



## **Desarrollo de un sistema de navegación para robots móviles mediante diferentes patrones de comportamientos**

UGVC Ubaldo Geovanni Villaseñor Carrillo, MAGA Marco Antônio González Aguirre, ASO Artemio Sotomayor Olmedo, Member, IEEE, EGH Efrén Gorrostieta Hurtado, Senior Member, IEEE, JCPO Jesús Carlos Pedraza Ortega, JEVS José Emilio Vargas Soto, Member, IEEE, STA Saúl Tovar Arriaga.

**Resumen:** El continuo desarrollo de Robots Móviles para propósitos científicos y de aplicaciones diversas, implica el desarrollo de algoritmos y técnicas de control eficientes. Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo e implementación de un Sistema de Navegación mediante diferentes Tipos de Comportamientos utilizando Lógica Difusa. Dichos comportamientos se utilizarán para controlar el avance del robot, y así cumplir su objetivo principal, que es el eficiente desplazamiento en el entorno que se encuentre. Dentro de este espacio en que se mueve dicho robot, existen varios obstáculos que le impiden desplazarse. La Lógica Difusa le permite al robot tomar una decisión en presencia de dichos obstáculos por medio de los diferentes tipos de comportamientos.

Palabras Clave: Inteligencia Artificial, Lógica Difusa, Robot Móvil, Sistema de Navegación, Tipos de Comportamientos.

**Abstract:** The continuous development of Mobile Robots for scientific purposes and different applications require control algorithms and efficient techniques to test their performance. This work aims at the development and implementation of a Navigation System using different Types of Behaviors based on Fuzzy Logic. These behaviors are used to monitor the advance of the robot, thus to achieve its main objective which is the efficient movement in the surrounding environment. Within this space in which the robot moves, there are several obstacles that prevent it from moving. The Fuzzy Logic allows the robot to take a decision in the presence of these obstacles through different types of behaviors.

Keywords: Artificial Intelligence, Fuzzy Logic, Mobil Robot, Navigation System, Types of Behaviors.

Ing. Ubaldo Geovanni Villaseñor Carrillo, Profesor Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Querétaro, México, (UbaldoC\_160588@hotmail.com).

Ing. Marco Antonio González Aguirre, Alumno Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Río Moctezuma 249, San Juan del Río, México, (magax7669@hotmail.com).

Ing. Artemio Sotomayor Olmedo, Profesor Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Querétaro, México, (artemiosotomayor@gmail.com).

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado, Profesor Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Querétaro, México, (efrengorrostieta@gmail.com).

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega, Profesor Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Querétaro, México, (caryoko@yahoo.com).

Dr. José Emilio Vargas Soto, Profesor Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Querétaro, México, (emilio@mecatronica.net).

Dr. Saúl Tovar Arriaga, Profesor Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Querétaro, México, (salutov@yahoo.com.mx).

### **Introducción**

Los robots móviles deben ser capaces de desenvolverse en un entorno real, construir su propio mapa y navegar de manera autónoma, para ello se requiere la implementación de estrategias de control inteligente que puedan manejar la incertidumbre presentada por el entorno, mientras toman decisiones en tiempo real con un costo computacional relativamente bajo [1].

Referente a la navegación de robots móviles es necesario tener en cuenta que:

-En condiciones iniciales no se conoce la localización del robot móvil en el entorno.

-El conocimiento a priori del entorno de trabajo es en general incompleto, incierto y aproximado. La información métrica generalmente es imprecisa e inadecuada.

-La información perceptual adquirida en la mayoría de los casos es poco fiable, el limitado rango de los sensores combinado con las características del ambiente (oclusión) y las condiciones adversas de observación inducen a ruido, a datos imprecisos y errores en el proceso de interpretación de las medidas [2].



El principal reto de la robótica móvil es la construcción de prototipos versátiles que de manera confiable realicen tareas complejas a pesar de la incertidumbre inherente al ambiente.

La **Figura 1** muestra un escenario típico en el cual se desplaza un robot móvil en condiciones normalizadas.



Fig. 1 Escenario Típico donde se desplazara el Robot Móvil [3].

Actualmente las investigaciones en robótica móvil tienden al desarrollo de numerosas y nuevas arquitecturas que integran Percepción y Acción. La tendencia general se orienta al planteamiento de pequeñas suposiciones sobre el ambiente encontrado, en la fase de ejecución se busca que sea sensible al ambiente y que se adapte a las contingencias encontradas [2].

