

# 7º Encuentro de Investigación

## Congreso Internacional de Ciencias, Innovación y Tecnología

"Hacia la consolidación de los Programas Educativos de la UPT"



(MR)

## MEMORIA



PONENTES NACIONALES E INTERNACIONALES, CARTELES CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS, PROTOTIPOS, PROYECTOS PRODUCTIVOS  
VOLUMEN I  
ISBN: 04-2014-091714443200-102

Investigación e Innovación de la Universidad Politécnica de Tulancingo

*Líderes Construyendo su Futuro*

## COMITÉ EDITORIAL

Mtro. Gerardo Téllez Reyes, Presidente  
Mtra. María de Jesús Espino Guevara, Consejera Académica  
Dr. Alfonso Padilla Vivanco, Consejero Académico  
Lic. Nelly Ubaldo Mejía, Consejera Editorial  
Dra. Carina Toxqui Quitl, Secretaria Técnica  
Dr. Enrique González Gutiérrez, Consejero Académico  
Dr. Juan Carlos Valdiviezo Navarro, Consejero Académico  
Dr. Rubén Tapia Olvera, Consejero Académico  
Dra. Rosario María del Rosario López Torres, Consejera Académica  
Dra. Benedicta María Domínguez Valdez, Consejera Académica

## EDICIÓN:

Ing. Crispín Hernández Álvarez

## DISEÑO DE PORTADA:

Mtro. Javier Arroyo Islas

Calle Ingenierías # 100. Col. Huapalcalco, Hidalgo, México. C.P. 43629.

Teléfono: 01(775) 75 5 82 02, Fax: 01(775) 75 5 83 24.

# Séptimo Encuentro de Investigación de la Universidad Politécnica de Tulancingo

## Prefacio

El Encuentro Anual de Investigación de la UPT, tiene como objetivo dar a conocer entre la Comunidad Universitaria, la labor científica y tecnológica que se desarrolla en cada una de las áreas Académicas de nuestra Institución.

Estas actividades permiten a los Profesores y Estudiantes, tener foros de discusión científica e intercambio de ideas para la mejora de sus propuestas de Investigación. Los trabajos que aquí presentamos son el resultado del esfuerzo colaborativo, entre los miembros de los Cuerpos Académicos y los estudiantes de los diferentes niveles que contempla nuestra oferta educativa. Las líneas genéricas en donde se ubican estos trabajos son las siguientes: Computación Óptica y Sistemas de Visión, Ingeniería de Software, Control e Instrumentación, Matemáticas Aplicadas a la Ingeniería, Desarrollo Regional, Dirección de Organizaciones, Desarrollo Empresarial y Capital Humano, Administración y Gestión Organizacional.

Agradecemos a todos los autores su valiosa contribución y deseamos que este ejercicio se vea reflejado en la mejora continua de la calidad Académica de nuestra Universidad y de su región de influencia.

Gerardo Téllez Reyes

RECTOR

Enero, 2015

# **COMPUTACIÓN ÓPTICA Y SISTEMAS DE VISIÓN** Pág.

Momentos de Krawtchouk para la detección de fases de la marcha, C. Camacho-Bello, A. Padilla-Vivanco, J.J. Báez-Rojas .....	I
Recuperación de filtros holográficos provenientes de objetos microscópicos utilizando el método de la transformada Wavelet-Gabor, M. Hernández-Romo, A. Padilla-Vivanco .....	5
Análisis de la distribución de venas de la mano para reconocimiento de personas, R. Castro-Ortega, C. Toxqui-Quitl, J. Solís-Villarreal, A. Padilla-Vivanco .....	11
Estudio de las propiedades de esparcimiento de partículas usadas en la fabricación de phantoms imitadores del melanoma cutáneo, M. Cunill-Rodríguez , J.A. Delgado-Atencio , D. Villegas-Hernández ..	15
Algoritmo para la caracterización de imágenes digitales de lesiones cutáneas pigmentadas con Base a su Color y Rugosidad, L. Y. Mera-González, J. A. Delgado-Atencio, J. C. Valdiviezo-Navarro.....	19
Simulación de haces con longitud de foco extendida mediante Zemax, A. Vázquez-Villa, J. A. Delgado-Atencio, S. Vázquez-y-Montiel, J. Castro-Ramos .....	26
Fusión de imágenes multifoco usando unidades de procesamiento gráfico, J. Hernández-Tapia, J. C. Valdiviezo-Navarro .....	30
Clasificación de botellas basado en visión por computadora, J.A. Cárdenas-Franco, C. Toxqui-Quitl, U.E. Escobar-Franco .....	35
Análisis de la marcha humana, V. Morales-Batalla, C. Toxqui-Quitl.....	39
Holografía óptico-digital fuera de eje, P. Soto-López, A. Padilla-Vivanco, A. Yuck Franco .....	45

# **CONTROL E INSTRUMENTACIÓN**

**Pág.**

Características de medición inteligente de energía eléctrica en una casa habitación, F. A. Elizalde-Canales, I. J. Rivas-Camero .....	50
Simulación de un demodulador de frecuencia para la sincronía eléctrica, C. Rueda-Germán, I. J. Rivas-Camero, J. H. Arroyo-Núñez, A. D. Vite-Rojo.....	55
Instrumentación inalámbrica de variables meteorológicas en un ambiente cerrado para uso agrícola, J. G. Duran-Candelaria, J. C. Ramos-Fernández, L. F. Cerecero-Natale, R. Terán-Pacheco .....	60
Impacto de las fuentes de energía renovables en la operación y control de sistemas eléctricos, D. Martínez-Martínez, R. Tapia-Olvera .....	65

# **MATEMÁTICAS APLICADAS A LA INGENIERÍA**

Un modelo de programación matemática binaria para la asignación de horarios en la Universidad Politécnica de Tulancingo, E. González-Gutiérrez, M. Pérez Rubio, M. Muñoz Pérez, H. Minor Popocatl .	72
Análisis y simulación de la probabilidad de rechazo de paquetes en redes 802.11, Wi-Fi, F. J. Bucio-Castillo, M. Muñoz-Pérez, F. J. Albores-Velasco, E. González-Gutiérrez .....	77
Modelación estocástica del protocolo CSMA/CA para redes inalámbricas, M. Muñoz-Pérez, F. J. Albores-Velasco, E. González-Gutiérrez .....	84
Estudio de sensibilidad paramétrico del método de relajación para sistemas lineales semi-infinitos, J. Barrera-Ángeles, E. González-Gutiérrez, M. Muñoz-Pérez, E. León-Olivares .....	96

# **DESARROLLO DE SOFTWARE APLICADO**

Medición experimental y comprobación teórica de la Resolución de un Sistema de Adquisición de Imágenes, A.M. Godínez-Jarillo, J.A. Delgado-Atencio, C. Enríquez-Ramírez.....	102
--	-----

# Momentos de Krawtchouk para la detección de fases de la marcha

C. Camacho-Bello<sup>1</sup>, A. Padilla-Vivanco<sup>2</sup>, J.J. Báez-Rojas<sup>3</sup>

**Resumen**— En este trabajo se presenta un análisis de teórico del proceso de la marcha humana desde el punto de vista holístico usando los momentos de Krawtchouk. Se describen las fases de la marcha humana y sus ventajas desde el punto de vista computacional. Se presentan resultados experimentales.

**Palabras clave**— Análisis de la marcha, momentos de Krawtchouk, reconocimiento de patrones.

## INTRODUCCIÓN

La marcha humana es un mecanismo complejo por el cual una variedad de músculos trabajan en conjunto de manera coordinada para trasladarse de un lugar a otro, con poco esfuerzo y un consumo mínimo de energía. Dada la alta complejidad que se presenta para el análisis de la marcha, por lo general se describe en términos de períodos y fases para facilitar su descripción y estudio. En este sentido, el ciclo de la marcha es el período de tiempo entre dos eventos idénticos en el ciclo de la marcha [1]. La Figura 1 muestra los componentes temporales de los diferentes soportes de cada pie durante el ciclo de la marcha. El ciclo de la marcha normal se compone de 62% de la fase de apoyo y 38% la fase de impulsión, además cuenta con dos períodos de doble apoyo, el cual ocupa un total del 25% del ciclo de la marcha.

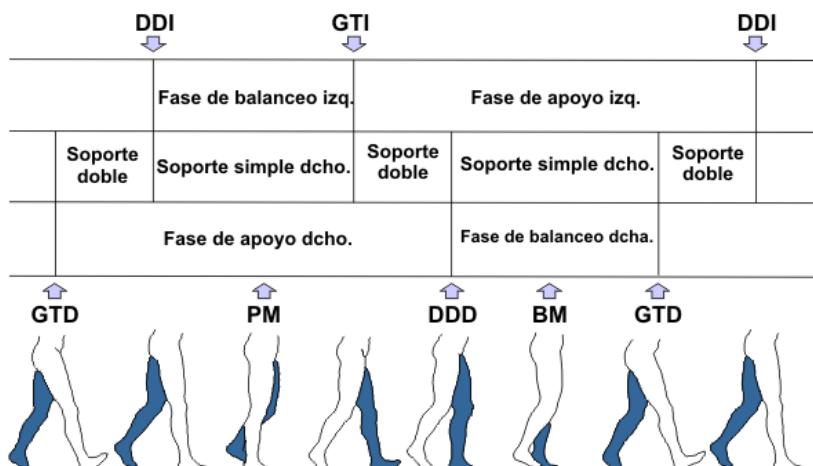


Figura 1: Ciclos de la marcha: golpe de talón derecho (GTD), despegue de los dedos derechos (DDD), golpe de talón izquierdo (GTI), despegue de los dedos izquierdos (DDI), postura media (PM), balanceo medio (BM).

El estudio de la marcha humana con la técnica de momentos ortogonales se ha estudiado en diferentes contextos, como el reconocimiento de la marcha [2,3] y reconstrucción de objetos en movimiento para predecir imágenes faltantes o intermedias de la marcha de un sujeto de prueba [4].

C. Camacho-Bello<sup>1</sup> (✉), A. Padilla-Vivanco<sup>2</sup> (✉), J.J. Báez-Rojas<sup>3</sup> (✉)

<sup>1,3</sup> Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, <sup>2</sup>Universidad Politécnica de Tulancingo  
e-mail:<sup>1</sup> [joel\\_camacho@inaoep.mx](mailto:joel_camacho@inaoep.mx), <sup>2</sup> [alfonso.padilla@upt.edu.mx](mailto:alfonso.padilla@upt.edu.mx), <sup>3</sup> [jbaeze@inaoep.mx](mailto:jbaeze@inaoep.mx)



Una de las ventajas de usar momentos ortogonales es que requiere pocos descriptores para extraer características de la forma y el movimiento [3]. Por otra parte, los momentos ortogonales Krawtchouk presentan buenos resultados en la extracción de características debido a su capacidad para extraer características locales y globales de una imagen con un mínimo de información redundante [5-7].

En este trabajo presentamos un nuevo método basado en el análisis de una serie de tiempo de los momentos Krawtchouk y la media entre el valor máximo y mínimo de la serie histórica, lo cual facilita el cálculo de las fases de la marcha. También presentamos los resultados de los porcentajes de las fases de la marcha y parámetros temporales de 10 sujetos de prueba.

### ALGORITMO PARA DETECTAR LAS FASES DE LA MARCHA

Como es bien conocido momentos de bajo orden están asociados con la forma, mientras que los momentos de orden superior describen el detalle de la imagen [8]. Por lo tanto, los momentos de orden inferior se pueden utilizar para el análisis de series de tiempo a partir de un conjunto de imágenes para describir el movimiento a través del tiempo de un objeto o de una persona que realiza una actividad física. También pueden extraer información de los parámetros temporales para el análisis de la marcha humana, como la fase de oscilación, la fase de apoyo, doble apoyo y la cadencia. La Figura 2 muestra el ciclo de la marcha obtenido con los momentos Krawtchouk de orden inferior normalizado por el momento de orden cero.

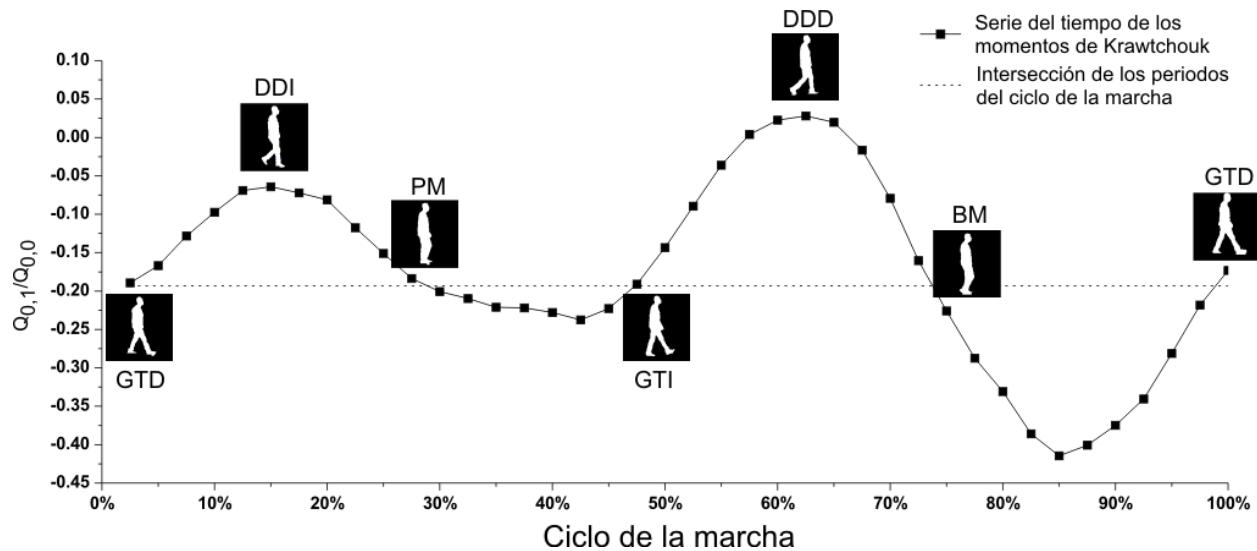


Figura 2. : Ciclos de la marcha asociado a momentos Krawtchouk.



Para facilitar la localización de las fases de la marcha de la serie temporal de los momentos Krawtchouk, proponemos obtener estos parámetros a partir de una línea que intercepta las diferentes fases de la marcha, que está dada por

$$g = \frac{\arg \max Q_{n,m}(t) + \arg \min Q_{n,m}(t)}{2}, \quad (1)$$

donde  $Q_{(n,m)}(t)$  son los momentos Krawtchouk de una imagen en un momento  $t$ . La línea propuesta por el valor de  $g$  cruza las fases de: golpe de talón derecho (GTD), despegue de los dedos derechos (DDD), golpe de talón izquierdo (GTI), despegue de los dedos izquierdos (DDI), postura media (PM), balanceo medio (BM), las cuales pueden encontrarse por el máximo de la serie de tiempo, todo esto se puede ver en la Fig. 2.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

El estudio experimental compara los valores medios de los parámetros temporales obtenidos de 10 sujetos de prueba con el método propuesto y el nivel de marcha normal en un adulto de sexo masculino de la población mexicana. Los participantes cumplieron con los siguientes criterios: masculino; entre 18 y 40 años; peso dentro de 65 a 82 kg.; ausencia de cualquier patología muscular. La Tabla I muestra los valores estándar por Pérez-Orive et al. [9] y el calculado por momentos Krawtchouk.

	Pérez-Orive et al. [9] Media	Método Propuesto Media	Método Propuesto Dst.
Ciclo de la marcha	1.14s	1.23s	0.07s
Paso	0.57s	0.6s	0.04s
Fase de apoyo	0.64s	0.75s	0.06s
Fase de balanceo	0.50s	0.47s	0.04s
Soporte doble	0.07s	0.30s	0.03s

Tabla I: Parámetros temporales del ciclo de la marcha.

## CONCLUSIONES

El método propuesto es fácil de implementar y tiene un bajo costo computacional, ya que un solo descriptor puede encontrar las fases de la marcha. Los resultados obtenidos sobre la duración de los parámetros de la marcha son relativamente más altos que los reportados para diferentes poblaciones, según lo informado por Pérez-Orive et al. [9]. Sin embargo, los porcentajes calculados con los momentos de Krawtchouk corresponden a los valores estándar, a diferencia de porcentajes de Pérez-Orive et al. [9] para la población masculina adulta mexicana. Creemos que el método propuesto servirá para el análisis de la marcha humana y los resultados presentados pueden contribuir a la rehabilitación de los pacientes con alguna condición al caminar.



## REFERENCIAS

1. Ayyappa E.: Normal Human Locomotion, Part I: Basic Concepts and Terminology, *Journal of Prosthetics and Orthotics*, 9(1), 10–17, (1997).
2. Camacho-Bello C., Toxqui-Quitl C., Padilla-Vivanco A.: Gait Recognition by Jacobi-Fourier moments, In: FIO/LS Technical Digest OSA, (2011).
3. Shutler J. D., Nixon M. S.: Zernike velocity moments for sequence-based description of moving features, *Image and Vision Computing*, 24, 343–356, (2006).
4. Prismall S. P., Nixon M.S., Carter N.: On moving object reconstruction by moments, In: *Proceedings of the 13th British Machine Vision Conference*, 83–82, (2002).
5. Yap P. T., Paramesran R., Ong S. H.: Image analysis by Krawtchouk moments,” *Image Processing, IEEE Trans Image Process* , 12 1367–1377, (2003).
6. Hu B., Liao S.: Chinese Character Recognition by Krawtchouk Moment Features. *Image Analysis and Recognition*. Springer Berlin Heidelberg, 711–716, (2013).
7. Sheeba Rani J., Devaraj D.: Face recognition using Krawtchouk moment, *Sadhana*, 37, 441–460, (2012).
8. Padilla-Vivanco A., Urcid-Serrano G., Granados-Agustín F., Cornejo-Rodríguez A.: Comparative analysis of pattern reconstruction using orthogonal moments, *Opt. Eng.* 46, 017002 (2007).
9. Pérez-Orive J., Pichardo A. E., Chávez-Arias D.: Desarrollo de un estándar de marcha normal en hombres adultos, *Rev. Méx. Ortop. Traum.* 12, (1998).



# Recuperación de filtros holográficos provenientes de objetos microscópicos utilizando el método de la transformada Wavelet-Gabor

M. Hernández-Romo<sup>1</sup>, A. Padilla-Vivanco<sup>2</sup>

**Resumen—** Se presenta un análisis de un sistema óptico-digital basado en la arquitectura del interferómetro de Mach-Zehnder para grabar filtros holográficos. El sistema de grabado holográfico hace uso de un objetivo de microscopio en cada brazo del sistema. Por otra parte, la Transformada Wavelet-Gabor es implementada para la etapa de reconstrucción holográfica. Las muestras estudiadas de esta investigación son seleccionadas con el fin de probar el algoritmo de recuperación y para caracterizar la resolución del sistema de registro holográfico. En este último paso, se utilizan algunas secciones de la tarjeta de resolución USAF 1951. Estas muestras permiten estudiar las características de la iluminación en el sistema de grabado. Adicionalmente, algunas muestras orgánicas son utilizadas para probar el método implementado, debido a que, las muestras biológicas tienen una composición morfológica compleja. Con esto en mente, podemos verificar las frecuencias recuperadas con cada uno de los parámetros establecidos en el método de recuperación. Se presentan resultados experimentales.

**Palabras clave—** Holografía Digital Microscópica, Transformada Wavelet, Microscópica en Tres Dimensión, Difracción Numérica.

## INTRODUCCIÓN

La holografía es una técnica para grabar y ver imágenes en tercera dimensión, una vez que han sido registradas y posteriormente reveladas en una película fotográfica de alta resolución [4]. Uno de los principios básicos inherentes a la holografía es el fenómeno interferencia entre dos haces de luz, del cual se registra su patrón de intensidades en una película fotosensible. Normalmente, para grabar hologramas se hace uso de la luz de un láser, ya que esta fuente luminosa tiene propiedades ondulatorias que permiten codificar la fase de la onda electromagnética en el material fotosensible, para después recuperarlo mediante un proceso óptico coherente [8].

El proceso para la recuperación de la amplitud y fase del objeto se divide en dos etapas. En la primera etapa se obtiene el grabado del patrón de interferencia, también conocido como filtro holográfico. La segunda etapa se llama la reconstrucción del campo óptico difractado, por medio de la luz que pasa a través del filtro holográfico.

Con el avance tecnológico actual ha sido posible dejar atrás la holografía analógica para dar paso a la holografía digital; en la cual, el proceso fotoquímico convencional de la holografía se sustituye por imágenes electrónicas, otorgando una nueva gama de capacidades. La holografía digital ofrece numerosas ventajas, tales como la rápida adquisición de hologramas, la disponibilidad completa de la información de la amplitud y la de fase del campo óptico, además de la versatilidad de las técnicas de procesamiento de imágenes [3].

M. Hernández-Romo<sup>1</sup> (✉), A. Padilla-Vivanco<sup>2</sup> (✉)

<sup>1,2</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail:<sup>1</sup> [martin.hernandez@upt.edu.mx](mailto:martin.hernandez@upt.edu.mx), <sup>2</sup> [alfonso.padilla@upt.edu.mx](mailto:alfonso.padilla@upt.edu.mx)



La eficiencia de la holografía digital tiende alta dependencia con la resolución del sensor electrónico utilizado para la grabación de los filtros holográficos [2]. El desarrollo de los sistemas opto-electrónicos y procesamiento de datos llevó a la holografía digital en nuevas perspectivas: se aplica a las distorsiones ópticas, las mediciones de formas, la microscopía y para las investigaciones de los líquidos en líquidos y gases.

## MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN

Transformada Wavelet de Gabor en dos dimensiones.

La Transformada Wavelet-Gabor (TWG) en dos dimensiones [1], se define en la Ec. (1), mientras que la familia de la Wavelet de Gabor se encuentra definida en la Ec. (2).

$$W_f(s, \theta, a, b) = \int \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \psi_{s, \theta}^*(x, y, a, b) dx dy \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \psi\left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, \theta\right) = & \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} \exp\left\{-\frac{(2\pi/\gamma)^2[(x-a)^2 + (y-b)^2]}{2s^2}\right\} \\ & \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{(x-a)\cos\theta + (y-b)\sin\theta}{s}\right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2}$  y  $j$  es la unidad imaginaria.

Si el holograma se crea debido a la interferencia de dos ondas coherentes en la geometría fuera de eje, donde el primero se llama onda de referencia  $R(x, y)$ , que tiene la información del medio de grabación y el segundo llamado onda objeto  $O(x, y)$  el que proviene del objeto, entonces estos rayos están definidos en las Ecs. (3) y (4).

$$O(x, y) = o(x, y) \exp[j\phi(x, y)], \quad (3)$$

$$R(x, y) = R_0 \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (x \cos \alpha + y \cos \beta)\right], \quad (4)$$

donde  $(x, y)$  son las coordenadas del plano del holograma,  $o(x, y)$  y  $R_0$  son la amplitud de las ondas,  $\phi(x, y)$  es la fase de la onda del objeto,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\alpha$  y  $\beta$  son los ángulos respectivamente, entre las direcciones de propagación de las ondas de objeto y de referencia. Por lo tanto, la intensidad del holograma  $I(x, y)$  se puede escribir como

$$\begin{aligned} I(x, y) = & |R_0|^2 + |o_{x,y}|^2 + R_0 O(x, y) \exp\left\{j\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x \cos \alpha + y \cos \beta + \phi(x, y))\right]\right\} \\ & + R_0 O(x, y) \exp\left\{-j\left[-\frac{2\pi}{\lambda}(x \cos \alpha + y \cos \beta + \phi(x, y))\right]\right\}. \end{aligned} \quad (5)$$



La TWG 2D para el holograma se puede escribir como:

$$W(s, \theta, a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{ A + R_0 o(x) \exp[j\phi(x, y)] + R_0 o(x) \exp[-j\phi(x, y)] \} \psi_{s, \theta}^*(x, b, a, b) dx dy, \quad (6)$$

Donde el módulo de la TWG en 2D  $|W(s, \theta, a, b)|$ , encuentra su máximo en  $s = T$  y  $\theta = \alpha$ . Si se multiplica el valor pico de la TWG en 2D por una onda ideal correspondiente a la onda de referencia se tienen la recuperación la información del holograma, descrita en la Ec. (7).

$$U_p(x, y) = \frac{\sqrt{\gamma^3}}{\sqrt[4]{4\pi^3}} R_0^2 \exp[\phi(x, y)]. \quad (7)$$

### SISTEMAS PARA EL GRABADO HOLOGRÁFICO

El sistema microscópico holográfico utilizado se representa en la Figura I, este sistema se basa en el interferómetro de Mach-Zehnder. En este esquema, un rayo láser seguido de un filtro espacial (SF) y el sistema de control de iluminación (P1, P2, Cl) se separa en dos haces por un divisor de haz (BS1). Donde, un brazo sirve como onda de referencia y otro rayo ilumina las muestras. Un objetivo de microscopio MO1 produce una imagen ampliada de la muestra (Ob) y el segundo objetivo MO2 es colocado en el brazo de referencia para obtener la congruencia de las curvaturas de frente de onda. El divisor de haz BS2 colocado delante del sensor CCD combina los dos haces antes de que se registran por la cámara CCD.

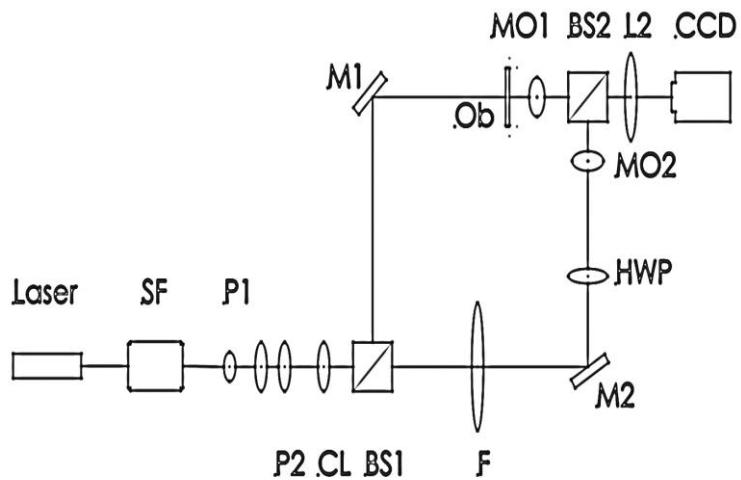


Figura I Sistema de grabado holográfico microscópico basado en el interferómetro de Mach-Zehnder.



## HOLOGRAMAS Y RESULTADOS

El proceso que se lleva a cabo para recuperar la información proveniente de los hologramas utilizando la TWG se muestra en la Figura 2, donde se muestra un holograma proveniente de la tarjeta de resolución USAF 1951, el cual se obtuvo con una amplificación de 10X y con iluminación en forma de transmisión. La Figura 2.b, muestra la amplitud recuperada del holograma, la cual es encontrada en el valor pico de la TWG en 2D. La Figura 2.c muestra la fase recuperada del holograma, la que presenta no solo la información del holograma sino que a su vez contiene la información de la iluminación del sistema de grabado holográfico, la información de la iluminación de fondo es corregida con el método de holograma de referencia, tal y como se muestra en la Figura 2.d, donde ahora se muestra el mapa de fase envuelta. En la Figura 2.e, se tiene el mapa de alturas de la fase que ilustra una imagen en 3D de la muestra, en el último paso el mapa de fase selecciona el perfil de altura de la muestra a lo largo del eje X o del eje Y, a fin de obtener las alturas del espécimen, como se observa en la Figura 2.f y la Figura 2.g.

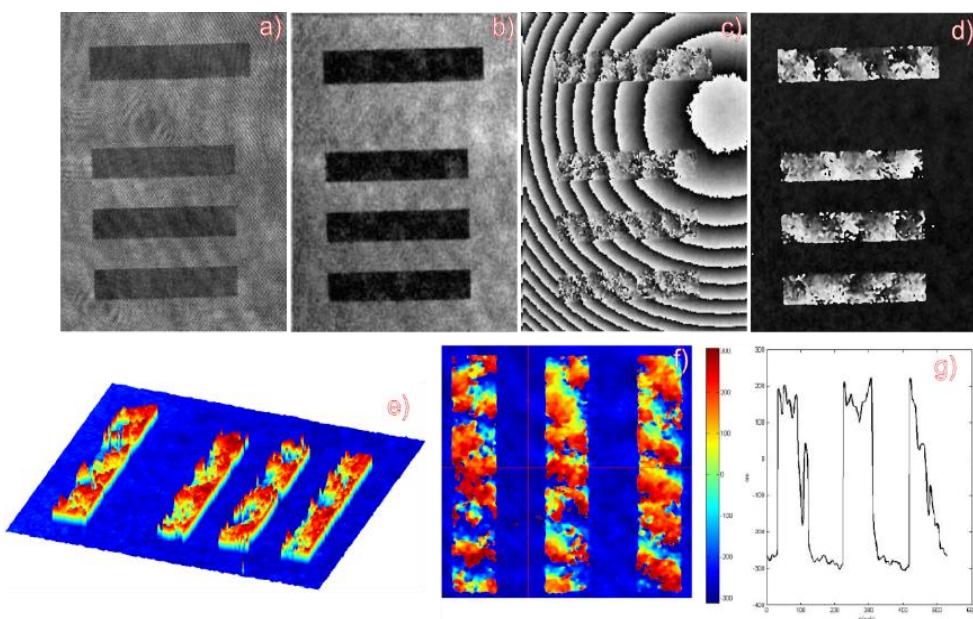


Figura 2 Tarjeta de resolución USAF 1951, a) Holograma, b) Amplitud, c) Fase envuelta, d) Mapa de fase, e) Mapa de alturas, f) Fase desenvuelta y g) Perfil de alturas en el eje X.

El método para la recuperación de hologramas basado en la TWG en 2D es probado con muestras biológicas como se observa en la Figura 3, donde el holograma es grabado a partir de una muestra de células de Sauco. Tanto la amplitud como la fase son recuperadas pero se presenta información no deseada en la Figura 3.e, la cual representa el mapa de alturas de la muestra, esta información parásita es generada en el momento de realizar la compensación de la aberración general del holograma.



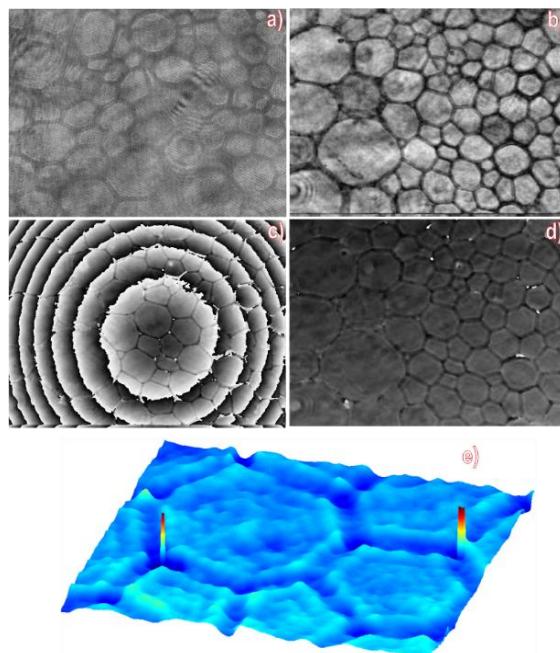


Figura 3 Muestra con células de Sauco tomada con una amplificación de 10X, a) Holograma, b) Amplitud, c) Fase envuelta, d) Mapa de fase y e) Mapa de alturas.

La recuperación de una segunda muestra biológica consiste en una sección del intestino de un conejo, donde es posible observar una imagen clara del mapa de fase, debido a, la compensación del mismo.

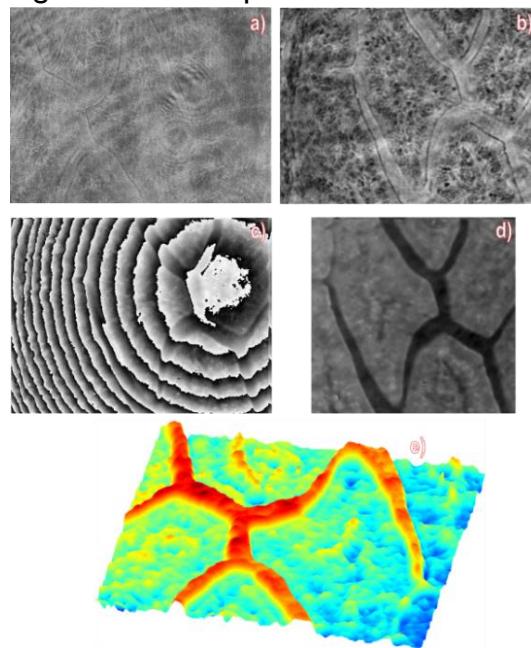


Figura 4 Muestra del intestino de un conejo capturada con una amplificación de 10X con iluminación de transmisión, a) Holograma, b) Amplitud, c) Fase envuelta, d) Mapa de fase y e) Mapa de alturas.



## CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha descrito un método de holografía digital microscópica fuera del eje con iluminación por transmisión para la medición de la fase de muestras biológicas. Se ha combinado un algoritmo de reconstrucción holográfica basado en la transformada Wavelet-Gabor y un método de compensación de la aberración a través de un holograma de referencia. Estos procedimientos son útiles para tener la amplitud y fase de la muestra. Con este algoritmo de reconstrucción, el orden cero y las imágenes gemelas se suprimen sin la necesidad de algún procedimiento extra, por lo cual se obtienen algunos resultados interesantes de alta calidad en la reconstrucción holográfica. Del mismo modo, para conseguir una resolución máxima axial en la imagen de fase hemos aplicado un holograma de referencia para corregir aberraciones de fase parasitarias. Esta metodología es útil para la inspección de las estructuras biológicas y de otros especímenes de industriales.

## REFERENCIAS

1. Martín Hernández-Romo, Alfonso Padilla-Vivanco, Myung K. Kim and Carina Toxqui-Quitl. "Phase retrieval of microscope objects using the Wavelet-Gabor transform method from holographic filters." SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, (2014).
2. Mundt, J., Kreis, T., "Digital holographic recording and reconstruction of large scale objects for metrology and display", Optical Engineering, 49(12), 125801-125801. (2010).
3. Kim, M.k., Principles and techniques of digital holographic microscopy, Journal of Photonics for Energy, 018005-018005, (2010).
4. Yoshikawa, T., Handbook of optical metrology principles and applications, CRC Press, (2009).
5. Weng, J., Zhong, J., Phase reconstruction of digital holography with peak of two-dimensional Gabor wavelet transform, Appl.Opt. 48 (2009).
6. Khmaladze, A., Kim, M.k., Lo, C., Phase imaging of cells by simultaneous dual-wavelength reflection digital holography, Optics express, 16(15), 10900-10911, (2008).
7. Jones, K., Wavelet Image Processing Applied to Optical and Digital Holography: Past Achievements and Future Challenges, Wavelets XI, Proc. of SPIE Vol. 5914 591423-1, (2005).
8. Hariharan, P., Optical Holography, Principles, techniques, and applications. Second Edition, Cambridge Studies in Modern Optics. (2004).



