el informe de estado NISTIR 8240 por parte del NIST, que trata sobre la primera ronda del proceso de estandarización de criptografía post-cuántica[5].

3. Algoritmos de Cifrado Lightweight

En la actualidad han surgido nuevas áreas como internet de las cosas, internet industrial de las cosas, redes de sensores y sistemas de cuidados y atención médica, que requieren una mayor interconexión (por lo general inalámbrica) con otros dispositivos y en algunos casos a internet. Estos dispositivos tienen un poder de cómputo menor por lo cual algoritmos criptográficos actualmente considerados seguros, que han sido diseñados para computadoras personales, suelen tener problemas para implementarlos.

Para esta problemática, NIST también ha iniciado un proceso para solicitar, evaluar y estandarizar algoritmos criptográficos ligeros que sean adecuados para su uso en entornos restringidos, donde el rendimiento de los estándares criptográficos NIST actuales no es aceptable.

Actualmente ya se han realizado dos rondas de esta convocatoria [6].

4. Conclusiones

Como se puede ver, la seguridad informática es un área con grandes cambios en poco tiempo, además de necesaria para empresas, gobiernos y usuarios. Por lo que el trabajo en colaboración con otras disciplinas como la matemática de caos, entre otras, puede ser una opción para solventar los problemas existentes y futuros con referencia a la integridad y confidencialidad de la información que almacenamos y/o transmitimos vía redes informáticas.

Referencias

- [1] Miller, M. E. M. (s.f.). - The Washington Post. Recuperado 2 enero, 2020, de <https://www.washingtonpost.com/gdpr-consent/?destination=%2fnews%2fmorning-mix%2fwfp%2f2015%2f07%2f22%2fcar-hacking-just-got-real-hackers-disable-suv-on-busy-highway%2f%3f>
- [2] Andrew Liptak, A. L. (2019, 11 agosto). Security researchers find that DSLR cameras are vulnerable to ransomware attack. Recuperado 2 enero, 2020, de <https://www.theverge.com/2019/8/11/20800979/check-point-canon-eos-80d-dslr-malware-ransomware-cybersecurity>
- [3] Fredric Paul, F. P. (2019, 14 enero). Top 10 IoT vulnerabilities. Recuperado 2 enero, 2020, de <https://www.networkworld.com/article/3332032/top-10-iot-vulnerabilities.html>
- [4] Jon Porter, J. P. (2019, 23 octubre). Google confirms ‘quantum supremacy’ breakthrough. Recuperado 2 enero, 2020, de <https://www.theverge.com/2019/10/23/20928294/google-quantum-supremacy-sycamore-computer-qubit-milestone>
- [5] Alagic, Gorjan, G. A. (2019, 31 enero). NISTIR 8240, NIST PQC Standardization Process: Round 1 Status Report | CSRC. Recuperado 2 enero, 2020, de <https://csrc.nist.gov/publications/detail/nistir/8240/final>
- [6] Lightweight Cryptography | CSRC. (s.f.). Recuperado 2 enero, 2020, de <https://csrc.nist.gov/projects/lightweight-cryptography>

9 | Electroluminescent Characterization of Commercial Solar Panels

L. Rodríguez Salas²⁸, O. F. Núñez Olvera²⁹, A. Lastras Martínez³⁰.

Resumen

Electroluminescence (EL) has become a very convenient tool to evaluate the quality of Si solar panels. The EL emission in a directly polarized p-n junction is generated by the recombination of minority carriers injected into the neutral regions adjacent to the junction. In comparison to direct gap materials like GaAs, the electroluminescent emission of Si is weak due to its indirect band gap nature. It is, nevertheless, measurable with infrared detectors sensitive to wavelengths around the band gap of Si (1.15 μm), including CCD cameras.

Here, we report on EL images of multicrystalline and monocrystalline Si commercial panels. Such images were obtained with a commercial photographic camera (EOS 50D Canon) by removing the infrared blocking filter from the sensor of the camera to enhance IR sensitivity and replacing it for a new infrared filter.[3] These images are of good quality and allow us to evaluate the homogeneity of the p-n union of a cell, as well to map the distribution of crystalline defects across the cells that comprise the solar panel.

²⁸L. Rodríguez Salas (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. loresalas@yahoo.com

²⁹O. F. Núñez Olvera (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. oscar.nunez@uaslp.mx

³⁰A. Lastras Martínez (✉)
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.
e-mail. alastras@gmail.mx

Keywords: EL; Electroluminescence imaging; Solar cells; PV modules; Crystalline defects.

1. Introduction

It seems that the expression “in recent years the production of solar cells has increased” is still in force for more than 20 years and will continue to be so, that’s why high quality, high yield and maximum power output are crucial objectives for solar cell manufacturers and customers at the same time. “Among installed systems, more than 90% are crystalline silicon cells, and especially polycrystalline silicon shows the advantages of low cost and large area with relatively high efficiency” [1]. The impact of good and fast quality control like in-homogeneities, handling damages, impure material, dislocation, broken fingers, among others, take on special importance when switching from small devices to large formats compatible with large industrial productions and large product distributors. One of the most material parameters to be monitored is the minority diffusion length (or lifetime), which governs the collection efficiency.[1] Fuyuki et al obtained electroluminescence images of a polycrystalline cell of Si and found a lineal relationship between the intensity of luminescence and diffusion length of minority carriers [1].

Here, we report on EL images of polycrystalline and monocrystalline Si commercial solar panels. These images were obtained with a commercial photographic camera EOS 50D Canon by removing the infrared blocking filter from the sensor of the camera to enhance IR sensitivity and replacing it for a new infrared filter [3].

Solar cells are large-area diodes optimized for light absorption and charge carrier collection. Inversing de normal operating mode by injecting charge carrier under applied forward bias leads to recombination in the devise. Although most solar cells are not particularly efficient light emitters, part of the recombination will be radiative, leading to detectable emission of photons with energies around the band gap of the solar-cell absorber [2].

2. Electroluminescence

EL, that is, the emission of light in consequence to the application of a forward voltage bias to a diode, is the reciprocal action to the standard operation of a solar cell, namely the conversion of incident light electricity.

Electroluminescence imaging can be used to detect a multitude of defects in crystalline or polycrystalline silicon solar cells, furthermore EL technique captures images with very high resolution that enable to resolve details or defects that should be hardly perceptible to the human eye [2], see Fig.1.



Fig. 1. EL image of a 15 cm x 15 cm polycrystalline Si solar cell.

