

Julio 2011  
Volumen 9  
Número 1

ISSN 1879 - 9532

**RIEE&C**

Una estrategia de segmentación  
de imágenes digitales de huellas  
dactilares latentes.  
Ruíz E. María E., Morales S. Miguel y  
Hernández M. Yahir  
1

Redes neuronales artificiales  
para el procesamiento de imágenes,  
una revisión de la última década.  
Ramírez Q. Juan A. y Chacón M. Mario I.  
7

Análisis en estado dinámico de la  
coordinación de relevadores  
de sobrecorriente.  
Marines C. Victor G. y Conde E. Arturo  
17

**REVISTA DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN**

Revista publicada por el Depto. de Ing. Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora



**ITSON** – Instituto Tecnológico de Sonora  
5 de Febrero 818 Sur. C.P. 85000  
Ciudad Obregón, Sonora, México.

## **RIEE&C:** Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Año 7, Volumen 9, Número 1, Julio de 2011.

DERECHOS RESERVADOS © 2011.

ISSN: 1870-9532

Publicación semestral editada por ITSON a través del  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.  
Esta publicación fue completada en Julio de 2011.

**Editor en jefe:** José Antonio Beristáin Jiménez

**Grupo editor ejecutivo:** José M. Campoy S., Rafael León V., Javier Pérez R., Juan C. Murrieta L., Manuel Domitsu K., Griselda González D. C.

**Editores asociados:** Adolfo Espinoza R., Adolfo Soto C., Andrés O. Pizarro L., Armando Ambrosio L., Armando García B., Eduardo Romero A., Enrique Aragón M., Erica Ruiz I., Gabriel Nuñez R., Ismael Murillo V., Jesús H. Hernández L., Joaquín Cortéz G., Juan J. Padilla Y., Moisés Rodríguez E., Raymundo Márquez B., Ricardo T. Solís G.

**Diseño de portada:** Itsel Gabriela Ramírez Escalante

**Contacto:** [rieeandc@itson.edu.mx](mailto:rieeandc@itson.edu.mx)

**Internet:** <http://www.itson.mx/rieeandc>.

Impreso en el taller del Instituto Tecnológico de Sonora. Fecha de Impresión Julio 2011.  
Tiraje de 200 ejemplares con 13 hojas.

El contenido de los artículos que se publican son responsabilidad de los autores.  
Prohibida la reproducción total o parcial del contenido de la revista,  
en cualquier medio, sin previa autorización por escrito del editor.  
Quedan reservados todos los derechos.

# Una estrategia de segmentación de imágenes digitales de huellas dactilares latentes

Ruíz E. María E., Morales S. Miguel y Hernández M. Yahir

## A Strategy for Digital Image Segmentation of Latent Fingerprints.

**Abstract**— Digital image segmentation is one of the most important stages in the implementation of an Automatic Fingerprint Identification System. This work describes a strategy for image segmentation of latent fingerprints using a proper combination of operators achieving better results than those reported in the literature. Latent fingerprint image are low quality images making more difficult the segmentation process. The segmentation proposed strategy is based on the gradient magnitude of the image and detection of regions. This strategy was implemented in Matlab and Java, and was tested using fingerprint images of the Fingerprint Verification Competition databases, such databases are commonly used for these purposes. The results achieved show a significant improvement compared with representative algorithms of literature, such as those based on the variance of image.

**Keywords**— Gradient Image, Segmentation, Automatic Fingerprint Identification System.

**Resumen**— La segmentación de imágenes digitales es una de las etapas más importantes en la implementación de un sistema de reconocimiento automático de huellas dactilares. En este trabajo se describe una estrategia para la segmentación de imágenes digitales que utiliza una combinación adecuada de operadores a fin de obtener mejores resultados que los reportados en el estado del arte cuando las imágenes a segmentar son huellas dactilares latentes, es decir, son imágenes de huellas dactilares con una mala calidad. La estrategia de segmentación propuesta está basada en la magnitud del gradiente de la imagen y en la detección de regiones. La estrategia propuesta fue implementada en Matlab y Java, y fue validada usando imágenes de huellas dactilares de las bases de datos de la Competencia de Verificación de Huella Dactilar (*Fingerprint*

*Verification Competition*), las cuales son comúnmente utilizadas para estos fines. Los resultados muestran una notable mejora en la precisión de la segmentación comparada con algoritmos representativos del estado del arte, tales como aquellos basados en la varianza de la imagen.

**Palabras clave**— Gradiente de una Imagen, Segmentación, Sistema de Identificación Automática de Huellas Dactilares.

### I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de identificación automática de huellas dactilares han adquirido gran importancia en la actualidad debido a que son de gran utilidad en cuestiones relacionadas con la seguridad de diversos recursos como pueden ser recintos o información, garantizando el control de acceso y uso eficiente de los mismos.

La practicidad y eficacia del uso de huellas dactilares para la identificación de individuos las ha convertido en uno de los rasgos biométricos más usados en la actualidad, por lo que la variedad de usos y aplicaciones de estos sistemas también va en aumento.

En la figura 1, se pueden observar las tareas elementales implicadas en la implementación de un sistema de reconocimiento automático de huellas dactilares (SRAHD)[1]:

1. Captura de la imagen de la huella.
2. Procesamiento de la imagen.
3. Extracción de características.
4. Creación de patrones o plantillas.
5. Preselección y matching.
6. Almacenamiento.

El procesamiento de la imagen es una de las tareas más importantes. Durante este proceso la imagen es tratada por varios algoritmos, con el objetivo de mejorar la calidad de la imagen y transformarla en una representación adecuada para que pueda ser usada por la siguiente etapa del proceso de reconocimiento, en la que se realiza una extracción de características para obtener un patrón, que posteriormente será usado en la etapa de preselección y matching.

Realizar un procesamiento adecuado de la huella dactilar es una tarea relevante en el proceso de reconocimiento, ya que si no se realiza un tratamiento correcto de la imagen durante esta etapa existe una gran posibilidad de que durante la extracción de características se detecten características falsas de la huella dactilar o se pierda información importante, lo que aumentaría en gran medida la probabilidad de que el sistema realice una identificación errónea del individuo, es decir que el sistema falle.

Manuscrito recibido el 1 de Febrero de 2011. Este trabajo fue respaldado por la Universidad Politécnica de Cd. Victoria (UPV), el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y el Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP).

Ruíz E. María E. hasta la fecha se ha de desempeñado como estudiante en el programa de Maestría en Ingeniería con especialidad en Tecnologías de la Información de la Universidad Politécnica de Cd. Victoria; Av. Nuevas Tecnologías 5902 Parque TECNOTAM, Carretera Victoria - Soto la Marina Km. 5.5; Ciudad Victoria, Tamaulipas, México; C.P. 87138;(e-mail elisaruiz222@hotmail.com).

Morales S. Miguel hasta la fecha se ha de desempeñado como Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Politécnica de Victoria; Av. Nuevas Tecnologías 5902 Parque TECNOTAM, Carretera Victoria - Soto la Marina Km. 5.5 Ciudad Victoria, Tamaulipas; C.P. 87138; Tel: (834) 1720383, Fax: (834) 1720388; (e-mail mmorales@upv.edu.mx).

Hernández M. Yahir es Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Politécnica de Victoria; Av. Nuevas Tecnologías 5902 Parque TECNOTAM, Carretera Victoria - Soto la Marina Km. 5.5. Ciudad Victoria, Tamaulipas. C.P. 87138. Tel: ( 834 ) 1720383 al 88, Ext. 2309; Fax: (834) 1720388; (e-mail yhernandezm@upv.edu.mx).



Fig. 1. Diagrama de bloques de un sistema de identificación de huellas dactilares.

Uno de los algoritmos usados durante el procesamiento de la imagen es el de segmentación, el cual tiene como propósito seleccionar solo el área de interés en la imagen (huella dactilar) y desechar lo indeseable como pueden ser manchas, sombras o cualquier cosa que no forme parte de la huella dactilar y que podría causar problemas en las etapas posteriores en el proceso de reconocimiento. Actualmente, en el estado del arte existen diversos algoritmos para resolver el problema de la segmentación de imágenes de huellas dactilares. Después de realizar un análisis de distintos algoritmos, se determinó una nueva estrategia basada en el cálculo del gradiente de la imagen y la detección de regiones.

Los resultados de la estrategia propuesta mejoran los resultados reportados en el estado del arte, aún cuando las imágenes de huellas dactilares utilizadas sean de baja calidad, siendo capaz de detectar eficientemente el área de interés en la huella dactilar eliminando manchas, sombras, ruido, etc. y adaptándose a las diferentes condiciones que puede presentar la imagen de entrada del algoritmo. Otras ventajas que ofrece esta propuesta es la utilización de herramientas de baja complejidad que facilitan en gran medida su implementación obteniendo resultados con un alto grado de eficiencia, además de consumir pocos recursos.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la siguiente sección se describen brevemente algunos métodos de segmentación más utilizados del estado del arte, en la sección 3 se presenta una introducción a los conceptos y herramientas más importantes relacionadas con la implementación de la estrategia propuesta. En la sección 4 se describe el algoritmo propuesto listando las principales tareas a realizar. En la sección 5 se presentan los resultados obtenidos.

Finalmente en la sección 6 se presentan las conclusiones de este trabajo.

## II. TRABAJO RELACIONADO

Actualmente en la literatura existen varios enfoques que proporcionan diversas estrategias a seguir para la segmentación de una imagen de huella dactilar. En [2], la imagen es particionada en bloques de 16 x 16 píxeles. Entonces cada bloque es clasificado de acuerdo a la distribución del gradiente de la escala de grises en cada bloque. En [3], este método se amplía excluyendo bloques con una varianza de la escala de grises menor que un umbral. En [4], la varianza de la escala de grises en dirección ortogonal a la orientación de las crestas en la imagen de la huella dactilar es usada para clasificar cada bloque de 16 x 16 bloques. En [5], la segmentación se basa en la coherencia, y la

morfología se usa para detectar regiones. En [6], este método es ampliado usando la coherencia, la media y la varianza, y un clasificador lineal óptimo es preparado para clasificar cada píxel en la imagen. En [7], se presenta un algoritmo adaptivo basado en los Momentos de Gauss-Hermite, la energía de éstos y la coherencia se usan para eliminar el fondo de una imagen aún cuando éste no sea uniforme, es decir, que existan algunas manchas, sombras, ruido, etc. en la imagen.

La mayoría de los algoritmos mencionados resultan poco eficientes en imágenes borrosas o con ruido, ya que podrían eliminar información importante del área de interés o por el contrario, dejar información indeseable como parte de la imagen. Por otra parte, los algoritmos propuestos en [5], [6] pueden detectar zonas con ruido, sin embargo, resulta complicado determinar un umbral generalizado óptimo para el cálculo de la coherencia. Diversos algoritmos de segmentación hacen uso de operaciones matemáticas complejas que dificultan su implementación, como en el caso de [5][6][7]. En este trabajo, la estrategia propuesta ofrece un nivel de eficiencia igual o mayor al de los algoritmos [5][6][7], pero su implementación es más rápida y menos compleja.

## III. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES

La estrategia de segmentación propuesta está basada en ideas y procedimientos de diferentes algoritmos existentes en el estado del arte, con el objetivo de obtener un algoritmo más eficiente y fácil de implementar.

### A. El Gradiente de una imagen

Una herramienta comúnmente usada para la detección de bordes en una imagen  $f$  en un punto  $(x, y)$  es el gradiente, denotado por  $\nabla f$ , y definido como un vector bidimensional [8]:

$$\nabla f \equiv \text{grad}(f) \equiv \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

siendo un vector perpendicular al borde, donde el vector  $\nabla f$  apunta en la dirección de variación máxima de  $f$  en el punto  $(x, y)$  por unidad de distancia.

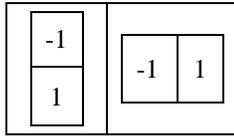


Fig. 2. Diagrama de las máscaras 1D usadas para implementar las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

La magnitud (longitud) del vector  $\nabla f$ , denotada como  $M(x, y)$ , se define como:

$$M(x, y) = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (2)$$

la cual representa la variación en la dirección del vector  $\nabla f$ . La dirección del vector  $\nabla f$  está dada por el ángulo medido con respecto al eje x, y se calcula como:

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{g_y}{g_x} \right] \quad (3)$$

Para obtener el gradiente de una imagen es necesario calcular las derivadas parciales  $\frac{\partial f}{\partial x}$  y  $\frac{\partial f}{\partial y}$  en cada píxel de la imagen, usando las siguientes ecuaciones:

$$g_x = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \cong f(x+1, y) - f(x, y) \quad (4)$$

$$g_y = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \cong f(x, y+1) - f(x, y) \quad (5)$$

Estas dos ecuaciones pueden ser implementadas para todos los valores de  $x, y$  mediante una operación de filtrado usando las máscaras de la figura 2.

### B. Etiquetado de Regiones

Los algoritmos de etiquetado permiten identificar zonas formadas por píxeles interconectados en una imagen binaria. Estas zonas pueden representar objetos de interés, son identificadas mediante valores numéricos únicos (etiquetas), lo que permite separar los objetos presentes en la imagen. En este trabajo se utilizó un algoritmo de etiquetado con el propósito de identificar y separar el área de interés de regiones más pequeñas que no cuentan con información trascendente para nuestra aplicación, este algoritmo toma como entrada una imagen binaria en donde el fondo de la imagen es negro y las regiones de interés son blancas. El proceso de etiquetado consiste en realizar un análisis de conectividad, para determinar si dos o más píxeles están unidos y por lo tanto pertenecen a un mismo objeto. Este enfoque ya ha sido utilizado en otros trabajos y se presenta a continuación [9]:

1. Se prueba si el píxel actual no es parte del fondo. En caso falso ir al paso 7.
2. Se verifica si el píxel es el primero de una nueva región.
3. Se evalúa si alguno de los píxeles vecinos ha sido etiquetado. En este punto, se evalúan solo los píxeles sombreados que se muestran en la figura 3(a), ya que los demás no han sido analizados y por lo tanto no pueden estar etiquetados. El

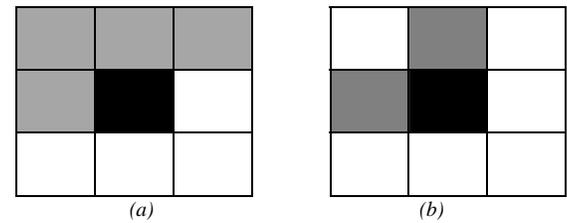


Fig. 3. Diagrama de los Píxeles vecinos analizados.

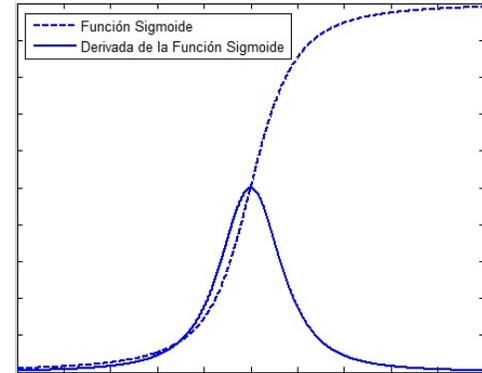


Fig. 4. Diagrama de una función sigmoide y su derivada.

algoritmo tomado como base para realizar la separación de objetos evalúa los píxeles mostrados en la figura 3(b), es decir se basa en 4-conectividad, lo cual puede causar que una región sea tomada como varias. Este problema es resuelto usando 8-conectividad.

4. Si existe más de un píxel vecino etiquetado, se comparan los valores de todos ellos. Si la etiqueta es la misma, se asigna esta etiqueta al píxel que se está evaluando.
5. Si la etiquetas son diferentes, se guarda el dato en una tabla de equivalencias, es decir que ambos valores pertenecen a una misma región para realizar la corrección después de etiquetar toda la imagen.
6. Por último, si el píxel no posee vecinos etiquetados, se etiqueta con un nuevo valor.
7. Se procede a analizar otro píxel.

Después de etiquetar toda la imagen, se deben corregir las etiquetas utilizando la tabla de equivalencias creada. Esta corrección es necesaria porque en general un objeto puede estar etiquetado con más de un valor. La tabla de equivalencias posee información sobre las etiquetas que pertenecen a un mismo objeto. Por lo tanto esta tabla se utiliza para asignar a todos los píxeles que pertenecen a una misma región, el valor de una de las etiquetas. El valor asignado es el mayor.