# Análisis de la distribución de venas de la mano para reconocimiento de personas

R. Castro-Ortega<sup>1</sup>, C. Toxqui-Quitl<sup>2</sup>, J. Solís-Villarreal<sup>3</sup>, A. Padilla-Vivanco<sup>4</sup>

**Resumen—** El análisis biométrico es una creciente área de investigación; este trabajo se encuentra enfocado en el reconocimiento de personas utilizando sus rasgos fisiológicos y/o de comportamiento. En este trabajo, la distribución de venas de la palma de la mano es extraída como patrón biométrico único. Para procesar los datos de la distribución de venas de la palma, las imágenes de las manos de las personas fueron adquiridas en el infrarrojo cercano. La mejora de las imágenes adquiridas viene dada por un filtro pasa-bajas basado en convolución espacial y ecualización del histograma. Las imágenes son binarizadas y posteriormente se obtuvo mediante algoritmos de morfología matemática la esqueletización y la dilatación. Se extrajeron los momentos geométricos como descriptores de la imagen, los cuales se convierten en un vector de entrada en una red neuronal artificial para la clasificación.

**Palabras clave—** Análisis Biométrico, Extracción de Características, Red Neuronal Artificial para clasificación, patrón de venas, procesamiento de imagen.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la identificación personal se ha basado en los sistemas tradicionales como tarjetas inteligentes y números de identificación personal (PIN), sin embargo este tipo de métodos proporcionan seguridad limitada y no son fiables debido a la facilidad de ser copiados o suplantados. La identificación biométrica puede minimizar estas desventajas ya que se basa en el hecho de que ciertas características biológicas son únicas e inalterables para cada persona, por lo que son más fiables y seguras [2,5]. Las venas de la palma y el dorso de la mano tienen muchas características que las hacen únicas. Y dado que se requiere que la sangre este fluyendo para registrar la imagen, la suplantación de identidad es casi imposible [5,6]. En el presente trabajo se hace uso de un sistema de adquisición de imágenes en el infrarrojo (IR) cercano. El uso de luz infrarroja (IR) se basa en el principio de absorción de los principales absorbentes de esta radiación en la sangre los cuales son la oxihemoglobina ( $\text{HbO}_2$ ), des oxihemoglobina (Hb) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) [3].

## BASES DE DATOS UPT

### Sistema de adquisición de imágenes

Para adquirir la imagen de la distribución de las venas, se implementó un sistema de visión por computadora que utiliza una fuente de iluminación en forma de anillo con emisión a los 880nm y una cámara digital 2CCD Progressive Scan Multi-Spectral El tamaño de la imagen adquirida es de 1024 (H) x 768 (V) píxeles donde cada píxel tiene un tamaño de  $4,65\mu$ .

R. Castro-Ortega<sup>1</sup> (✉), C. Toxqui-Quitl<sup>2</sup>, J. Solís-Villarreal<sup>3</sup>, A. Padilla-Vivanco<sup>4</sup>  
<sup>1,2,4</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo, <sup>3</sup>Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario  
e-mail: [raul.castro@upt.edu.mx](mailto:raul.castro@upt.edu.mx)



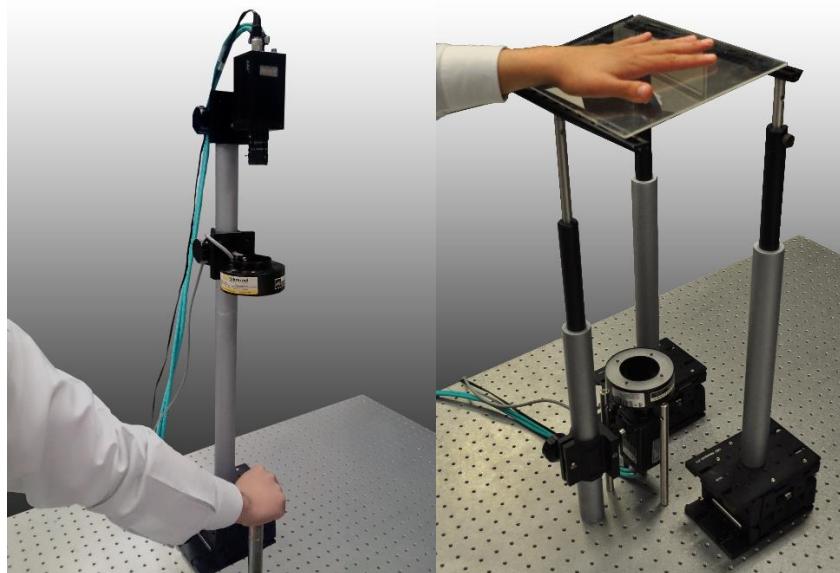


Figura 1. Sistema de adquisición de imágenes utilizado.

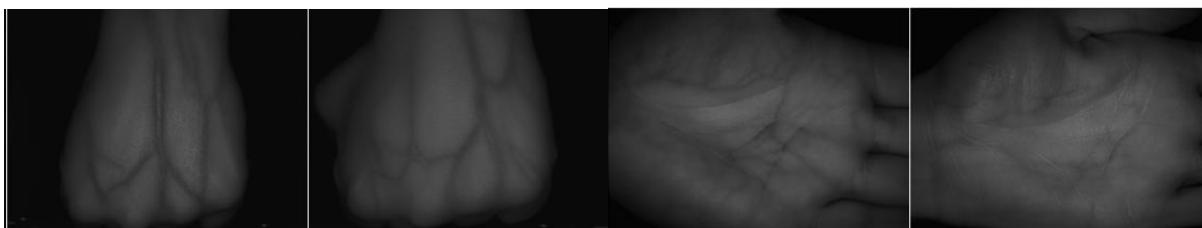


Figura 2. Imágenes adquiridas en el laboratorio de la palma y dorso de la mano.

#### Base de datos Multispectral Palmprint PolyU.

Las imágenes de la palma de la mano son de una base de datos que se descargó de Internet, propiedad de la Universidad Politécnica de Hong Kong, contiene las imágenes de 500 personas con 12 versiones en 4 canales, rojo (650nm), verde (550nm), azul (480nm) e infrarrojo (880nm) (RGB-IR), fueron descartados los canales rojo, verde y azul porque no se visualizan las venas. La figura 3 muestra algunas imágenes en el infrarrojo cercano.

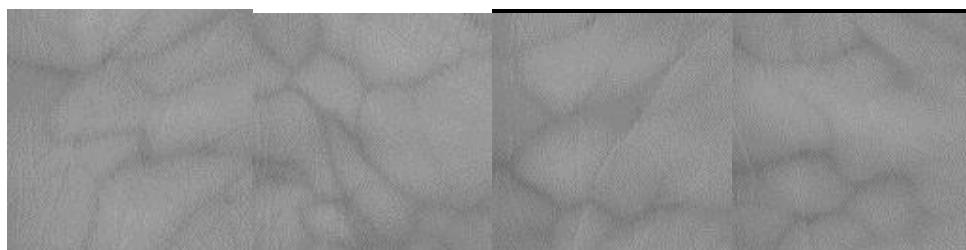


Figura 3. Imágenes de la base de datos Multispectral Palmprint PolyU.



## EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

### Pre-procesamiento de las imágenes

Antes de realizar las etapas de pre-procesamiento y extracción de características de las imágenes, es necesario segmentar una porción de la imagen original. La extracción de ésta porción se conoce como región de interés ROI (del inglés Región Of Interest) [1,4].

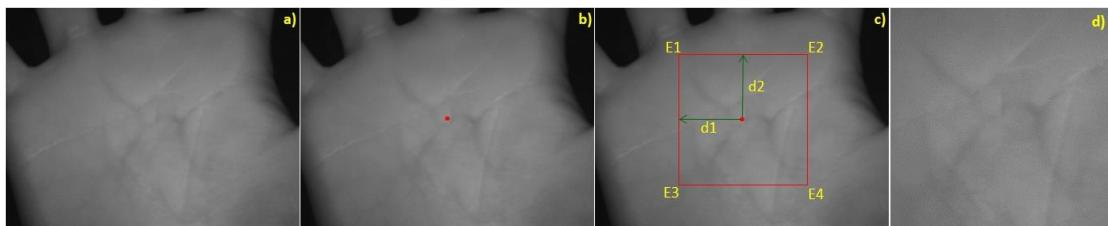


Figura 4. Proceso de la extracción de la ROI. a) Imagen Original, b) Centro del objeto, c) Cálculo de la ROI, d) Imagen segmentad.

El pre-procesamiento de las imágenes se muestra en la Figura 5.

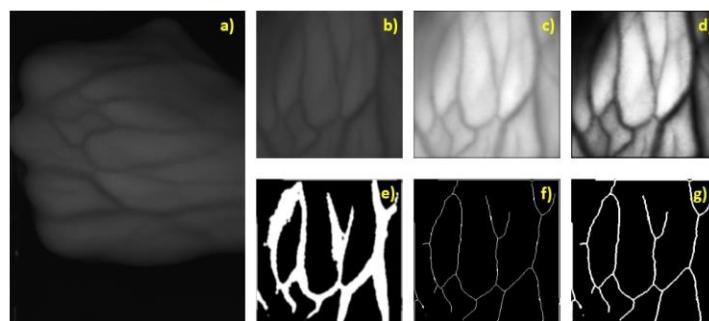


Figura 5. a) Imagen original, b) Filtraje, c) Ecualización de histograma, d) Binarización Adaptativa, e) Adelgazamiento y f) Dilatación.

### Extracción de características

El código de venas consiste en la realización de un recuento de píxeles que se presentan en una región a través de un sub-muestreo de la imagen con el patrón de la vena dilatada. La expresión para obtener el código venas está dada por:

$$VC = \begin{cases} 1 & \text{si } Np \geq \delta \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde  $Np$  es el número de píxeles en un pequeño bloque cuadrado,  $\delta$  es un umbral de corte y  $VC$  es el vector resultante. Para la clasificación utilizamos una red neuronal artificial en el que las neuronas de entrada reciben los descriptores  $VC$ .



## RESULTADOS

Los resultados para determinar la eficiencia de la técnica de extracción de características se resumen en la tabla I:

Processed people	Geometric Moments	Hu Moments	Vein Code
	Correct Classification	Correct Classification	Correct Classification
25	72 %	16.33 %	98.33 %
50	55.67 %	9 %	96.5 %
100	49.92 %	6.25 %	96.17 %
150	45 %	5.06 %	95.72 %
200	---	---	94.83 %

Tabla I. Comparación de la eficiencia de los métodos de clasificación con extracción de características.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó un sistema de adquisición de imágenes con fuente de iluminación IR y una cámara multiespectral. Los resultados del algoritmo VeinCode muestran ser una buena técnica para la extracción de características de las imágenes procesadas, también es necesario precisar que con el aumento del número de personas dentro de la red neuronal, aumenta el costo computacional.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) para el número de beca 303672

## REFERENCIAS

1. Qiushi Zhao, Wei Bu, Xiangqian Wu, and David Zhang, "Design and implementation of a contactless multiple hand feature acquisition System," Proc. of SPIE 8371, (2012).
2. Oscar Fernando Motato Toro and Humberto Loaiza Correa, "Identificación biométrica utilizando imágenes infrarrojas de la red vascular de la cara dorsal de la mano," Revista Ingeniería e Investigación, vol. 29, pp. 90-100, (2009).
3. Aída Marcotti, Belén Hidalgo and Ladislao Mathé, "Método de detección no invasivo utilizando luz infrarroja," Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Tesis de Maestría, (2012).
4. Lingyu Wang, Graham Leedham and David Siu-Yeung Cho, "Minutiae feature analysis for infrared hand vein pattern biometrics," Pattern Recognition, vol. 41, pp. 920-929, (2008).
5. Yun-peng Hu, Zhi-yong Wang, Xiao-ping Yang and Yu-ming Xue, "Hand vein recognition based on the connection lines of reference point and feature point," Infrared Physics & Technology, vol. 62, pp. 110-114, (2014).
6. Ahmed M. Badawi, "Hand vein biometric verification Prototype: A testing performance and patterns similarity," International Journal of Biomedical Sciences, pp. 141-148, (2007).



# Estudio de las Propiedades de Esparcimiento de Partículas usadas en la Fabricación de Phantoms Imitadores del Melanoma Cutáneo

M. Cunill-Rodríguez<sup>1</sup>, J.A. Delgado-Atencio<sup>2</sup>, D. Villegas-Hernández<sup>3</sup>

**Resumen**— El desarrollo de phantoms que imiten las propiedades ópticas de la piel continua siendo de significativa importancia para probar nuevos algoritmos y métodos para la detección de melanoma cutáneo maligno. El objetivo de este trabajo fue realizar simulaciones teóricas usando la Teoría de Mie para predecir las propiedades ópticas de las partículas usadas en los phantoms como centros de esparcimiento del tejido humano.

**Palabras clave**— melanoma, phantoms, teoría de Mie.

## INTRODUCCIÓN

En el año 2001, el Registro Histopatológico de Neoplasias Malignas (RHNM) reportó 102,657 tumores malignos que corresponden a 101.6 casos por 100,000 habitantes. El cáncer de piel ocupó el segundo lugar (13.6%), solamente superado por el cáncer de cérvix (24.4%) [1]. Un estudio del cáncer de piel en Nuevo León, México realizado por Alfaro et al., [2] confirmó que el comportamiento epidemiológico de esta lesión es similar al del resto del país y del mundo, siendo el carcinoma baso celular el más frecuente con un 65%, seguido del carcinoma espino celular y el melanoma con un 23% y 6.5%, respectivamente, siendo el melanoma maligno el responsable del 80% de las muertes por cáncer cutáneo. Además de los pacientes diagnosticados con melanoma, solamente el 14% sobrevive más de 5 años [3].

Hasta la fecha el diagnóstico de melanoma es un reto para el médico especialista lo cual ha dado lugar al desarrollo de nuevas técnicas ópticas para su detección [4-6]. Varios autores han fabricado y caracterizado phantoms imitadores de este tipo de cáncer de piel con el fin de investigar el desempeño de algunas propuestas de nuevos métodos ópticos para su discriminación respecto a los lunares comunes [7]. La teoría de Mie [8] se utiliza comúnmente para predecir las propiedades ópticas de las partículas usadas para imitar a los centros de esparcimiento del tejido humano. En este trabajo se presenta el resultado de la simulación de la sección transversal de esparcimiento  $\sigma_s$ , el factor de anisotropía  $g$ , y la sección transversal de esparcimiento reducida  $\sigma'_s$ , para dos tipos de partículas: microesferas de polímeros y melanina, en el rango espectral de 300 a 1500 nm. La simulación fue realizada además para distintos tamaños de estas partículas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los algoritmos para realizar las simulaciones de las propiedades de esparcimiento de las partículas ( $\sigma_s$ ,  $g$ ,  $\sigma'_s$ ) usando la Teoría de Mie, fueron integrados en el ambiente de programación MATLAB®. Estas simulaciones se llevaron a cabo para dos tipos de partículas: microesferas de polímeros y melanina tomándose para la simulación datos de los trabajos de Pogue et. al [9] y Bashkatov et. al [10], respectivamente (ver Tabla I).

M. Cunill-Rodríguez<sup>1</sup> (✉), J.A. Delgado-Atencio<sup>2</sup> (✉), D. Villegas-Hernández<sup>3</sup> (✉)  
 1,2,3 Universidad Politécnica de Tulancingo  
 e-mail: <sup>1</sup> [margarita.cunill@upt.edu.mx](mailto:margarita.cunill@upt.edu.mx), <sup>2</sup> [jose.delgado@upt.edu.mx](mailto:jose.delgado@upt.edu.mx), <sup>3</sup> [david.villegas@upt.edu.mx](mailto:david.villegas@upt.edu.mx)



Los cálculos se realizaron en función de la longitud de onda  $\lambda$  en el intervalo de 300 a 1500 nm con un incremento de 10 nm y variando el diámetro de cada partícula como se indica: 50, 200, 400, 600, 800 y 1000 nm para las de microesferas; y de 30, 127, 160 y 400 nm para las partículas de melanina.

Tipo de partículas	Índice de refracción del medio	Índice de refracción de la partícula	Rango de variación del diámetro de las partículas (nm)
Microesferas de polímero	1.33	1.59	50 a 100000
Melanina	1.33 y 1.50	1.65	30 a 400

Tabla I: Parámetros ópticos usados en nuestras simulaciones [9-10], al emplear la Teoría de Mie para realizar los cálculos de las propiedades de esparcimiento:  $\sigma_s$ ,  $g$  y  $\sigma'_s$ .

## RESULTADOS

En la Fig. I, se presenta el resultado del cálculo de  $\sigma_s$ ,  $g$  y  $\sigma'_s$  como función de la longitud de onda  $\lambda$ , para las microesferas de polímero. El gráfico de la sección transversal de esparcimiento reducida es obtenido a partir de la expresión simple  $\sigma'_s = \sigma_s(1 - g)$  que relaciona a los parámetros ópticos previamente calculados.

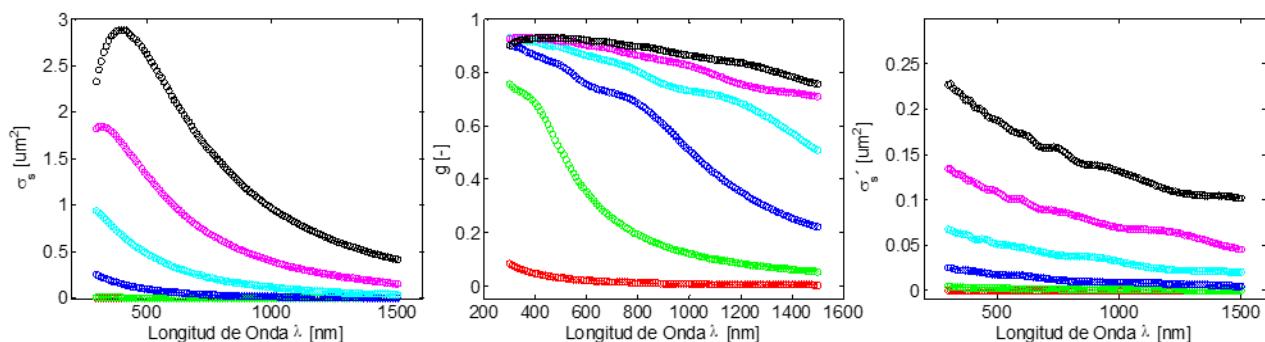


Figura I. Dependencia espectral de la sección transversal de esparcimiento  $\sigma_s$ , el factor de anisotropía  $g$ , y de la sección transversal de esparcimiento reducida  $\sigma'_s$ , para partículas de microesferas de polímero de diferentes diámetros (50, 200, 400, 600, 800 y 1000 nm) en un medio acuoso.

Los resultados relativos a los valores de  $\sigma_s$ ,  $g$  y  $\sigma'_s$  como función de la longitud de onda de la radiación electromagnética que interactúa con la partícula de melanina, se presentan en la Fig. 2 que corresponden a 4 diámetros diferentes reportados como tamaños fisiológicos de la melanina en la epidermis [10].



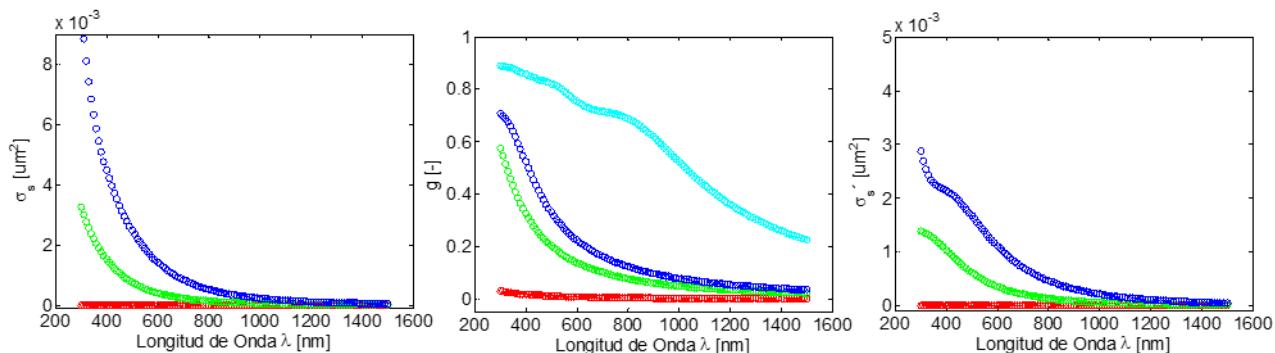


Figura 2. Dependencia espectral de la sección transversal de esparcimiento  $\sigma_s$ , el factor de anisotropía  $g$  y de la sección transversal de esparcimiento reducida  $\sigma'_s$ , para partículas de melanina de diferentes diámetros (30, 127, 160 y 400 nm) en un medio acuoso.

Los cálculos se repitieron para las partículas de melanina inmersas en un medio con un índice de refracción como el de la resina de poliuretano ( $n = 1.50$ ) que como sabemos constituye un medio sólido. Los resultados (no presentados) muestran que la forma espectral para  $\sigma_s$ ,  $g$  y  $\sigma'_s$ , para los 4 diámetros de las partículas es prácticamente la misma que para la partícula inmersa en agua, salvo que sus valores son menores en el caso de  $\sigma_s$  y  $\sigma'_s$ .

## CONCLUSIONES

En este trabajo hemos implementado un programa en el lenguaje de programación MATLAB ® que nos permite realizar el cálculo y el graficado de los parámetros ópticos de una partícula esférica inmersa en un medio de índice de refracción conocido mediante el uso de la teoría de Mie. El programa ha sido especificado para calcular y graficar espectralmente: 1) la sección transversal de esparcimiento, 2) el factor de anisotropía y 3) la sección transversal de esparcimiento reducida. Fue investigada la dependencia de los parámetros ópticos anteriores con el diámetro de la partícula esférica encontrando que existen variaciones significativas de éstos con el diámetro de la partícula. Una limitación del estudio realizado es que no se ha considerado la variación espectral del índice de refracción de la partícula y del medio en los cálculos realizados.

## REFERENCIAS

- [1] Epidemiología del Cáncer en México 2001. <http://rubengarcia.wordpress.com/2008/09/26/epidemiologia-del-cancer-en-mexico-2001/>. Accesado el 3 de abril de 2013.
- [2] Alfaro A, Castrejón L, Rodríguez-Ortiz M. "Cáncer de piel. Estudio epidemiológico a 10 años en derechohabientes del ISSSTE en Nuevo León". Dermatol. Rev. Mex. 54(6), 321:325, 2010.



- [3] Miller AJ, Mihm MC. "Mechanisms of disease. Melanoma". N. Engl J. Med., 355: 51-65, 2006.
- [4] Dan Gareau, Ricky Hennessy, Eric Wan, Giovanni Pellacani, Steven L. Jacques "Automated detection of malignant features in confocal microscopy on superficial spreading melanoma versus nevi". Journal of Biomedical Optics, 15(6), 061713-1: 061713-10, 2010.
- [5] R. Marchesini, N. Cascinelli, M. Brambilla, C. Clemente, L. Mascheroni, E. Pignoli, A. Testori, D. R. Venturoli: "In vivo spectrophotometric evaluation of neoplastic and non-neoplastic skin pigmented lesions. II: discriminant analysis between nevus and melanoma". Photochemistry and Photobiology Vol. 55, No. 4, pp. 515-522, 1992.
- [6] Ilze Diebele, Ilona Kuzmina, Alexey Lihachev, Janis Kapostinsh, Alexander Derjabo, Lauma Valeine, and Janis Spigulis, "Clinical evaluation of melanomas and common nevi by spectral imaging". Biomedical Optics Express 39(3), 467-472, 2012.
- [7] Timothy J. Muldoon, Sean A. Burgess, Brenda R. Chen, Désirée Ratner, and Elizabeth M. C. Hillman, "Analysis of skin lesions using laminar optical tomography". 3(7), BIOMEDICAL OPTICS EXPRESS, 1701:1712, 2012.
- [8] Lihong V. Wang and Hsin-I Wu. Biomedical Optics. Principles and Imaging. Wiley-Interscience 2007.
- [9] Brian W. Pogue and Michael S. Patterson. "Review of Tissue Simulating Phantoms for Optical Spectroscopy, Imaging and Dosimetry", Journal of Biomedical Optics 11, 1-16, 2006.
- [10] Alexey N. Bashkatov, Elina A. Genina, Vyacheslav I. Kochubey, Mikhail M. Stolnitz, Tatyana A. Bashkatova, Olga V. Novikova, Anna Yu. Peshkova, Valery V. Tuchin. "Optical properties of melanin in the skin and skin-like phantoms". Proceedings of SPIE Vol. 4162, 219:226, 2000.



# Algoritmo para la caracterización de imágenes digitales de lesiones cutáneas pigmentadas en Base a su Color y Rugosidad

L. Y. Mera-González<sup>1</sup>, J. A. Delgado-Atencio<sup>2</sup>, J. C. Valdiviezo-Navarro<sup>3</sup>

**Resumen**— El melanoma es la forma más mortal de cáncer de piel en humanos en todo el mundo con un incremento del número de víctimas al año. Una forma tradicional de diagnóstico de melanoma es mediante el uso de la denominada regla ABCDE la cual se define por Asimetría, Borde, Color, Diámetro y Evolución de la lesión. Para lesiones de melanoma, el color como un descriptor exhibe valores heterogéneos, que van desde marrón claro a marrón oscuro (a veces rojizo azul o incluso blanco). Por lo tanto, la investigación acerca de las características de color de imágenes digitales de melanoma podría proporcionar ideas para el desarrollo de algoritmos automatizados para la discriminación entre melanomas y lunares comunes. En este trabajo de investigación, es propuesto y probado un algoritmo para caracterizar el color en una lesión pigmentada de la piel. El algoritmo desarrollado mide el tono en cada uno de los sitios de la zona pigmentada de una imagen digital haciendo uso del espacio de color HSI. El algoritmo fue aplicado a 40 imágenes digitales de los melanomas inequívocos y 40 imágenes de lunares comunes, las cuales fueron tomadas de diferentes bases de datos. Los resultados preliminares indican que los cambios de color visibles de sitios de melanoma son bien representados por el algoritmo propuesto. Se discute el desempeño de la rugosidad como otro factor que permite discriminar un melanoma de un lunar.

**Palabras clave**— Melanoma, lunares comunes, algoritmo, tono, rugosidad.

## INTRODUCCIÓN

Las lesiones pigmentadas de la piel humana como melanomas y lunares comunes son originadas de células llamadas melanocitos, las cuales se encuentran en la interface epidermis-dermis de la piel humana y son las encargadas de la producción de un pigmento en la piel denominado melanina, responsable del color de la piel, de los ojos y del cabello.

El melanoma cutáneo es de los tres tipos de cáncer de piel el más mortífero y difícil de diagnosticar.<sup>2</sup> Este tipo de cáncer se ha incrementado a nivel mundial y México no es una excepción <sup>3,4</sup> por lo que existe una preocupación justificada hacia la detección temprana del mismo utilizando tanto los métodos tradicionales como las técnicas ópticas modernas.

El uso de imágenes de la piel llega a ser un método efectivo para el diagnóstico de melanoma y otras lesiones pigmentadas de la piel. Wang et al., <sup>5</sup> describen una técnica llamada TBP (de las siglas en inglés Total Body Photography) en la cual los pacientes con lesiones pigmentadas de la piel son fotografiados con el propósito de clasificar y documentar las lesiones para futuro seguimiento.

Una forma clínica tradicional para el diagnóstico de melanoma considera ciertas características de la lesión pigmentada que quedan resumidas en la regla ABCDE (Asimetría, Borde, Color, Diámetro y Evolución de la lesión). <sup>6</sup> A partir de la examinación de estas características se puede evaluar si una lesión pigmentada es melanoma o lunar, ya que para ambos, esta regla arroja resultados diferentes.

L. Y. Mera-González<sup>1</sup> (✉), J. A. Delgado-Atencio<sup>2</sup> (✉), J. C. Valdiviezo-Navarro<sup>3</sup> (✉)

<sup>1,2,3</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [laura.mera@upt.edu.mx](mailto:laura.mera@upt.edu.mx) , <sup>2</sup> [jose.delgado@upt.edu.mx](mailto:jose.delgado@upt.edu.mx) , <sup>3</sup> [carlos.valdiviezo@upt.edu.mx](mailto:carlos.valdiviezo@upt.edu.mx)



El color es un descriptor importante que exhibe una variación significativa en una lesión pigmentada de la piel, 6,7 por ejemplo, los colores presentes en melanoma cutáneo pueden estar comprendidos entre el blanco y el negro, pasando por otros colores tales como café claro, café oscuro, marrón, rojo, rosado, púrpura y azul grisáceo, mientras que para lunares el tono es homogéneo.<sup>8</sup>

Otro parámetro importante para la caracterización de melanoma y lunares comunes es la rugosidad, ya que como es mencionado por González *et al.*,<sup>9</sup> es de principal importancia en la descripción de la textura de un objeto, y en melanomas este descriptor suele tener un valor mayor en comparación con lunares.<sup>10</sup> Diversos grupos de investigación han desarrollado técnicas ópticas y algoritmos computacionales para la caracterización de melanoma a través de su color. Por ejemplo, Landau *et al.*<sup>11</sup> adquirieron 71 imágenes de lesiones con una cámara digital y más tarde estas fueron analizadas con un sistema el cual calculó la variación de tonos de cada imagen y la desviación estándar de sus tonos. Stanley *et al.*<sup>12</sup> usaron una técnica de análisis de histograma de color para evaluar la discriminación de lesiones de la piel en base al cálculo del color en diferentes regiones de la lesión en imágenes dermatoscópicas.

En este trabajo de investigación se presenta un algoritmo computacional automatizado capaz de calcular la variación de color en melanomas y lunares comunes a través imágenes digitales dermatológicas y dermatoscópicas de la componente H del espacio de color HSI. Además se incursiona en la implementación de una función que permita medir la rugosidad en cada una de las lesiones para discriminar el melanoma cutáneo de otras proliferaciones melanocíticas no malignas como los lunares comunes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### I. Adquisición de datos

- Con el fin de evaluar el desempeño de nuestro algoritmo fueron procesadas 40 imágenes digitales de melanoma y 40 imágenes digitales de lunares comunes. El conjunto de imágenes fueron seleccionadas de tres bases de datos públicas encontradas en Internet como se describe a continuación:
- Conjunto de datos A: contiene 17 imágenes dermatológicas de melanoma, obtenidas del Servicio de Información Dermatológica (Dermis). El sitio ofrece un atlas de imágenes hechas con diferentes diagnósticos, casos clínicos e información adicional acerca de la mayoría de las enfermedades de la piel. Este servicio tiene la cooperación del Departamento Clínico de Medicina Social (Universidad de Heidelberg) y el Departamento de Dermatología (Universidad de Earlangen).
  - Conjunto de datos B: consiste de 52 imágenes dermatológicas (35 lunares comunes y 17 melanomas), obtenidas del Atlas de Dermatología de la Escuela Médica in Vilanova, Spain.
  - Conjunto de datos C: contiene 11 imágenes dermatoscópicas (6 melanomas y 5 lunares comunes), adquiridas de un Atlas de dermatoscopía en Copenhagen NV, Dinamarca.



## 2. Procesamiento de datos

El conjunto de imágenes digitales dermatológicas y dermatoscópicas de lesiones pigmentadas de la piel fueron procesadas mediante un algoritmo automatizado desarrollado en Matlab® R2012b para encontrar la variación de color y la rugosidad en lunares comunes y melanomas.

### 2.1. Segmentación de la lesión

Este paso consiste en aislar la lesión de la piel. El proceso de segmentación fue realizado primeramente por la binarización de la imagen original mediante un umbral dado  $\tau$ . El valor  $\tau$  para este propósito es 0.4. Una vez que la imagen original fue binarizada, como se indica en la Figura 1(b), fue obtenida una imagen complemento, ver Figura 1(c). Finalmente, aplicamos la operación AND entre la imagen original y la imagen complemento con el fin de generar la imagen segmentada como se observa en la Figura 1(d).

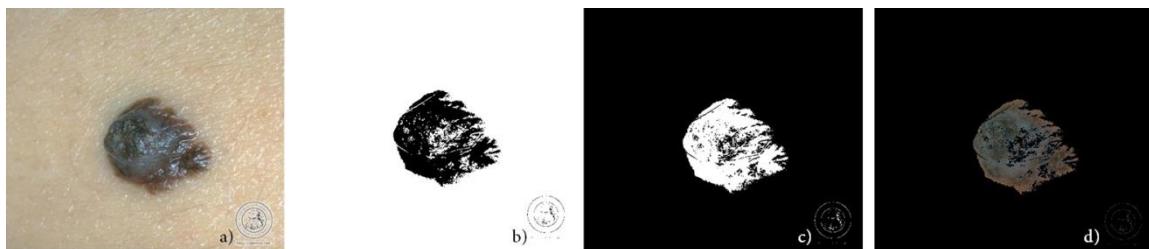


Figura 1. Segmentación del área pigmentada. a) Imagen original. b) Imagen binaria. c) Imagen complemento. d) Lesión segmentada.

### 2.2. Extracción de características

La extracción de características está basada en la regla ABCDE de dermatoscopía. Por tanto, la característica extraída de la imagen segmentada corresponde al tono.

La medición de tono en las imágenes digitales dermatológicas y dermatoscópicas de melanoma y lunares fue calculada a cada imagen segmentada, a través de la componente H (Hue) del espacio de color HSI como se expresa en (I).<sup>11</sup> Cabe mencionar que los valores de tono están dados de 0° a 360°.

$$H = \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{\frac{1}{2}(R-G)+(R-B)}{\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}} \quad (I)$$

### 2.3. Medición de la variación de tono

Dado que los tonos comprendidos de 0° a 10° y de 330° a 360° son muy parecidos espacialmente, los valores entre 330° y 360° fueron remplazados por 0° para evitar confusión en el desempeño del algoritmo. Así mismo, los tonos correspondientes al fondo de la imagen equivalentes a 90° fueron remplazados por NaN.



Con el fin de identificar cambios de tono en lunares comunes y melanomas, el rango de  $0^\circ$  a  $330^\circ$  fue dividido en 22 grupos de 15 grados cada uno, seguidamente, un color diferente fue asignado a cada grupo con el objetivo de observar la variación de tono en una nueva imagen RGB.

Finalmente, para conocer numéricamente la variación de tono de cada lesión pigmentada, fue calculada la diferencia entre el valor máximo y mínimo de tono de cada imagen, mediante la operación  $Var_{hue} = H_{max} - H_{min}$ .