Amonge the main defects that electroluminescence can show us are:

- A. Micro cracks and breakages.
- B. Broken finger contacts / broken contacts.
- C. Debris areas.
- D. Grain boundaries and dislocations.
- E. Material contamination / contact formation.

3. Experimental details

To perform an electroluminescence test, an important issue is to have a dark or semi-dark room big enough to handle a solar panel inside of it. Once we have this, a current

source is necessary to power the panel, The experimental tests were conducted at room temperature (25°C approx.), at different times of the day, and a dark room was used to test solar cells, and a semi-dark room to capture photographs of the complete solar panels.

As mentioned above, under forward bias condition, solar cells emit infrared light (wavelength around 1000 to 1200 nm) whose intensity reflects the number of minority carriers in base layers.[1] To capture these images, a commercial camera (EOS 50D Canon) was modify as previously mentioned to enhance IR sensitivity. Refer to the conversion tutorial to filter installation. [3]

Since the electroluminescence test is not a destructive test, we first designed the appropriate conditions to work with solar cells, connecting them and providing the necessary mechanical support to prevent it from breaking. Once it was proven that the images obtained were good quality to observe optical and mechanical failures.

Fig.2 depicts the setup for EL characterization. One of the most interesting things about the EL imaging results on the one hand from the high spatial resolution combined with its simplicity and swiftness, which is clearly superior to alternative techniques such as the light-beam-induced current (LBIC) measurement. The measuring times of EL images are shorter compared with LBIC. The technique can be used to survey a solar cell or entire modules and visualize microscopic defects on the micrometer scale.

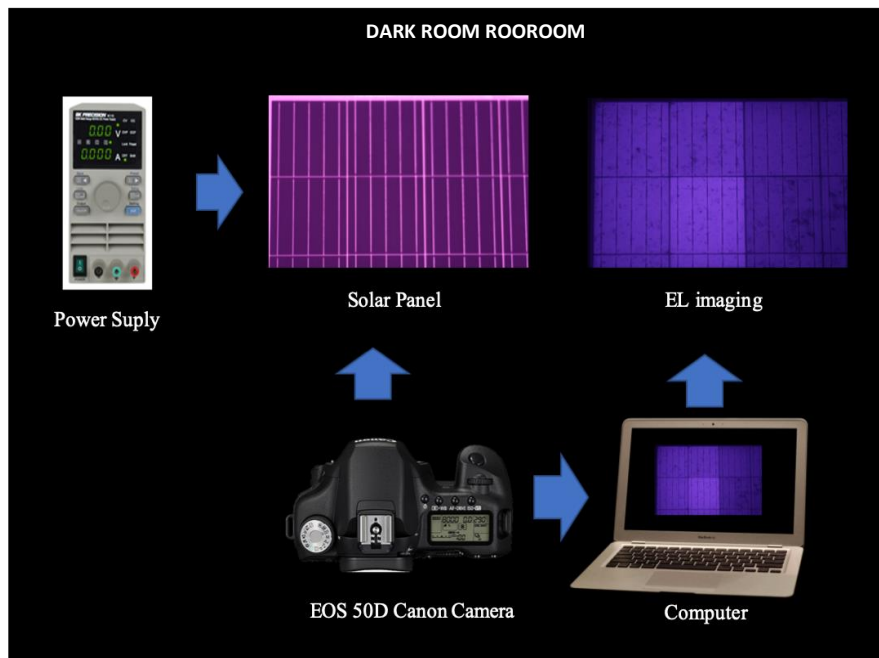


Fig. 2. Hardware system. In order to perform the EL test in solar panels a power supply model was used to power the panel, a commercial camera Canon EOS 50D and a computer to analyze the photographs.

5. Results

The photographs were taken at room temperature to different manufacturer solar panels.

Fig.3. Shows a good image of polycrystalline panel, where we can see details like boundary grains and some cell less illuminated than others, because the optical and electronic properties vary locally such as for instance the minority carrier diffusion length is lower close to dislocations or grain boundaries [2].

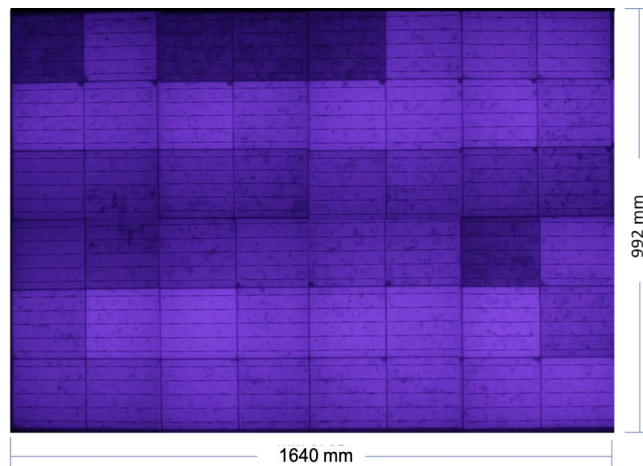


Fig. 3. EL image of polycrystalline solar panel. The image was taken in a semi-dark room.

Fig.4. Belongs to a monocrystalline solar panel and here we can appreciate a good uniform lighting all over the panel, that means to say it is a good quality one.

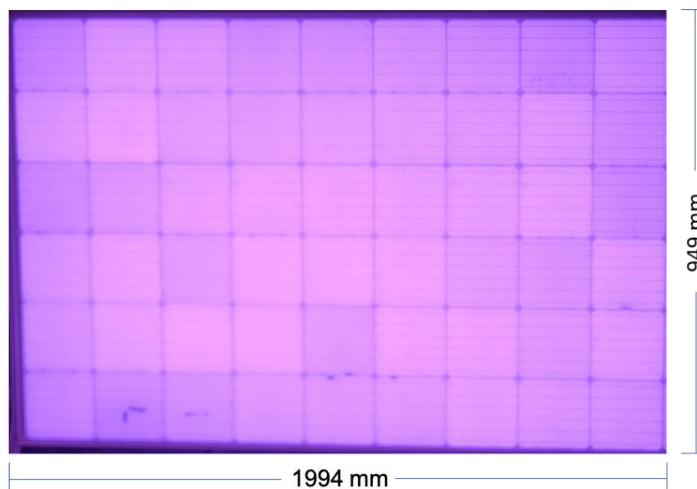


Fig. 4. Monocrystalline panel EL imaging. The image was taken in a semi-dark room.

Our results indicate that this technique is affordable for an ample range of applications, including the quick characterization of commercial panels. It also allows its use in teaching laboratories for didactic purposes.