Para lograr esto, los datos de percepción han sido incluidos en la capa de ejecución como se observa en la **Figura 2**.

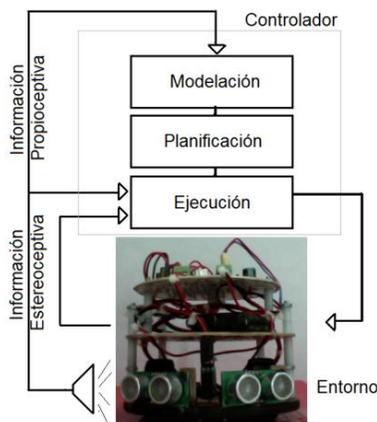


Fig. 2 Arquitectura Híbrida [2].

Muchos investigadores han optado por implementar estrategias menos complejas, como “Divide y Vencerás”, descomponiendo la capa de ejecución en

pequeñas unidades de Decisión-Acción o comportamientos (Arquitectura Híbrida Basada en Comportamientos) [4-5].

Un comportamiento es una pequeña unidad de control hecha para alcanzar un objetivo simple en un conjunto restringido de situaciones. Para poder realizar tareas complejas los robots autónomos necesitan de la activación y cooperación de un número de comportamientos. Cada comportamiento implementa en detalle un control seguro para una subtarea específica como seguir una trayectoria, evitar objetos sensados o cruzar puertas.

Actualmente la lógica difusa juega un papel muy importante en el diseño de controladores para robots móviles basados en comportamientos. La lógica difusa permite el diseño de controladores que son tolerantes a la incertidumbre, el ruido o las perturbaciones en las medidas de los sensores. Además, los comportamientos difusos pueden ser sintetizados en un conjunto de reglas tipo *if-then*, de forma que el conocimiento de un experto queda reflejado en términos lingüísticos fáciles de entender [2].

Algunas arquitecturas de control de robots móviles [7-8] se basan en la descomposición de las tareas complejas o en comportamientos. Estos comportamientos están codificados usando una base de reglas difusas y heurísticas del tipo *if Antecedente then Consecuente*. Tanto el antecedente como el consecuente son conjuntos difusos. El valor de verdad del antecedente determina la “deseabilidad” de aplicar esa regla en el estado actual. Se han definido tres comportamientos básicos: aproximación a la pared más cercana, seguir el pasillo y evitar obstáculos [6-7]. Cada comportamiento se ha implementado como una base de reglas difusas.

### Conceptos Básicos de Lógica Difusa

La lógica difusa es básicamente una lógica multivaluada que proporciona un medio para enfrentar situaciones del mundo real, situaciones complejas y dinámicas, que son más fácilmente caracterizadas por palabras que por modelos matemáticos [9].

Los sistemas difusos son esquemas basados en el conocimiento, el cual a su vez esta sintetizado en una base de reglas. El corazón del sistema difuso es la base del conocimiento que consiste en reglas tipo IF Condición THEN Acción. La condición 1 es denominada antecedente y la condición 2 es denominada consecuente.

El esquema básico de un sistema difuso se presenta en la **Figura 3**.

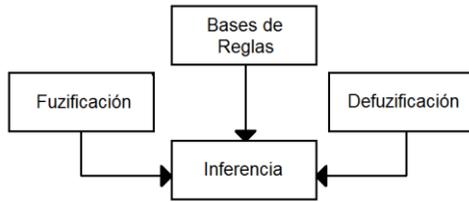
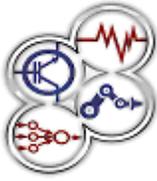


Fig. 3 Esquema Básico de un Sistema Difuso.

Los datos que entran al sistema difuso están expresados en lenguaje común, debido a esto es necesario trasladar el conocimiento inicial, es decir trasladar los datos a un lenguaje que sea entendido por el sistema difuso “fuzificación”. Al terminar el proceso los datos son llevados nuevamente a su forma original a través de la “defuzificación”.

Las reglas creadas por el usuario describen el comportamiento del sistema, estas pueden ser del tipo Mandami o Takagi-Sugeno [9].

La lógica difusa tiene como base la idea, que en un instante dado, no es posible precisar el valor de una variable X, sino tan solo conocer el grado de pertenencia de cada uno de los conjuntos en que se ha dividido el rango de variación de la variable [9].