#### 2.4. Obtención de la rugosidad

Uno de las propuestas más simples para la descripción de textura es el uso de momentos estadísticos del histograma de intensidades de una imagen o región. Sea  $z$  una variable aleatoria que denota intensidad y sea  $p_i(z)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ , el histograma correspondiente, donde  $L$  es el número de niveles de intensidad distintos en una imagen. Por lo tanto, el  $n^{th}$  momento de  $z$  sobre la media es

$$\mu_n(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^n p(z_i) \quad (2)$$

donde  $m$  es el valor medio de  $z$  (intensidad promedio):

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i) \quad (3)$$

El segundo momento, es decir, la varianza dada por  $\sigma^2(z) = \mu_2(z)$  es de particular importancia en la descripción de la textura. Esta es una medida de la diferencia de intensidad que puede usarse para establecer los descriptores de la suavidad relativa. Por ejemplo, el valor de la varianza es igual a 0 para áreas de constante intensidad y se aproxima a 1 para valores grandes de  $\sigma^2(z)$ . La varianza normalizada como es mostrada en (4) permite calcular la rugosidad de una imagen, teniendo como resultado valores numéricos entre 0 y 1.<sup>11</sup>

$$R(z) = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2(z)} \quad (4)$$

La ecuación anterior es aplicada a la componente H de la imagen segmentada.

### RESULTADOS

En la Figura 2 se presenta una comparación entre el proceso de segmentación y el agrupamiento de tono en imágenes digitales de melanoma y lunares comunes.



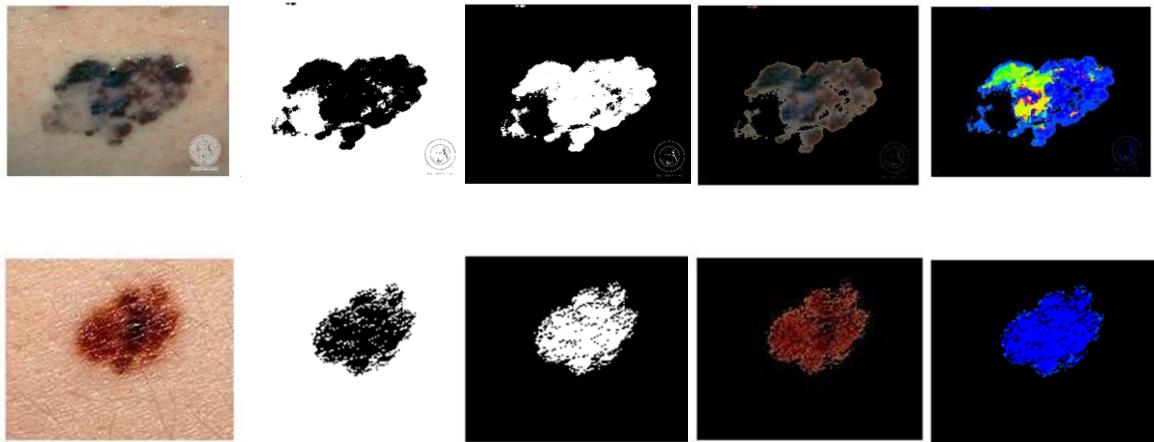


Figura 2. Fila superior: corresponde al proceso de segmentación y agrupación de colores en una imagen de melanoma. Fila inferior: presenta los resultados del proceso de segmentación y agrupamiento de colores en un lunar común.

En la Tabla I se resumen los valores máximos y mínimos de imágenes dermatológicas y dermatoscópicas representativas de melanomas y lunares comunes, así como la variación de tono en ellas. Los valores resaltados en la columna  $H_{min}$  y en la columna  $H_{max}$  corresponden a los valores mínimos y máximos de cada conjunto de imágenes.

Tabla I. Comparación de variación de tono de algunos melanomas y lunares comunes.

<i>Imagen</i>	$H_{min}$	$H_{max}$	$Var_{hue}$
Dermatológica de melanoma	<b>0.00013938°</b>	330°	329.9999°
Dermatológica de melanoma	0.00019275°	<b>330°</b>	329.9999°
Dermatológica de lunar	<b>0.0001285°</b>	23.2560°	23.2558°
Dermatológica de lunar	0.00047680°	<b>51.0517°</b>	51.0512°
Dermatoscópica de melanoma	<b>0.0001766°</b>	330°	329.9999°
Dermatoscópica de melanoma	0.0002157°	<b>330°</b>	329.9998°
Dermatoscópica de lunar	<b>0.00012242°</b>	7.8154°	7.8153°
Dermatoscópica de lunar	0.0001874°	<b>21.3939°</b>	21.3937°



La variación general de tono en imágenes digitales dermatológicas de melanoma fue de  $329.99^\circ$ , mientras que en imágenes digitales dermatológicas de lunares fue de  $51.05^\circ$ . En cuanto a imágenes dermatoscópicas de melanoma, la variación general de tono en ellas fue de  $329.99^\circ$  y en lunares comunes fue de  $21.39^\circ$ .

Por lo tanto, de acuerdo a los valores numéricos de variación de tono para imágenes dermatológicas y dermatoscópicas de lunares y melanomas, el rango de variación para los primeros es menor que para los melanomas.

Finalmente fue calculada la rugosidad de cada lesión pigmentada de la piel, generando los valores numéricos que se muestran a continuación:

Imágenes digitales de melanoma:  $0.9459 \leq R \leq 0.9999$

Imágenes digitales de lunares comunes:  $0.0603 \leq R \leq 0.8960$

## DISCUSIÓN

La presencia de vello en las imágenes es un factor influyente en la segmentación de las lesiones y para la obtención de la variación de tono, debido a que en ocasiones el tono en el vello podría tener un valor mayor que en zonas del área pigmentada. Este caso estuvo presente únicamente en el 2.5% de nuestras imágenes procesadas.

El 17.5% de nuestras imágenes de melanoma presentan color homogéneo, por lo tanto, cuando fueron procesadas con el algoritmo fue obtenido un rango de variación de tono menor a  $50^\circ$  en ellas.

Los valores generados por la función que calcula la rugosidad en las imágenes digitales de lesiones pigmentadas de la piel permite observar el límite numérico para ambas lesiones, es decir, la rugosidad en lunares comunes no excede el 0.8960 y la rugosidad en melanomas no es menor que 0.9459, aunque quizás sea necesario realizar un cálculo más preciso ya que la diferencia entre el valor mínimo de R en melanomas y el valor máximo de R en lunares comunes es de 0.0499.

## CONCLUSIONES

Un algoritmo automático para la medición del color en imágenes digitales dermatológicas y dermatoscópicas de melanomas y lunares comunes fue desarrollado e implementado. El resultado de aplicar dicho algoritmo refleja la variación evidente de tono en las imágenes procesadas. El rango general de variación de tono en las imágenes dermatológicas y dermatoscópicas de melanoma fue de  $0.0013938^\circ$  a  $330^\circ$ , mientras que para las imágenes dermatológicas y dermatoscópicas de lunares comunes fue de  $0.00012242^\circ$  a  $51.00517^\circ$ . La agrupación de colores en las lesiones pigmentadas de la piel permitió observar la gran variación de tono presente en melanoma y el tono homogéneo en lunares comunes.



Por último, se desarrolló una función que permitió discutir el desempeño de la rugosidad como un factor más para discriminar las lesiones pigmentadas de la piel obteniendo para imágenes digitales de melanoma una rugosidad comprendida entre 0.9459 y 0.9999, mientras que para imágenes digitales de lunares comunes los valores fueron menores, comprendidos entre 0.0603 y 0.8960.

## REFERENCIAS

- [1] Fukunaga, M., Martínez, G., Liu, Z-J., Kalabis, J., Mrass, P., Weninger, W., Firth, S. M., Planque, N., Perbal, B., and Herlyn M., "CCN3 controls 3D spatial localization of melanocytes in the human skin through DDR1," *JCB, Papers* 175(4), 563-569 (2006).
- [2] Green, A., Martin, N., McKenzie, G., Pfitzner, J., Quintarelli, F., Thomas, B. W., O'Rourke M., and Knight N., "Computer image analysis of pigmented skin lesions," *Melanoma Res., Papers* 1(4), 231-236 (1991).
- [3] Ruiz, A., Escoabar, G., de la Barrera, F., Herrera, A., Padilla, A., Suchil, and L., G., "Epidemiología del melanoma de piel en México," *Rev. Inst. Nac. Cancerol., Papers* 44(4), 168-174 (1998).
- [4] González, N. E. and Flores, A. Y., "El melanoma en México," *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas., Papers* 15(3), 161-164 (2010).
- [5] Wang, S. Q. and Hashemi, P., "Noninvasive Imaging Technologies in the Diagnosis of Melanoma," *Semin Cutan Med Surg., Papers* 29(3), 174-184 (2010).
- [6] Friedman, R. J. and Rigel, D. S., "The clinical features of malignant melanoma," *Dermatol Clin., Papers* 3(2), 271-283 (1985).
- [7] Nachbar, F., Stoltz, W., Merkle, T., Cognetta, A. B., Vogt, T., Landthaler, M., Bilek, P., Braun-Falco, O., and Plewig, G., "The ABCD rule of dermatoscopy: High prospective value in the diagnosis of doubtful melanocytic skin lesions original," *J Am Acad Dermatol., Papers* 30(4), 551-559 (1994).
- [8] Capdehourat, G., Corez, A., Bazzano, A., Alonso, R., and Musé, P., "Toward a combined tool to assist dermatologists in melanoma detection from dermoscopic images of pigmented skin lesions," *Pattern Recognition Letters, Papers* 32(16), 21872196 (2011).
- [9] González, R. C. and Woods, R. E., [Digital Image Processing], 3er edn. Pearson Prentice-Hall, (2002).
- [10] Gareau, D., Hennessy, R., Wan, E., Pellacani, G., & Jacques, S. L., "Automated detection of malignant features in confocal microscopy on superficial spreading melanoma versus nevi". *Journal of biomedical optics, Papers* 15(6), 061713-061713 (2010).
- [11] Landau M., Matz H., Tur E., Dvir M., and Brenner S., "Computerized system to enhance the clinical diagnosis of pigmented cutaneous malignancies," *Int J Dermatol., Papers* 38(6), 443-446 (1999).
- [12] Stanley, R. J., Stoecker, W. V., and Moss, R. H., "A relative color approach to color discrimination for malignant melanoma detection in dermoscopy images," *Skin Res Technol., Papers* 13(1), 62-72 (2007).



# Simulación de Haces con Longitud de Foco Extendida Mediante Zemax

A. Vázquez-Villa<sup>1</sup>, J. A. Delgado-Atencio<sup>2</sup>, S. Vázquez-y-Montiel<sup>3</sup>, J. Castro-Ramos<sup>4</sup>

**Resumen—** En los sistemas ópticos formadores de imágenes existe una relación inversa entre su resolución y la profundidad de foco. Existen diversas técnicas para modificar esta relación, una de ellas es el uso de haces de luz con una distribución de irradiancia tal que intrínsecamente se genere una profundidad de foco grande. En este estudio se consideran los haces generados por las lentes holográficas: fresnel, axilens y axicon. Mediante el software Zemax® se simulan estos haces y se analiza su comportamiento en planos ubicado en diferentes posiciones sobre el eje óptico. Hasta donde conocemos no se ha realizado un estudio comparativo de este tipo de haces para la aplicación de interés. Además, brindamos los detalles de cómo utilizar Zemax® para modelar un modulador espacial de luz que es el dispositivo que sirve para generar este tipo de haces.

**Palabras clave—** Resolución, Profundidad de foco, Modulador espacial, Zemax.

## INTRODUCCIÓN

En los sistemas formadores de imágenes ópticas como la microscopía óptica, la microscopía con focal y la tomografía óptica coherente, entre otros, para obtener una resolución mayor es necesario enfocar un haz luminoso, típicamente con un perfil Gaussiano, en una mancha que tenga el menor tamaño posible. Sin embargo, al realizar este proceso se provoca como consecuencia que el haz luminoso diverja más rápido. La distancia dentro de la cual el tamaño del spot luminoso no cambia significativamente es conocida como profundidad de foco (PDF), entonces los sistemas con aperturas numéricas grandes tienen profundidades de foco pequeñas como muestra la Figura I.

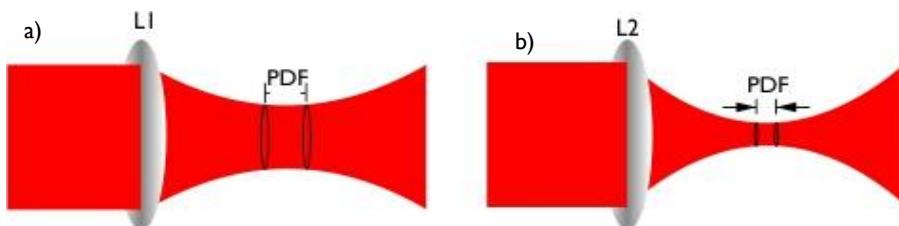


Figura I. a) Lente con apertura numérica pequeña b) lente con apertura numérica grande.

Una forma de reducir esta relación es utilizar haces diferentes a los haces gaussianos, este tipo de haces se pueden generar mediante el uso de un modulador espacial de luz (SLM por sus siglas en inglés) el cual es un dispositivo que puede cambiar la fase o amplitud de un haz incidente mediante una pantalla formada

A. Vázquez-Villa<sup>1</sup> (✉), J. A. Delgado-Atencio<sup>2</sup> (✉), S. Vázquez-y-Montiel<sup>3</sup> (✉), J. Castro-Ramos<sup>4</sup> (✉)

<sup>1, 2, 3</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo, <sup>4</sup> Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

e-mail: <sup>1</sup> [alexis.vazquez@upt.edu.mx](mailto:alexis.vazquez@upt.edu.mx), <sup>2</sup> [jose.delgado@upt.edu.mx](mailto:jose.delgado@upt.edu.mx), <sup>3</sup> [gatoangora2000@yahoo.com.mx](mailto:gatoangora2000@yahoo.com.mx), <sup>4</sup> [jcastro@inaoep.mx](mailto:jcastro@inaoep.mx)



con pixeles, esto permite generar cambios en la fase con el objetivo de generar diversos tipos de haces luminosos. Sin embargo, una desventaja de los SLM es que son costosos, por lo que si nosotros solo queremos analizar el comportamiento de una función de fase que hayamos generado en un sistema óptico, podemos simularlo mediante el uso de un software comercial como es el caso de Zemax® el cual permite realizar diversos tipos de análisis en la propagación del haz.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la versión R2013a de MATLAB para generar las funciones de fase de la misma manera como si se fueran a desplegar en un SLM, de solo fase, con una resolución de 1080x1080 pixeles y un tamaño de pixel de 8 micrómetros, las dimensiones físicas del SLM serían  $8.64 \times 8.64$  mm los valores de fase pueden variar de cero a  $2\pi$ . En este trabajo se generaron las funciones de fase de un axicon [1, 2] la cual genera un haz Bessel, una lente Fresnel [3, 4] y un axilens [5] que es el punto intermedio entre una lente Fresnel y un axicon. Para poder simular un modulador espacial en Zemax es necesario definir una superficie del tipo “Grid-Phase” que es una superficie plana pixelada y donde cada uno de los pixeles tendrá un valor de fase. Para poder introducir estos valores de la fase en la superficie se crea un archivo de texto .DAT consistente de la información del número de pixeles de la superficie los tamaños de pixel y una tabla con los valores de fase para cada pixel junto con sus derivadas. La superficie puede hacer un ajuste de interpolación entre los pixeles (seleccionamos la opción de interpolación lineal). La iluminación que se utilizó en la simulación es un haz gaussiano que tiene un diámetro de 4 mm y una longitud de onda de  $\lambda=632.8\text{nm}$  las lentes tienen una distancia focal  $f = 150$  mm,  $\Delta f = 20$  mm, el axicon se creó con una fase que genera un tamaño de spot central de 50  $\mu\text{m}$ , todas las funciones están desplazadas medio pixel tanto en el eje vertical como horizontal.

## RESULTADOS

En la Figura 2 se presenta una comparación entre el proceso de segmentación y el agrupamiento de tono en imágenes digitales de melanoma y lunares comunes.

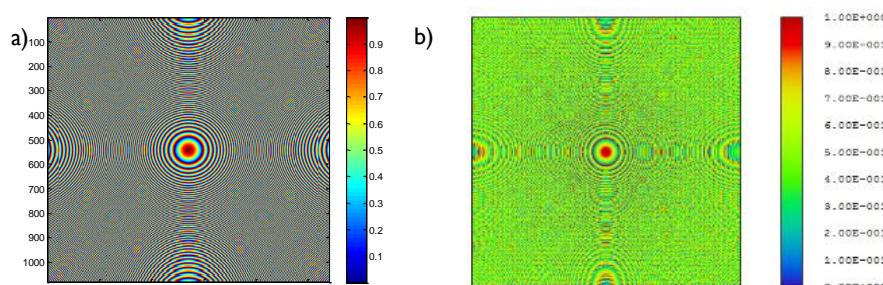


Figura 2. Funciones de fase de una axilens. a) Generado en Matlab, b) generado en Zemax. Unidades son períodos de  $2\pi$ .



En la figura 3 se muestra la PSF calculada con Zemax® para los tres tipos de lentes que se utilizaron en este estudio. La fila superior de imágenes fueron calculadas a una distancia  $d = 150$  mm y la fila inferior de imágenes a la distancia  $d = 155$  mm.

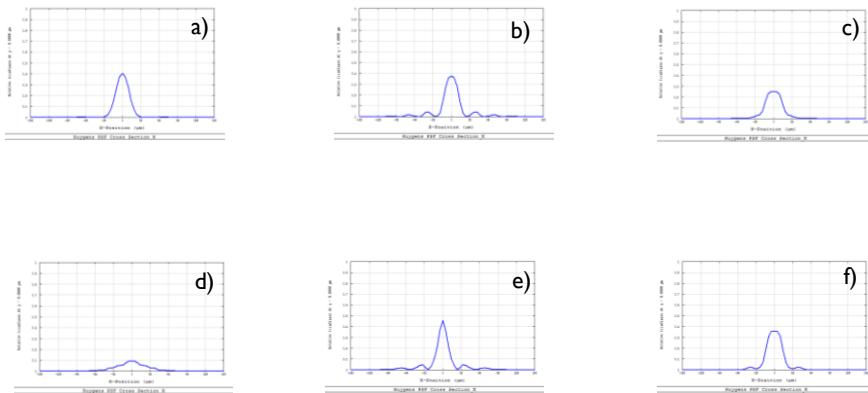


Figura 3. Función de punto extendido (PSF) para diferentes tipos de lentes: a) y d) lente Fresnel, b) y e) axicon, c) y f) axilens. Las imágenes de la fila superior se obtuvieron a la distancia focal  $d = 150$  mm, las imágenes de la fila inferior a una distancia  $d = 155$  mm

## CONCLUSIONES

Como se puede observar es posible utilizar ZEMAX para simular a un modulador espacial conforme a los resultados obtenidos que muestran que los haces generados están en correspondencia con los resultados reportados experimentalmente en la literatura. De nuestro estudio se puede observar como el perfil de los haces generados por el axicon y el axilens se mantienen constantes a lo largo de una distancia axial de 5 mm, lo cual implica un aumento considerable en la profundidad de foco del sistema óptico.

Una aplicación práctica de alto impacto de esta investigación pudiera ser en el desarrollo de modalidades novedosas de sistema formadores de imágenes a nivel microscópico en sistemas de tomografía óptica coherente para ambiente clínico e industrial.

## REFERENCIAS

- [1] J. A. Davis, J. Guertin y D. M. Cottrell, «Diffraction-free beams generated with programmable spatial light modulators,» *Applied Optics*, vol. 32, nº 31, pp. 6368-6370, 1993.
- [2] J. A. Davis, E. Carcole y D. M. Cottrell, «Intensity and phase measurements of nondiffracting beams generated with a magneto-optic spatial light modulator,» *Applied Optics*, vol. 35, nº 4, pp. 593-598, 1996.



- [3] E. Carcolé, J. Campos y S. Bosch, «Diffraction theory of Fresnel lenses encoded in low-resolution devices,» *Applied optics*, vol. 33, n° 2, pp. 162-174, 1994.
- [4] D. M. Cottrell, J. A. Davis, T. R. Hedman y R. A. Lilly, «Multiple imaging phase-encoded optical elements written as programmable spatial light modulators,» *Applied optics*, vol. 29, n° 17, pp. 2505-2509, 1990.
- [5] N. Davidson, A. A. Friesem y E. Hasman, «Holographic axilens: high resolution and long focal depth,» *Optics Letters*, vol. 16, n° 7, pp. 523-525, 1991.



# Fusión de imágenes multifoco usando unidades de procesamiento gráfico

J. Hernández-Tapia<sup>1</sup>, J. C. Valdiviezo-Navarro<sup>2</sup>

**Resumen—** En diversas aplicaciones que van desde la biología hasta la electrónica es necesario observar objetos que por su reducida dimensión se denominan microscópicos. Para su visualización y captura se emplea un sistema óptico como el microscopio, sin embargo al incrementar la amplificación del mismo se ve disminuida la profundidad de campo, lo que se traduce en múltiples planos de enfoque del mismo objeto. Para permitir observar todo el volumen del objeto enfocado se emplea la fusión de imágenes digitales. Este trabajo presenta un algoritmo de fusión de imágenes que proporciona un contraste aceptable para las imágenes resultantes y además es eficiente en tiempos de cómputo gracias a la implementación en paralelo de dicho algoritmo en un Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU).

**Palabras clave—** microscopia, fusión de imágenes, alta resolución, GPU.

## INTRODUCCIÓN

La fusión de imágenes es el proceso de combinar la información complementaria de múltiples imágenes de la misma escena, tomadas en diferentes planos, en una sola imagen, de tal forma que la imagen resultante tendrá una información más detallada de la escena que la información que proporciona cada imagen de forma independiente. En microscopía, al incrementar el aumento, la cantidad de planos o zonas de la imagen que se encuentran desenfocados aumenta de forma considerable. Por lo que, la información de interés se encuentra dispersa en varias imágenes. La fusión de imágenes tiene como objetivo combinar las zonas de interés de una muestra para un microscopista, sin alterar la información original presente en los diferentes planos de enfoque. Existen varias técnicas basadas en subdividir las imágenes por bloques de tamaño  $M \times N$  como la propuesta por Li. et al [1]. Dicha métrica mide el nivel de contraste de los bloques de las imágenes empleando como criterio la Frecuencia Espacial, para medir el nivel de contraste de cada bloque y determinar cuál es el mejor. Además existen otras métricas como las basadas en Wavelets [2], sin embargo, el principal problema de ambas técnicas reside en los elevados tiempos de cómputo requeridos para determinar el tamaño de bloque óptimo para realizar la fusión. El desarrollo de las GPU ha hecho posible la implementación de algoritmos en paralelo con el objetivo de minimizar la carga de cómputo de la Unidad central de procesamiento. Este trabajo presenta la implementación en paralelo de un algoritmo de fusión de imágenes digitales empleando una GPU.

## ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

La implementación en paralelo del algoritmo de fusión se probó mediante imágenes provenientes de dos muestras: (1) una muestra de metal desvastado mediante ácido y (2) una zona de una llave de aluminio.



J. Hernández-Tapia<sup>1</sup> (✉), J. C. Valdiviezo-Navarro<sup>2</sup> (✉)  
<sup>1,2</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo  
e-mail: <sup>1</sup> [jorge.hernandez@upt.edu.mx](mailto:jorge.hernandez@upt.edu.mx) , <sup>2</sup> [carlos.valdiviezo@upt.edu.mx](mailto:carlos.valdiviezo@upt.edu.mx)

Las imágenes se obtuvieron con un microscopio motorizado Carl Zeiss con un objetivo de 10x y una Apertura Numérica (NA) de 0.3. La resolución resultante de las imágenes es de 2548 x 1936 pixeles. Para la muestra de metal desvastado se tomaron 23 planos imagen a diferentes posiciones de enfoque a lo largo del eje Z, mientras que para la llave de aluminio se tomaron 19 planos imagen. La figura 1 muestra las imágenes correspondientes a los planos 5 y 15 de la muestra de metal desvastado. Mientras que la figura 2 los planos 3 y 6 de la llave de aluminio.

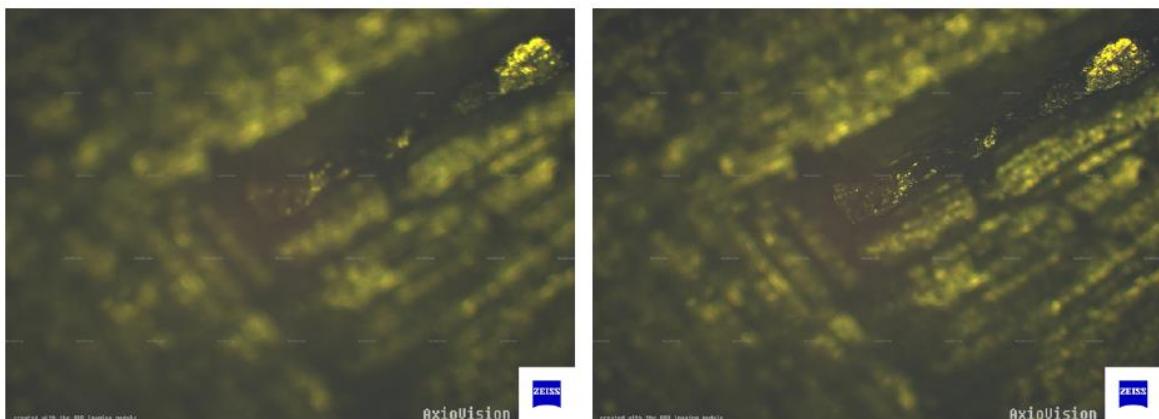


Figura 1: Imágenes correspondientes al metal desvastado en el plano 5 y 15 respectivamente.

Los algoritmos se implementaron bajo Matlab R2013a (The Mathworks, MA). El software se ejecutó en una computadora con procesador Intel Xeon E3-1230 V2 3.30 GHz con 16 GB de memoria RAM y con sistema operativo Windows 8, y para la implementación de los algoritmos se empleó una tarjeta gráfica NVIDIA Quadro K4000 con 768 núcleos de CUDA y 3GB de memoria DDR5.

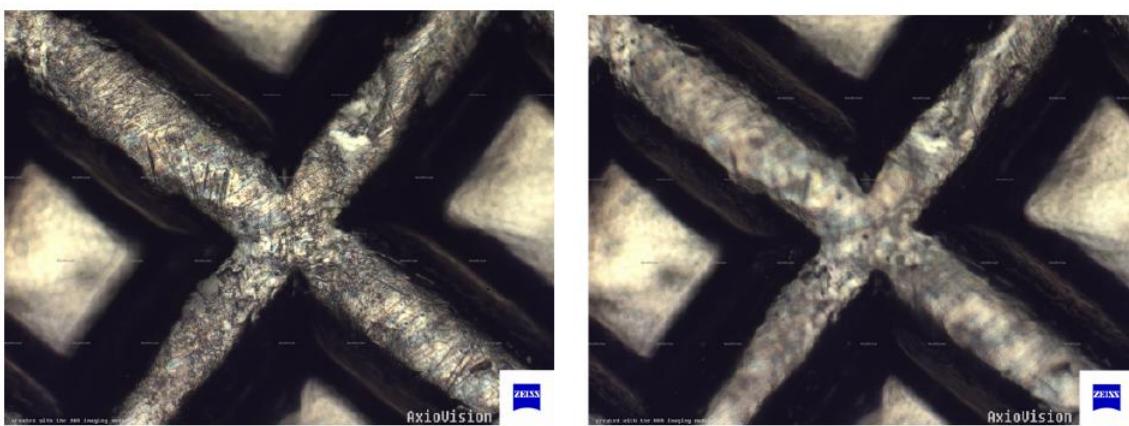


Figura 2: Imágenes correspondientes a una zona de la llave de aluminio en el plano 3 y 6 respectivamente.



## ALGORITMOS DE AUTOENFOQUE

Para poder presentar la descripción matemática de los algoritmos empleados definimos a  $g(i, j)$  como la intensidad de la imagen en la coordenada  $i, j$ , para  $i=1\dots, M$  y  $j=1\dots, N$  respectivamente; el símbolo  $\otimes$  denota el operador usual de la convolución. Algunas de las métricas empleadas se describen a continuación. Las métricas para implementar el algoritmo se describen a continuación:

- **Distancia Euclídea (DE):** La distancia euclídea o euclídea es la distancia ordinaria entre dos puntos en un espacio euclídeo la cual se obtiene a partir del teorema de Pitágoras. Acorde con [3], es posible cuantificar la diferencia entre dos pixeles de color calculando la distancia geométrica euclídea entre ellos.

$$D(P1, P2) = \sqrt{(P1_r - P2_r)^2 + (P1_g - P2_g)^2 + (P1_b - P2_b)^2}$$

donde los subíndices r,g y b corresponden a los componentes del modelo de color RGB.

- **Máscaras de Kirsch (K):** Las máscaras de Kirsch corresponden a un detector de bordes que proporciona información de las altas frecuencias en las direcciones cardinales. Se basa en una convolución de la imagen original con una máscara de tamaño  $3\times 3$ .

$$N = \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} \quad NO = \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad O = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad SO = \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad SE = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} \quad NE = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

Figura 3: Máscaras de Kirsch, Norte (N), Noroeste (NO), Oeste (O), Suroeste (SO), Sur (S), Sureste (SE), Este (E), Noreste (NE).

## CÓMPUTO EN PARALELO EMPLEANDO GPU

El método principal para mejorar el desempeño y la velocidad de una computadora se basa en incrementar la velocidad de reloj y el número de núcleos en el procesador principal. El uso del CPU como unidad principal, ha disminuido con el nacimiento de las GPU. Con la Aparición de CUDA (Compute Unified Device Arquitecture), el uso de las GPU ha incrementado en aplicaciones científicas.



Un programa de CUDA se compone por un programa corriendo de forma secuencial en la CPU, y de un código en paralelo corriendo sobre la GPU conocido como kernel. El código en CPU mencionado previamente es el encargado de transferir los datos que serán procesados por la GPU. Posteriormente se invoca al kernel; qué procesará la información y finalmente el resultado es copiado de regreso a la memoria de la CPU para su almacenamiento o muestreo.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

El algoritmo de fusión se basa en una fusión denominada como pixel a pixel, las imágenes a fusionar son filtradas inicialmente por las máscaras de Kirsch para realizar posteriormente la transformación a DE. El algoritmo se describe a continuación: 1) Obtener la imagen filtrada de los planos a fusionar empleando las máscaras de Kirsch mencionadas con anterioridad. 2) De las imágenes obtenidas calcular las matrices de distancias euclidianas. 3) Aplicar un criterio de selección: el criterio de selección se basa en elegir el pixel con el mayor valor en niveles de gris de las matrices de distancia eucladiana obtenidas en el paso anterior. 4) La posición (i,j) del mayor de los pixeles, elegido en el paso 3, será empleada para extraer el pixel RGB de la imagen original. Este pixel formará la imagen fusionada.

El algoritmo de fusión fue calculado para cada conjunto de imágenes y se midieron los tiempos de cómputo necesarios para completar el algoritmo de fusión tanto en CPU como en GPU. La figura muestra la imagen fusionada resultante para el caso de metal desvastado compuesto por 23 planos de enfoque. Por otra parte la Tabla I muestra los tiempos de cómputo tanto para CPU como para GPU.

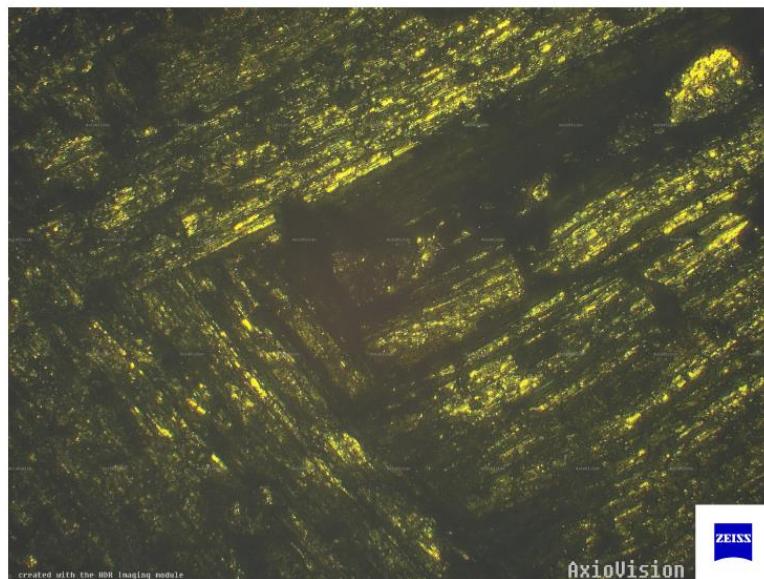


Figura 4: Imagen fusionada empleando la técnica propuesta, tiempos de cómputo para CPU y GPU.



Muestra	Tiempos CPU (s)	Tiempo GPU (s)
Metal	18068.90	16.24
Llave	15491.79	9.08

Tabla 1: Tiempos para la muestra de metal desvastado en CPU y GPU usando la métrica propuesta.

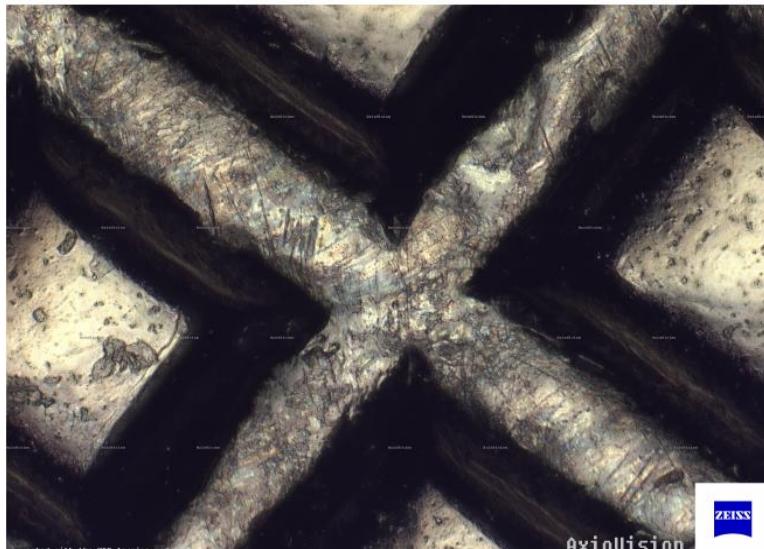


Figura 5: Imagen fusionada de la llave de aluminio empleando la técnica propuesta, tiempos de cómputo para CPU y GPU.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se discutió la implementación en paralelo de un algoritmo de fusión de imágenes multifoco. Los resultados de las pruebas aquí presentados demuestran de forma contundente que la técnica es eficiente en términos de calidad de contraste, de igual forma se demuestra que las unidades de procesamiento gráfico pueden ser empleadas para aplicaciones de tiempo real al disminuir los tiempos de cómputo en tres órdenes de magnitud siendo la GPU en concreto hasta 1000x más rápida.

## REFERENCIAS

- [1] S. Li, J.T Kwok, Y. Wang, "Combination of images with diverse focuses using the spatial Frequency", Information Fusion, Vol. 2, No. 3, pp. 169-176, (2001).
- [2] A. Padilla-Vivanco, I. Téllez-Arriaga, C. Toxqui-Quitl, C. Santiago-Tepantlán, "Multifocus microscope color image fusion based on Daub(2) and Dau (4) kernels of the Daubechies wavelet family", Proc. SPIE: Applications of Digital Image Processing XXXII, Vol. 7443, pp. (2009).
- [3] R. Hurtado-Pérez, "Análisis Comparativo de algoritmos de enfocamiento en imágenes a color para microscopía óptica". Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Tulancingo, (2013).



