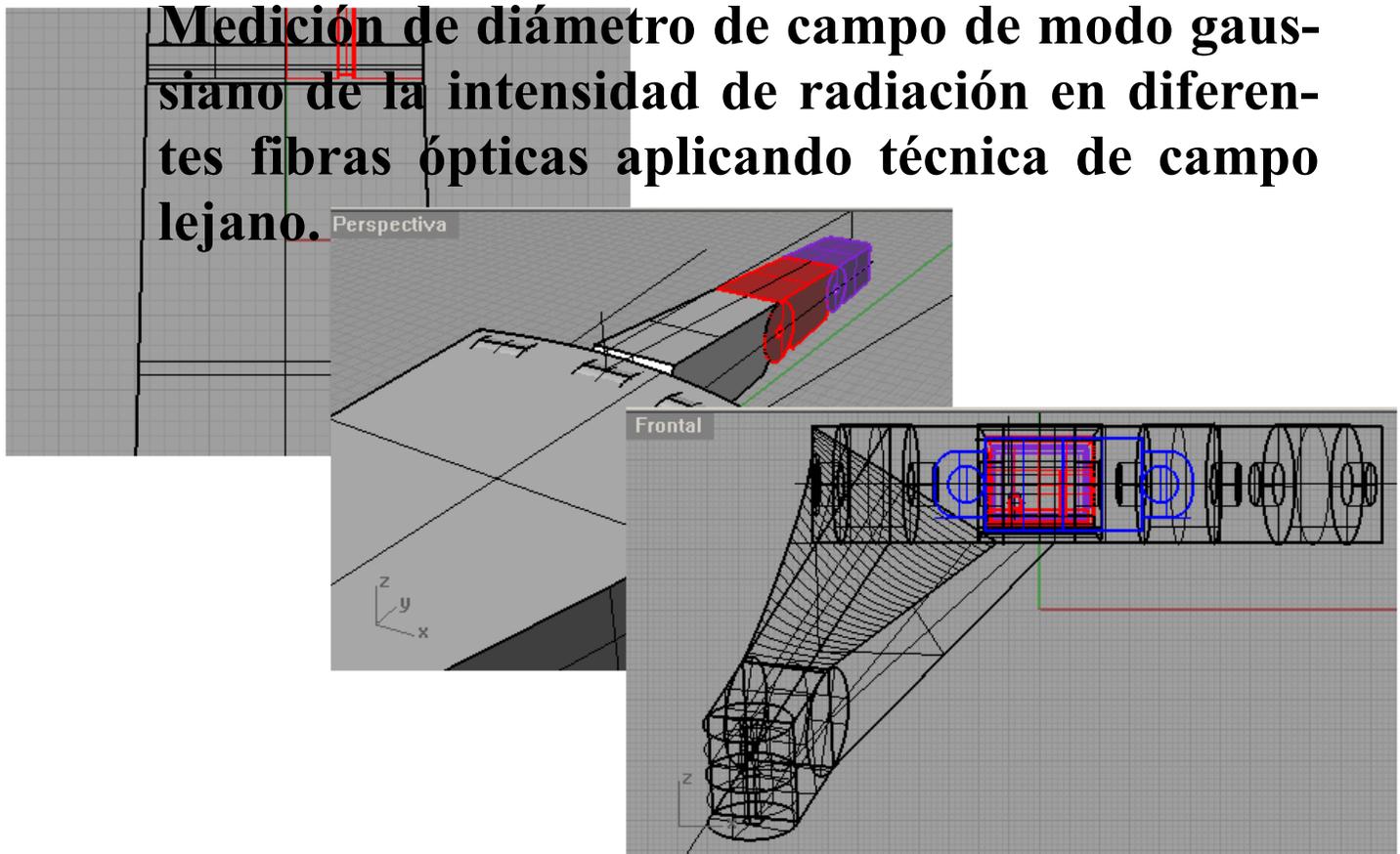


# RISCE

## Revista Internacional de Sistemas Computacionales y Electrónicos



**Medición de diámetro de campo de modo gaussiano de la intensidad de radiación en diferentes fibras ópticas aplicando técnica de campo lejano.**



**Computación aleatorizada — probabilidad y algoritmos**

RISCE Revista Internacional de Sistemas Computacionales y Electrónicos; es una publicación bimestral del Instituto Politécnico Nacional, Av. Luis Enrique Erro S/N, unidad “Profesional Adolfo López Mateos”, Del. Gustavo A. Madero, C.P. 07738, México D.F. a través de la Escuela Superior de Computo; Av. Juan de Dios Bátiz S/N esquina Miguel Othón de Mendizabal. “Unidad Profesional Adolfo López Mateos”. Col. Lindavista C.P. 07738, México, D. F. tel 57296000 ext. 52000. Certificado de reserva de Derechos al uso Exclusivo del título No. 04-2008-062613190500-203, ISSN en trámite. Los artículos son responsabilidad exclusiva del autor y no reflejan necesariamente el criterio de la institución, a menos que se especifique lo contrario. Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite explícitamente la fuente.

La revista se especializa en el área de los sistemas computacionales y electrónicos; tanto en el desarrollo, como en la investigación en:

- Computo Móvil
- Física Electrónica
- Ingeniería de software
- Procesamiento de señales
- Inteligencia artificial
- Comunicaciones
- Electrónica
- Robótica y cibernética
- Computo educativo
- Matemática computacional
- Innovación Tecnológica

### **Distribución**

La revista cuenta con 300 ejemplares que se distribuyen en:  
Europa, Asia y América Hispana; mediante CD ROM y correo electrónico



## **Directorio**

Dr. José Enrique Villa Rivera

Director General

Dr. Efrén Parada Arias

Secretario General

Dra. Yoloxóchilt Bustamante Diez

Secretaria Académica

Director de la ESCOM

Ing. Apolinar Cruz Lazaró

Subdirector Académico de la ESCOM

M. en C. Flavio Arturo Sánchez Garfias

Jefe del Departamento de Postgrado de la ESCOM

Jesús Yaljá Montiel Pérez

## **Comité Editorial**

Laura Mendez Segundo, Gabriela de Jesús López Ruiz, Felix Serrano Talamantes, Hugo Puebla Lomas

## **Coordinador Técnico**

Ing. Saúl De la O Torres

RISCE Revista Internacional de Sistemas Computacionales y Electrónicos; es una publicación bimestral del Instituto Politécnico Nacional, Av. Luis Enrique Erro S/N, unidad "Profesional Adolfo López Mateos", Del. Gustavo A. Madero, C.P. 07738, México D.F. a través de la Escuela Superior de Computo; Av. Juan de Dios Bátiz S/N esquina Miguel Othón de Mendizabal. "Unidad Profesional Adolfo López Mateos". Col. Lindavista C.P. 07738, México, D. F. tel 57296000 ext. 52000. Certificado de reserva de Derechos al uso Exclusivo del título No. 04-2008-062613190500-203, ISSN en trámite Los artículos son responsabilidad exclusiva del autor y no reflejan necesariamente el criterio de la institución, a menos que se especifique lo contrario. Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite explícitamente la fuente.

## **Miembros del comité Revisor**

(Todo el comité técnico esta formado por doctores en ciencias o su equivalente)

Francisca Losavio de Ordaz (Venezuela)(Universidad Central de Venezuela)

Alfredo Matteo (Venezuela) (Universidad Central de Venezuela)

Emmanuel F. Moya Anica (México)

Edgardo Manuel Felipe Riverón (Cuba) (México)(CIC)

Luis Enrique Palafox Maestre (México)

Eduardo F. Caicedo Bravo (Colombia)

Hilda Ángela Larrondo (Argentina)

Guillermo Leopoldo Kemper Vásquez (Perú)

Elizabeth León Guzmán (Colombia)

María Cecilia Rivera (Chile)

Francisco F. Gallegos Funes (México)

Satu Elisa Schaeffer (Finlandia)(UANL)

Rafael Canetti (Uruguay)

Javier Echaiz (Argentina)

Pablo Belzarena (Uruguay)

Carlos Beltrán González (Italia)(Universitá di Genova)

Elena Fabiola Ruiz Ledesma (México)

Jonatan Gómez (Colombia)

Armando De Giusti (Argentina)

Juan José Torres Manríquez (México)

Jesús Yaljá Montiel Pérez (México)

Luis Alfonso Villa Vargas (México)

Marco Antonio Ramírez Salinas (México)

Félix Moreno González (España)(UPM)

Salvador Godoy Calderón (México) (CIC)

**Fundador de la Revista**

Rodolfo Romero Herrera

<b>Indice</b>	
<b>Computación aleatorizada — probabilidad y algoritmos</b>	2
Elisa Schaeffer; CIIDIT & FIME, UANL	
<b>Entorno de desarrollo para el diseño y simulación de sistemas difusos</b>	6
<sup>1</sup> Edmundo René Durán Camarillo, <sup>1</sup> Raúl Acosta Bermejo, <sup>1</sup> Escuela Superior de Computó, IPN.	
<b>“Una metodología para crear soluciones a problemas en sistemas complejos de Tecnologías de Información y Comunicación”</b>	17
<sup>1</sup> Dr. Leopoldo Galindo-Soria, <sup>2</sup> Ing. Jaime Rubén Miranda-Medrano; Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. U. Z, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación	
<b>Especificación formal de un enlace de comunicación punto a punto</b>	25
Florencio Guzmán Aguilar, José Sánchez Juárez, Fabiola Ocampo Botello, Roberto de Luna Caballero Instituto Politécnico Nacional	
<b>Medición de diámetro de campo de modo gaussiano de la intensidad de radiación en diferentes fibras ópticas aplicando técnica de campo lejano.</b>	31
<sup>1</sup> Alexandre Michtchenko, <sup>2</sup> Mónica Fuentes Nava	
<sup>1</sup> IPN Sección de Estudios de Posgrado ESIME Zacatenco, mitchen@servidor	
<b>Análisis de comunicaciones satelitales</b>	40
Andrés Calvillo Téllez, Carelia Gaxiola; <sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del IPN	
<b>Respuesta del ojo humano para el Reconocimiento de Estados Emocionales<sup>1</sup></b>	50
Rodolfo Romero Herrera, <sup>2</sup> Francisco Gallegos Funes	
Escuela Superior de Computo, IPN, <a href="mailto:romeroh@ipn.mx">romeroh@ipn.mx</a> , Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN	
<b>Instrucciones para Autores</b>	57

# Computación aleatorizada — probabilidad y algoritmos

Elisa Schaeffer

CIIDIT & FIME, UANL

Conferencia magistral del CISCE 2008 en la IPN

A los científicos nos gusta pensar que todo fenómeno se puede entender, modelar y controlar. Sin embargo, mucho del mundo real es demasiado complejo para permitir que lo capturamos en términos de interacciones deterministas entre los componentes. Hay muchas cosas que de cierta manera parecen ocurrir al azar, aunque no completamente — percibimos regularidades y patrones en el comportamiento de sistemas aunque no podemos explicarlos de una manera exacta y satisfactoria.

Las computadoras son el alivio de los científicos en este mundo de sistemas complejos. La computadora realiza de una forma completamente determinista su programa, ejecutando instrucción por instrucción lo que le solicitamos. Sin embargo, permitir que la aleatoriedad entre al mundo estructurado de la computación nos apodera a realizar trabajos que sin ello estuvieran laboriosos, complicados o hasta imposibles.

## Probabilidad

La probabilidad es un concepto matemático para capturar la intuición sobre las frecuencias relativas de los resultados posibles de un experimento aleatorio, como por ejemplo el lanzamiento de una moneda o un dado. En términos poco exactos, la probabilidad de un cierto resultado  $x_i$  es  $p \in [0, 1]$  si en el largo plazo  $100 \cdot p$  por ciento de las repeticiones el resultado es  $x_i$ .

Es importante conocer todos los posibles resultados del experimento para poder hablar sobre la probabilidad. Vamos a nombrar el experimento  $X$  (formalmente,  $X$  es una variable aleatoria) y denotamos con  $P(X = x_i)$  la probabilidad de que el resultado sea  $x_i$ . Denotamos también el número de resultados posibles por  $n$ , así que

$$X \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

Las probabilidades de los diferentes resultados tienen que sumar a uno,

$$\sum_{i=1}^n P(X = x_i) = 1. \quad (2)$$

En muchos experimentos, los  $x_i$  o son valores numéricos (como es el caso con los dados) o se les puede asignar un valor numérico (que sol sea cero y águila sea uno, por ejemplo). En términos de tales valores numéricos podemos determinar el valor esperado de  $X$ , o sea el “resultado típico” de un experimento:

$$\text{Exp}(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P(X = x_i). \quad (3)$$

## Algoritmos

Toda la computación está basada en algoritmos. Un algoritmo, en su significado clásico - es un método de solución para un cierto problema que, dada una instancia (o sea, los datos particulares del problema), realiza una sucesión finita de pasos deterministas de cómputo y siempre llega al resultado correcto.

El problema podría, por ejemplo, ser el ordenamiento de  $k$  números enteros en orden creciente. La instancia consistiría de una sucesión de  $k$  enteros,  $[a_1, a_2, \dots, a_k]$ , en un orden arbitrario. Hoy, por simplicidad, suponemos que  $a_i \neq a_j$  para todo  $i \neq j$ . Ya muy temprano en su carrera, cada Computó logo aprende varios diferentes algoritmos para resolver este problema. Los estudiantes suelen preferir algoritmos sencillos como el algoritmo de burbuja (inglés: bubblesort) donde uno realiza de una manera repetida intercambios entre elementos “vecinos”  $a_i$  y  $a_j$  hasta que queden todos ordenados.

Para poder evaluar la calidad de un algoritmo, es necesario determinar su complejidad computacional. La complejidad computacional se define en términos del número de pasos de cómputo que necesita el algoritmo para llegar a la solución deseada. Evidentemente, el número de pasos depende de la instancia: en primera instancia, de su tamaño (que en el caso de ordenamiento es el número de elementos  $k$ ) y también de los datos mismos: uno esperaría que ordenar 1000 elementos tarde más que ordenar 200, y que si los números ya vienen parcialmente ordenados, que el ordenamiento sea más rápido.

Para poder comprar entre diferentes algoritmos, el acuerdo es que uno siempre tiene que considerar el tiempo que toma el algoritmo en el peor caso. El peor caso corresponde a esa instancia que necesita el número máximo de pasos para resolver. Calculando para diferentes tamaños de instancias, uno llega a conocer la forma en que el cantidad de pasos crece cuando el tamaño de la instancia crece.

Denotando por  $n$  el tamaño de la instancia y por  $g(n)$  el número de pasos para el peor caso entre las instancias de tamaño  $n$ , decimos que la complejidad asintótica del algoritmo es  $O(f(n))$  si aplica que con algún constante  $c > 0$  desde algún valor  $n_0$  aplica que

$$g(n) \leq c \cdot f(n). \quad (4)$$

Esto significa que la función  $g(n)$  crece igual o más lentamente que  $f(n)$ . Se dice que un algoritmo es eficiente si tiene complejidad asintótica  $O(n^k)$ , es decir, la cantidad de pasos crece polinomialmente.

Algoritmos aleatorizados

El algoritmo de burbuja para el ordenamiento tiene complejidad asintótica  $O(n^2)$ , que es un polinomio. Sin embargo, existe un algoritmo mejor que solamente necesita  $O(n \log n)$  pasos. Ese algoritmo se llama ordenamiento rápido (inglés: quicksort). Ordenamiento rápido es un algoritmo recursivo, donde primero se elige uno de los elementos para ser el pivote y después se divide los elementos en dos conjuntos: a los que son menores o iguales al pivote y a los que son mayores. Al haber hecho tal división, se repite lo mismo con las dos partes. Al llegar a una parte que consiste de un solo elemento, lo único que falta es volver a juntar los partes. Si la división a las dos partes siempre es balanceado en el sentido que las dos partes tienen aproximadamente el mismo tamaño, se alcanza la complejidad asintótica mencionada de  $O(n \log n)$ .

El único problema es la elección del pivote para conseguir este efecto. Si pasamos mucho tiempo analizando los datos para encontrar un pivote bueno, sufre la eficiencia del algoritmo. Pero si siempre lo elegimos por una regla determinista (por ejemplo, “el pivote es el primer elemento”), el peor caso es  $O(n^2)$  no ganamos nada en comparación con el método de burbuja.

Una solución proviene de tomar algunas libertades con la definición de algoritmo: un método de solución para un cierto problema que, dada una instancia (o sea, los datos particulares del problema), realiza una sucesión finita de pasos deterministas de cómputo y siempre llega al resultado correcto. Vamos a permitir pasos no deterministas: elegimos el pivote mejor al azar entre los elementos. Un breve análisis matemático revela que con un pivote aleatorio el valor esperado del número de pasos cumple con  $O(n \log n)$ .

También podríamos tomar otro tipo de libertad: quizá no es necesario que un algoritmo siempre tenga la respuesta correcta, mientras lo tenga la mayoría del tiempo. Si el algoritmo es rápido, lo podemos repetir algunas veces para asegurarnos de la respuesta en términos probabilistas.

---

Es importante distinguir entre la complejidad asintótica de un algoritmo y la complejidad computacional de un problema — el primero tiene que ver con la cantidad de pasos que toma ese algoritmo en particular, mientras el segundo es un concepto teórico sobre la existencia de algoritmos que utilizan una cantidad de recursos acotada por ciertas funciones. Los conceptos de las clases de complejidad P y NP caracterizan la complejidad de un problema, no de un algoritmo.

Por ejemplo, si nos dan una expresión booleana en forma normal conjuntiva con tres literales por cláusula y nos piden encontrar una asignación de valores de verdad que lo satisfaga, podríamos dedicarnos a algoritmos clásicos a resolver este problema — que desafortunadamente todos son de tiempo exponencial, o sea, nada eficientes. Sin embargo, si simplemente asignamos valores verdad y falso al azar a las variables, un poquito de matemáticas demuestra que el número esperado de cláusulas satisfechas es  $\frac{7}{8}$ . O sea, muy rápidamente podemos satisfacer una gran parte. Depende de la aplicación si es necesario tener una respuesta exacta o si una respuesta aproximada rápida basta.

Al diseñar un algoritmo de aproximación, hay dos consideraciones importantes. El primero es poder calcular el tiempo esperado de ejecución del algoritmo y el segundo es conocer qué tan lejos de las respuestas exactas llegaremos con el algoritmo. Podríamos también tomar la libertad de tener algoritmos que pueden en ciertos casos tardar muchísimo, siempre y cuando “en un caso típico” son rápidos, o sea, que tengan un valor esperado finito para el número de pasos de computación.

También existen métodos donde no existe mucho conocimiento teórico sobre el número esperado de pasos ni de la calidad de la solución, pero que en la práctica han resultado eficientes y confiables. Estos algoritmos “informales” se llama heurísticos. Por ejemplo, en vez de resolver un sistema enorme de ecuaciones complicadas, podríamos “adivinar” algunos valores iniciales a sus variables y de una manera probabilista modificarlas, observando si se mejora la solución. Una familia importante de los algoritmos heurísticos son las metaheurísticas para la búsqueda local que resuelven problemas de optimización. Computadoras y la aleatoriedad

Por poder incorporar elementos aleatorios en algoritmos, podemos ganar mucho en eficiencia y en flexibilidad. Sin embargo, la generación de números aleatorios no es nada trivial. Una computadora es inherentemente determinista y no incorpora nada aleatoria en sí. Por eso, no es posible generar algo puramente aleatorio por computadora.

Para superar esta dificultad, existe un campo especializado de investigación de las matemáticas discretas que se enfoca en el desarrollo de generadores de números pseudoaleatorios. Un generador de números pseudoaleatorios es un algoritmo que genera una sucesión de números de tal manera que es muy difícil pronosticar el siguiente número haber observado algunas salidas anteriores del algoritmo. Es un campo muy sofisticado con aplicaciones muy importantes, como la criptografía y la simulación.

Cuando uno necesita un alto nivel de aleatoriedad, o sea, un generador muy bueno de números pseudoaleatorios, frecuentemente se añade a la computadora un sensor de algún fenómeno ambiental como la temperatura o la dirección y la velocidad del viento. Otra opción es utilizar de entrada datos de algún sistema muy complejo y difícil de pronosticar, como por ejemplo el mercado bursátil. Para implementar el juego de buscaminas o tetris, no es tan importante qué tan aleatorios profundamente son los números pseudoaleatorios utilizados (la librería estándar de ANSI-C

es más que suficiente), pero en aplicaciones científicos e industriales de alto nivel que hay buscar otras alternativas que son matemáticamente más robustos y acercan más al comportamiento aleatorio teórico

## Literatura

Los libros de probabilidad son varios; sin embargo, un libro excelente que repasa toda la probabilidad necesaria y enfoca en la computación aleatorizada es el libro de texto de Mitzenmacher y Upfal [4]. Otro libro bueno de algoritmos aleatorizados es lo de Raghavan y Matwani [5]. Sobre algoritmos en general, la referencia clásica es el libro de Cormen et al. [1]. El libro de Vazirani [7] sobre algoritmos de aproximación es bueno. Para conocer más sobre la complejidad computacional, las referencias clásicas son el libro de texto de Papadimitriou [6] y el libro seminal de Garey y Johnson [2]. Sobre heurísticos, un libro muy bueno es el libro de Hoos y Stützle [3].

## Referencias

[1] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest y Clifford Stein. Introduction to Algorithms. McGraw-Hill Book Co., Boston, MA, EE.UU., segunda edición, 2001.

- [2] Michael R. Garey y David S. Johnson. Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness. W. H. Freeman, San Francisco, CA, EE.UU., 1979.
- [3] Holger H. Hoos y Thomas Stütze. Stochastic Local Search: Foundations and Applications. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, EE.UU., 2005.
- [4] Michael Mitzenmacher y Eli Upfal. Probability and Computing : Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis. Cambridge University Press, New York, NY, EE.UU., 2005.
- [5] Rajeev Motwani y Prabhakar Raghavan. Randomized Algorithms. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, G.B., 1995.
- [6] Christos H. Papadimitriou. Computational Complexity. Addison Wesley, Reading, MA, EE.UU., 1994.
- [7] Vijay V. Vazirani. Approximation Algorithms. Springer-Verlag GmbH, Berlín, Alemania, 2001.

# Entorno de desarrollo para el diseño y simulación de sistemas difusos

<sup>1</sup>Edmundo René Durán Camarillo, <sup>1</sup>Raúl Acosta Bermejo,

<sup>1</sup>Escuela Superior de Computo, IPN. Av. Juan de Dios Batiz esq. Miguel Othon de Mendizábal S/N,  
Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. San Pedro Zacatenco. México DF., CP. 07738,  
[eduranc@ipn.mx](mailto:eduranc@ipn.mx), [racostab@ipn.mx](mailto:racostab@ipn.mx). 5729 6000 – 52019

**Resumen.-** Este artículo presenta el fundamento y las partes que conforman una aplicación para el Diseño y Simulación de Sistemas Difusos, dicha aplicación consta de seis módulos principales que son el Editor de Sistemas Difusos, el Editor de Variables Difusas, el Editor de Reglas IF-THEN, el Visualizador de Reglas IF-THEN, el Visualizador de Superficie y un Tutorial Interactivo.

**Abstract.-** This article presents the foundation and skills that form an application for Fuzzy System's Design and Simulation, this application has six main modules that are: Fuzzy Systems Editor, Fuzzy Variables Editor, IF-THEN Rules Editor, IF-THEN Rules Viewer, Surface Viewer and an Interactive Tutorial.