6. Conclusions

The electroluminescence technology allows the visualization and detection of PV modules crystalline defects otherwise not visible for the human eye. These defects undetected, can progress over time and lead to a significant loss in module power.

The EL images were obtained with a very small under forward current under $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

The exposure time and sensibility (ISO) are important parameters to control so that the images generated are suitable for analysis.

References

- [1]. Takashi Fuyuki, Hayato Kondo, Tsutomu Yamazaki, Yu Takahashi, and Yukiharu Uraoka, Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence, Appl. Phys. Lett. 86, 262108 (2005).
- [2]. Advanced Characterization Techniques for Thin Films Solar Cells. Edited by Daniel_Abou-Ras,_Thomas_Kirchartz.
- [3]. <https://www.lifepixel.com/tutorials/infrared-diy-tutorials/canon-50d-ir>

10 | Análisis Multiresolución y Aprendizaje Profundo para Detección de Patrones Característicos en la Navegación Aérea

J. M. Fortuna Cervantes³¹, M. T. Ramírez Torres³², J. Martínez Carranza³³, M. Mejía Carlos³⁴, J. S. Murguía Ibarra³⁵.

Resumen

Este trabajo se propone un primer enfoque basado en el análisis multiresolución del procesamiento de imágenes para la detección y clasificación de objetos dentro de la navegación aérea en entornos simulados. Se ha generalizado el uso de algoritmos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) para procesar imágenes en el dominio espacial, obtenidas de la cámara a bordo del UAV, siendo útiles en las tareas de detección y clasificación. Además, sostenemos que las características de las ondas también influyen en el rendimiento de las CNN durante el entrenamiento. Además, hemos investigado la combinación del análisis multiresolución, mediante wavelets, en combinación con las arquitecturas de CNN, con el propósito de introducir una mayor

³¹J. M. Fortuna Cervantes (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.

e-mail. juan.manuel.fortuna@hotmail.com

³²M. T. Ramírez Torres (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, Carretera Salinas-Santo Domingo 200, 78600, Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.

e-mail. tulio.torres@uaslp.mx

³³J. Martínez Carranza (✉)

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.

Departamento de Informática, Luis Enrique Erro #1, Sta. María Tonantzintla, 72840, San Andrés Cholula, Puebla, México.

e-mail. carranza@inaoep.mx

³⁴M. Mejía Carlo (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Av. Karakorum 1470 Lomas 4a. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.

e-mail. marcela.mejia@uaslp.mx

³⁵J. S. Murguía Ibarra (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Facultad de Ciencias, Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295, San Luis Potosí, S.L.P., México.

e-mail. ondeleto@uaslp.mx

robustez en el escenario de la detección de objetos con un dron, donde los objetos pueden presentar un patrón repetitivo como la textura, o una textura que es difícil de detectar debido a los cambios en la iluminación, la escala y la perspectiva de la cámara.

Palabras clave: CNN, Análisis Multiresolución, Análisis de Ondas, Detección de Objetos, Drone, Entorno de Simulación de un Gazebo.

1. Introducción

En la última década los algoritmos de control servo visual han sido utilizados con gran interés en diferentes áreas de la robótica; específicamente para la navegación autónoma de vehículos aéreos no tripulados o dron [1]. Asimismo, el uso de los vehículos ha tenido un crecimiento exponencial en un gran número de aplicaciones, por ejemplo: búsqueda y rescate, vigilancia, inspección, monitoreo, reconocimiento de patrones, entre otras [2]. En ciertos casos de estudio, se requiere introducir mayor robustez en el escenario de detección, donde los objetos se caracterizan por tener textura, que en algunas ocasiones es difícil de detectar debido a cambios en la iluminación, escala y perspectiva de la cámara. Por lo tanto, el uso de técnicas para el procesamiento de imágenes como el análisis multiresolución o wavelet, las redes neuronales profundas o redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) se han convertido en una gran alternativa [3] [4].

Para abordar el problema planteado, proponemos un enfoque basado en una arquitectura de redes neuronales profundas y el análisis multiresolución. El diseño del modelo de la red neuronal convolucional asume explícitamente que las entradas son imágenes e implica la creación de un conjunto de datos wavelet con características de aproximación. La etapa de aprendizaje será el medio donde se entrenará al dron, para que pueda reconocer y aprender los objetos de manera que el vehículo aéreo no tripulado utilice los sensores disponibles como medio para detectar su entorno y generar la predicción de la escena. Por lo anterior, se asume que el dron sólo está equipado con una cámara a bordo, la Unidad de Medición Inercial (IMU, por sus siglas en inglés) y un altímetro para conocer la altura con respecto al suelo dentro del entorno simulado. La base para nuestro diseño es una arquitectura para el aprendizaje profundo con resultados en

clasificación binaria. En este caso, la red clasifica las imágenes capturadas por la cámara a bordo del dron en dos clases: Objeto con textura y Objeto sin textura.

Este artículo ha sido organizado de la siguiente manera: la Sección II describe el trabajo relacionado; la Sección III proporciona la base teórica necesaria para la metodología propuesta; la Sección IV muestra el diseño de la parte experimental y los resultados; la conclusión de la investigación y trabajo futuro se presentan en la Sección V.

2. Trabajo Relacionado

La integración de ambos métodos de procesamiento de imagen como el aprendizaje profundo y el análisis wavelet en el área de los vehículos aéreos no tripulados abre nuevos campos de aplicación. El procesamiento visual es muy útil para introducir mayor robustez en el escenario de detección de objetos de manera autónoma, debido a los cambios en la iluminación, escala y perspectiva de la cámara. Por ejemplo, en relación con las redes convolucionales y el análisis multiresolución, Williams et al, proponen convertir los datos al dominio wavelet para obtener los coeficientes wavelet de promedio y detalle con la finalidad de procesar las imágenes con menor resolución que las originales. Así, logrando una mayor precisión, tiempos de ejecución más rápidos y eficiencia en la clasificación de imágenes de la base de datos CIFAR-10 y la detección de emociones de la base de datos KDEF [5].

Por otra parte, con el enfoque de utilizar el aprendizaje profundo o las redes neuronales con los vehículos aéreos no tripulados para la detección y evasión de obstáculos, en [6] los autores proponen un enfoque de aprendizaje profundo para estimar el centro de una ventana de forma robusta, generando una línea de visión como guía. En principio, se menciona que, debido a las complicaciones, tales como la variación de condiciones de iluminación, la geometría de las ventanas y que están superpuestas en el plano de imagen, la imagen durante el procesamiento tiende a fallar. En general, a través de una revisión al estado del arte, hasta ahora se observa que los algoritmos de inteligencia computacional mejoran las estrategias de detección y caracterización de objetos, con propiedades como el aprendizaje, la adaptabilidad a los cambios en el entorno, cambios en la iluminación, escala, entre otros.