El grado de pertenencia se cuantifica mediante la función de pertenencia  $f$ , que puede tener diferentes formas. En la **Figura 4** se muestran algunas de estas.

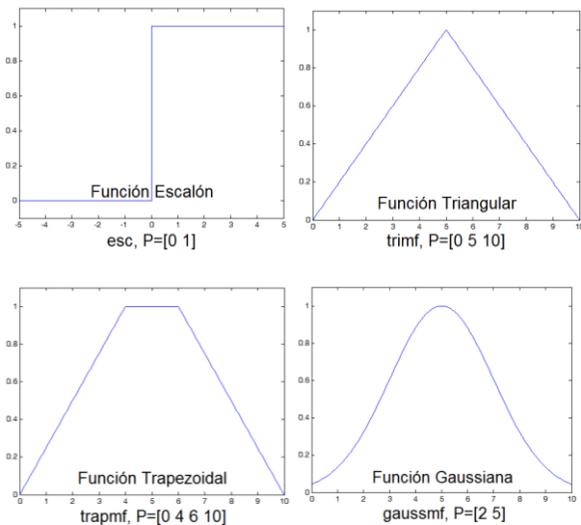


Fig. 4 Funciones de Pertenencia Típicas.

La **Figura 5** muestra una función de pertenencia (para este ejemplo la variable es distancia), además se

muestran los valores lingüísticos y el universo del discurso.

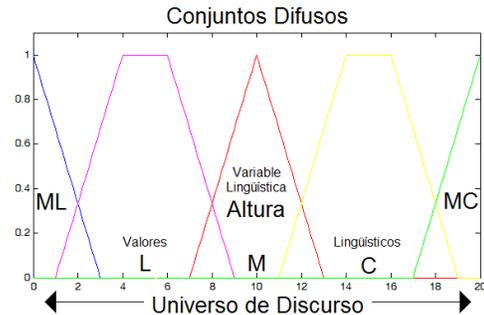


Fig. 5 Parámetros de Importancia.

El proceso de combinar las diferentes reglas se realiza a partir del motor de inferencia [9]. El motor de inferencia más utilizado en sistemas difusos y de control es:

**-Motor de inferencia mínimo (AND).** Dado el conjunto difuso A' en U, el motor de inferencia mínimo entrega B' como:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1} [\text{supmin}(\mu_{A'_l}(x), \mu_{A'_1}(x_1), \dots, \mu_{A'_n}(x), \mu_{A'_l}(x))] \quad (1)$$

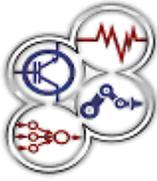
Siendo X y Y las variables lingüísticas de entrada y salida del sistema difuso y M el numero de reglas en la base de reglas difusas.

Los procesos que operan en el mundo real usualmente requieren de acciones de control no difusas, es decir, señales que estén bien definidas dentro de los números reales.

Por ello se hace necesario recurrir a la *interfaz de defuzificación*.

La estrategia de defuzificación más utilizada es el **método de centro de gravedad** [9]. El defuzificador por centro de gravedad especifica a  $y^*$  como el centro de área cubierta por la función de pertenencia de B', esto es:

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (3)$$



### Implementación de los Comportamientos

Para la implementación de los comportamientos se ha propuesto un entorno conocido. El robot de pruebas tiene 2 sensores de ultrasonido ubicados de tal manera que entregan información de la distancia de los obstáculos que lo rodean, en este caso los obstáculos son las paredes del entorno seleccionado.

En la **Figura 6** se muestran los sensores utilizados, estos tienen un rango mínimo de 3cm. y máximo de 400 cm.

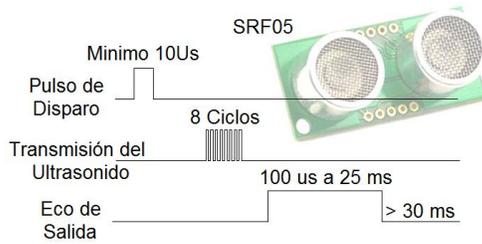


Fig. 6 Sensor Ultrasónico SRF05.

Las dimensiones del espacio a utilizar son 400 cm. de largo. y 250 cm. de ancho, el robot debe desplazarse dentro del laberinto sin ninguna complicación, en caso de que exista algún obstáculo que se lo impida, el robot lo evadirá y continuara con su rumbo. La **Figura 7** muestra un gráfico del laberinto utilizado.