**Palabras clave:** Función de Membresía, Lógica Difusa, Reglas IF-THEN, Superficie de Control, Variable Difusa.

**Keywords:** Control Surface, Fuzzy Logic, Fuzzy Variable, IF-THEN Rules, Membership Function.

## I. Introducción

Los sistemas basados en la Lógica Difusa (Sistemas Difusos) son utilizados para poder solucionar diversos problemas, tal y como lo haría el razonamiento humano; todas estas situaciones se caracterizan por el dinamismo y la complejidad, además de ser más entendibles de forma lingüística que por expresiones matemáticas.

En la actualidad se están desarrollando algunos sistemas difusos para modelar el comportamiento de sistemas reales; es por esto, que surge la necesidad de contar con herramientas que permitan visualizar los resultados a priori del comportamiento de dichos sistemas, tal y como lo es una herramienta para el diseño y simulación de sistemas difusos, y que además sea capaz de ahorrar tiempo y dinero durante las fases de análisis y diseño.

Los diseñadores interesados en el desarrollo de Sistemas Difusos buscan herramientas que brinden o se apeguen a las siguientes pautas:

- Una aplicación amigable.
- Buena organización y flexibilidad.
- Basada en la teoría de la Lógica Difusa.
- Facilitar y optimizar la etapa de diseño de un Sistema Difuso.
- Poder observar el comportamiento interno del Sistema Difuso.
- Ayudar en la construcción de un Sistema Difuso.
- No saturar de información al usuario, en las interfaces gráficas.
- Incluir capacitación a usuarios inexpertos en la Teoría de la Lógica Difusa.

De libre acceso.

La mayoría de las aplicaciones disponibles (libres y comerciales) no satisfacen en su totalidad las necesidades de quienes las utilizan; la adquisición de aquellas que son comerciales suelen tener un costo alto y en ocasiones implica la compra de módulos por separado, es decir, vienen aunadas a otras aplicaciones para poder funcionar completamente.

Entre dichas aplicaciones se encuentran algunas desarrolladas dentro de Instituto Politécnico Nacional, las cuales no llegaron a cumplir el objetivo propuesto o son para sistemas muy específicos. También existen otras de acceso comercial, cuyo precio es muy elevado y no cumplen con las pautas antes mencionadas.

En la elaboración del presente prototipo se buscó cubrir todas las necesidades anteriores, no depender de otras aplicaciones para su funcionamiento y ser una fuente de conocimiento acerca de la Lógica Difusa., conllevando a la obtención de una Herramienta para el Desarrollo y Simulación de Sistemas Difusos.

El presente artículo contiene una descripción de esta herramienta, sus componentes y los conceptos fundamentales de Lógica Difusa que son la base para el funcionamiento de la aplicación.

## II. Técnicas Utilizada

Mediante esta herramienta es posible la construcción de Sistemas Difusos, que son la aplicación de la Teoría Difusa en problemas del mundo real, caracterizados por información imprecisa o ambigua, el padre de esta teoría es Lotfi A. Zadeh.

Para poder comprender el funcionamiento de estos sistemas y como es que estos hacen uso de toda la Teoría Difusa, serán descritos los conceptos relacionados con el diseño de un Sistema Difuso, el cual conlleva cuatro partes principales [1]:

### Fusificación

La *Fusificación* en los sistemas difusos es utilizada para transformar una Entrada Crisp en una Entrada Difusa.

Una *Entrada Crisp* es un valor exacto que pertenece a un rango de valores llamado *Universo de Discurso*, dichos valores son aplicables a una variable del Sistema Difuso, la cual es conocida como *Variable Difusa*.

Una *Variable Difusa* está definida por medio de diferentes *Funciones de Membresía* que definen el grado de ser miembro de un Conjunto Difuso dentro de un Universo de Discurso [2].

### Edición de Reglas

La edición de reglas es una de las partes fundamentales al momento de crear un Sistema Difuso, ya que, las acciones de control generadas por un Sistema Difuso, dependen de reglas que dictan el comportamiento del sistema ante determinadas entradas, estas reglas pueden ser vista como parte de una base de conocimiento.

Las reglas son escritas, ya sea por un experto que conozca la forma en que se debe de llevar a cabo el control del sistema en cuestión, o simplemente por intuición.

Una Regla es expresada de manera lingüística, de la misma forma en que el razonamiento humano hace una conclusión ante determinadas situaciones, de tal forma que la estructura general de una regla es la siguiente:

IF *Antecedente* THEN *Consecuente*

Donde *Antecedente*, es una proposición simple conformada por el nombre de una Variable Difusa de entrada más la Etiqueta de una Función de Membresía asociada a esta variable. Ahora bien, el *Consecuente*, es también una proposición simple, pero está conformada por el nombre de una Variable Difusa de salida más la Etiqueta de una Función de Membresía asociada a esta variable.

Una vez que se obtienen los diferentes grados de membresía provenientes del proceso de Fusificación, éstos deben ser procesados para generar una Salida Difusa. La realización de la Evaluación de Reglas en un Sistema Difuso, se lleva a cabo por medio de un Algoritmo de Inferencia, el cual consiste en tres pasos básicos:

1. *Fuzzy Matching*: Calcula el grado para el cual el dato de entrada se iguala (relaciona) a la condición de la Regla Difusa.
2. *Inferencia*: Calcula la conclusión de la Regla a partir de sus grados de relación (matching).
3. *Agregación*: Combina las conclusiones inferidas por todas las Reglas Difusas en una conclusión final.

### Defusificación

Después de evaluar las Reglas Difusas y sus Variables Difusas, se necesita trasladar estos valores nuevamente hacia el mundo real.

La *Defusificación* es la conversión de una cantidad difusa a una cantidad precisa o Valor Crisp. La salida del proceso de Agregación es la unión lógica de dos o más Funciones de Membresía definidas en el Universo de

Discurso de las Variables Difusas de Salida. En general, es necesario ejecutar un Método de Agregación para que a partir de este se obtenga un valor defusificado.

### III. Desarrollo

De acuerdo a los pasos para la construcción de un Sistema Difuso se genera una organización de la aplicación en bloques, dicha separación de la aplicación está integrada por partes bien definidas pero que comparten información, la Figura 1 muestra el Diagrama a Bloques de la aplicación.

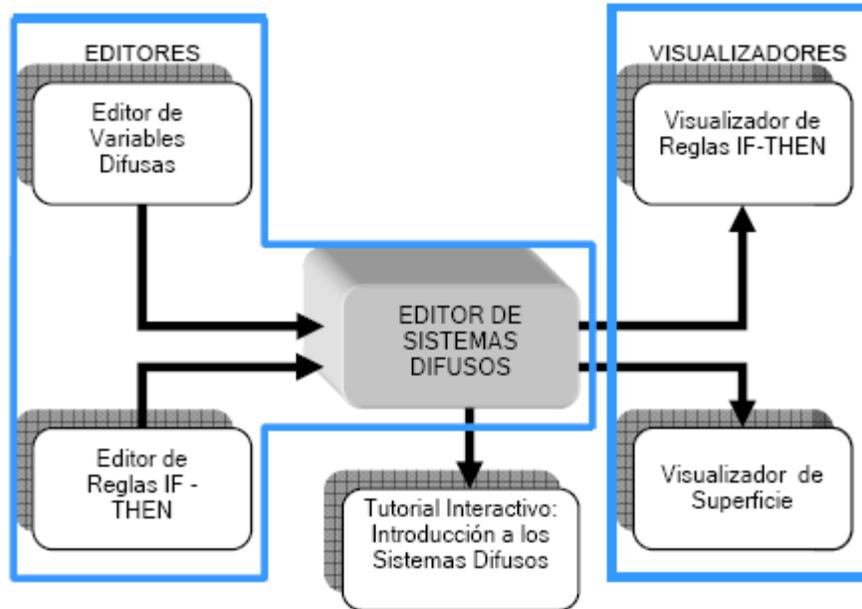


Figura 1. Diagrama a Bloques de la Aplicación.

Como se observa en la Figura 1, la aplicación se divide en Editores y Visualizadores:

- La parte de Editores se compone de: Editor de Sistemas Difusos, Editor de Variables Difusas y Editor de Reglas IF-THEN. Es necesario contar con editores debido que a través de ellos el usuario realizará el diseño de su Sistema Difuso.
- La parte de Visualizadores se compone de: Visualizador de Reglas IF-THEN y Visualizador de Superficie. El contar con Visualizadores le permite al usuario observar el comportamiento del sistema diseñado.

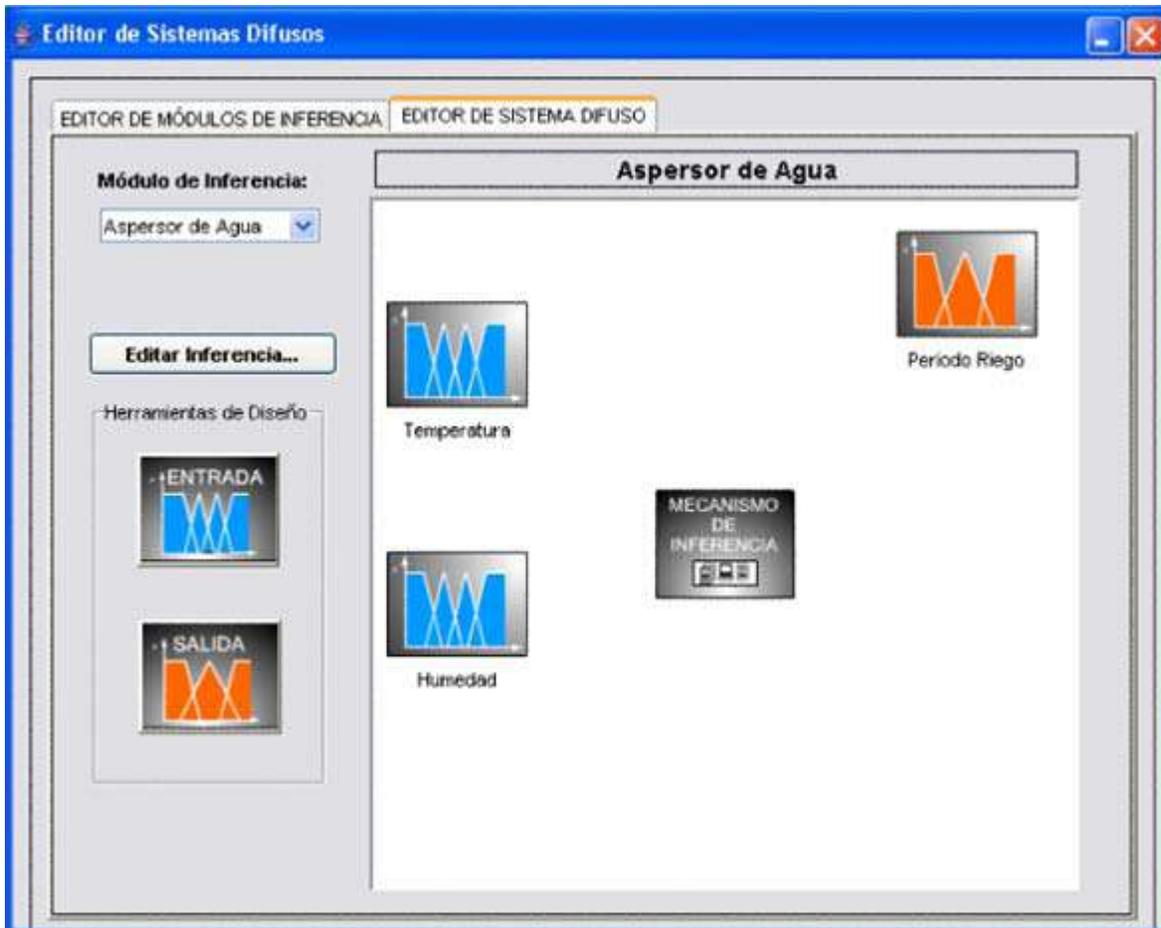
Se cuenta también con un Tutorial Interactivo, que presenta al usuario los principales conceptos involucrados a la construcción de un Sistema Difuso, y a la vez evaluar el conocimiento adquirido.

#### Editor de Sistemas Difusos

En el Editor de Sistemas Difusos se declaran los diferentes Módulos de Inferencia que componen al sistema que se está construyendo, lo cual quiere decir que si el usuario lo requiere, puede crear más de un Módulo de Inferencia. Este Editor contiene dos diferentes interfaces, las cuales se pueden observar en la Figura 2 y 3. La primera permite observar la información general de proyecto, mientras que en la segunda, se adicionan las Variables Difusas y permite editar la Inferencia del Módulo de Inferencia Actual, lo que significa que son declarados los Métodos para la Evaluación de Reglas y el Método de Defusificación.



**Figura 2.** Interfaz del Editor de Módulos de Inferencia.



**Figura 3.** Interfaz del Editor de Sistema Difuso.

#### **Editor de Variables Difusas**

Dicho de manera general el Editor de Variables Difusas (Figura 4) es el encargado de dar la funcionalidad a las Variables de Entrada y Salida del Sistema Difuso, entendiéndose como funcionalidad, la definición de las Funciones de Membresía que representan a dichas variables. En base a lo anterior, es aquí donde se define la información necesaria que forma el sistema para realizar posteriormente la Evaluación de Reglas y la Defusificación, es decir, el usuario podrá editar las diferentes características de las Funciones de Membresía.

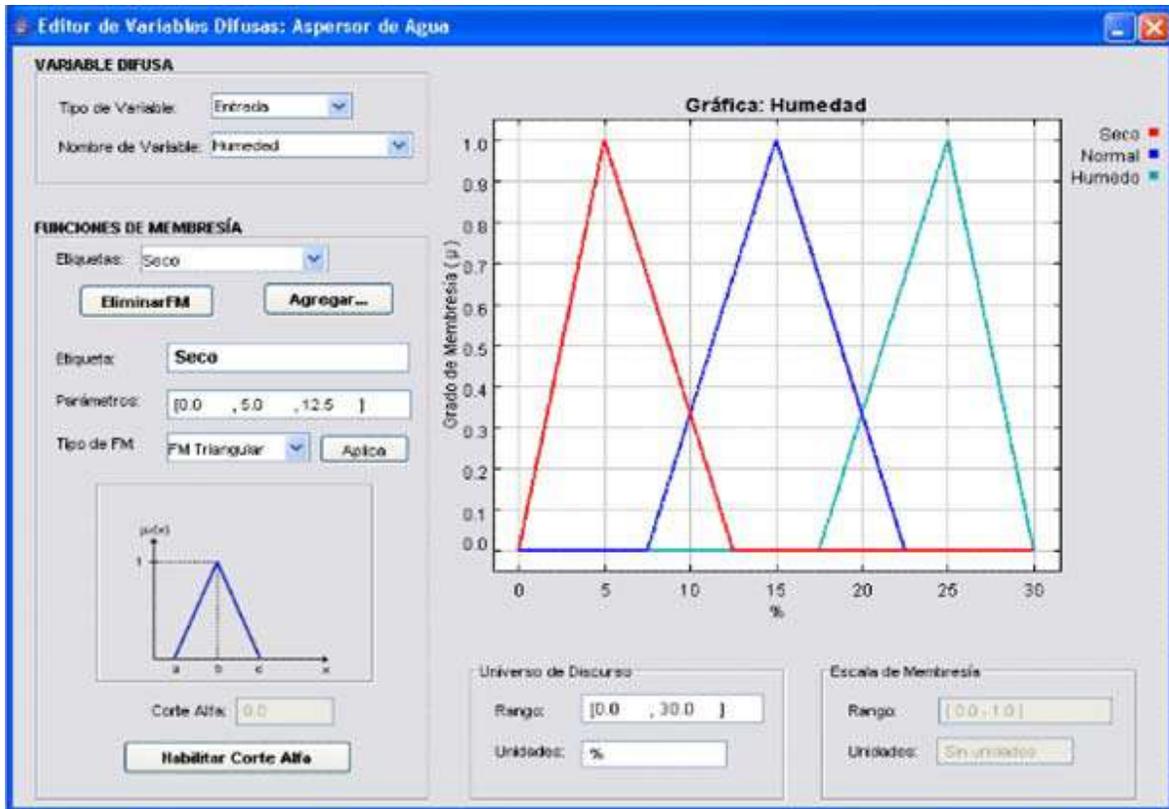


Figura 4. Interfaz del Editor de Variables Difusas.

#### Editor de Reglas IF-THEN

El Editor de Reglas IF-THEN es un elemento fundamental de la aplicación, puesto que es la interfaz que permite al usuario la creación desde una hasta  $n$  reglas, las cuales dictarán el comportamiento deseado del Módulo de Inferencia Difusa (Sistema Difuso) que el usuario esté diseñando.

En el Editor de Reglas se estructuran las reglas a partir las Variables Difusas tanto de Entrada como de Salida, y sus respectivas Etiquetas Difusas (Funciones de Membresía) asociadas a estas variables.

Para estructurar una Regla, este editor la divide en Antecedentes (desde 1 hasta  $n$ ), siendo estos la parte IF de la regla y en Consecuentes (desde 1 hasta  $n$ ), siendo este la parte ELSE de la regla.

Un Antecedente estará compuesto por alguna de las Variables Difusas de Entradas y alguna Etiqueta Difusa asociada a ésta. Mientras que un Consecuente estará conformado por alguna de las Variables Difusas de Salida y alguna Etiqueta Difusa Asociada a éste.

Además, dentro de este Editor existen dos formas de crear las Reglas:

- La primera es estructurando la Regla mediante la selección de las Variables Difusas y sus respectivas Etiquetas Difusas para formar uno a uno los Antecedentes y los Consecuentes. De esta forma se pueden editar Reglas de hasta  $n$  Antecedentes y hasta  $n$  Consecuentes.
- La segunda es mediante una Matriz de Reglas, la cual usa las Etiquetas Difusas de una Variable de Entrada para los nombres de las filas, y las Etiquetas Difusas de otra Variable de Entrada para los nombres de las columnas. Las celdas de la matriz se llenan con la Etiqueta Difusa de la Variable de Salida deseada para muchas combinaciones de entradas; y así cada celda es convertida a una Regla. De esta forma se estructuran Reglas de 2 Antecedentes y 1 Consecuente de una forma más rápida.

A continuación se muestra cómo es que el usuario hace uso de este Editor, para lo cual se muestra la interfaz gráfica y las funciones principales de este en la Figura 5.

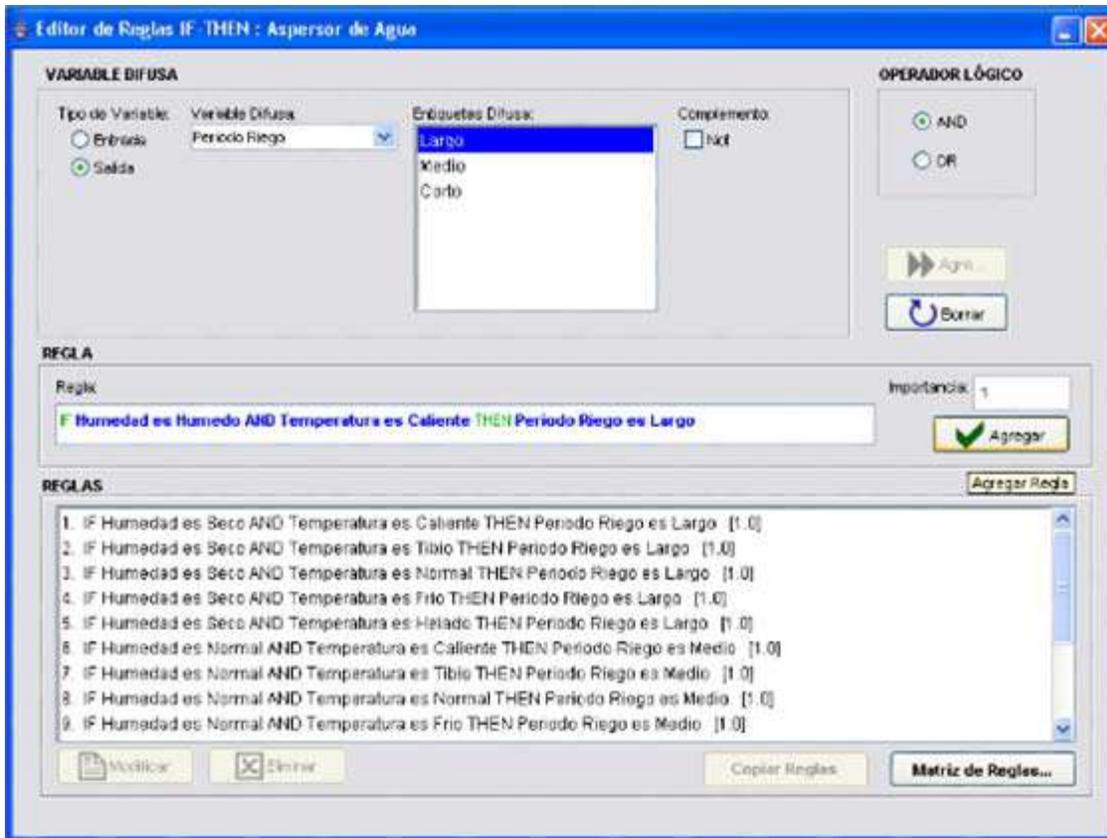


Figura 5. Interfaz del Editor de Reglas IF-THEN.

### Visualizador de Reglas IF – THEN

El Visualizador de Reglas IF – THEN recibe las Reglas declaradas y en base a estas y a Valores Crisp para las Variables de Entrada, permite la visualización de la respuesta del Sistema Difuso, en forma particular, por medio del Proceso de Implicación en el cual se evalúan cada una de las Reglas, y en forma general por medio del Proceso de Agregación en el cual se evalúan las Reglas en conjunto.

Cuando se trata de un Sistema Difuso con Fusificador y Defusificador, también es mostrado el proceso de Defusificación para obtener una Salida Crisp.

El proceso de Inferencia que está conformado por los procesos mencionados anteriormente, se puede observar en la interfaz del Visualizador de Reglas IF-THEN como lo muestra la Figura 6.