3. Método Propuesto

a. Análisis multiresolución

Para implementar este análisis se sigue el algoritmo de Mallat, aplicada a las funciones bidimensionales o imagen (denotada por $x[m,n]$) [7], de manera práctica y eficiente con un fundamento teórico de la transformada wavelet rápida bidimensional (TWR-2D). Además, con el algoritmo se logra tener una conexión entre las wavelets y los bancos de filtros. En sí, la descomposición en multiresolución de una imagen es representada por una serie de aproximaciones y detalles en sub-imágenes. En el primer nivel de descomposición se aplica dos filtros respectivamente, uno pasa bajas (h) y otro pasa altas (g), cada uno de ellos seguido por una operación de submuestreo por un factor de 2, como se ilustra en la Fig. 1.

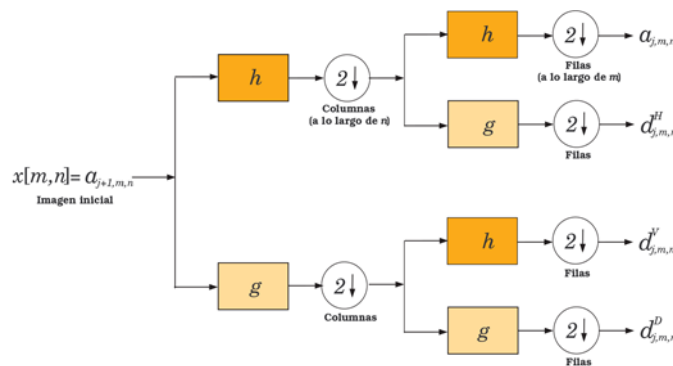


Fig. 1. Estructura de bancos de filtros para el primer nivel de la descomposición multiresolución de una imagen.

B. Redes neuronales convolucionales

Las redes neuronales convolucionales (CNN), son ampliamente utilizadas en tareas de visión por computadora. Las cuales están formadas por neuronas que tienen parámetros en forma de pesos y sesgos que se pueden aprender. Además, estas redes se componen de una capa de entrada, una capa de salida y varias capas ocultas, algunas de las cuales son convolucionales. La operación de convolución ocurre internamente en todos los mapas de características de la capa convolucional. La ecuación (1) describe la representación matemática de la distribución de pesos con respecto a un filtro deseado:

$$y_{ij} = \sigma \left(b + \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n-1} W_{l,m} a_{j+l,k+m} \right) \quad (1)$$

donde $W_{l,m}$ representa los pesos distribuidos, b representa el sesgo, $a_{j+l,k+m}$ es la función de activación en una posición determinada, y n es el tamaño de la ventana del filtro.

Por lo tanto, el uso de las capas convolucionales le permite a la CNN aprender diferentes niveles de abstracción. Una característica diferencial de la CNN es que asume explícitamente que las entradas son imágenes, lo que nos permite codificar ciertas propiedades en la arquitectura para reconocer elementos específicos en las imágenes [8]. La CNN será una pila de capas Convolucionales 2D con activación *Rectified Linear Unit (ReLU)* alternadas con una capa *MaxPooling2D*. La profundidad de los mapas de características aumenta progresivamente en la red (de 32 a 128), mientras que el tamaño de los mapas de características disminuye (de 62×62 a 2×2). Debido a que se está resolviendo un problema de clasificación binaria, la red terminará con una sola unidad (una capa densa de tamaño 1) y una activación *Sigmoid*. Esta unidad codificará la probabilidad de que la red esté orientándose a una clase u otra.

4. Experimentos y resultados.

En esta sección se presenta la estructura experimental con la finalidad de evaluar el método propuesto. Además, se evalúa toda la estructura utilizando un simulador de entornos 3D que posibilita evaluar el comportamiento de un robot en un mundo virtual.

A. Conjunto de datos wavelet.

Para la etapa de entrenamiento, validación y de prueba se utilizó imágenes adquiridas en la simulación. En este caso, el conjunto de datos contiene 955 imágenes con un objeto con textura (en el plano de imagen) y con la misma cantidad de imágenes para el conjunto de datos sin objeto. Específicamente 1400 imágenes para la etapa de entrenamiento, 300 para validación y 210 para las pruebas. En ambos casos se generan el conjunto de sub-imágenes wavelet de aproximación y de detalle (horizontal, diagonal, vertical) a tres niveles multiresolución en escala de grises, la Fig. 2 ilustra la imagen

original de 512×512 píxeles con ambos conjuntos de datos wavelet, sub-imágenes de 64×64 "píxeles".

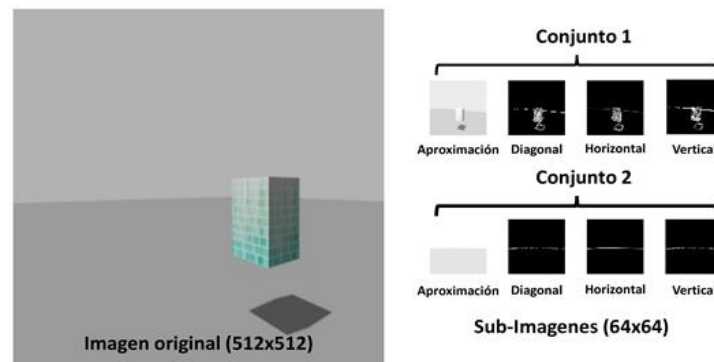


Fig. 2. Imagen capturada para el entrenamiento de la red neuronal convolucional (Conjuntos de las imágenes usadas para la clasificación de objeto con textura vs sin objeto dentro del plano de imagen).

B. Experimentos en simulación.

En este trabajo, se utilizó un simulador Gazebo para el diseño de vehículos aéreos no tripulados como es el caso del Parrot AR.Drone 2.0 y el desarrollo de escenarios realistas 3D para simulaciones [9].