# Clasificación de botellas basado en visión por computadora

J.A. Cárdenas-Franco<sup>1</sup>, C. Toxqui-Quitl<sup>2</sup>, U.E. Escobar-Franco<sup>3</sup>

**Resumen**— Se presenta un sistema de visión por computadora para la inspección de botellas PET en busca de defectos de fabricación, usando técnicas de procesamiento digital de imágenes. Se implementaron tres módulos en LABVIEW para el control de calidad de la boca, pared y base de las botellas. El algoritmo propuesto genera mapas de defectos que serán usados para la clasificación de las botellas.

**Palabras clave**— Control de calidad, visión por computadora, análisis de Fourier.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de visión por computadora han tenido éxito en diversas aplicaciones, como la producción de circuitos<sup>1</sup>, la clasificación en la industria de textil<sup>2</sup> y minera, entre otras<sup>3</sup>. Estos sistemas aportan una serie de ventajas para el control de calidad de la producción, como la seguridad, fiabilidad, la repetitividad y la precisión. El control de calidad es una parte esencial de cualquier sistema de producción de botellas<sup>4</sup>. Durante la producción de botellas, hay muchos tipos de defectos. Las botellas son inspeccionadas por defectos de fabricación, grietas o deformación en la boca de la botella o pared y las partículas de suciedad en el fondo de la botella<sup>5</sup>. Debido a la inspección de botellas por inspectores humanos la baja velocidad y eficiencia son factores que afectan la producción. La inspección de botellas es una de las aplicaciones típicas de la visión artificial y procesamiento de imagen digital en la industria<sup>6</sup>. Varias configuraciones de los sistemas ópticos se utilizan para capturar la imagen de las botellas en movimiento<sup>7</sup>. Algunos de ellos incluyen sólo tres cámaras<sup>8</sup> y otros doce<sup>9</sup>.

## INSPECCIÓN DE BOTELLAS

### SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Las imágenes digitales de una botella se adquieren para la detección de defectos en el acabado de la botella, pared de la botella y el fondo de la botella. La forma de un defecto se elige entre una base de defectos indicados en la Tabla I.

Boca de la botella	Pared de la botella	Fondo de la botella
Grietas	Grietas	Objetos extraños
Deformaciones	Manchas	Objetos pegajosos

Tabla I Tipo de defectos.

J.A. Cárdenas-Franco<sup>1</sup> (✉), C. Toxqui-Quitl<sup>2</sup> (✉), U.E. Escobar-Franco<sup>3</sup> (✉)

<sup>1, 2, 3</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: [juan.cardenas@upt.edu.mx](mailto:juan.cardenas@upt.edu.mx) , [2 carina.toxqui@upt.edu.mx](mailto:carina.toxqui@upt.edu.mx) , [3 uriel.escobar@upt.edu.mx](mailto:uriel.escobar@upt.edu.mx)



La inspección se divide en tres módulos, cada uno está equipado con cámaras CCD, lentes de zoom y sistemas de iluminación basados en LED. El sistema de adquisición utiliza una cámara CCD de exploración, que es capaz de obtener un conjunto de 16 imágenes por segundo. Con una resolución de  $1432 \times 1050$  en escala de gris. La distancia focal del objetivo zoom es 37 a 75 mm y el LED de color verde tiene un campo de visión de 7,6 a 22,8 cm y también se utiliza una fuente de luz LED blanca.

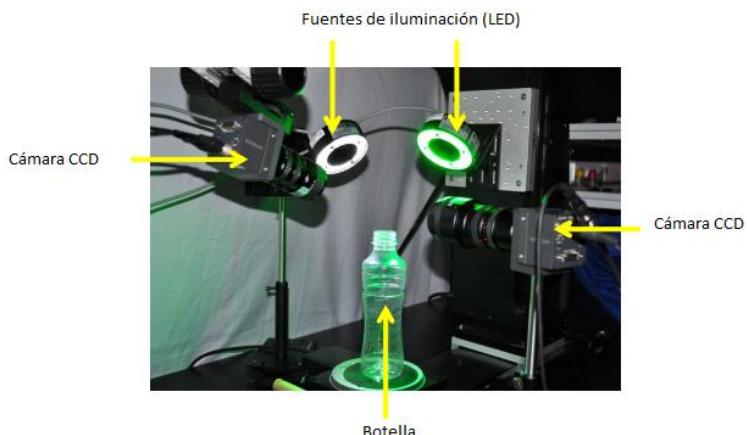


Figura 1. Montaje experimental para la inspección acabado de la botella sin rotación.

## MÉTODOS EN LA DETECCIÓN DE FALLAS

Una vez que la posición de la botella en la cámara se conoce, y las cinco imágenes digitales adquiridas, el paso siguiente es el análisis y procesamiento de imágenes digitales para la detección de cualquier defecto. Los algoritmos propuestos para la inspección de botellas se basan en el análisis de frecuencia.

### TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

La transformada discreta de Fourier de una función de imagen  $f(x, y)$  de tamaño  $M \times N$  está dada por la ecuación<sup>1</sup>.

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp^{i2\pi[\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}]}$$

Estas ecuaciones comprenden la transformada de Fourier par. Es una práctica común multiplicar la función de imagen de entrada por  $(-1)^{x+y}$  antes de calcular la transformada de Fourier.



## RESULTADOS

Los resultados de la inspección serán transferidos a un eyector que rechazan las malas botellas. La Tabla 2 muestra los resultados de laboratorio de clasificación de la botella en dos clases, con defecto y sin defecto.

	Número de botellas inspeccionadas	Correcta clasificación (CRC)
Boca	463	85.5 %
Pared	899	80.64 %
Fondo	796	95.0 %

Tabla 2. Resultado de laboratorio.

Aunque el algoritmo detecta con éxito defectos verticales en el acabado de la botella, la inspección tenía una detección de pérdida durante el proceso de binarización porque la selección de umbral. En el caso de la pared de la botella, la detección de pérdida es debido a la confusión de la textura de la pared de la botella y el defecto. También la binarización es el problema en la detección de defectos en la parte inferior de la botella.

## CONCLUSIONES

Se presentó un sistema de visión artificial para la detección de fallos en las botellas de PET. El inspector de botella se dividió en tres módulos para la adquisición de la imagen de la boca de la botella, pared de la botella y el fondo de la botella. Las imágenes capturadas eran la tramitación previa mediante una corrección gamma y convolución con un filtro Laplaciano. Esto hace que los bordes de la imagen sean más nítida. Se propuso un algoritmo de detección de defectos basado en el filtrado de frecuencia de n imágenes. Se diseñó la función La función de transferencia del filtro para la detección de grietas verticales en el acabado de la botella. La CRC fue de 85,5%. En el caso de la pared de la botella fue de 80,64%. La detección de pérdida es debido a la confusión de la textura de la pared de la botella y el defecto. Y el más alto CRC fue del 95,0% en el fondo de la botella.

## REFERENCIAS

1. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. Digital Image Processing, Prentice Hall, 2da Edición, (2002).
2. A. Islam, S. Akhter, and T. Mursalin, “Automated textile defect recognition system using computer vision and artificial neural networks”, World Academy of Science, Engineering and Technology 13, (2006).
3. S. Chatterjee, A. Bhattacherjee, “Genetic algorithms for feature selection of image analysis-based quality monitoring model: An application to an iron mine,” Engineering applications of artificial intelligence vol. 24, pp 786-795, (2011).



4. H. Liu, Y. Wang and F. Duan "Glass bottle inspector based on machine vision," World academic of science engineering and Technology vol 44, pp. 843-848 (2008).
5. F. Shafait, S. Muhammad, and S. Klette. "Fault detection and localization in empty water bottles through machine vision," Technical report. IRIS inspection machines.
6. F. Duan, Y. Wang, H. Liu and Y. Li "A machine vision inspector for beer bottle," Engineering Application sof Artificial Intelligence vol 20, pp. 1013-1021 (2007).
7. J. Luc "Latest vision technology offer new horizons for hollow ware inspection," Technical report. IRIS inspection machines.
8. Juan Cárdenas. Sistemas de Visión por Computadora para el control de calidad, Universidad Politécnica de Tulancingo, Tesis de Maestría, (2012).
- 9 M. Canivet, R. Zhang, and M. Jourlin. "Finish inspection by vision for glass production," Proceedings of SPIE, 2183, pp. 164-169, (1994)



## Análisis de la marcha humana

V. Morales-Batalla<sup>1</sup>, C. Toxqui-Quitl<sup>2</sup>

**Resumen**— Un patrón de marcha humana puede ser caracterizado con diferentes tipos de parámetros, algunos básicos y otros de mayor complejidad. Actualmente, el estudio de la marcha humana es una herramienta diagnóstica importante en la evaluación de patologías neuro-músculo-esqueléticas ya sea transitoria o permanentes, locales o generales. Dentro de las técnicas para la extracción de la marcha se encuentran las basadas en sensores y las basadas en imágenes, que es con la que se trabaja en esta investigación.

**Palabras clave**— Marcha humana, reconocimiento de patrones, momentos.

### INTRODUCCIÓN

Existen dos tipos de biometrías; la biometría estática en la cual se encuentra el reconocimiento mediante huellas dactilares, retinas, iris, forma de la cara y la geometría de la palma de la mano y la biometría dinámica, en esta se tiene el patrón de voz, firma manuscrita, dinámica del teclado, análisis de gestos y la marcha humana, que es en la que está enfocado dicho proyecto.

En el último siglo las técnicas de análisis de la marcha han experimentado su mayor desarrollo. Principalmente desde la introducción de programas informáticos que proporcionan datos numéricos y gráficos que a su vez permiten un estudio objetivo de la marcha normal y patológica, incluyendo los factores que pueden modificarla. La locomoción humana está descrita por Vera Luna del Instituto de Biomecánica de Valencia como una serie de movimientos alternantes rítmicos de las extremidades y del tronco que determinan un desplazamiento hacia delante del centro de gravedad.

### MOMENTOS

#### MOMENTOS GEOMÉTRICOS

Los momentos geométricos están definidos como.

$$m_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} x^p y^q I(x, y) \quad (1)$$

donde p y q son los órdenes ( $p+q$ ), y  $M \times N$  es el tamaño de la imagen.

V. Morales-Batalla<sup>1</sup> (✉), C. Toxqui-Quitl

<sup>1,2</sup>Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [victoria.morales@upt.edu.mx](mailto:victoria.morales@upt.edu.mx)



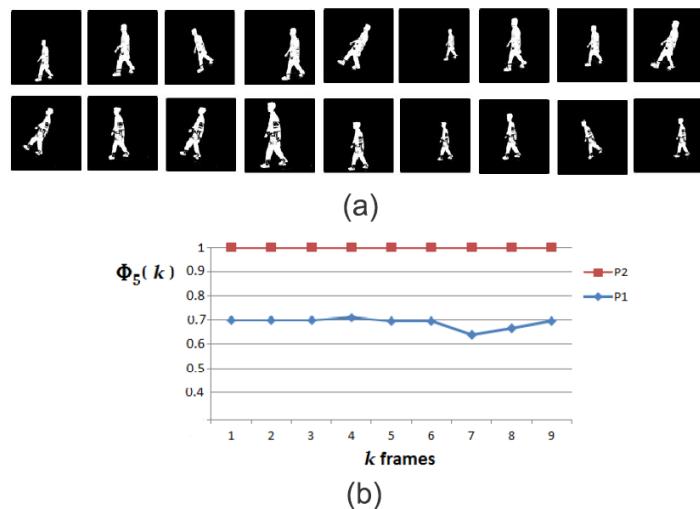


Figura 1. (a) K Imágenes de dos sujetos en diferente escala, la orientación y la posición. (b) Descriptores invariantes basados en  $\varphi_5(k)$  momentos de Hu.

## SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Se implementó un sistema óptico-digital compuesto de 3 cámaras y un sistema de iluminación controlado, el cual permite monitorear la forma de caminar de un individuo. La base de datos que se generó consta de 27 individuos con 3 secuencias por persona.



Fig. Interfaz desarrollada por Victoria M. Morales Batalla



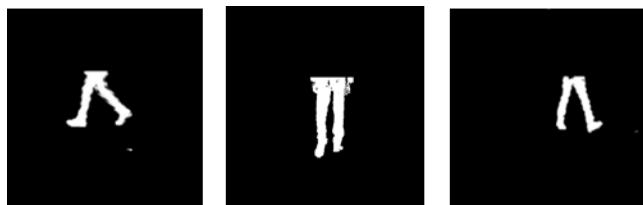


Fig. Imágenes de la Base de Datos UPT

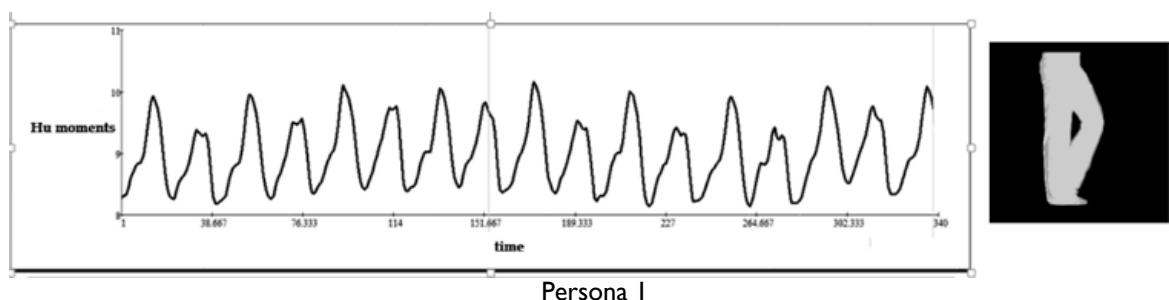
Con el objetivo de comparar la eficiencia del algoritmo, éste se probó en una base de datos pública llamada MoBo de la Universidad de Pensilvania.

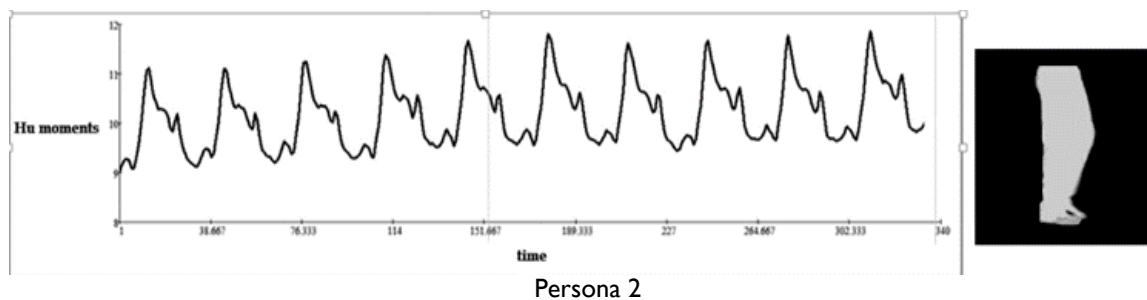


Fig. Imágenes de la Base de Datos MoBo

## IDENTIFICACIÓN DE PERSONAS

Las imágenes de las bases de datos UPT y MoBo son procesadas con las funciones mencionadas, para obtener el ciclo de la marcha o firma biométrica, que serviría para la identificación de personas.





La cámara número 3 proporcionó los mejores resultados para los casos de caminar inclinado y caminar con una pelota en las manos.

Cámara	Caminar despacio	Caminar rápido	Caminar con pelota	Caminar inclinado
1	95.5%	91.1%	97.7%	91.1%
2	86.6%	93.3%	97.7%	91.1%
3	97.7%	91.1%	100%	100%

Al igual que la base de datos MoBo, nuevamente la cámara 3 de la base UPT presenta los mejores resultados de clasificación.

Personas	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3
20	69%	79%	86%
27	51%	60%	65%

## APLICACIÓN MÉDICA

Numerosos trabajos sugieren que cambios básicos en la forma de caminar de una persona pueden ser un indicador temprano para el diagnóstico de patologías de la marcha, como el Parkinson, la esclerosis múltiple y la hidrocefalia de presión normal. Además el análisis de la marcha humana amplia el conocimiento teórico para permitir desarrollar mejores elementos como prótesis y órtesis.

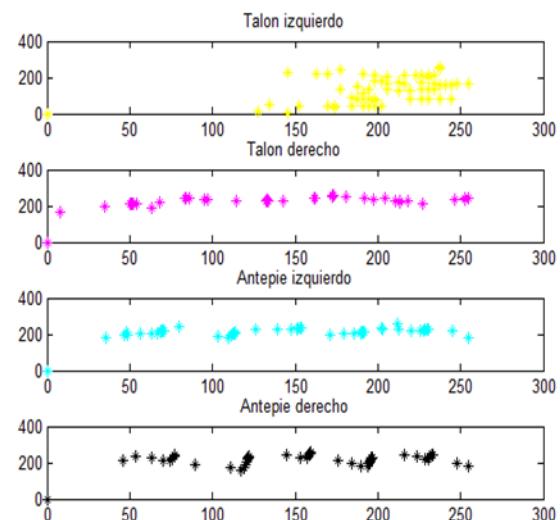
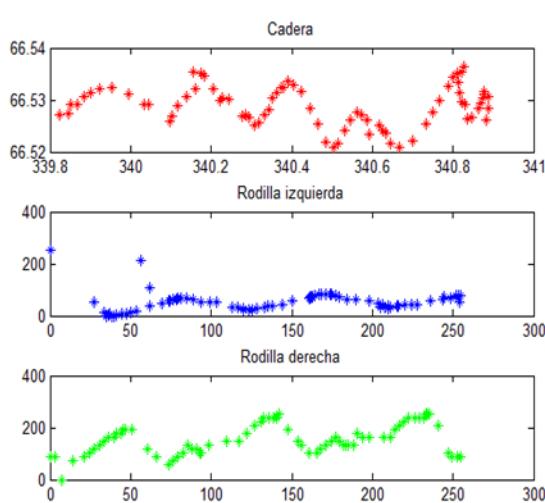
Las gráficas de un reporte de la marcha incluyen una zona sombreada, que acotan los desplazamientos de un ciclo de marcha normal, las mediciones en determinado paciente para considerarlo con una cinemática normal deben caer dentro de estas regiones.





Imágenes procesadas para el análisis clínico

Se tienen gráficas en donde un especialista ya podría dar algún diagnóstico de patologías. También se pueden hacer cálculos como velocidad, frecuencia y longitud de zancada. Incluso sirven para realizar reportes de la marcha de un paciente.



## CONCLUSIONES

Momentos geométricos se calcularon a partir serie de imágenes digitales. Se muestra claramente la periodicidad de la marcha en la historia de momentos. Se utilizó la base de datos MoBo para probar los resultados de clasificación utilizando una RNA (WEKA). Se desarrolló una base de datos propia y se logró una clasificación de un 86%. Los mejores resultados de la clasificación en ambas bases de datos se obtienen al utilizar la cámara 3. Se generó un algoritmo para el análisis clínico de la marcha.

## REFERENCIAS

- [1] "Handbook of Biometrics", Anil K. Jain, Patrick Flynn, Arun A. Ross, Editorial Springer, July 2007.
- [2] "Statistical Analysis of Gait Rhythm in Patients with Parkinson's Disease", Yunfeng Wu, Sridhar Krishnan, IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, VOL. 18, April 2010.
- [3] "Human identification based of gait", Mark S. Nixon, Tieniu Tan, Rama Chellappa, Editorial Springer, 2010.
- [4] "Análisis Biomecánico de Marcha Humana a Través de Técnicas de Modelaje", L. E. Contreras, J. A. Tristánchó y L. F. Vargas, 2012.



# Holografía óptico-digital fuera de eje

P. Soto-López<sup>1</sup>, A. Padilla-Vivanco<sup>2</sup>, A. Yuck Franco

**Resumen**— Se presenta una revisión del método de reconstrucción holográfica basado en la respuesta al impulso. Se describe el arreglo experimental empleado, el cual es una versión del interferómetro de Mach-Zehnder. Se recuperan algunas fases provenientes de material biológico y se grafican en 3D.

**Palabras clave**— Microscopia Holográfica digital, interferómetro de Mach-Zehnder, Recuperación de la fase.

## INTRODUCCIÓN

Holografía es una técnica no destructiva usada para la visualización de muestras, uno de sus usos más frecuentes, está en el estudio de muestras biológicas. Otras técnicas como la luz fluorescente, que libera niveles altos de radiación pueden dañar las muestras usadas, es por ello que, la holografía es una técnica emergente de grabado rápido, y con la capacidad de realizar una reconstrucción del objeto bajo estudio. Es sabido que, las técnicas de interferometría holográfica se aplican en el estudio en tiempo real de deformaciones de retina en humanos. La holografía permite obtener imágenes tridimensionales de alta resolución de ciertas cavidades, así como de tejidos y órganos internos del cuerpo humano. Históricamente, la holografía fue inventada en 1948 por Dennis Gabor en un esfuerzo para mejorar la resolución del microscopio electrónico [1]. Las dos áreas han llegado a ser una misma en ciertas aplicaciones, por lo que existe ahora una nueva rama del conocimiento con aplicaciones a las áreas médico-biológicas, llamada Microscopia Holográfica Digital.

## DESARROLLO

### ONDAS DE LUZ

Las ondas de luz pueden ser descritas por el campo electromagnético. Asimismo, los conceptos de interferencia y difracción forman las bases de la holografía y la teoría para describirla apropiadamente, es el modelo ondulatorio de la luz [2]. La oscilación cuantitativa son el campo eléctrico y el magnético. Las amplitudes de los campos oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la luz y perpendicularmente una de otra, esto es, las ondas de luz son un fenómeno transversal.

La propagación de la luz se describe por la ecuación de onda, la cual proviene de las ecuaciones de Maxwell. La ecuación de onda en el vacío está dada por:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

P. Soto-López<sup>1</sup> (✉), A. Padilla-Vivanco<sup>2</sup> (✉), A. Yuck Franco<sup>3</sup> (✉)

<sup>1,2</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [pedro.soto@upt.edu.mx](mailto:pedro.soto@upt.edu.mx) , <sup>2</sup> [alfonso.padilla@upt.edu.mx](mailto:alfonso.padilla@upt.edu.mx) , [aldoyuck@gmail.com](mailto:aldoyuck@gmail.com)



Aquí  $\vec{E}$  es el campo eléctrico y  $\nabla^2$  es el operador Laplaciano, donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío  $c = 299792458 \text{ m/s}$ .

La longitud de onda en el vacío de la luz visible está en el rango de 400 nm (violeta) a 780 nm (rojo). En el caso de frecuencias el rango correspondiente es igual a  $7,5 \cdot [10]^{14} \text{ Hz}$  a  $3,8 \cdot [10]^{14} \text{ Hz}$ . Los sensores de luz como por ejemplo el ojo humano, el fotodiodo o la CCD, no son capaces de detectar altas frecuencias debido a la rapidez con la que oscilan las ondas luminosas. En la práctica, se puede medir directamente solo la intensidad, ésta es proporcional al tiempo promedio del cuadrado del campo eléctrico y puede ser definido como.

$$I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle_t = \epsilon_0 c \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E^2 dt \quad (2)$$

## INTERFERENCIA

La superposición de dos o más ondas en el espacio es llamada interferencia. Si cada campo es una solución de la ecuación de onda, la superposición es también una solución. Esto es así porque la ecuación de onda, es una ecuación diferencial lineal, cuya solución en general se puede expresar como la combinación.

$$\vec{E}_i(\vec{r}, t) = \sum_i \vec{E}_i(\vec{r}, t), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

La interferencia de dos o más ondas monocromáticas se da con frecuencia y longitud de onda es igual. Así mismo, las ondas tienen que tener la misma dirección de polarización, su amplitud compleja puede ser:

$$A_k(x, y, z) = a_k e^{-i\varphi_k}, \quad k = 1, 2 \quad (4)$$

La intensidad está dada por el módulo al cuadrado de la suma de las amplitudes.

$$I = |A_1 + A_2|^2 = (A_1 + A_2)(A_1 + A_2)^* = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (5)$$

Una cámara al grabar el haz objeto y el haz de referencia interfiriendo se pueden representar de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} I &= |A_{obj} + A_{Ref}|^2 = (A_{obj} + A_{Ref})(A_{obj} + A_{Ref})^* \\ &= I_{obj} + I_{Ref} + 2\sqrt{I_{obj} I_{Ref}} \cos(\varphi_{obj} - \varphi_{Ref}) \end{aligned} \quad (6)$$

Donde el primer término de la derecha representa la intensidad del objeto, el segundo la intensidad del haz de referencia y el tercero representa la interferencia de los dos haces.



## RESPUESTA AL IMPULSO

Se presenta el método alternativo expresado de la distribución de amplitud compleja en el plano de observación por la convolución del disturbo original con una respuesta [3]. La respuesta al impulso es obtenida de la transformada inversa de Fourier.

$$h(x, y, z) = F^{-1}\{e^{2i\pi\gamma\hat{z}}\} = \iint_{-\infty}^{\infty} e^{2i\pi\gamma\hat{z}} e^{2i\pi(\alpha\hat{x} + \beta\hat{y})} d\alpha d\beta \quad (7)$$

## SISTEMA OPTO-ELECTRÓNICO

El interferómetro Mach-Zehnder que se empleó es para realizar el grabado de filtros, consiste de dos divisores de haz, de dos espejos totalmente reflectores y dos objetivos de microscopio, el cual aparece en la Figura 1. Las dos ondas dentro del arreglo viajan a lo largo de caminos separados. Puede introducirse una pequeña diferencia entre los caminos con una ligera inclinación de uno de los divisores de haz, así como también en alguno de los espejos. Dado que los dos caminos están separados, el interferómetro es relativamente difícil de alinear. Sin embargo, el interferómetro puede aplicarse en muchas situaciones. En nuestro caso se ha usado para el grabado de filtros holográficos que contienen franjas de interferencia.

## RESULTADOS

En la Figura 2, se muestran los resultados obtenidos. En el filtro u Holograma capturado se hallan los dos haces de luz interfiriendo, un haz es el que contiene la información del objeto y el segundo el de referencia, al aplicar el método de respuesta al impulso se obtiene la recuperación y por último se toma una sección de la recuperación y se grafica en una tercera dimensión, en la cual se pueden observar distintas posiciones del objeto, así como también su profundidad.

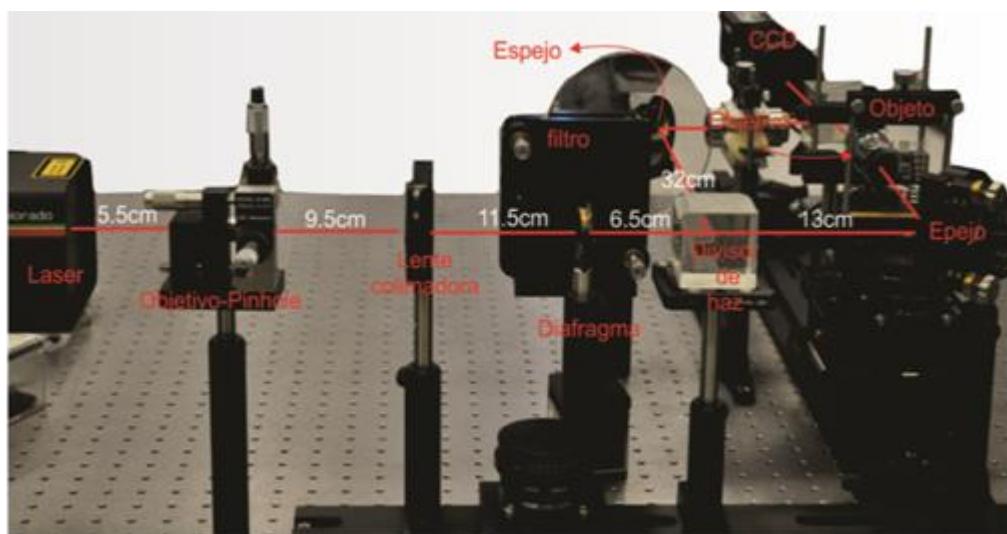


Figura 1. El interferómetro Mach-Zehnder empleado para el grabado de filtros



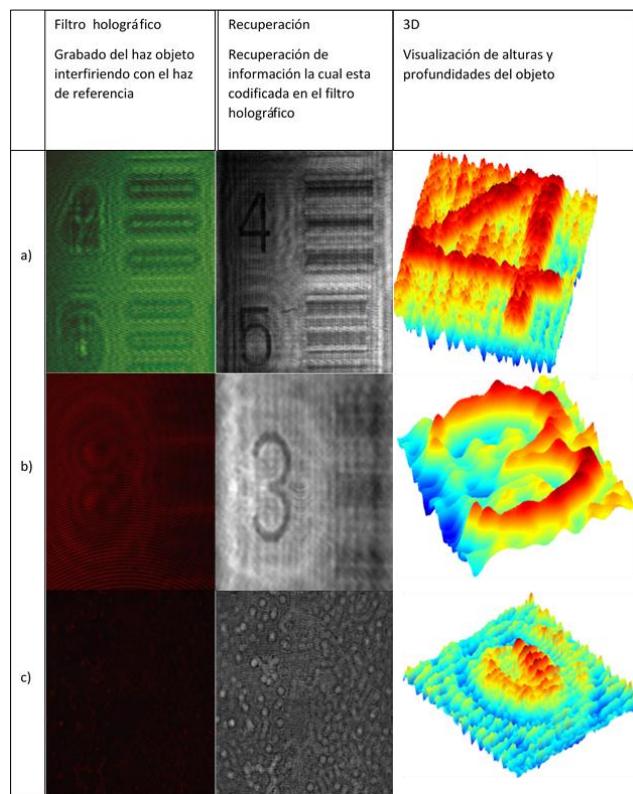


Figura 2. Visualización de la fase recuperada de un objeto metálico.

## CONCLUSIONES

El interferómetro de Mach-Zehnder es muy apropiado para realizar holografía, ya que permite interferencia de dos haces de forma de reflexión así como de transmisión, un ejemplo de la primera aparece en la Figura 2a, en la cual se usa una tarjeta USAF reflectiva, obteniendo una buena recuperación con detalles que pueden ser más visuales. La imagen correspondiente a la Figura 2b, es de una tarjeta USAF usada de forma de Transmisión, también tiene buenos resultados a la hora de realizar su reconstrucción.

En la Figura 2c se puede observar una recuperación de una muestra sanguínea, en la cual los glóbulos rojos son muy pequeños para ser observados a simple vista, y con la ayuda de la holografía podemos visualizar hasta en una tercera dimensión la superficie y volumen de estos glóbulos. Todo ello se logra usando el método de respuesta al impulso programado en Matlab, el cual fue de gran apoyo para las reconstrucciones en un lapso de tiempo muy pequeño, así como la visualización en 3D del objeto.



## REFERENCIAS

1. D. Gabor, The Nobel Prize in Physics 1971, <http://www.nobelprize.org>
2. U. Schnars, W. Jueptners, Digital Holography, Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques, Springer, pp. 5-16 (2005)
3. R. N. Bracewell, The Fourier Transform and its Applications, McGraw-Hill, New York, (1965).



# Características de medición inteligente de energía eléctrica en una casa habitación

F. A. Elizalde-Canales<sup>1</sup>, I. J. Rivas-Cambero<sup>2</sup>

**Resumen**— Los medidores inteligentes registran los eventos, perfiles de carga y precios y transmiten los datos por medio de Internet, en este sentido los clientes pueden comprobar el uso que han hecho de la energía eléctrica y controlar su consumo. Con un sistema de medidores inteligentes, los usuarios podrían consumir la cantidad de energía eléctrica que están dispuestos a pagar. En este trabajo se presenta una revisión del estado del arte de las redes eléctricas inteligentes con respecto a los sistemas de medición que proponen utilizar.

**Palabras clave**—Medidor inteligente, redes eléctricas inteligentes, consumo de energía, casa habitación

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación encuentra su motivación principalmente en los problemas ambientales y energéticos que se están enfrentando generando preocupación mundial sobre la eficiencia energética debido al probable desabastecimiento de combustibles fósiles proponiendo generar conciencia y favoreciendo las condiciones de racionamiento energético a través de las redes eléctricas inteligentes.

Desde un contexto global se define la Red Eléctrica Inteligente o (Smart Grid en inglés) como la integración dinámica de los desarrollos en ingeniería eléctrica y los avances de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) con el objetivo primordial de realizar un uso eficiente y racional de la energía.

La revisión del estado del arte revela que el propósito de las redes eléctricas inteligentes, es colaborar en la disminución del impacto ambiental, de ahí que varios países desarrollados están creando estrategias que permitan disminuir la emisión de dióxido de carbono al implementar fuentes alternas de energía como son la energía eólica y energía solar. Además se busca renovar y actualizar la red eléctrica convencional por medio del uso de tecnologías de información y comunicación avanzada (ver figura 1), entre los que destacan los medidores inteligentes, que habilitan la comunicación en dos vías entre las compañías y los consumidores [1], además de permitir a los hogares administrar el uso de electricidad [2].

F. A. Elizalde-Canales<sup>1</sup> (✉), I. J. Rivas-Cambero<sup>2</sup> (✉)

<sup>1,2</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> francisca.elizalde@upt.edu.mx , <sup>2</sup> ivan.rivas@upt.edu.mx



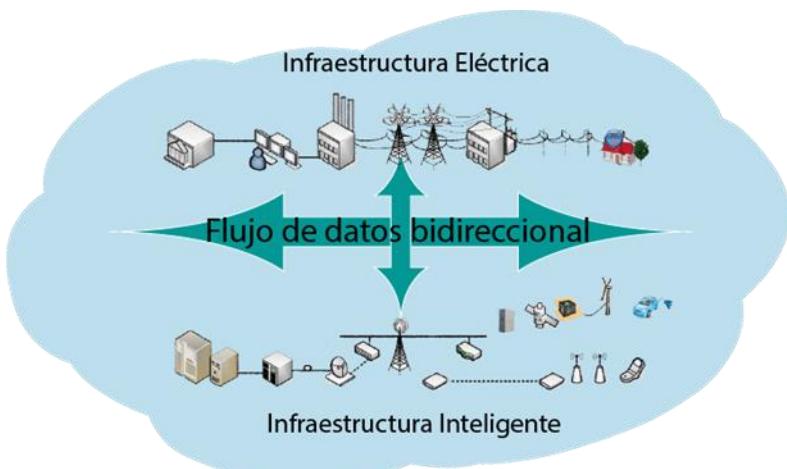


Figura 1. Transmisión en ambos sentidos.

El medidor inteligente es el equipo que realiza la medición, registro y almacenamiento de la información de consumo de energía, que es transmitida en tiempo real hacia concentradores y luego a la empresa de servicios de energía eléctrica con la finalidad de realizar un análisis que permita optimizar procesos. La industria eléctrica está decidida a transformar la red convencional en una red distribuida y bidireccional; tomando como referencia el modelo de Internet.