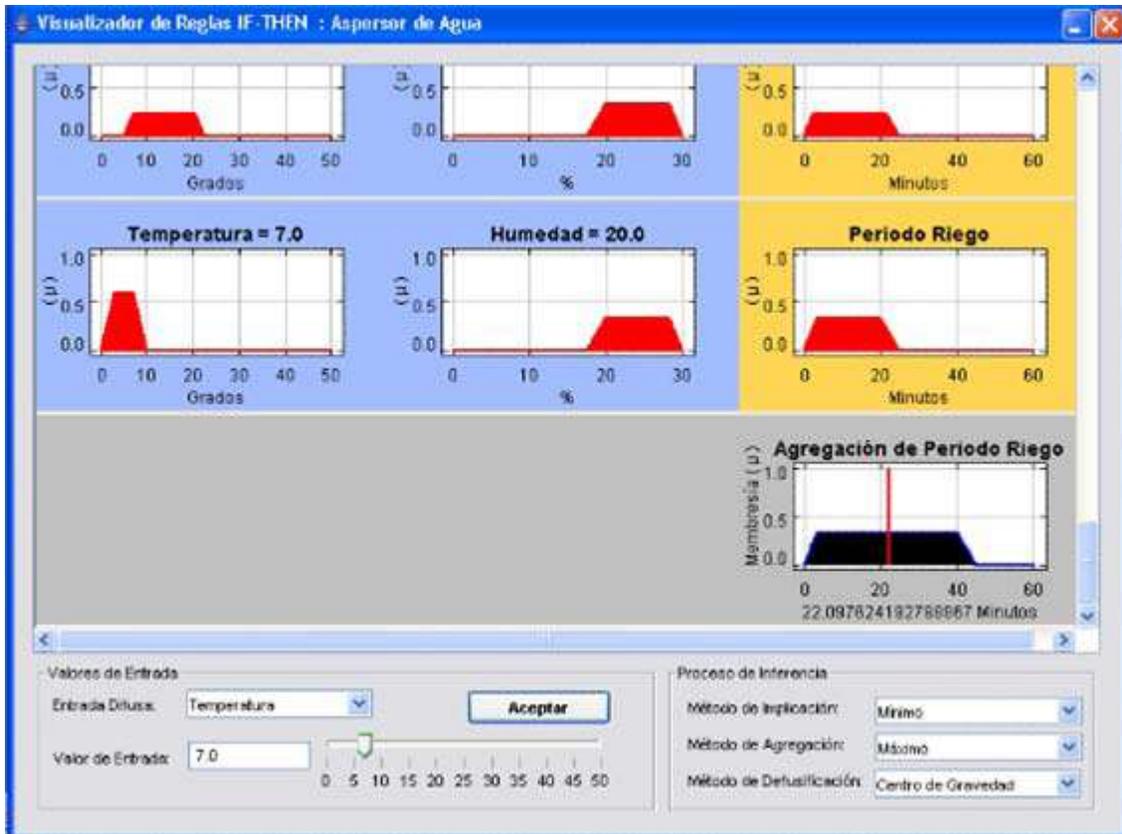


Figura 6. Interfaz del Visualizador de Reglas IF-THEN.

### Visualizador de Superficie

El Visualizador de Superficie muestra la salida del sistema y permite observar su comportamiento global. Relaciona todas las Variables Difusas, tanto de entrada como de salida que forman el Sistema Difuso, para poder mostrar una superficie de salida como se observa en la Figura 7.

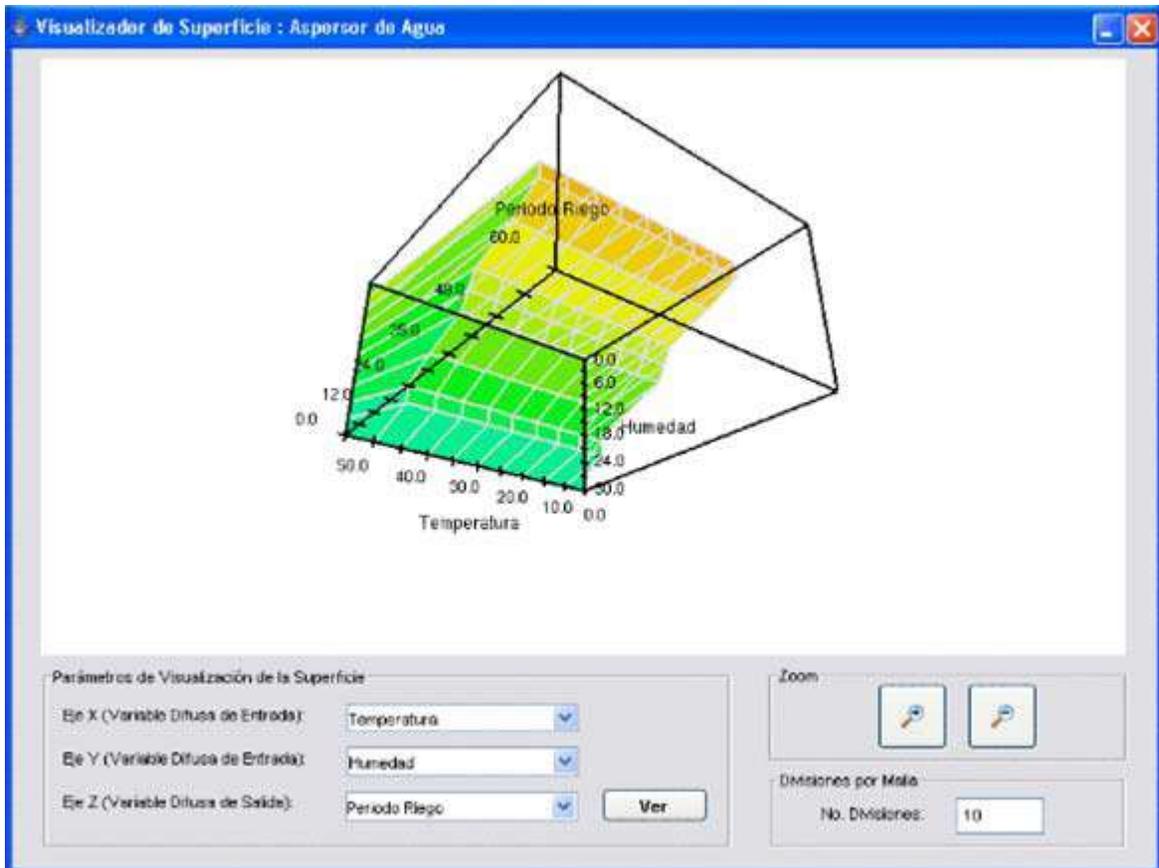
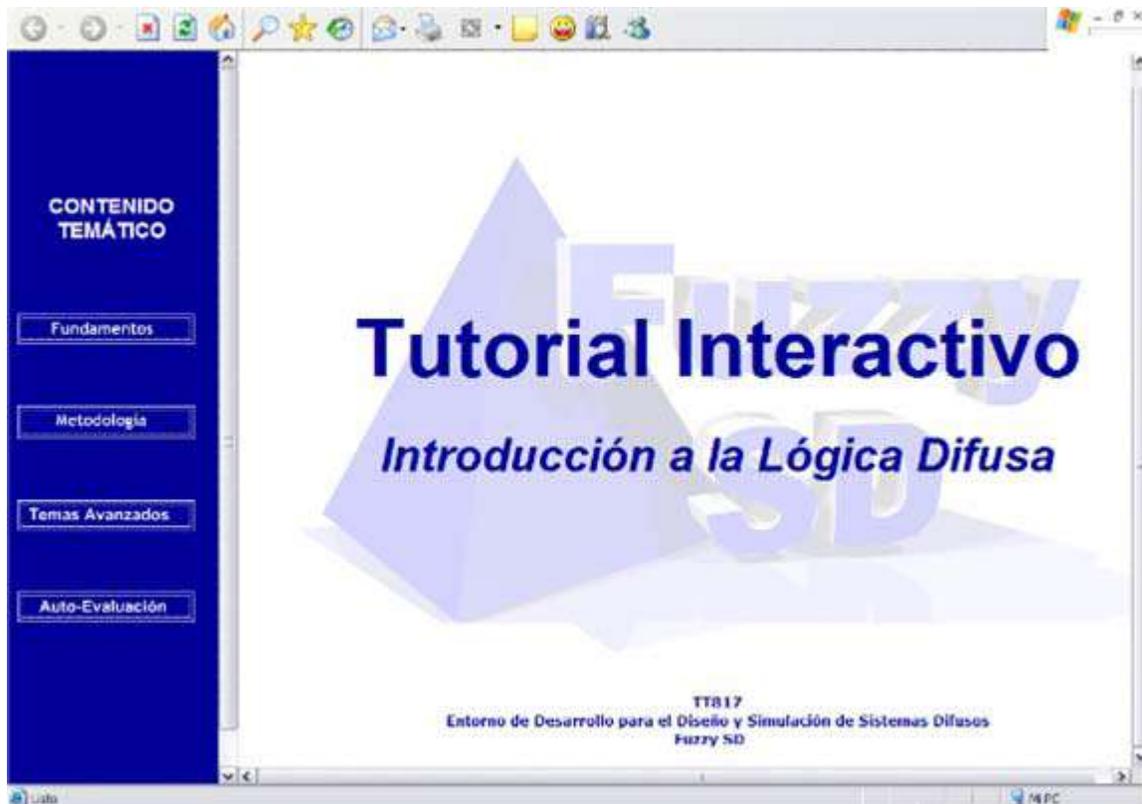


Figura 7. Interfaz del Visualizador de Superficie.

### Tutorial Interactivo

Es una herramienta de aprendizaje para el usuario, en el cual se realizan evaluaciones del conocimiento adquirido; la temática es sobre los Sistemas Difusos en forma general. De forma tal que se le presentan al usuario apartados con los principales conceptos involucrados en la construcción de un Sistema Difuso, ver Figura 8.



**Figura 8.** Interfaz del Tutorial Interactivo.

La aplicación ha sido probada ingresando diseños propuestos para algunos ejemplos de Controladores Difusos, los resultados han sido corroborados contra aplicaciones de objetivos similares a la que se presenta en este artículo, estas aplicaciones son la Fuzzy Toolbox de Matlab y FIDE.

En general, la aplicación presenta algunas ventajas sobre las aplicaciones antes mencionadas que le permiten al usuario el diseño de Sistemas Difusos de forma rápida y detallada, para alcanzar estas características la aplicación brinda atributos adicionales como:

*Edición de más de un Módulo de Inferencia* – Permite al usuario tener Módulos de Inferencia independientes para el diseño de macroproyectos.

*Selección de más de tres Normas y Conormas para la Inferencia* – Permite experimentar al usuario la combinación de diferentes Mecanismos de Inferencia mediante una variada biblioteca de Operadores Lógicos.

*Diversidad en tipos de Funciones de Membresía* – El usuario puede representar de forma precisa el comportamiento natural del Sistema.

*Peso de Contribución de la Regla* – Da prioridad a las Reglas al momento de realizar la Inferencia.

*Corte Alfa* – Descarta valores no deseados, por lo cual agiliza el proceso de Inferencia al momento de evaluar las Funciones de Membresía.

*Matriz de Reglas* – Ayuda a construir Reglas de manera intuitiva y rápida.

*Visualización del Proceso de Implicación* – El usuario observa detalladamente como la aplicación llega a una conclusión parcial.

*Visualización del Proceso de Agregación* – El usuario observa a detalle como la aplicación llega a una conclusión general.

*Tutorial Interactivo* – Permite a usuarios inexpertos conocer la Lógica Difusa y evaluar el conocimiento adquirido.

Todas estas características, no se contemplan en las aplicaciones con objetivos similares como las mencionadas anteriormente, por lo que en esta aplicación presenta ventajas significativas.

Las primeras pruebas realizadas a la aplicación, se realizaron al simular un Sistema para Controlar un Aspersor de Agua de un Invernadero de Tomates, considerado como el Sistema Difuso más básico, puesto que cuenta con dos Variables de Entrada (Temperatura y Humedad) y una de Salida (Periodo de Riego). Los resultados obtenidos en comparación con software con objetivos similares a la aplicación que se trata en este artículo, son semejantes, pero se obtiene una ventaja de mayor precisión respecto a los otros.

Una vez que se probó con el ejemplo básico, se simuló un ejemplo de mayor complejidad, como lo es un Sistema de Control Difuso para el Sistema de Transporte Colectivo Metro en la Línea 4. Aún cuando se presentaron problemas debido a que no se habían considerado Reglas que tan sólo tomaran en cuenta algunas Variables del Sistema y no todas, la aplicación no presentó inestabilidad, se obtuvieron los resultados apropiados.

## V. Conclusiones y Trabajo a Futuro.

La aplicación permite dar solución a problemas reales que requieran el diseño de Sistemas Difusos, desde el más sencillo hasta algunos con mayor complejidad.

Cada uno de los bloques generados en la aplicación tiene un objetivo específico, el cual se cumple. Los Editores ayudan al usuario a diseñar un Sistema Difuso, mientras que, en diferente medida, los Visualizadores permiten observar resultados de acuerdo a cambios en la estructura del Sistema.

El usuario tiene la oportunidad de Agregar, Modificar o Eliminar, casi todas las diferentes características del Sistema, desde cada una de los atributos de las Funciones de Membresía hasta los mismos Módulos de Inferencia.

La implementación de la aplicación se realizó totalmente en java, ocupando algunas API's para la graficación y construcción del archivo generado por la aplicación, lo que representó algunos retos al momento de la implementación como el formato para la estructura del archivo y la gráfica en tercera dimensión para la gráfica de control.

Un trabajo futuro para esta aplicación es la integración de un bloque que sea capaz de generar código en algún lenguaje de programación, útil en el sentido de que el diseñador sólo se preocupe por el análisis del sistema por diseñar y no sobre la forma de implementarlo.

## VI. Referencias

[1] Li-Xin Wang (1997): "A Course in Fuzzy System and Control", Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey.

[2] John Yen, Reza Langari (1999): "Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey

## Extractos Curriculares

**Edmundo René Durán Camarillo** es Maestro en Ciencias por el CINVESTAV-IPN, México (1994), y es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México (1993). Actualmente es Profesor Investigador Titular del Departamento de Postgrado en la Escuela Superior de Cómputo, ESCOM-IPN, México, y sus áreas de interés son: Sistemas Neurodifusos, Redes Neuronales Artificiales, Sistemas Inteligentes e Inteligencia Artificial.

**Raúl Acosta Bermejo** es Doctor en Informática, Tiempo Real, Robótica y Automatismo del Ecole de Mines de París, Francia (2003), Maestro en Ciencias en la especialidad de Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV-IPN (1997), Ingeniero en Electrónica en la UAM Azcapotzalco (1993). Ha realizado trabajos de investigación en el área de los Sistemas Distribuidos, Semántica Formal y, Lenguajes Compiladores entre otras. Actualmente es Subdirector Académico de la Escuela Superior de Cómputo, ESCOM-IPN, México.

# “Una metodología para crear soluciones a problemas en sistemas complejos de Tecnologías de Información y Comunicación”

<sup>1</sup>Dr. Leopoldo Galindo-Soria,<sup>2</sup> Ing. Jaime Rubén Miranda-Medrano

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. U. Z, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Edificio 5, Piso 2, Área de Ingeniería de Sistemas, Tel. 5729-6000 Ext. 54805, lgalindos@yahoo.com.mx, Becario de la COFAA del IPN  
2Comisión Federal de Electricidad, Gerencia ASARE, Administración del Sistema SAP R/3, Av. San. Rafael # 211-A, Col. Santa Cecilia Tlalnepantla, Tel. 5229-4400 Ext. 85207, ruben.miranda@cfe.gob.mx

**Resumen.-** En este documento se presenta una metodología, la cual, es un procedimiento que se propone sirva de ayuda para orientar en el desarrollo de soluciones a problemas en Sistemas Complejos de Tecnologías de Información y Comunicación (SCTIC).

**Palabras Clave:** Sistemas, Sistemas Complejos, Tecnologías de Información y Comunicación.

## I. Introducción.

En la mayoría de los casos en los que se presentan situaciones complejas de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC's), lo primero que se pretende es resolver los problemas tomando como base experiencias propias de una Institución o empresa; heredadas, ya sea de la misma institución o por algunas otras del mismo rubro, o también adquiridas por trabajos realizados por la misma empresa o institución.

Tomando como base lo anterior y por lo tanto considerando experiencias previas de los autores, se elaboró esta metodología, cuya finalidad es: proponer procedimientos de: planeación, análisis, diseño, construcción, implantación, operación y evaluación, para resolver o solucionar los problemas característicos en los Sistemas Complejos en el campo referente a Tecnologías de Información y Comunicación.

Entonces, para iniciar, se puede decir, que:

Un “problema” es la conciencia de una desviación de la norma, ya sea intencionada o no. Además, para comprender a un Sistema Complejo, se parte de la definición de “Sistema” de Van Gigch, la cual dice que: “Un sistema es una reunión o conjunto de elementos relacionados” [1].

Una vez recordado lo que es un sistema, se puede proponer una definición de un sistema complejo, partiendo primero del concepto de “complejidad”, para lo cual se consideran otros términos o puntos de definición, que a continuación se presentan:

Así mismo, Van Gigch comenta, que: “la complejidad existe cuando un problema parece desordenadamente grande, esto es; la intrincación de intra e interrelaciones entre los componentes del sistema” [1].

Ahora bien, calificar a algo de “complejo”, sirve además, para mencionar que hay una dificultad, ya sea de comprensión o de realización. En ese mismo instante, se cumple un cierto papel de explicación de lo que no se podía explicar de alguna otra forma:

Es decir, la constatación de que existe complejidad en “algo” permite, con frecuencia, justificar la falta de una teoría y sustituye, aunque de manera ilusoria, la insuficiencia de alguna explicación. En este artículo, la complejidad la referimos, en el contexto de las TIC's, como la cantidad de manejo u operación de datos o información, considerando que: cuanto mayor es el número de elementos que componen un sistema, mayor es la información que éste manejará.

Entonces, en síntesis, **cuando se torna muy difícil comprender al sistema debido al gran número de elementos interrelacionados, en ese momento; estamos normalmente, enfrente de un sistema complejo.**

## II. Descripción General de la Metodología Propuesta.

**Considerando lo anterior, la metodología propuesta consta de cinco FASES:**

En primera instancia se presenta la **fase cero** (llamada así a propósito); en ella se establecen los procedimientos específicos administrativos de planeación y control que se encargarán de mantener dentro de un marco a la aplicación de las fases subsiguientes de la metodología.

La fase siguiente, la **uno**, consiste en identificar el medio ambiente en el que se presenta la situación compleja y se elabora una evaluación para entonces definir o proponer un diagnóstico. Posteriormente, en la **fase dos**, se elige la mejor solución, seleccionada de acuerdo con sus características más óptimas de entre un plan de soluciones y se propone una estrategia de desarrollo, todo ello basado en los elementos encontrados en la fase uno.

La **fase tres**, consiste en diseñar una solución para esa situación compleja, para ello, se elabora un diseño preliminar y posteriormente, el detallado.

Continuando con la **cuarta fase**, se construye e implanta la solución. Aquí, se concretan en la realidad las propuestas elaboradas con anterioridad.

Por último, en la **fase cinco**, se realiza la operación de la solución implantada y también la evaluación y el diagnóstico de su desempeño, para así, mejorarla o identificar la necesidad de iniciar de nuevo el ciclo en la fase uno, en otro nivel evolutivo.

Para comprender mejor la estructura y secuencia de la metodología propuesta, se presenta, en forma gráfica y de manera general en la figura 1, mostrando cada una de las fases que se interrelacionan y sus actividades principales:

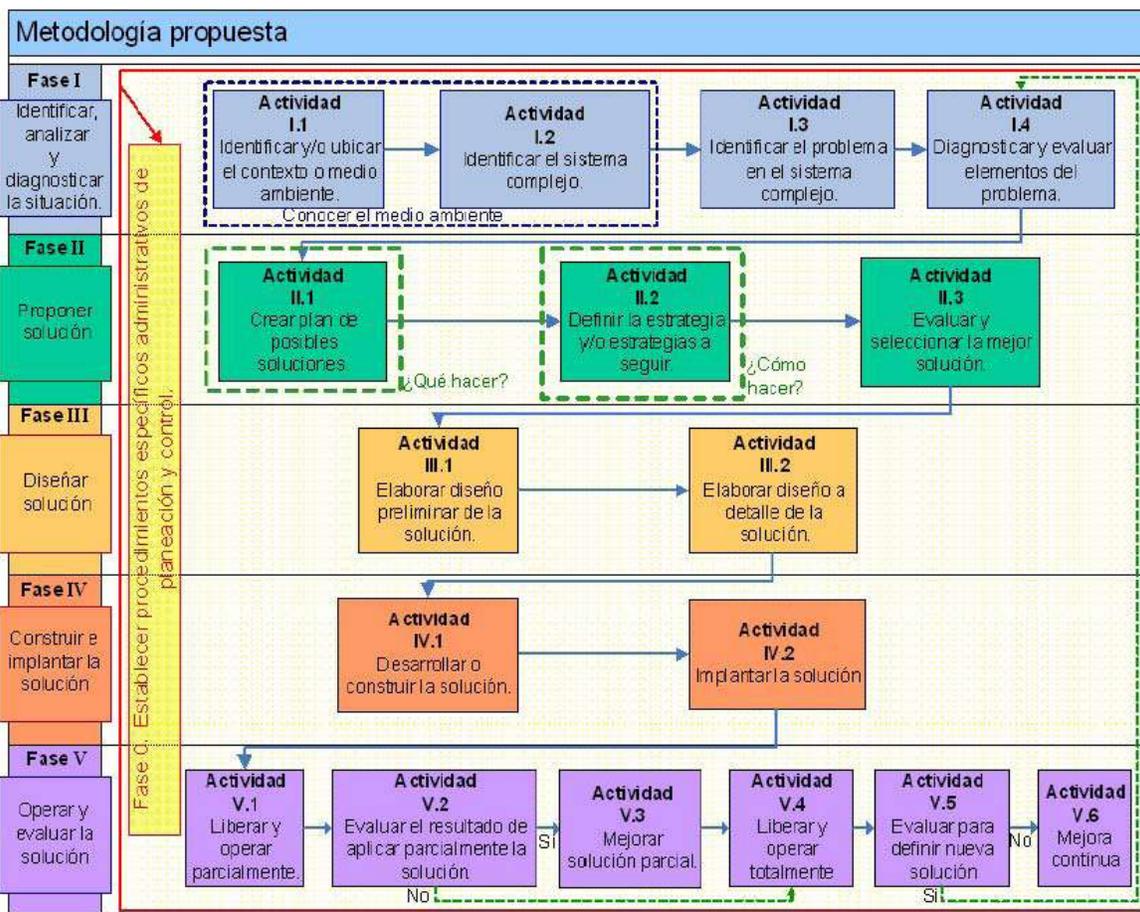


Figura 1. Representación gráfica de la estructura general de la metodología propuesta.

### III .Metodología Propuesta

#### FASE CERO. ESTABLECER PROCEDIMIENTOS ESPECÍFICOS ADMINISTRATIVOS DE PLANEACIÓN Y CONTROL.

En esta fase se requiere definir y crear los procedimientos específicos administrativos de planeación y control que permitan gestionar las fases y actividades a lo largo de la aplicación de toda la metodología, como son:

- Los procesos de: Planeación y definición de estrategias, dirección, organización, control, evaluación, etc.
- Los sistemas de: información basados en computadoras, redes de telecomunicaciones, etc.; involucrados en los procesos de origen, destino, apoyo, etc.

- Las diversas fuentes de datos e información.
- Ahora, se entra a la aplicación de la metodología:

### **FASE I. IDENTIFICAR, ANALIZAR Y DIAGNOSTICAR LA SITUACIÓN.**

Lo primero que se debe hacer, es: ubicar al “enemigo” y para ello es necesario conocer su medio ambiente, lo cual se logra a través de la realización de las siguientes actividades:

En esta actividad se debe realizar lo siguiente:

**Proceso I.1.1** Identificar y escribir los elementos de la empresa en donde se presenta la situación compleja.

Para ello se requiere de obtener:

- Su visión.
- Su misión.
- El organigrama general y estructura organizacional.
- Sus objetivos.
- Sus planes y estrategias.
- Su política de calidad o políticas.
- Sus funciones y actividades correspondientes.

**Proceso I.1.2** Se requiere elaborar, con la técnica correspondiente, un mapa mental que describa los elementos de la empresa obtenidos en el punto 1.1.1.

**Proceso I.1.3** Aquí, se debe identificar y describir los elementos sistémicos del área particular en donde se presenta la situación compleja.

Para ello, se propone obtener:

- Su visión.
- Su misión.
- El organigrama y estructura organizacional.
- Sus objetivos.
- Su política o políticas.
- Sus funciones y actividades correspondientes del área.

**Proceso I.1.4** Por último, se sugiere, crear un mapa mental que describa los elementos del área particular con los elementos obtenidos en el punto anterior.