El simulador proporciona imágenes de la vista frontal de la cámara abordo del AR.Drone como si fuera la real; brindando un soporte para la adquisición de imágenes para la etapa de preprocesamiento y predicción de esta a partir del modelo creado. En el caso del entrenamiento de la red de aprendizaje profundo, se diseña un objeto cubico con textura. Con este diseño experimental se guardaron las imágenes con el contexto de la vista frontal. Las imágenes inicialmente tienen un tamaño de 640×380 "píxeles" para después aplicar un res-escalamiento a un tamaño de 512×512 "píxeles". Finalmente se aplica el análisis multiresolución a un nivel de escala igual a 3 para tener imágenes de menor resolución y ayudar a la red para que pueda ser entrenada con menos parámetros, además, se utiliza una función madre Haar por ser una de las más comunes en procesamiento de imágenes y extracción de características. Por lo tanto, se obtiene 4 subconjuntos de imágenes con resolución de 64×64 " píxeles" (valor permitido para la arquitectura propuesta), una versión promedio donde se concentra toda la energía de la imagen

original, y tres versiones de detalle donde se preservan las características horizontales, verticales y diagonales. Para los experimentos de simulación, probamos con diferentes perspectivas de visión de la cámara abordo, el cual son dos casos, uno donde aparece por completo el objeto con textura, como se ilustra en la Fig. 3, y el otro donde no aparece en el plano de imagen, ver Fig. 4. En estos diferentes escenarios, nuestro enfoque demostró ser eficaz en términos de detección y predicción para la clasificación binaria.

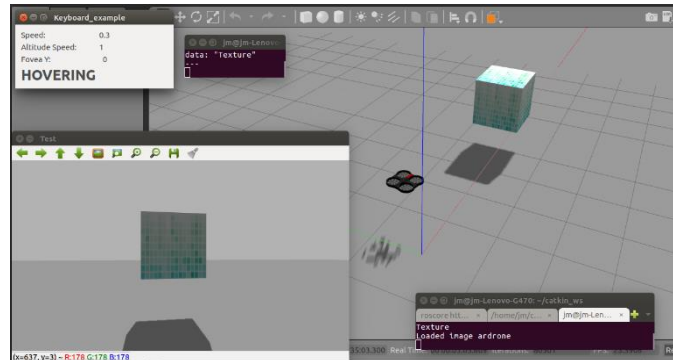


Fig. 3. Simulación de la detección de objeto aplicando el método propuesto con el enfoque de análisis wavelet y aprendizaje profundo.

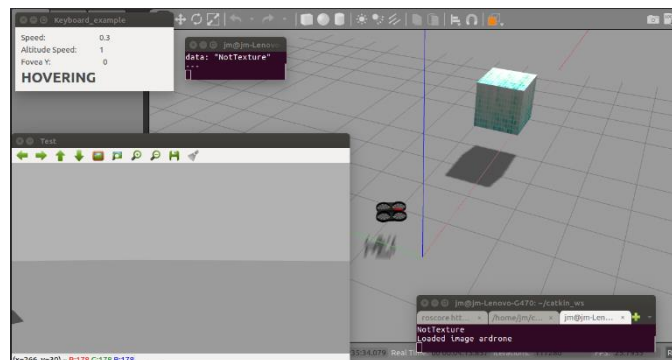


Fig. 4. Simulación fuera de campo de visión, donde el objeto no es detectado.

A pesar de que el caso es muy particular, se demostró que la interacción de una red con un conjunto de datos wavelet en aplicaciones de robótica pueden lograr resultados prometedores en la etapa de entrenamiento, menos parámetros, una red pequeña y evitar el sobreajuste. La simulación brinda un análisis completo del método propuesto, por lo tanto, al desarrollar un entorno mucho más complejo se logrará implementar una aplicación con condiciones reales para la clasificación y detección de objetos con texturas.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un método para la detección de objetos con texturas basado en el análisis multiresolución y redes neuronales profundas aplicado en la navegación de vehículos aéreos no tripulados o drones en ambientes simulados. El objetivo ha permitido que el dron reconozca los objetos con texturas en la escena o fotograma actual, y ejecutar una acción que establezca la clasificación. La salida de la predicción es visible en la terminal de ejecución, de acuerdo con dos combinaciones posibles: Objeto con textura y Objeto sin textura. La metodología propuesta fue evaluada usando el simulador Gazebo a través del paquete llamado gazebo_ros, en el que nuestro sistema funciona en tiempo real, es decir, casi el doble de la velocidad de los frames de la cámara a bordo.

El trabajo futuro implica realizar experimentos con nuevas familias wavelet, con el objetivo de lograr una mejor caracterización de las texturas de los objetos con un enfoque multiclase. Además, de acoplarlo dentro de un sistema de navegación autónomo más complejo para la detección y el seguimiento de este.

Agradecimientos

J.M.F.C. es becario doctoral del CONACYT (México) en el Programa de Posgrado en "Ciencias Aplicadas" del IICO-UASLP. Al INAOE por otorgar las facilidades para realizar la estancia de investigación donde se realizó parte de este trabajo.

Referencias

- [1]. L. O. Rojas-Pérez, Autonomous Navigation System For Micro Aerial Vehicles. Tesis de Licenciatura, InsitutoTecnológico superior de Atlixco, Puebla, México, 2018.
- [2]. J. Martínez-Carranza, L. Valentín, F. Márquez-Aquino, J.C. González-Islas, N. Loewen, (mayo, 2016). Obstacle Detection during Autonomous Flight of Drones Using Monocular SLAM. *Research in Computing Science*, vol. 114, pp. 111–124.
- [3]. C. Vargas-Olmos, (2010). Procesamiento de imágenes con métodos de ondeleta, Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, UASLP, San Luis Potosí, México.
- [4]. J. D. Cárdenas-Amaya, "Extracción y análisis de características con la Transformada Wavelet para el reconocimiento de imágenes," Tesis de maestría, Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, UASLP, San Luis Potosí, México, 2018.
- [5]. T. Williams, R. Li, (febrero, 2018). An Ensemble of Convolutional Neural. *Journal of Software Engineering and Applications*. pp. 69-88.
- [6]. S. Jung, S. Hwang, H. Shin, D. H. Shim, (2018). Perception, Guidance, and Navigation for Indoor Autonomous Drone Racing Using Deep Learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- [7]. S. Mallat, (2009). *A wavelet tour of signal processing: the sparse way.*, 3° ed. United States: Academic Press.
- [8]. J. Torres, (23 Septiembre 2018). Convolutional Neural Networks for Beginners [En línea]. Available: <https://towardsdatascience.com/convolutional-neural-networks-for-beginners-practical-guide-with-python-and-keras-dc688ea90dca>. [Último acceso: 27 Abril 2019].
- [9]. N. Koenig, A. Howard, (2004). Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sendai.