## IV. ESTRATEGIA PROPUESTA DE SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN DE HUELLA DACTILAR

Podemos detectar el área de la huella dactilar y desechar la información innecesaria en la imagen haciendo uso de las herramientas descritas en la sección anterior. En un primer paso se aproximan las derivadas parciales en las coordenadas de cada píxel de la imagen, como se muestra en las ecuaciones (4) y (5). Los cambios abruptos de intensidad se pueden modelar como una función sigmoide como la que se puede observar en la figura 4. El resultado de la derivada de una función sigmoide en áreas donde existe mayor cambio de intensidad es una función en

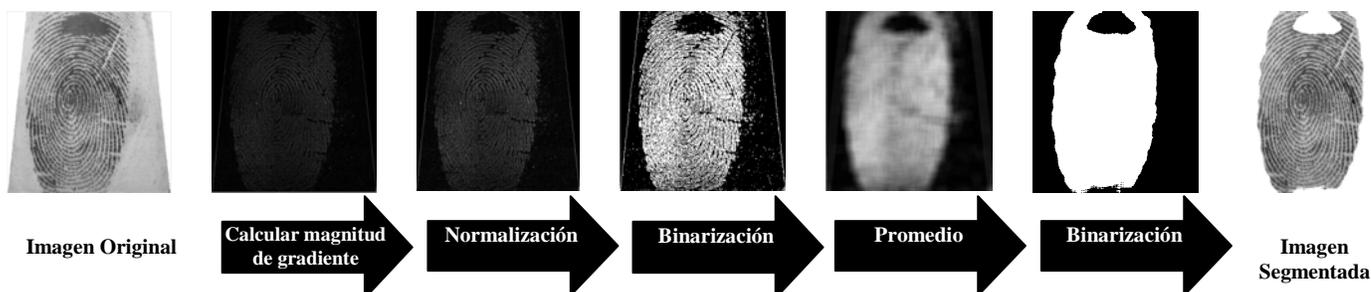


Fig. 5. Diagrama de las etapas que conforman la estrategia de segmentación propuesta.

forma de campana angosta semejante a la que aparece se muestra en la figura 4. Por otro lado un cambio en la intensidad de los píxeles mínimo o nulo tiene como resultado una función con valores cercanos a cero. Con estas aproximaciones de las derivadas parciales se calcula la magnitud del gradiente.

La magnitud del gradiente será grande en las áreas donde existan cambios abruptos de intensidad y pequeña en aquellas que presenten cambios suaves, estos resultados posteriormente son normalizados por lo que los valores de la magnitud del gradiente en áreas donde existan cambios de intensidad abruptos se elevarán acercándose aún más al nivel de intensidad máximo, lo que facilita la binarización.

Debido a esta normalización, se puede utilizar como valor umbral para la binarización la media de los valores de intensidad de la magnitud del gradiente normalizado. El propósito de esta primera binarización es hacer que los bordes detectados en la imagen se vuelvan más notables como se aprecia en la figura 5 y faciliten la detección del área de interés.

Enseguida, se utiliza un filtro de promediado con un tamaño de máscara de  $19 \times 19$  píxeles para obtener áreas con una escala de gris uniforme. Se observó en la imagen normalizada y binarizada que existían áreas con píxeles oscuros que tenían una extensión de alrededor de 10 píxeles cuadrados, por lo que una máscara de promediado de 19 píxeles cuadrados permite cubrir y combinar esas áreas con píxeles blancos adyacentes para obtener áreas con un color grisáceo uniforme que evita la aparición de huecos dentro del área de interés al realizar la binarización final. La imagen resultante de la última binarización servirá como entrada del algoritmo de etiquetado. Por último, en la imagen filtrada y binarizada se guardará la región que tiene el mayor número de píxeles conectados (etiquetado de regiones) y se desechará el resto de las regiones con menos píxeles. Esta región corresponderá a la región donde se encuentra la información más significativa de una huella dactilar.

A continuación se listan a detalle las principales tareas del algoritmo de segmentación propuesto:

- 1) Dada una imagen de huella dactilar de tamaño  $N \times M$ , calcular el gradiente de la imagen filtrándola usando las máscaras de la figura 2 y posteriormente la magnitud del gradiente usando la ecuación (2).
- 2) Normalizar los valores de la imagen, para asegurarse de que se encuentren en un rango de 0 a 255. Para esto, es necesario:
  - i. Encontrar el valor mínimo de intensidad en la imagen.
  - ii. Restar el valor mínimo encontrado a cada uno de los valores de la imagen.

- iii. Encontrar el valor máximo de intensidad en los nuevos valores de la imagen y dividirlo entre 255.

- iv. Por último, multiplicar cada uno de los valores de la imagen por el resultado obtenido de la división en el paso anterior.

- 3) Binarizar la imagen normalizada, utilizando como umbral el cálculo de la media de la imagen.
- 4) Aplicar un filtro de promediado a la imagen binarizada, utilizando una máscara de convolución con coeficientes de valor  $1/fc$ , donde  $f$  representa el número de filas de la máscara y  $c$  representa el número de columnas de la máscara.
- 5) Binarizar nuevamente la imagen filtrada, obteniendo nuevamente la media de la imagen para que ésta sea usada como umbral.
- 6) Obtener la matriz de etiquetas de la imagen binaria utilizando algún algoritmo de etiquetado, en este trabajo se utilizó el mismo algoritmo que en [9].
- 7) Encontrar la etiqueta con el mayor número de ocurrencias en la matriz de etiquetas, esto descartando las pertenecientes al fondo.
- 8) Detectar la región más grande y enviar al fondo todas las regiones restantes detectadas, rescatando así sólo la información que pertenece a la huella dactilar.

En la figura 5, se pueden observar las distintas etapas de la estrategia de segmentación propuesta en este trabajo, en las que se hace uso de herramientas sencillas y fáciles de implementar para eliminar información innecesaria de la imagen de la huella dactilar.

## V. RESULTADOS

Con el propósito de realizar un análisis comparativo se realizó también la implementación de uno de los algoritmos de segmentación más representativos en el estado del arte. Bajo dicho esquema, se calcula la varianza de la imagen dividida en bloques. Cada bloque es considerado como parte del área de interés si el resultado de su varianza es mayor que un umbral predefinido, de otra manera es enviado al fondo. Se utilizaron diversas imágenes con un tamaño de 328 por 364 píxeles (valores  $N$  y  $M$  mencionados en el paso 1) propuesto) de las bases de datos que fueron utilizadas en una de las ediciones de la Competencia de Verificación de Huella Dactilar [11] para realizar pruebas y poder realizar una comparación de los mismos con los resultados de algoritmos propuestos en este trabajo. En la tabla I podemos observar los resultados obtenidos con diferentes imágenes por el algoritmo basado en la varianza y el algoritmo propuesto.

TABLA I.  
RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Imagen N°	Imagen original	Imagen Segmentada usando la varianza [3][4][10]	Imagen segmentada por el algoritmo propuesto en este trabajo
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

TABLA I.  
RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS  
(CONTINUACIÓN)

Imagen N°	Imagen original	Imagen Segmentada usando la varianza [3][4][10]	Imagen segmentada por el algoritmo propuesto en este trabajo
8			
9			
10			
11			
12			

En la tabla I se puede apreciar como en los resultados del algoritmo que hace uso de la varianza se puede perder información importante de la huella dactilar o dejar información que no es de interés como parte de la imagen. En las imágenes 1 y 3 de la tabla I se obtienen resultados parecidos, mientras que en la imagen 2, el resultado de la segmentación presenta más errores debido a que las condiciones de la imagen cambiaron, es decir, la calidad de la imagen es baja, por lo que es más difícil distinguir el área de interés del fondo.

El algoritmo propuesto es capaz de adaptarse a las condiciones de la imagen de entrada, por lo que no es necesario el establecimiento de un umbral predefinido para obtener buenos resultados. En la tabla I se puede observar que en todos los

casos, la estrategia propuesta en este trabajo produce como resultado una sola región al segmentar solo el área de interés en la imagen de huella dactilar latente y eliminar información indeseable, a diferencia de las estrategias propuestas en [3][4][10] que no eliminan completamente esta información de la imagen. Se obtuvieron resultados favorables en la mayoría de las muestras en las que fue probada la estrategia propuesta, observándose que debe existir un contraste entre las crestas y los valles que haga notar los bordes presentes en la imagen ya que si el cambio en la intensidad entre ellos es mínimo el área será eliminada como en el caso de las imágenes 4, 5, 6, 7 y 9 de la tabla I, donde se desecharon partes de la huella debido a que no se detectaron cambios de intensidad importantes en esas áreas y que no serán de utilidad en la fase de extracción de características y reconocimiento.

## VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se pueden obtener buenos resultados de segmentación de huellas dactilares usando algoritmos basados en la varianza de la imagen si la imagen que tenemos como entrada está en buenas condiciones, es decir, no está borrosa, manchada o con presencia de ruido. El algoritmo propuesto en este trabajo obtuvo mejores resultados en la mayoría de las muestras de la base de datos que fue utilizada para realizar pruebas. En algunas de las imágenes existen áreas en las que el cambio de intensidad entre las crestas y los valles es mínimo por lo que no fueron detectadas como parte de la huella y se consideran como parte del fondo. En la estrategia propuesta se utilizaron herramientas conocidas del estado del arte como son la magnitud del gradiente con el objetivo de detectar cambios abruptos de intensidad en la imagen siendo que en el área de la huella es donde existe una mayor concentración de estos cambios. Al binarizar la imagen, el área de la huella se hace aún más notable lo que facilita su detección a través de la aplicación de un filtro de promediado para obtener áreas con una intensidad uniforme. La binarización permite que se puedan detectar todas las áreas que componen la imagen con la ayuda de un algoritmo de etiquetado de regiones, por lo que se desecharan todas las regiones pequeñas rescatando solo la más grande que pertenece a la huella dactilar. El algoritmo propuesto en este trabajo se desarrolló como parte de las actividades de la implementación de un Sistema de Identificación Automática de Huellas Dactilares por lo que será integrado en la pila de procesos del sistema de reconocimiento, para que posteriormente sea implementado en una tarjeta FPGA con la finalidad de mejorar los tiempos de procesamiento.

## REFERENCIAS

- [1] D. Maltoni, D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar, Handbook of Fingerprint Recognition. Londres: Springer-Verlag, 2009, pp.4-5.
- [2] B. M. Mehre, N. N. Murthy, S. Kapoor, and B. Chatterjee, "Segmentation fingerprint images using the directional image", Pattern Recognition, vol. 20, no. 4, 1987, pp. 429-435.
- [3] B.M. Mehre, N.N. Murthy, S. Kapoor, and B. Chatterjee, "Segmentation fingerprint images-a composite method", Pattern Recognition, vol. 22, no. 4, 1987, pp. 381-385.
- [4] N. Ratha, S. Chen and A. Jain, "Adaptive flow orientation based feature extraction in fingerprint images", Pattern Recognition, vol. 28, no. 11, 1995. pp. 1657-1672.

[5] A.M. Bazen and S.H. Gerez, "Directional field computation for fingerprints based on the principal component analysis of logical gradients", In: Proceedings of ProRISC2000, 11<sup>th</sup> Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing, Veldhoven, Netherlands, 2000.

[6] A.M. Bazen and Sabith H. Gerez, "Segmentation of Fingerprint Images", In: Proc. RISC2001 Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing, Veldhoven, Netherlands, 2001.

[7] L. Wang, X. Chen and J. Shen, "Fingerprint image segmentation based on Gaussian-Hermite Moments", In: Advanced Data Mining and Applications, Lecture Notes in Computer Science, 2005, pp. 446-454.

[8] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, 2008, pp. 206-208.

[9] N. L. Montes Castrillón, "Desarrollo de Algoritmos de Segmentación de Frutos Maduros y Verdes de Café en Imágenes Tomadas en Condiciones Controladas, Basados en las Propiedades de Color", Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Ingeniería y Arquitectura Manizales, Manizales, Colombia, 2001.

[10] N. F. Binti Zakaria, "Implementation Of Fingerprint Biometric Template System In Embedded Software Design," M.E. Thesis, Faculty of Electrical Engineering, University Technology Malaysia, Johor Bahru, Johor, Malaysia, 2006.

[11] D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, J. L. Wayman and A. K. Jain, "FVC2000: Fingerprint Verification Competition", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 3, March 2003.

**María E. Ruiz E.**, nació en Cd Victoria, Tamaulipas el 8 de abril de 1984. Obtuvo el grado de Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria en el estado de Tamaulipas en el año 2007.



Ella ha trabajado en empresas privadas como desarrolladora de software. Actualmente, se encuentra desarrollando su proyecto de investigación para obtener el grado de Maestra en Ingeniería en la Universidad Politécnica de Ciudad Victoria, Tamaulipas. Su área de especialidad es el procesamiento de imágenes digitales y el desarrollo de sistemas computacionales en dispositivos reconfigurables FPGA.



**Miguel Morales Sandoval** nació en Calpan, Puebla el 07 de octubre de 1978. Recibió el grado de licenciado en Ciencias de la Computación en 2002 por la Universidad Autónoma de Puebla. Recibió el grado de Maestro y Doctor en Ciencias en 2004 y 2008 respectivamente, ambos por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, ubicado en Tonantzintla, Puebla.

Desde diciembre de 2008 es profesor investigador en la Universidad Politécnica de Victoria, en Ciudad Victoria, Tamaulipas donde dirige tesis de maestría e imparte diversas materias de posgrado y licenciatura en el área de las Tecnologías de Información. Desde 2003 realiza proyectos de investigación en las áreas de la criptografía, con especialidad en Criptografía de Curvas Elípticas y el diseño digital de arquitecturas hardware usando dispositivos reconfigurables y lenguajes de descripción de hardware. Ha publicado alrededor de 20 artículos en revistas y congresos especializados, y participa en el desarrollo de proyectos de investigación aplicada.

El Dr. Morales-Sandoval es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y cuenta con la distinción de perfil deseable por PROMEP.



**Yahir Hernández Mier** nació en Durango, Durango el 27 de abril de 1977. Recibió el grado de Ingeniero Electrónico en 1999 por el Instituto Tecnológico de Cd. Victoria (ITCV), Tamaulipas, México y el grado de Maestro en Ciencias en Bioelectrónica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, IPN (CINVESTAV), México, D.F., en 2003. Concluyó su trabajo para obtener el grado de Doctor en el Centro de Investigación en automatización de Nancy (CRAN), Vandoeuvre-Les-Nancy, Francia. Actualmente, se desempeña como profesor investigador

en la Universidad Politécnica de Cd. Victoria, México en el área de mecatrónica y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus áreas de interés se enfocan sobre aplicaciones medicas e industriales de visión por computadora, procesamiento de señales e instrumentación.

# Redes neuronales artificiales para el procesamiento de imágenes, una revisión de la última década

Ramírez Q. Juan A. y Chacón M. Mario I.

## Artificial neural networks for image processing, a review of the last decade

**Abstract**— The widespread use of Artificial Neural Networks in the image processing field motivated a review of 200 papers. This review documents the use of neural network architectures for classification, recognition and segmentation in digital images. The present review describes different neural networks architectures as well as some of their modifications and applications on image processing. Then new neural networks models including spiking neurons are covered. An analysis of the literature reviewed organized by the type of image processing achieved by the neurons is described and finally the conclusion of this work are commented.

**Keywords**— Artificial Neural networks, Image Processing, Computational Intelligent.

**Resumen**— El amplio uso de las redes neuronales en el campo del procesamiento de imágenes, motiva a realizar una revisión de 200 artículos donde se documentan algoritmos que utilizan alguna arquitectura de redes neuronales para tareas de clasificación, reconocimiento o segmentación en imágenes digitales. Esta revisión presenta los distintos modelos de redes así como sus modificaciones y aplicaciones en el procesamiento de imágenes. Luego se documentan algunos aspectos de nuevas redes neuronales incluyendo los modelos pulsantes, se presenta el análisis de los trabajos revisados organizado por el tipo de procesamiento que hacen las redes neuronales y finalmente se comentan las conclusiones del estudio realizado.

**Palabras clave**— Redes Neuronales Artificiales, Procesamiento de Imágenes, Computación Inteligente.

### I. INTRODUCCIÓN

Durante las décadas pasadas, surgieron modelos de redes neuronales artificiales (RNA) postuladas de diversas teorías del funcionamiento de redes neuronales biológicas. Desde entonces, han sido numerosos los trabajos propuestos donde se aplican RNAs en diferentes áreas de la ingeniería. Un área donde se utilizan ampliamente dichas redes es la de procesamiento de imágenes, donde existe una gran cantidad de trabajos propuestos con RNAs. Esto ha motivado diversas revisiones acerca de la contribución de dichos trabajos. En 2002 Egmont-Petersen

Manuscrito recibido el 9 de junio de 2011. Este trabajo fue financiado por el Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT- Gobierno del Estado de Chihuahua, bajo el apoyo CHIH-2009-C02-125358.

J.A. Ramírez y M.I. Chacón son miembros del Laboratorio de Percepción Visual con aplicaciones en Robótica en el Instituto Tecnológico de Chihuahua, Ave. Tecnológico 2909, Chihuahua Chih., C.P. 31310 México. Teléfono: +(52) 614-413-7474; fax: +(52) 614-413-5187. e-mail: jaramirez@itchihuahua.edu.mx, mchacon@ieec.org

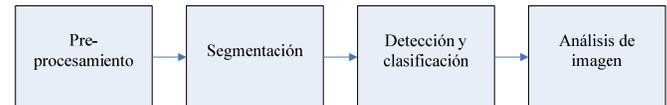


Fig. 1. Niveles de procesamiento.

realizó una revisión de 200 artículos de redes neuronales aplicadas al área de procesamiento de imágenes publicados en la década de los noventa. El enfoque presentado fue en los distintos tipos de redes *feedforward*, aunque hace referencia a redes como la red de Kohonen (SOM), Hopfield, Red neuronal celular (CNN), memorias asociativas y redes ART y su contribución en procesamiento de imágenes [1]. Misra en 2010 realizó un estudio de las implementaciones en hardware de las RNAs en las últimas dos décadas [2]. Wang, Ma y Cheng en 2010 publican una revisión de trabajos relacionados con la red pulso-acoplada (PCNN) y su aplicación en la solución de problemas del área de procesamiento de imágenes [3]. Otros estudios de RNAs se enfocan a distintas aplicaciones como sistemas financieros, técnicas biométricas, criptosistemas, control automático, etc [4][5][6]. Con respecto a otras técnicas de computación inteligentes y procesamiento de imágenes, Naz en 2010 hace un estudio de las técnicas de segmentación en imágenes digitales con agrupamiento difuso con probabilidad espacial y *Fuzzy C Means* (FCM) para procesamiento de imágenes [7]. Senthilkumaran hace un resumen en 2009 donde documenta varios tipos de algoritmos para segmentar imágenes con técnicas de lógica difusa, algoritmos genéticos y la SOM[8].

Sin embargo, en la literatura analizada, no se reportan revisiones de las distintas redes neuronales aplicadas a procesamiento de imágenes de los últimos años. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una revisión de 200 trabajos publicados en los últimos diez años enfocándose a documentar las distintas modificaciones que han tenido las diferentes arquitecturas de redes neuronales para mejorar su aplicación en procesamiento de imágenes. De estos trabajos, 167 documentan RNAs y procesamiento de imágenes, 18 trabajos tratan sobre nuevos modelos de redes pulsantes y 15 son análisis de redes neuronales y procesamiento de imágenes. Debido a restricciones de espacio solo se documentan 77 de estas referencias. Los artículos revisados, fueron seleccionados de varios trabajos con base al prestigio de la revista o congreso que publica, el impacto que tiene la publicación en la contribución al procesamiento de imágenes y a la aplicación dirigida.

La organización del artículo es la siguiente. En la Sección II se da una introducción a la taxonomía de los niveles del procesamiento de imágenes. En la Sección III se estudian las RNAs aplicadas a procesamiento imágenes y sus modificaciones,

en la Sección IV se documentan los resultados y en la Sección V las conclusiones.

## II. TAXONOMÍA DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Las técnicas para analizar una imagen digital se agrupan en un área llamada Procesamiento Digital de Imágenes. Estas herramientas se organizan según el nivel de procesamiento que se desea realizar para analizar la información contenida en una imagen digital. Estos niveles forman una cadena de procesamiento como la que se ve en la figura 1[1]. A continuación se describen brevemente:

- 1) *Pre-procesamiento*. Operaciones para adaptar la información de una imagen y tener mejor análisis en pasos posteriores. Ejemplos de procesamiento son las operaciones de brillo y contraste.
- 2) *Segmentación*. Operaciones para hacer una partición de la imagen en varias regiones que representen la información necesaria para el problema a resolver.
- 3) *Detección de objetos y clasificación*. Determinación y clasificación de los objetos contenidos en la imagen.
- 4) *Análisis de imagen*. Obtener información de alto nivel acerca de lo que la imagen muestra.

Por su potencial para reconocer patrones de información las RNA han sido desde hace décadas herramientas para resolver problemas en cualquiera de los niveles del procesamiento de imágenes. Esto debido a que las imágenes digitales contienen mucha información difícil de interpretar por una máquina. En la literatura analizada, la mayoría de las aplicaciones de las RNAs en imágenes digitales fueron para tareas de segmentación y clasificación (CL). Para desglosar la información, la parte de segmentación se separó de la siguiente manera:

- 1) *Segmentación de forma (SS)*. Se refiere a generar una nueva imagen binarizada donde el resultado son regiones representativas de la información que se desea analizar.
- 2) *Detección de bordes (CS)*. Extracción de altas frecuencias en la imagen que representen contornos y límites de objetos en la imagen.
- 3) *Segmentación de color (CrS)*. Partición de la imagen en regiones que agrupan colores similares.
- 4) *Segmentación de Textura (TS)*. Partición de una imagen con base a los patrones de variación espacial de las intensidades de grises y color.
- 5) *Segmentación de movimiento (VS)*. Detección de objetos dinámicos en una secuencia de imágenes.

También se reportaron trabajos para eliminación de ruido (NR), agrupamiento de datos para aplicaciones específicas (Ct) y comparación entre RNAs (VR).

## III. REDES NEURONALES Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

### A. Breve historia de las RNAs

El sistema nervioso de los animales se estructura con neuronas que forman redes para el procesamiento de información generada por los diversos estímulos de entrada de los sistemas sensoriales. Dichas redes, han servido también de inspiración

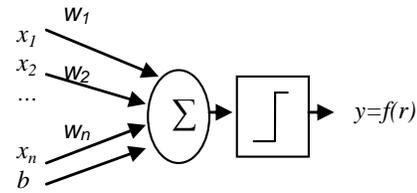


Fig. 2. Modelo de neurona artificial con salida binaria[9].

para modelar las redes neuronales artificiales (RNA), las cuales son interconexiones de neuronas artificiales. Estas redes surgieron a partir de las ideas en la publicación de McCulloch y Pitts, donde se postula que las neuronas funcionan como dispositivos booleanos. Este postulado fue criticado como teoría biológica, pero permitió generar una neurona como un modelo lineal seguido de una función activación booleana. Aquí, la función lineal representa la sinapsis (unión entre neuronas) y la agregación de la información, mientras que la función no lineal representa el procesamiento que hace la neurona. Esto resultó en un modelo que se ilustra en la figura 2, donde la función lineal se ve en la ecuación (1).

$$r = \sum_{i=1}^n x_i w_i + b \quad (1)$$

Aquí,  $x_i$  son los datos de entrada,  $w_i$  son los pesos sinápticos y  $b$  un factor de polarización. El resultado de  $r$ , es procesado por una función binaria que da un uno o un cero a la salida según el valor de  $r$  [10].

El perceptrón fue el primer modelo de red neuronal, el cual utiliza la neurona artificial de la figura 2, además de que tenía su arquitectura en tres capas y un algoritmo de aprendizaje. Este fue probado como un detector de caracteres ópticos, por lo que el campo de redes neuronales se inició como una forma de procesar imágenes [10].

Luego del perceptrón y otras redes con neuronas binarias, surgen otros modelos que también han sido utilizadas en el área de procesamiento de imágenes. Como las redes con funciones de activación continuas, tales como las sigmoideas o las funciones de base radial, definidas en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$f(r) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha r)} \quad (2)$$

$$f(x, c) = f(\|x - c\|) \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro que caracteriza la inclinación de la función,  $c$  es un punto llamado centro. En la figura 3 se observan ejemplos de las funciones sigmoidea y radial con respecto a la agregación  $r$ . En general, los modelos clásicos de estas redes tienen la característica de ser supervisados, es decir, necesitan una referencia en un proceso de entrenamiento para obtener una salida deseada a una entrada determinada. También se han generado modelos con características no supervisadas como los mapas auto-organizados de Kohonen (SOM) y la Teoría de Resonancia Adaptiva (ART). Además han surgido otros modelos como las Redes Neuronales Recurrentes, y las que se basan en

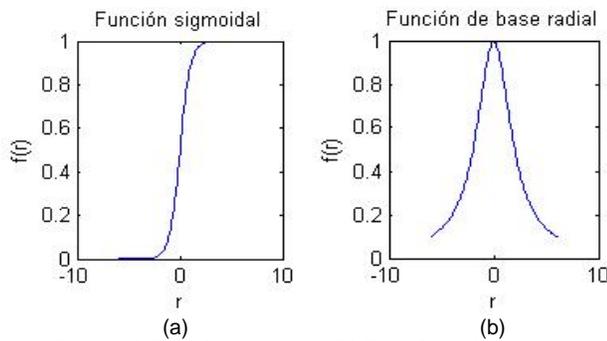


Fig. 3. (a) Función sigmoideal. (b) Función de base radial.

modelos probabilísticos que han sido por varios años muy útiles en el área del procesamiento de imágenes [1].

En los últimos 10 años, han sido varias las arquitecturas de redes neuronales utilizadas para procesamiento de imágenes. De la literatura analizada se reportan trabajos relacionados a procesamiento de imágenes con la teoría de resonancia adaptiva (ART), red neuronal celular (CNN), perceptrón multicapa (MLP), redes neuronales oscilatorias (ONN), red neuronal pulsoacoplada (PCNN), redes neuronales recurrentes (RNN), redes neuronales basadas en modelos probabilísticos (RPNN), red neuronal de funciones radiales (RBFNN) y los mapas auto-organizados de kohonen (SOM). A continuación se presentan estos casos.

#### B. Teoría de Resonancia adaptiva (ART)

Es un modelo de red neuronal artificial que basa su funcionamiento en la forma en cómo el cerebro procesa información [11][12]. Esta arquitectura puede ser supervisada y no supervisada. Dicha red se basa en el dilema plasticidad-estabilidad del aprendizaje y se implementa en tres arquitecturas, la ART1 para entradas binarias, ART2 para valores continuos y escalas de grises y ARTMAP que combina ART1 y ART2 formando una estructura de aprendizaje supervisado. La forma básica de ART es un modulo de comparación, un parámetro de vigilancia y un modulo de reinicio. El modulo de comparación toma un vector de entrada y lo agrupa en alguna clase conocida por la red. El parámetro de vigilancia se encarga de indicar el grado de pertenencia de la entrada a alguna clase dada. Si la entrada no pertenece a ninguna clase, se crea una clase nueva. Esta red es muy útil por su capacidad para agrupar datos según su información, siendo una técnica de reconocimiento de patrones.

En la búsqueda de artículos relacionados con el modelo ART, se observó que ART1 se ha utilizado para reconocimiento de huellas digitales y de caracteres. Mientras que ART2 y ARTMAP se utilizan como clasificadores de patrones o para agrupamiento de datos en distintas aplicaciones. ARTMAP apareció en todos los trabajos en su modelo difuso *Fuzzy ARTMAP* (FAM). Dentro de las modificaciones de ART, se encontró una utilizada por Liu quien publica ART MMAP (ART Mixture MAP), la cual consiste en una red neuronal ART basada en una *mixture model* (modelo de mezcla estadística) para la clasificación de subpíxeles de regiones en imágenes satelitales[13]. Poh Tan presenta en [14] un modelo de ARTMAP modular (MARTMAP), la cual es una variación de ARTMAP enfocada al reconocimiento de patrones multiclases por medio de módulos. *Simplified FAM* (SFAM) es una variante de ART

simplificada en dos capas una de entrada y otra de salida y se utiliza en reconocimiento de caracteres en [15].

#### C. Red Neuronal Celular (CNN)

Basada en la teoría de los autómatas celulares, está red permite la interacción de los vecinos de cada unidad en la red. Contiene una cantidad fija de unidades llamadas células, las cuales son sistemas no lineales, dinámicos donde la información de entrada es codificada para conocer su comportamiento. Cada célula esta localmente interconectadas con múltiples entradas que vienen de otras células. La dinámica puede ser continua (CT-CNN) ó discreta (DT-CNN).

Con respecto a la CNN, la mayoría de los trabajos revisados se enfocan a detección de bordes, segmentación de formas y algunos trabajos en detección de movimiento. En [16], Kawahara utiliza una CNN con plantilla dinámica (DCNN) que actualiza ciertos valores de aprendizaje en iteraciones y se utilizó para detección de movimiento. Strzelecki hace un método de segmentación de texturas en [17] basado en una red de oscilaciones sincronizadas con la CNN (SON) y al comparar el método con la clásica MLP obtuvo un mejor desempeño. En [18], Babatunde modifica el modelo de la CNN para mejorar la detección de bordes con respecto a otros métodos como *canny*. Kang en 2009 propone un algoritmo para segmentación de huella digital utilizando lógica difusa para obtener un umbral y a partir de ahí se utiliza una *Threshold CNN* (TCNN) para agrupar píxeles [19]. Corinto presenta una modificación de la CNN basado en aproximaciones polinomiales (PoCNN) probada en segmentación de regiones y se prueba su comportamiento dinámico [20]. En 2006 se desarrolló una arquitectura de CNN difuso (FCNN) para obtener segmentación de forma y bordes [21]. Una variante interesante es la DTCNN (CNN de tiempo discreto), la cual se vio en trabajos enfocados a segmentación de bordes [22]. Un aspecto interesante de la CNN además de sus variantes, es que es muy propicia para implementaciones en hardware. Por lo cual fue común encontrar diversas implementaciones de algoritmos CNN en *chips* o en GPUs (Unidades de procesamiento gráfico)[22][23]. Otro aspecto es que la CNN mostró en esta búsqueda es la capacidad en detección de bordes, ya que tal como en [18], fue común que los resultados con métodos clásicos de procesamiento de imágenes fueran comparados con la CNN en diversos trabajos, teniendo siempre una mayor capacidad para delimitar contornos con poca cantidad de ruido.

#### D. Perceptrón multicapa (MLP) y Backpropagation (BP)

Esta parte se refiere a redes perceptrón multicapa con funciones de activación sigmoideas que son entrenadas mediante algoritmos de aprendizaje BP. Debido a que MLP fue de los primeros modelos de redes neuronales, se plantean en muchos trabajos para comparar el desempeño entre un modelo propuesto y un perceptrón o un algoritmo de entrenamiento con BP. Otros autores como Narasimha han utilizado MLP para validar el desarrollo de algoritmos de optimización de RNAs[24].

De los resultados de las búsquedas, Crespo hace una modificación donde propone una MLP con función de activación sigmoideal y pesos como funciones gaussianas entrenados con una

variante de BP para ajuste de pesos gaussianos y tuvo buen desempeño en imágenes multispectrales[25]. Shiblee sugiere una variante de red con activación sigmoïdal pero las agregaciones de los vectores de pesos y entradas, se basan en el algoritmo de la media ponderada generalizada (GMP) [26]. Rajini en 2010 publica una evaluación del desempeño de algoritmos de entrenamiento de redes neuronales para reconocimiento de objetos. Para ellos, se utilizaron diferentes algoritmos de entrenamiento basados en BP. Las variaciones estudiadas son *BPmom* (variación de *momentum*), *Through Time*, *Resilen* y *Quick*. De estos, el algoritmo que logró converger más rápido fue el *BPmom*. Para probar los algoritmos se utilizaron varias imágenes [27]. El resto de los trabajos estudiados, se enfocan en aplicaciones de clasificación donde se auxilia la red de técnicas como transformada de *Hough*, FCM y Transformada del coseno.

#### E. Red Neuronal Oscilatoria (ONN)

La teoría de las redes oscilatorias se basa en los estímulos con oscilaciones periódicas sincronizadas en forma de grupos en la corteza visual y es posible que sirvan para detectar características en una escena visual. A partir de esto, se modelan redes con características oscilatorias que se van sincronizando según el patrón de entrada.

En la literatura se reportaron diferentes ejemplos de redes oscilatorias, pero lo más común fue el modelo LEGION (*locally excitatory globally inhibitory oscillator network*) en el cual la oscilación se genera a partir de la retroalimentación de un vecindario de unidades excitables y un inhibidor global. Aquí cada unidad excitable es estimulada de forma proporcional a cada entrada formando una retroalimentación con el inhibidor y se crea una oscilación cuya forma depende del estímulo de entrada. De esta manera, se va generando una serie de oscilaciones que representan cada patrón de formas que tiene una imagen [28].

De esta red se revisaron algunos trabajos, todos enfocados a segmentación de objetos y texturas. También fue común encontrar implementaciones en hardware con las redes oscilatorias. Fernández implementa el modelo LEGION en un FPGA en [29] para segmentación de carácter e implementa el mismo modelo en un circuito CMOS [30].

#### F. Red Neuronal Pulso-Acoplada (PCNN)

Esta red es utilizada para preprocesamiento y desarrollada por Eckhorn, a partir de la corteza visual del cerebro del gato. La PCNN se implementa en un modelo de una neurona por píxel y su arquitectura tiene tres módulos principales: el módulo dendritas, el módulo de encadenamiento y el generador de pulsos. En el árbol de dendritas recibe la información del vecindario y se procesa en el módulo de encadenamiento y el *feeding*, otra parte de la red que también contiene la entrada. El generador de pulsos tiene un umbral dinámico que se basa en el proceso interno que tiene la neurona en el *feeding* y el módulo de encadenamiento [3].

Wang en 2010 publica un repaso de la PCNN donde se hace una investigación del uso de este modelo en 10 años, y se documentan modificaciones que se han publicado para

simplificar el modelo en función de mejorar el tiempo de cómputo o ampliar las aplicaciones que puede tener la PCNN. Dentro de los modelos que se reportan, está la red de Kinser que se le conoce como *intersecting cortical model* (ICM), se trata de una PCNN simplificada con menos ecuaciones y diseñada específicamente para procesamiento de imágenes. Un modelo distinto es la PCNN con encadenamiento unitario (*unit linking*), que se hace a partir de la reducción de parámetros en la neurona y haciendo la parte del encadenamiento como una sola unidad de entrada. Otro es la PCNN multispectral y se trata de una PCNN multicanal que consiste en un conjunto de PCNNs en paralelo de canales separados. En el trabajo de revisión de Wang también se hace referencia a la contribución que tienen los modelos de la PCNN en áreas del procesamiento de imágenes como segmentación, eliminación de ruido, detección de objetos y extracción de características debido su capacidad de preprocesamiento [3].

#### G. Redes neuronales Recurrentes (RNN)

Son redes neuronales que tienen conexiones formando un ciclo directo. Esto permite comportamientos dinámicos pero consumen más memoria que las redes directas. Los ejemplos clásicos de las redes recurrentes son las redes de *Hopfield*, la RNN bidireccional o la RNN de tiempo continuo. El uso de las RNN es muy variado tanto en procesamiento como en aplicación y tiene un gran potencial en agrupamiento de datos como ART.

De los artículos revisados con la RNN, la mayoría se enfoca a segmentación de formas y movimiento. Aunque también se dieron algunos modelos de clasificación y agrupamiento de datos. Chatterjee en [31] propone el uso de una RNN de Elman y Jordan para generar escalas de grises en imágenes de medio tono. Zheng propone en [32] una capa de modo competitivo con una Lotka Volterra RNN para extraer y segmentar objetos en imágenes digitales. Zhou plantea un modo competitivo similar a Zheg pero es una RNN con neuronas de tiempo discreto para segmentar imágenes médicas [33]. Guanzhong sugiere una RNN de ciclo dinámico (DCRNN) basada en la red de Elman para segmentación de texturas [34]. Nishide propone una RNN con parámetro de polarización (RNNBP) para extraer objetos dinámicos basados en la perspectiva del sensor activo de un robot [35]. Bianchini desarrolla un algoritmo de localización de objetos donde una RNN de entrada-salida (IO RNN) se usa para procesar gráficas posicionales acíclicas y generar funciones en espacios euclidianos [36]. Reiter en [37] hace un modelo de segmentación y reconocimiento de movimiento con una red de neuronas para memorias recurrentes (LSTM RNN) y cadenas de Markov. En la literatura revisada solo se encontró un trabajo relacionado con la red original de Hopfield, propuesto por Morikawu para reducción de ruido [38].

#### H. Red Neuronal con Funciones de Base Radial (RBFNN)

Las RBFNN son redes que contienen funciones de activación de base radial que cumplen con el criterio que se ve en la ecuación (3). Generalmente estas funciones de activación son de tipo gaussiano. Las RBFNN, consisten típicamente de una red de tres capas; la de entrada, la oculta que contiene funciones de base radial no lineal y la capa de salida. Las RBFNN son muy

utilizadas en aplicaciones específicas como segmentación de tejidos en imágenes médicas, inspección de calidad en procesos industriales, reconocimiento de rostros y gestos.

De los artículos revisados que documentan procesamiento de imágenes con RBFNN, la mitad se enfocan a trabajos de clasificación, el resto utilizan la RBFNN principalmente para segmentación de formas. Veera hace una comparación en el funcionamiento de una RBFNN y una MLP para tareas de categorización y recuperación de datos [39]. Kumar en [40] utiliza una RBFNN para reducir tiempos de computación en algoritmos de segmentación de formas basado en agrupamiento difuso para imágenes médicas. Sing desarrolló un algoritmo de segmentación de imágenes del cerebro donde utilizó una RBFNN autoadaptiva que emplea una función para hacer un espacio de características separables no lineales y simular el proceso del cerebro en tratar con una situación nueva [41]. Benamrane propone el uso de una RBFNN con un algoritmo genético que calcula el número de neuronas con funciones de activación gaussianas para segmentación de imágenes para detección de bordes en imágenes médicas del cerebro [42].

### 1. Redes Neuronales probabilísticas (RPNN)

En la literatura analizada se encontraron tres tipos de redes probabilísticas, la red neuronal probabilística (PNN), el algoritmo de mezclas gaussianas (GMM) y la red neuronal aleatoria. La PNN es una RNA semi-supervisada basada en las redes de decisión bayesiana. La arquitectura consta de cuatro capas. La primera capa recibe el vector de entrada. La segunda capa tiene un conjunto de neuronas totalmente conectadas con las neuronas de la primera capa con funciones de activación dada por:

$$\phi_{jk}(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^d} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x - m_{jk}^x)^2\right) \quad (4)$$

Donde  $d$  es el tamaño del vector,  $x$  es la entrada,  $m_{jk}^x$  es la media del  $j$ -ésimo vector de referencia,  $k$  es la clase correspondiente y  $\sigma$  es un parámetro de suavizado. La tercera clase es la capa de suma que complete la estimación de probabilidad. La última capa clasifica la entrada de acuerdo a la decisión bayesiana[43]. Esta red es muy utilizada para clasificación y reconocimiento de patrones en aplicaciones específicas. Las PNN encontradas en la revisión se utilizan para segmentación de formas y texturas. Dentro de las modificaciones encontradas, está la PNN ponderada (WPNN), la cual resuelve algunas limitantes de la PNN clásica por una matriz de covarianza que reemplaza los factores de suavizado singular y agrega ponderaciones a la capa de suma. Estos factores ponderados indican la probabilidad de que un vector de referencia pertenezca a una clase. La WPNN se utilizó para segmentación de formas en imágenes del cerebro y se probó con una SOM previa al procesamiento de la red [44][45]. Otra variante presentada es la *Background Neural Network* (BNN), la cual sirve como modelo estadístico de los antecedentes de cada posición de un píxel en una secuencia de video [46]. Otro modelo de interés que se encontró fue una RNAs aleatoria, la cual se trata de una representación matemática de neuronas que intercambian señales pulsantes. Cada neurona es representada por un entero cuyo valor se incrementan cuando la célula recibe un

pulso que la inhibe ó habilita, de manera que los impulsos se asocian con 1 y -1. De los artículos revisados solo se encontró una red neuronal aleatoria, que realiza segmentación de texturas utilizando también un filtro Gabor [47].

Un algoritmo también probabilístico, es el modelo de mezclas gaussianas (GMM) y es una herramienta muy útil para agrupación en poblaciones de datos. Este método es una función de densidad de probabilidad paramétrica representada como la suma ponderada de densidades gaussianas [48]. Esta función de probabilidad es tomada como una red neuronal probabilística [49]. Es muy utilizada para clasificar patrones de voz y en segmentación de imágenes digitales. Fueron cuatro los artículos donde se utilizaba GMM, en el caso de Meur, Chevet en [50] se enfoca a hacer un algoritmo basado en la GMM para obtener la parte más sobresaliente de la imagen, mientras que Faiza en [49] y Blekas en [51] se enfocan en segmentación de texturas y en 2009 Peñalver presenta un modelo del GMM para segmentación del color con base a la entropía de datos [52].

### J. Mapa Auto-Organizado de Kohonen (SOM)

La SOM es una red no supervisada que se basa en un proceso competitivo donde cada neurona en una red neuronal se vuelve sensitiva a las categorías de los patrones de entrada. Generalmente tiene una arquitectura bidimensional y utiliza el aprendizaje competitivo para que las neuronas sin una distribución de datos específica se vayan aproximando a la distribución de los datos de entrada. Esta red se ha utilizado mucho en reconocimiento de patrones para aplicaciones y en análisis de texto [53][54].

De los artículos seleccionados de la SOM, varias aplicaciones se enfocan a segmentación de formas geométricas, color, movimiento y un poco de segmentación de contornos. La SOM se encontró combinada con agrupamiento difuso, PCA y algoritmos genéticos. Un punto interesante es que se encontraron varios algoritmos que utilizan SOFM para procesar color, por ejemplo Zhang en 2007 plantea la SOFM para segmentar color donde una técnica wavelet mejora su eficiencia [55]. Christodoulou, Michaelides sugieren en [56] un algoritmo donde la técnica *K-nearest neighbor* y la SOFM agrupan píxeles que generen clases de nubes. Otra variante presentada es la SOM paramétrica (PSOM), la cual es un conjunto variado de bases no lineales para hacer mapeos topológicamente ordenados con vectores de referencia y fue utilizada por Nölker y Ritter en [57] para calcular la posición de distintos puntos a través de los ángulos entre ellos, con el objetivo de ver la posición de los dedos en una imagen digital. Wu desarrolla una variante que la denomina SASOM (SOM estructura adaptiva) y se trata de un algoritmo que encuentra el número correcto de neuronas para una aplicación, que en el caso de [58] se utiliza para reconocimiento de gestos. Otra estrategia es un método propuesto basado en mecanismos de atención visual denominado SOBS (*Self Organization Background Substraction*), y es un algoritmo basado en diferencias de fondo pero auto-organizado para evitar ruidos en la detección de movimiento [59]. SOTM (*Self Organization Tree Map*) es otra estrategia como una SOM con características similares al modelo ART que Kyan y Jarrah presentan haciendo diversas pruebas y variantes para procesamiento de multimedia [60]. Salhi en 2009 hace una

revisión de varios modelos inspirados en la forma y la dinámica de SOM [61]. Una estrategia común fue la de combinar la SOM con otros modelos de *soft computing*, muestra de esto es la combinación realizada por Awad en [62] que combina la SOM con un algoritmo genético haciendo un sistema neurogenético. Otra combinación son los mapas auto-organizados con técnicas de lógica difusa, un ejemplo de esto es el modelo FCNN (*Fuzzy Clustering Neural Network*) el cual es un clasificador que se utilizó en agrupamiento de píxeles para segmentar movimiento [63]. La SOTFN-SV es una red difusa con inferencia Sugeno auto-organizadas para segmentación de color [64].

En estas modificaciones que fueron los modelos con mejores resultados de la SOM, se puede observar un marcado uso de la para detección de patrones de color y movimiento.

### K. Redes Pulsantes (SNN)

Conforme se van generando más conocimiento en la forma en cómo funciona el sistema nervioso de los animales, nuevos modelos de RNAs surgen. Un esquema que ha tomado mucho auge en los últimos años es el de las RNAs pulsantes (SNN). Estas redes se inspiran a partir de que las células del sistema nervioso generan una serie de potenciales de acción que se pueden analizar como señales en el dominio del tiempo. En la figura 4, se puede observar que estas señales van generando una serie de picos o espigas cuya frecuencia entre pulsos y forma contiene la información necesaria para la percepción y procesamiento de la información [65].

Este esquema es muy distinto del modelo inicial de McCulloch y Pitts, ya que implica que la información que codifica una neurona va más allá de una constante binaria. Algunos autores consideran que las SNNs se pueden considerar como una tercera generación de RNAs; la primera generación son las RNAs basadas en el modelo binario de la figura 2 y la segunda generación las neuronas con funciones de activación continuas [66][67]. La mayoría de estos modelos se establecen como ecuaciones diferenciales que definen la dinámica de una neurona biológica como por ejemplo el modelo de *Hodgkin-Huxley* el cual está dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \\ \frac{du}{dt} &= a(bv - u) \end{aligned} \quad (5)$$

con un reinicio de espiga cuando  $v \geq 30\text{mV}$ , se obtiene:

$$\begin{aligned} v &\leftarrow (-65\text{mV}) \\ u &\leftarrow u + 2 \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $u$ ,  $v$  son variables dimensionales,  $a$  y  $b$  son parámetros dimensionales,  $t$  es tiempo. A partir de estas ecuaciones se diseñan neuronas pulsantes con salidas similares a las de la figura 4[68].

La teoría de neuronas pulsantes se inspira de cualquier parte del sistema nervioso, por lo que existen modelos basados en la parte del cerebro dedicada a procesar la información visual. Actualmente varios autores han propuesto distintas arquitecturas

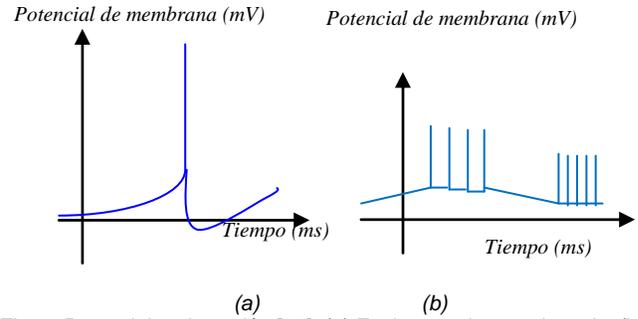


Fig. 4. Potenciales de acción [66]. (a) Espiga o pulso en sinapsis. (b) tren de pulsos (espigas) a la salida de neurona.

de SNNs, pero en la literatura analizada no se reportó un modelo más general. Sin embargo, existen algoritmos de aprendizaje como el STDP (*Spike Time Dependet Plasticity*) y en [69] se propone la Regla de Plasticidad de Actividad Sináptica (SAPR) para aprendizaje de SNNs. La SAPR se probó con neuronas pulsantes que hacen procesamiento de segmentación y clasificación en imágenes de tejidos biológicos. Otras pruebas realizadas en procesamiento de imágenes con las SNNs se ven en [70][71] donde se utilizan las SNN para detección de caracteres y líneas. En [72] se propone un modelo con SNN basado en atención selectiva y detalles sobresalientes de objetos.

### L. Otras arquitecturas

También se dieron diversos casos donde las redes no se pudieron clasificar en una categoría en específico. Zhao en [73] propone una red caótica de mapas para segmentación de escenas y en [74] utiliza sistemas caóticos para agrupación de datos. Lee en 2004 utiliza oscilaciones de Lee en el modelo TCAN, (*Transient Autoassoative Network*) para segmentación de escena [75]. Shen, Chang en 2005 presenta un modelo de segmentación de imágenes del cerebro basada en agrupamiento de FCM optimizado con una RNA [76]. Lin y Chang desarrollan un modelo de RNA difusa (FNN) con inferencia de Sugeno, distribuida en cinco capas, donde la capa dos tiene las variables lingüísticas con funciones de mezclas gaussianas, la tercer capa tiene las reglas difusas y se prueba en segmentación de texturas y caracteres [77]. Rasche en [78] presenta un modelo para detección de bordes y movimiento bidimensional de neuronas pulsantes que le llama membrana excitable. Mignotte en 2011 desarrolla para segmentación no lineal de color un sistema basado en agrupamiento difuso con SVM [79]. Juang propone dos arquitecturas neurodifusas de cuatro y seis capas para clasificar posturas del cuerpo y diagnóstico de dispositivos en imágenes térmicas [80][81]. La red de cuatro etapas tiene una capa de variables lingüística, otra de inferencia y otra de salida, mientras que la de seis tiene una capa intermedia de normalización. Yang en [82] desarrolla un algoritmo para reconocimiento de gestos con una TDNN, (*Time Delay Neural Network*) la cual es una red directa que hace ventaneos de tiempo en cada capa para hacer análisis de señales en el dominio del tiempo y clasificar gestos con manos.

## IV. ESTADÍSTICAS Y RESULTADOS DE LA REVISIÓN

En esta sección se presenta un concentrado de la revisión de los trabajos analizados. En la Tabla I se pueden observar las

TABLA I. TIPO DE PROCESAMIENTO REALIZADO POR LAS RNA.

Proc./Red	ART	CNN	MLP, BP	ONN	RNN	PRNN	RBF NN	SOM	OTRAS	TOTAL
NR	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
TS	0	2	0	1	1	4	0	1	1	10
VS	1	2	0	0	0	0	0	3	2	8
CS	0	8	0	0	1	1	1	1	1	13
SS	2	6	10	9	4	5	7	5	5	53
Ct	9	0	0	0	2	0	1	2	1	15
Cr S	2	1	1	0	0	0	1	7	1	13
CL	15	0	5	2	3	5	10	1	2	43
VR	1	0	0	0	2	0	0	0	0	3
OTROS		2	1	0	1	0	0	2	2	8
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>	<b>21</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>15</b>	<b>167</b>

TABLA II. RNA Y SUS VARIANTES ENCONTRADAS

ART	CNN	ONN	PCNN	RNN	PRNN	RBF NN	SOM	OTRAS	MLP, BP
ART MMAP	DCNN	LEGION	ICM	Elman Jordan	PNN	Autoadaptiva	SOFM	Caóticas	
MARTMAP	SON		PCNN multicanal	Lotka Volterra RNN	WPNN	FCM RBFNN	PSOM	Neurodifusas	MLP GMP
SFAM	TCNN		Encadenamiento unitario	DCRNN	GMM	NeuroRBFNN	FCNN	TCAN	MLP pesos gaussianos
	PoCNN			RNNBP	RNA aleatoria		SOTFN	TDNN	
	CTCNN			IO RNN			SASOM	FNN	
				LSTM RNN			SOBS	Membrana excitable	
				Hopfield			SOTM		

cantidades de artículos organizados por redes y tipo de procesamiento que se realiza en la imagen. La PCNN no se agregó en la Tabla I debido a que se tomó como base el estudio de Wang en [3], donde se documenta el potencial de la red y las aplicaciones a tareas de segmentación, reconocimiento de patrones y objetos. Tampoco se toma las SNN debido a que los trabajos analizados no reportan una red concreta. Se puede ver en la Tabla I que las aplicaciones más comunes son segmentación de formas y clasificación. Referente a segmentación de formas, las redes que reportaron más resultados fueron RBFNN, MLP con funciones de activación gaussianas, las ONN y las redes caóticas. Mientras que las redes que actúan más como clasificadoras son ART, PNN y RBFNN. La tercera forma de procesamiento más común es Ct, para lo cual fueron redes ART las más utilizadas aunque las RNN y la SOM reportaron trabajos. En segmentación de bordes, el modelo más utilizado en la literatura analizada fue CNN, mientras que en segmentación de color fue la SOM. Para segmentación de texturas el GMM, las redes aleatorias y PNN fueron los algoritmos más comunes. Un aspecto que se ve es que se reporta un resultado de eliminación de ruido, este se tomó como una categoría aparte por que fue la única aplicación en tareas e pre-procesamiento. Finalmente detección de movimiento aunque no generó muchos resultados, fue SOM y CNN los que reportaron trabajos con buenos resultados.

También se puede en la Tabla I ver que las redes con más resultados son ART, CNN y SOM. ART mostró más resultados para agrupamiento de datos y clasificación, CNN muestra más resultados para detección de bordes y segmentación de formas, mientras que SOM muestra más resultados para segmentación de

color. Además se puede observar también que CNN y SOM reportaron resultados en todas las formas de segmentación.

Dentro de las aplicaciones más comunes, resalta que se obtuvieron varios resultados en fueron procesamiento de imágenes médicas, sensor remoto, reconocimiento de caracteres y reconocimiento de placas de automóvil.

En la Tabla II se observa un resumen de las RNAs y modificaciones de redes que resultaron los modelos más exitosos reportados en el análisis de los 167 artículos y fueron descritos en la sección 3. En el caso de ART, sus variantes muestran que puede servir en tareas de segmentación de formas y objetos. Para CNN, las modificaciones fueron muy variadas en aplicaciones, ya que fueron útiles en tareas de detección de movimiento, texturas en imágenes medicas, segmentación de huella digital, formas y bordes. Además se presentan aplicaciones en hardware. Referente a LEGION, este fue un modelo documentado en varios trabajos de manera exitosa para segmentación de formas e implementaciones en hardware. Las modificaciones de la PCNN se enfocaron más en perfeccionar el modelo para procesamiento de imágenes y en el caso de la PCNN multicanal para aplicaciones de fusión de imágenes. Las redes recurrentes que se muestran en la Tabla II, tuvieron buenos resultados para aplicaciones específicas en movimiento y detección de objetos. El resto de las variantes de RNN obtuvieron buenos resultados en simulación. En el caso de las variantes de RBFNN, fue usual encontrarla con algoritmos genéticos y difusos para aplicaciones a reconocimiento de rostros y segmentación de imágenes del cerebro. Referente a los modelos de la categoría RPNN, se observó el marcado uso en segmentación y detección de texturas con GMM, además WPNN fue exitosa en segmentación de

imágenes del cerebro y PNN para detección de placas en automóviles. Para la SOM, las variantes SOMF, PSOM, SOFT NN, SASOM muestran muy Buenos resultados en procesamiento de color, mientras que SOBS, FCNN útiles para detección de movimiento.

## V. CONCLUSIONES

De la revisión de los 167 artículos, se pudo observar que las RNAs tuvieron un uso muy marcado para tareas de segmentación. De manera más específica, son muy utilizadas para segmentación de formas, color, textura, movimiento y bordes.

De acuerdo al análisis de esta revisión de artículos, segmentación de forma fue la aplicación más común de varias arquitecturas de RNA, ya que es difícil extraer con métodos clásicos de procesamiento de imágenes formas irregulares que no tienen un patrón tan repetible, tales como tejidos biológicos, regiones en sensado remoto, patrones biométricos, inspección de producto, etc.

Referente a procesamiento de color, los mejores resultados en este análisis fueron SOFM, PSOM, SOFT NN, SASOM. Para textura en este análisis fue GMM y la SON. Para segmentación de movimiento SOBS, FCNN, DTCNN y la TDNN han sido los modelos más exitosos de acuerdo con la literatura analizada y segmentación de bordes ha sido más estudiado por varios modelos basados en la CNN. Para tareas de clasificación las redes ART, MLP, RBFNN y PNN han sido las más utilizadas.

La PCNN aunque no se documentó en este trabajo, se puede constatar mediante el estudio en [3] que es un modelo muy apto para segmentación de imágenes. Un detalle interesante es que la SOM ha sido documentada antes como un modelo muy flexible y en esta revisión resultó útil en todas las tareas de segmentación de imágenes. Otro detalle es que las ONN aparte de ser modelos exitosos para segmentación, también se documenta su flexibilidad en implementaciones en hardware. Además, CNN es documentada con una capacidad mayor que algoritmos clásicos en detección de bordes y segmentación de formas. En los últimos cuatro tipos de redes mencionados, se pudo observar su flexibilidad para hacer modificaciones y nuevos modelos, además de que generan resultados estables y consistentes en trabajos propuestos recientemente, por lo que se asume que se puede trabajar por varios años con estas redes. Sin embargo, durante la revisión de SNNs, se pudo notar que existen muchos laboratorios y universidades que aún proponen sus SNNs. La mayoría de las SNNs se basan en investigaciones recientes de los potenciales de acción del sistema nervioso, por lo que conforme vayan surgiendo nuevos conocimiento acerca del funcionamiento de la corteza visual, vendrán modelos de RNAs que funcionen de manera similar a la visión de los animales.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT- Gobierno del Estado de Chihuahua, por el apoyo para realizar este trabajo bajo el apoyo CHIH-2009-C02-125358.

## REFERENCIAS

- [1] Egmont-Petersen, Ridder, Handels, "Image processing with neural networks—a review", *Pattern recognition*, vol. 35, no. 10, pp. 2279-2301, Oct 2002.
- [2] Misra Janardan and Indranil Saha, "Artificial neural networks in hardware: A survey of two decades of progress", *Elsevier Neurocomputing*, vol. 74, no. 1, pp. 239-255, Dec 2010.
- [3] Zhaobin Wang, Yide Ma, Feiyan Cheng and Lizhen Yang; "Review of pulse-coupled neural network", *Elsivier Imagen and vision computer*, vol. 28, no. 1, pp. 5-13, Jan 2010.
- [4] Weihua and Yuhong Li, "Applications of Artificial Neural Networks in Financial Economics: A Survey", *IEEE Computational Intelligence and Design (ISCID)*, vol. 1, Oct. 2010, pp. 211-214.
- [5] Chowdhury, F.N, "A survey of neural networks applications in automatic control", *IEEE Proceedings of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory*, Athens OH, Mar 2001, pp. 349-353.
- [6] Micheli and Tzanakou, "A Comparative Survey on Biometric Identity Authentication Techniques Based on Neural Networks", *IEEE Biometrics: Theory, Methods, and Applications book*, Nov 2010, pp. 47-79.
- [7] Naz Samina, Hammad Majed and Humanyun Irshad, "Image Segmentation using Fuzzy Clustering: A Survey", *International Conference on Emerging Technologies; islamabad*, Oct 2010, pp. 181-186.
- [8] N Senthilkumaran and R. Rajesh, "Image Segmentation - A Survey of Soft Computing Approaches", *IEEE computer society, International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, Oct 2009, pp. 844-846.
- [9] Lefteri H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, "Fuzzy and neural approaches in engineering", *Wiley & SONS INC*, 1997, pp. 191-227.
- [10] Robert Hecht-Nielsen, *Perceptrons*; University California San Diego, Institute for Neural Computation Technical Report No. 0403, Jul 2004.
- [11] S. Grossberg, "Competitive learning: from iterative activation to adaptive theory", *Cognitive science*, vol. 11, no. 1, pp. 23-63, Jan 1987.
- [12] Grossberg S and Carpenter G, "Adaptive Resonance Theory", *Cambridge, Massachusetts: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, no. 2, (1-12), 1998.
- [13] Weiguo Liu, Karen C. Seto, Elaine Y. Wu, Sucharita Gopal, and Curtis E. Woodcock, "ART-MMAP: A Neural Network Approach to subpixel classification", *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 42, no. 9, pp. 1976-1983, Sep 2004.
- [14] Tan, Chue Pon, Chen Change Loy, Weng Kin Lai, Chee Peng Lim, "Robust modular ARTMAP for multi-class shape recognition", *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Jun 2008, pp. 2405-2412.
- [15] M Keyarsalan, GH A Montazer and K Kazemi, "Font-based persian character recognition using Simplified Fuzzy ARTMAP neural network improved by fuzzy sets and Particle Swarm Optimization", *IEEE, Evolutionary Computation Congress*, Trondheim, May 2009, pp. 3003-3009.
- [16] Makasakazu Kawahara, Takashi Inoue and Yoshifumi Nishio, "Image Processing Application Using CNN with Dynamic Template", *International Workshop on Cellular Nanoscale; Berkeley CA*, Feb 2010, pp. 1-6.
- [17] Michal Strzelecki, Joonwhoan Lee and Sung-Hwan Jeong, "Analysis of Biomedical Textured Images with Application of Synchronized Oscillator-based CNN", *IEEE 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)*, Berkeley CA, Feb 2010, pp. 1-6.
- [18] Hezekiah Babatunde, Olusegun Folorunso and Adio Akinwale, "A Cellular Neural Network- Based Model for Edge Detection", *Journal of Information and Computing Science*, vol. 5, no. 1, pp. 3-10, 2010.
- [19] Jiaying Kang and Wenjuan Zhang, "Fingerprint Segmentation using Cellular Neural Network", *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing*, vol. 2, no. 1, Jun 2009, pp. 11-14.
- [20] F Corinto, M Biey and M Gilli, "Non-linear coupled CNN models for multiscale image analysis", *International journal of circuit theory and applications*, vol. 34, no. 1, pp. 77-88, Jan 2006.
- [21] Koki Nishizono and Yoshifumi Nishio, "Image Processing of Gray Scale Images by Fuzzy Cellular Neural Network", *RISP International Workshop nonlinear circuits*, Honolulu Hawaii, USA, Mar 3-5 2006, pp. 90-93.
- [22] Fujita Tomohiro and Okamura Takashi, "CAM-Universal Machine: A DTCNN Implementation for Real-Time Image Processing", *11th International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, Santiago de Compostela, Spain, pp. 219-223, Jul 2008.
- [23] Ryanne Dolan, Guilherme DeSouza, "GPU-Based Simulation of Cellular Neural Networks for Image Processing", *Proceedings of International Joint*

- Conference on Neural Networks, Atlanta Georgia, USA, Jun 2009, pp. 730-735.
- [24] Pramod L. Narasimha, Walter H. Delashmit, Michael T. Manry, "An integrated growing-pruning method for feedforward network training", *Science Direct, Neurocomputing*, vol. 71, no. 13-15, Aug 2008, Pages 2831-2847.
- [25] Crespo Juan, Duro Richard and Lopez Fernando, "Gaussian Synapse ANNs in Multi- and Hyperspectral Image Data Analysis", *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 52, no. 3, pp. 724-732, Jun 2003.
- [26] Mohd Shiblee, B Chandra, Prem K Kalra, "Generalized Power Mean Neuron Model", *IEEE, Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*; Jan 2010, pp. 276-279.
- [27] G K Rajini and Dr Ramachandra Reddy, "Performance Evaluation of Neural Networks for Shape Identification in Image Processing", *IEEE computer society, International Conference on Signal Acquisition and Processing*; Bangalore, India, 2010, pp. 255-258.
- [28] Naeem Shareef, DeLiang L. Wang and Roni Yagel, "Segmentation of Medical Images Using LEGION", *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 18, no. 1, pp. 74-91, Jan 1999.
- [29] D enis Fernandes, Jeferson Polidoro Stedile and Philippe Olivier Alexandre Navaux, "Architecture of Oscillatory Neural Network for Image Segmentation", *IEEE computer society, Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing*, 2002, pp. 29-36.
- [30] Daniel Fern andez, Gerard Villar, Eva Vidal, Eduard Alarc on, Jordi Cosp and Jordi Madrenas, "Mismatch-tolerant cmos oscillator and excitatory synapse for bioinspired image segmentation", *IEEE International Symposium, Circuits and Systems, ISCAS, May 2005*, pp. 4114-4117.
- [31] Arpitan Chatterjee, Kanay Ch Paul and Bipan Tudu, "Application of recurrent neural network for generating grayscale digital half-tone images", *IEEE computer society, International Conference on Emerging Applications of Information Technology*, Feb 2011, pp. 41-44.
- [32] Bochuan Zheng, Zhan Yi, "Extracting Long Contour by Using the Competitive Layer Model of the Lotka-Volterra Recurrent Neural Networks", *IEEE International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, vol. 3, Aug 2010, pp. 627-631.
- [33] Wei Zhou and Jacek Zurada, "Discrete-time Recurrent Neural Networks for Medical Image Segmentation based on Competitive Layer Model with LT neurons", *IEEE Biomedical Engineering and Computer Science international conference*, April 2010, pp. 1-4.
- [34] Guanzhong Li, "A New Dynamic Strategy of recurrent neural network", *IEEE proceedings Cognitive Informatics international conference*, Kowloon, Hong Kong, Jun 2009, pp. 486-491.
- [35] Shun Nishide, Tetsuya Ogata, Ryunosuke Yokoya, Jun Tani, Kazunori Komatani, and Hiroshi G. Okuno, "Active Sensing based Dynamical Object Feature Extraction", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice Francia*, Sep 2008, pp. 1-7.
- [36] Monica Bianchini, Marco Maggini and Lorenzo Sarti, "Object localization using Input/Output Recursive Neural Network", *IEEE Computer society international conference Pattern Recognition*, vol. 3, Sep 2006, pp. 1-4.
- [37] Reiter Stephan, Bj orn Schuller and Gerhard Rigoll, "A combined LSTM-RNN - HMM - approach for meeting event segmentation and recognition", *IEEE proceedings, International conference on Speech and Signal Processing, Acoustics*, May 2006, vol. 2, pp. 393-396.
- [38] Hirotoku Morikawu and Shigeo Wudu, "Scene discrimination by recalling with visual neural system", *IEEE International Conference on Neural & Signal*, Nangng China, Dec 2003, pp. 200-203.
- [39] Veera Ms B, "Research Study of Neural Networks for image categorization and retrieval", *IEEE Computer and Automation Engineering International Conference*, Singapore, vol. 2, Feb 2010, pp. 686-690.
- [40] S Sathish Kumar, M. Moorthi, M Madhu, Dr R Amutha, "An improved method of segmentation using fuzzy-neuro logic", *IEEE computer society Second International Conference on Computer Research and Development*, May 2010, pp. 671-675.
- [41] K. Sing, D. K. Basu. M. Nasipuri, and M. Kundu, "Self-adaptive RBF neural network-based segmentation of medical images of the brain", *IEEE Proceedings Intelligent Sensing and Information conference*, Jan 2005, pp. 447-452.
- [42] Benamrane Nac era and Abdelkader Fekir, "Medical Images Segmentation By Neuro-Genetic Approach", *IEEE computer society, International Conference on Information Visualisation*, Jul 2005, pp. 981-986.
- [43] Rivas-Perea P, J. G. Rosiles, M. I. Chacon M, "Traditional and Neural Probabilistic Multispectral Image Processing for the Dust Aerosol Detection Problem", *IEEE Southwest Symposium Image Analysis & Interpretation (SSIAI)*, 23-25 May 2010, pp. 169 - 172.
- [44] Tao Song, Mo Jamshidi, Roland R. Lee and Mingxiong Huang, "A Novel Weighted Probabilistic Neural Network for MR Image Segmentation", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, Oct 2005, pp. 2501-2506.
- [45] Tao Song, M. Jamshidi, Roland R. Lee and Mingxiong Huang, "A Modified Probabilistic Neural Network for Partial Volume Segmentation in Brain MR Image", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 18, no. 5, pp. 1424-1432, Sep 2007.
- [46] Culibrk Dubravko, Oge Marques and Daniel Socek, "Neural Network Approach to Background Modeling for Video Object Segmentation", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 18, no. 6, pp. 1614-1627, Nov 2007.
- [47] Rong Lu and Yi Shen, "Image Segmentation Based on Random Neural and Gabor filters", *IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, pp. 6464- 6467, Jan 2006.
- [48] Reynolds, Douglas, "Gaussian mixture Model", Massachusetts, MIT Lincoln Laboratory, Disponible: [www.ll.mit.edu/mission/.../ist/.../0802\\_Reynolds\\_Biometrics-GMM.pdf](http://www.ll.mit.edu/mission/.../ist/.../0802_Reynolds_Biometrics-GMM.pdf)
- [49] Faiza Mekhalfa, Nafa  Nacereddine and Aicha Baya, "Unsupervised Algorithm for Radiographic Image Segmentation Based on the Gaussian Mixture Model", *International Conference Eurocon 2007, Warsaw*, Sep 2007, pp. 289-293.
- [50] Oliver Le Meur and Jean-Claude Chevet, "Relevance of a Feed-Forward Model of Visual Attention for Goal-Oriented and Free-Viewing Tasks", *IEEE Transactions On Image Processing*, vol. 19, no. 11, pp. 2801-2813, Nov 2010.
- [51] K Blekas, "A Spatially Constrained Mixture Model for Image Segmentation", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 16, No. 4, pp. 494-498, April 2007.
- [52] Antonio Pe alver, Francisco Escolano and Juan S enz, "Learning Gaussian Mixture Models With Entropy-Based Criteria", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 20, no. 11, pp. 1756-1771, Nov 2009.
- [53] M.N.M. Sap, Ehsan Mohebi, "Hybrid Self Organizing Map for Overlapping Clusters", *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, pp. 11-20, 2008.
- [54] Teuvo Kohonen, Samuel Kaski, Krista Lagus, Jarkko Saloj arvi, Jukka Honkela, Vesa Paatero, and Antti Saarela, "Self Organization of a Massive Document Collection", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 574-585, May 2000.
- [55] Jun Zhang and Qieshi Zhang, "Color Image Segmentation Based on Wavelet Transformation and SOFM Neural Network", *IEEE Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec 2007, pp. 1778-1781.
- [56] Christodoulos I. Christodoulou, Silas C. Michaelides, and Constantinos S. Pattichis, "Multifeature Texture Analysis for the Classification of Clouds in Satellite Imagery", *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 41, no. 11, pp. 2662-2668, Nov. 2003.
- [57] Claudia N lker and Helge Ritter, "Visual Recognition of Continuous Hand Postures", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 13, no. 4, pp. 983-994, Jul 2002.
- [58] Ying Wu and Thomas Huang, "Nonstationary Color Tracking for Vision-Based Human-Computer Interaction", *IEEE transactions on neural networks*, vol. 13, no. 4, pp. 948-960, Jul 2002.
- [59] Lucia Maddalena and Alfredo Petrosino, "A Self-Organizing Approach to Background Subtraction for Visual Surveillance Applications", *IEEE Transactions On Image Processing*, vol. 17, no. 7, pp. 1168-1177, Jul 2008.
- [60] Matthew Kyan, Kambiz Jarrah, Paisarn Muneesawang and Ling Guan, "Strategies for Unsupervised Multimedia Processing: self-organizing trees and forests", *IEEE computational intelligence magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 27- 40, May 2006.
- [61] Mohamed Salah Salhi, Najet Arous, and Noureddine Ellouze, "Principal temporal extensions of SOM: Overview", *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 2, no. 4, pp. 61-84, Dec. 2009.
- [62] Mohamad Awad, Kacem Chehdi, and Ahmad Narsi, "Multicomponent Image Segmentation Using a genetic algorithm and artificial neural network", *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, vol. 4, no. 4, pp. 571-575, Oct. 2007.
- [63] Xiaou Tang, Xinbo Gao, Jianzhuang Liu and Hongjiang Zhang, "A Spatial-Temporal Approach for Video Caption Detection and Recognition", *IEEE Transactions Neural Networks*, vol. 13, no. 4, pp. 96-971, Jul 2002.

- [64] Chia-Feng Juang, Shih-Hsuan Chiu, and Shu-Wew Chang, "A Self-Organizing TS-Type Fuzzy Network With Support Vector Learning and its Application to Classification Problems", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 998–1008, Oct 2007.
- [65] Laurent Perrinet, Manuel Samuelides, and Simon Thorpe, "Coding Static Natural Images Using Spiking Event Times: Do Neurons Cooperate?", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 5, pp. 1164–1175, Sep 2004.
- [66] Peter Dayan and L.F. Abbott, "Theoretical Neuroscience", MIT Press, 2009 pp. 1-15.
- [67] N.G. Pavlidis, D.K. Tasoulis, V.P. Plagianakos, and M.N. Vrahatis, "Spiking Neural Network Training Using Evolutionary Algorithms", *IEEE Proceedings International Joint Conference on Neural networks*, 2005, 2190-2194 vol. 4.
- [68] Eugene M. Izhikevich, "Simple Model of Spiking Neuron", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, no. 16, pp. 1569-1572, Sep 2004.
- [69] Waldemar Swiercz, Krzysztof J. Cios, Kevin Staley, Lukasz Kurgan, Frank Accurso, and Scott Sagel, "A New Synaptic Plasticity Rule for Networks of Spiking Neurons", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 17, no. 1, pp. 94-105, Jan 2006.
- [70] QingXiang Wu, T.M. McGinnity, Liam Maguire and Jianyong Cai, "Detection of Straight Lines Using a Spiking Neural Network Model", *Fifth International Conference on Natural Computation*, 2009, pp. 385-389.
- [71] Mohammad A. Bhuiyan, Rommel Jalasutram, and Tarek M. Taha, "Character recognition with two spiking neural network models on multicore architectures" *IEEE Symposium on Computational Intelligence for Multimedia Signal and Vision Processing*, 2009, pp. 29-34.
- [72] KangWoo Lee, Hilary Buxton, and Jianfeng Feng, "Cue-Guided Search: A Computational Model of Selective Attention", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 16, no. 4, pp. 910-924, July 2005
- [73] Liang Zaho and Elbert Macau, "A Network of Dynamically Coupled Chaotic Maps for Scene Segmentation", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 12, no. 6, pp. 1375–1385, Nov 2001.
- [74] Liang Zhao Andre C. P. L. F. de Carvalho, and Zhaohui Li, "Pixel Clustering by Adaptive Pixel Moving and Chaotic Synchronization", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 15, no. 5, pp. 1176–1185, Sep 2004.
- [75] Raymond T S Lee, "Transient-Chaotic Autoassociative Network (TCAN) Based on Lee Oscillators", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 15; no. 5, pp. 1228–1243, Sep 2004.
- [76] Shan Shen, William Sandham, Malcolm Granat, and Annette Sterr, "MRI Fuzzy Segmentation of Brain Tissue Using Neighborhood Attraction With Neural-Network Optimization", *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9, no. 3, pp. 459–467, Sep 2005.
- [77] Chin\_teng Lin, Wen-Chang and Sheng-Fu Liang, "An On-Line ICA-Mixture-Model-Based Self-Constructing Fuzzy Neural Network", *IEEE Transactions On Circuits And Systems*, vol. 52, no. 1, pp. 207–221, Jan 2005.
- [78] Christoph Rashe, "Neuromorphic Excitable Maps for Visual Processing", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 18, no. 2, pp. 520–529, Mar 2007.
- [79] Max Mignotte, "MDS-Based Multiresolution Nonlinear Dimensionality Reduction Model for Color Image Segmentation", *IEEE Transactions On Neural Networks*, vol. 22, no. 3, pp. 447-460, Mar 2011.

- [80] Chia Feng Juang, Shih-Hsuan Chiu and Shen-Jie Shiu; "Fuzzy System Learned Through Fuzzy Clustering and Support Vector Machine for Human Skin Color Segmentation"; *IEEE Transactions On Systems Man And Cybernetics*, vol. 37, no. 6, pp. 1077–1087, Nov 2007.
- [81] Chia Feng Juang, Chia-Ming Chang, "Human Body Posture Classification by a Neural Fuzzy Network and Home Care System Application", *IEEE Transactions On Systems Man And Cybernetics*, vol. 37, no. 6, pp. 984–994, Nov 2007.
- [82] Ming Hsuan Yang, Narendra Ahuja and Mark Tabb; "Extraction of 2D Motion Trajectories and Its Application to Hand Gesture Recognition", *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, vol. 24, no. 8, pp. 106-1074, Aug 2002.



**Juan A. Ramírez-Quintana** nació en Chihuahua Chih. México en 1981. Recibió el grado de Licenciatura (2004) y Maestro en Ciencias (2007) en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Chihuahua.

Desde el 2008 hasta el 2011 fue profesor en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Actualmente es estudiante de doctorado en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Sus áreas de interés son visión por computadora, procesamiento digital de imágenes,

percepción visual e inteligencia computacional.

El M.C. Ramírez es miembro estudiante de la IEEE.



**Mario I. Chacón Murguía** nació en la ciudad de Chihuahua en 1959. Recibió los grados de ingeniería (1982) y M.C. (1985) en ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico de Chihuahua y el grado de Ph.D. (1998) de New México State University, Las Cruces NM, USA.

Su experiencia profesional incluye puestos como Asistente de Investigador y Asistente de Profesor en New México State University. Ha desarrollado proyectos de investigación para varias compañías.

Actualmente es Profesor - Investigador en el Instituto Tecnológico de Chihuahua, Chihuahua, Chih., México donde es director de los laboratorios de DSP y Visión y Percepción Visual con aplicaciones en Robótica.

El Dr. Chacón es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Ha publicado más de 105 trabajos en revistas internacionales, nacionales y congresos, así como la publicación de dos libros. Su investigación actual incluye percepción visual, visión por computadora, procesamiento de imágenes y señales usando inteligencia computacional y reconocimiento de patrones.

# Análisis en estado dinámico de la coordinación de relevadores de sobrecorriente

Marines C. Víctor G. y Conde E. Arturo

## Dynamic state analysis of the overcurrent relay coordination

**Abstract**— This paper presents the analysis of the overcurrent relay operation using computational resources. Through the application proposal is possible to analyze the dynamic operation of the relay for the purpose of validating the relay trip times or to provide educational items related to learning electrical protection. The analysis of coordination between overcurrent devices, either relays, fuses and reclosers and the impact of introducing non-conventional time curves is described by developing examples of the application.

**Keywords**— overcurrent-relay, dynamic state, graphical programming, human resource training.

**Resumen**— En este artículo se presenta el análisis de la operación de relevadores de sobrecorriente utilizando recursos computacionales. Mediante la aplicación propuesta es posible analizar la operación dinámica del relevador para efectos de validar los tiempos de disparo de relevadores en campo o para proporcionar elementos didácticos relacionados con el aprendizaje de protecciones eléctricas. El análisis de la coordinación entre dispositivos de sobrecorriente, ya sea relevadores, fusibles o restauradores y el impacto de introducir curvas de tiempo no convencionales es descrito mediante el desarrollo de ejemplos de la aplicación.

**Índices**— Relevador de sobrecorriente, estado dinámico, programación gráfica, formación de recursos humanos.

### I. INTRODUCCIÓN

La comprensión del funcionamiento y limitaciones de los sistemas de protección es una parte importante en la formación de ingenieros eléctricos. La enseñanza en clase por parte de académicos es limitada en muchas ocasiones por carecer de elementos demostrativos que permitan evaluar las diferentes condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia, dificultando, en lo particular, la capacidad de transmisión del conocimiento de las protecciones eléctricas. Por otra parte, las

Manuscrito recibido el 1 de Abril de 2011. Este trabajo fue respaldado por la universidad tecnológica de Santa Catarina y la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Marines C. Víctor G. hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor en la Universidad Tecnológica de Santa Catarina, Nuevo León, México; Carretera Monterrey - Saltillo Km. 61.5, C.P. 66359; Tel. (81) 8124-8400, (81)8316-9894 y (81) 8316-9925; Fax: (81) 8316-9892. (e-mail [vic\\_marines@hotmail.com](mailto:vic_marines@hotmail.com))

Conde E. Arturo, actualmente es profesor investigador del programa doctoral de ingeniería eléctrica de la FIME-UANL Universidad Autónoma de Nuevo León, México; Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León; C.P. 66451; Tel. (81) 83 29 40 20; Fax (81) 83 32 09 04. (e-mail [con\\_de@yahoo.com](mailto:con_de@yahoo.com))

actividades en un laboratorio en muchas ocasiones son limitadas por la falta de recursos para el análisis de los eventos y medios de visualización de las diversas condiciones de operación. Los paquetes profesionales de protecciones además de tener un costo prohibitivo para muchos centros educativos se centran en la componente de aplicación más que en la componente didáctica.

En [1] se puntualiza la importancia del diseño de cursos de ingeniería de sistemas de potencia con una urgente necesidad de identificar y desarrollar los materiales necesarios para la educación y la formación de los ingenieros de la protección futura, este trabajo esta orientado en esta dirección.

En la búsqueda de materiales que ofrezcan recursos didácticos adecuados, se han adecuado laboratorios para ofrecer una componente de enseñanza del sistema eléctrico de potencia. En [2] se describe la conformación de un laboratorio de simulación de sistemas de potencia a escala de un sistema trifásico para mejorar las actividades de investigación y enseñanza de protecciones. En [3] se presenta un recurso gráfico para el análisis y diseño de sistemas de potencia la cual provee de herramientas para facilitar la creación y modificación de aplicaciones de análisis de sistemas de potencia. En [4] se describe un software interactivo para el apoyo del proceso de aprendizaje en clase, laboratorio y auto-aprendizaje.

La directriz en los recursos didácticos para el aprendizaje de sistemas de potencia y particularmente en protecciones ha sido en aportar recursos gráficos [3,4,5-9], esto es debido a que la evaluación del desempeño de la protección se realiza por medio de la comparación gráfica de las condiciones de operación del sistema eléctrico con la curva del relevador. Mediante esta comparación se evalúa y determinan las condiciones particulares que pueden comprometer el desempeño de la protección. Debido al incremento y factibilidad de comunicaciones en los sistemas eléctricos, la protección pasa de ser un dispositivo de control independiente del sistema a un elemento integral de la operación de la red; la evaluación dinámica de la operación de la protección debe ser analizada ante diferentes condiciones operativas, difícilmente cubiertas en una sola plataforma de simulación.

La evaluación del desempeño de un relevador de sobrecorriente está en función de su capacidad de detectar fallas dentro de su zona de protección. Sin embargo la señal de corriente es la única variable eléctrica medida, la cual es sensible a la condición de operación del sistema y de la conexión en el punto de falla, por tanto la determinación de la ubicación de la falla es difícil ya que su zona de protección es dinámica y muy sensible a las condiciones de operación del sistema eléctrico. En los demás principios de protección tal como el diferencial y

piloto su característica es constante e insensible al estado operativo de la red eléctrica, únicamente el relevador de distancia presenta una dinámica limitada debido a la polarización. Es por esa razón que el análisis *post mortem* de la operación de un relevador de sobrecorriente es complicado debido a que no se conoce el tiempo en que la protección debería operar ya que este depende de la dinámica de la corriente de falla. Es una práctica común realizar una reconstrucción de la operación del relevador inyectándole los registros de eventos a un relevador similar en condiciones de laboratorio para validar el tiempo de operación de la protección.

Se han presentado diversos desarrollos educativos de relevadores de sobrecorriente en *hardware*. En [2] se describe el diseño de un relevador electrónico- analógico de sobrecorriente de tiempo inverso con funciones direccionales e instantáneo, el relevador propuesto es destinado para aplicaciones de laboratorio. El desarrollo de relevadores por parte de instituciones educativas es una labor complicada y de una inversión de tiempo considerable principalmente por el acondicionamiento de la señal y la estabilidad del *hardware*; la evaluación de la operación de un relevador mediante esta alternativa no es recomendable. Otra alternativa es la evaluación mediante un recurso computacional en donde de forma similar se inyecten las señales de los eventos y se evalúe la operación del relevador. Esta segunda alternativa es la propuesta en este trabajo.

Este artículo está orientado hacia el análisis de la operación de los relevadores ante diferentes condiciones operativas. El análisis del comportamiento del relevador ante diversos escenarios es cubierto en forma teórica de manera adecuada, sin embargo la reproducibilidad de tales escenarios en laboratorio es deseable y aconsejable para la formación de futuros ingenieros en protecciones [1], este aspecto puede ser cubierto de manera satisfactoria con una herramienta computacional que permita la reproducibilidad de diferentes escenarios y la visualización de la operación del relevador. La herramienta computacional propuesta permite simplificar y profundizar en la enseñanza de protecciones de alumnos de pregrado y postgrado en un espectro amplio de tópicos y escenarios dinámicos de operación de la protección; es factible la realización de diversas actividades didácticas y de análisis de la operación de relevadores. En esta herramienta computacional no se evalúa la función direccional del relevador, se asume que esta función está presente y que opera de manera satisfactoria.

## II. ESTRUCTURA FUNCIONAL

La estructura funcional para el acondicionamiento de la señal de entrada y el algoritmo del relevador es mostrado en la figura 1. La señal eléctrica de entrada al relevador proveniente del secundario de los transformadores de corriente, está compuesta de señales que si bien son representativas del fenómeno eléctrico, no son requeridas para determinar el criterio de operación del relevador debido a que presentan un carácter aleatorio que imposibilita la determinación de condición de falla, el procesamiento digital debe eliminar las cantidades no deseadas y retener las cantidades de interés [10]. La operación del relevador de sobrecorriente debe ser establecida únicamente con la componente de la señal a la frecuencia nominal debido a que esta

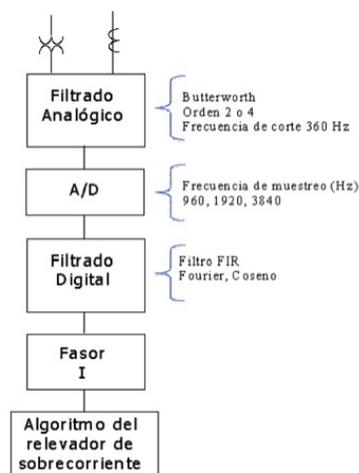


Fig. 1. Estructura para el procesamiento de las señales para propósitos de protección.

componente de la señal es afectada proporcionalmente por la ubicación de la falla.

Por otra parte, la presencia de componentes no filtradas representan un error en la operación del relevador, esta condición si es crítica para relevadores de distancia por ejemplo, no lo es tanto para relevadores de sobrecorriente ya que los tiempos de operación son mayores; así el porcentaje de tiempo debido al error es diluido en el tiempo total del relevador. El mismo razonamiento se aplica en lo referente al retardo debido a la ventana de datos.

La saturación de los transformadores de corriente (TC) [11][12] aun cuando impacta en el desempeño de los relevadores, generalmente está presente en condiciones muy específicas de operación y de falla; estando directamente asociada al dimensionamiento del transformador de corriente su efecto puede reducirse significativamente. La no linealidad de la respuesta de los transformadores de instrumentos no es simulada en la herramienta propuesta; es decir, no se disponen de los modelos matemáticos de los transformadores, el efecto de la saturación en los relevadores puede ser analizado introduciendo señales saturadas generadas en algún paquete académico o comercial.

Para la obtención del fasor fue necesario incorporar dos etapas de filtrado, un filtro analógico y otro digital para eliminar las componentes frecuenciales indeseadas. Generalmente el filtro analógico utilizado es el filtro Butterworth, este filtro es preferido por tener respuestas planas en la banda de paso y monótona decreciente en la banda de parada [13]. Posterior a la etapa de filtrado analógico se realizó el proceso de digitalización de la señal analógica, el incremento en la frecuencia de muestreo permite lograr un incremento sustancial en la resolución de la señal, pero incrementa la carga del procesador. Debe considerarse la operación del esquema completo de protección de línea es decir los elementos de fase y tierra operados ante una falla para la estimación de la carga del procesador. La reducción del efecto de "aliasing", fue obtenida mediante una sintonización entre el filtrado analógico y el filtrado digital permitiendo un traslape de las frecuencias de filtrado; es posible eliminar el filtrado analógico mediante el sobremuestreo de la señal [14]. El filtrado digital se realizó con filtros tipo FIR, ya que no hay recursión. Además que los filtros IIR producen en general

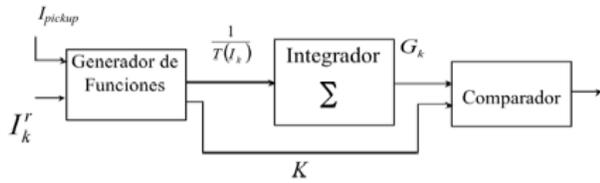


Fig. 2. Diagrama funcional de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.

distorsión de fase, contrario a los FIR que son de fase lineal. Esta condición permite que su respuesta a la frecuencia tenga ceros naturales en las frecuencias armónicas permitiendo un rechazo de estas componentes. Es utilizado el filtro tipo coseno por tener un mejor rechazo a la componente en directa.

Teniendo el fasor de la señal de corriente de la frecuencia fundamental, se puede modelar los algoritmos digitales del relevador de sobrecorriente.

### III. ALGORITMO DIGITAL DE UN RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE

El modelo básico y los criterios para la implementación digital de un relevador de sobrecorriente son presentados en [15]. En la figura 2 se presenta el diagrama funcional de la implementación del relevador realizada en este trabajo. El relevador digital recibe como entrada la magnitud del fasor de la componente fundamental de la corriente  $I_k^r$  y el valor de ajuste  $I_{pickup}$ . La característica de tiempo inverso  $T(I_k)$  está en función de la corriente de operación  $I_k = I_k^r / I_{pickup}$  es evaluada en el tiempo. El valor acumulado del integrador  $G_k$  (magnitud y signo) depende de  $I_k$  (ver figura 2).

La representación del valor acumulado del integrador para la zona de operación ( $T_O$ ) y para la zona de reposición ( $T_R$ ) es:

$$\Delta G_k = \begin{cases} \Delta t \frac{1}{T_O(I_k)} & I_k \geq 1 \text{ Zona de Operación} \\ \Delta t \frac{1}{T_R(I_k)} & 0 \leq I_k < 1 \text{ Zona de Reposición} \end{cases} \quad (1)$$

donde:  $G_k = G_{k-1} + \Delta G_k$   
 $\Delta t$  periodo de muestreo

La representación del valor acumulado del integrador ( $G_k$ ) o, analógicamente la posición del disco de inducción en un relevador electromecánico en cualquier instante de tiempo es establecido por (1). En la zona de operación, la integración de la función  $T_O(I_k)$  es positiva, incrementando el valor del acumulador en el integrador (recorrido del disco hacia el cierre de contactos); de otra forma, en la zona de reposición la integración de la función  $T_R(I_k)$  es negativa y decreta el valor del acumulador del integrador (retorno del disco a la posición de accionamiento). Ambas funciones son definidas en [16].

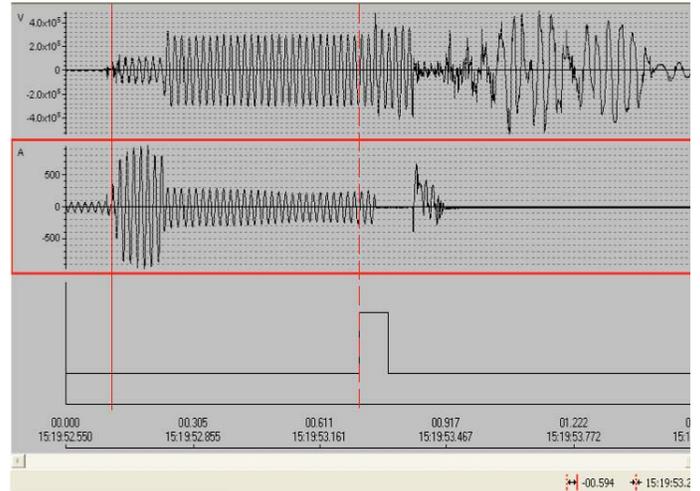


Fig. 3. Registro de un evento real en una red de distribución de 34.5-kV en una aplicación comercial.

El valor de la función generada  $T_O(I_k)$  o  $T_R(I_k)$  depende de la magnitud del fasor cuando la muestra  $k$  es procesada; por lo tanto, la expresión descrita en (1) considera el comportamiento dinámico del relevador de sobrecorriente ante corrientes de falla variables.

La condición de operación y reposición es satisfecha cuando:

$$G_k = K \quad (2)$$

donde:

$$K = \begin{cases} 1 & \text{el tiempo de operación es obtenido como } T_{op} = k_{op} \Delta t \\ 0 & \text{el tiempo de reposición es obtenido como } T_{res} = k_{res} \Delta t \end{cases}$$

$k_{op}$  y  $k_{res}$  son el intervalo de muestras entre el arranque del relevador y el cumplimiento de la condición de operación y reposición respectivamente.

### IV. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

#### A. Validación de tiempo de operación

El tiempo de operación de un relevador de sobrecorriente está definido por la dinámica de la corriente de falla, en muchos eventos existe incertidumbre respecto a si el tiempo de operación es el correcto. En esta sección se presenta la validación de la operación de un relevador de sobrecorriente de tierra a partir del registro del evento real capturado por un registrador de eventos. En la figura 3 se presenta el registro de un evento real desplegado en una aplicación comercial correspondiente a una falla monofásica en una línea de distribución de 34.5 kV. Se muestra el voltaje y la corriente del neutro del evento de falla registrado y el estado del contacto de disparo del relevador direccional de sobrecorriente de tierra 67N. La validación del tiempo en el cual opera el relevador puede ser realizado de dos formas, mediante la inyección de la señal a un relevador similar con un equipo de pruebas de relevadores, o efectuando la simulación algorítmica de la operación del relevador. Esta segunda opción es la presentada en esta sección auxiliándose de la herramienta computacional propuesta.

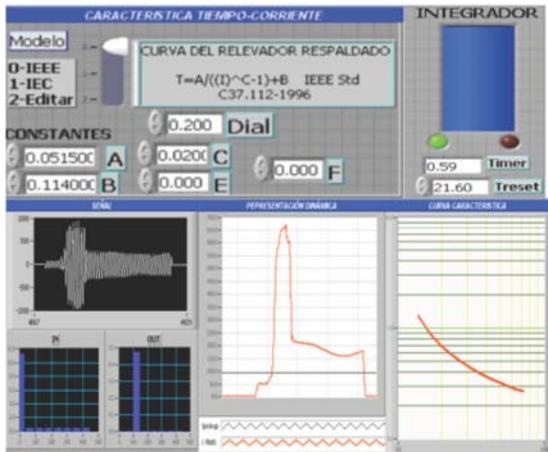


Fig. 4. Registro del evento real obtenido por la aplicación propuesta.

Los ajustes del 67N de campo son:

$$I_{pickup} = 92 \text{ A}$$

Curva Moderadamente inversa [16], Dial=0.2

Los ajustes del relevador se definen en la herramienta presentada, se reproduce la operación del relevador y se registra el tiempo de operación resultante. Se muestran resultados de las diferentes secciones de la herramienta computacional propuesta. El tiempo de operación de la protección es muy aproximado (menor a un ciclo) con el registrado (figura 4), el tiempo obtenido fue de:

$$\text{Tiempo} = 0.59 \text{ s o}$$

$$35.4 \text{ ciclos (f=60hz)}.$$

En la figura 4 se muestran algunas rutinas de la herramienta computacional propuesta, en la sección de característica tiempo-corriente se define el modelo estandarizado del relevador, adicionalmente esta rutina permite la edición de curvas por medio de la definición de su expresiones analíticas propuestas. En el integrador se emula el recorrido del disco de inducción del relevador, así cuando el indicador de nivel se llena se tienen el cumplimiento de la condición de operación. Se dispone de salidas gráficas donde es posible visualizar la señal de entrada, su espectro frecuencia antes y después del filtrado digital, la magnitud del fasor y ajuste para visualizar el arranque del algoritmo de integración, por último se presenta la curva de tiempo del relevador.

El objetivo de presentar este análisis es para mostrar el procedimiento de validación de la operación de los relevadores de campo mediante el uso de herramientas computacionales. Además la aplicación de esta herramienta en la educación permitirá fortalecer las actividades de análisis de eventos y la evaluación de la respuesta de la operación de los relevadores empleando señales de eventos reales, señales generadas en diversos paquetes comerciales de simulación o utilizando el módulo de generación interna de señales de la aplicación.

### B. Coordinación

La coordinación entre dispositivos de protección de sobrecorriente debe satisfacer la expresión (3) para la corriente de falla máxima vista por ambas protecciones [17].

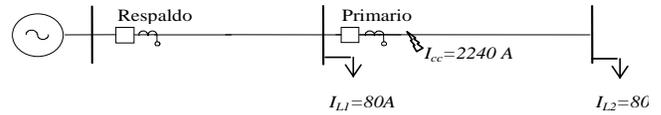
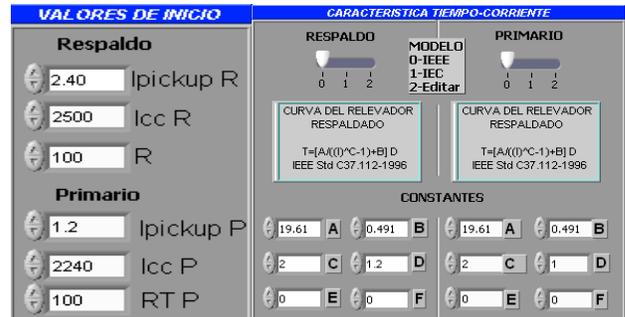
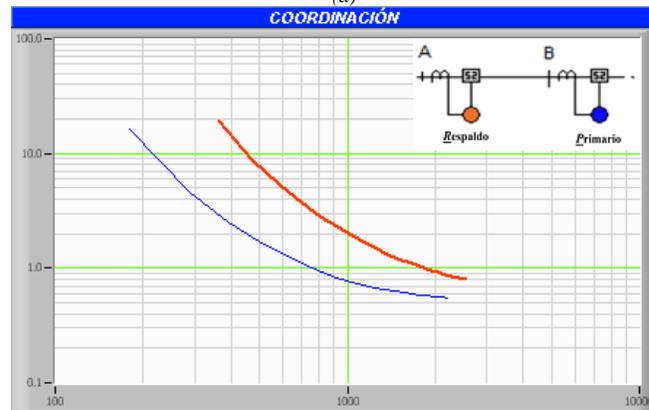


Fig. 5. Sistema radial, caso base.



(a)



(b)

Fig. 6. Simulación de caso base en la aplicación propuesta. (a) Definición de parámetros de ajuste en la aplicación, (b) visualización de curvas de operación.

$$T_{respaldo}(I_k^{respaldo}) = T_{primario}(I_k^{primario}) + CTI \quad (3)$$

donde:

$T_{respaldo}(I_k^{respaldo})$  es el tiempo de la protección de respaldo.

$T_{primario}(I_k^{primario})$  es el tiempo de la protección primaria.

CTI es el intervalo de coordinación (0.2-0.4 s).

$I_k^{primario}$  e  $I_k^{respaldo}$  es la corriente de operación en la muestra  $k$  para la protección primaria y de respaldo respectivamente.

La corriente de operación es determinada por el cociente entre la corriente de falla del sistema  $I_k^{sistema}$  y la corriente de arranque del relevador  $I_{pickup}^{primario}$  e  $I_{pickup}^{respaldo}$ .

### C. Coordinación relevador-relevador.

La coordinación fue realizada en el sistema mostrado en la figura 5 considerando el valor máximo posible de la corriente de cortocircuito. Los parámetros de ajuste fueron definidos en la aplicación. En la figura 6 se muestran los parámetros definidos y la carta de coordinación. La corriente de ajuste del relevador primario y de respaldo es establecida en esta rutina, se definen las corrientes de coordinación y la relación de transformación. Los tiempos de operación de los relevadores reflejados en la carta de

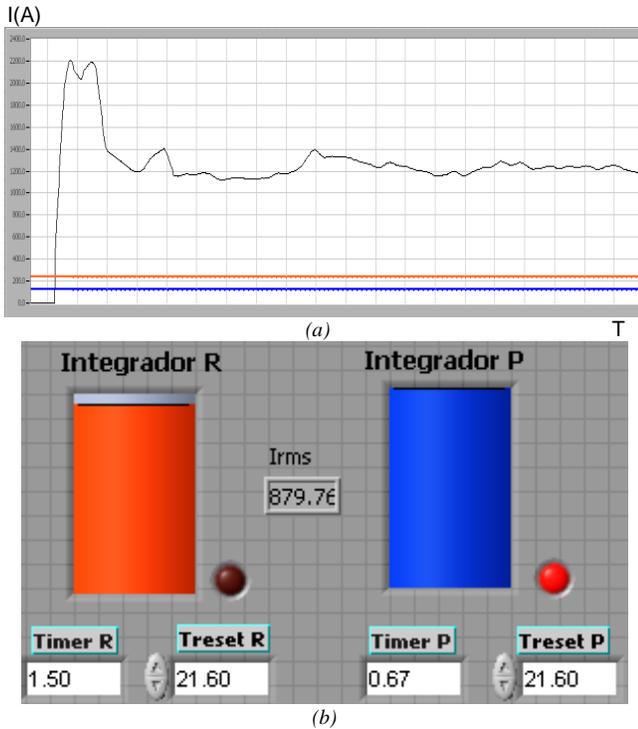


Fig. 7. Registro de tiempos de operación con señal dinámica de falla. (a) Señal de falla real, (b) registro de los tiempos de operación de los relevadores con ajuste similar al caso base.

coordinación se cumplen si la corriente de falla es una señal escalón, para valores dinámicos y efectos de resistencia de arco y resistencia de falla los tiempos de operación serán diferentes.

Las curvas de los relevadores fueron definidas como muy inversas [16] y los ajustes fueron calculados según se recomienda en [17] con un CTI (*time coordination interval*) de 0.3.

La evaluación en estado dinámico de la coordinación se muestra en la figura 7. Se muestra la posición de los integradores o discos de inducción del relevador primario y respaldo, además del tiempo de operación y el tiempo de reposición. Con esta información es posible verificar la coordinación en estado dinámico. La señal de falla utilizada fue obtenida de un evento real. Se observa que los tiempos de operación de los relevadores son mucho mayores que los establecidos en la coordinación debido a que se define un escenario pesimista en el cual la corriente de falla se mantiene en su valor máximo, esta consideración es adecuada para el proceso de ajuste. Sin embargo el tiempo real de operación comúnmente será mayor impactando directamente a la calidad de voltaje del sistema.

#### D. Coordinación fusible y rele. Caso 1.

La herramienta propuesta cuenta con un editor de ecuaciones donde es posible representar curvas de relevadores, fusibles o restauradores, esta opción es útil para la evaluación de nuevas curvas o de curvas ajustadas obtenidas de los modelos propuestos. Las curvas de tiempo de los fusibles no están definidas en forma analítica. Los valores se obtuvieron de la información proporcionada por los fabricantes. Para la obtención de la expresión analítica se utilizan criterios similares a los de los relevadores [18] utilizando parejas de valores tiempo corriente igualmente espaciados pero en el doble de número que el de los

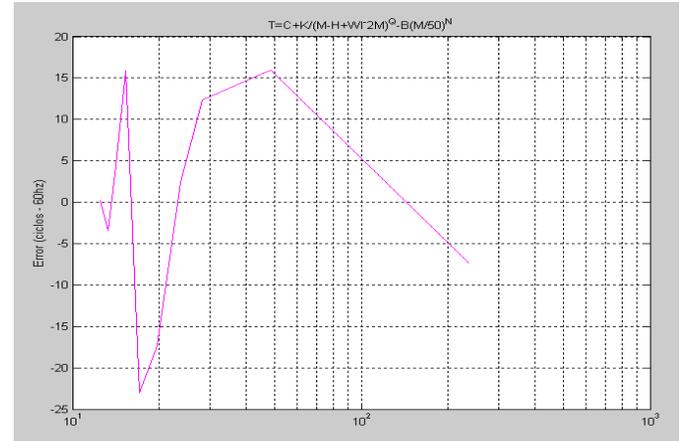


Fig. 8 Error de ajuste de la curva de tiempo.

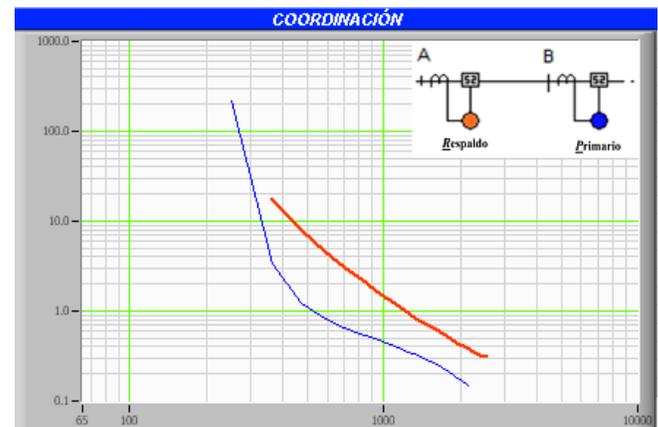


Fig. 9 Coordinación entre fusible y relevador. Caso 1.

relevadores (20 puntos), debido a que en los fusibles no hay ninguna región crítica para ajuste de curvas, todo el rango es considerado; además la forma de la curva de tiempo tiene mas diversidad que en los relevadores.

Se realizó el ajuste de la curva de máximo tiempo de liberación de un fusible Tipo K de 240V y 200 A. La expresión empírica obtenida utilizando el modelo propuesto por Heiber [19] fue:

$$T = 395.08 + \frac{441.307}{(I - 11.29 + I^{-21})^{2.686}} - 394.65 \left(\frac{I}{50}\right)^{0.00093} \quad (4)$$

El error del ajuste, aunque es independiente de la aplicación propuesta, fue el mostrado en la figura 8.

En la figura 9 se muestra la coordinación entre el fusible (primario) y el relevador (respaldo), la expresión analítica del fusible fue obtenida por algoritmos de regresión no lineal y la expresión introducida en la aplicación generó la curva del fusible. El sistema eléctrico mostrado en la Fig. 5 fue utilizado para determinar los ajustes de los dispositivos de protección. El relevador 1 fue definido como un relevador con curva extremadamente inversa según [16] con una palanca de tiempo de 0.8.

#### E. Coordinación fusible y rele. Caso 2.

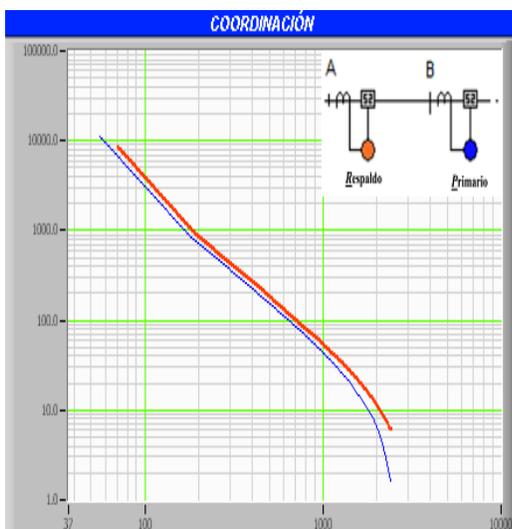


Fig. 10. Coordinación entre fusible y relevador. Caso 2.

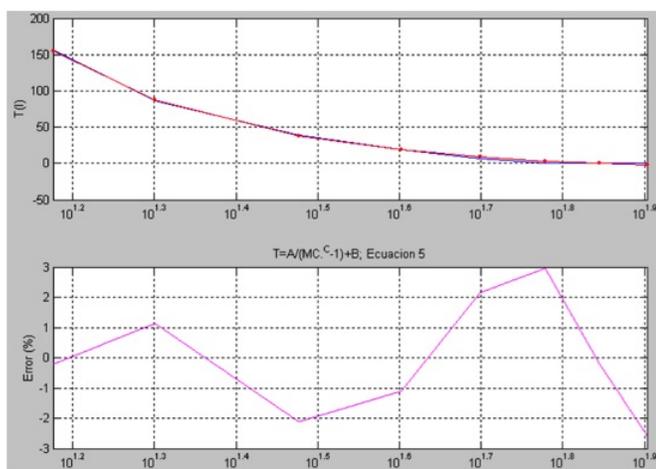


Fig. 11. Error de ajuste de la curva de tiempo.

La curva de tiempo de los relevadores de sobrecorriente es definida según los modelos establecidos en los estándares. Otros dispositivos de protección tales como fusibles y restauradores presentan curvas diferentes, la coordinación es complicada. Una posibilidad de ajuste es que el relevador tenga modelos con mayor flexibilidad tal que permitan emular con mayor detalle la curva de fusibles o restauradores. En la figura 10 se presenta este escenario, se ajusta un fusible de 5kV y 200 A, utilizando el modelo de la IEEE los coeficientes A, b y n son parámetros de ajuste [16]. El modelo obtenido es:

$$T = \left( \frac{9655.406}{I^{1.56} - 1} \right) - 12.91 \quad (5)$$

El relevador 2 es definido con la misma expresión matemática, la coordinación resultante se muestra en la figura 10. En la figura 11 se muestra el error del modelo obtenido del proceso de ajuste de curvas del fusible, esta información es incluida para darle factibilidad al proceso de coordinación descrito.

La evaluación del comportamiento ante corrientes de falla dinámicas es posible asignando un comportamiento dinámico del fusible similar al del relevador, el modelo dinámico del fusible

no está definido en la aplicación, sin embargo este escenario es muy aproximado a la realidad.

Los casos presentados muestran la posibilidad de análisis que es posible realizar con la aplicación propuesta, la exactitud de los modelos de fusibles o restauradores obtenidos es ajeno a la aplicación desarrollada, sin embargo la posibilidad de visualización y análisis con señales simuladas o de eventos reales es factible.

## V. CONCLUSIONES

El uso de herramientas computacionales para el apoyo en la formación de futuros ingenieros representa una alternativa viable para permitir un incremento en el conocimiento de la operación de los relevadores en estado dinámico y el funcionamiento de los diferentes esquemas de protección. Además la programación de las funciones de protección en una herramienta computacional independiente, permite una mejor interacción con diversas arquitecturas de software incrementando la diversidad de condiciones operativas posibles de realizar.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Brahma, S., De La Ree, J., Gers, J., Girgis, A.A., Horowitz, S., Hunt, R., Kezunovic, M., Madani, V., McLaren, P., Phadke, A.G., Sachdev, M.S., Sidhu, T.S., Thorp, J.S., Venkata, S.S. & Wiedman, T. The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities, and Solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2), 538 – 544, 2009.
- [2] Wei-Jen Lee, Jyh-Cherng Gu, Ren-Jun Li & Didsayabutra, P. A physical laboratory for protective relay education. *IEEE Transactions on Education*, 45(2), 182 – 186, 2002.
- [3] Huang, J.A. & Galiana, F.D. An integrated personal computer graphics environment for power system education, analysis and design. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3), 1279 – 1285, 1991.
- [4] Jian Yang; Anderson, M.D. Teaching tool shows results through visualization [power systems education]. *Computer Applications in Power*, IEEE, 11(1), 37-42, 1998.
- [5] P.M. Hirsch. Interactive graphics for load flow. *IEEE Power Industry Computer Applications Conference Proceedings*, Toronto, Canada, 159-165, 1977.
- [6] S.H. Salon. An interactive computer graphics package for electric power engineering education. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 102 m(7), 1954-1959, 1983.
- [7] Lo, C.H., Anderson, M.D. & Richards, E.F. An interactive power system analyzer with graphics for educational use. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(2), 174-181, 1986.
- [8] Papadopoulos, M., Hatziarfryiou, N.D. & Papadakis, M.E. Graphics aided interactive analysis of radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(4), 1297-1302, 1987.
- [9] Daneshdoost, M. & Shaat, R. A pc based integrated software for power system education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(3), 1285-1292, 1989.
- [10] E.O. Schweitzer, III, Daqing Hou, "Filtering for protective relays," 47<sup>th</sup> Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, Georgia, April 28-30, 1993.
- [11] *Standard Requirements for Instrumental Transformers*. IEEE Standard, C57.13-1993, 1993.
- [12] Tziouvaras, D.A., McLaren, P., Alexander, G., Dawson, D., Esztergalyos, J., Fromen, C., Glinkowski, M., Hasenwinkle, I., Kezunovic, M., Kojovic, L., Kotheimer, B., Kuffel, R., Nordstrom, J. & Zocholl, S. (2000). Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 62-72.
- [13] Proakis, John G. & Manolakis, D.G. (1998). *Tratamiento digital de señales*. Madrid: Prentice hall.
- [14] Brahma, S.M.; De Leon, P.L.; Kavasseri, R.G. "Investigating the Option of Removing the Antialiasing Filter From Digital Relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(4), pp. 1864 - 1868 Oct. 2009.

- [15] G. Benmouyal, "Some aspects of the digital implementation of protection time functions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1705-1713.
- [16] *IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays*, IEEE Std. C37.112-1996.
- [17] IEEE Std. C37.113-1999, *Guide for protective relay applications to transmission lines*, September 1999.
- [18] M.S. Sachdev, J. Singh, R.J. Fleming, Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer application, *IEEE Paper A78 131-5*, January 1978.
- [19] J.E. Hieber, "Empirical equations of overcurrent relay curves for computer application," *IEEE Winter Power Meeting*, New York, N.Y., January/February 1965, Paper No. 31 CP 65-91, pp. 1-11.



**Arturo Conde-Enríquez.** Se graduó como ingeniero mecánico electricista en la Universidad Veracruzana en 1993. Obtuvo la maestría en ciencias de la ingeniería eléctrica y el grado de doctor en ingeniería eléctrica en la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1996 y 2002, respectivamente. Actualmente es profesor investigador del programa doctoral de ingeniería eléctrica de la FIME-UANL y es miembro del sistema nacional de investigadores.



**Víctor Guadalupe Marín Castillo** nació en Monterrey Nuevo León, México, en 1984. Obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista en 2006 y el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Orientación en Sistemas Eléctricos de Potencia en 2010, ambos en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente se desarrolla como profesor en la Universidad Tecnológica de Santa Catarina, Nuevo León, México.



# **RIEE&C**

**Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación**

**AGRADECE AL GRUPO DE REVISORES QUE COLABORARON  
EN LA PRESENTE EDICIÓN**

**Adolfo Espinoza Ruiz  
Armando Ambrosio López  
Arturo Hernández Aguirre  
Eduardo Pérez Careta  
Ernesto Vázquez Martínez  
Javier Vega Pineda  
Jesús Héctor Hernández López  
José Javier Díaz Carmona  
José Manuel Campoy Salguero  
Juan Humberto Sossa Azuela  
Pablo Ibarguengoytia González  
Pablo Gómez Zamorano**



# RIEE&C

## Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

### INVITACIÓN A FORMAR PARTE DEL COMITÉ REVISOR

El Instituto Tecnológico de Sonora a través del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica pone en marcha la Revista RIEE&C (ISSN: 1870-9532) con el fin de coadyuvar a la difusión científica y cultural en el país en las áreas de Electrónica, Eléctrica y Sistemas Computacionales. RIEE&C es un espacio donde se pueden publicar resultados científicos y de desarrollo tecnológico tanto para investigadores como para estudiantes de nivel superior.

En esta revista se publican artículos de investigación con resultados originales y deseamos que dichos artículos estén sujetos a un estricto arbitraje realizado por investigadores líderes en su especialidad, adscritos a instituciones nacionales y extranjeras. Lo anterior con el objetivo de ser incluida en el índice de revistas reconocidas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT.

Por lo anterior le hacemos una cordial invitación para que forme parte del grupo de revisores de la revista RIEE&C. En busca de indexarse, RIEE&C crea un expediente de cada uno de sus revisores, por lo que en caso de aceptar la invitación, se le solicita envíe su currículum vitae así como una copia de la cédula profesional o copia del título del máximo grado académico obtenido. Es importante que su currículum contenga datos como:

- Número de cédula profesional.
- Grado académico.
- Áreas de interés.
- Centro de trabajo.

Estos datos deberán ser enviados a la dirección de correo electrónico [rieandc@itson.edu.mx](mailto:rieandc@itson.edu.mx). También le invitamos a conocer nuestra página electrónica en la dirección <http://www.itson.mx/rieandc>.

Atentamente

---

José Antonio Beristáin Jiménez  
Editor en Jefe de la RIEE&C  
Instituto Tecnológico de Sonora  
Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica



**En el Instituto Tecnológico de Sonora ofrecemos la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, opción: Energía Eléctrica.**

**Objetivo del programa:**

Formar recurso humano capaz de generar conocimiento y tecnología relacionados con energía para el desarrollo regional sustentable a través de proyectos innovadores en alianzas estratégicas con los sectores productivo y social.

**Líneas de generación y aplicación del conocimiento:**

- Calidad de la energía eléctrica.
- Generación y uso eficiente de la energía eléctrica.

**Podrá desempeñarse en las siguientes áreas:**

- Soluciones alternativas de generación de energía eléctrica.
- Uso eficiente y calidad de la energía eléctrica.
- Docencia.
- Investigación.

Para ingresar al posgrado se deberá contar con licenciatura afín, razonamiento verbal y numérico, pensamiento lógico estructurado, capacidad para trabajar en equipo y el autoaprendizaje, aptitud para la investigación científica, habilidad para identificar y resolver problemas, espíritu emprendedor y creativo.

**Contacto:**  
 Responsable de Programa Educativo  
 Unidad Obregón / Campus Nainari  
 Centro de Atención Docente (CAD)  
 Teléfono: 4109000 ext. 1758  
 Email: [mcie\\_posgrado@itson.mx](mailto:mcie_posgrado@itson.mx)  
 Página web: <http://www.itson.mx/oferta/mciee>



**ITSON**  
Educar para Trascender



# **RIEE&C**

**Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación**

## **INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES**

RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (ISSN: 1870-9532) se publica semestralmente. Se aceptan artículos originales en aplicaciones de la ciencia, desarrollo de nueva tecnología o soluciones eficientes de ingeniería, siempre y cuando no hayan sido publicados o estén bajo consideración para publicarse en alguna otra revista.

Todos los documentos deberán enviarse al editor en jefe de RIEE&C, José Antonio Beristáin Jiménez, por e-mail a: [rieecandc@itson.edu.mx](mailto:rieecandc@itson.edu.mx)

Los artículos se revisarán por especialistas en el área y dictaminarán si el artículo es apropiado para su publicación. No se deberán enviar manuscritos directamente a los editores asociados.

Los manuscritos enviados por los autores deberán seguir el formato que muestra la guía para el autor, la cual se encuentra en la página de internet <http://www.itson.mx/rieecandc>.