#### **Actividad I.2. Identificar el sistema complejo.**

Para comprender al Sistema Complejo y su situación problemática se deben identificar los elementos que se tienen en el Sistema Complejo, para ello se recomienda realizar las actividades a continuación descritas:

- Valorar la necesidad y la posibilidad de obtener los recursos necesarios.

De acuerdo a lo anterior, continuar con:

- Entender lo mejor posible al problema complejo y/o áreas involucradas, mediante la obtención de información de posibles causas.
- Identificar a los elementos medulares, como son los meta-sistemas y subsistemas.

Se debe de obtener también lo siguiente [3]:

- ¿Qué o quién (humanos y/o sistemas) administra los procesos?
- ¿Qué o quién (humanos y/u otros sistemas) administra los sistemas de: Control, producción, informáticos u otros?
- ¿Qué o quién (humanos y/o sistemas) administra la información importante?

Además, obtener información sobre:

- Las funciones en el área de negocio, sus factores de éxito o no, su ubicación, etc.
- Las Tecnologías de Información y de comunicación utilizadas, herramientas de desarrollo etc.
- Los datos: distribución y definición física, consultas, tiempos, calidad, retención, historia.
- Las aplicaciones, reportes, sistemas y archivos, planeación de sistemas futuros.

**Proceso I.2.1** Definir a los procesos actuales que se realizan en el área, elaborando los correspondientes diagramas de procesos o de flujo mas adecuados.

**Proceso I.2.2** Identificar en lo posible las necesidades de la situación problemática en el Sistema Complejo.

Una ayuda importante para identificar las necesidades, se puede obtener de los cuestionarios, su elaboración, su aplicación y su análisis. Estos deben ser aplicados a personal que utiliza o utilizará el sistema.

#### **Actividad I.3. Identificar el problema en el Sistema Complejo.**

Se sugiere realizar lo siguiente:

**Proceso I.3.1** Describir experiencias empíricas y/o técnicas documentadas.

Consiste en describir en forma específica y/o numérica general las experiencias empíricas, su contexto, sus determinantes, sus interrogantes y efectos, del problema.

**Proceso I.3.2** Definir con claridad el problema.

Al describir las experiencias empíricas y perfilar el problema nos ayudan a definir el problema con mayor precisión de detalle. Los términos utilizados para definir el problema deben ser lo bastante claros para permitir que cualquier persona, con sólo leer, se ubique en lo que se pretende resolver. **Subproceso I.3.2.1** Delimitar los aspectos que abarca el problema.

Para definir un problema correctamente es necesario precisar los aspectos que incluye. Hay que evitar frecuentes divagaciones y centrar la atención en los elementos medulares, como son:

- Identificar el contexto del problema.
- Identificar el origen y su medio ambiente.
- Identificar manifestaciones del problema.
- Conocimientos que se tienen sobre él.

**Subproceso I.3.2.2** Enunciar el problema.

Se debe enunciar el problema en forma declarativa a manera de propósito.

**Subproceso I.3.2.3** Identificar las posibles causas del problema en el Sistema Complejo. Para tal efecto pueden utilizarse las técnicas a continuación descritas:

- Diagramas de Causa y Efecto (Ishikawa)
- Análisis de Pareto
- Diagramas de distribución (“Scatter”)
- Histogramas o Técnicas de Teoría de la Decisión
- “Benchmarking”.

**Actividad I.4. Diagnosticar y evaluar los elementos del problema.**

Se debe utilizar toda la información obtenida en la actividad anterior. Se pueden emplear técnicas de recopilación y clasificación de la información, de preferencia manejar una carpeta con toda la documentación obtenida.

Para lo anterior, se sugiere realizar lo siguiente:

**Proceso I.4.1** Agrupar los elementos Sistémicos.

Es importante agrupar a los elementos sistémicos como son: Procesos, datos, entradas y salidas, volúmenes y tiempos, controles, etc., e identificar todas las tareas y actividades que se ejecutan en el sistema complejo. Se pueden agrupar en una “**tabla sistémica**” [2], de la siguiente manera:

**Tabla 1.** Identificación de posibles elementos del sistema o situación compleja en una tabla sistémica [2].

SISTEMA O SITUACIÓN COMPLEJA						
Subsistema	Entradas	Procesos	Salidas	Datos	Tiempos/ Volúmenes	Controles
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**Proceso I.4.2** Se sugiere, para identificar, analizar y diagnosticar mejor las necesidades, utilizar técnicas de evaluación y diagnóstico, como por ejemplo:

- Jerarquización analítica.
- Descenso mínimo.
- Mínimos cuadrados.

**FASE II: PROPONER SOLUCIÓN.**

Ahora, se proponen las siguientes actividades:

**Actividad II.1. Crear plan de posibles soluciones.**

El Plan de soluciones debe incluir, además de la información detallada del problema y su definición, los aspectos siguientes:

- La valoración de la situación actual.
- La identificación del alcance.
- La identificación de tareas.
- La definición de los recursos.

- La asignación de los recursos.
- La definición de los tiempos por actividad.
- La definición de los productos a generar.
- El desarrollo del plan de contingencia.
- Un análisis de Ventajas/desventajas.
- Un análisis de costo/beneficio.
- Un análisis de tiempos.

**Actividad II.2. Definir la estrategia o estrategias a seguir.**

Esta actividad es fundamental para posteriormente dar paso al diseño de la solución con mayor posibilidad de éxito.

Se sugiere llevar a cabo las siguientes actividades:

**Proceso II.2.1** Definir las necesidades mediante la obtención de lo siguiente:

- Obtener recursos.
- Definir la estructura organizacional.
- Definir el (los) equipo (s) de trabajo.
- Proponer la solución o las soluciones.

**Proceso II.2.2** Identificar y analizar a detalle los siguientes dominios de la empresa:

- Dominio de Procesos.
- Dominio de Datos.
- Dominio de Sistemas de Información.
- Dominio de Soporte a Toma de Decisiones.
- Dominio de los Recursos Humanos.

**Proceso II.2.3** Cumplir con los siguientes objetivos

- Identificar la visión y la planeación a largo plazo.
- Establecer un marco de referencia para desarrollos futuros.
- Alcanzar consensos sobre objetivos comunes.
- Identificar los requerimientos clave de la infraestructura.
- Establecer tiempo de entrega inicial.
- Obtener el compromiso de la dirección.

**Proceso II.2.4** Definir un modelo o modelos de solución.

Aquí, se define una estructura de elementos que conformen la posible solución. Es decir, se debe de proponer el modelo o ideal que se desea obtener, especificando a detalle todos los conceptos que se consideren necesarios para definir su estructura, operación y funcionalidad.

**Actividad II.3. Evaluar y seleccionar la mejor solución.**

Para ello se debe de crear un análisis de los elementos de la solución, ubicar a la perfección los elementos del problema y considerar lo siguiente:

- Soluciones específicas a obtener. Esto es muy importante, ya que será la base de la construcción de la solución.
- Definir la actividad a realizar con estas posibles soluciones.
- Definir y adquirir o crear la herramienta de solución.
- Selección de los elementos de la solución.

Se deben emplear métodos que utilizan procesos bien definidos sobre las operaciones del negocio para así generar soluciones correctas a partir de elementos de solución.

**FASE 3: DISEÑAR LA SOLUCIÓN.**

Una vez realizadas las actividades anteriores, ahora se propone realizar las siguientes:

**Actividad III.1. Elaborar diseño preliminar de la solución.**

Esta actividad es fundamental para la creación de una solución, ya que de ella, depende la posibilidad de un óptimo resultado. Se deben diseñar, en forma general, los elementos de la solución, tales como: su arquitectura, sus procesos o transformaciones, sus entradas, salidas, controles, datos o información, tiempos de desarrollo y de respuesta, distribución. Lo anterior, se puede presentar en una nueva “tabla sistémica” [2], con el detalle de las especificaciones.

**Actividad III.2. Elaborar diseño detallado de la solución.**

Se propone realizar lo siguiente:

**Proceso III.2.1** Resolver problemas de: definición de conceptos, homónimos, sinónimos, etc., de los elementos del problema, como por ejemplo: balances, totales dimensionales, por región, tiempo, productos, etc.

**Proceso III.2.2** Crear los escenarios de alternativas y posibles equivalencias, para así determinar si es posible obtener esa información.

**Proceso III.2.3** Definir o diseñar con el mayor detalle todos los elementos de la solución o sistema que se definieron en la actividad anterior.

Aquí, se tiene que entrar lo mejor posible en la Tecnología en la que se realizará la solución. Será, muy importante, el apoyo de los expertos correspondientes y obviamente ya se deberá de contar con todos los recursos necesarios.

#### **FASE IV: CONSTRUIR E IMPLANTAR LA SOLUCIÓN.**

A continuación, se sugiere efectuar estas actividades:

##### **Actividad IV.1. Desarrollar o construir la solución.**

Ya que se tienen todos los elementos necesarios (tratar de crear una solución para un problema en un sistema complejo, sin tener todos o la mayoría de los elementos, sería algo inadecuado y sólo llevaría a resultados incompletos o parciales o incluso al fracaso); se realizan todas los procesos de construcción.

En el caso de las TIC's, conlleva una problemática adicional, ya que si algo cambia, actualmente, son las mismas, y esto trae como consecuencia un trabajo exhaustivo de actualización de todos los recursos, lo cual se agrega al mismo trabajo que se está desarrollando.

Normalmente, esta es la actividad más operativa y como tal, si no se estructuraron bien sus elementos se puede fallar muy fácilmente. De ahí, la importancia de las fases y actividades anteriores.

##### **Actividad IV.2. Implantar la solución.**

Una vez, desarrollada la solución se procede a su implantación (en ocasiones, el desarrollo y la implantación se realizan en paralelo; o sea, se crea y se implanta en ese momento).

Para ello, es necesario, también, contar con todos los recursos planeados en las actividades anteriores, que como se comentó anteriormente, en el caso de las TIC's, se requiere de elementos específicos muy actualizados.

La implantación, involucra cuestiones como: la capacitación, las pruebas individuales y (posiblemente totales), la creación de: manuales de operación, mantenimiento, etc., así como la puesta a punto de toda la tecnología y sus procesos involucrados.

#### **FASE V. OPERAR Y EVALUAR LA SOLUCIÓN.**

Por último, se sugiere realizar lo siguiente:

##### **Actividad V.1. Liberar y operar parcialmente la solución.**

Ya implantada la solución, se tiene que transferir a las personas o áreas que la tienen que operar o emplear (conocidos como usuarios), para ello, se requiere comprobar que estén completamente capacitados en su operación y uso.

Además, es posible, que la operación tecnológica la tenga que realizar un área especializada como lo es una Gerencia de Tecnologías de Información o equivalente. Es decir, deberá existir una coordinación y comunicación adecuada entre el o las área(s) usuarias y el área tecnológica correspondiente.

También, es posible que se realice una liberación parcial o modular para confirmar la operatividad adecuada de la solución. Para ello se realiza la siguiente actividad:

##### **Actividad V.2. Evaluar y diagnosticar el resultado de la aplicación parcial de la solución.**

Es un proceso exhaustivo de prueba de cada uno de los elementos, desde el análisis de la problemática hasta la presentación de la solución; además de las pruebas integrales o completas que sean necesarias. (sí no se ha realizado). Además, se tiene que validar la integridad y seguridad de la solución, así como su accesibilidad y disponibilidad a todos sus componentes.

También, se requiere verificar los sistemas o procesos de control o equivalentes.

En el caso, de que la evaluación de la aplicación conduzca a un diagnóstico satisfactorio, se pasa a la **actividad V.4**, para la liberación total y operación completa de la solución.

En caso, de que la operación no sea satisfactoria se procede a la siguiente actividad:

##### **Actividad V.3. Mejorar la solución parcial y obtener una nueva mejorada.**

En base, a los resultados de la evaluación y su diagnóstico correspondiente, se procede a realizar las adecuaciones o modificaciones pertinentes, -que también, tendrán que ser evaluadas y diagnosticadas como correctas y/o adecuadas-, para así, poder liberar en forma completa el sistema o solución, lo que se hará en la siguiente actividad.

#### **Actividad V.4 Liberar y operar totalmente**

Después de mucho empleo de recursos: materiales y financieros; así como, gran cantidad de trabajo y esfuerzo, se está en disposición de entregar una solución al área involucrada para su empleo completo.

Entonces, las áreas involucradas operarán el sistema o solución en forma normal y completa.

Revisando que todo funcione adecuando. Una vez, que se tiene un cierto tiempo de operación; se podrá considerar la siguiente actividad.

#### **Actividad V.5. Evaluar para definir nueva solución.**

Ahora, se tendrá que monitorear el desempeño de todo el proceso solutivo para afinaciones o cambios necesarios o mantenimiento común o imprevisto, esto conducirá en un momento dado a un posible rediseño o incluso a crear otra nueva solución semejante y así cerrar el ciclo de vida correspondiente; e iniciar otro semejante, a partir de la **Actividad I.4**, en la que las actividades de identificación del: medio ambiente, el sistema complejo y el problema, ya han sido identificados en el ciclo anterior y cuyos elementos de análisis, no se deben de perder u omitir o no tomar en cuenta y sólo deberán de ser actualizados.

#### **Actividad V.6. Mejora continua.**

Si la solución propuesta, seleccionada, diseñada, desarrollada, implantada y liberada totalmente, está en una operación que de acuerdo con los parámetros correspondientes, está en norma; se propone una estructura para mejorarlo en forma continua, sin tener que considerar el volver a realizarlo, como se comentó en la actividad anterior. En dicha estructura, se deberán de indicar las acciones y/o procesos, además de las normas o parámetros que se deberán de cumplir para una operación óptima y adecuada, tanto a las necesidades actuales como a las que vayan surgiendo.

### **IV. Resultados Experimentales.**

Actualmente, se está iniciando la aplicación de la metodología en dos empresas paraestatales grandes (PEMEX y CFE), para la creación de Sistemas de Información en Planeadores de Recursos Empresariales (ERP's, por sus siglas en inglés), tal como, el sistema SAP y sobre Sistemas Manejadores de Bases de Datos, como el Oracle e Informix. Los resultados se presentarán posteriormente en otro evento.

### **V. Conclusiones Y Trabajos Futuros.**

Como se observa, identificar, diagnosticar, proponer, planear, seleccionar, diseñar, desarrollar o construir, implantar, liberar, evaluar y operar parcial y totalmente, mejorar en forma continua, y gestionar completamente, una(s) solución(es) a un problema de un sistema complejo (o no) en los contextos de las áreas de Tecnologías de la Información y Comunicación, son tareas que involucran retos interesantes, sobre todo por el cambio continuo en los mismos, lo que conlleva a una actualización constante de todos los recursos correspondientes. Como trabajos futuros inmediatos, este trabajo forma parte del proyecto de tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas del Ing. Jaime Miranda Medrano.

### **VI. Referencias.**

- [1] Van Gigch J. P.: "Teoría General de Sistemas" 2ª. Edición; Trillas; México, D. F., MÉXICO; 1987.
- [2] Galindo, L., "Una Metodología para el Desarrollo de Sistemas de Información Basados en Computadoras"; Memorias del 6º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. SEPI, ESIME Zacatenco, IPN; México, D. F., MÉXICO; Pp. 698-709; Noviembre 2001.
- [3] Galindo, L., "Análisis y Diseño de Sistemas de Información"; en revisión para su publicación por Pearson Educación (Prentice-Hall-Addison Wesley), México, D. F. MÉXICO, Septiembre de 2005.
- [4] Galindo, L., "Data Warehousing: A Methodology for the Construction of Stores of Information"; Advances in Artificial Intelligence and Computer Science Vol. 14, Research on Computing Science; Eds. Gelbukh A., Yañez C., Camacho O.; CIC IPN, México, D. F. MÉXICO; Pp. 203-210; September 2005.

### **VII. Extracto Curricular de los Autores**

El **Prof. Leopoldo A. Galindo Soria**, tiene estudios de: Licenciado en Física y Matemáticas por la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN (1979); Maestría en Ciencias en Computación por el Centro Nacional de Cálculo del IPN (1981); Master en Sistemas Interactivos Multimedia por la Universidad

Politécnica de Cataluña y la Universidad de Barcelona en Barcelona, España (1999); Maestría en Administración de Proyectos y Comercio Electrónico por el Tecnológico de Monterrey: Campus Universidad Virtual Empresarial (2001); y Doctorado en Informática en la Universidad Politécnica de Cataluña, en Barcelona, España (1992). Tiene una experiencia docente como: Profesor-Investigador del Instituto Politécnico Nacional con una Antigüedad de 32 años, los últimos 18 a nivel de Posgrado, donde continúa como Profesor Titular. También, es profesor fundador de la ESCom. Se ha desempeñado como Profesor Invitado a nivel Licenciatura y Maestría en la: UNAM, UAM, Tecnológico de Monterrey, Universidad Autónoma de Querétaro, Universidad Anahuac, UNID, Tecnológico de Poza Rica y otras Instituciones. Tiene experiencia profesional como colaborador y/o asesor en Sistemas de Computación en: PEMEX, CFE, Instituto Mexicano del Petróleo, Vidrio Plano de México, Banamex, Bancomer y otras empresas, con una Antigüedad de 26 años. Sus áreas de interés son: La investigación, creación, modificación, aplicación y evaluación de Metodologías para el desarrollo de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's).

El **Ing. Jaime Rubén Miranda-Medrano**, es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la ESIME Zacatenco del IPN (2001); es candidato a Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas, también por la ESIME Zacatenco (2005). Actualmente trabaja en la Comisión Federal de Electricidad en la Gerencia ASARE en el Proyecto de Administración del Sistema SAP R/3. Sus áreas de interés son: La propuesta de nuevas metodologías para resolver problemas complejos en las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's), en particular, en entornos de Planeadores de Recursos Empresariales (ERP's, por sus siglas en inglés), tal como, el sistema SAP y sobre Sistemas Manejadores de Bases de Datos, como el Oracle.

# Especificación formal de un enlace de comunicación punto a punto

Florencio Guzmán Aguilar, José Sánchez Juárez, Fabiola Ocampo Botello, Roberto de Luna Caballero  
Instituto Politécnico Nacional, D. F., focampob@ipn.mx

**Resumen.-** En este artículo se presenta una metodología matemática para resolver las ecuaciones de diseño de antenas que proporcionan los parámetros idóneos para acoplarlas con los canales de comunicación, transmisor y receptor apropiados involucrados en un sistema de comunicación, lo anterior mediante la utilización de un software adecuado donde se utilizan entre otros, métodos numéricos en la solución de las ecuaciones de Maxwell aplicadas a un caso particular de propagación en el espacio libre y un procedimiento para la obtención de datos en cada una de las etapas del sistema de comunicación.

También se presenta una nueva concepción matemática para simplificar el número de pasos y la complejidad de las ecuaciones de diseño en un enlace de radiocomunicación, metodología que se desarrolló en un lenguaje de programación.

**Palabras clave:** Canales, comunicación, Maxwell, receptor, transmisor.

## I. Introducción

Cuando el método propuesto se aplica a un sistema de comunicación todos los elementos que contiene se consideran de gran importancia. Donde se aprovechan las características más importantes de las antenas como: la longitud de onda, la direccionalidad, la ganancia y la impedancia.

Para acoplarlas al transmisor y al receptor, y el cálculo de estos va a depender de la potencia de recepción de las dos antenas, ya que si la potencia es muy reducida, se tendrá que dar mayor énfasis al receptor y esto dependerá del ruido que exista en el enlace, porque entonces se manejaría la alternativa de dar mayor potencia al transmisor [3]. Una ventaja es que esta metodología no considera un tipo específico de antena, sino que se abstrae en un cálculo entre dos puntos en el espacio libre. Así que esta metodología es una guía en el diseño de los enlaces de comunicaciones, que sirve para un experto en radio transmisión y una persona que solamente tiene conocimientos elementales de enlaces de antenas. Esta metodología les ayudará a decidir que tipo de elementos debe conformar el enlace de radiocomunicaciones.

Dentro de los problemas de diseño de los enlaces de comunicaciones, existen cálculos de ruido en el canal de comunicaciones para hacer la consideración de si dar mayor potencia al transmisor o mayor sensibilidad al receptor, se tendrían que hacer cálculos de ganancia y de impedancia de diferentes tipos de antenas para colocar la más idónea [4].

Las ecuaciones de Maxwell tienen una gran importancia en la teoría electromagnética, ya que de estas ecuaciones se derivan fórmulas que se utilizan para calcular parámetros de los canales, las antenas y de elementos de enlace entre equipos de transmisión y recepción, estas ecuaciones tienen un grado de complejidad que dificulta en muchas ocasiones su manejo, por lo que se hace necesario simplificarlas para disminuir la cantidad de cálculos y con ello dar claridad en su expresión, para facilitar su manejo en la solución de problemas.

Esta metodología evita que se tengan que hacer los cálculos de ruido del canal y ayuda a realizar los cálculos de la ganancia e impedancia de las antenas a instalar. Para determinar las características eléctricas del transmisor y del receptor, y el tipo de antena que se va a utilizar. Por otro lado se facilita la programación de esta metodología.

## II. Procedimiento metodológico

El propósito de implementar una metodología donde se idealicen los elementos participantes del enlace de comunicaciones para que se reduzcan lo más posible los cálculos extras que conllevan el diseño de un enlace de comunicaciones. Para iniciar el método se considera el caso de un enlace punto a punto en el espacio libre, donde se subdivide el espacio en dos subespacios  $a$  y  $b$ , además se consideran una densidad de corriente  $\rightarrow J$  y una fuente magnética  $\rightarrow M$  para cada uno de los subespacios anteriores con la misma frecuencia, los representaremos como:

$\vec{J}_a, \vec{M}_a$  y  $\vec{J}_b, \vec{M}_b$ , respectivamente [1] [2]. Estas fuentes producen campos eléctricos y magnéticos

dados por,  $\vec{E}_a, \vec{H}_a$  y  $\vec{E}_b, \vec{H}_b$  para cada subespacio.

### III. Exposición de resultados

A continuación se describe paso a paso el procedimiento para obtener la ecuación de potencia entre dos antenas.

**Paso 1.** Se realiza el producto vectorial entre el campo eléctrico y el campo magnético de los subespacios alternos ( $a$  y  $b$ ), se restan estos productos y se aplica la divergencia. La resta se aplica para conocer el flujo de electrones de un subespacio a otro [5]. Desarrollamos y aplicamos las ecuaciones de Maxwell para obtener la siguiente igualdad:

$$\nabla \cdot (\vec{E}_b \times \vec{H}_a - \vec{E}_a \times \vec{H}_b) = \vec{E}_a \cdot \vec{J}_b - \vec{H}_a \cdot \vec{M}_b - \vec{E}_b \cdot \vec{J}_a + \vec{H}_b \cdot \vec{M}_a$$

**Paso 2.** Se integran todos los pares de subespacios que contiene el espacio total, debido a esto se aplica una integral de volumen, utilizando el teorema de la divergencia se obtiene, -

$$\int_V (\vec{E}_b \times \vec{H}_a - \vec{E}_a \times \vec{H}_b) \cdot d\vec{S}' = \int_V (\vec{E}_a \cdot \vec{J}_b - \vec{H}_a \cdot \vec{M}_b - \vec{E}_b \cdot \vec{J}_a + \vec{H}_b \cdot \vec{M}_a) dV'$$

**Paso 3.** Se hacen las siguientes consideraciones, sobre las componentes del campo, en la integral de volumen anterior

$$E_\theta = \eta H_\phi$$

$$E_\phi = -\eta H_\theta$$

$$d\vec{S}' = \hat{r} dS'$$

donde se aplica el teorema de reciprocidad o lema de Lorentz,

$$\int_V (\vec{E}_a \cdot \vec{J}_b - \vec{H}_a \cdot \vec{M}_b) dV' = \int_V (\vec{E}_b \cdot \vec{J}_a - \vec{H}_b \cdot \vec{M}_a) dV'$$

Donde se suponen fuentes

$$\vec{M}_b = 0 \quad \text{y} \quad \vec{J}_b = \hat{p} \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$$

$$\vec{E}_b \quad \text{y} \quad \vec{H}_b$$

que producen los siguientes campos en cualquier punto del espacio, una vez calculados estos campos se pueden calcular los campos que produce cualquier distribución de corrientes

$$\vec{J}_a \quad \text{y} \quad \vec{M}_a$$

**Paso 4.** Se aplica la función de Green, aplicando las consideraciones anteriores,

$$\hat{p} \cdot \vec{E}_a(x_0, y_0, z_0) = \int_V (\vec{E}_b \cdot \vec{J}_a - \vec{H}_b \cdot \vec{M}_a) dV'$$

sí se orienta  $\hat{p}$  en las tres direcciones ortogonales del espacio, se obtendrá  $\vec{E}_a$  y  $\vec{H}_a$ , que son los campos

producidos por  $\vec{M}_b$ .