11

Síntesis y análisis estructural del pigmento $Zr_{1-x}PrSiO_4$ a partir de óxidos precursores ZrO_2 , SiO_2 y Pr_6O_{11}

H. H. Rivera Yerena³⁶, M. Robles Martínez³⁷, T.C. Flores-Flores³⁸, J. F. Louvier Hernández³⁹, R. Patiño Herrera⁴⁰, E. Pérez⁴¹.

Resumen

Este trabajo se centra en el estudio de la síntesis del pigmento amarillo de silicato de circonio dopado con praseodimio ($Pr-ZrSiO_4$). Las propiedades cromáticas del pigmento están directamente relacionadas con su estructura cristalina, lo cual se ha podido observar con difracción de rayos X al asociar las lecturas colorimétricas con la información obtenida de los difracto-gramas. La estructura cristalina del pigmento, y en consecuencia las propiedades cromáticas, están determinadas por las condiciones de síntesis donde los factores más importantes son de temperatura, tiempo de reacción, masa de dopante, tamaño de partícula, fases de los reactivos, así como la cantidad y tipo de mineralizante.

³⁶H. H. Rivera Yerena (✉)

Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato, Antonio García Cubas 600, Fovissste, 38010 Celaya, Gto.

³⁷M. Robles Martínez (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Doctorado Institucional de Ingeniería y Ciencia de los Materiales, Av. Sierra Leona #550, Lomas de San Luis, 78210 San Luis, S.L.P., México.

e-mail. robles.mar@hotmail.com

³⁸T. C. Flores Flores (✉)

Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato.

Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México, Av. Antonio García Cubas #600 esq. Av. Tecnológico, Colonia Alfredo V. Bonfil, 38010, Celaya, Gto, México.

³⁹J. F. Louvier Hernández (✉)

Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato.

Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México, Av. Antonio García Cubas #600 esq. Av. Tecnológico, Colonia Alfredo V. Bonfil, 38010, Celaya, Gto, México.

⁴⁰R. Patiño Herrera (✉)

Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato.

Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México, Av. Antonio García Cubas #600 esq. Av. Tecnológico, Colonia Alfredo V. Bonfil, 38010, Celaya, Gto, México.

e-mail. roos_ph@iqcelaya.itc.mx

⁴¹E. Pérez (✉)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Instituto de Física, Av. Dr. Manuel Nava 6, Zona Universitaria, 78290 San Luis, S.L.P., México.

e-mail. elias@ifisica.uaslp.mx

En este trabajo se reporta el efecto de diferentes temperaturas de síntesis, tiempos de reacción y distintas cantidades de ion dopante en las propiedades cromáticas del pigmento.

Palabras clave: Pigmento $Zr_{1-x}PrSiO_4$, Estructuras Cristalinas, Pigmento.

1. Introducción

Un pigmento cerámico es una sustancia inorgánica que mezclada en proporciones alrededor del 5% en peso con matrices vítreas genera coloración uniforme de las mismas, dicha sustancia debe ser estable a altas temperaturas, ser insoluble en la matriz vítrea y no modificar las propiedades de la matriz. Los pigmentos cerámicos están constituidos por una red cristalina donde se integra un ion cromóforo [1].

Entro de la larga tradición de los materiales cerámicos se han desarrollado pigmentos amarillos como el zirconio-vanadio, estaño-vanadio, amarillos de cadmio, antimonato de plomo, etc. que han sido ampliamente utilizados en aplicaciones ornamentales de especialidad dentro de la industria. Las regulaciones ambientales y sanitarias en las décadas de 1970 y 1980 crearon la necesidad de desarrollar un pigmento amarillo limpio e intenso para sustituir principalmente a los pigmentos de plomo y cadmio, esto derivó en el uso industrializado del silicato de praseodimio-zirconio, descubierto en la década de 1960 [2]. El pigmento $Zr_{1-x}PrxSiO_4$ es considerado una solución sólida de praseodimio en zircón donde iones de praseodimio remplazan iones de zirconio en la estructura cristalina [3]. La producción comercial del pigmento incluye la adición de algunos mineralizantes, que funcionan como catalizadores de la reacción y generan una fase que funciona como medio de transporte para iones involucrados en la formación del silicato de zirconio-praseodimio [4]. El método de síntesis cerámico es el más popular dentro de la industria por la sencillez y los bajos costos del proceso. El método consiste en mezclar uniformemente los componentes reaccionantes para una posterior calcinación a temperaturas que van de 500 a 1400 °C, en función de la temperatura de formación del sistema pigmentante. La mayoría de las reacciones químicas que ocurren en la síntesis se desarrollan en estado sólido, sin embargo, para promover algunas de ellas se introducen sustancias que puedan formar una

fase líquida o gaseosa, dichas sustancias son sales u óxidos que son conocidos como mineralizantes [5], [6].

En la industria de los pigmentos cerámicos es muy importante caracterizar un color, así como establecer diferencias entre colores. El modelo más utilizado en el campo es el sistema CIEL*a*b*, en este sistema se utiliza un sistema de colores opuestos, la variable L* es una medida de la claridad, mientras que las componentes a* y b* definen las señales de color rojo-verde y amarillo-azul. Un valor positivo de a* define un color más rojo que verde, y un valor positivo de b* define a un color más amarillo que azul [7].

2. Condiciones Experimentales

En este estudio se analizaron tres variables para la síntesis del pigmento amarillo. La temperatura de calcinación (900 °C, 1000 °C, 1100 °C y 1200 °C), el tiempo de residencia (6 h, 12 h, 24 h y 48 h) y la cantidad de Pr ($x= 0.03$, $x= 0.05$ y $x= 0.07$) fueron las variables estudiadas para evaluar cuantitativamente el efecto de estos factores sobre el color y las características estructurales. Las muestras fueron procesadas por el método cerámico tradicional. La mezcla de óxidos precursores (ZrO_2 , SiO_2 , Pr_6O_{11}) con la mezcla mineralizante de NaCl y Na_2SiF_6 fue realizada en un mortero de ágata para lograr un contacto profundo entre las fases involucradas. La mezcla de óxidos precursores y mineralizantes fue colocada en crisoles sellados. Las mezclas se llevaron a la temperatura de calcinación a una tasa de 10 °C/min, en la cual se mantuvieron por los tiempos de residencia establecidos, al final del tiempo de residencia los crisoles fueron retirados y enfriados a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras calcinadas fueron desagregadas con un mortero de ágata y posteriormente tamizadas con una malla de 25 μm . Las fases cristalinas fueron involucradas en la formación del pigmento $Zr_{1-x}Pr_xSiO_4$ se determinaron por difracción de rayos X a temperatura ambiente un equipo Bruker, Modelo D8 ADVANCE, con Detector Ojo de Lince y Tubo de Cu. Las muestras se corrieron de 15 a 140° con un Tamaño de paso de 0.01°. Para las determinaciones colorimétricas se empleó un espectrofotómetro CM-5 de Konica Minolta. Para la síntesis del pigmento $Zr_{1-x}Pr_xSiO_4$ se empleó SiO_2 de Sigma-Aldrich con pureza mayor a 99% en fase cuarzo- α con el 99 % de las partículas con un tamaño menor o igual a 8 μm ; ZrO_2 de Sigma-Aldrich con pureza mayor a 99% en fase monoclinica con un tamaño de partícula menor a 5 μm ; Pr_6O_{11} Sigma-Aldrich

con pureza de 99.9%; NaCl Sigma-Aldrich de pureza mayor a 99% con un tamaño de partícula menor a 25 μm y NaSiF₆ Sigma-Aldrich de pureza mayor a 99% con un tamaño de partícula menor a 25 μm . Las sales mineralizantes fueron mezcladas y homogeneizadas en un mortero de ágata hasta lograr un polvo fino.

3. Resultados

Las lecturas colorimétricas de los experimentos realizados se han analizado para identificar tendencias generales en las variaciones de tono en función de las condiciones de síntesis. Los resultados estadísticos de las lecturas colorimétricas muestran que las variables más importantes para el desarrollo del color amarillo son la temperatura (T) y la cantidad de praseodimio (x), como se puede observar en la Figura 1, donde las barras mayores corresponden al efecto de la variable de temperatura, seguida por la interacción entre temperatura y cantidad de praseodimio. Finalmente, el efecto individual de la cantidad de praseodimio tiene magnitud muy similar a su interacción con la temperatura. La variable del tiempo (t) sólo se presenta con efecto significativo en interacción con la temperatura.

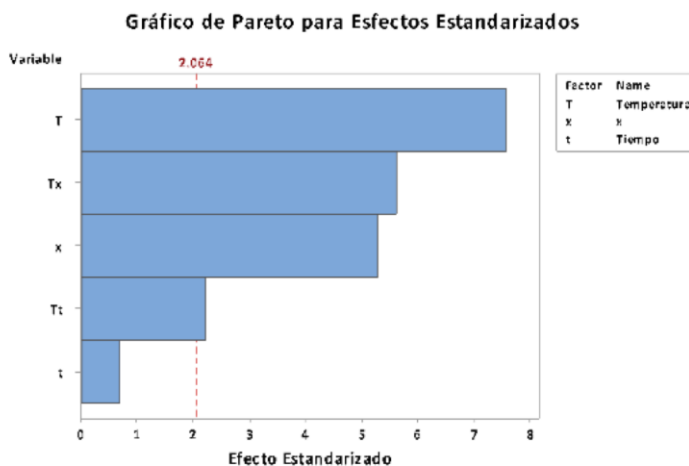


Fig. 1. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la síntesis del pigmento $\text{Zr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{SiO}_4$.

La forma en que los efectos principales afectan a la coordenada b^* de las lecturas colorimétricas se muestra en la Figura 2. De ella se puede observar que la intensidad del color amarillo depende fuertemente de los niveles en las variables de temperatura y

cantidad de praseodimio. En el caso de la temperatura se observan los menores valores de b^* cuando la temperatura es de 1200 °C siendo 1000 °C la temperatura que promueve el color amarillo de forma más intensa. En cuanto a la cantidad de praseodimio se muestra que los valores de $x=0.07$ afectan de forma considerable la intensidad del color, siendo los valores de 0.03 a 0.05 los mejores para lograr la síntesis del pigmento con buena intensidad de color. El tiempo de calcinación, como se puede observar, tiende a reducir la intensidad del color amarillo.

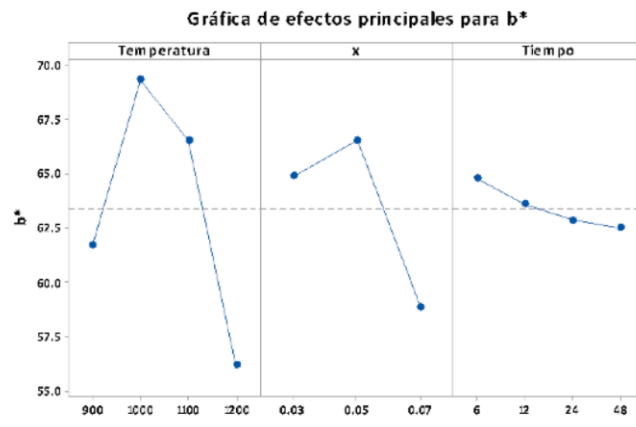


Fig. 2. Gráfica de efectos principales para la coordenada de color b^* .

Considerando los resultados de la gráfica anterior, donde el efecto del tiempo es menor, se construyó la Figura 3 con las variables que tienen los efectos más grandes. En ella se muestra una región donde la componente b^* presenta los valores más altos, indicando un color amarillo intenso. De la misma forma que en la Figura 2 se puede observar que altos valores de temperatura y praseodimio no contribuyen al desarrollo del color amarillo.

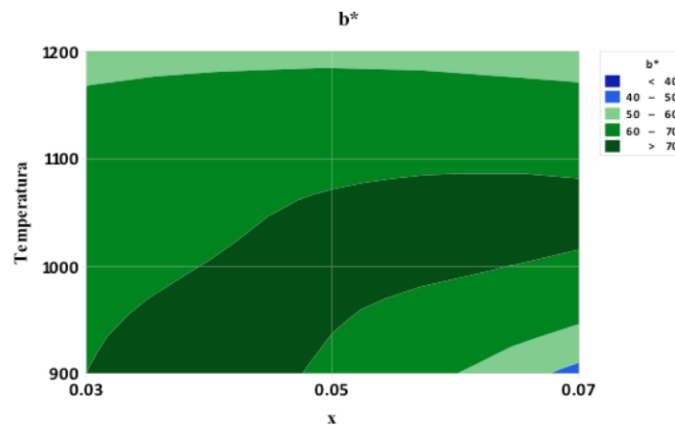


Fig. 3. Curvas de contorno para b^* en función de la temperatura y contenido de praseodimio (x).