Con base al análisis realizado la situación actual muestra un futuro desabasto de energía eléctrica y la sociedad debe tomar conciencia acerca del costo, tanto en términos económicos como ambientales que implica el consumo desmedido. El ingreso de medidores inteligentes en sus hogares, que lean y trasmitan los datos en tiempo real, apoyaría a los consumidores en el uso eficiente de su consumo suponiendo una oportunidad de aprendizaje, sobre sus hábitos e intensidades de consumo. Si los consumidores están informados sobre el precio de la energía, aumentan las posibilidades de cambiar parte de su demanda para períodos en los que se tengan precios más bajos [3].

Para la implementación de los medidores inteligentes se están estudiado diferentes proyectos, enfocados ayudar a los consumidores a hacer uso eficiente de su consumo y obtener ahorros [4]. Los usuarios también pueden tener acceso a información como precio, cantidad de consumo y parámetros del sistema, entre otros [5]. Sin embargo la transmisión de datos, tanto en medios cableados e inalámbricos, es propensa a ser interceptada, alterada o interrumpida, por tanto existen algunos inconvenientes de los medidores inteligentes como son:

- Pérdida de la privacidad
- Disminución de la fiabilidad (medidores más complicados e incremento de la posibilidad de interferencia por parte de terceros no autorizados)
- Aumento de los riesgos de seguridad de red o de acceso remoto
- Riesgos de contaminación electromagnética por uso de wifi, GSM, GPRS o sistemas de microondas



Las tecnologías de redes inteligentes para la trasmisión de datos, utilizan los avances cibernéticos recientes para aumentar las funciones de control y vigilancia en toda la red de energía eléctrica, incorporando diversas iniciativas técnicas. Tomando en cuenta que para asegurar la interconexión efectiva entre equipos y sistemas, se requiere de estándares de comunicación que definan un lenguaje común que facilite el intercambio de datos. En la actualidad, coexisten diferentes protocolos y tecnologías de comunicación con diversas fases de implantación en cada una de las actividades del sistema eléctrico basados en el modelo OSI y TCP/IP.

## DESARROLLO

Un sistema de medición puede ser integrado como el de la figura 2, que muestra la topología de los dispositivos involucrados en la medición, por medio de sensores de corriente y voltaje a través del micro controlador arduino, construyendo una red inalámbrica utilizando un router para proveer internet en un hogar, donde se brinde el acceso a las mediciones a través de dispositivos móviles por medio de un navegador web. Las mediciones se realizan a través de un sistema que calcula la potencia y energía eléctrica consumida en la red eléctrica. Luego se envían las mediciones por medio de una red WIFI a un servidor web, utilizando un router el cual le da la potencia de un sistema embebido.

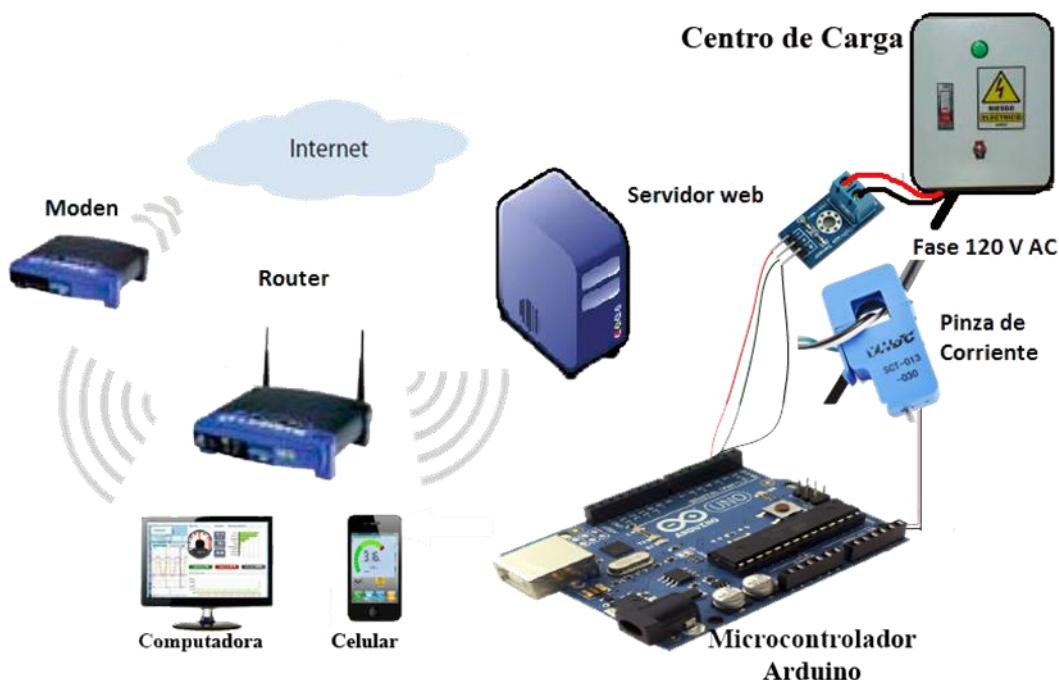


Figura 2. Dispositivos que se utilizan en un sistema inteligente.



En la revisión de artículos sobre mediciones eléctricas de energía se encontró que se tienen proyectos e iniciativas a nivel internacional, como por ejemplo el proyecto de Unión Europea que diseña el plan conocido como PLAN 20-20-20, que es una iniciativa lanzada para luchar contra el cambio climático con metas claras: reducir las emisiones de bióxido de carbono un 20%; ahorrar un 20% en el consumo energético; y proveer al sistema energético con al menos un 20% de energía renovable; todo ello para 2020. También Latinoamérica se ha concientizado y se están creado programas que involucran gobierno, empresas, universidades y proveedores; como es el caso de Colombia, Chile, Ecuador y Brasil; aunque a nivel general y considerando el continente americano, E.E.U.U ha avanzado realmente con hechos “medibles” y cuantificables en la iniciativa Smart Grid o de Redes Inteligentes.

Las Redes Inteligentes presentan oportunidades para el control, la automatización, incorporación de fuentes de energías renovables, recolección de datos y control por medio de aplicaciones inteligentes, con las cuales se busca mejorar la eficiencia.

## CONCLUSIONES

El análisis de la literatura está enfocado al diseño y construcción de un sistema de medición inteligente que presenta una alternativa para optimizar el consumo de energía eléctrica en una casa habitación. Presumiendo que la medición inteligente puede aportar grandes beneficios, como la posibilidad de devolver información al consumidor final acerca de su consumo energético y con ello conducirlo hacia una mejor planeación y uso eficiente de la energía eléctrica generando potenciales ahorros energéticos y económicos. Debido a que los beneficios de la integración de un sistema de medición inteligente en las redes eléctricas son sustanciales permitiendo la medición de consumo de electricidad; lectura remota, procesamiento de datos de medición automática y transferencia para aumentar la información del cliente en tiempo real, y así mejorar la toma de decisiones y el control del consumo.

Los sistemas de medición al estar integrados de hardware, software y sistemas de comunicación, poseen peligros potenciales y significativos presentando problemas de privacidad y seguridad; por lo que se requiere mejorar la seguridad en la implementación de tecnología de medición.

## REFERENCIAS

- [1]. Erol-kantarci, M., & Mouftah, H. T. (2010). The Impact of Smart Grid Residential Energy Management Schemes on the Carbon Footprint of the Household Electricity Consumption. Electric Power and Energy Conference, IEEE.
- [2]. Sianaki, O. A., Hussain, O., Dillon, T., & Tabesh, A. R. (2010). Intelligent Decision Support System for Including Consumers' Preferences in Residential Energy Consumption in Smart Grid.



- [3]. Ajaja, A. (2010). Reinventing electric distribution. *IEEE Potentials*, 29(1), 29–31.
- [4]. Shargal, M. (2009). From Policy to Implementation : The Status of Europe's Smart Metering Market. *Energy, Utilities & Chemicals*
- [5]. Zhang, J., Chen, Z., Yang, X., Chen, K., & Li, K. (2010). Ponder over Advanced Metering Infrastructure and Future Power Grid. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 1–4.  
doi:10.1109/APPEEC.2010.5448797



# Simulación de un demodulador de frecuencia para la sincronía eléctrica

C. Rueda-Germán<sup>1</sup>, I. J. Rivas-Cambero<sup>2</sup>, J. H. Arroyo-Núñez<sup>3</sup>, A. D. Vite-Rojo<sup>4</sup>

**Resumen—** Phase Locked Loop (PLL) es una técnica de control en lazo cerrado que es empleada en el proceso de demodulación de ondas de radio de FM, el objetivo principal de esta técnica consiste en la generación de una señal de salida con amplitud fija, frecuencia y fase coincidente con la señal de entrada. Esta técnica es recurrida en el proceso de sincronía entre los sistemas locales de generación eléctrica y el sistema eléctrico nacional, ya que el ángulo de fase y frecuencia de la red eléctrica es información crítica para lograr la interconexión sin causar perturbaciones.

**Palabras clave—** PLL, fase, frecuencia, interconexión, red eléctrica, FM

## INTRODUCCIÓN

México tiene alto potencial energético proveniente del sol, viento, agua y del calor de la tierra. Actualmente en México los sistemas de generación de energía renovable conectados a la red, como se observa en la Fig. I, tienen una penetración y desarrollo aún naciente [3].

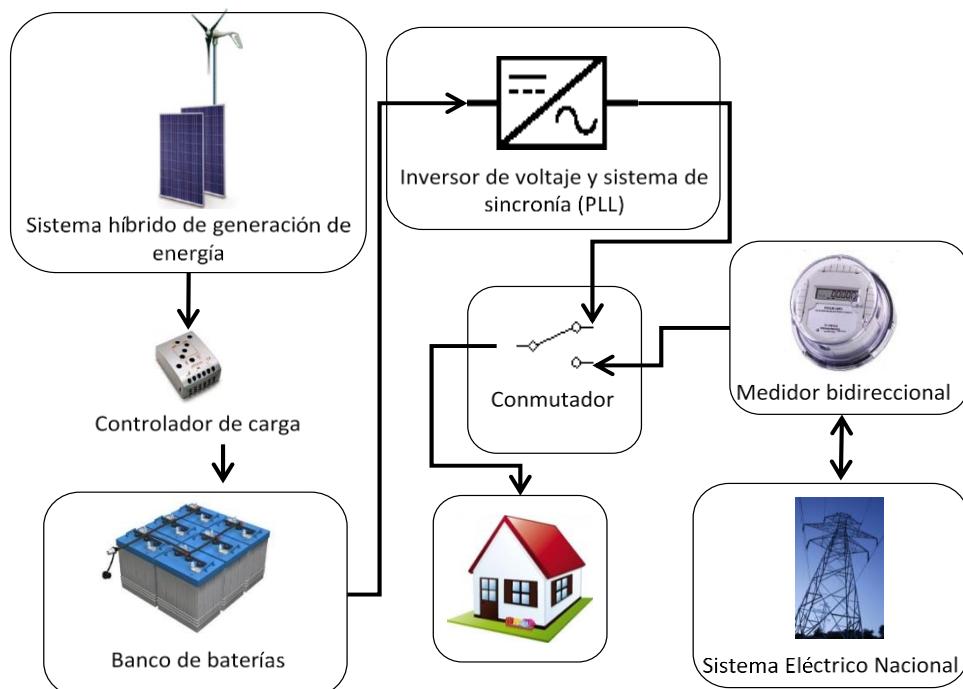


Fig. I Configuración típica de un sistema híbrido conectado a la red

C. Rueda-Germán<sup>1</sup>, I. J. Rivas-Cambero<sup>2</sup>, J. H. Arroyo-Núñez<sup>3</sup>, A. D. Vite-Rojo<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [clementina.rueda@upt.edu.mx](mailto:clementina.rueda@upt.edu.mx), <sup>2</sup> [ivan.rivas@upt.edu.mx](mailto:ivan.rivas@upt.edu.mx), <sup>3</sup> [humberto.arroyo@upt.edu.mx](mailto:humberto.arroyo@upt.edu.mx), <sup>4</sup> [alma.vite@upt.edu.mx](mailto:alma.vite@upt.edu.mx)



Para interconectar un sistema local de generación de energía (SLG) con el sistema eléctrico nacional (SEN) es necesario establecer una sincronía en frecuencia y fase entre ambas formas de onda para evitar perturbaciones. En la Fig. 2 se muestra un desfasamiento de  $90^\circ$  entre las formas de corriente alterna, representadas mediante ondas sinusoidales, que causaría posibles desperfectos en las líneas de transmisión de la electricidad.

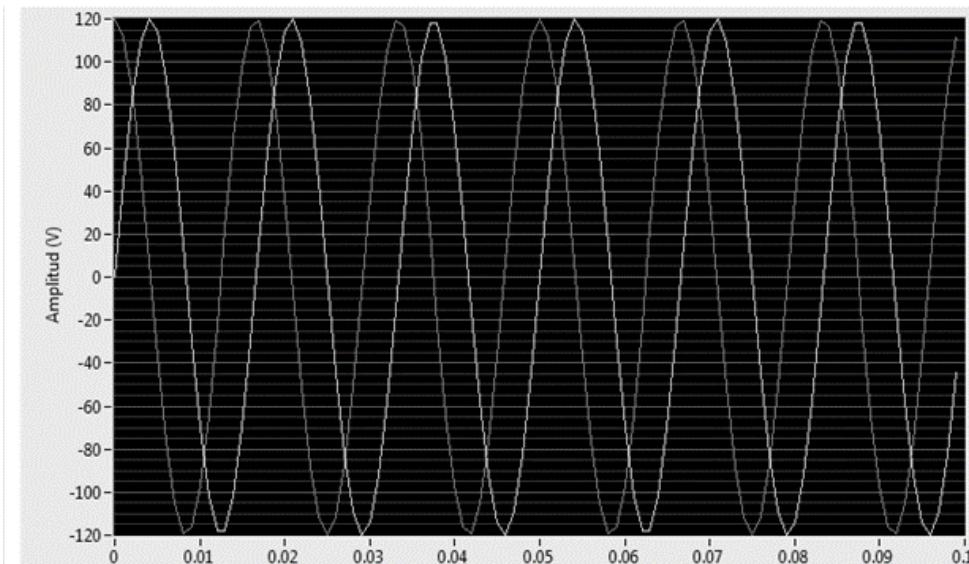


Fig. 2 Desfasamiento de  $90^\circ$  entre dos ondas sinusoidales.

Diferentes opciones de sincronía eléctrica son usuales, pero la más ampliamente utilizada tiene relación directa con los receptores de estaciones de radio en frecuencia modulada (FM).

### DESARROLLO

Para la realización de esta simulación se emplea un método de demodulación de un sistema de FM, las características de la modulación en frecuencia se observan en la Fig. 3, en donde la amplitud de la señal portadora permanece constante mientras que la frecuencia cambia por la acción de la señal moduladora.



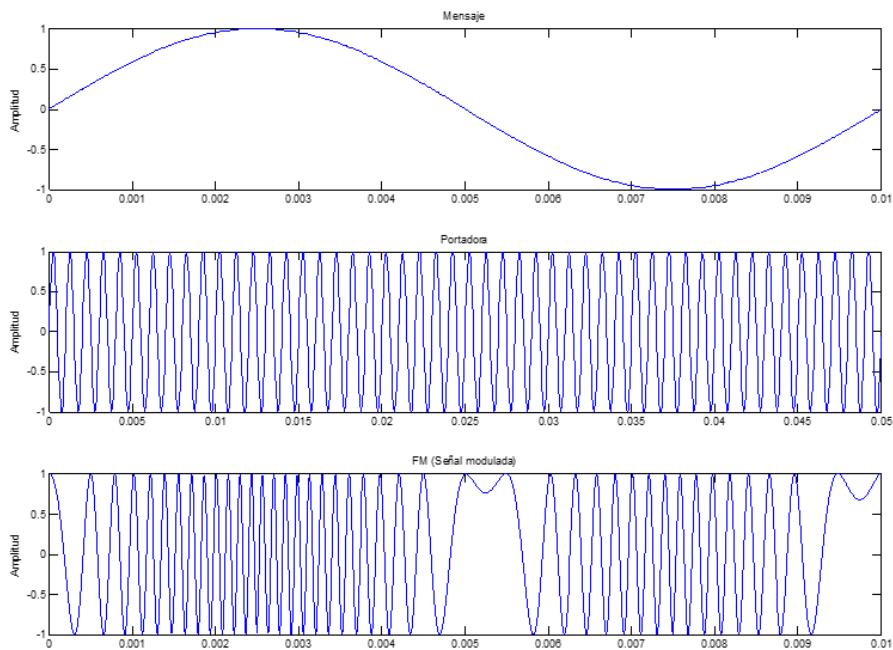


Fig. 3 Modulación FM.

Cualquier circuito que convierta una variación de frecuencia en la portadora a una variación de voltaje proporcional puede utilizarse para desmodular o detectar señales de FM [2]. El lazo enganchado en fase (PLL) es una técnica de demodulación utilizada en la sincronía eléctrica [3] que puede ser descrita con una estructura básica mostrada en el diagrama de la Fig. 4.

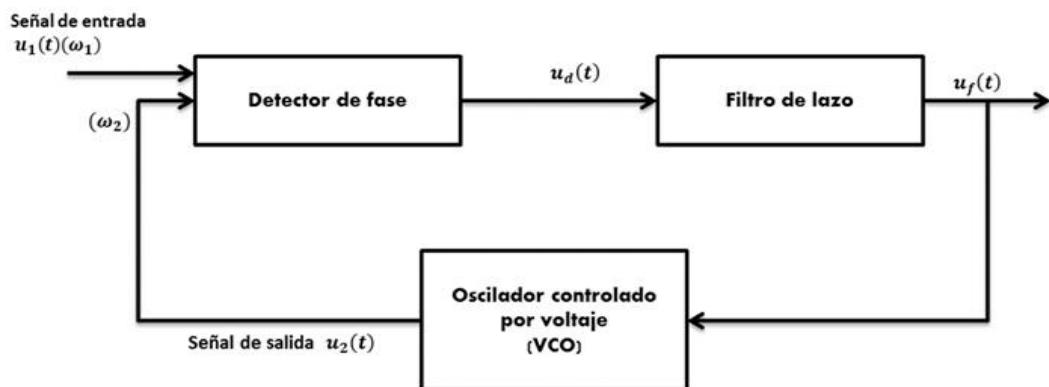


Fig. 4 Componentes de un PLL



Empleando Matlab®, lenguaje de alto nivel con alta capacidad de procesamiento, en el desarrollo de esta simulación, se utiliza un modelo matemático basado en un PLL [4] que comienza con la ecuación básica de una onda sinusoidal definida como en la ecuación 1. En esta ecuación, la frecuencia y la fase son modificadas para observar la respuesta del filtro de lazo, el tiempo de enganche, la portadora modulada, la salida del detector de fase y la respuesta del VCO, tal como se muestran en la Fig. 5.

$$v = V_p \operatorname{sen}(2\pi f t \pm \theta) \quad (1)$$

donde:

$V_p$  = amplitud pico

$f$  = frecuencia

$\theta$  =ángulo de fase

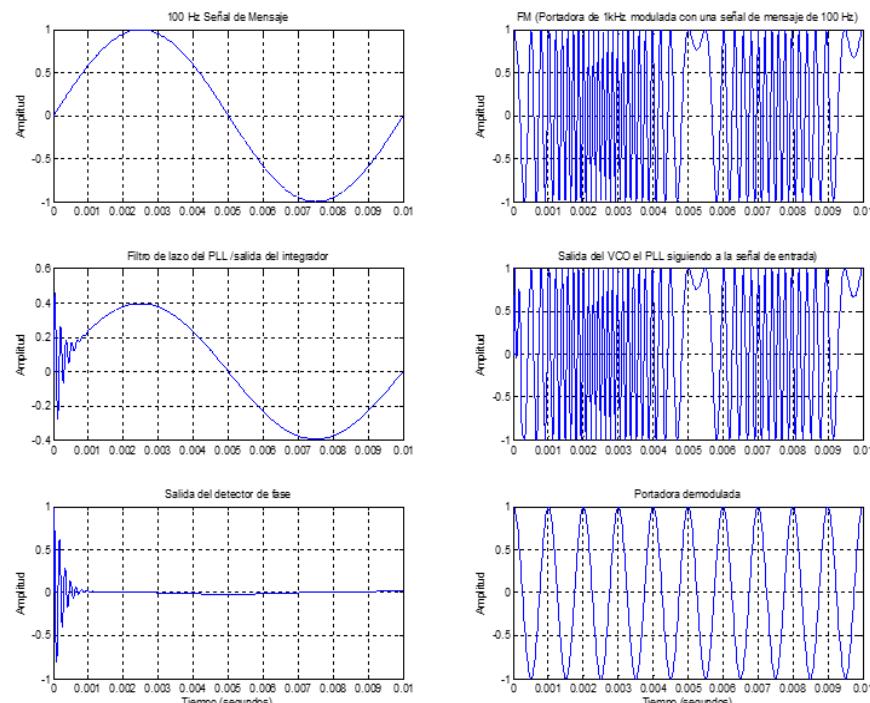


Fig. 5 Demodulador FM basado en un PLL

## RESULTADOS

Con la simulación de un PLL acoplada a los parámetros técnicos de la línea eléctrica es posible sintonizar el filtro para que el tiempo de enganche entre la señal de referencia, en este caso un sistema eléctrico monofásico, y un sistema local de generación de energía entren en sincronía en el menor tiempo posible sin generar alteraciones, los resultados obtenidos se observan en la Fig. 6.



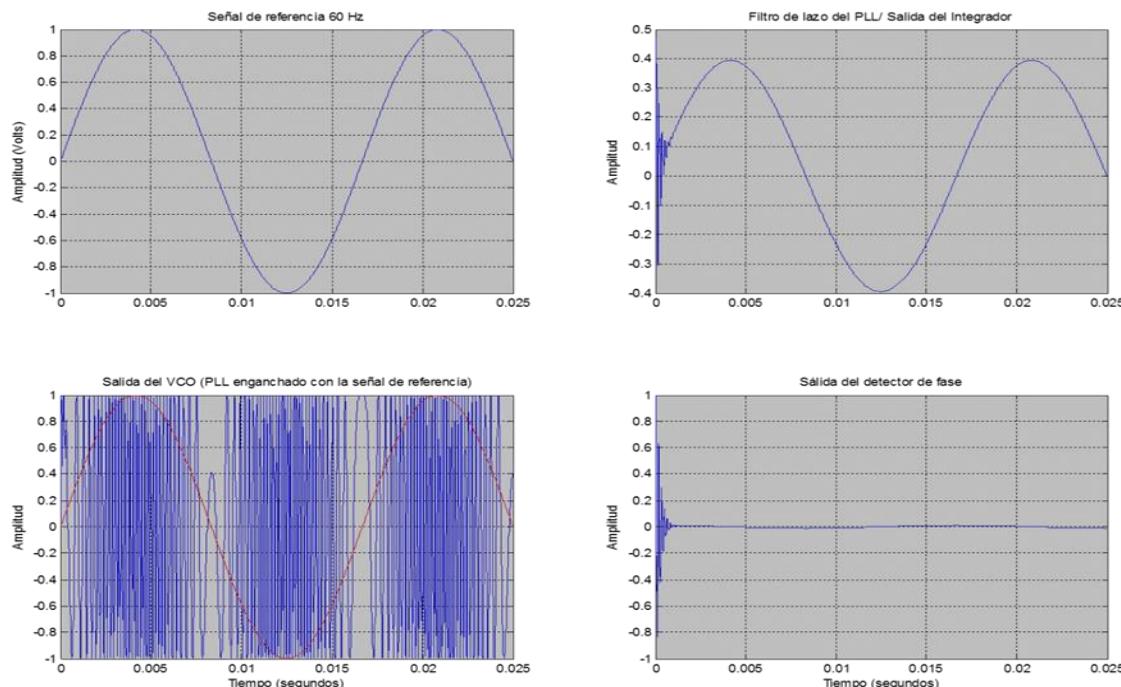


Fig. 6 Resultantes del PLL

## CONCLUSIONES

La presente simulación tuvo por objeto la sintonía del filtro PI o filtro de lazo relacionado con el PLL, el proceso es obtener el menor tiempo de respuesta y atenuación de la señal de referencia para que el PLL entre en enganche con la señal eléctrica y pueda seguir en fase y frecuencia sin errores ni perturbaciones significativas.

## REFERENCIAS

1. Alatorre, C. (2009). Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. México D.F.: Secretaría de energía.
2. Wayne, Tomasi. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas Prentice Hall. México 2003
3. Clementina Rueda-Germán, J. Humberto Arroyo-Núñez, Iván Rivas-Cambero. Implementation of an embedded phase and frequency tuner, as reference for real-time energy exchange with the grid. Sixth International Symposium on Energy & Technology Innovation Forum, Puerto Rico Energy Center-Laccei, February 20-21, 2014, Puerto Rico ISSN 2334-2498.
4. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24167-simple-pll> demonstration / content / simple \_PLL.m



# Instrumentación Inalámbrica de Variables Meteorológicas en un Ambiente Cerrado para uso Agrícola

J. G. Durán-Candelaria<sup>1</sup>, J. C. Ramos-Fernández<sup>2</sup>, L. F. Cerecero-Natale<sup>3</sup>, R. Terán-Pacheco<sup>4</sup>

**Resumen—** En el presente trabajo, se muestra la caracterización y acondicionamiento de señales para los sensores de: temperatura interna, temperatura externa, humedad interna, humedad externa, radiación solar y velocidad del viento, de un invernadero agrícola, de forma indirecta se determina el índice de presión de vapor. El trabajo de instrumentación se realiza usando una tarjeta basada en tecnología de microcontroladores modelo Arduino MEGA2560, para adquirir las 6 variables climáticas utilizando el convertidor analógico digital y transmitir de forma inalámbrica usando los módulos comunicación serial XBee S2, para su visualización, manipulación gráfica y registro de mediciones en una base de datos desarrollada en LabVIEW. Como pruebas experimentales se presentan los datos de las mediciones adquiridas durante 20 horas, donde se puede apreciar el correcto funcionamiento de la instrumentación electrónica.

**Palabras clave—** Comunicación Inalámbrica, Adquisición.

## INTRODUCCIÓN

La producción agrícola bajo invernadero es perturbada por el clima en su interior y exterior, por lo que es deseable mantener las variables que lo caracterizan dentro de un rango de valores que es establecido por los expertos en agricultura [2].

Un invernadero es un recinto cerrado donde la diferencia entre el clima interior y exterior se crea principalmente mediante la radiación solar y los mecanismos del estancamiento del aire. Todo esto es con el objetivo de proveer un ambiente apropiado para el cultivo de especies vegetales, [3]. Algunas de las ventajas de cultivar en invernaderos pueden ser las siguientes:

- Provee un microclima especial para el mejor crecimiento de los cultivos.
- Logra extender los tiempos de producción.
- Protege a los cultivos de las inclemencias del tiempo y de plagas.

Los sistemas de adquisición se utilizan para medir y registrar señales obtenidas de dos maneras principalmente: originadas a partir de la medición directa de cantidades eléctricas, como pueden ser voltajes de CA o CD. Los sistemas de adquisición se pueden clasificar principalmente en: analógicos y digitales, [1].

J. G. Duran-Candelaria<sup>1</sup> (✉), J. C. Ramos-Fernandez<sup>2</sup>, L. F. Cerecero-Natale<sup>3</sup>, R. Teran-Pacheco<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Universidad Politécnica de Pachuca, <sup>3,4</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [juliодuran@micorreoupp.edu.mx](mailto:juliодuran@micorreoupp.edu.mx)



El trabajo que aquí se reporta, se realizó la instrumentación electrónica de los sensores de temperatura y humedad tanto interna como externa y radiación solar y velocidad del viento, así como el cálculo de déficit de presión de vapor de un invernadero con producción de jitomate, todo esto con el fin de adquirir una base datos para proponer un modelo bioclimático y sus uso en el diseño de leyes de control.

## **DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACIÓN ANALÓGICA Y DIGITAL**

Para caracterizar los sensores de temperatura, humedad, radiación solar, velocidad de viento, se requieren los datos de fabricante de los sensores, además instrumentos patrón para calibrar. Una etapa importante es el desarrollo de las ecuaciones matemáticas que describen las variables físicas que se miden. Mediante las ecuaciones sintonizadas generalmente de forma experimental, se determina las ganancias de acondicionamiento de las señales de los amplificadores operacionales. El sensor de humedad relativa para este estudio es el HMZ-433AI su señal depende a su vez de la temperatura por esta razón en la tabla se muestran diferentes porcentajes de humedad dependientes de un valor de temperatura determinado, el sensor de temperatura es el LM35 que es lineal su voltaje de salida en función de la temperatura.

Las configuraciones electrónicas de los amplificadores operacionales son del tipo amplificador no inversor. Las señales de salida de los circuitos amplificadores se conectaron a canales de conversión analógica digital de una tarjeta Arduino MEGA2560, para su posterior transmisión en protocolo serial inalámbrico.

Tomando en cuenta el acondicionamiento de señal y conversión analógica realizada, en el programa de LabVIEW se configuraron las velocidades de comunicación serial inalámbricas para la transmisión inalámbrica de las mediciones adquiridas.

Adquiriendo todas las mediciones del clima y separadas por variables, se implementó la conversión necesaria para tener las variables en su respectiva unidad de medición, las fórmulas de conversión de los sensores de temperatura, radiación solar y velocidad del viento solo depende la variable que se mide, ya sea velocidad del viento, temperatura o radiación solar a diferencia del sensor de humedad relativa que depende también del valor de temperatura, se calculó también el déficit de presión de vapor una variable importante en un invernadero.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las mediciones experimentales adquiridas del día 17 de mayo de 2014, el experimento comenzó a las 00:01 a.m. horas con duración de 20 horas. Se observa las mediciones adquiridas por el sistema de adquisición de datos que se desarrolló en este trabajo. Para este caso en particular la Figura 5, se muestra las temperaturas interna y externa del invernadero, se aprecia claramente que durante la noche y las primeras horas de la mañana la temperatura es bastante baja, presentando un punto mínimo de temperatura a las 05:30 a.m. horas con 1.63°C de la temperatura externa y que comienza a elevarse de forma proporcional a las 06:48 a.m., también es



importante mencionar la diferencia de temperaturas cuando el calor se concentra debido a que el nylon del invernadero concentra los rayos solares a las 12:56 a.m con 37.34°C de la temperatura interna con la medición externa a la misma hora de 27.85°C teniendo una diferencia de 9.49°C entre ambas temperaturas.

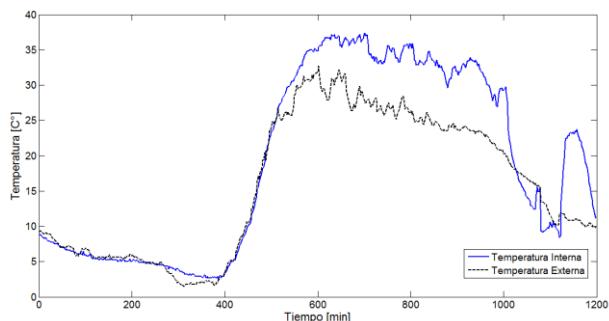


Fig. 5. Temperatura Interna y Externa.

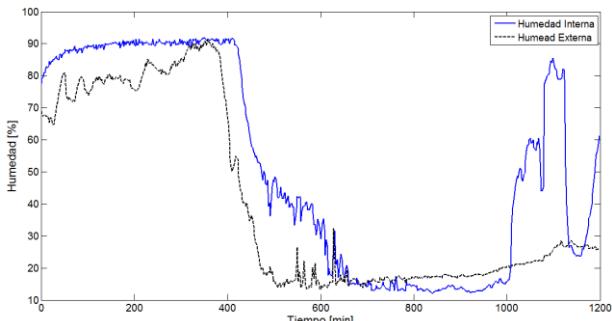


Figura 6. Humedad Interna y Externa.

En la siguiente Fig. 6 se muestran las variables de las humedades interna y externa donde se observa que durante la noche estas mediciones aumentan teniendo un comportamiento inverso al de temperatura. El punto más alto registrado fue a las 06:16 con un porcentaje humedad relativa Interna del 91.86%, el valor registrado a la misma hora de la humedad externa fue de 90.58% teniendo una diferencia de 1.28%. el punto mínimo a las 3:28 P. M. horas con un porcentaje de 12% de humedad interna, observándose así una correlación inversamente proporcional entre la humedad y la temperatura dado que estas dos variables afectan de manera directa el cálculo del déficit de presión de vapor.

A continuación se muestra en la Fig. 7 la gráfica de radiación solar se puede observar que la medición con un mínimo durante todas las horas que dura la noche de 0 W/m<sup>2</sup> y comienza a elevarse después de las 06:46 a.m. horas con una lectura de 88  $\frac{W}{m^2}$  teniendo un punto máximo a las 1:12 P. M. horas con un valor de 880  $\frac{W}{m^2}$  esta energía es de mucha importancia para las plantas puesto que requieren de la radiación solar debido a que es necesaria para la fotosíntesis además de elevar la temperatura de la atmósfera terrestre y por lo tanto del invernadero, esta variable puede ser utilizada en un control de temperatura por sombra.

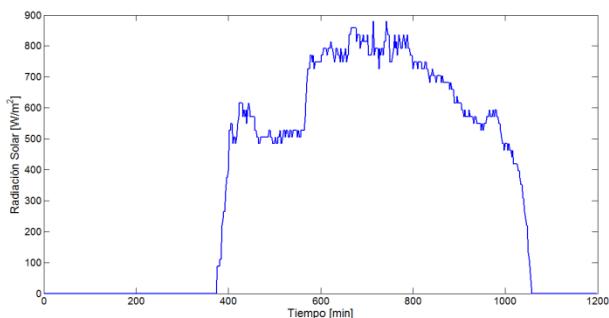


Fig. 7. Radiación Solar.

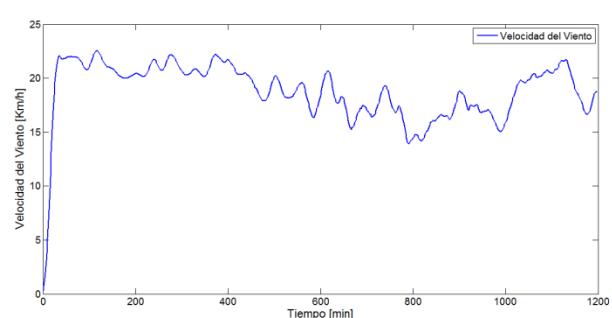


Figura 8. Velocidad del Viento.



A continuación se muestra en la Fig. 9 la gráfica de la variable de déficit de presión de vapor calculada con la temperatura y la humedad relativa, es conocido que el aire tiene una capacidad máxima de retención de humedad dependiendo de la temperatura. La presión de vapor a la máxima retención de vapor en el aire se le conoce como presión de vapor a saturación expresada como KPa, teniendo un punto mínimo a las 07:12 horas con un valor de 0.144 KPa y un punto máximo a las 12:57 con un valor de 13.94 KPa.

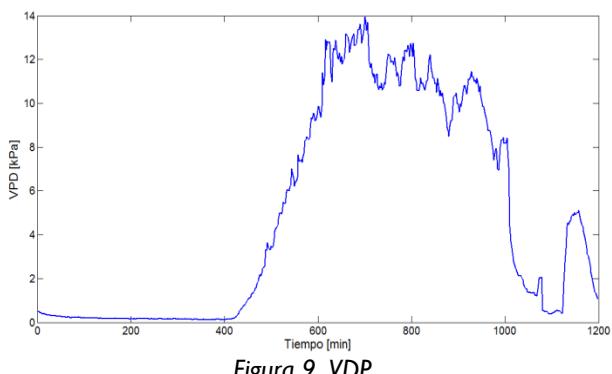


Figura 9. VDP.