**Paso 5.** Se aplica el teorema de reciprocidad al siguiente caso particular. Se consideran dos antenas, identificadas mediante los subíndices 1 y 2, las cuales están aisladas en el espacio.

**Paso 6.** Se considera un generador de corriente  $I_{1a}$  en la antena 1 y en la antena 2 un circuito abierto  $V_{2a}$ . Si no existen fuentes magnéticas, la ecuación es la siguiente

$$\int_V (\vec{E}_a \cdot \vec{J}_b) dV' = \int_V (\vec{E}_b \cdot \vec{J}_a) dV'$$

**Paso 7.** Se tiene en cuenta que  $\vec{J}_a$  solo existe en la región terminal de la antena 1 y

$\vec{J}_b$  en la terminal de la antena 2, por lo que se obtiene la siguiente ecuación,

$$\int_{ant2} (\vec{E}_{2a} \cdot \vec{J}_{2b}) dV' = \int_{ant1} (\vec{E}_{1b} \cdot \vec{J}_{1a}) dV'$$

**Paso 8.** Se obtiene el siguiente resultado ya que la corriente del generador fluye a lo largo de una línea y es constante, entonces,

$$\int_{ant2} (\vec{E}_{2a} \cdot \vec{J}_{2b}) dV' = \int_{ant2} (\vec{E}_{2a}(l) \cdot \vec{I}_{2b}) dl = -I_{2b} V_{2a}$$

donde  $V_{2a}$  es la tensión en el circuito abierto creada en la región terminal de la antena 2 por la corriente  $I_{1a}$ .

**Paso 9.** Análogamente tenemos que,

$$\int_{ant1} (\vec{E}_{1b} \cdot \vec{J}_{1a}) dV' = -I_{1a} V_{1b}$$

Estas expresiones son válidas para cualquier cuádrupolo o medio homogéneo, lineal e isótropo, es decir, formado por elementos bilaterales, con el resultado siguiente,

$$V_{2a} I_{2b} = V_{1b} I_{1a}$$

o equivalentemente

$$\left. \frac{V_{2a}}{I_{1a}} \right|_{I_{2a}=0} = \left. \frac{V_{1b}}{I_{2b}} \right|_{I_{1b}=0}$$

que en la notación habitual se escribe como  $Z_{21} = Z_{12}$

Se aplica el teorema de reciprocidad con fuentes de corrientes magnéticas, que como se ha visto son equivalentes a los generadores de tensión, se obtiene un desarrollo similar,  $Y_{21} = Y_{12}$

**Paso 10.** Se calcula la potencia recibida por una antena con carga  $Z_L$ . Se tiene una antena receptora 2 con una carga  $Z_L$ . El voltaje a circuito abierto o del generador equivalente en dicha antena es  $V_{ca}$  y la potencia entregada a la carga  $P_{R2}$  es

$$P_{R2} = \left| \frac{V_{ca}}{V_{22} + Z_L} \right|^2 R_{22} = \frac{|I_1|^2 |Z_{21}|^2}{4R_{22}}$$

**Paso 11.** Se calcula la potencia transmitida por la antena 1, esto es,

$$P_{T1} = |I_1|^2 R_{11}$$

y entonces

$$\frac{P_{R2}}{P_{T1}} = \frac{|Z_{21}|^2}{4R_{11}R_{22}}$$

**Paso 12.** Se obtiene la ecuación de transmisión de una expresión alternativa para la relación de potencias, como sigue,

$$\frac{P_{R1}}{P_{T1}} = \frac{D_1 A_{ef2}}{4\pi r^2}$$

#### IV. Discusión de resultados

Una nueva forma de tratar un problema de comunicaciones, es el uso de las ecuaciones de Maxwell considerando un nuevo punto de referencia en el tiempo, por lo que se propone la siguiente

solución.

**Paso 1** Se obtienen dos potenciales, uno vectorial  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  y otro escalar  $\Phi(\vec{r}, t)$ , los cuales satisfacen las relaciones siguientes [6] [1] [2],

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\nabla\Phi(\vec{r}, t) - \frac{\partial}{\partial t}\vec{A}(\vec{r}, t)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \nabla \times \vec{A}(\vec{r}, t)$$

estos potenciales se relacionan entre sí mediante la llamada condición de Lorentz

$$\nabla \cdot \vec{A}(\vec{r}, t) + \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\vec{r}, t) = 0$$

Estos potenciales electrodinámicos son soluciones de las siguientes ecuaciones de onda vectoriales inhomogéneas

$$\nabla^2 \Phi(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Phi(\vec{r}, t) = -\frac{\rho(\vec{r}, t)}{\epsilon_0}$$

$$\nabla^2 \vec{A}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{A}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \vec{j}(\vec{r}, t)$$

y están dados por las expresiones

$$\Phi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\vec{r}', t')}{R} dV'$$

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}', t')}{R} dV'$$

$$R = \left| \vec{R} \right| = \left| \vec{r} - \vec{r}' \right|$$

**Paso 2** De la figura 1, se observa que

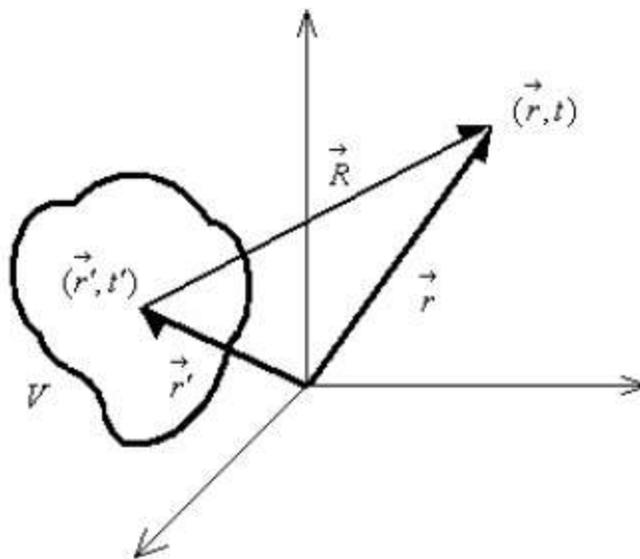


Figura 1

La característica de estos potenciales es que, el tiempo en el punto fuente  $(t')$  y el tiempo en el punto campo  $(t)$

son distintos;  $t' = t - \frac{R}{c}$ , donde  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  es la velocidad de la luz.

**Paso 3** Se aplica la transformada de Fourier,

$$F(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{F}(\vec{r}, t) e^{i\omega t} d\omega$$

Para poder reescribir las ecuaciones de Maxwell, ya no como funciones de la posición y el tiempo, sino ahora, como funciones de la posición y la frecuencia,

$$F(\vec{r}, t) \Leftrightarrow \mathfrak{F}(\vec{r}, t) \Rightarrow \frac{\partial F(\vec{r}, t)}{\partial t} \Leftrightarrow i\omega \mathfrak{F}(\vec{r}, t)$$

es decir, ahora tenemos

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, \omega) = \rho(\vec{r}, \omega)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, \omega) = 0$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) + i\omega \vec{B}(\vec{r}, \omega) = \vec{0}$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) - i\omega \vec{D}(\vec{r}, \omega) = \vec{j}(\vec{r}, \omega)$$

en esta nueva representación se tienen las siguientes relaciones constitutivas que ayudan a resolver problemas de una manera más sencilla, en algunas ocasiones y dependiendo del fenómeno a describir,

$$\vec{D}(\vec{r}, \omega) = \epsilon_{\omega} \vec{E}(\vec{r}, \omega)$$

$$\vec{j}(\vec{r}, \omega) = \sigma_{\omega} \vec{E}(\vec{r}, \omega)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, \omega) = \mu_{\omega} \vec{H}(\vec{r}, \omega)$$

## V. Conclusiones

Esta metodología sirve para apoyar en el cálculo de un enlace a un experto en telecomunicaciones. También se puede desarrollar un programa que presente toda la deducción de las ecuaciones y que además realice el cálculo de potencias y distancia de un enlace de comunicaciones. Con el hecho de hacer el cambio de plano del tiempo al plano de la frecuencia, con la nueva propuesta, se puede realizar el mismo cálculo de potencias en el enlace de comunicaciones pero ahora con la intervención de la frecuencia, lo que implica un dato que ayuda a determinar el ancho de banda del canal.

Se pueden obtener las graficas del comportamiento en frecuencia programando las ecuaciones obtenidas, y así poder determinar la frecuencia óptima del enlace de comunicaciones.

Para desarrollar este software se programaron las ecuaciones que se presentan en los pasos número 10 y 11 haciendo las consideraciones según sea el caso de R11 y R22, se aplicó un método numérico y por último se programó la ecuación del paso 12 para calcular la distancia del enlace.

## Referencias

- [1] J.H.Reitz, F.J.Milford, R.W.Chrity Fundamentos de la Teoría Electromagnética. Addison-Wesley, (1996).
- [2] J.D. Jackson, Electrodinámica clásica, Editorial Alambra, (1975).
- [3] S. Haykin, An Introduction to Analog and Digital Communications, John Wiley and Sons, (1989).
- [4] Jack Smith, Modern Communication Circuits, McGraw –Hill, (2001).
- [5] C.A. Balanis, Antenna Theory. Analysis and Design, Harper and Row, (2000).

[6] W. C. Chew and J. M. Jin and C. C. Lu and E. Michielssen and J. M. Song, Fast solution methods in electromagnetics, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, (1997).

# Medición de diámetro de campo de modo gaussiano de la intensidad de radiación en diferentes fibras ópticas aplicando técnica de campo lejano.

<sup>1</sup>Alexandre Michtchenko, <sup>2</sup>Mónica Fuentes Nava

<sup>1</sup>IPN Sección de Estudios de Posgrado ESIME Zacatenco, mitchen@servidor.unam.mx, 5729600 ext. 54622 ; <sup>2</sup>IPN Sección de Estudios de Posgrado ESIME Zacatenco, navamf@infosel.com, 56672074;

**Resumen.**- La medición de diámetro de campo de modo gaussiano es una medida característica de las fibras ópticas. En la mayoría de estos sistemas, existen problemas de pérdidas de señal ocasionados por diferentes circunstancias, entre las cuales destaca la pérdida de señal por dobleces en la fibra óptica, pérdidas de señal por uniones, por acoplamientos entre fibras ópticas, dispersión de guías de ondas, etc.. Una de las técnicas de medición empleadas para realizar estudios y estimar una caracterización de los sistemas, es la medida de diámetro de campo de modo gaussiano aplicando la técnica de campo lejano, esta técnica permite conocer la intensidad de distribución gaussiana que existe dentro de la fibra óptica. Esta medida está directamente relacionada con la longitud de onda de operación de la fibra óptica, del radio del núcleo de la fibra y los perfiles del índice de refracción del núcleo y revestimiento.

**Palabras clave:** Fibra monomodo, distribución de campo gaussiano, campo de diámetro gaussiano, campo lejano.

## I. Introducción.

Los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica, requieren la caracterización del medio de transmisión, con la finalidad de ofrecer un favorable desempeño relacionado con el transporte de la información por medio de la fibra óptica. Uno de los principales problemas frecuentemente encontrados en estos tipos de sistemas son: las pérdidas de señal. Este tipo de problemas se dan por diferentes circunstancias, algunas ocasionadas por defectos de fábrica de los dispositivos físicos involucrados en los sistemas de telecomunicaciones, pero la mayoría de las veces estas pérdidas son ocasionadas por el medio de transmisión debido a una mala fabricación y/o mala caracterización de la fibra óptica. Existen alternativas de solución las cuales permiten crear métodos que ayudan a medir las diferentes características de la fibra óptica. En el presente trabajo, la meta principal, es dar a conocer un esquema general de la importancia que tiene la medición del diámetro de campo de modo gaussiano en las fibras ópticas aplicando la técnica de campo lejano. Se describe en forma general en que consiste esta técnica, así como, una breve descripción del arreglo experimental implementado para desarrollar esta técnica.

## II. Medición de diámetro de campo de modo gaussiano.

La distribución de modo de campo fundamental en las fibras ópticas, es una característica que determina importantes parámetros, como son: las pérdidas de señal por uniones, eficiencia de introducción de luz en la fibra, pérdidas de señal por dobleces y algunas otras. La medida de diámetro de campo de modo (MFD) gaussiano es una medida particular de las fibras ópticas, el modo fundamental de la fibra óptica puede ser precisamente representado por una función gaussiana (1).

$$\psi_G(r) = A e^{-r^2/\omega_0^2} \quad (1)$$

donde  $\omega_0^2$  es usualmente conocida como el tamaño del punto, A es una constante y r es el radio del tamaño de la mancha o punto transmitido. La medida de diámetro del campo de modo gaussiano esencialmente especifica el extendido transversal del campo modal fundamental. El MFD gaussiano, es una medida que está relacionada con el tamaño de un punto o del ancho del haz de la luz propagada en una fibra. El MFD está en

función de la fuente de longitud de onda, el radio del núcleo de la fibra y los perfiles de índice de refracción tanto del núcleo como del revestimiento de las fibras. En una fibra típica monomodo, la mayoría de la potencia óptica es propagada dentro del núcleo de la fibra y una pequeña porción se propaga a lo largo de la región establecida entre la interfase del núcleo y revestimiento. Estos parámetros hacen que el MFD sea más usual que una simple medida del diámetro del núcleo, otra técnica utilizada para características de la fibra óptica especialmente en fibras multimodo.

La distribución de los campos electromagnéticos en una fibra óptica es referida como los modos de la fibra. Generalmente un modo en una fibra óptica es representada como  $LP_{mn}$ , donde  $m$  representa la mitad del número de las variaciones a lo largo de la dirección azimutal, y  $n$  representa el número de variaciones a lo largo de las dirección radial. Los modos llamados “LP” son utilizados en la fibra óptica para describir el modo de comportamiento de una fibra óptica. Cuando se tiene el modo  $LP_{01}$ , se dice que es el modo de orden más bajo, el cual, el modo de la forma construye una función de distribución gaussiana muy cerrada. La aproximación de modo gaussiana es una herramienta muy usual para el análisis del comportamiento de la fibra y es relativamente fácil su uso en la construcción de modelos de desempeño para las fibras ópticas. En la “Figura. 1” se muestran algunos ejemplos de los modos de una fibra óptica.

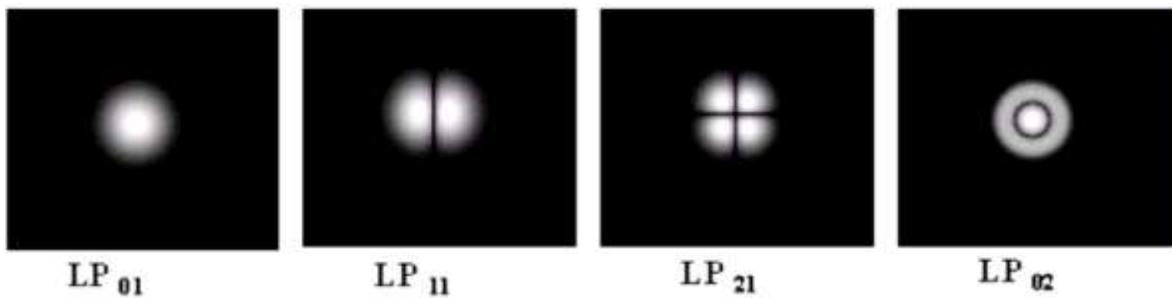


Figura 1. Diferentes modos de la fibra óptica.

**Propagación de un haz de láser en fibra óptica.**

En general, la propagación de un haz de láser puede ser aproximado asumiendo que el haz del láser tiene un perfil de intensidad gaussiana ideal correspondiente al modo teórico  $TEM_{00}$ . En el modo  $TEM_{00}$ , el haz emitido desde un láser, comienza como una onda perfecta plana con un perfil de radiación transversal gaussiano. La forma de la figura del haz gaussiano es truncado por algún diámetro, por las dimensiones internas del láser o por algunas limitaciones de la apertura en el tren óptico. Para especificar las características de propagación del rayo láser, se establece una definición a este diámetro la cual es: **“es el diámetro a el cual la intensidad del haz o rayo gaussiano ha caído a  $1/e^2$  (13.5%) de su máximo”**. ”Figura 2”  
 Existe un modelo popular que describe una curva gaussiana en una fibra y esta dada por (2).

$$I(r) = I(0) \exp(-2r^2 / w_0^2) \quad I(r) = I(0) \exp(-2r^2 / w_0^2) \tag{2}$$

donde  $I(r)$  es el valor de la corriente de la intensidad del haz a un radio  $r$ ,  $I(0)$  es la intensidad máxima del haz a  $r=0$ , y  $w_0$  es el radio del modo del campo.

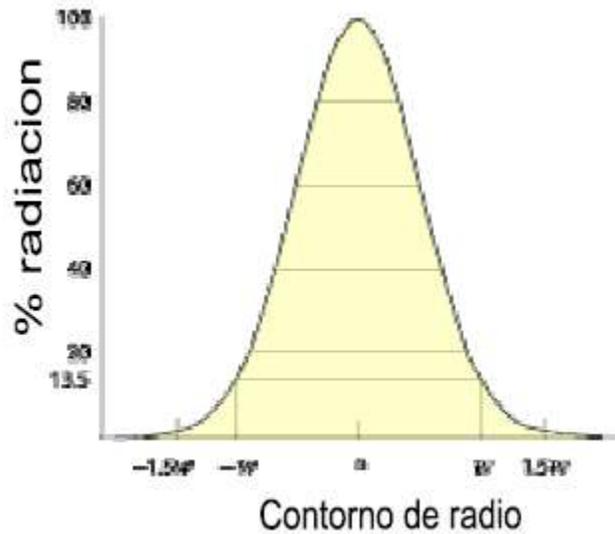


Figura 2. Perfil de un haz Gaussiano (Modo Teórico TEM<sub>00</sub>).

### III. Técnicas de medición de diámetro de campo de modo gaussiano.

Existen diferentes técnicas de aplicación que ayudan a la medida de diámetro de campo de modo gaussiano.

#### Técnica del campo cercano.

Una de las técnicas utilizadas en la medición MFD gaussiano, es la llamada técnica del campo cercano, está técnica consiste en desarrollar un arreglo experimental mostrado en la “Figura 3” el cual permita introducir luz en una fibra de prueba y el campo cercano de la fibra pueda ser magnificado utilizando un microscopio con un foto detector. La medida del patrón de intensidad esta dado por (3).

$$I(r) \propto \psi^2(r) \tag{3}$$

donde I(r) es la intensidad de corriente del haz a un radio r. Para los campos gaussianos cercanos se realiza la construcción de una curva gaussiana con ayuda de la ecuación (4).

$$G(r) = G_0 e^{-2r^2/\omega_0^2} \tag{4}$$

donde  $\omega_0$  representa el tamaño del punto o mancha transmitida, r radio del punto o mancha,  $G_0$  es una constante, a partir de esta formula que ayuda a la construcción de la curva gaussiana, podemos encontrar el máximo traslape con (5).

$$\Gamma = \frac{\left[ \int_0^{\infty} \sqrt{I(r)G(r)} r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r) dr \int_0^{\infty} G(r) dr} \tag{5}$$

si  $\omega_0$  es el valor que maximiza el traslape  $\Gamma$ , entonces  $d_N = 2\omega_0$ .

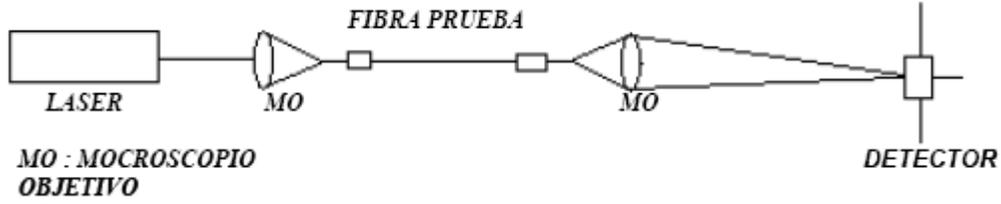


Figura 3. Arreglo experimental para la medida del patrón de intensidad del campo cercano en fibras ópticas.

### Técnica del campo lejano.

El perfil de intensidad del campo lejano es medido con un fotodetector. El patrón de intensidad del campo lejano puede ser escrito como (6).

$$|\psi(\theta)|^2 = |\psi(0)|^2 e^{-2 \sin^2 \theta / \sin^2 \theta_f} \quad (6)$$

donde  $\psi(\theta)$  patrón de intensidad en una ángulo  $\theta$ ,  $\psi(0)$  la intensidad máxima en una ángulo  $0^\circ$

$$\sin \theta_f = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (7)$$

cuando se tiene que  $\theta$  es pequeño podemos escribir a (6) como (8).

$$|\psi(\theta)|^2 \cong |\psi(0)|^2 e^{-2\theta^2 / \theta_f^2} \quad (8)$$

$$d_f = 2w_0 = \frac{2\lambda}{\pi \sin \theta_f} \quad (9)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda. La distribución angular del campo lejano esta definida cuando se cumple la condición de (10).

$$r \geq z_R = \pi w^2 / \lambda \quad (10)$$

donde :  $z$  se denomina radio de Relley.

$w$  radio característico del campo de modo de fibra óptica.

$\lambda$  longitud de onda.

La relación entre distribución del campo eléctrico en campo cercano  $E(\rho, \phi)$  y campo lejano  $E_f(r', \theta')$  en coordenadas polares se puede escribir como (11).

$$E_f(r, \theta, \varphi) = \frac{j}{\lambda r} \exp(-jkr) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\rho', \varphi') \exp[jk\rho' \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')] \rho' d\rho' d\phi' \quad (11)$$

En el caso de modos simétricos con respecto al eje y el modo principal se puede rescribir [11] como (12).

$$E_f(r, \theta) = \frac{j}{\lambda r} \exp(-jkr) \int_0^\infty E(\rho') J_0(k\rho' \sin\theta) \rho' d\rho' \quad (12)$$

donde:  $J_0$  función de Bessel de orden cero.