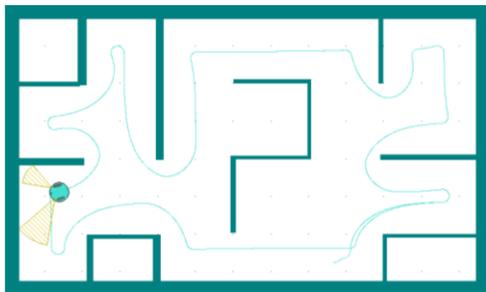


Fig. 7 Entorno de Trabajo.

La disposición de los sensores se muestra en la **Figura 8**.

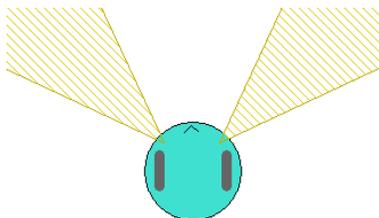


Fig. 8 Disposición de Sensores.

### Programación de la Lógica Difusa en Matlab

Utilizando el Toolbox de Fuzzy disponible en Matlab 7.8 se implementan cada uno de los comportamientos propuestos [10].

#### Comportamiento Seguir Pasillo

La descripción general del sistema creado se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Características del Sistema Difuso.

Fuzzy Name	'Seguir Pared'
Fuzzy Type	'Mamdani'
And Method	'Min'
Or Method	'Max'
Defuzzification Method	'Centroid'
Implication Method	'Min'
Aggregation Method	'Max'
Input	[1x2 Struct]
Output	[1x2 Struct]
Rule	[1x25 Struct]

Las funciones de pertenencia utilizadas son del tipo triangular y trapezoidal, esta selección se ha realizado debido a la facilidad de expresar estas funciones a través de un modelo matemático o conjunto de ecuaciones. Estas funciones de pertenencia representan de manera adecuada la naturaleza de los datos como se muestra en la **Figura 9** y **Figura 10**.

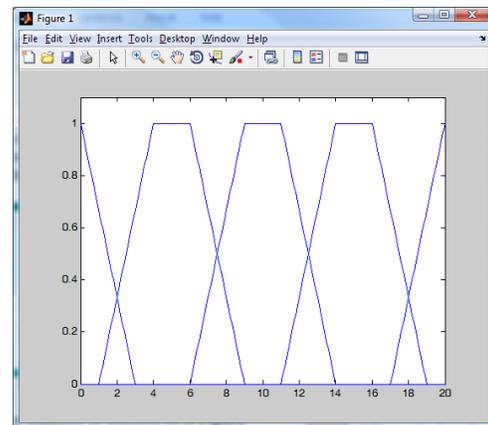


Fig. 9 Función de Pertenencia para las Entradas del Sistema.

Las etiquetas lingüísticas empleadas para las funciones de pertenencia en las variables de entrada son las siguientes: “MC=Muy Cerca”, “C=Cerca”, “N=Normal”, “L=Lejos” y “ML=Muy Lejos”.

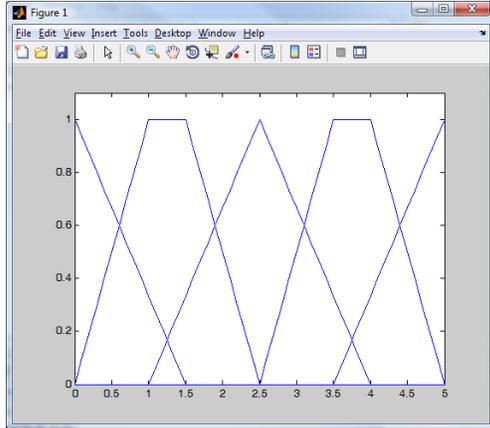
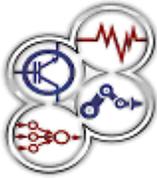


Fig. 10 Función de Pertenencia para las Salidas del Sistema.

Las etiquetas lingüísticas empleadas para las funciones de pertenencia en las variables de salida son las siguientes: “P=Parar”, “B=Baja”, “M=Media”, “A=Alta” y “V=Velocidad”.

Posteriormente se obtienen todas las reglas planteadas. Aquí se muestran dos de ellas:

1. - If (Ultrasonico\_1 is C) and (Ultrasonico\_2 is L) then (Salida.Motor\_1 is A) (Salida.Motor\_2 is M).
2. - If (Ultrasonico\_1 is N) and (Ultrasonico\_2 is ML) then (Salida.Motor\_1 is M) (Salida.Motor\_2 is P).