Medición	Máximo	Mínimo
$T_i$	37.34°C	2.54°C
$T_e$	32.73°C	1.63°C
$H_i$	91.86%	12.49%
$H_e$	90.06%	13.71%
$RS$	$880 \frac{W}{m^2}$	$0 \frac{W}{m^2}$
$Vv$	$22.55 \frac{Km}{h}$	$0 \frac{Km}{h}$
$VDP$	13.94 KPa	0.144 KPa

Tabla I. Comparativo de Mediciones.

## CONCLUSIONES

Con los resultados experimentales se concluye que es posible adquirir señales del clima de manera inalámbrica, con una tarjeta ArduinoMEGA2560, módulos de comunicación inalámbrica Xbee S2, interface USB-RS232 Prolific Technology y LabVIEW. De esta forma se desarrolló un datalogger que permite guardar las mediciones del clima en un archivo xls para su posterior despliegue en gráficas, o un posible análisis para el diseño de leyes de control de temperatura del invernadero.

## REFERENCIAS

- [1] Albert D. Helfrick; Wiliam D. Cooper. Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. Prentice-Hall, 1990.
- [2] Ramos Fernández, J. C., López Morales, V., and Lafont F., E. G. (2007a). A neurofuzzy structure modelling evapotraspiration in a Greenhouse crop. Ingenieria Investigaci\_on y Tecnología, XI:127-139.
- [3] Tpagro. <http://www.tpagro.com>, 2005.
- [4] Gorrostieta-Hurtado, E.; Sotomayor-Olmedo, A.; Pedraza-Ortega, J.C.; Aceves-Fernandez, M.A.; Villaseñor-Carillo, U.G., "Modeling Key Parameters for Greenhouse Using Fuzzy Clustering Techniques," Artificial Intelligence (MICAI), 2010 Ninth Mexican International Conference on, vol., no., pp.103,106, 8-13 Nov. 2010.



- [5] Mancuso, M.; Bustaffa, F., "A wireless sensors network for monitoring environmental variables in a tomato greenhouse," Factory Communication Systems, 2006 IEEE International Workshop on, vol., no., pp.107,110, 0-0 0
- [6] Bojin Liu; Ghosal, D.; Chuah, Chen-Nee; Zhang, H.M., "Reducing Greenhouse Effects via Fuel Consumption-Aware Variable Speed Limit (FC-VSL)," Vehicular Technology, IEEE Transactions on , vol.61, no.1, pp.111,122, Jan. 2012
- [7] Lujuan Deng; Kanyu Zhang; Youmin Gong; Songhe Xie, "Environment optimal control in intelligent greenhouse," Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on, vol.6, no., pp.5356,5360 Vol.6, 15-19 June 2004



# Impacto de las fuentes de energía renovables en la operación y control de sistemas eléctricos

D. Martínez-Martínez<sup>1</sup>, R. Tapia-Olvera<sup>2</sup>

**Resumen—** Las situaciones ambientales actuales han propiciado el gran desarrollo del uso de las energías renovables para la generación de electricidad. Este uso creciente de nuevas fuentes de electricidad ha traído grandes beneficios ambientales, pero al mismo tiempo ha introducido nuevos fenómenos, o versiones distintas de ciertos fenómenos indeseables en los sistemas eléctricos. Por tanto es necesario revisar temas tales como la estabilidad angular y de voltaje, la localización óptima de generación distribuida, el despacho económico, la asignación de unidades, la coordinación de protecciones, entre otros, incluyendo alta penetración de energías renovables. En éste trabajo se presenta una investigación sobre el estado del arte del análisis de sistemas eléctricos de potencia y distribución considerando una alta penetración de fuentes renovables y generación distribuida.

**Palabras clave—** Energías renovables, fuentes renovables, alta penetración, sistemas eléctricos, generación distribuida, localización óptima, estabilidad angular, estabilidad de voltaje.

## INTRODUCCIÓN

Se entiende por fuentes renovables (FR) el conjunto de tecnologías que permiten la generación de energía eléctrica de forma limpia mediante recursos naturales renovables [1], tales como el viento, la energía solar, la energía de las mareas, las microturbinas, entre otras. Debido a su naturaleza de producción intermitente los generadores empleados en éste tipo de tecnologías pueden ocasionar problemas de estabilidad angular y estabilidad dinámica en generadores convencionales conectados a la red, además, su no producción de potencia reactiva ocasiona también problemas de estabilidad de voltaje estática y dinámica. Como ventajas de éste tipo de tecnologías se tiene en primer lugar la baja emisión de contaminantes, habilidad en la reducción de pérdidas de energía eléctrica, confiabilidad desde el punto de vista eléctrico, bajo costo de inversión en comparación con las tecnologías convencionales, entre otras [2]. Por otra parte, se entiende por Generación Distribuida (GD) a las centrales eléctricas instaladas en la red de distribución y cerca de los consumidores finales, razón por la cual las pérdidas asociadas al transporte de energía se reducen considerablemente. Este tipo de centrales de GD pueden ser del tipo convencional o de fuentes renovables. En éste último caso se habla de Generación Distribuida de Fuentes Renovables (GDFR). Es importante mencionar que la GD tiene también un fuerte impacto en la operación y control de un sistema eléctrico, ya que los sistemas existentes hasta hace poco tiempo no contemplaban la inclusión de éste tipo de tecnologías en los sistemas de distribución. Se desprende de lo anterior que es importante analizar los fenómenos clásicos presentes históricamente en los sistemas eléctricos de potencia, como son la estabilidad (angular, de voltaje, de frecuencia, de pequeña señal, etc.), la coordinación de protecciones, el despacho económico, la asignación de unidades, entre otros, ante la inclusión de las fuentes renovables y la generación distribuida.

D. Martínez-Martínez<sup>1</sup> (✉), R. Tapia-Olvera<sup>2</sup> (✉)

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, <sup>2</sup>Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [dmartinezm@uaemex.mx](mailto:dmartinezm@uaemex.mx) , <sup>2</sup> [ruben.tapia@upt.edu.mx](mailto:ruben.tapia@upt.edu.mx)



## Desarrollo

Se presentan casos tomados de la literatura donde se analiza el impacto de las fuentes renovables y la generación distribuida en la operación y control de sistemas eléctricos. Se analizan fenómenos tales como estabilidad angular, estabilidad de voltaje, ubicación óptima de GD, entre otros.

### IMPACTO DE LA GD Y LAS FR EN LA ESTABILIDAD ANGULAR Y DE VOLTAJE.

La estabilidad angular se refiere a la capacidad de los generadores de un sistema eléctrico para mantenerse en sincronismo después de una perturbación en el sistema. Generalmente se analiza durante la primera oscilación posterior al disturbio, a lo que se le conoce como estabilidad transitoria. Si el análisis va más allá de este lapso de tiempo, se habla de estabilidad dinámica. En éste sentido se han propuesto diversas técnicas para mitigar este fenómeno, algunas de las cuales se describen a continuación.

- a. Uso combinado de dispositivos STATCOM y bancos de baterías [3].

La estabilidad transitoria se relaciona con el comportamiento dinámico del sistema durante una falla y antes de que ésta sea liberada. Un método para mejorar la estabilidad de sistemas eólicos es utilizar baterías de almacenamiento de energía. Estas baterías permiten a los generadores de fuentes renovables entregar grandes cantidades de potencia activa en períodos de tiempo relativamente cortos, con lo que facilitan el control de frecuencia del sistema. Por otra parte, el uso de los Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexibles (FACTS – Flexible A.C. Transmission Systems) facilitan el control de diversos parámetros de un sistema eléctrico, como pueden ser: flujos de potencia activa y reactiva, voltajes y ángulos nodales, entre otros. En este sentido se ha analizado el uso combinado del dispositivo FACT denominado STATCOM, el cual posee la habilidad de proporcionar suave y rápidamente compensación de potencia reactiva para el mejoramiento del soporte de voltaje, el amortiguamiento y la estabilidad transitoria del sistema.

- b. Uso de capacitores en derivación y manejo de potencia activa y reactiva [4].

Otra metodología relacionada con el mejoramiento de los márgenes de estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos es el uso de capacitores en derivación y técnicas para el manejo de potencia activa y reactiva basadas en el despacho económico de carga. La idea principal de ésta técnica es realizar un análisis modal de la matriz característica del sistema, el cual proporcionará información precisa de aquellos generadores que aportan poco, nada o incluso que estén afectando la estabilidad de voltaje del sistema eléctrico considerado. Una vez detectados, estos generadores serán penalizados asignándoles altos costos en el predespacho económico de carga, razón por la cual el programa del predespacho no los considerará para cubrir la demanda y de ésta forma se evitará su participación para satisfacer el consumo. No obstante, es bien sabido que los generadores eléctricos son una de las principales fuentes de potencia reactiva y por ende, uno de los principales medios para el control de voltaje en un sistema eléctrico, razón por la cual es necesario suplir la salida de uno o varios de ellos por la razón mencionada anteriormente.



Para cubrir esta necesidad se propone el uso de bancos de capacitores que aporten la potencia reactiva necesaria dejada de suministrar por los generadores que intencionalmente fueron dejados fuera del despacho económico de carga por no aportar a la estabilidad de voltaje del sistema. En cuanto al manejo de la potencia activa y reactiva, la idea es nuevamente realizar un análisis modal que permita determinar los nodos del sistema más propicios para el control de potencia activa y reactiva, ajustando dinámicamente las inyecciones de potencia en dichos nodos.

c. Técnicas basadas en mediciones en tiempo real [5].

Estas técnicas consisten en monitorear permanentemente el comportamiento del sistema, determinando indicadores de proximidad al colapso de voltaje que permitan tomar acciones oportunas para prevenirlo.

Se apoyan de equipos tales como PMU (Phasor Measurement Unit – Unidad de Medición Fasorial) y en Sistemas Supervisores de Control y Adquisición de Datos (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition). La base de estas técnicas consiste en determinar el nivel de stress o nivel de carga del sistema mediante la evaluación de indicadores, lo que permitirá tomar las acciones pertinentes en el momento preciso. Se realiza entonces la detección de parámetros críticos y se ejecutan en su caso las acciones de control necesarias. La Figura 1 ilustra este procedimiento.

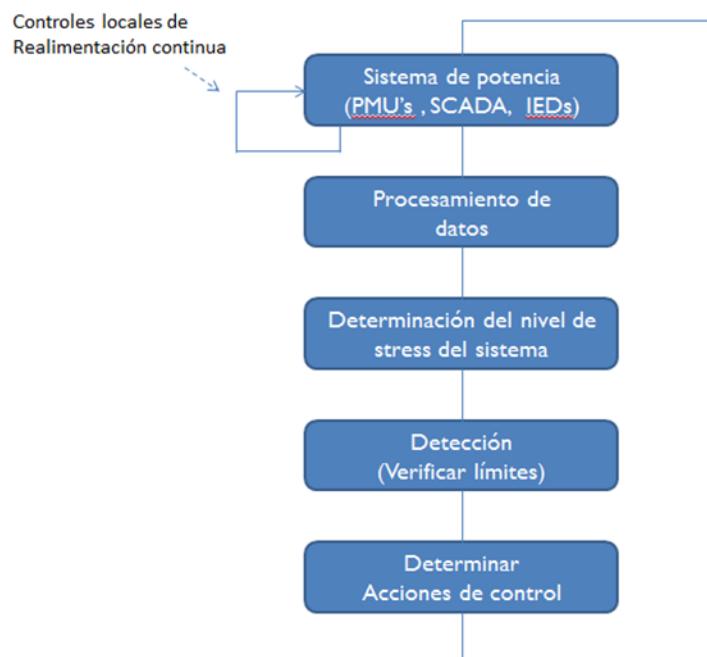


Figura 1. Esquema de control de voltaje en tiempo real [5].

d. Control de baterías de almacenamiento para control de frecuencia [6].



Se puede implementar un control para los sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS – Battery Energy Storage Systems) que permita apoyar el control de frecuencia en una microred (MG) y con la habilidad de desconectarse de la red para alimentar una carga local en forma aislada [7]. Por tanto, el BEES puede funcionar conectado a la microred (G-mode) o en modo aislado (I-mode), realizando el cambio entre uno y otro modo de una manera perfectamente coordinada con el control propuesto y que, de acuerdo a pruebas experimentales, no presenta variaciones significativas de voltaje o frecuencia al realizar la transición.

## METODOLOGÍAS PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA (GD)

Otro aspecto importante de la implementación de GD en sistemas eléctricos es la ubicación óptima de la misma, lo que permitirá optimizar pérdidas de energía y costos, así como reducir problemas de confiabilidad y estabilidad angular y de voltaje [8]. La figura 2 muestra los métodos más usados para establecer la ubicación óptima de GD en un sistema eléctrico.

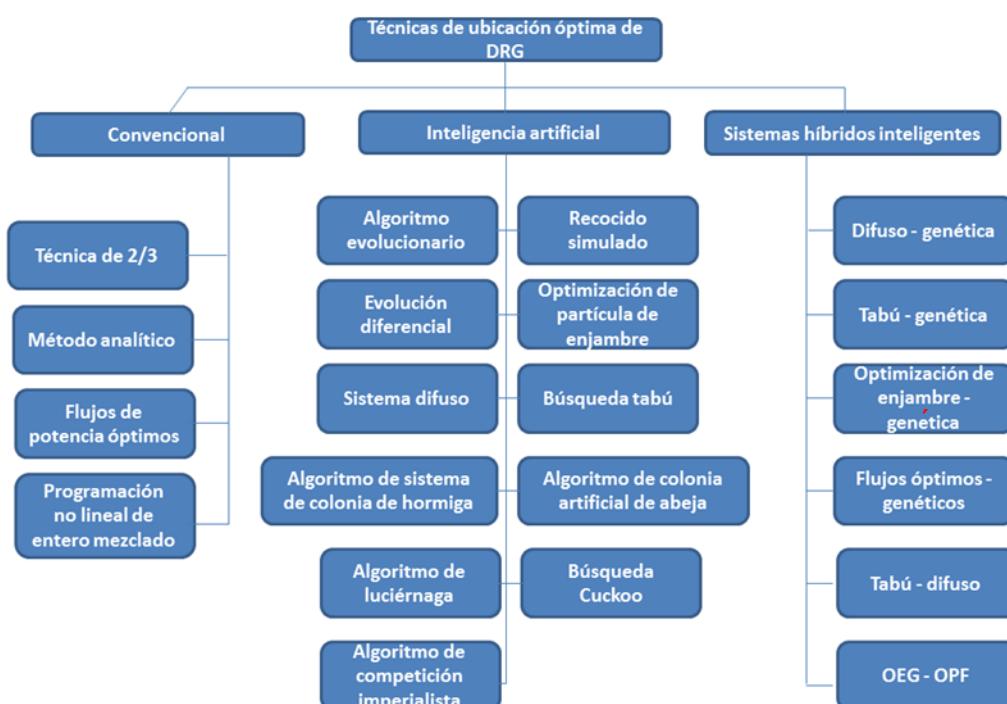


Figura 2. Técnicas de ubicación óptima de Generación Distribuida Renovable (DRG) [8].

Estas técnicas de ubicación óptima se dividen básicamente en tres tipos: (i) Técnicas analíticas, (ii) Algoritmos genéticos y (iii) Métodos de inteligencia artificial. Cada una de estas técnicas presenta ventajas y desventajas respecto a las otras, sin embargo, la desventaja principal de todas ellas es la complejidad de un sistema eléctrico de potencia real, en el cual se tienen muchas restricciones que deben considerarse simultáneamente, tales como pérdidas de energía, confiabilidad, factores de carga, perfiles de voltaje, estabilidad de voltaje, entre otras. Por esta razón se considera que la ubicación óptima de DRG es aún un problema no resuelto y con muchas líneas abiertas de investigación. La tabla I muestra un resumen de las técnicas más usadas en la ubicación óptima de DRG.



Método de ubicación de DRG	Ventajas	Desventajas
Regla de los 2/3	Técnica de aproximación simple y fácil de usar	No se puede aplicar a sistemas con carga no uniforme
Método analítico	Fácil de implementar, factor de precisión alto, eficiencia en tiempo computacional.	Pocos ejemplos en la literatura, carece de robustez, solo puede considerar objetivos simples y solo un DRG a la vez.
Flujos de potencia óptimos	Fácil de encontrar ejemplos en la literatura, factor de precisión alto, eficiencia en tiempo computacional.	Problema formulado de forma cerrada, difícil de incluir diversos aspectos en los cálculos.
Programación no lineal de entero mezclado	Factor de precisión alto, eficiencia en tiempo computacional.	Difícil de implementar y entender.
Algoritmo evolucionario	Funcionamiento eficiente para encontrar el óptimo global, fácil de encontrar ejemplos en la literatura.	Relativamente difícil de programar, convergencia prematura, posibilidad de quedar atrapado en óptimos locales, bajo factor de precisión.
Recocido simulado	Fácil de implementar, habilidad de proporcionar soluciones razonablemente buenas para muchos problemas combinacionales, robustez.	Funcionamiento relativamente bajo para encontrar el óptimo global, largo tiempo de cómputo.
Evolución diferencial	Pocos parámetros requeridos, capaz de manejar problemas de optimización complejos.	Convergencia inestable, posibilidad de quedar atrapado en óptimos locales.
Optimización de partícula de enjambre	Fácil de programar con pocas ecuaciones, fácil de encontrar ejemplos en la literatura.	Funcionamiento relativamente bajo para encontrar el óptimo global, pocos ejemplos en la literatura.
Sistema difuso	Fácil de entender y apropiado para modelar incertidumbres para una mejor solución.	Pocos ejemplos en la literatura.
Búsqueda tabú	Funcionamiento eficiente para lograr una solución óptima o sub-óptima, capaz de escapar de mínimos locales.	Relativamente difícil de programar debido a la sintonización de muchos parámetros, bajo factor de precisión.
Algoritmo de búsqueda de colonia de hormigas	Fácil de entender y programar.	Cambios en la distribución de probabilidad por iteración, tiempo incierto de convergencia, pocos ejemplos en la literatura.
Algoritmo artificial de colonia de abejas	Capaz de manejar problemas complejos de optimización, fácil de programar.	Pocos ejemplos en la literatura
Búsqueda Cuckoo	Fácil de programar, pocos parámetros requeridos.	Convergencia lenta, pocos ejemplos en la literatura.
Algoritmo de la luciérnaga	Fácil de entender y programar.	Convergencia lenta, pocos ejemplos en la literatura.
Algoritmo de competición imperialista	Capaz de manejar problemas complejos de optimización	Relativamente difícil de programar debido a la sintonización de muchos parámetros, pocos ejemplos en la literatura.
Sistema inteligente híbrido	Funcionamiento eficiente para encontrar el óptimo global, capaz de manejar problemas complejos de optimización.	Relativamente difícil de programar, pocos ejemplos en la literatura

Tabla I. Ventajas y desventajas de las principales técnicas de ubicación óptima de DRG [8]



## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda de literatura reciente relacionada con la temática analizada. Se realizó la clasificación de acuerdo a los temas abarcados en cada una de las referencias consultadas y se realizó un resumen de los aspectos más importantes de cada una de ellas.

## RESULTADOS

Se ha descrito el impacto de las fuentes renovables de energía sobre la operación y control de un sistema eléctrico. El análisis de la literatura demuestra que la inclusión de generación distribuida y fuentes renovables tiene un impacto directo sobre fenómenos como la estabilidad angular y la estabilidad de voltaje, los cuales no pueden ser tratados como si de un sistema convencional se tratara. Por esta razón es necesario desarrollar nuevas técnicas y metodologías que permitan aminorar estas nuevas problemáticas.

## DISCUSIÓN

Las fuentes renovables de energía han tenido un impacto positivo desde el punto de vista ecológico en los procesos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. No obstante, su inclusión ha traído consigo algunos fenómenos indeseables como problemas de estabilidad angular y de voltaje.

Así mismo se requiere realizar estudios que permitan determinar la ubicación óptima de generadores de fuentes renovables dentro de un sistema eléctrico de potencia o de distribución. Los ahorros económicos esperados debido a la minimización de pérdidas de transporte de energía y el acceso libre a fuentes renovables justifican los esfuerzos que se desarrollan actualmente en todo el mundo para dar solución a las problemáticas mencionadas anteriormente. El estado del arte de ésta temática presenta aún áreas de oportunidad que deberán ser desarrolladas próximamente.

## CONCLUSIONES

Se concluye que la introducción de fuentes renovables y la generación distribuida en los sistemas actuales de distribución y en las nuevas microredes, induce fenómenos indeseables como inestabilidad angular, inestabilidad de voltaje o inestabilidad de frecuencia. Se han realizado intentos de diseñar controles que permitan reducir el impacto negativo de estos fenómenos, algunos de los cuales se mencionan en este trabajo. Se observa además que la ubicación óptima de la generación distribuida es un tema relevante, ya que de ello dependerá la reducción de pérdidas de energía, costos de inversión y fenómenos indeseables como los mencionados anteriormente. Las diversas técnicas mencionadas se enfrentan a la problemática de la variedad de funciones objetivo presentes en el proceso de optimización debido a la misma naturaleza



compleja de un sistema eléctrico. Finalmente se recomienda explorar el uso de software especializado que permita combinar el análisis de sistemas de control con el análisis de redes eléctricas, lo que permitiría expandir las posibilidades de análisis del impacto de las fuentes renovables y la generación distribuida en redes eléctricas.

## REFERENCIAS

- [1] T. Ackerman, Wind Power in Power Systems, 2005.
- [2] S. Heir, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, 2005.
- [3] A. Kanchanaharuthai, V. Chankong, K. Loparo, Transient stability and voltage regulation in power systems with renewable distributed energy resources, 2011, IEEE.
- [4] H. Omidi, B. Mozafari, A. Parastar, M.A. Khaburi, Voltage stability margin improvement using shunt capacitors and active and reactive power management, 2009, IEEE Electric Power & Energy Conference.
- [5] M. Glavic, D. Novosel, E. Heredia, D. Kosterev, A. Salazar, F. Habibi, M. Donnelly. Real time voltage control under stress conditions, 2012, IEEE Power and Energy Magazine.
- [6] I. Serban, C. Marinescu. Control strategy of three-phase battery energy systems for frequency support in microgrids and with uninterrupted supply of local loads, 2014, IEEE Transactions on power electronics, Vol. 29, No. 9.
- [7] X. Tan, Q. Li, H. Wang. Advances and trends of energy storage technology in microgrid, Int. J. Elect. Power Energy Systems , Vol. 44, No. 1, Jan 2013.
- [8] W.S. Tan, M.Y. Hassan, M.S. Majid, H.A. Rahman, Optimal distributed renewable generation planning: a review of different approaches, 2013, Renewable and Sustainable Energy Reviews.



# Un modelo de programación matemática binaria para la asignación de horarios en la Universidad Politécnica de Tulancingo

E. González-Gutiérrez<sup>1</sup>, M. Pérez Rubio<sup>2</sup>, M. Muñoz Pérez<sup>3</sup>, H. Minor Popocatl<sup>4</sup>

**Resumen**— En este trabajo se presenta un modelo de programación matemática binario para la óptima asignación de horarios docentes en la Universidad Politécnica de Tulancingo, se considera las disponibilidades reales de docentes y mostramos resultados de la implementación cuando utilizamos el optimizador GAMS.

**Palabras clave**— Programación entera binaria, modelo matemático.

## INTRODUCCIÓN

EL objetivo de todas las instituciones educativas es ofrecer una educación de alta calidad, por lo que se debe tener una infraestructura adecuada y una determinada cantidad de recursos humanos, estos se deben planificar de tal forma que exista un equilibrio, es decir, que no haya escases o sobreoferta de ellos. Un modelo de programación matemática para la asignación de horarios debe satisfacer una serie de requerimientos impuestos por políticas de cada universidad. Actualmente, el proceso de programación se realiza de forma manual demorando aproximadamente un mes en promedio. Cabe destacar que la programación obtenida de esta manera no está libre de errores, detectándose en algunos casos ciertas ineficiencias e incumplimientos de los requerimientos básicos para el correcto funcionamiento de la institución.

En consecuencia, una buena programación horaria genera una serie de beneficios para los principales actores que conviven en las instituciones. Entre estos es posible mencionar por ejemplo: eliminar traslapes de horarios entre cursos del mismo cuatrimestre, respetar la disponibilidad de horarios de los profesores, respetar la capacidad de las aulas y laboratorios de clase e incorporar condiciones deseables, como por ejemplo: favorecer las clases en bloque horarios específicos o minimizar la utilización de aulas.

En la literatura se han estudiado este tipo de problemas, por ejemplo, en [1], [2], [3], [4] y, recientemente en [5].

E. González Gutiérrez<sup>1</sup>, M. Pérez Rubio<sup>2</sup> (✉), M. Muñoz Pérez<sup>3</sup>, H. Minor Popocatl<sup>4</sup>  
1, 2, 3, 4 Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [mireya.perez@upt.edu.mx](mailto:mireya.perez@upt.edu.mx)



## DESARROLLO

Se considera como unidad básica del modelo, el cuatrimestre, éste se basa en la programación entera que integra la definición de horarios y asignación de aulas de clase. El modelo asigna de manera conjunta bloque de horarios de clase que corresponde a una semana.

De esta manera, se definen combinaciones de bloques de horarios que llamamos patrones de horarios. La idea es que el modelo decida el programar o no las clases de cátedra directamente en el patrón de bloques de horarios, por ejemplo, si una asignatura posee bloques de dos horas consecutivas del mismo día. Además suponemos, por simplicidad de exposición, consideramos que cada grupo permanece en la misma aula durante toda la semana.

Sea  $I$  el conjunto de las asignaturas,  $J$  el conjunto de cuatrimestres y  $K$  el conjunto de horas,  $P$  el conjunto de profesores,  $G$  los grupos del cuatrimestre  $j$ ,  $j \in J$  y  $h_i$  el número de horas que se debe impartir la asignatura,  $i$ ,  $i \in I$ .

Adicionalmente son necesarios los siguientes conjuntos que comparten relación de los conjuntos que acabamos de definir.

I)  $\Omega_p$  denota la disponibilidad durante toda la semana en el nuevo bloque horario del profesor,  $p, p \in P$ . Definimos subconjuntos relacionados con éste.

- a)  $L_p$  denota la disponibilidad que corresponde al día lunes,
- b)  $M_p$  denota la disponibilidad que corresponde al día martes,
- c)  $X_p$  denota la disponibilidad que corresponde al día miércoles,
- d)  $J_p$  denota la disponibilidad que corresponde al día jueves,
- e)  $V_p$  denota la disponibilidad que corresponde al día viernes,
- f)  $\Omega_{2p}$  denota la disponibilidad del profesor  $p$  en la franja horaria de dos horas y
- g)  $\Omega_{1p}$  denota la disponibilidad del profesor  $p$  en la franja horaria de una hora.



2)  $\Psi_p$  denota las asignaturas del profesor  $p \in P$

Sea  $x_{jk}$  la variable binaria definida por

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{sí la asignatura } i \text{ se imparte en el cuatrimestre} \\ j \text{ en el horario } k, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

De esta manera presentamos el modelo que optimiza los horarios que corresponden a cada profesor.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (ijk)x_{jk} \quad (1)$$

sujeto a

$$2 \sum_{k \in \Omega_{2p}} x_{jk} + \sum_{k \in \Omega_{1p}} x_{jk} \leq h_i; \forall i \in \Psi_p \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{k \in L_p} x_{jk} \leq l; \forall i \in \Psi_p \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{k \in M_p} x_{jk} \leq l; \forall i \in \Psi_p \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{k \in X_p} x_{jk} \leq l; \forall i \in \Psi_p \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{k \in J_p} x_{jk} \leq l; \forall i \in \Psi_p \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{k \in V_p} x_{jk} \leq l; \forall i \in \Psi_p \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{i \in \Psi_p} x_{jk} \leq l; \forall k \in \Omega_p \forall j = i \quad (8)$$

$$x_{sjk} + x_{jk+1} \leq l; \forall k \in \Omega_{2p}, i \neq s \quad (9)$$

$$x_{sjk} + x_{jk+7} + x_{jk+8} \leq l; \forall k \in \Omega_{1p}, i \neq s \quad (10)$$

$$x_{jk} \in \{0, 1\} \forall i \in I \forall j \in J \forall k \in K$$

La función objetivo representa el requerimiento de que el horario se elija lo más justo. La restricción (1) garantiza que cada asignatura se imparta de acuerdo al número de créditos que le corresponda. Las restricciones (2)-(7) impiden que durante los días de la semana en las que los profesores tienen disponibilidad se impartan más de dos horas continuas al día. Las restricciones (8) y (9) controlan que no se produzcan topes de horarios entre asignaturas diferentes.



## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Hasta el momento se han obtenido algunos resultados por el modelo propuesto y tiene como propósito mostrar las ventajas de la utilización del modelo matemático.

Los datos de disponibilidades fueron suministrados por la coordinación de Ingeniería en Sistemas Computacionales. Está compuesta de dos cuatrimestres y 14 profesores.

El modelo de programación entera tiene 371 variables de decisión y más de 1000 restricciones. Este modelo fue implementado en el optimizador GAMS [6] y resuelto mediante CPLEX [7] en una computadora con S.O. Windows 7, Intel (R) Xenon(R) CPU E5-2667 0 @ 2.0GHz 2.90 GHz y RAM 12.0 GB. La siguiente Figura I, muestra un horario del segundo cuatrimestre grupo I que se obtuvo a partir del modelo propuesto.

	L	M	X	J	V
07:00 a. m.					
08:00 a. m.					
09:00 a. m.					
10:00 a. m.					
11:00 a. m.					
12:00 a. m.					
01:00 p. m.					
02:00 p. m.					

Figura I. Horario del segundo cuatrimestre grupo I.

## CONCLUSIONES

Se concluye que la introducción de fuentes renovables y la generación distribuida en los sistemas actuales de distribución y en las nuevas microredes, induce fenómenos indeseables como inestabilidad angular, inestabilidad de voltaje o inestabilidad de frecuencia. Se han realizado intentos de diseñar controles que permitan reducir el impacto negativo de estos fenómenos, algunos de los cuales se mencionan en este trabajo. Se observa además que la ubicación óptima de la generación distribuida es un tema relevante, ya que de ello dependerá la reducción de pérdidas de energía, costos de inversión y fenómenos indeseables como los mencionados anteriormente. Las diversas técnicas mencionadas se enfrentan a la problemática de la variedad de funciones objetivo presentes en el proceso de optimización debido a la misma naturaleza compleja de un sistema eléctrico. Finalmente se recomienda explorar el uso de software especializado que permita combinar el análisis de sistemas de control con el análisis de redes eléctricas, lo que permitiría expandir las posibilidades de análisis del impacto de las fuentes renovables y la generación distribuida en redes eléctricas.



## REFERENCIAS

- [1] Y. L. R. M. H. S. C. H. L. D. Zhang, "A simulated annealing with a new neighborhood structure based algorithm for high school timetabling problems," *European Journal of Operational Research*, pp. 550-558, 2010.
- [2] H. D. S. S. M. Al-Yakoob, "Mathematical programming models and algorithms for a class-faculty assignment problem," *European Journal of Operational Research*, pp. 488-507, 2006.
- [3] H. D. S. S. M. Al-Yakoob, "A mixed-integer programming approach to a class timetabling problem: A case of study with gender policies and traffic considerations," *European Journal of Operational Research*, pp. 1028-1044, 2007.
- [4] J. M. A. J. P. H. R. E. K. Burke, "A branch-and-cut procedure for the Udine Course Timetabling problem," *Annals of Operations Research*, pp. 71-87, 2012.
- [5] J. L. M. F. E. O. B. Diana Sánchez Partida, "An integer linear programming model for a university timetabling problem considering time windows and consecutive periods," *Journal of Applied Operations Research*, vol. 6, no. 3, pp. 158-173, 2014.
- [6] G. A. M. S. (GAMS), "<http://www.gams.com/>," [Online].
- [7] m. i. p. a. q. p. High-performance mathematical programming solver for linear programming, "<http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>," [Online].
- [8] "Metaheuristics Network," [Online]. Available: <http://www.idsia.ch/Files/ttcomp2002>.
- [9] V. Bardadym, "Computer Aided School and University Timetabling, The New Wave," *Lecture Notes in Computer Science Series*, pp. 22-45, 1996.
- [10] D. D. W. J. K. E. Burke, "Applications to timetabling," *Handbook of Graph Theory*, pp. 445-474, 2003.
- [11] K. J. J. K. R. W. E. Burke, "Automated University Timetabling," *The State of the Art, The Computer Journal*, pp. 565-571, 1998.
- [12] G. L. M. Carter, "Recent Developments in Practical Course Timetabling," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 3-19, 1998.
- [13] A. Schaefer, "A survey of automated timetabling," *Artificial Intelligence*, pp. 87-127, 1999.
- [14] D. D. Werra, "An introduction to Timetabling," *European Journal of Operational Research*, pp. 151-162, 1985.



# Análisis y simulación de la probabilidad de rechazo de paquetes en redes 802.11, Wi-Fi

F. J. Bucio-Castillo<sup>1</sup>, M. Muñoz-Pérez<sup>2</sup>, F. J. Albores-Velasco<sup>3</sup>, E. González-Gutiérrez<sup>4</sup>

**Resumen—** En una WLAN, el estándar IEEE 802.11 utiliza la DCF y el protocolo de contienda: CSMA/CA. El desarrollo de esta investigación se basa en el análisis de este protocolo utilizando herramientas probabilísticas. En [12] se presenta un análisis de este protocolo que está basado en la teoría de procesos de Markov. En este trabajo utilizamos las condiciones de optimalidad, específicamente consideramos las principales medidas de rendimiento, así como los tiempos de servicio en la red, utilizando la fragmentación de los paquetes para calcular la probabilidad de rechazo del mismo y la capacidad de tráfico en el medio operando en condiciones de saturación, con ruido y sin estaciones ocultas. Las formulas se implementaron en MATLAB y se compararon con los resultados que se obtuvieron con el simulador Pythagor Simulator.

**Palabras clave—** Red inalámbrica, estándar IEEE 802.11b, simulación de redes.

## INTRODUCCIÓN

Por su utilidad, las WLAN se han desarrollado varios trabajos con el objetivo de descubrir las regiones de optimalidad, por ejemplo, se ha evaluado el rendimiento de la Función de Coordinación Distribuida (DFC) vía simulación [7] o por aproximación mediante modelos analíticos, simplificando considerablemente la regla backoff (o de postergación), véase [10] y [14]. En [13], [14] y [16], se desarrollaron métodos, bajo el esquema DCF, para evaluar el rendimiento de la WLAN bajo condiciones de saturación cuando hay colas para transmitir en cada nodo de la WLAN.