Introduciendo la frecuencia en el espacio definido por (13).

$$q = \sin\theta / \lambda \quad (13)$$

De esta manera (12) se puede describir como (14)

De esta manera (12) se puede describir como (14)

$$E_f(r, \theta) = \frac{j}{\lambda r} \exp(-jkr) E_H(q) \quad (14)$$

A esta ecuación también se le conoce como transformada de Hankel.

$$E_H(q) = 2\pi \int_0^{\infty} E(\rho') J_0(2\pi q \rho') \rho' d\rho' \quad (15)$$

De esta manera podemos decir que la distribución angular del campo de modo principal en zona lejana  $E_f(r, \theta)$   $E(\rho')$  es la transformada de Hankel de distribución radial del campo de modo dentro de fibra óptica. La transformada inversa de Hankel nos permite recibir  $E(\rho')$  desde la distribución de la radiación de campo medido en zona lejana.

$$E(\rho') = 2\pi \int_0^{\infty} E_H(q) J_0(2\pi q \rho') q dq \quad (16)$$

donde:

$$E_H(q) = -j\lambda r \exp(jkr) E_f(r, \theta) \quad (17)$$

$$\theta = 1 / \text{Sin}(q\lambda) \quad (18)$$

Distribución de la radiación de campo medido en zona lejana se puede medir fácilmente.

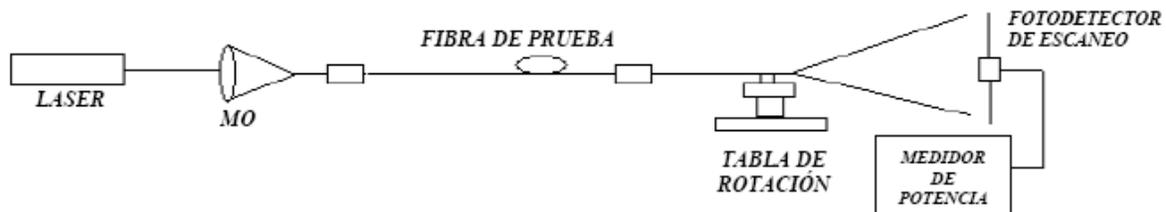


Figura 4. Arreglo experimental para la medida del patrón de intensidad del campo lejano en fibras ópticas.

#### Técnica de compensación transversal.

La "figura 5" muestra la técnica de compensación transversal para la medición de un MFD. En este, se puede medir la variación de la potencia a través de la compensación transversal entre las dos piezas de la fibra de prueba. Ahora, para una desalineación transversal de  $d$  la pérdida de señal dada esta dada por.

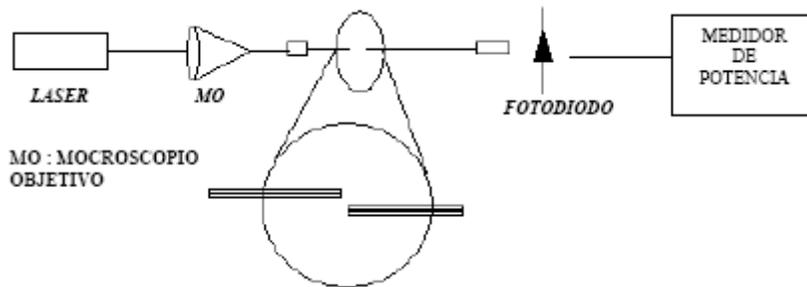
$$\alpha \text{ dB} \approx 4.343 \left( \frac{d}{\omega_p} \right)^2 \quad (19)$$

para  $d \ll \omega_p$ .

En esta técnica se puede observar lo siguiente:

- La separación entre el final de la fibra debe ser menor que  $5\mu\text{m}$ .
- Las condiciones de lanzamiento de sobrellenado debe ser utilizada para reducir la sensibilidad de la posición de las entradas de la fibra.
- Debe ser utilizado un buen separador de modo de revestimiento.

Esta medida puede ser utilizada fácilmente para la variación de la medida del MDF con una longitud de onda, utilizando una fuente de luz blanca.



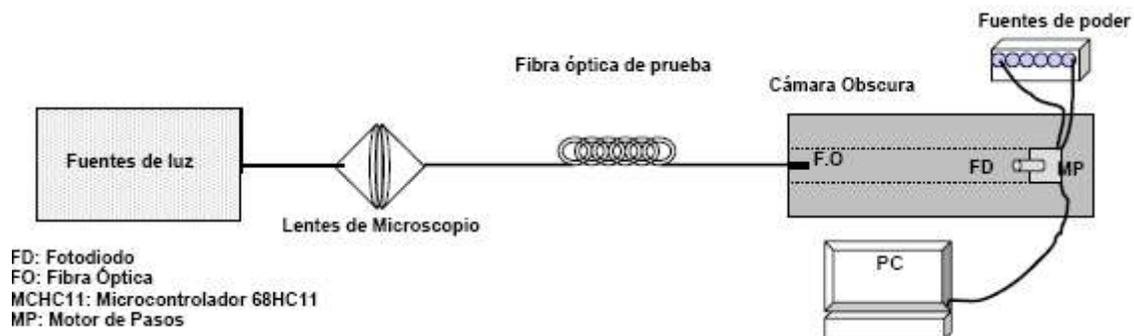
**Figura 5.** Arreglo experimental para la medida del patrón de intensidad gaussiano aplicando la técnica de compensación transversal en fibras ópticas.

#### Técnica de medición del ancho del haz de un láser con cámara de CCD.

Las medidas de perfil basadas en cámaras depende de los sensores del área espacial utilizada en las cámaras, como los son las cámaras de CCD, arreglos de fotodiodos, o sensores de vidicon. El haz es incidente en el área de sensores, donde un completo mapeo de la intensidad de distribución es generada. En sensores como los de la cámara CCD o arreglos de fotodiodos, el haz genera carga individual en cada sensor del arreglo, y el perfil deseado es obtenido como una señal de video analógica o digital. De la misma manera, con un sensor tipo vidicon, el haz cambia la conductividad local en el sensor, el cual es entonces leído utilizando un electrón del haz y es convertido en una señal de video analógica para proporcionar el perfil deseado. Las cámaras de CCD consisten en dos arreglos de píxeles cuadrados o rectangulares bidimensionales. Los perfiles basados en cámaras actúan como una grabación fotográfica. Los rangos de medida de una cámara van desde ~24 dB para algunos sensores estándar de 8 bits, arriba de ~50 dB para cámaras de 16 bits. Este tipo de cámaras puede proporcionar medidas características de la fibra óptica como es el campo cercano y el campo lejano. Sin embargo, existen algunas limitaciones respecto a las medidas del campo lejano debido a las limitaciones del tamaño del sensor y la necesidad de atenuar el haz incidente por mas de 5 ordenes de magnitud. Las cámaras son utilizables para realizar medidas del campo cercano y obtener información acerca de la estructura modal espacial de las fibras y su geometría.

#### IV. Desarrollo experimental.

El arreglo experimental utilizado en está técnica se muestra en la “Figura 8”.



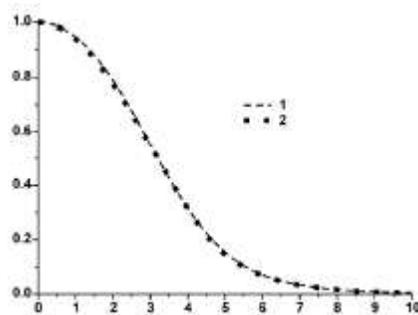
**Figura 8.** Arreglo experimental para la medida del patrón de intensidad del campo lejano en fibras ópticas. Como fuente de luz se utilizaron tres tipos: Láser He-Ne, lámpara de alógeno de tungsteno y un diodo láser. Se utilizaron lentes de microscopio con la finalidad de poder enfocar la luz emitida por cada una de las fuentes en la fibra óptica de prueba. Las fibras ópticas de prueba fueron de varios fabricantes, con la finalidad de poder comparar los resultados obtenidos de cada una de estas. Estas fibras ópticas, previamente fueron preparadas cuidadosamente ya que pueden ocurrir desviaciones en las medidas del campo de modo de

diámetro debido a una superficie no lisa o perfectamente pulida. Los cortes realizados en ambos extremos de la fibra fueron realizados con los instrumentos adecuados para este trabajo, así como, el pulido de la misma. Se utilizó un fotodetector el cual tiene movimientos semicirculares para detectar la luz propagada por la fibra óptica, esto con ayuda de un motor de pasos controlado con una interfaz de microcontrolador 68HC11. Los datos obtenidos a partir de estas mediciones fueron capturados en una PC.

Se utilizó una cámara de CCD para captar las distribuciones modales de cada fibra óptica. Se acercó la cámara de CCD directamente a la salida de la luz de la fibra óptica y capturar la intensidad de luz transmitida. Se realizaron programas en aplicación de MatLab para el procesamiento y manipulación de los datos obtenidos.

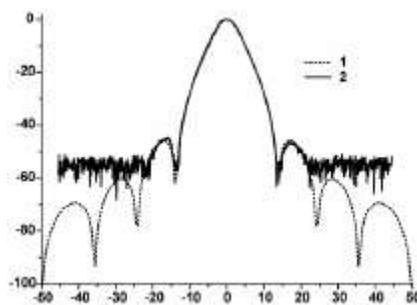
## V. Resultados y Conclusiones

La “Figura 9” es una gráfica obtenida a partir de la técnica presentada en este trabajo. Los datos capturados en diferentes ángulos e intervalos de tiempos son procesados en programas de aplicación (MatLab), la gráfica es el resultado de la distribución de intensidad que existe en la fibra óptica, se marca claramente los datos experimentales y los datos teóricos antes calculados. Se puede observar que el método es eficiente ya que se han comprobado los resultados experimentales con los resultados teóricos.



**Figura 9.** Distribución de la intensidad del modo principal en fibra óptica SMF-28 longitud de onda 1.53  $\mu\text{m}$ . 1 expérimetal, 2 teorico .

La “Figura 10” se muestra la distribución de intensidad obtenida, se comparan los resultados teóricos y experimentales, podemos decir que el método de comporta con un alto grado dinámico, así mismo se observa que después de obtener la intensidad máxima que se encuentra en  $0^\circ$ , existen ciertas distorsiones, las cuales están relacionadas con ruidos externos y por la dispersión de la fibra óptica.



**Figura 10.** Distribución de la intensidad del modo principal en fibra óptica SMF-28 en longitud de onda 1.53  $\mu\text{m}$  en campo lejano(1) y valor teórico experimental(2).

Nombre de Fibra óptica	$\lambda_c$	$\Delta n$
Corning SMF-28	1.25	0.0043
DSF	1.05	0.010
SM179	1.05	0.017

Donde:

$\lambda_c$  – corte de longitud de onda para modo modos altos

$\Delta n$  – diferencia de índice de refracción entre núcleo y revestimiento

Nombre de Fibra óptica	Radio del campo de la moda ( $\lambda=1.32$ )				Radio del campo de la moda ( $\lambda=1.53$ )			
	$1/e^2$	$1/e^2$ (teórico)	$w_d$	$w_m$	$1/e^2$	$1/e^2$ (teórico)	$w_d$	$w_m$
<b>Corning SMF-28</b>	4.73	4.70	4.73	4.79	5.18	5.12	5.42	5.61
<b>DSF</b>	2.82	2.86	3.21	3.45	3.33	3.22	3.90	4.32
<b>SM179</b>	2.21	2.20	2.30	2.37	2.44	2.44	2.70	2.87

**Tabla 1.** Valores de los Radios del campo modal, medidas practicas y teóricas.

Esta técnica es aplicada en diferentes fibras ópticas y también es utilizada para caracterizar la distribución de la radiación en diferentes tipos de lasers y diodos de luz.

## VI. Referencias

- [1] Giovanni Cancellieri; “Single-Mode Optical fiber Measurements: Characterization and Sensing”; Artech House Boston London; Capítulo 3 y 4; 2006.
- [2] Jeffrey L. Guttman; PHOTON, inc., 6860 Santa Teresa Blvd., San Jose, CA 95119 “Mode-Field Diameter and “Spot Size” Measurements of Lensed and Tapered Specialty Fibers”.
- [3] Devices Hale R. Farley; Jeffrey L. Guttman; Razvan Chirita and Carmen D. Pálsan Photon inc. 6860 Santa Teresa Blvd San Jose, CA 95119 “Mode Field Diameter And Effective Area Measurement Of Dispersion Compensation Optical”
- [4] Niels Asger Mortensen and Jacob Riis Folkenberg, Crystal Fibre A/S, Blokken 84, DK-3460 Birkerød, Denmark “Near-field to far-field transition of photonic crystal fibers: symmetries and interference phenomena”.
- [5] Gaussian Beam Propagation, [www.mellesgriot.com](http://www.mellesgriot.com), 30 Enero 2006
- [6] Karpov V.I., Grekov M.V., Dianov E.M., Golant K.M., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Khrapko R.R., “Mode-field converters and long period gratings fabricated by thermodiffusion in nitrogen doped silica core fibers”, OFC'98, paper ThG4, 1998.
- [7] Limberger H.G., Fonjallaz P.-Y., Salathe R.P., Cochet F., “Compaction- and photoelastic-induced index changes in fiber Bragg gratings”, Applied Physics Letters, Vol.68, No.22, pp.3069-3071, 1996.
- [8] Neumann E.-G. Single-mode fibers: Fundamentals, Springer Series in Optical Sciences, Vol.57, 1988.
- [9] Petermann K., “Microbending loss in monomode fibers”, Electronics Letters, Vol.12, pp.107-109, 1976.
- [10] Petermann K., “Constraints for fundamental-mode spot size for broadband dispersion compensated single-mode fibers”, Electronics Letters, Vol.19, pp.712-714, 1983.

## Extractos curriculares

**Alexandre Michtchenko** es Doctor en Ciencias Físico Matemático por la Universidad Técnica del Instituto de Física y Tecnología en Moscú(1981), en 1977 recibió el grado de Maestro en Ciencias en la misma Universidad, actualmente trabaja como Profesor Investigador en la Esime Zacatenco Sección de Estudios de Posgrado(1998), sus áreas de interés son lasers e instrumentación con lasers de fibra óptica.

**Mónica Fuentes Nava** Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional ESIME Zacatenco(2000), se ha desarrollado en la industria en áreas relacionadas en medios de transmisión, actualmente se encuentra cursando la Maestría en Ciencias de Telecomunicaciones en ESIME Zacatenco Sección de Estudios de Posgrado, sus áreas de interés son medios de transmisión, estudio de redes de alta tecnología basadas en fibra óptica.

# Análisis de comunicaciones satelitales

Andrés Calvillo Téllez, Carelia Gaxiola

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del IPN, Av del parque 1310 garita de Otay, Tijuana B. C.  
CP 22510 calvillo@citedi.mx , teléfono 01(664)6231344 red 82837

**Resumen.-** Se presenta el análisis de un enlace satelital con cobertera continental, de San Antonio TX, a Santiago de Chile. Opera en las frecuencias de 6145 MHz de subida y 3920 MHz de bajada el satélite elegido es el SATMEX6 en banda C. Para estimar el enlace se tomo en cuenta la frecuencia de subida, la frecuencia de bajada, rango, potencia en las estaciones terrenas, potencia en el satélite, ganancia y pérdidas en el sistema. Los resultados se presentan en forma tabular y en grafica, simulados en Java.

**Abstract.-** This paper treats a radio link budget satellite with continental coverage, from San Antonio TX to Santiago de Chile. Use up frequencies of 6145MHz and down of 3920 MHz in the Band C of SATMEX 6. The, esteem of coverage can be obtained, applying the maximum power to the transmitter. Using parameters of link quality, such as: radiated power, attenuations before antenna, attenuations for Free Space Loss (FSL) and Reception Signal Level. The results are presented in graphics, simulated in Java.

**Palabras clave:** Estimación Radioenlace Satelital, Propagación en Espacio Libre, Transponder.

**Keywords:** Satellite Radio Link budget, Free Space Propagation, Transponder.

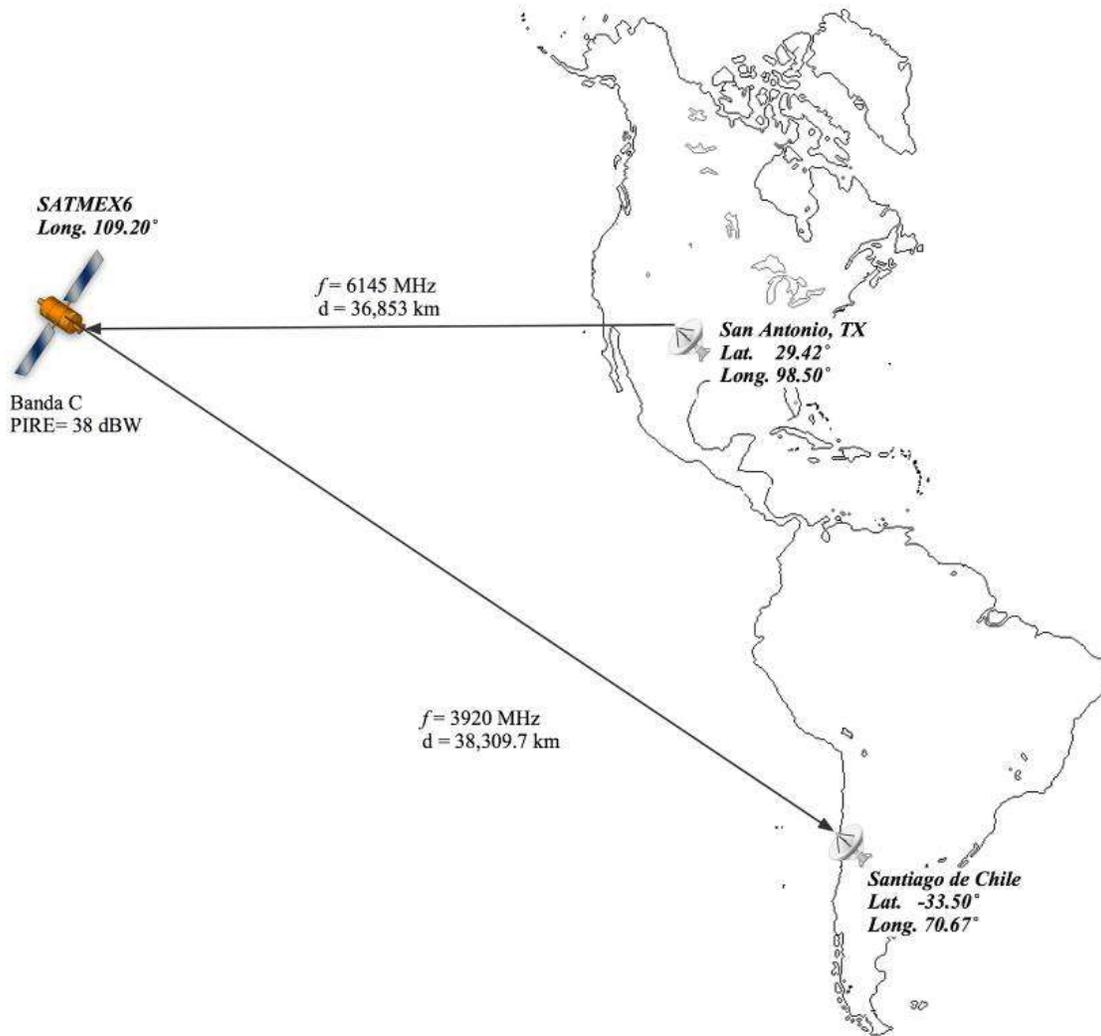
## I. Introducción

Los satélites de comunicaciones son artefactos que orbitan nuestro planeta. Reciben una señal de una estación terrena, la amplifican y la reenvían a la Tierra, con la ventaja de que cubren enormes superficies del globo terráqueo. El sistema satelital consta de dos elementos: La sección tierra, compuesta por un gran número de estaciones terrestres y la sección espacial, compuesta por los satélites. Generalmente se utilizan dos estaciones terrestres por satélite. Una de estas estaciones es el emisor u origen de la señal enviada al satélite y la otra es el receptor de dicha señal, aunque tienen cada una la capacidad de enviar y recibir. La cobertura que irradia cada haz de las antenas del satélite, posee un contorno predefinido que cubre las zonas de mayor demanda del servicio de comunicaciones satelitales [1]. En la Figura 1 se muestra la huella del satélite SATMEX6 para la banda C3. La comunicación con el satélite se realiza mediante acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, time division multiple access). Se utiliza un modulador digital por desplazamiento cuatrfásico (QPSK, Quaternary Phase Shift Keying). Mediante un mezclador de 6 GHz se hace la conversión de la frecuencia intermedia (IF) a una frecuencia de portadora de radiofrecuencia (RF) apropiada. El amplificador de alta potencia (HPA) proporciona el nivel de sensibilidad adecuada y potencia de salida necesaria para propagar la señal hacia el satélite. En el modelo presentado se muestran las pérdidas inherentes del sistema consideradas para el estudio realizado.

Estación terrena para el enlace ascendente

En la Figura 2 se muestra el modelo del sistema de comunicación instalado en la estación terrena para el enlace de subida, donde se representan los componentes principales del sistema.

El transponder del satélite consta de un dispositivo para limitar la banda de entrada (BPF), un amplificador de bajo ruido de entrada (LNA), un amplificador de potencia de bajo nivel y un filtro pasabanda de salida. El BPF de entrada elimina el ruido total aplicado a la entrada del LNA. La salida del LNA alimenta a un convertidor de frecuencia, el cual convierte la frecuencia de subida de banda alta a una frecuencia de bajada de banda baja. El amplificador de potencia de bajo nivel, que es comúnmente utilizado un tubo de onda progresiva, amplifica la señal del RF para su transmisión por medio de la bajada a los receptores de la estación terrena. Cada canal RF requiere un transponder por separado.



**Figura 1.** Enlace satelital y huella del satélite SATMEX6 en banda C3 con una PIRE de 38dBW.

Estación terrena para el enlace descendente

En el modelo descendente el receptor de estación terrena esta constituido por un BPF de entrada, un LNA y un convertidor de RF a IF [2].

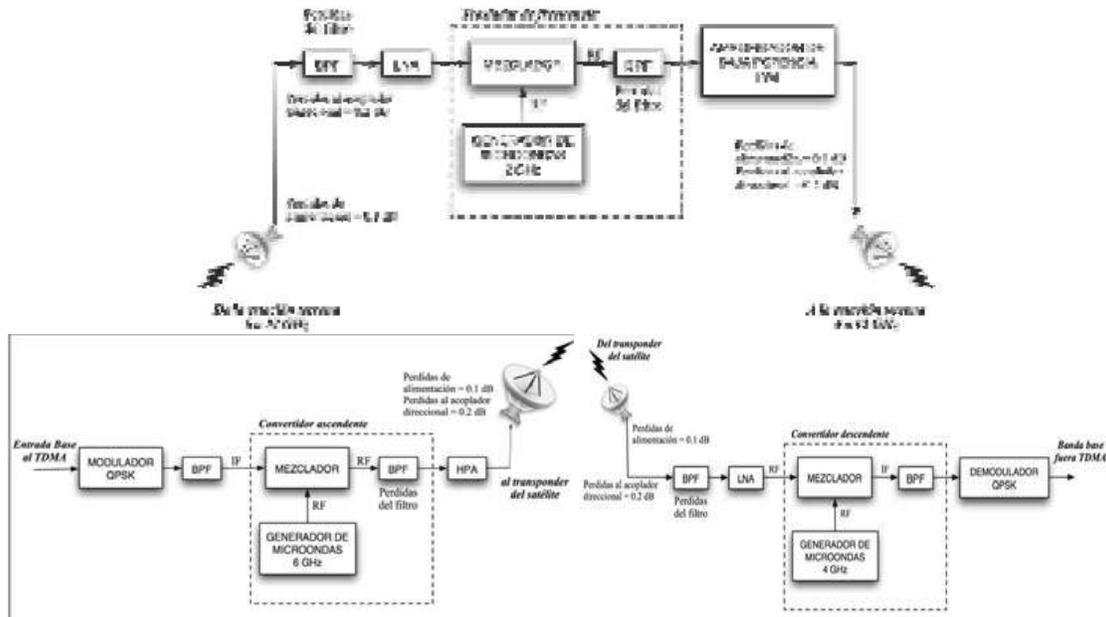


Figura 2. Modelo ascendente al satélite, del transponder del satélite y descendente del satélite.

El ángulo de apuntamiento y los azimut se calculan a partir de la ubicación de las estaciones terrenas y del satélite,

Satelite: Lon 109.2°

San Antonio,TX: Lat 29.42° Lon 98.50°

Santiago de Chile: Lat -33.50° Lon 70.67°

$$Azimuth = \arctan \left[ \frac{\tan L}{\sin LA_{et}} \right] \quad (1)$$

$$L = LO_{et} - LO_{sat} \quad (2)$$

$$Az = 180^\circ + Azimuth \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\cos LA_{et} \cos L - 0.151}{\sqrt{1 - \cos^2 LA_{et} \cos^2 L}} \right] \quad (4)$$

San Antonio, TX

$$L = 98.50^\circ - 109.20^\circ = -10.70^\circ, \quad Azimuth = \arctan \left[ \frac{\tan(-10.70^\circ)}{\sin(29.42^\circ)} \right] = \arctan \left[ \frac{-0.1889}{0.4912} \right] = -21.04^\circ,$$

$$Az = 180^\circ + (-21.04^\circ) = 158.95^\circ, \quad \theta = \arctan \left[ \frac{\cos(29.42^\circ) \cos(-10.70^\circ) - 0.151}{\sqrt{1 - \cos^2(29.42^\circ) \cos^2(-10.70^\circ)}} \right] = 53.73^\circ$$

Santiago de Chile,

$$L = 70.67^\circ - 109.20^\circ = -38.53^\circ$$

$$Azimuth = \arctan \left[ \frac{\tan(-38.53^\circ)}{\sin(-33.50^\circ)} \right] = \arctan \left[ \frac{-0.7963}{-0.5519} \right] = 55.27^\circ,$$

$$Az = 180^\circ + (55.27^\circ) = 235.27^\circ,$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\cos(-33.50^\circ)\cos(-38.53^\circ) - 0.151}{\sqrt{1 - \cos^2(-33.50^\circ)\cos^2(-38.53^\circ)}} \right] = \arctan \left[ \frac{(0.8338)(0.7822) - 0.151}{\sqrt{1 - (0.6953)(0.6119)}} \right] = 33.48^\circ$$

Análisis ascendente al satélite,,  $f=6145 \text{ Mhz}$ ,  $P=2 \text{ KW}$ ,  $D=4.8 \text{ m}$ , la ganancia de la antena Tx Vertex RSI modelo 4.8 KPC/KPX/KPK es  $G_{et}= \text{dBi } 48.1$

Cálculo del EIRP: Se propone como potencia de transmisión 2KW. A partir del cual se realizan todos los cálculos posteriores. Se aplica la siguiente expresión

$$EIRP = 10 \log P + G_{et}$$

$$EIRP = 10 \log(2000) + 48.1 = 81.1 \text{ dBi}, \quad EIRP = 81.1 \text{ dBi}$$

Las pérdidas de propagación en espacio libre para una distancia al satélite de  $d=36,853 \text{ km}$  se obtienen mediante la siguiente expresión,

Las pérdidas de propagación en espacio libre para una distancia al satélite de  $d=36,853 \text{ km}$  se obtienen mediante la siguiente expresión,

$$FSL = 32.44 + 20 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz}$$

$$FSL = 32.44 + 20 \log(36,853) + 20 \log(6,145) = 199.53 \text{ dB}, \quad FSL = 199.53 \text{ dB}$$

Figura de mérito del satélite, de la hoja de especificaciones del satélite es  $G/T = -3 \text{ dB/K}$

$$k = -228.6 \text{ dBJ/}^\circ\text{k} \quad \text{cte. de Boltzman}$$

0.1 dB.

Pérdidas de Propagación: Apuntalamiento 0.5 dB, Polarización 0.5 dB, Absorción atmosférica 0.5 dB, Contorno 0.5 dB, Lluvia 0.5 dB.

Pérdidas en el Satélite: BPF 0.4 dB, Acoplador Direccional 0.2 dB, Alimentador de Antena 0.1 dB,

En total las pérdidas misceláneas que es la suma de las anteriores da:  $L_m = 3.9 \text{ dB}$

El cálculo de  $(C/N)_{ASC}$ . La razón de potencia de portadora a densidad de potencia de ruido se encuentra mediante la siguiente expresión,

$$\left( \frac{C}{N_o} \right)_{ASC} = EIRP + \frac{G}{T} - FSL - L_m - k$$

$$\left( \frac{C}{N_o} \right)_{ASC} = 81.1 - 3 - 199.53 - 3.9 - (-228.6) = 103.27 \text{ dB}$$

Cálculo de la relación señal a ruido  $(C/N)_{ASC}$ . En el sistema de comunicaciones satelital ubicado en la estación terrena de San Antonio TX, se tiene una tasa de transmisión de 512 kbps. Con el parámetro anterior se realiza el cálculo del ancho de banda requerido para un sistema QPSK [3]. El ancho de banda se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$B = \frac{R_b}{2}$$

$$R_b = 512 \text{ Kb [QPSK]}$$

Con este valor se determina la razón señal a ruido de la portadora, como se muestra a continuación,

$$\left[ \frac{C}{N} \right]_{ASC} = \left( \frac{C}{N_o} \right)_{ASC} - (B)_{ASC}$$

$$\left[ \frac{C}{N} \right]_{ASC} = 103.27 - 10 \log 256 \times 10^3 = 49.18 \text{ dB}, \left[ \frac{C}{N} \right]_{ASC} = 49.18 \text{ dB}$$

Relación  $(E_b/N_o)_{ASC}$ . La densidad de potencia de bit a densidad de ruido se obtiene mediante la siguiente expresión,

$$\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{ASC} = \left( \frac{C}{N} \right)_{ASC} - 10 \log \left( \frac{B}{R_b} \right)_{ASC}$$

Por los valores obtenidos en cálculos anteriores sabemos que el ancho de banda es 256 Kb y la tasa de bits es 512 Kb, estos valores se sustituyen en la ecuación

$$\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{ASC} = 49.18 + 3.010 = 52.20 \text{ dB}, \left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{ASC} = 52.20 \text{ dB}$$

Cálculo de la densidad de potencia  $\Phi$ : Según la hoja de datos del satélite tenemos que la densidad de potencia es  $\Phi = -92 \text{ dB} / \text{m}^2$

Análisis de bajada a la estación terrena: Se realiza el cálculo de los parámetros de bajada a la estación terrena. En general se aplican criterios similares a los aplicados en el análisis de subida del satélite.

Pérdidas de propagación: Se aplica la misma expresión del análisis de subida al satélite,  $f=3920 \text{ Mhz}$ ,  $d=38,309.7 \text{ km}$ ,  $\text{dB } 97.195)920,3 \log(20)7.309,38 \log(2044.32) = FSL, \text{ dB } 195.97 \text{ FSL}$

Cálculo del EIRP y ganancia de la antena del satélite: De la hoja de datos del satélite [4] obtenemos,

$$\text{EIRP} = 38 \text{ dBW}, P_{Tsat} = 47 \text{ W} = 16.72 \text{ dBW}$$

Mediante la siguiente expresión obtenemos la ganancia del satélite,

$$G_{Tsat} = \text{EIRP} - P_{Tsat}$$

$$G_{Tsat} = 38 - 16.72 = 21.28 \text{ dB}, G_{Tsat} = 21.28 \text{ dB}$$

Cálculo de la figura de mérito del receptor. Según la hoja de especificación de la antena la figura de mérito es

$$\left( \frac{G}{T} \right)_R = 25.2 \text{ dB/k Banda C a } 35^\circ \text{K}$$

Cálculo de  $(C/N)_{o\_Desc}$ . Se utiliza la misma expresión que el enlace de subida,  $\text{kDBJ} / 6.228^\circ = k$

Pérdidas ET: BPF 0.4 dB, Acoplador Direccional 0.2 dB, Alimentador Antena 0.1 dB,

Pérdidas de Propagación: Apuntalamiento 0.5 dB, Polarización 0.5 dB, Absorción atmosférica 0.5 dB, Contorno 0.5 dB, Lluvia 0.5 dB.

Pérdidas en el Satélite: BPF 0.4 dB, Acoplador Direccional 0.2 dB, Alimentador Antena 0.1 dB

$L_m=3.9$  dB

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{DESC} = EIRP + \left(\frac{G}{T}\right)_R - FSL - L_m - k$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{DESC} = 38 + 25.2 - 195.97 - 3.9 - (-228.6) = 91.93 \text{ dB}, \quad \left(\frac{C}{N_o}\right)_{DESC} = 91.93 \text{ dB}$$

Cálculo de  $(C/N)_{DESC}$ . Se utiliza la misma expresión que en el enlace de subida,

$$\left[\frac{C}{N}\right]_{DESC} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{DESC} - (B)_{DESC}$$

$$\left[\frac{C}{N}\right]_{ASC} = 91.93 - 10 \log 256 \times 10^3 = 37.84 \text{ dB} \quad \left[\frac{C}{N}\right]_{DESC} = 37.84 \text{ dB}$$

Relación  $(E_b/N_o)_{DESC}$ . Se utiliza la misma expresión que en el enlace de subida,

$$\left[\frac{E_b}{N_o}\right]_{DESC} = \left[\frac{C}{N}\right]_{DESC} - \left(\frac{B}{R_b}\right)_{DESC}$$

$$\left[\frac{E_b}{N_o}\right]_{DESC} = 37.84 + 3.010 = 40.85 \text{ dB}, \quad \left[\frac{E_b}{N_o}\right]_{DESC} = 40.85 \text{ dB}$$

Densidad de potencia  $\Phi$  hacia la estación terrena: Mediante la siguiente expresión se obtiene la densidad de potencia hacia la estación terrena, donde  $r$  es el rango,

$$\Phi = 10 \log G_{Tsat} - 10 \log P_{Tsat} - 10 \log(4\pi r^2)$$

$$\Phi = 21.28 - 16.72 - 10 \log(4\pi(38,309.70)^2) = -98.09 \text{ dBW/m}^2, \quad \Phi = -98.09 \text{ dBW/m}^2$$

Cálculo de la eficiencia del sistema,  $(C/N)_{o\text{ sis}}$  y  $(E_b/N_o)_{o\text{ sis}}$ : Mediante los cálculos anteriores de la relación de la señal portadora a ruido para las etapas ascendente al satélite y descendente a la ET es posible evaluar el sistema de comunicaciones satelital mediante la siguiente expresión,

$$\left[\frac{C}{N_o}\right]_{SIS} = \frac{1}{\frac{1}{\left[\frac{C}{N_o}\right]_{ASC}} + \frac{1}{\left[\frac{C}{N_o}\right]_{DESC}}}$$

$$\left[ \frac{C}{N_o} \right]_{ASC} = 103.27 \text{ dB} = 2.123244462 \times 10^{10}, \quad \left[ \frac{C}{N_o} \right]_{DESC} = 91.93 \text{ dB} = 1,559,552,503$$

$$\left[ \frac{C}{N_o} \right]_{SIS} = 1,452,839,432 = 91.62 \text{ dB}, \quad \left[ \frac{C}{N_o} \right]_{SIS} = 91.62 \text{ dB}$$

Mediante los cálculos anteriores de la relación de la densidad de energía por bit a ruido para las etapas ascendente al satélite y descendente a la ET es posible evaluar el sistema de comunicaciones satelital mediante la siguiente expresión,

$$\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{SIS} = \frac{1}{\frac{1}{\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{ASC}} + \frac{1}{\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{DESC}}}$$

$$\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{ASC} = 52.19 \text{ dB} = 1.548816619 \times 10^{52}, \quad \left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{DESC} = 40.85 \text{ dB} = 7.079457844 \times 10^{40}$$

$$\left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{SIS} = 7.079457844 \times 10^{40} = 40.85 \text{ dB}, \quad \left[ \frac{E_b}{N_o} \right]_{SIS} = 40.85 \text{ dB}$$

### III. Resultados

Especificaciones técnicas del sistema satelital San Antonio, TX – Santiago de Chile

#### LOCALIZACION DE LA ESTACION TERRENA

Lugar	
Rango	36,853 Km
Angulo de elevación	53.73 Grados
Azimut	158.95 Grados
Latitud E.T	29°25'12'' Norte
Long. E.T	98°30'0'' Oeste
Lugar	
Rango	38,309.7 Km
Angulo de elevación	24.37 Grados
Azimut	235.27 Grados
Latitud E.T	-33°30'00'' Norte
Long. E.T	70°40'12'' Oeste
Long. Satellite	109.2° Oeste
FRECUENCIA	
Bajada a la ET	3920 MHz
Transmisión al satélite	6145 MHz
DIAMETRO DEL PLATO DE LA ESTACION TERRENA	4.8 M
NOMBRE DEL SATELITE	
POTENCIA DEL TRANSMISOR	2000 W
GANANCIA DE LA ANTENA (dBi)	
ESTACION TERRENA	48.1
SATELITE	21.28 dBi

EIRP Ascendente al Satélite	81.1	<i>dB</i>
Descendente a la estación terrena	38	
FSL Ascendente al satélite	-199.53	<i>dB</i>
Descendente a la estación terrena	-195.97	
Pérdidas misceláneas en la ET		
Pérdidas en el BPF	- 0.4	<i>dB</i>
Pérdidas en el acoplador direccional	- 0.2	<i>dB</i>
Pérdidas de alimentación de la antena	- 0.1	<i>dB</i>
Pérdidas en la Propagación		
Pérdidas de apuntalamiento	-0.5	<i>dB</i>
Pérdidas de polarización	-0.5	<i>dB</i>
Pérdidas por absorción atmosférica	-0.5	<i>dB</i>
Pérdidas por contorno	-0.5	<i>dB</i>
Pérdidas por lluvia	- 0.5	<i>dB</i>
Pérdidas en el satélite		
Pérdidas en el BPF	- 0.4	<i>dB</i>
Pérdidas en el acoplador direccional	- 0.2	<i>dB</i>
Pérdidas de alimentación de la antena	- 0.1	<i>dB</i>
<b>Pérdidas misceláneas totales</b>	-3.9	<i>dB</i>
FIGURA DE MERITO DEL SATELITE	-3	<i>dB/°K</i>
FIGURA DE MERITO DEL RECEPTOR	25.2	<i>dB/°K</i>
C/N <sub>o</sub> Ascendente	103.27	<i>dBHz</i>
Descendente	91.93	
C/N Ascendente	49.18	<i>dB</i>
Descendente	37.84	
E <sub>b</sub> /N <sub>o</sub> Ascendente	46.17	<i>dB</i>
Descendente	34.83	
Φ Ascendente		
Descendente		

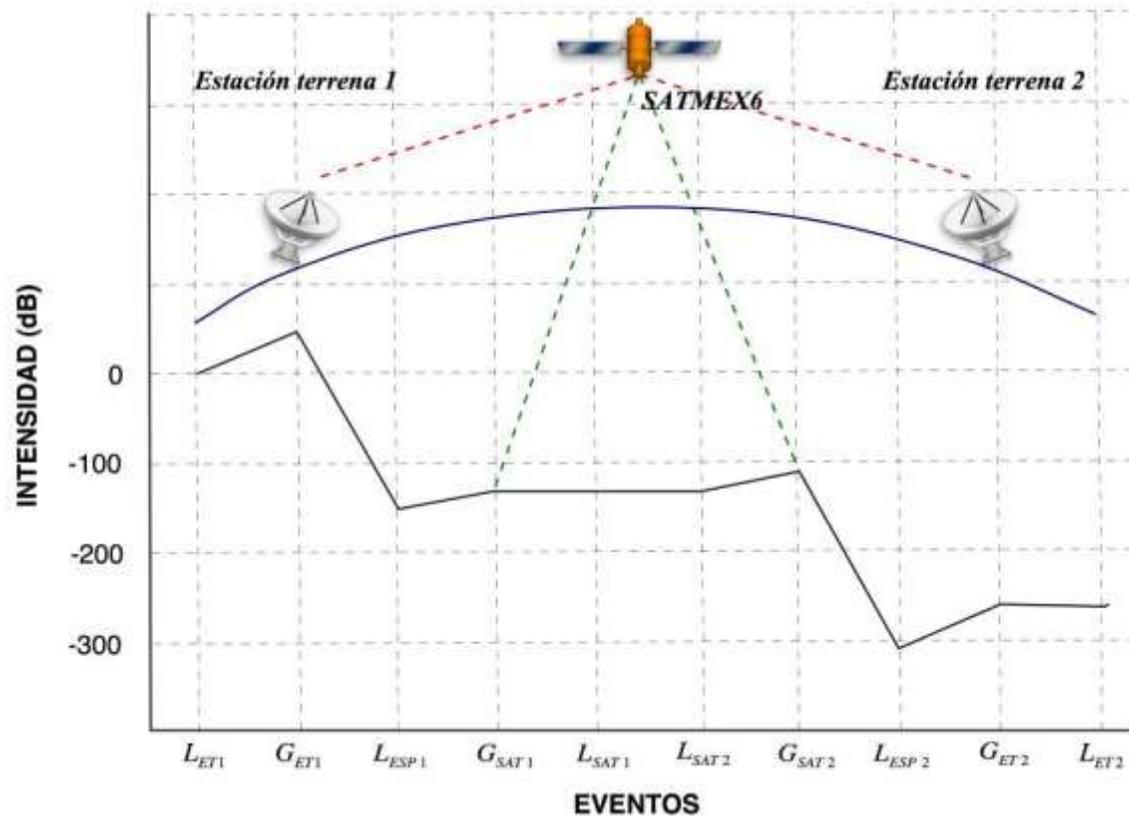


Figura 9. Representación de las pérdidas del radioenlace satelital.

#### IV. Conclusión

Del análisis de comunicaciones satelitales se desprende la viabilidad del enlace, pese a las condiciones meteorológicas adversas que pueden afectar la señal durante su recorrido entre la estación terrena y el satélite. Por eso se contemplan un margen suficiente y necesario para asumir la atenuación y degradación de la señal durante todo el trayecto sumando las pérdidas misceláneas. Una parte importante que se trata son los ángulos de apuntamiento que localizan al satélite, de los cuales depende la mejor cobertura tierra – satélite, debido a que la antena a esa distancia solo tiene una apertura máxima de  $2^\circ$  y un ligero desvío en tierra corresponde a kilómetros en el espacio.

El análisis inicia con un valor promedio de la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva de la estación terrena transmisora, eligiendo la ganancia de la antena y determinando la potencia del transmisor. Así mismo la estación terrena receptora se caracteriza por una figura de mérito ( $G/T$ ) y la temperatura de ruido del sistema y los componentes de acople de esos elementos. Se incluye la suma de pequeñas pérdidas, tales como la atenuación en el cable, entre el LNA y la antena puede resultar en degradación significativa de la figura de mérito  $G/T$ . Las condiciones climáticas, tanto lluvia, niebla, nieve, absorción atmosférica y las pérdidas por el espacio libre son un elemento clave en la degradación y desvanecimiento de la señal y de la cual depende en gran medida el éxito o el fracaso de un enlace satelital que genera las mayores pérdidas, ocasionadas por el largo trayecto de la señal propagada desde un satélite, por ello hay que considerar el caso más extremo. Por ello para tomar en cuenta éste deterioro de la señal satelital es necesario tomar en cuenta la relación Portadora a ruido del sistema ( $C/N$ )<sub>SIS</sub> que se genera al hacer los cálculos con los parámetros del enlace, que se resume en una operación compleja de la relación portadora a ruido del ascendente ( $C/N$ )<sub>ASC</sub> y descendente ( $C/N$ )<sub>DESC</sub>.

Este análisis puede emplearse en comunicaciones satelitales además del SATMEX 6 solo se tiene que considerar la posición y huella del satélite del cual se desprende el tipo de cobertura que utilizará, si el enlace es en Norteamérica conviene la cobertura C1, en Centroamérica la C2 y si es Continental la C3.

Para éste caso se selecciono el satélite SATMEX 6 en banda C3 dado su cobertura, la cual permite el enlace sin necesidad de realizar triangulaciones adicionales. Esta cobertura opera en banda C, con un PIRE de 38dB

en los límites de la huella, suficiente para garantizar el nivel de señal en todos los puntos de la cobertura. Se utilizan frecuencias diferentes para el enlace de subida y bajada para diferenciar entre las dos señales y que estas no se interfieran destructivamente.

La degradación de la señal del radioenlace satelital es directamente proporcional a la distancia entre el satélite y la estación terrena, además de factores que propician atenuación de la señal, por una parte se encuentran aquellos que dependen directamente de los equipos de transmisión y recepción, los cuales podemos modificar para alcanzar un nivel eficiente de funcionamiento, y en segundo término se tienen aquellos que son inherentes del medio de transmisión, para éstos se establecen condiciones promedio para el análisis. El programa implementado en Java permite simular el radioenlace. Se selecciono este lenguaje para la implementación del programa debido a la portabilidad del mismo.

### Referencias

- [1] Jerry, Gibson, (1996). The Communications Handbook, CRC Press / IEEE Press,
- [2] Satelites, <http://fuente.8m.com/Satelites.htm>, 08 de Mayo de 2006
- [3] Calvillo, Andrés, enlace satelital CITEDI – Solidaridad 1 – IPN.  
[www.depi.itchihuahua.edu.mx/electro/electro2000/mem2000/articulos/CO2.pdf](http://www.depi.itchihuahua.edu.mx/electro/electro2000/mem2000/articulos/CO2.pdf), 08 de Mayo de 2006
- [4] [www.tripointglobal.com](http://www.tripointglobal.com), 08 de Mayo de 2006
- [5] Satelites Mexicanos, [www.satmex.com](http://www.satmex.com), 08 de Mayo de 2006
- [6] Report on the Research & Development of a Latin American Satellite Strategy. Institute for Connectivity in the America, April 2003
- [7] Wayne Tomasi, 1996. “Sistemas de comunicaciones electrónicas”, Prentice Hall, México.

### Extractos curriculares

**Andrés Calvillo Téllez** es Ingeniero en Electrónica y comunicaciones por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, México D. F. (1989), obtuvo su Maestría en Sistema Digitales por el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (1993). Actualmente es profesor Asistente en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, México y sus áreas de interés son: Sistemas Digitales, Instrumentación virtual, Automatización, Comunicaciones Inalámbricas, Satélites Experimentales.

**Carelia Gaxiola** es Ingeniero en sistemas computacionales por la Universidad Autónoma de Baja California Campus Tijuana, México (2004), obtuvo su Maestría en Sistema Digitales por el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (2006). Actualmente es profesora en la Universidad Autónoma de Baja California Campus Tijuana, México y sus áreas de interés son: Sistemas Digitales, Sistemas Computacionales Comunicaciones Inalámbricas.

Artículo aceptado por refereo

G22

# Respuesta del ojo humano para el Reconocimiento de Estados Emocionales

<sup>1</sup>Rodolfo Romero Herrera, <sup>2</sup>Francisco Gallegos Funes

Escuela Superior de Computo, IPN, [romeroh@ipn.mx](mailto:romeroh@ipn.mx), Tel. 57296000 ext. 52011. Fax: 52003

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN

**Resumen.-** Empleando un análisis morfológico, se desarrollo una interfaz grafica que permite cuantificar el tamaño de la pupila, partiendo del hecho de que esta es la parte más oscura del ojo. Este software funciona correctamente con imágenes tomadas con una cámara de visión nocturna que nos permite eliminar el ruido generado por el reflejo de fuentes de iluminación puntuales, que dificulta la localización y aislamiento de la pupila. Se elimina posibles huecos en la pupila empleando tanto la apertura como el cierre. Esto permite obtener un algoritmo que implementado en software, generara a futuro un sistema capaz de detectar estados emocionales de una persona en particular. Dicho sistema se adapta junto con lentes al ojo humano lo cual permite detectar el estado emocional. A partir de la observación de los cambios se consigue determinar el área en común que comparten los diferentes estados de ánimo y de esta forma ponderar la Ecuación de la intensidad emotiva.

**Palabras clave:** Iris, morfología, apertura, cierre, etiquetado, intensidad emotiva.

**Abstract.-** Using a morphologic analysis, development a graphic interface that allows to quantify the size of the pupil, being divided itself of the fact that this is the darkest part of the eye. This software Works correctly with images taken with a camera of night vision that allows us to eliminate the noise generated by the reflection of precise sources of illumination that makes difficult to the location and isolation of the pupil. So much are eliminated possible hollows in the pupil using the opening as the closing. This allows to obtain an algorithm that implemented in software, generated to future a system able to detect emotional states of a person in individual. This system adapts lenses to the human eye along with which allows to detect the emotional state. From the observation of the changes one is able to determine the area in common that they share the different states from I animate and of this form to weigh the Equation of the emotion intensity.

**Keywords:** Iris, morphology, opening, closes, labeled, emotions intensity.

## I. Introducción

El proceso de análisis de iris se ha abordado desde distintos enfoques y posee diferentes soluciones. La pupila, que permite la entrada de luz al interior del ojo, es un orificio que en las imágenes se ve de color negro. El iris es un diafragma que regula la cantidad de luz que llega a la retina. La variación del diámetro o área de la pupila no depende de la intensidad de luz únicamente, también de su naturaleza; es decir la longitud de onda del haz de Luz [1]. Otro factor que puede variar y aumentar la dilatación de la pupila son las emociones, que da pie a desarrollar un sistema que permita diferenciar cuando el diámetro de la pupila cambia. Determinadas las variaciones es posible implementarlas en sistemas computacionales que reaccionen en función de estado emotivo detectado en la pupila de una manera más eficiente, ya dichos cambios son difíciles de controlar por parte del ser humano en su propio cuerpo, lo cual no sucede con sistemas que mediante biometría de la cara determinan una expresión facial [2].

## II. Metodología

Para que el sistema permita la detección de la dilatación se siguieron estos pasos:

1. Captura de la imagen.
2. Escala de grises
3. Binarización y etiquetado.
4. Apertura.
5. Distancia
6. Pupila rellena.
7. Mediación del diámetro.

La erosión es la degradación progresiva de uno de los campos, sea 0 o 1. Un elemento del campo a degradar seguirá perteneciendo al mismo si esta rodeado de elementos iguales a él, de acuerdo a lo que indique el elemento estructurante, en caso contrario dejara de pertenecer a ese conjunto [3].

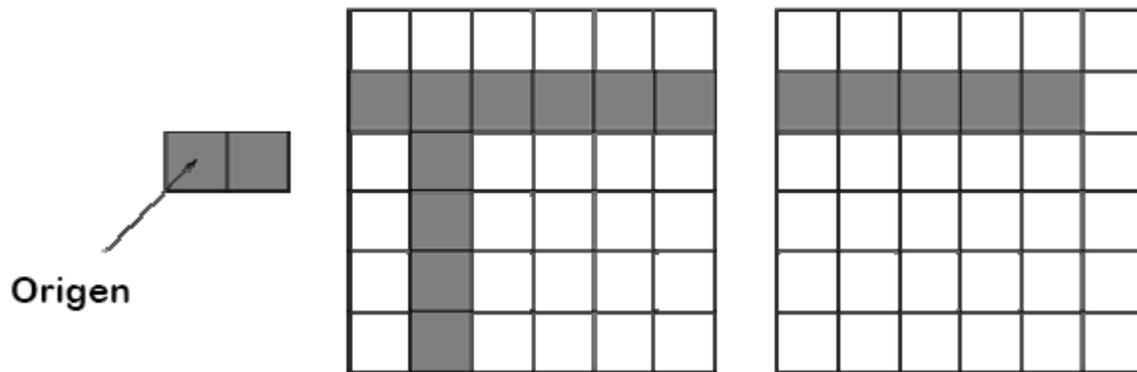


Fig. 1. Erosión Morfológica.

La dilatación, por el contrario, es el crecimiento progresivo de uno de los campos (0 o 1). Un elemento contrario al campo a crecer será convertido si posee algún vecino perteneciente al campo que se expandiona [4].

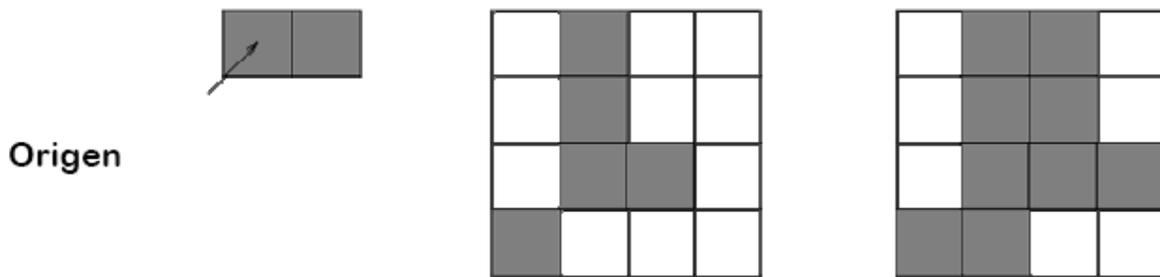


Fig. 2. Dilatación Morfológica.

### Localización de la pupila.

Se tomaron imágenes con infrarrojo lo que elimino el brillo puntual. Con el objetivo de eliminar la iluminación y brillo intenso, se utiliza el formato de color HSB, principalmente al identificar los píxeles más iluminados donde su componente de brillo es mayor a 0.5, ya que va de 0 a 1. Ubicados estos puntos, se crea un nuevo píxel con el mismo valor H y S, pero menor en B. Cuando se aíslan los elementos más oscuros de la imagen, también se encuentran las pestañas y zonas ajenas a la pupila. Sin embargo estas otras áreas son irregulares, mientras que la pupila es redonda, por lo que se hace un análisis de distancias de cada píxel al fondo de la imagen y un etiquetado[4]. Todas las operaciones para aislar el iris se realizan en una imagen binaria correspondiente a la imagen completa, donde se tiene un 1 si ese punto se considera posible pupila y 0 si no es así.

Los píxeles con mayor distancia al fondo de la imagen se consideran parte de la pupila. Se emplea la operación de morfología matemática de apertura; la cual consiste de una erosión seguida de una dilatación. La apertura de una imagen X por un elemento estructural B se denota por  $X \circ B$  y se define como:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B \quad (1)$$

Una vez detectada la pupila, por el algoritmo de mayor distancia, se utilizan un algoritmo para rellenar la pupila.

Aislando la pupila, se rellenan orificios indeseables [5]. Si los píxeles a evaluar tienen valor 1 o forman parte de la pupila, y el píxel central no, entonces pasa a ser parte de la pupila, asignándosele un 1. Este proceso elimina pequeños huecos provocados por ruido.

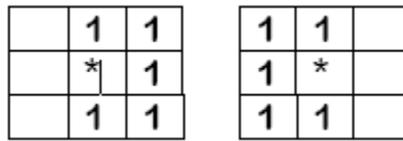


Fig. 3. Elementos Estructurantes.

El tamaño de un objeto vendrá dado por sus píxeles:

Y el diámetro de un círculo es:

$$D=2(\text{area}/(4\pi))^{1/2} \text{ Ec. 3}$$

### III Resultados

Se realizaron varias pruebas en distintas personas. Obteniéndose los siguientes resultados: Al binarizar una imagen se pueden observar las imágenes mostradas en la Figura 5.

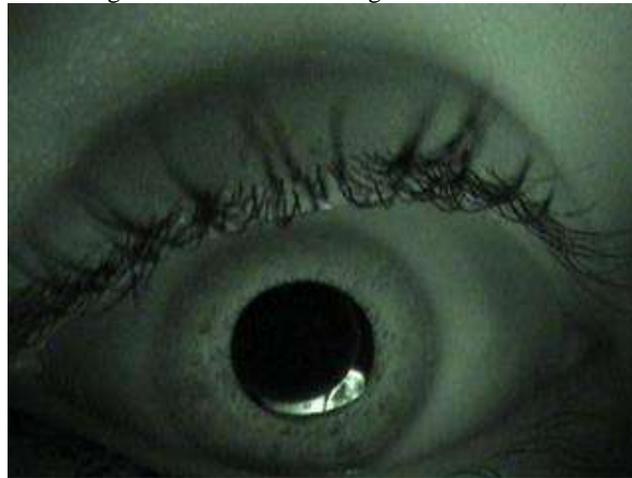
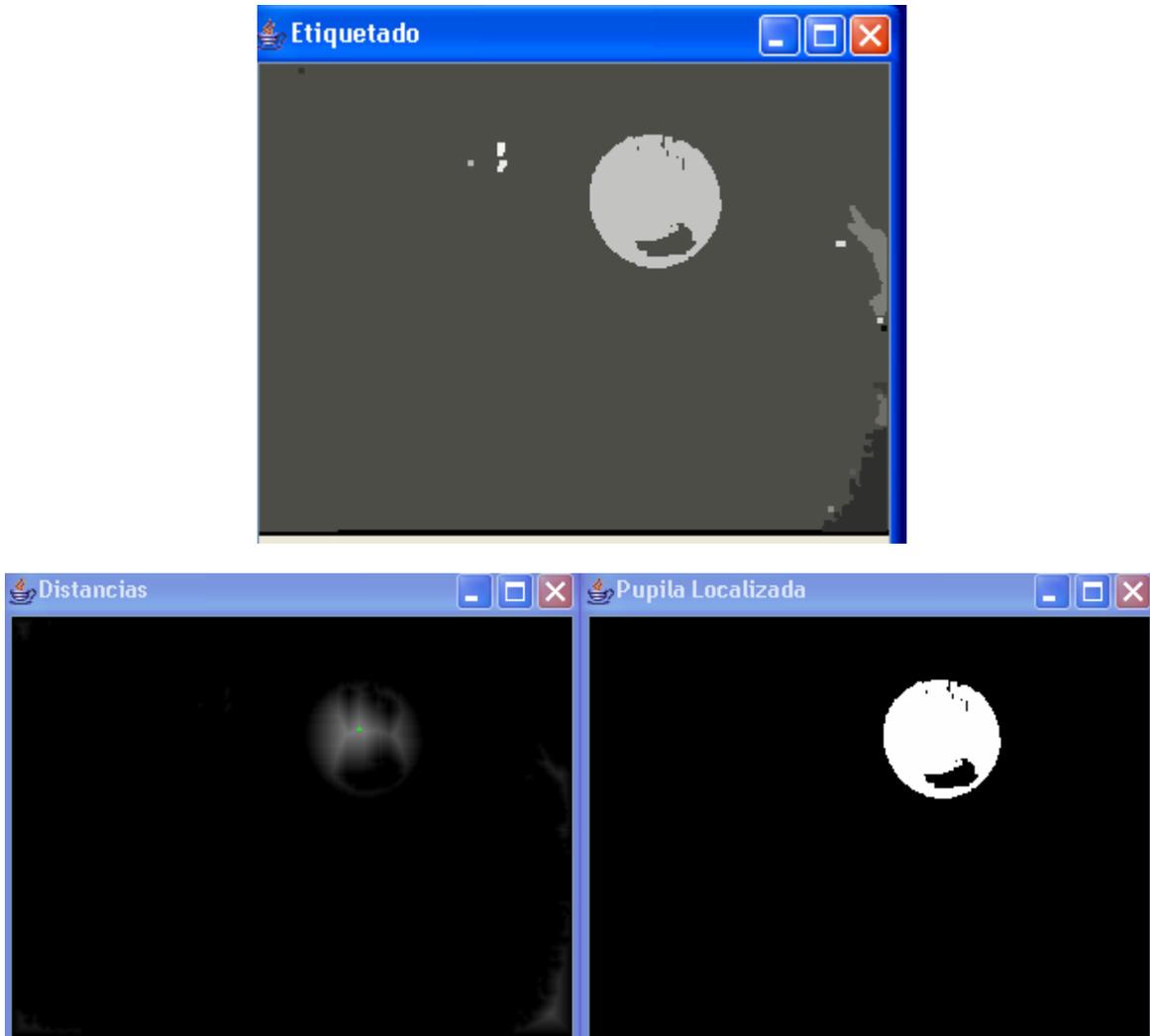


Fig. 4. Imagen de entrada



Fig. 5. Imagen binarizada

Aplicando la morfología matemática se pueden observar las imágenes de la figura 6. Esto permite tanto localizar el iris como eliminar el ruido.



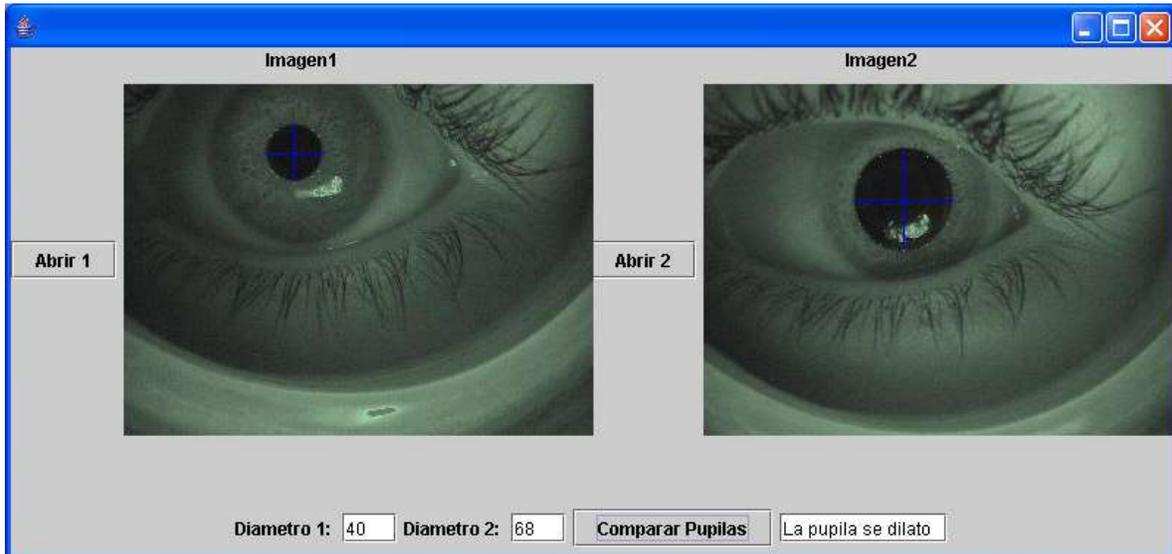
**Fig. 6.** Aplicando operaciones Morfológicas.

Una vez hecho esto se puede rellenar la pupila y con esto aplicar las ecuaciones 2 y 3.



**Fig. 6.** Aplicando operaciones Morfológicas.

La interfaz permite comparar el tamaño de dos imágenes que se carguen desde archivo. El siguiente ejemplo muestra una dilatación provocada al entrar en un lugar poco iluminado. Ver Figura 8.



**Fig 8.** Cuantificación de la dilatación de una pupila.

Mediante técnicas de coordenadas polares y con imágenes de mayor resolución [6] es posible aislar ciertas regiones del ojo humano con la finalidad de detectar como afectan las emociones, no solo a la respuesta pupilar, sino también a la textura del iris; como puede observarse en las figuras 9 y 10.



**Fig. 9** Análisis de la textura del ojo humano.



Fig. 10. Segmento para análisis.

Una vez obtenido el análisis es factible implementar la intensidad de las emociones en la ecuación 4 [7]. Donde “ $I_e$ ” es la combinación de todas las emociones positivas, tales como felicidad, placer, etc. Podemos observar aun sin determinar la ecuación que gobierna los cambios, como la pupila y el iris modifican en un caso su diámetro y en el otro su textura.

$$I_p = \log_2 ( \_ 2 I_e ) \quad \text{Ec. 4}$$

Se observo que muchos cambios el la textura del iris se acentuaban cuando la persona sujeta a análisis tenia una enfermedad. Por lo que es difícil realizar dicho análisis con enfermos sobre todo terminales.

#### IV. Conclusiones y Trabajo a futuro de investigadores

Para poder estudiar de manera exacta el comportamiento de un órgano de múltiple función como lo es la pupila, se debe comprender su diseño y función, así como otros fenómenos físicos relacionados con él. Para examinar el efecto de las emociones en la pupila, debe contarse con condiciones controladas que permitan aislar la dilatación y contracción por factores ajenos como lo son el efecto de la iluminación o medicamentos.

Aplicando morfología matemática se puede eliminar el ruido provocado por diversos factores. La localización de la pupila depende del etiquetado y sobre todo de la distancia a fondo; es decir la diferencia entre el fondo y el color de la pupila.

Obtener el grado de dilatación de la pupila permitirá realizar varios estudios, por ejemplo medir como afectan distintos estados emocionales a la dilatación.

Uno de los objetivos al estudiar el efecto de las emociones en la pupila es el desarrollo del cómputo emotivo. Para poder identificar las emociones de una persona, el estudio debe ser particular, no se puede generalizar las manifestaciones de emociones ya que cada individuo las expresa de manera diferente.

Para emplear el tamaño de la pupila como medio de interacción entre la computadora y el usuario es necesario también estudiar el efecto de la iluminación del monitor en el ojo. Este estudio es de principal importancia si se busca que la persona se encuentre frente a una PC que interprete sus emociones.

#### Referencias

- [1] Moritz Stöering “Computer Vision and Human Skin Color” Tesis Doctoral, Universidad Aalborg, Dinamarca, Junio 2004. <http://www.cvmt.dk/~mst/Publications/phd/8790562240.pdf>
- [2] Shaogang Gong, Stephen J. McKenna, Alexandra Psarrou, DYNAMIC VISION From Images to Face Recognition , Imperial College Press, 2000.
- [3] Efford, Nick (2000), “Segmentation” en: Digital Image Procesing a practical introduction using JavaTM Pearson Education, Addison-Wesley.
- [4] Gonzalo Pajares Matinsanz, Jesús Manuel de la Cruz García, José Manuel Molina Pascual, Juan Cuadrado Pardo, Alejandro López Correa , “Extracción de Regiones” en: IMAGENES DIGITALES: Procesamiento Práctico con Java , RAMA.
- [5] ARANA,G.,CALDERÓN,M. Y LARRE,N. Caracterización del patrón de iris para verificación de identidad. Bogotá D.C, 2001 Tesis de Grado.
- [6] Lira Chavez, Jorge, “Realces Selectivos” y “Reconocimiento de Patrones” en: Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes, IPN, UNAM, FCE, 2002.

[8] Rosalind W. Picard., "Affective Computing", The MIT Press, 2000.

**Extractos curriculares**

**Rodolfo Romero Herrera** es Maestro en Ciencias en Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica. Es profesor Investigador del IPN. Ha publicado 1 Libro, Artículos en congresos nacionales e internacionales, así como en revistas. Director varias tesis a nivel Licenciatura. Actualmente trabaja en sistemas de visión por computadora, así como afectivos.

**Francisco J. Gallegos-Funes**, es Doctor en Ciencias en Comunicaciones y Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional de México. Es profesor investigador de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de México. Su principal actividad de investigación esta en el área de procesamiento de imágenes y video, detección, filtrado; Percepción remota y sistemas en tiempo real.

## Instrucciones para los autores

Los artículos que se someten a **RISCE** deben contener resultados inéditos y originales, no haber sido publicados con anterioridad ni haber sido sometidos simultáneamente a otra revista científica. Si el artículo ha sido presentado, sometido o publicado en alguna otra parte, deberá informarse al coordinador editorial. Los artículos deben ajustarse a las siguientes especificaciones:

- Idioma Inglés (anexar un resumen y palabras clave en español)
- Idioma Español (anexar un resumen y palabras clave en Inglés)
- Procesador de texto admitido: MS-Word.
- Tamaño de página: carta, utilizar un solo lado de la hoja. Máximo 10 páginas.
- Márgenes: izquierdo 2.5 cm y derecho 2 cm., superior 2.5 cm e inferior 2.5 cm.
- Autores: primer nombre seguido de los dos apellidos (sin abreviaturas), abajo: afiliación y e-mail.
- Tipo de letra del texto regular: Times o Times New Roman de 10 pt (título original 22 pt; secciones 11.5 pt, subsecciones 11.5 pt, en negritas).
- Texto: a una columna y con espaciado sencillo (renglón seguido).
- Resumen/Abstract: entre 70 y 150 palabras, colocado al principio del texto, seguido del de español o inglés según sea el caso.
- Palabras clave/Keywords: colocadas después del resumen en negritas, y no más de 10.
- Imágenes y fotografías: deben ser de alta calidad, con colores bien definidos y contrastantes, en mapa de bits (no sectorizadas) en formato JPG e incrustadas en el texto de forma que se puedan manipular independientemente.
- Fórmulas: Deberán de presentarse en formato de tabla sin bordes, centradas y la numeración de c/u justificada a la derecha con negritas en mapa de bits, no vectorizadas.
- Pies de figura. Deben mencionarse dentro del texto y numerarse de manera consecutiva con un tipo de letra Times New Roman 9 puntos
- Cabecera de tabla. Debera presentarse en la parte superior de la tabla un numeración consecutiva y descripción con tipo de letra Times New Roman 9
- Referencias:

En cualquier caso el nombre del autor del artículo o publicación web deberá mostrarse al principio. Deberán ordenarse conforme aparezcan dentro del texto encerradas entre paréntesis cuadrado “[ ]”. A continuación algunos ejemplos:

- [1]. Baldonado, M., Chang, C.-C.K., Gravano, L., Paepcke, A.: The Stanford Digital Library Metadata Architecture. *Int. J. Digit. Libr.* 1 (1997) 108–121
- [2+]. Bruce, K.B., Cardelli, L., Pierce, B.C.: Comparing Object Encodings. In: Abadi, M., Ito, T. (eds.): *Theoretical Aspects of Computer Software. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1281. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1997) 415–438
- [3]. van Leeuwen, J. (ed.): *Computer Science Today. Recent Trends and Developments. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1000. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1995)
- [4]. Michalewicz, Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. 3rd edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1996)

### Instrucciones para el envío

Envíe el archivo en extenso a la siguiente dirección electrónica:

romrodolfo@gmail.com

Los revisores técnicos le harán llegar sus observaciones y modificaciones, las cuales deberá realizar y reenviar el archivo corregido al correo romrodolfo@gmail.com.

El comité editorial se comunicará mediante correo electrónico indicándole la aceptación o rechazo del artículo

Se le solicitará autorización para publicación; en caso de aceptar se le indica la cuenta donde debe hacer el depósito por cobro de publicación y el costo el cual no debe exceder de \$1000.00 pesos mexicanos.