Para relacionar las propiedades cromáticas del pigmento con la estructura cristalina se han realizado experimentos de difracción de rayos X sobre los pigmentos sintetizados. El análisis de estos datos permite asociar la estructura cristalina a las propiedades cromáticas y al mismo tiempo determinar los efectos que las condiciones de reacción tienen sobre el desarrollo de los cristales de zircón. En la Figura 4a se muestra un segmento de los difractogramas, correspondiente al pico de mayor intensidad, de cuatro muestras sintetizadas con igual composición y tiempo de calcinación, siendo la única diferencia la temperatura de síntesis. De la Figura 4a se puede observar que la posición y forma de los picos no son muy diferentes entre ellos, situación que no es así para la intensidad de estos. Las diferencias en intensidad pueden ser explicadas por el grado de sustitución del ion de praseodimio en la red cristalina. En la Figura 4b se muestra el mismo segmento de los difractogramas, pero con cuatro muestras sintetizadas a igual temperatura y tiempo de calcinación, siendo la única diferencia la composición. En este caso la posición, forma e intensidad son muy diferentes entre ellos, estas diferencias tienen su origen en el grado de sustitución, sitios de sustitución y las dimensiones de los cristales.

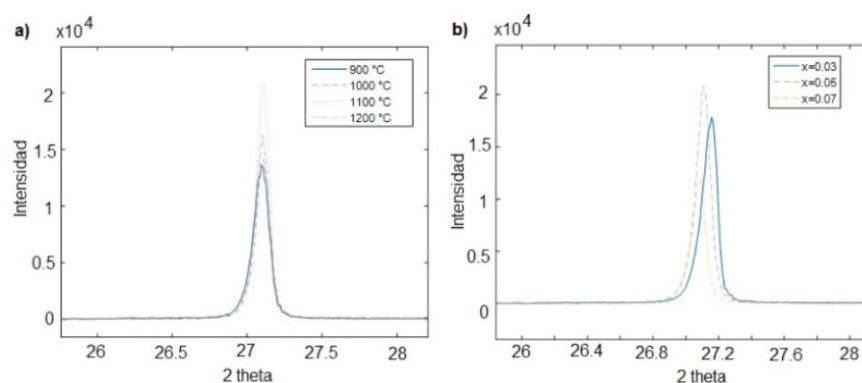


Fig. 4. a) Pico de mayor intensidad para los difractogramas de pigmentos sintetizados a igual a) composición y tiempo de calcinación, b) temperatura y tiempo de calcinación.

4. Conclusión

De los resultados de este reporte se concluye que la temperatura y contenido de praseodimio son las variables más importantes en la síntesis del pigmento y se muestra la tendencia del desarrollo del color amarillo en función de las distintas condiciones de síntesis. La técnica de difracción de rayos X proporciona información estructural del

pigmento que permite explicar las propiedades cromáticas en función de las condiciones de síntesis para su control y reproducibilidad dentro de la industria.

Referencias

- [1]. G. Monrós Tomás, “El color de la cerámica: nuevos mecanismos en pigmentos para los nuevos procesados de la industria cerámica,” 2003.
- [2]. R. A. Eppler, “Formation of praseodymium-doped zircon colors in presence of halides,” *Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development*, vol. 10, no. 3, pp. 352–355, 1971.
- [3]. M. Ocaña, A. Caballero, A. R. González-Elípe, P. Tartaj, and C. J. Serna, “Valence and Localization of Praseodymium in Pr-Doped Zircon,” *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 139, no. 2, pp. 412–415, Sep. 1998.
- [4]. M. Ocaña, A. Caballero, A. R. González-Elípe, P. Tartaj, C. J. Serna, and R. I. Merino, “The effects of the NaF flux on the oxidation state and localisation of praseodymium in Pr-doped zircon pigments,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 19, no. 5, pp. 641–648, 1999.
- [5]. G. Del Nero, G. Cappelletti, S. Ardizzone, P. Fermo, and S. Gilardoni, “Yellow Pr-zircon pigments. The role of praseodymium and of the mineralizer,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, no. 14, pp. 3603–3611, Nov. 2004.
- [6]. D. Guo, Q. Yang, P. Chen, Y. Chu, Y. Zhang, and P. Rao, “The influence of micronization on the properties of Pr-ZrSiO₄ pigment,” *Dyes and Pigments*, vol. 153, no. January, pp. 74–83, 2018.
- [7]. G. A. Klein, *Industrial Color Physics*, vol. 154. New York, NY: Springer New York, 2010.

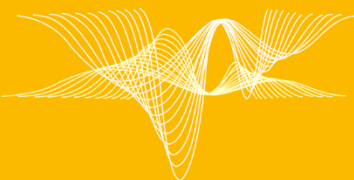


UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
CIENCIAS

En este compendio se muestran los trabajos de diferentes grupos de investigación. El compendio abarca 11 reportes, los temas tratados abarcan: desde la fisiología con temas como la implementación de un modelo matemático y electrónico de una célula excitable; temas de ecuaciones diferenciales con retardo en el tiempo como en el trabajo titulado time delay electronic circuit; temas de sistemas caóticos como lo son, la bifurcación automática del atractor caótico Rössler Usando Ni MyDAQ y Arduino; Temas de procesamiento de señales tales como, selección de series temporales caóticas como criterio de seguridad para sistemas de cifrado, introducción a criptografía pos-cuántica y algoritmos de cifrado lightweight, análisis multiresolución y aprendizaje profundo para detección de patrones característicos en la navegación aérea; temas de control como Controlador PID en aplicaciones AFM; temas de materiales entre los que se cuentan, estudio de soportes poliméricos de poli(ácido láctico)/quitosano, síntesis y análisis estructural del pigmento $Zr_{1-x}PrSiO_4$ a partir de óxidos precursores ZrO_2 , SiO_2 y Pr_6O_{11} para su potencial uso en la regeneración de piel; y temas de manufactura con, uso de termografía en pruebas de calidad de manufactura, electroluminescent characterization of commercial solar panels. De esta forma los diferentes grupos de investigación nos dan a conocer su quehacer científico. Esperamos se lean los trabajos y envíen sus comentarios a los respectivos autores, para fomentar una cooperación entre las diversas entidades.



**SEÑALES CAÓTICAS, BIOLÓGICAS
Y ELECTRÓNICAS**
FACULTAD DE CIENCIAS, UASLP

Tecnología y ciencias aplicadas



9 786075 351469