### Programación de la Lógica Difusa en Pic-C

Una vez obtenida toda la simulación de nuestro sistema, se prosigue a programar el microcontrolador por medio de nuestro software. El software en su totalidad fue denominado *FuzzyPic 1.0* y permite generar el código en C para el microcontrolador deseado [11]. La ventana principal de nuestro software se muestra en las **Figura 11**.

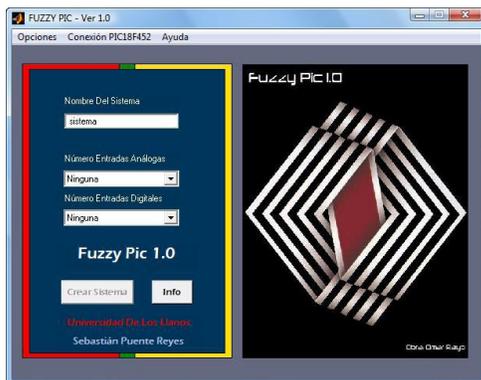


Fig. 11 Ventana Principal de Fuzzy Pic.

## Resultados

### Seguir Pared

El robot móvil se encuentra en un punto inicial  $X_0$  en estado de reposo. La primera lectura evalúa las distancias de los dos sensores ultrasónicos. A partir de la información obtenida se toma la decisión sobre el ángulo de giro. El robot compara las distancias entregadas por los dos sensores y gira hacia el lado que registra la menor lectura, si las lecturas son iguales no gira hacia ningún lado. Cada .5 cm. se registran lecturas y se toma la decisión sobre la variación en las velocidades de las ruedas.

Los resultados obtenidos para el comportamiento de seguir pared se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Información Obtenida del Algoritmo “Seguir Pared”.

Datos	Sensor 1	Sensor 2	Motor 1	Motor 2
1	6.39 cm	3.25 cm	3.51 m/s	0.72 m/s
2	9.76 cm	2.05 cm	2.50 m/s	1.17 m/s
3	11.9 cm	5.09 cm	2.14 m/s	1.72 m/s
4	15.1 cm	12.7 cm	1.25 m/s	3.92 m/s
5	11.0 cm	8.31 cm	2.50 m/s	2.23 m/s
6	10.0 cm	10.0 cm	2.50 m/s	2.50 m/s
7	0.84 cm	18.4 cm	4.42 m/s	2.21 m/s
8	2.53 cm	17.0 cm	3.77 m/s	2.26 m/s
9	16.7 cm	3.49 cm	1.25 m/s	2.50 m/s
10	18.4 cm	2.05 cm	1.01 m/s	2.73 m/s

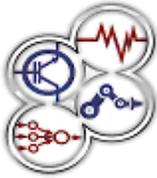
### Seguir Pasillo

El robot móvil se encuentra en un punto inicial  $X_0$  en estado de reposo. La primera lectura evalúa las distancias de los dos sensores ultrasónicos. A partir de la información obtenida se toma la decisión de cual rumbo tomar. Cada .5 cm. se registran las lecturas de los sensores de ultrasonido, para este comportamiento las lecturas deben de ser iguales ya que el robot se está desplazando en línea recta. Cuando las lecturas son diferentes el rumbo se corrige variando las velocidades de las ruedas.

Los resultados obtenidos para el comportamiento de seguir pasillo se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Información Obtenida del Algoritmo “Seguir Pasillo”.

Datos	Sensor 1	Sensor 2	Motor 1	Motor 2
1	2.72 cm	8.20 cm	3.76 m/s	2.84 m/s
2	3.77 cm	6.87 cm	3.75 m/s	3.30 m/s
3	7.75 cm	7.80 cm	2.97 m/s	2.96 m/s
4	9.60 cm	12.6 cm	2.50 m/s	1.90 m/s



5	15.6 cm	11.4 cm	1.25 m/s	2.34 m/s
6	13.6 cm	13.1 cm	1.52 m/s	1.70 m/s
7	10.0 cm	10.1 cm	2.50 m/s	2.50 m/s
8	8.01 cm	11.9 cm	2.88 m/s	2.14 m/s
9	5.63 cm	1.67 cm	3.75 m/s	4.02 m/s
10	2.45 cm	2.73 cm	3.78 m/s	3.40 m/s

## Conclusiones

En este trabajo se demostró que el control por medio de la lógica difusa tuvo un excelente desempeño, el robot acertó en el 98% de las pruebas y simulaciones.