En [5] se desarrolló una aproximación numérica del modelo, para evaluar el rendimiento de saturación, utilizando probabilidad condicional; en [18] se presentó un análisis para evaluar, numéricamente, el rendimiento del protocolo Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Evasión de Colisiones (CSMA/CA) mediante cadenas inducidas de Markov. En [12] y [13] se evaluaron los parámetros que involucran la saturación del rendimiento de una WLAN mediante métodos analíticos, lo cual permite encontrar regiones de optimalidad para estos parámetros

En el presente trabajo utilizamos el análisis del estándar IEEE 802.11, presentado en [12] en donde se calcula el rendimiento y la probabilidad de rechazo de transmisión de paquetes en redes Wi-Fi cuando han alcanzado el límite de intentos permitidos para su envío. En este mismo trabajo se presenta la solución de este modelo en términos de probabilidades, nosotros estamos interesados en programar dichos resultados en MATLAB, con el objetivo de obtener resultados numéricos, a partir del modelo analítico.

F. J. Bucio-Castillo<sup>1</sup>, M. Muñoz-Pérez<sup>2</sup> (✉), F. J. Albores-Velasco<sup>3</sup>, E. González-Gutiérrez<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo, <sup>3</sup> Universidad Autónoma de Tlaxcala

e-mail: <sup>2</sup> [magda.munoz@upt.edu.mx](mailto:magda.munoz@upt.edu.mx)



## DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 es un estándar para WLAN, y se encarga de la implementación y funcionamiento de dichas redes, su objetivo es desarrollar un control de acceso al medio (MAC) y especificar la capa física para su interconexión inalámbrica en estaciones fijas, portables y móviles dentro de un área local.

Uno de los principales métodos de acceso utilizado por el estándar IEEE 802.11, es la DCF que utiliza el protocolo Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Evasión de Colisiones (CSMA/CA), para permitir a los usuarios competir por el medio inalámbrico. Bajo este esquema los paquetes de datos se transmiten a través de dos mecanismos:

**Mecanismo de Acceso Básico.**

**Mecanismo RTS/CTS.**

**Fragmentación.**

### Modelo analítico

A lo largo de esta sesión, exponemos los resultados de [Vishnevskii2003]. Consideraremos una red LAN inalámbrica con  $N$  estaciones activas con un paquete para transmitir, estadísticamente homogéneas, trabajando bajo condiciones de saturación. Que las estaciones son estadísticamente homogéneas significa que:

- 1) La longitud del paquete de datos seleccionado en cada estación será de igual tamaño, denotada como  $\{d_i, i = 1, \dots, l_{\max}\}$ .
- 2) Los valores del umbral de fragmentación  $(L_f)$  y  $\bar{P}$ , sean iguales en todas las estaciones.
- 3) El retardo de propagación,  $\delta$ , sea el mismo para todas las estaciones.

La operación de la red LAN inalámbrica se subdivide en ranuras virtuales no uniformes, de modo que cada estación pueda cambiar su contador de retardo y, cuando llega a cero, puede iniciar su transmisión.

Estas ranuras virtuales se definen como: Vacía ( $p_e$ ) cuando no transmite la estación, Exitosa ( $p_s$ ) cuando una y solo una estación transmite y Colisión ( $p_c$ ) cuando dos o más estaciones transmiten.



En el modelo analítico estudiaremos tres casos, con los cuales obtendremos principalmente los valores del rendimiento y la probabilidad de rechazo en la transmisión de paquetes de datos: El primer caso, si  $I < \max(\bar{P}, L_f)$ , los paquetes de datos son transferidos mediante el mecanismo de acceso básico; En el segundo caso, si  $\bar{P} < I \leq L_f$ , usamos el mecanismo RTS/CTS; por último el tercer caso, si  $L_f < I$ , los paquetes de datos son divididos en tramas cortas y son transmitidos mediante fragmentación.

**Caso 1.** Si  $I < \max(\bar{P}, L_f)$ , para obtener la probabilidad de rechazo y el rendimiento de la transmisión de paquetes de datos, utilizaremos las siguientes fórmulas:

La probabilidad de rechazo de la transmisión de paquetes de datos, denotada por  $p_{rej}(I)$ , se obtiene mediante

$$p_{rej}(I) = [\pi_{cd}(I)]^{N_s},$$

donde  $N_s$  es el número máximo de intentos cortos de transmisión;  $\pi_{cd}(I)$ , obtenida en (1).

El rendimiento, denotado por  $S$ , se determina por

$$S = p_s \sum_{l=l_{\min}}^{l_{\max}} \sum_{k=0}^{K(l)} \frac{8l\pi_h(l,k)\hat{d}_{lk}}{[\hat{p}_e\sigma + \hat{p}_sT_s + \hat{p}_cT_c]},$$

donde el rendimiento es la relación de la sumatoria de la transmisión de un paquete relacionada a una cadena de datos  $(l,k)$ ;  $T_s$  y  $T_c$  son los tiempos promedios de duración de una ranura en colisión y una ranura con éxito respectivamente;  $\pi_h(l,k)$  es la probabilidad de transmisión de un paquete de longitud  $l$  de un intento asociado a una cadena  $(l,k)$  llevado acabo exitosamente;  $\hat{p}_e$ ,  $\hat{p}_s$  y  $\hat{p}_c$  se obtienen de (3),  $\underline{T_s}$ ,  $\underline{T_c}$  y  $\pi_h(l,k)$  se definen en [Vishnevskii2003].

**Caso 2.** Si  $\bar{P} < I \leq L_f$ , en este caso, el número de transmisiones de tramas RTS estará limitado por número máximo de intentos largos, denotado por  $N_d$ , cada una de estas transmisiones puede ser precedida por un número intentos infructuosos  $0, \dots, N_s - l$  de transferir una trama RTS.

Para obtener la probabilidad de rechazo y el rendimiento de la transmisión de paquetes, utilizaremos las siguientes fórmulas:



La probabilidad de rechazo para un paquete de longitud  $l$  la obtenemos mediante

$$p_{rej} = \sum_{i_d=0}^{N_d - l N_s + i_d (N_s - l)} \zeta_l^r(i_d, i_r) + \sum_{i_r=0}^{N_d (N_s - l)} \zeta_l^d(i_r).$$

Para obtener el rendimiento  $S$ , para este **caso 2**, se modifica de la fórmula (3) a la fórmula (8), sustituyendo en ellas el valor  $N_s$  por  $i_m^l$ , obtenido en (9).

**Caso 3.** Si  $L_f \leq l$ , para el cálculo de la probabilidad de rechazo y del rendimiento de la transmisión de paquetes datos, se considera la fragmentación del paquete de datos para su transmisión, los fragmentos se transmiten, si y solo si, cumplen las siguientes condiciones:

- Todos los fragmentos se han transferido exitosamente y los contadores  $n_s$  o  $n_d$  no han alcanzado su límite.
- Si el primer intento de transmisión de la primera trama de datos o del resto de ellas o bien una trama ACK, fue distorsionada alcanzando su límite de retransmisiones  $N_s$  y  $N_d$ .

La probabilidad de rechazo de paquetes por fragmentación es

$$p_{rej}(l) = p_{rej}(L_f) + \sum_{k=l}^{K(l)-l} p_{rej}(L_f) z_{l,k} + \bar{p}_{rej}(r_l^0) z_{l,0}.$$

Para obtener el rendimiento  $S$ , para este **caso 3**, se modifica de la fórmula (3) a la fórmula (8), sustituyendo en ellas el valor  $N_s$  por  $I_m(l)$ , obtenido en (19).



## Resultados numéricos

**Caso 1.** Mecanismo de acceso básico, si  $I \leq \text{Max}(P, Lf)$ , para la transmisión de los paquetes de datos consideraremos un paquete con una longitud  $I = 350$  bytes, menor al umbral  $P$  y al umbral  $Lf$ , una red inalámbrica con  $N = \{5, \dots, 50\}$  estaciones activas y el límite de intentos de retransmisión dado por  $i = 7$ .

Los resultados numéricos del comportamiento del rendimiento y de la probabilidad de rechazo, se presentan en la Tabla 3.3.

Estación	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Prej	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.0
S	1.15	1.04	8.87	7.60	6.55	5.68	4.95	4.33	3.81	3.3

Tabla 3.3: Rendimiento (S) y Probabilidad de rechazo (prej).

A partir de los datos de la Tabla 3.3 podemos analizar el comportamiento de S y de prej. Para una WLAN con 5 estaciones obtenemos un valor para  $S = 1,15 \times 6$  bits/s y  $\text{prej} = 0,0360$ , si se incrementa el número de estaciones activas los valores de S decrecen y los valores de prej incrementan.

**Caso 2.** Mecanismo RTS/CTS, si  $P < I \leq Lf^m$ , para la transmisión de los paquetes de datos consideramos un paquete con una longitud  $I = 450$  bytes, mayor al umbral  $P$  y menor al umbral  $Lf$ , una red inalámbrica con  $N = \{5, \dots, 50\}$  estaciones activas y el límite de intentos de retransmisión dado por  $i = 25$ . Obteniendo los resultados numéricos del comportamiento del rendimiento y de la probabilidad de rechazo, presentados en la Tabla 3.4.

Estaciones	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Prej	0	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.0
S	8	8.11	7.78	7.38	6.93	6.44	5.91	5.37	4.82	4.2

Tabla 3.4: Rendimiento (S) y Probabilidad de rechazo (prej).

A partir de los datos de la Tabla 3.4 podemos analizar el comportamiento de S y de prej. Para una WLAN con 5 estaciones obtenemos un valor para  $S = 8,33 \times 6$  bits/s y  $\text{prej} = 0,0573$ , si se incrementa el número de estaciones activas los valores de S decrecen y los valores de prej incrementan.



**Caso 3.** Mecanismo de fragmentación, si  $\mu f < l$ , para la transmisión de los paquetes de datos consideraremos un paquete con una longitud  $l = 2000$  bytes, mayor al umbral  $L_f$ , el cual es fragmentado en tramas de  $K(l) = 3$  con tamaño  $r_1 = 1800$  y  $r_0 = 200$ , una red inalámbrica con  $N = \{5, \dots, 50\}$  estaciones activas y el límite de intentos de retransmisión dado por  $Im(l) = 65$ . Obteniendo los resultados numéricos del comportamiento del rendimiento y de la probabilidad de rechazo, presentados en la Tabla 3.5

Estación	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Prej	0.12	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.1
S	1.15	1.24	1.16	1.06	9.48	8.48	7.57	6.77	6.05	5.4

Tabla 3.5: Rendimiento (S) y Probabilidad de rechazo (prej).

## REFERENCIAS

- [1] Alizadeh. F., *A Finite Load Analytical Model for the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function MAC*. Proc. of WiOPT'03: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, INRIA. Sophia Antipolis, France, pp. 3-5, 2003.
- [2] Anurag. K., *Wireless Networking*. Elsevier, 2008.
- [3] Bianchi. G., *Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 18. No. 3, 2000.
- [4] Cali. M. C., *IEEE 802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 18. NÂo 9, 2000.
- [5] Chatzimisios. P., *Packet Delay Analysis of the Advanced Infrared (Air) CSMA/CA MAC protocol in optical wireless LANs*. International Journal of Communications Systems. Tomo 18, 2005.
- [6] Choo. K. L., *Performace Analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA Me- dium Access Control Protocol*. In Preceedings of the 7th IEEE international Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Comunications (PIMRC96). Taipei. Taiwan, P 407-411,, 1996.
- [7] Ho. T.S., *Performace Analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA Medium Access Control Protocol*. In Preceedings of the 7th IEEE international Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Comunications (PIMRC'96). Taipei. Taiwan, 1996.
- [8] IEEE. *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. P802.11, 1997.
- [9] Sánchez. B. M., *Modelo realista para la Función de Coordinación Distribuida del Estándar IEEE 802.11b*. Univ. Tarapacá, vol. 13 No. 3, pp. 96-103, 2005.
- [10] Schriber. T.J., *Simulation using GPSS*. Jonh Wiley & Sons, 1974.
- [11] Sóbol. T.J., *Lecciones populares de matemáticas, Método Montecarlo*. Mir, Moscú Rusia, 1993.
- [12] VishnevKii. V. M., *Optinal Tool of the Wi Fi Protocol: Study in Saturation. Distributed Modelling Comunication Networks*, Moscow Russia, 2003.



- [13] Vishnevskii. V. M., A Wireless Lan Under High Load and in Noise: Throughput Evaluation. Automation and remote control. Vol. 62. No. 8, 2001.
- [14] Vishnevskii. V. M., 802.11 LANs: Saturation Throughput in the Presence of Noise. In Proceeding of the 2nd International IFIP TC6 Net- working Conference (Networking 2002). Pisa, Italy. Lecture Notes in Computer Science. 2345:1008-1019, Spring-Verlag, 2002.
- [15] Vishnevskii. V. M., IEEE 802.11 Wireless LAN: Saturation Throughput Analysis with Seizing Effect Consideration. Cluster Computing, 5(2). P 535-548, 2002.
- [16] Weinmiller. J., Performance Study of Access Control in Wireless LAN's IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HYPERLAND. Mobile Networks and Applications. P 55-76, 1997.
- [17] Wu. K. L., Performance of reliable transport protocol to achieve a theoretical throughput limit. IEEE INFOCOM 2002, pp. 599-607, 2002.
- [18] Wu. Y., Performance Analysis of CSMA/CA Protocol for High Speed Wireless LANs,. International Transactions in Operational Research. Vol. 9,, 2001.



# Modelación estocástica del protocolo CSMA/CA para redes inalámbricas

M. Muñoz-Pérez<sup>1</sup>, F. J. Albores-Velasco<sup>2</sup>, E. González-Gutiérrez<sup>3</sup>

**Resumen—** En este trabajo proponemos un modelo estocástico para el protocolo WLAN, CSMA/CA. Suponemos que el periodo de transmisión, de retardo y de detección de colisiones no son necesariamente variables aleatorias exponenciales. Además, en caso de colisiones, el nodo emisor, espera un periodo de tiempo y posteriormente intenta retransmitir. El modelo se basa en el estudio de Procesos Linealizados de Markov y Semi-Markovianos. Se describen las características de la red, como es el promedio de nodos activos (en el régimen estacionario), el periodo de trasmisión y la capacidad de la red.

**Palabras clave—** IEEE standard, CSMA/CA, Procesos Linealizados de Markov, Procesos Semimarkovianos.

## INTRODUCCIÓN

En la última década ha habido una intensa investigación en el desarrollo de nuevas tecnologías para redes inalámbricas y uno de los aspectos más importantes es el diseño de protocolos eficientes. Los modelos analíticos son una herramienta fundamental para describir sistemas reales o modelos de simulación estándar. Este tipo de modelos se pueden usar también para verificar programas de simulación grandes, proporcionando resultados exactos para subcasos del modelo simulado. Además, la investigación en modelos analíticos es necesaria para el desarrollo de protocolos nuevos y eficientes [1].

Las redes de área local inalámbrica (WLAN) se están desarrollando de tal manera que, para usuarios en un área geográfica delimitada, proporcionen un amplio ancho de banda. Éstas se pueden usar en diferentes lugares como oficinas, universidades o centros comerciales.

Para acceder al medio, el estándar IEEE 802.11 emplea el protocolo: Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Evasión de Colisiones (CSMA/CA). Por su utilidad, ha habido varios intentos de modelarlo y descubrir las regiones más óptimas.

En [6], se desarrolla una aproximación de modelación para evaluar el rendimiento de saturación, basados en argumentos de probabilidad condicional; en [9] se presenta un análisis para evaluar numéricamente el rendimiento del protocolo, mediante cadenas inducidas de Markov.

M. Muñoz-Pérez<sup>1</sup> (✉), F. J. Albores-Velasco<sup>2</sup>, E. González-Gutiérrez<sup>3</sup>  
<sup>1,3</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo, <sup>2</sup> Universidad Autónoma de Tlaxcala  
e-mail: <sup>1</sup> [magda.munoz@upt.edu.mx](mailto:magda.munoz@upt.edu.mx)



En nuestra propuesta, consideramos que los tiempos de transmisión no son necesariamente exponenciales y consideramos también como variables aleatorias generales los tiempos de detección de la colisión y la solución del conflicto. Como resultado del modelado, se obtienen fórmulas para calcular las principales características del funcionamiento de la red en el régimen estacionario: el promedio de terminales activas, el tiempo medio de estancia en la red, la capacidad de tráfico y las tiempos de estancia en cada uno de los estados que se destacan en el modelo: canal libre, canal transmitiendo, canal detectando colisión y canal resolviendo colisión.

La herramienta utilizada en el modelado fue la de los procesos semimarkovianos, que nos permitieron considerar variables no necesariamente exponenciales, y los procesos linealizados de markov, que nos permitieron construir las densidades para estados definidos como un conjunto finito de semi-rectas.

En la Sección I, damos una breve descripción del protocolo, en las Secciones II, III y IV realizamos la construcción del modelo matemático. En las secciones V, VI y VII presentamos la solución del sistema, así como sus características de rendimiento.

## I. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Consideramos una Red de Área Local Inalámbrica, WLAN (Wireless Local Area Networks), que consiste de  $M$  terminales idénticas en un canal virtual,  $M < \infty$ . Cada terminal tiene un único lugar de espera. Una terminal con un paquete para transmitir se denominará *activa* y, en caso contrario, *pasiva*.

En estado pasivo cada terminal permanece un tiempo aleatorio distribuido exponencialmente con parámetro  $\lambda$ , por lo que la intensidad del flujo total de comunicaciones generadas (nuevas) es:

$$\lambda_n = \lambda(M - n),$$

donde  $n$  es el número de terminales activas,  $n = 0, \dots, M$ , véase [2].

Una terminal con un paquete de datos para trasmitir, denominada *terminal fuente*, necesita, primero, conocer el estado del canal, para lo que transmite un paquete corto, llamado RTS, Request to Send, hacia la *terminal destino*. Si la terminal destino lo recibe correctamente, responde enviando un paquete de autorización para transmitir, denominado CTS, Clear to Send, que, si se recibe, permite a la terminal fuente transmitir el paquete de datos. Si la terminal fuente no recibe el paquete CTS en un tiempo específico, ésta supone que el canal estaba ocupado y que se produjo una *colisión*. En este caso, la terminal intenta retransmitir después de un tiempo aleatorio.

Suponemos que la duración de la transmisión del paquete RTS es una variable aleatoria  $\tau_1$ , con función de distribución (FD)  $B_1(x)$ , y que descubrir la colisión toma un tiempo aleatorio  $\tau_3$  con FD  $B_3(x)$ . Consideramos que la duración de la transmisión del paquete de datos (longitud del paquete) es una variable aleatoria  $\tau_2$  con FD  $B_2(x)$ .



Cuando se descubre una colisión, las terminales que tienen paquetes para transmitir, retrasan su transmisión un tiempo aleatorio distribuido exponencialmente con parámetro  $\nu$ . Después de que se termina el tiempo de retraso de éstas terminales, y si el canal no se ha desocupado, se genera un nuevo tiempo aleatorio.

Una vez descubierta una colisión, se inicia su solución, lo que toma un tiempo aleatorio  $\tau_0$  con  $\text{FD } B_0(x)$ . Consideramos que  $E\tau_i = \mu_i^{-1} < \infty$ , para  $i = 0, 1, 2, 3$ . Después de la liberación del canal, si únicamente una terminal transmite, ocurre una *transmisión exitosa*; al concluir una transmisión exitosa la terminal activa se convierte en pasiva.

Consideremos un proceso estocástico  $\xi(t), t \geq 0$ , definido sobre el espacio de estados:

$$x = \{(n), n = 0, \dots, M; (j, n, x), j = 0, \dots, 2, n = (2 - j), \dots, M; (n, x), n = 2, \dots, M; x \geq 0\}$$

Aquí, estamos considerando que los estados del proceso tienen diferente número de componentes, cuya interpretación, para algún momento  $t$ , es la siguiente:

- $\xi(t) = (n)$ , denota el caso cuando el canal está libre y en el sistema hay  $n$  terminales activas.
- $\xi(t) = (j, n, x)$ , para  $j = 0, 1, 2, n = 2 - j, \dots, M$ , con  $x \geq 0$ , denota, para  $j = 0$ , que el canal está resolviendo una colisión; para  $j = 1$  que el canal se encuentra transmitiendo el paquete RTS y, para  $j = 2$  que el canal se encuentra transmitiendo el paquete de datos, que hay  $n$  terminales activas y que transcurrió un tiempo  $x$  desde el inicio de la solución del conflicto ( $j = 0$ ) o desde el inicio de la transmisión del paquete RTS ( $j = 1$ ), o desde el inicio de la transmisión de datos ( $j = 2$ ).
- $\xi(t) = (n, x)$ , denota que se hay  $n$  terminales activas y que el tiempo transcurrido desde la detección del conflicto es  $x$ .

En cualquiera de los casos, la componente discreta de los estados pertenece a un conjunto finito y la consideración adicional del tiempo de estancia hace que el espacio de estados tenga una subconjunto finito, debido a estados del tipo  $(n)$ , para  $n = 0, \dots, M$  y un subconjunto finito de semi-rectas, los estados del tipo  $(j, n, x)$  y  $(j, x)$  para  $j = 0, 1, 2, n = 2 - j, \dots, M$ , y  $x \geq 0$ . Esto nos permitirá, en la construcción del modelo, utilizar las herramientas de los procesos semimarkovianos (los tiempos de estancia en los estados de tipo  $j = 0, 1, 2, 3$ . no necesariamente exponenciales) [2], y las de los procesos linealizados de Markov, propuestos en [4].

## II. TRANSICIONES ENTRE LOS ESTADOS DEL PROCESO

En esta sección vamos a analizar las posibles transiciones y vamos a mostrar que, en los momentos de cambio de estado, es posible construir una cadena de Markov.



Cuando nos encontramos en estados del tipo  $\xi(t) = (n), n = 0, \dots, M$ , existen dos posibles transiciones:

- I) Si una terminal pasiva se convierte en activa, inicia la transmisión de su paquete RTS y, por tanto,

$$(n) \rightarrow (1, n + 1, 0).$$

- 2) Si a una terminal activa se le termina el tiempo de retraso de la transmisión, pasa al estado de inicio de transmisión del RTS ( $x = 0$ ), hay  $n$  terminales activas y una está transmitiendo, esto es,

$$(n) \rightarrow (1, n, 0), n \neq 0.$$

Cuando nos encontramos en estados del tipo  $(j, n, x)$  es decir, transmitiendo el paquete RTS ( $j = 1$ ), resolviendo un conflicto ( $j = 0$ ) o transmitiendo el paquete de datos ( $j = 2$ ), analizamos las transiciones para cada valor de  $j$ .

Si nos encontramos en estados del tipo  $(0, n, x)$  son posibles las siguientes transiciones:

- Si una terminal pasiva se convierte en activa, tenemos

$$(0, n, x) \rightarrow (0, n + 1, x), \quad n = 2, \dots, M.$$

- Si concluye la solución del conflicto y ninguna terminal pasiva, de las  $M - n$  restantes, se convierte en activa, entonces

$$(0, n, x) \rightarrow (n), \quad n = 2, \dots, M.$$

Si consideramos estados del tipo  $(1, n, x)$  tenemos:

- I) Si concluye la transmisión del RTS, ninguna terminal pasiva se convierte en activa y a ninguna terminal activa se le termina el tiempo de retraso, entonces inicia la transmisión del paquete de datos

$$(1, n, x) \rightarrow (2, n, 0), \quad n = 1, \dots, M.$$

- 2) Si una terminal pasiva se convierte en activa, entonces se provoca una colisión con el paquete de datos,

$$(1, n, x) \rightarrow (n + 1, 0), \quad n = 1, \dots, M.$$



De los estados del tipo  $(2, n, x)$  son posibles las siguientes transiciones:

- 1) Si concluye la transmisión exitosa del paquete de datos y ninguna terminal pasiva, de las  $M - n$  restantes, se convierte en terminal activa y a ninguna de las  $n - 1$  activas se les termina el retraso, entonces pasa a un estado con  $n - 1$  terminales activas en espera de transmisión,

$$(2, n, x) \rightarrow (n - 1), \quad n = 1, \dots, M.$$

- 2) Si una terminal pasiva se convierte en activa, inicia el tiempo de detección de un nuevo conflicto esto es,

$$(2, n, x) \rightarrow (n + 1, 0), \quad n = 1, \dots, M.$$

Cuando  $\xi(t) = (n, x)$  y una de las  $M - n$  terminales pasivas se convierte en activa y no se ha terminado la detección de la colisión, pasamos a un estado con  $n + 1$  terminales activas

$$(n, x) \rightarrow (n + 1, x), \quad n = 2, \dots, M.$$

Ahora, si termina el tiempo de detección de la colisión, pasamos al estado en el que se inicia la solución del conflicto, y hay  $n$  máquinas activas, es decir,

$$(n, x) \rightarrow (0, n, 0), \quad n = 2, \dots, M.$$

## DISTRIBUCIONES DEL PROCESO

Ahora, estudiaremos algunas de las propiedades de las funciones de distribución para el proceso  $x(t)$ . Para esto, consideremos las siguientes probabilidades:

$$P(n, t) = Pr\{\xi(t) = (n)\}, \quad n = 0, \dots, M \tag{1}$$

$$P_j(n, t, x) = Pr\{\xi(t) \in \{(j, n) \otimes (0, x)\}\} \tag{2}$$

para  $j = 0, n = 2, \dots, M$  y para  $j = 1 \text{ ó } 2, n = 1, \dots, M$

$$P_3(n, t, x) = Pr\{\xi(t) \in \{(n) \otimes (0, x)\}\}, \quad n = 2, \dots, M \tag{3}$$



Además, vamos a denotar por  $p$  a las correspondientes densidades de probabilidad, es decir,

$$P(n) = \frac{d}{dt} P(n, t),$$

$$P_j(n, t, x) = \frac{d}{dt} P(n, t, x), \quad j = 1, 2, 3$$

Finalmente, definamos las probabilidades estacionarias

$$P(n) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(n, t),$$

$$P_j(n, x) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_j(n, t, x), \quad j = 1, 2, 3.$$

En la teoría general de los procesos linealizados [4], [2], [7] se demuestra que tiene lugar, reformulado para nuestro modelo, el siguiente teorema:

**Teorema I:** Supongamos que para las funciones de distribución (1), (2) y (3) existen las funciones de densidad  $P_j(n, 0, x)$ ,  $j = 1, 2, 3$  para las cuales

$$q_j(n, x) = \frac{p_j(n, 0, x)}{1 - B_j(x)} \leq C < \infty, \quad (4)$$

para  $j = 0$  ó  $3$  y  $n = 2, \dots, M$ ;  $j = 1$  ó  $2$  y  $n = 1, \dots, M$ , son funciones continuas. Entonces, para cada  $t > 0$ , existen las densidades  $P_j(n, t, x)$ ,  $j = 1, 2, 3$ , tales que,

$$q_j(n, t, x) = \frac{p_j(n, t, x)}{1 - B_j(x)} \leq C < \infty, \quad (5)$$

para  $j = 0$ ,  $n = 2, \dots, M$ ;  $j = 1, \dots, 3$ ,  $n = 1, \dots, M$ ,

Puesto que el proceso  $\xi(t)$  cumple con las condiciones del teorema ergódico de Beljaev [4], esto es, tenemos el subconjunto finito de estados del tipo  $(n)$ , un subconjunto finito de semi-rectas  $(n, x)$  y si además, considerando los momentos de salto de la cadena inducida de Markov, ésta es transitiva, entonces existe una única distribución estacionaria del proceso  $\xi(t)$  con las densidades:

$$p_j(n, x) = q_j(n, x)[1 - B_j(x)], \quad (6)$$

para  $j = 0$  ó  $3$  y  $n = 2, \dots, M$ ;  $j = 1$  ó  $2$  y  $n = 1, \dots, M$ , donde

$$q_j(n, x) \leq C < \infty.$$



## EL MODELO INTEGRO-DIFERENCIAL

Para hallar el modelo que describe el funcionamiento del protocolo, vamos a analizar las posibles transiciones que puede tener el proceso  $\xi(t)$  en el intervalo de tiempo  $[t, t + \Delta t]$ , para lo cual vamos a considerar, por separado, los diferentes tipos de estados del espacio  $x$ .

**Teorema 2:** El funcionamiento del modelo del protocolo CSMA/CA se describe por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales

$$q'_j(n, x) = -\lambda_n q_j(n, x) + u(n-2)\lambda_{n-1}q_j(n-1, x)], \quad (7)$$

para  $j = 0, j = 3$  y  $n = 2, \dots, M$ ;

$$q'_j(n, x) = -\lambda_{nn1}q_j(n, x), \quad n = 1, \dots, M, \quad j = 1, 2; \quad (8)$$

con las condiciones de frontera

$$p(n)\lambda_{nn0} = u(M-n) \int_0^\infty q_2(n+1, x) dB_2(x) + u(n-1) \int_0^\infty q_0(n, x) dB_0(x), \quad (9)$$

para  $n = 0, \dots, M$ ;

$$p_3(n, 0) = \lambda_{n-1} \int_0^\infty p_2(n-1, x) dx + \lambda_{n-1} \int_0^\infty p_1(n-1, x) dx \quad (10)$$

para  $n = 2, \dots, M$ ;

$$\begin{aligned} p_2(n, 0) &= \int_0^\infty q_1(n+1, x) dB_1(x), \quad n = 1, \dots, M, \\ p_1(n, 0) &= p(n)nv + p(n-1)\lambda_{n-1}, \quad n = 1, \dots, M, \\ p_2(n, 0) &= \int_0^\infty q_1(n+1, x) dB_1(x), \quad n = 1, \dots, M, \end{aligned} \quad (11)$$

donde  $u(x)$  es la función de Heaviside

$$u(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x \leq 0, \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

y

$$\begin{aligned} \lambda_{nki} &= \lambda(M-k) + v(n-i), \\ \lambda_n &= \lambda(M-n). \end{aligned}$$



La demostración de este teorema es constructiva.

### SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES

**Teorema 3:** La solución del sistema de ecuaciones (7)-(11) tiene la forma

$$q_j(n, x) = e^{-\lambda_n x} \sum_{k=2}^n \binom{M-k}{n-k} (1 - e^{-\lambda x})^{n-k} q_j(k, 0), \quad (12)$$

para  $j = 0$  o  $3$  y  $n = 2, \dots, M$ ;

$$q_j(n, x) = e^{-\lambda_{nm_1} x}, \quad (13)$$

para  $i = 1$  o  $2$  y  $n = 1, \dots, M$ ;

### ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

Para analizar las condiciones de frontera, tendremos que re-escribir algunas expresiones. El desarrollo en serie de Taylor de la exponencial y el desarrollo de un binomio permiten obtener que

$$(1 - e^{-\lambda x})^{n-k} = \sum_{m=0}^{n-k} \binom{n-k}{m} (-1)^m e^{-\lambda mx},$$

Ahora, sustituyendo en (7),

$$\begin{aligned} q_j(n, x) &= e^{-\lambda_n k} N_{M,k,0} \sum_{m=0}^{n-k} \binom{n-k}{m} (-1)^m e^{-\lambda mx} q_j(k, 0), \\ &= N_{M,k,0} \sum_{m=0}^{n-k} \binom{n-k}{m} (-1)^m e^{-\lambda(M-n+m)x} q_j(k, 0), \end{aligned}$$

para  $j = 0$  o  $3$ . Usando la definición de la transformada de Laplace-Stieljes de una función de distribución [3], tenemos que

$$\int_0^\infty e^{-\lambda_{n-m} x} dB_j(x) = \beta_j(\lambda_{n-m}), \quad j = 0 \text{ ó } 3,$$



por lo tanto,

$$\int_0^\infty q_j(n, x) dB_j(x) = \int_0^\infty N_{M,k,0} \sum_{m=0}^{n-k} \binom{n-k}{m} (-1)^m e^{-\lambda_{n-m}x} q_j(k, 0) dB_j(x),$$

$$N_{M,k,0} \sum_{m=0}^{n-k} \binom{n-k}{m} (-1)^m \beta_j(\lambda_{n-m}) q_j(k, 0),$$

para  $j = 0$  o  $3$ . Introduzcamos la siguiente notación:

$$C_{jnk} = \sum_{m=0}^{n-k} \binom{M-k}{n-k} \binom{n-k}{m} (-1)^m \beta_j(\lambda_{n-m}),$$

para  $j = 0$  o  $3$ ,  $n = 1, \dots, M$  y  $k = 2, \dots, n$ .

Con esta notación tendremos, finalmente, que

$$\int_0^\infty q_j(n, x) dB_j(x) = \sum_{m=0}^{n-k} C_{jnk} q_j(k, 0),$$

para  $n = 1, \dots, M$  y  $j = 0$  o  $3$ .

Análogamente, de (13) y por la definición de la Transformada de Laplace-Stieljes, tenemos

$$\int_0^\infty q_i(n, x) dB_i(x) = \int_0^\infty e^{-\lambda_{nn1}x} dB_i(x) = \beta_i(\lambda_{nn1}),$$

donde  $i = 1$  o  $2$  y  $n = 1, \dots, M$  Con base en lo anterior podemos enunciar el siguiente:

**Teorema 4:** Las condiciones de frontera pueden calcularse a partir de las siguientes fórmulas

$$p(n) = u(n-1) \frac{1}{\lambda_{nn0}} \sum_{k=2}^n C_{0nk} q_0(k, 0) + u(M-n) \frac{\beta_2(\lambda_{nn1})}{\lambda_{nn0}}$$

para  $n = 0, \dots, M$ ;

$$p_0(n, 0) = \sum_{k=2}^n C_{3nk} q_3(k, 0), \quad n = 2, \dots, M.$$

$$p_1(n, 0) = \lambda_{n-1} p(n-1) + vnp(n), \quad n = 1, \dots, M.$$

$$p_2(n, 0) = \beta_1(\lambda_{nn1}), \quad n = 1, \dots, M.$$

$$p_3(n, 0) = \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1,n-1,1}} [2 - \beta_1(\lambda_{n-1,n-1,1}) - \beta_2(\lambda_{n-1,n-1,1})],$$

para  $n = 2, \dots, M$ ;



## PROBABILIDADES ESTACIONARIAS

Para concluir nuestro análisis, en esta sección vamos a presentar un resultado que nos proporciona las fórmulas de cálculo de las probabilidades estacionarias de nuestro sistema, mismas que servirán para obtener las características de su funcionamiento, sus índices de productividad, en términos de sus parámetros.

**Teorema 5:** Las probabilidades estacionarias están dadas por las expresiones

$$p_j(n) = \frac{1}{\sum_{n=1}^M p_j(n-1)} \left[ q_j(n, 0) - \sum_{k=2}^n \bar{c}_{jk} q_j(k, 0) \right],$$

para  $j = 0$  o  $3$  y  $n = 2, \dots, M$ ;

$$p_j(n) = p_j(n) = \frac{1}{\sum_{n=1}^M} \{ q_j(n, 0) - b_j(\sum_{m=1}^M) \},$$

para  $j = 1$  o  $2$  y  $n = 1, \dots, M$ ;

Para obtener estas fórmulas se hace uso del Teorema 1 y del conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el modelo del funcionamiento del protocolo. De acuerdo con la distribución estacionaria obtenida es posible calcular los principales índices de productividad, en el régimen estacionario, de la red. El canal se puede encontrar en alguno de los cuatro tipos de estados que definimos en capítulos anteriores: libre, transmitiendo, descubriendo un conflicto o resolviendo un conflicto. Sea

$$p_l = p(\times) = \sum_{n=0}^M p(n),$$

$$p_d = p_0(\times) = \sum_{n=2}^M p_0(n),$$

$$p_t = p_l(\times) = \sum_{n=1}^M p_l(n),$$

$$p_{t_2} = p_2(\times) = \sum_{n=1}^M p_2(n),$$

$$p_r = p_3(\times) = \sum_{n=2}^M p_3(n).$$

Si denotamos el promedio de terminales activas por  $\bar{n}$ , tenemos



$$\bar{n} = \sum_{n=0}^M [p(n) + u(n)(p_1(n) + p_2(n) + u(n-1)(p_0(n) + p_3(n))].$$

De aquí, podemos determinar la intensidad de salida del sistema,  $\bar{l}_D$ , de las transmisiones exitosas [2]

$$\bar{l}_D = \bar{l}(M - \bar{n}).$$

Al conocer las características  $\bar{n}$  y  $\bar{l}_D$  podemos encontrar el tiempo medio de estancia de un paquete:

$$\bar{w} = \frac{\bar{n}}{\bar{l}_D}.$$

La capacidad de tráfico del canal:

$$\bar{u} = \frac{\bar{l}_D}{m}.$$

## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el análisis del protocolo CSMA/CA. Se demostró que el uso de los procesos linealizados de Markov es adecuado para su modelado. Las características, índices de productividad del sistema, se encontraron en una forma explícita en términos de las probabilidades estacionarias calculadas.

Los resultados obtenidos son generales, ya que consideran la posibilidad de utilizar una amplia gama de distribuciones para los tiempos de transmisión del paquete, de detección y solución del conflicto, con el único requisito de tener primer momento.

## REFERENCIAS

- [1] Anurag Kumar, D. Manjunath, Joykury. "Wireless Networking". Ed. Elsevier. 2008.
- [2] Albores F.J., Bocharov P.P., Pechinkin. "Teoría de Colas". Universidad Autónoma de Tlaxcala. Primera Edición. 1997.
- [3] Bateman. "Tables of integral transforms". Mc Graw Hill, vol. 2. 1954.
- [4] Beljaev Ju. K. "Line Markov Processes and their Application to Problems of the Theory of Reliability". Selected Trans. Math. Statist. and Prob. Vol 9. 1970.
- [5] Boyce-Diprima." Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems". John Wiley&Sons, Inc. Seventh edition. 2001.



- [6] Chatzimios P., Boucouvaos A.C. "Packet Delay Analysis of the Advanced Infrared (Air) CSMA/CA MAC protocol in optical wireless LANs". International Journal of Communications Systems. Tomo 18. 2005.
- [7] Muñoz Pérez Magda, Albores Velasco Javier F. "Modelación de Políticas de Reemplazo de la Teoría de la Fiabilidad mediante Procesos Linealizados de Markov". Aportaciones y Aplicaciones de la Probabilidad y la Estadística. Vol. 3. 2009.
- [8] Richard Haberman. Elementary Applied Partial Differential Equation with Fourier Series and Boundary. Prentice Hall, Upper Saddle River NJ07458, 1998.
- [9] Wuy Yue., Yutaka Matsumoto. "Performance Analysis of CSMA/CA Protocol for High Speed Wireless LANs". International Transactions in Operational Research. Vol. 9. 2001.



# Estudio de sensibilidad paramétrico del método de relajación para sistemas lineales semi-infinitos

J. Barrera-Ángeles<sup>1</sup>, E. González-Gutiérrez<sup>2</sup>, M. Muñoz-Pérez<sup>3</sup>, E. León-Olivares<sup>4</sup>

**Resumen—** En este trabajo se realiza un estudio paramétrico del método de Relajación extendido aplicable a Sistemas Semi-linfinitos Lineales (SSIL), se consideran sistemas dentro de la literatura, se implementa y se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros que se encuentran dentro del método. Finalmente se muestran resultados de la implementación computacional.

**Palabras clave—** Sensibilidad, sistemas semi-infinitos, factibilidad.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas semi-infinitos lineales (en adelante SSIL's), son los sistemas de la forma  $\{a_t'x \geq b_t, t \in T\}$ , donde  $T$  representa un conjunto de índices arbitrario fijo;  $a_t \in R^n$  ( $a_t$  vector columna),  $b_t \in R$  son las imágenes de  $t$ ,  $t \in T$ , por medio de las funciones  $a : T \rightarrow R^n$  y  $b : T \rightarrow R$ , respectivamente ( $a_t'$  indica el vector transpuesto de  $a_t$ ,  $x \in R^n$  y  $a_t'x$  es el producto interior de dichos vectores).

Una cantidad considerable de aplicaciones que se pueden reformular como problemas de programación matemática en donde aparecen de manera natural sistemas con una cantidad infinita de inecuaciones, por ejemplo cuando se estudian problemas de incertidumbre en el peor escenario, en la producción total de un costo farmacéutico, y cuando los parámetros que se involucran en la producción de los mismos sufren cambios de acuerdo a los precios de la materia prima. Dentro del contexto del peor escenario, una variedad interesante de aplicaciones en el área de construcción de viviendas se proporciona en [1]. Los travesaños de las construcciones se esperan que resistan pequeños sismos sin daños y sin demasiados daños reparables tales que la supervivencia de los ocupantes se garantice todo el tiempo. Un simple problema de diseño es minimizar la masa de un construcción sujeta a que los desplazamientos de los techos no excedan un umbral establecido para soportar sismos consecutivos.

También encontramos problemas de PSI en problemas de control, tales como la planeación de trayectorias de un robot [2], la esterilización de comida [3], en el control de contaminación de aire [4], y en el modelado de reducción cinética [5]. Esta última aplicación, es muy importante como herramienta para simulaciones de reacciones de flujo de mecanismos de combustión a gran escala.

J. Barrera-Ángeles<sup>1</sup>, E. González-Gutiérrez<sup>2</sup> (✉), M. Muñoz-Pérez<sup>3</sup>, E. León-Olivares<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo & Universidad Politécnica de Tulancingo, <sup>2,3,4</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo,  
 e-mail: <sup>2</sup> [enrique.gonzalez@upt.edu.mx](mailto:enrique.gonzalez@upt.edu.mx)



Hasta ahora han sido publicados pocos artículo sobre el tratamiento numérico de los SSIL's en  $R^n$  (salvo para sistemas con una estructura dada muy particular, véanse [6]), puesto que la equivalencia computacional del problema de optimización lineal y el problema lineal factible, válido en dimensiones finitas, no es válida para el concepto semi-infinita.

Es obvio que agregando una función objetivo arbitraria a un SSIL dado, digamos  $x \mapsto c'x$ , algún método de PLSI (que no requiera una solución inicial factible) aproxima una solución factible del SSIL, pero las iteraciones suelen ser infactibles (recalcamos que las soluciones óptimas de cualquier problema de PLSI no trivial factible pertenece a la frontera del conjunto factible  $F$ ). Con el fin de evitar este inconveniente, es preferible buscar la máxima bola Euclídea contenida en  $F = \{x \in R^n \mid a_t^i x \geq b_t, t \in T\}$ . Supongamos que  $b_t \leq 0$  para todo  $t \in T$  tal que  $a_t = 0_n$  (de otro modo el conjunto factible,  $F$ , es vacío). Sea  $S = \{t \in T \mid a_t \neq 0_n\}$ ,  $c_t = \frac{a_t}{\|a_t\|}$  y  $d_t = \frac{b_t}{\|a_t\|}$  para todo  $t \in S$ , y considérese el problema de PLSI

Sup  $x_{n+1}$

s.a  $c_t^i x - x_{n+1} \geq d_t, t \in S,$

con variable de decisión  $x \in R^n$  y  $x_{n+1} \in R$ , cuyo valor óptimo en no negativo (positivo,  $+\infty$ ) si, y sólo si, el conjunto factible  $F$ , es no vacío. La ventaja de este modelo es que los métodos numéricos proveen un punto interior cuando el algoritmo se interrumpe en alguna iteración  $(x^r, x_{n+1}^r)$  tal que  $x_{n+1}^r > 0$ .

Las principales clases de SSIL's consistentes en  $R^n$  se pueden agrupar de acuerdo a las propiedades de sus coeficientes, un sistema  $\sigma$  es continuo cuando  $T$  está definido como una unión de intervalos cerrados de  $R$  y todos los coeficientes  $a_1(\cdot), \dots, a_n(\cdot), b(\cdot)$ , son funciones continuas en  $T$ . El sistema  $\sigma$  es polinómico cuando  $T$  es un intervalo compacto y todos los coeficientes  $a_1(\cdot), \dots, a_n(\cdot), b(\cdot)$ , son polinomios cuyo dominio es  $T$ , dentro de los mismos sistemas se distinguen otros tres tipos de sistemas  $\sigma$  localmente Farkas-Minkowsky (LFM), sistemas  $\sigma$  es Farkas-Minkowsky (FM) y sistemas  $\sigma$  localmente poliédrico (LOP).

Estas definiciones se han generado a partir del análisis de resultados de propiedades geométricas importantes en SSIL's y PSIL, véase [7].

La resolución de los SSIL's, es decir, encontrar puntos factibles (llamado problema de factibilidad), se pueden tratar desde el punto de vista de generación de métodos analíticos (es decir exactos) y métodos computacionales, dentro de estos últimos, nuestro interés se ha centrado en analizar el método de Relajación extendido.

En el caso de sistemas ordinarios (sistemas con un número finito de restricciones), el problema de factibilidad es equivalente a resolver problemas de PL, pero esta equivalencia se pierde cuando el número de restricciones es infinito.



## EL MÉTODO DE RELAJACIÓN EXTENDIDO

Este método tiene sus antecedentes en trabajos como los de [8], [9] y [10], de manera general, dado un sistema  $\sigma$  continuo en el que supondremos que  $a_t \in \mathbb{R}^n / \{0_n\}$  para todo  $t \in T$ , de modo que cada inecuación representa un semiespacio, sea  $F$  su conjunto solución. La idea geométrica del método es simple, supongamos que la iteración actual  $x$  es un punto tal que  $x \notin F$ , de entre los hiperplanos asociados con inecuaciones violadas por  $x$  se elige uno de los más alejados de  $x$ , llamémosle  $H$ ; el punto siguiente se obtiene desplazando  $x$  perpendicularmente hacia  $H$  una distancia igual a,  $\lambda d(x, H)$ , donde  $\lambda > 0$  es un parámetro prefijado y  $d(x, H)$  es la distancia Euclídea desde  $x$  hasta el hiperplano  $H = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a_t' x = b_t\}$ , para algún  $t \in T$  tal que  $a_t' x < b_t$  definida por  $d(x, H) = \frac{|a_t' x - b_t|}{\|a_t\|}$ . Entonces el

$$x + \lambda \mu \frac{a_t}{\|a_t\|}$$

punto siguiente viene dado por véase [11].

En particular, si se toma  $\lambda = 2$ , ( $\lambda = 1$ ), el punto siguiente es el punto simétrico a  $x$  respecto de  $H$  (la proyección ortogonal de  $x$  sobre  $H$ , respectivamente), véase la Figura 1.

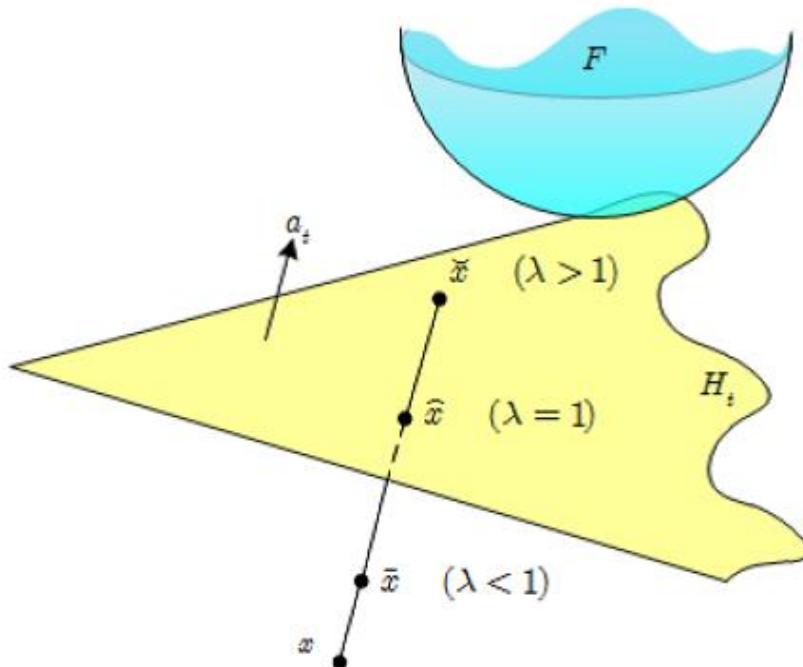


Figura 1. Geometría del método de Relajación extendido.



### Algoritmo (Método de Relajación extendido MRE)

1  $\lambda \in (0,2]$ ,  $M > 2$ ,  $\beta > 2$ ,  $r = 0$  y  $x^0 \in R^n$ .

2 Calcule  $u_r = \inf_{t \in T} g(t, x^r)$  donde  $g(t, x^r) := (a_t^r x^r - b_t)$ .

Si  $u_r \geq 0$ , fin ( $x^r \in F$ ). Si  $u_r < 0$ , sea  $T_r = \{t_r < T / g(t_r, x^r) < 0\}$

3 Sea  $\beta_r = \beta$  y considere el problema de optimización global

$$\sup\left\{\frac{b_t - a_t^r x^r}{\|a_t\|}, t \in T_r\right\} = \mu_r.$$

4 Encuentre una  $\beta_r$  aproximación  $\varepsilon_r$  de la solución  $\mu_r$  del problema ( $\mu_r - \beta_r < \varepsilon_r \leq \mu_r$ ).

Si  $\beta_r < \varepsilon_r(M-1)$ , entonces para algún  $t_r \in T_r$ ,

$\frac{\mu_r}{M} < \varepsilon_r := \frac{b_{t_r} - a_{t_r}^r x^r}{\|a_{t_r}\|} \leq \mu_r$ , y elija  $x^{r+1} = x^r + \lambda \varepsilon_r \frac{a_{t_r}}{\|a_{t_r}\|}$ . Reemplace  $r$  por  $r+1$  y vuelva al paso 2.

Si no es así,  $\beta_r = \frac{\beta_r}{2}$  y vaya al paso 4.

La primera parte de este estudio se centró en el análisis de sensibilidad de los parámetros  $\lambda$ ,  $\beta$  y  $M$  considerando el punto inicial  $x^0 = (34.368772, 82.06698)$  generado de manera aleatoria. El sistema considerado fue  $\sigma = \{2tx_1 - (3t^2 - 2)x_2 \geq -2(t^4 + 3), t \in T\}$  donde  $T = [0,1]$ . El conjunto factible se muestra en la Figura 2, región en blanco, junto con algunos de los puntos que se generaron por el Algoritmo.

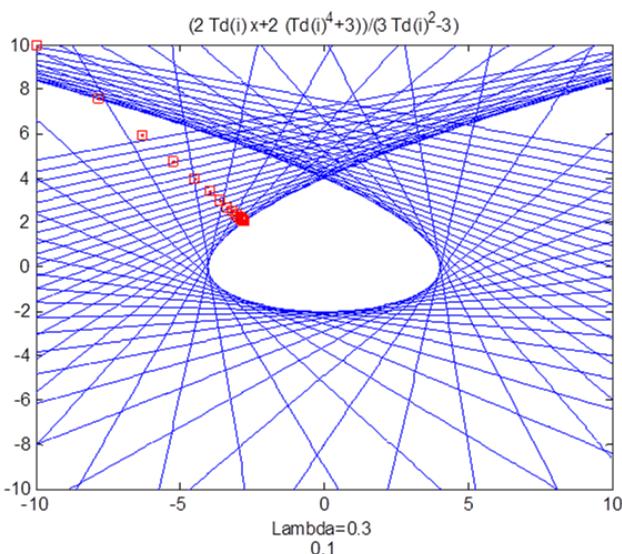


Figura 2. Algunas iteraciones que se aproximan al conjunto Factible del sistema, región en blanco.



En este ejemplo consideramos valores de  $\beta = 0.1$ ,  $M = 1 \times 10^6$  y  $\lambda \in \{0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.9\}$ . Como podemos observar en la Figura 3 el menor número de iteraciones se encuentra cuando el parámetro  $\lambda$  está en el rango  $\lambda \in \{1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5\}$ .

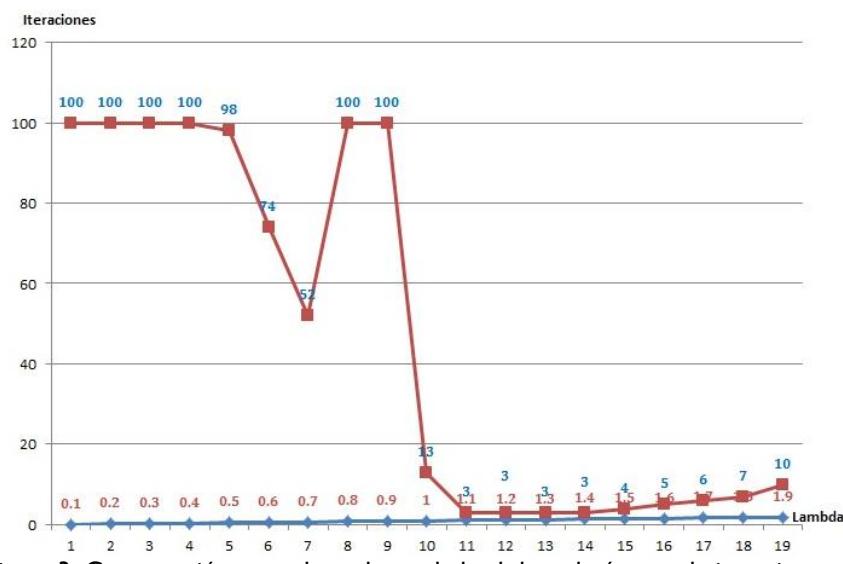


Figura 3. Comparación entre los valores de lambda y el número de iteraciones.

Además del ejemplo que se presenta realizamos el estudio con diversos sistemas y diversos valores para  $\sigma$ , obtenidos dentro de la literatura especializada, y  $x^0$  generado de manera aleatoria y de forma determinística, pero, por problemas de espacio no fue posible incluirlos. Finalmente propusimos diferentes valores para  $\lambda$ ,  $\beta$  y  $M$ , obteniendo resultados análogos a los que se muestran acerca del parámetro  $\lambda$ . De esta manera evidenciamos que los valores de  $\beta$  y  $M$ , no producen ningún efecto sobre el método bajo el que se realizó el estudio.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos sobre la evidencia computacional del análisis de sensibilidad de los parámetros  $\lambda$ ;  $\beta$  y  $M$ ; que aparecen en el método de Relajación extendido permiten precisar que  $\lambda$  desempeña el rol principal del Algoritmo, ya que en  $\lambda$  se centra el tamaño de paso que se va a dar en el desarrollo de cada iteración. Los resultados se obtuvieron considerando sistemas cuyo factible,  $F$ , fue un subconjunto en  $R^n$ , con diversos valores de  $n \in \{2, 3, \dots, 100\}$ .



Considerando los valores de  $\beta = 0.1$  y  $M = 1 \times 10^6$  y observamos que existen ligeras variaciones en el tiempo computacional del Algoritmo. Sin embargo, los valores de la función marginal,  $g_t$ , se mantiene con variaciones pequeñas, por lo que el problema de optimización global tampoco produce cambios en los resultados del Algoritmo. Por último, de los resultados sobresalientes, tenemos que independientemente del espacio en donde se considere el sistema  $n \in \{2, 3, \dots, 100\}$ , el mejor desempeño del algoritmo se mantiene para valores de  $\lambda \in [1, 2]$ .

## REFERENCIAS

- [1] Y. E. K. F. S.-C. Lin C-J, "Implementation of an inexact approach to solving linear semi-infinite programming problems," *J. Comp. Appl. Math.*, pp. 87-103, 1995.
- [2] H.-R. E., "Semi-infinite programming algorithm for robot trajectory planning," *PhD. Thesis*, 1992.
- [3] S. E. W. Kleis D., "Optimal control of sterilization of prepackaged food," Thecnical report, Universitat Trier, 1997.
- [4] G. W. L. Kortanek K. O., "Numerical aspects of pollution abatement problems: Optimal control strategies for air quality standars," in *Preceedings in Operations Research*, 1972.
- [5] B. T. P. I. G. W. H. Olowole O., "Obtaining accurate solutions using reduced chemical kinetic models," *Combustion theory and modelling*, pp. 348-365, 2006.
- [6] G. M. A., "Linear semi-infinite programming theory: An updated survey," *European Journal of Operational Research*, pp. 390-405, 2002.
- [7] L. M. A. Goberna M. A., *Linear semi-infinite optimization*, Wiley, 1998.
- [8] S. Agmon, "The ralxation method for linear inequalities," *Canadian J. Math.*, pp. 382-392, 1954.
- [9] J. G. R., "Some relaxation methods for linear inequalities," *Cahiers du Cero*, pp. 43-53, 1979.
- [10] H. H., "A projection method for solving infinite systems of linear inequalities," *Advances and approximation*, pp. 186-194, 1994.
- [11] H. R. L. T. M. I. González-Gutiérrez E., "Under and over projection methods for solving inequality systems," *Comnt. Rend. Acad. Bulg. Sci.*, pp. 43-53, 2011.
- [12] P. M. J. Cánovas J., "Estabilidad en programación semi-infinita lineal: Un enfoque cuantitativo," *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*, pp. 12-17, 2006.
- [13] W. G. A. Cooper I. D., "A projected lagrangian algorithm for semi-infinte programming," *Math. Programming*, pp. 337-356, 1985.
- [14] S. G. Hettich R., "Semi-infinite programming models in robotics," *Parametric Optimization and Related Topics*, pp. 112-118, 1991.



# Medición experimental y comprobación teórica de la Resolución de un Sistema de Adquisición de Imágenes

A.M. Godínez-Jarillo<sup>1</sup>, J.A. Delgado-Atencio<sup>2</sup>, C. Enriquez-Ramírez<sup>1</sup>

**Resumen**— El conocimiento de la resolución de un sistema de adquisición de imágenes digitales es de vital importancia para varias aplicaciones, entre ellas las médico-biológicas. El objetivo de este estudio fue la implementación de un arreglo experimental para el análisis de la resolución de un sistema de adquisición de imágenes digitales para aplicación en el diagnóstico y reconocimiento del melanoma cutáneo.

**Palabras clave**— resolución, USAF 1951, MTF, lente, cámara.

## INTRODUCCIÓN

Los elementos principales de un sistema automatizado de adquisición de imágenes digitales son el conjunto lente-cámara y el software que garantiza el registro automatizado de dichas imágenes. Cuando se trata de medir el desempeño de un sistema de este tipo juega un papel esencial conocer la resolución de las imágenes capturadas por el conjunto lente-cámara bajo diferentes condiciones de adquisición. El método práctico comúnmente usado para medir la resolución de un sistema óptico consiste en usar un objeto de prueba o patrón que presenta varios conjuntos de barras blancas y oscuras de igual ancho y altura para cada conjunto. Cada conjunto es numerado como un elemento específico y varios elementos son asociados a un mismo grupo. Los elementos están constituidos por barras horizontales y verticales. El elemento de un determinado grupo para el cual podemos distinguir a simple vista las barras que lo forman se considera como el que determina el límite de resolución del sistema. Utilizando, el número del grupo y del elemento se puede identificar a través de una fórmula la resolución del sistema lente-cámara expresando en número de líneas por milímetro [1]. El método descrito se puede aplicar por ejemplo utilizando el test de resolución USAF 1951. Por otra parte, la Función de Transferencia de Modulación (MTF) permite estimar el tamaño mínimo de los objetos con un contraste considerable en la imagen y se representa en forma de un gráfico, donde podemos visualizar el límite de resolución a través de líneas por milímetro [2].

El sistema óptico de adquisición de imágenes digitales se está desarrollando con el objetivo de obtener imágenes con una resolución comparable con las dimensiones de las irregularidades típicas del borde de un melanoma. Se sabe que un melanoma tiene irregularidades del orden de 25 a 33 micras aproximadamente [3], por lo que el sistema a usar para la captura de estas lesiones debe tener una resolución espacial capaz de visualizar detalles de estas dimensiones.

A.M. Godínez-Jarillo<sup>1</sup> (✉), J.A. Delgado-Atencio<sup>2</sup> (✉), C. Enriquez-Ramírez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Cuerpo Académico de Ingeniería de Software, <sup>2</sup>Cuerpo Académico de Computación óptica

<sup>1,2,3</sup> Universidad Politécnica de Tulancingo

e-mail: <sup>1</sup> [alicia.godinez@upt.edu.mx](mailto:alicia.godinez@upt.edu.mx) , <sup>2</sup> [jose.delgado@upt.edu.mx](mailto:jose.delgado@upt.edu.mx)



En este trabajo se presenta el estudio de la determinación de la resolución de un sistema óptico formado por una lente Computar M2514-MP 2/3" 25mm F1.4 y una cámara AD-080GE, que contiene un sensor con una resolución de 1024(H) x 768 (V) pixeles, utilizando la tarjeta de resolución USAF 1951. Además se analiza la MTF de una lente similar a la anterior para conocer el desempeño de la misma.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 TEST DE RESOLUCIÓN USAF 1951

Para el estudio de la resolución se empleó la tarjeta *Edmund Optics Quality Resolution Chart*, la cual es una tarjeta laminada de vinilo con un tamaño de 3 1/2" de largo por 2" de ancho [4] para replicar una tarjeta USAF 1951. Esta tarjeta contiene elementos estándar con variación de tamaños para medir la resolución, los cuales consisten en grupos numerados formados por tres líneas horizontales y tres líneas verticales de longitud y ancho determinado [5].

Para determinar la resolución a través de esta tarjeta, se debe localizar el grupo y elemento, donde a simple vista se puedan distinguir las barras negras [1,6], cabe mencionar que el número localizado en la parte superior de las líneas corresponde al grupo, mientras que el número localizado al lado de las líneas compete al número de elemento. La resolución es calculada mediante la fórmula [7]:

$$\text{Resolution} = 2^{\text{Group}+(\text{Element}-1)/6} \text{ (Line pairs/mm)}$$

El valor obtenido puede ser transformado a micras por medio de la fórmula [8]:

$$\text{Resolution} = \frac{I}{lp/mm} \times 1000$$

La figura 1, muestra un diagrama con las condiciones en las que fue captura la imagen de la tarjeta USAF 1951. Donde L representa el largo de la tarjeta,  $L_0$  es el campo de visión por el conjunto cámara-lente,  $S_0$  corresponde a la distancia entre la lente y la tarjeta USAF y finalmente  $L_B$  es la distancia entre la cámara y la tarjeta. Como fuente de iluminación se usaron dos leds blancos con 4mm de espesor aproximadamente.



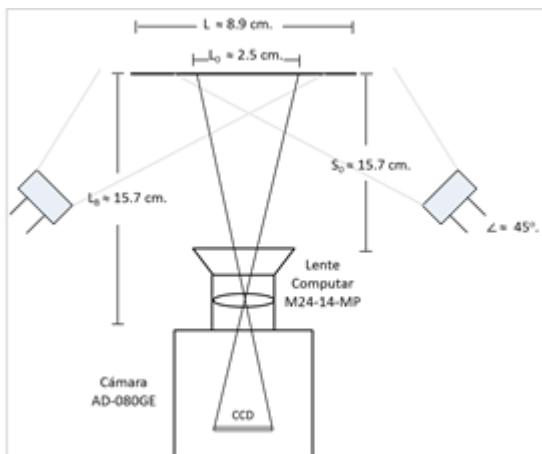


Figura 1. Arreglo experimental para la determinación de la resolución del sistema de adquisición en estudio.

Con el arreglo experimental implementado en la lente se estableció el diafragma totalmente abierto y se varió la intensidad de iluminación, en estas condiciones se capturaron cuatro imágenes de la tarjeta USAF 1951.

El arreglo de iluminación utilizado para la prueba de resolución del sistema lente-detector CCD es el único utilizado en este trabajo. El arreglo se seleccionó de acuerdo a la revisión de la bibliografía existente [6,9] que se refiere al estudio de la resolución de un sistema óptico de adquisición digital de imágenes y también a la facilidad de implementar tal sistema de iluminación con los elementos disponibles en nuestro laboratorio.

## 2.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MODULACIÓN (MTF)

Para obtener una medida cuantitativa sobre la resolución de la lente empleada en este sistema de visión, se procedió al análisis de la MTF, sin embargo, para la lente Computar M2514-MP la hoja de datos técnicos no proporciona la información suficiente para el cálculo de dicha función, por lo que el análisis se realizó para una lente con características similares (TECHSPEC 59-871) a ella. Las características y similitudes de ambas lentes se muestran comparativamente en la tabla I.

Características principales	Lente Computar MP25-14	TECHSPEC 59-871
Focal Length	25 mm	25 mm
Aperture (f/#)	f/1.4	f/1.4 - f/17

Tabla I. Características de lente usada vs lente similar.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 TEST DE RESOLUCIÓN USAF 1951

La figura 2, muestra las imágenes obtenidas de la tarjeta USAF 1951 con el arreglo experimental descrito en la sección anterior, en ella se muestra el valor de intensidad de iluminación en la parte superior, en la parte inferior de cada imagen se muestra el grupo y elemento correspondiente al grupo de líneas que se pueden percibir a simple vista, así como su resolución obtenida a partir de la fórmula descrita en la sección 2.1.

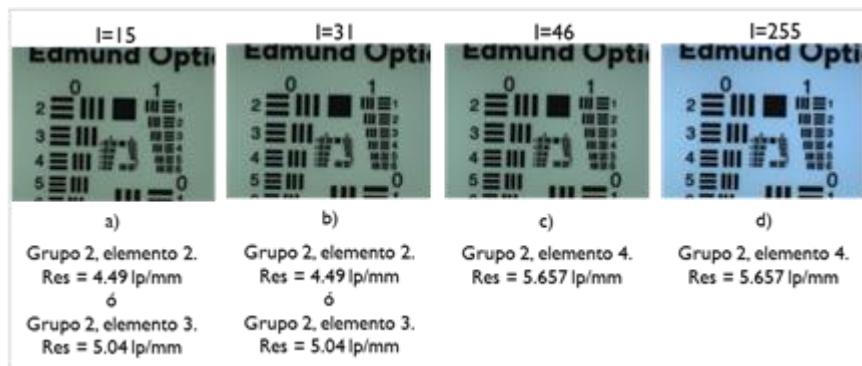


Figura 2. Imágenes capturadas con arreglo experimental para la determinación de la resolución del conjunto lente-cámara de interés.

Como se puede apreciar en la figura 2a y 2b, entre el grupo 2, elemento 2 y grupo 2, elemento 3, se podían aun distinguir las barras negras del fondo, mientras que en la figura 2c y 2d, el elemento que era mejor visible, esto con una mayor iluminación, resultó ser el grupo 2, elemento 4, lo que generó como resultado una resolución de 5.657 lp/mm ó 176.8 micras. Todas las imágenes adquiridas fueron analizadas para garantizar que no existiese píxeles saturados, generados a partir del aumento de iluminación.

#### 3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MODULACIÓN (MTF)

La figura 3 corresponde al gráfico MTF obtenido de la hoja de datos técnicos de la lente en TECHSPEC 59-871.



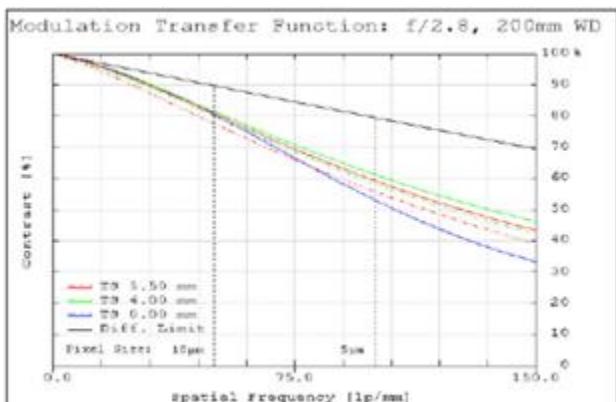


Figura 3. Función de Transferencia de Modulación para la lente TECHSPEC 59-871.

En el gráfico anterior la línea negra corresponde al desempeño de la lente evaluada con una apertura de 2.8 y a una distancia de trabajo de 200mm, con esto podemos determinar que la lente se encuentra en una calidad promedio al tener su capacidad de contraste en un 70 % aproximadamente, adquiriendo imágenes con 150 lp/mm de resolución, equivalente a 6.66 micras.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó un arreglo experimental para determinar la resolución del conjunto lente M2514-MP 2/3" - cámara AD-080GE resultando que el mismo tiene una resolución aceptable para la aplicación de interés. Se observó que la iluminación utilizada, así como la percepción visual influyen en el cálculo de la resolución de dicho sistema.

Por otra parte al conocer la MTF de una lente similar a la perteneciente al sistema de visión con el que se trabaja actualmente, se obtuvo una idea general sobre el límite de resolución de la lente propia, lo que permite establecer que dicha lente tiene una resolución razonable para los objetos de estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Smith, W. J. (2000). Modern optical engineering. United States of America: McGraw-Hill.
- [2] Resolución espacial y función de transferencia de modulación (MTF). Recuperado el 6 de septiembre de <http://theempireoflights.blogspot.mx/2012/12/resolucion-espacial-y-funcion-de.html>
- [3] Tim K. Lee, David I. McLean, M. Stella Atkins. "Irregularity index: A new border irregularity measure for cutaneous melanocytic lesions ". Medical Image Analysis 7 (2003) 47–64



- [4] Pocket USAF Optical Test Pattern. Recuperado el 6 de septiembre de 2014 de <http://www.edmundoptics.com/testing-targets/test-targets/resolution-test-targets/pocket-usaf-optical-test-pattern/1852>
- [5] Medición de la resolución de los escáneres. Recuperado el 9 de enero de 2014 de <http://www.filmscanner.info/es/Aufloesung.html>
- [6] Lens Testing with the USAF 1951 Chart (2000). Recuperado el 26 de agosto de 2014 de [http://www.jimdovy.org/Tips/Equipment/USAF\\_Test/usaf\\_test.html](http://www.jimdovy.org/Tips/Equipment/USAF_Test/usaf_test.html)
- [7] USAF 1951 and Microcopy Resolution Test Charts and Pixel Profiles. Image Processing (3/24/10). Recuperado el 26 de enero de 2014 de <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/e2-usaf1951.pdf>
- [8] Choosing the Correct Test Target. Edmund Optics. Technical Resources. Recuperado el 10 de septiembre de 2014 de <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/testing-targets/choosing-the-correct-test-target/>
- [9] Setting up and photographing SFR test charts. Imatest. Recuperado el 10 de septiembre de 2014 de [http://www.imatest.com/docs/sfr\\_instructions/](http://www.imatest.com/docs/sfr_instructions/)