Haciendo una comparación de los datos físicos con los datos que arrojó la simulación se pudo observar que los datos poseen un error del 0.6%. Las herramientas de software y simulación proveen un marco de trabajo sencillo, escalable y flexible que facilitan la implementación del prototipo final.

Finalmente el robot será utilizado con fines educativos y de investigación para el desarrollo de algoritmos más novedosos como: fuzzy jerárquico, ensamblados de redes neuronales, algoritmos heurísticos, etc.

## Referencias

- [1] Carrasco Rodrigo, Cipriano Aldo. "Sistema de Guiado para un robot móvil basado en lógica difusa". *XV Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático*. Octubre de 2002.
- [2] Hernando Parra, Luis Hernando Ríos G., Maximiliano Bueno L. "Navegación de Robots Móviles" *Scientia Et Technica*, vol. 13, pp.79-84.
- [3] MrobotSoft, *MrobotSim 1.0.03*, <http://www.mrobotsoft.com>.
- [4] Simarro Raúl, Ricolfe Carlos, Navarro José. Simó José. "Herramienta para la prueba de controladores Inteligentes aplicados a la robótica móvil." *Universidad Politécnica de Valencia*. 2002.
- [5] Jasmin Velagic, Bakir Lacevic, Branislava Perunicic. "A 3-level autonomous mobile robot navigation system designed by using reasoning/search approaches." *Robotics and Autonomous Systems 54*" 2006, pp. 989-1004.
- [6] Cordoba Juan, Ríos Luis, Restrepo Carlos. "Descripción de una plataforma móvil implementada para el estudio de técnicas inteligentes de navegación: P-METIN". *Scientia Et Technica*. Año XI, No.27 Abril de 2005.
- [7] Driankov Dimiter. "A Reminder on Fuzzy Logic". *Springer-Physica Verlag*. Pages 25-47. 2007.
- [8] Saffiotti Alessandro. "The Uses of Fuzzy Logic in Autonomous Robot Navigation". *Sofá Computing 1* (4): 180-197. 2006.
- [9] Tamara Benito Matías, Ma. Isabel Durán Vicente. "Lógica Borrosa" *Universidad Carlos III*".
- [10] Matlab, *Fuzzy Toolbox*, <http://www.matlab.com>.
- [11] Puente Sebastián, Villaseñor Ubaldo "Módulo de Desarrollo para la Implementación en Microcontrolador, de Sistemas Lógicos Difusos Tipo Mamdani", *Universidad de los Llanos*. 2010

## Currículo corto de los autores

### Ubaldo Geovanni Villaseñor Carrillo

Ingeniero en Mecatrónica egresado de la Universidad del Valle de México. Actualmente realiza Desarrollo de Investigaciones y Proyectos en la Universidad Autónoma de Querétaro.

### Marco Antonio González Aguirre

Ingeniero en Mecatrónica egresado de la Universidad del Valle de México. Actualmente realiza Desarrollo de Investigaciones y Proyectos en la Universidad Autónoma de Querétaro.

### Artemio Sotomayor Olmedo

Ingeniero en Computación egresado de la Universidad Autónoma de Querétaro. Actualmente realiza Desarrollo de Investigaciones y Proyectos en la Universidad Autónoma de Querétaro.

### Efrén Gorrostieta Hurtado.

Ingeniero Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente. Cursó la Maestría y el Doctorado en Mecatrónica en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Actualmente es Profesor-Investigador en la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### Jesús Carlos Pedraza Ortega

Ingeniero Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de Celaya. Cursó la Maestría en Ingeniería Eléctrica en la FIMEE, Universidad de Guanajuato. Sus estudios de Doctorado fueron en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Tsukuba. Actualmente es Profesor-Investigador en la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### José Emilio Vargas Soto

Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cursó la Maestría en Ingeniería de Control en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus estudios de Doctorado fueron en Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid. Actualmente es Profesor-Investigador en la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### Saúl Tovar Arriaga

Ingeniero Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de Querétaro. Cursó la Maestría en Ciencias de la Mecatrónica en la Universidad de Siegen, Alemania. Sus estudios de Doctorado fueron en el área de Robots Médicos y Cirugía Asistida por Computadora en la Universidad de Erlangen-Nuremberg, Alemania. Actualmente es Profesor-Investigador en la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro.