

# Sistema de control de velocidad basado en lógica difusa para robot móvil.

## Speed control system based on diffuse logic for mobile robot.

Álvaro Hernández Sol\* (1).  
Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.  
[ing\\_sol10@yahoo.com.mx](mailto:ing_sol10@yahoo.com.mx).

Alejandro Isidoro Méndez Hernández (2). Estudiante del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.  
[alejandromendez.am16@gmail.com](mailto:alejandromendez.am16@gmail.com).

Raúl Moreno Rincón (3). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. [rmoreno@ittg.edu.mx](mailto:rmoreno@ittg.edu.mx).

José Ángel Zepeda Hernández (4). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.  
[jzepeda@ittg.edu.mx](mailto:jzepeda@ittg.edu.mx).

Aldo Esteban Aguilar Castillejos (5). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.  
[aaguilarc@ittg.edu.mx](mailto:aaguilarc@ittg.edu.mx).

Osbaldo Ysaac García Ramos (6). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. [ogarcia@ittg.edu.mx](mailto:ogarcia@ittg.edu.mx).

---

\*corresponding author.

Artículo recibido en agosto 26, 2020; aceptado en septiembre 21, 2020.

### Resumen.

*El presente artículo describe el diseño de un sistema de controlador difuso de velocidad para un vehículo móvil autónomo. Al aplicar este controlador en el prototipo se le dotará de una velocidad de movimiento constante, además de que el sistema proporcionará un movimiento sin desviación de ruta. El controlador de velocidad difuso utiliza con entradas la información que proporciona dos encoders y un giroscopio, teniendo 2 salidas que corresponden a los motores independientes del robot móvil. Estos datos están aplicados sobre un diseño de 5 funciones de membresía, utilizando un controlador tipo Mandami. En las pruebas realizadas en el laboratorio se logró reducir el error en 0.1% de la velocidad requerida. La finalidad de este sistema es lograr un prototipo de robot móvil que lleve a cabo un recorrido manteniendo una velocidad constante a pesar de las características del terreno.*

**Palabras claves:** Control, lógica difusa, vehículo, móvil.

### Abstract.

*This article describes the design of a fuzzy speed controller system for an autonomous mobile vehicle. By using this controller in the prototype It was given a constant speed of movement, in addition to the system will provide a movement without deviation of route. The fuzzy velocity controller uses the information provided by two encoders and a gyroscope with inputs, having 2 outputs that correspond to the independent motors of the mobile robot. This data is applied to a design of 5 membership functions, using a Mandami type controller. In the tests carried out in the laboratory, the error was reduced by 0.1% of the required speed. The purpose of this system is to achieve a*

*prototype of mobile robot that carries out a tour maintaining a constant speed despite the characteristics of the terrain.*

**Keywords:** Control, fuzzy logic, mobile, vehicle.

## 1. Introducción.

La lógica difusa intenta emular el comportamiento humano mediante el uso de conjuntos difusos (Valenzuela, 2013: 623). Ha cobrado mucho auge en las últimas décadas debido a la simplicidad de su aplicación, ya que se puede implementar sin necesidad de conocer el modelo matemático del sistema (Chen, 2001), que de hecho realizar un sistema de control difuso en un sistema que se puede modelar y resolver mediante un modelo matemático produce peores resultados, más sin embargo existe la necesidad del conocimiento del comportamiento del sistema o lo que es lo mismo el conocimiento de un experto que ha trabajado con el sistema (Urbieta, 1995).

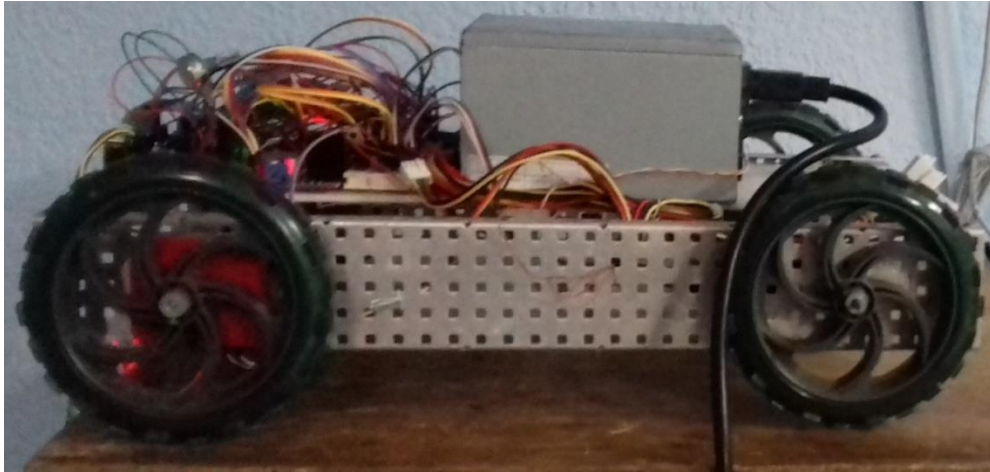
En el caso de vehículos autónomos, se están desarrollando muchos algoritmos de control de velocidad, para que realicen la actividad programada de la mejor manera (Choset, 2005). Todos estos algoritmos son diseñados para el vehículo a utilizar, considerando dimensiones, peso, motores y estructuras propias del mismo. En la literatura se pueden encontrar diferentes metodologías para diseñar sistemas de control de velocidad: a) Método analítico publicado por Blanco con su controlador difuso tipo Mandani usando simulink (Blanco, 2014: 261), b) El controlador difuso de Duarte codificados en VHDL (Duarte, 2014: 267), y c) El controlador difuso tipo Takani-Sugeno de Bojórquez que utiliza mínimos cuadrados y algoritmos genéticos (Bojórquez, 2014: 318), entre otros.

Entre los métodos antes mencionados, la técnica de control de velocidad más usada es la de método de Takani-Sugeno que más se ha estado usando con esta finalidad. La importancia de un sistema de control de velocidad no es solo garantizar un desplazamiento continuo de un robot móvil, sino además evitar el consumo excesivo de corriente de las baterías por los continuos incrementos y decrementos de la aceleración del móvil (Jassbi, 2007). Nótese que para garantizar la efectividad de los sistemas de control de un robot móvil es necesario desarrollar un sistema de control de velocidad. Este trabajo propone el desarrollo de un sistema de control de velocidad que siempre estará verificando el desplazamiento que el robot lleve a cabo. Este problema es debido a que es necesario, a) verificar si la velocidad se ve decrementada o incrementada por una pendiente en donde se desplace el móvil, b) Se debe buscar un mecanismo (algoritmo) que permita introducir la dinámica de falla en motor, c) debe proponerse una estrategia para que una vez detectada la falla, se pueda hacer la corrección y llevar a cabo la compensación con los motores restantes.

En nuestro caso se propone el diseño de un controlador difuso tipo mandani que permita mantener la velocidad de un robot móvil autónomo que tiene como misión la recolección de botellas de PET. Este control es importante para que el robot mantenga la velocidad del sistema recolector y de esta forma se incremente su eficiencia, sin importar las condiciones del terreno (pendientes) y el propio peso del vehículo.

## 2. Métodos.

Para la realización de este artículo se tomó como base un robot móvil a escala del robot recolector de PET. Para la construcción del chasis se utilizaron perfiles de aluminio y llantas de la compañía VEX ROBOTICS, ver figura 1. Para medir la distancia se utilizaron encoders ópticos de la misma compañía, montado en el eje de cada llanta delantera del vehículo móvil, ver figura 2. Se usó una tarjeta de desarrollo arduino UNO como base para programar el controlador difuso usando la librería eFLL.



**Figura 1.** Vehículo móvil de prueba.

Como consideraciones adicionales, se tiene que el encoder utilizado proporciona 90 pulsos por vuelta y el diámetro de cada llanta es de 5.1 pulgadas. Además, se definió, para realizar las pruebas, un circuito en línea recta donde se pudiera variar fácilmente el ángulo de inclinación y se fijó una distancia de 10 metros. Para poder medir el tiempo que le tomaba al vehículo recorrer dicha distancia se implementó un sistema formado por dos sensores ópticos, un display LCD de 16x2 y un Arduino UNO.

Usando la ecuación del perímetro de un círculo se calculó la distancia que las llantas recorren al girar 3600. Al utilizar llantas de 5.1" la distancia recorrida es de 40.69 cm por vuelta completa.

$$\text{perimetro} = \pi D \quad (1)$$

$$\text{Distancia}(t) = \left(\frac{\text{perimetro}}{90}\right) * \text{encoder}(\text{Pulsos}) \quad (2)$$



**Figura 2.** Encoder de cuadratura marca VEX ROBOTICS.

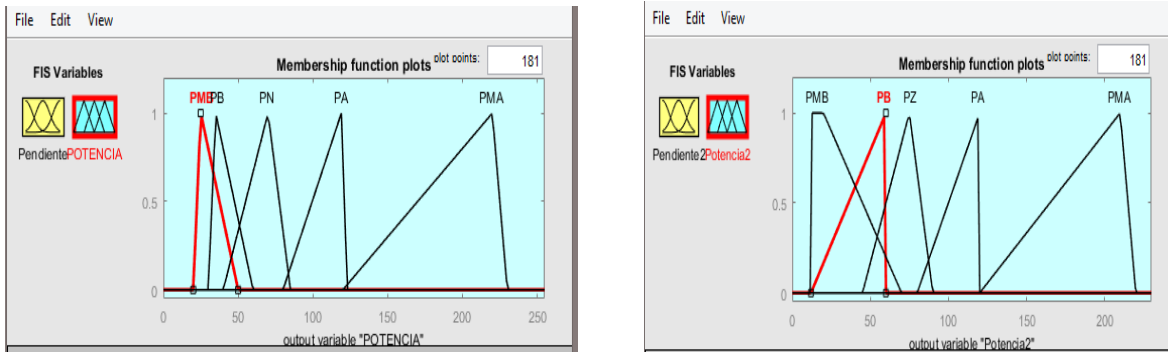
Se utilizó las lecturas del desplazamiento de ambas llantas, para realizar los ajustes necesarios para controlar la dirección del desplazamiento y que el vehículo se moviera en línea recta. Además de considerar las lecturas de los encoders como valores de entrada al controlador difuso.

Se realizaron pruebas para caracterizar la potencia máxima aplicada a los motores con los cuales se pudiera mantener una velocidad constante para diferentes ángulos de inclinación y poder determinar el máximo grado de inclinación que los motores podrían mantener una velocidad constante.

**Fuzzy Logic.**

Para realizar el diseño del control difuso se utilizó el toolbox de MAtLab “fuzzy logic” (Magaña, 2014: 63).

Con esta herramienta se diseñaron 2 controladores difusos tipo Mandani, ver figura 3. La propuesta de los conjuntos difusos se seleccionó considerando que a la salida se tuvieran la mejor respuesta.



Controlador 1.

Controlador 2.

**Figura 3.** Funciones de membresía de salida.

**Tabla 1.** Base de datos tiempo de recorrido (2 motores).

Intentos	Inclinación - PWM	
	0° 55%	5° 100%
1	3.5	No se movió
2	3.5	No se movió
3	3.6	No se movió
4	3.5	No se movió
5	3.6	No se movió
6	3.5	No se movió
7	3.6	No se movió
8	3.5	No se movió
9	3.5	No se movió
10	3.6	No se movió
11	3.4	No se movió
12	3.4	No se movió
13	3.2	No se movió
14	3.3	No se movió
15	3.2	No se movió
16	3.4	No se movió
17	3.3	No se movió
18	3.4	No se movió
19	3.4	No se movió
20	3.4	No se movió
<b>Promedio</b>	<b>3.45</b>	<b>No se movió</b>

**Base de conocimiento.**

En el diseño de estos controladores se usaron reglas basadas en los datos de funcionamiento del sistema que se obtuvieron mediante la caracterización del móvil, considerando motores y los encoders utilizados. En las tablas 1 - 2 se muestran los datos que se registraron al realizar pruebas del móvil. Los datos necesarios fueron el tiempo que le tomaba al vehículo recorrer la distancia fijada y la potencia que se le suministraba a los motores y obviamente el ángulo de la pendiente.

**Tabla 2.** Base de datos tiempo de recorrido (4 motores).

Intentos	Inclinación - PWM					
	5° 31%	5° 41%	5° 52%	5° 62%	5° 72%	5° 81%
1	4.6	3.2	2.4	2.2	2.1	2.0
2	4.1	3.2	2.5	2.2	2.2	1.9
3	4.1	3.2	2.4	2.2	2.2	2.0
4	4.1	3.0	2.5	2.2	2.1	2.0
5	4.2	3.0	2.6	2.2	2.0	2.0
6	4.1	3.2	2.5	2.1	2.1	2.0
7	4.2	3.3	2.6	2.2	2.1	2.0
8	4.5	3.2	2.5	2.3	2.1	2.0
9	4.2	3.1	2.5	2.2	2.1	2.0
10	4.2	3.2	2.4	2.2	2.2	2.0
11	4.2	3.4	2.4	2.2	2.1	2.0
12	4.1	3.1	2.5	2.2	2.0	2.0
13	4.5	3.1	2.6	2.1	2.1	2.0
14	4.5	3.1	2.5	2.2	2.1	2.0
15	4.5	3.1	2.6	2.2	2.1	2.0
16	4.3	3.2	2.6	2.2	2.2	2.0
17	4.4	3.0	2.6	2.2	2.1	2.1
18	4.5	2.9	2.5	2.1	2.2	2.0
19	4.1	3.0	2.5	2.2	2.1	2.0
20	4.4	3.2	2.5	2.2	2.1	2.0
<b>promedio</b>	<b>4.29</b>	<b>3.13</b>	<b>2.51</b>	<b>2.19</b>	<b>2.12</b>	<b>2.00</b>

**3. Resultados.**

En este artículo se presentan los resultados de dos controladores difusos con distintos valores de conjuntos de entrada y salida.

Las pruebas que se realizaron durante la caracterización del móvil que se desplazaba sobre una plataforma de prueba, a la cual se le incrementaba y decrementaba la inclinación dentro de los siguientes rangos:

Ángulo de pendiente máximo 10°.  
Velocidad máxima constante 2.6 m/s.

**Tabla 3.** Lecturas de potencia.

Pendiente	Controlador difuso 1		Controlador difuso 2	
	Arduino	Matlab	Arduino	Matlab
13°	184.67	192	183.33	183
12°	184.67	192	183.33	183
11°	184.67	192	183.33	183
10°	184.67	192	183.33	183
9°	176.9	180	173.45	174
8°	167.97	170	164.26	164
7°	156.98	158	154.11	154
6°	140.45	142	139.84	140
5°	107.14	107	106.22	107
4°	96.29	99.4	93.57	96.5
3°	89.19	90.4	89.38	90.9
2°	83.96	84.1	85.26	85.8
1°	78.68	78.5	79.59	79.7
0°	71.46	71.1	70	70
-1°	61.01	61.6	59.51	59.9
-2°	57.81	57.9	55.64	55.6
-3°	54.29	54.2	52.9	53.1
-4°	50	50.1	48.71	50
-5°	43.89	43.7	42.67	43.2
-6°	40.34	40.4	38.82	40.8
-7°	38.82	38.9	36.64	36.7
-8°	36.63	36	34.37	34.7
-9°	32.22	32.2	32.75	33.1
-10°	31.83	31.9	31.66	32.1

En la tabla 3 se muestran los valores de potencia aplicada obtenidos a la salida del control difuso, tanto en la simulación en Matlab como los del control implementado en Arduino para ambos controladores diseñados.

En las figuras 4-5 se muestran el comportamiento de los dos controladores difusos diseñados considerando los valores de potencia (PWM) aplicados a los motores obtenidos a la salida dependiendo de la pendiente de entrada. Se puede apreciar que las diferencias entre los valores obtenidos en Matlab y Arduino son muy pequeñas.

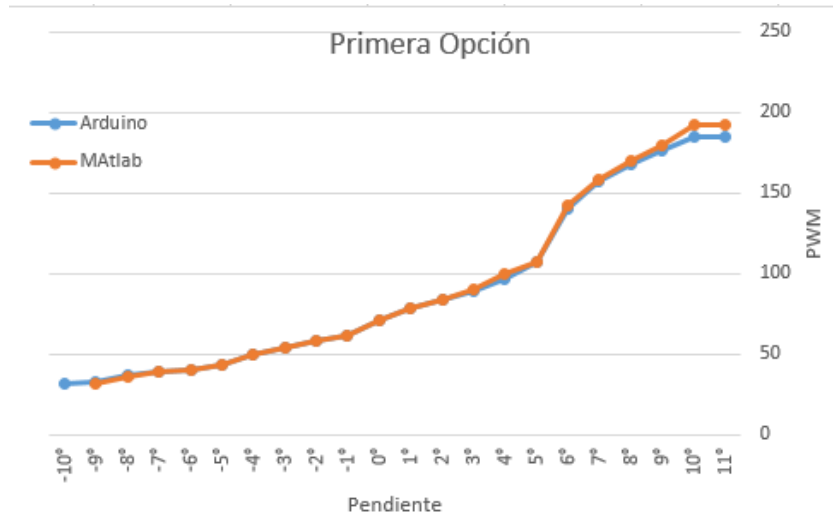


Figura 4. Comparación de potencia de salidas en controlador 1.

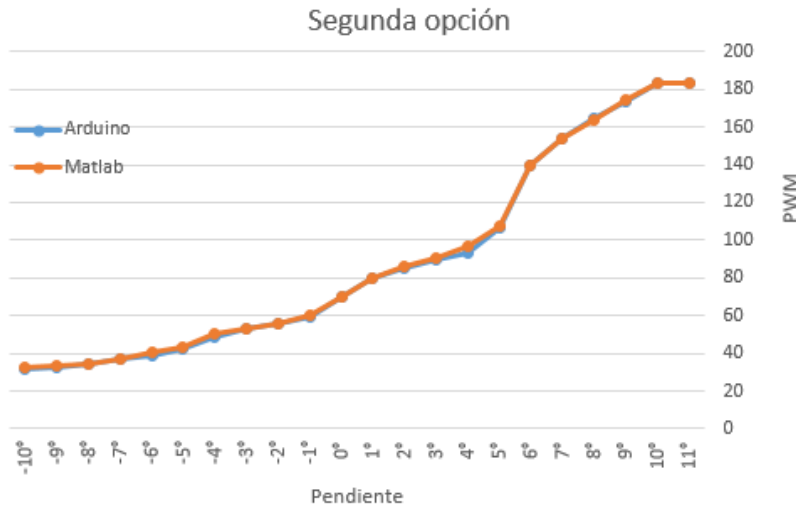
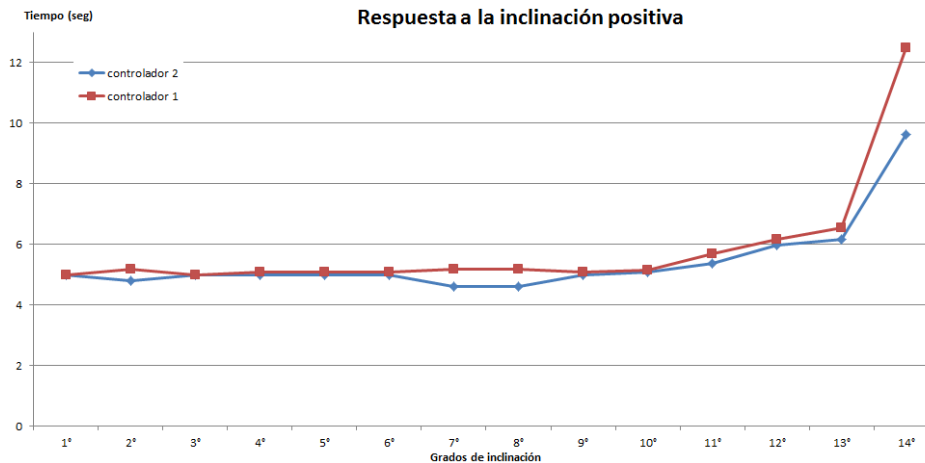
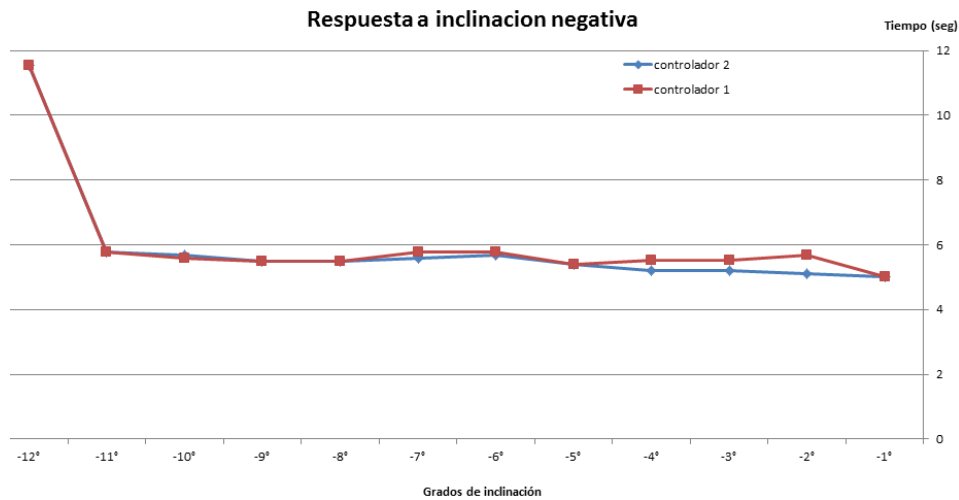


Figura 5. Comparación de potencia de salidas en controlador 2.

Por último al realizar las pruebas finales del control de velocidad, se realizaron 50 recorridos del vehículo sobre la plataforma de pruebas para cada grado de inclinación de la misma (dentro de los rangos preestablecidos) a una velocidad constante de 2 m/s. Con todos los datos capturados y utilizando el método de promedios móviles se obtuvo el tiempo en que el vehículo recorre la distancia de diez metros para cada grado de inclinación. Esta respuesta se puede observar en las figuras 6 -7.



**Figura 6.** Comparación de tiempo vs inclinación pendiente positiva.



**Figura 7.** Comparación de tiempo vs. Inclinación pendiente negativa.

### Discusión.

Las ventajas de los controladores basados en lógica difusa sobre los controladores convencionales son muchas cuando no se conoce el modelo matemático del sistema. Los resultados obtenidos en este proyecto son sin duda satisfactorios ya que se logró el objetivo principal, el controlador implementado cumple con el objetivo de mantener la velocidad constante dentro de los límites establecidos. Como se puede ver en las gráficas el controlador 2 se comportó mucho más estable cuando se variaba la inclinación con pendiente positiva, mientras que el controlador fue menos estable cuando se utilizaba sobre una pendiente negativa. Esta respuesta del controlador depende en gran medida de la caracterización que sea del móvil a controlar y de la experiencia al seleccionar los conjuntos difusos.



### Agradecimientos.

Los autores agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 6847.18-P, sin el cual no hubiera sido posible la publicación de estos resultados.

### Referencias bibliográficas.

- Blanco, J. M. (2014).** Comparación de controlador difuso vs control clásico para un motor de CD. Electro 2014. Pp 261-266.
- Bojorquez, G. (2014).** Metodología para la implementación de sistemas difusos tipo Mamdani en lenguajes de programación de propósito general. Electro 2014. Pp. 318-323.
- Chen, G. (2001).** Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. USA: CRC Press.
- Choset, H. (2005).** Principles of robot motion, theory, algorithms, and implementations. USA: The MIT press.
- Duarte, J.H. (2014).** Control difuso de velocidad en VHDL. Electro 2014. Pp. 267-272.
- Jassbi, J. ; Alavi, S.H.; Serra, P.J. ; Ribeiro, R. (2007).** Transformation of a Mamdani FIS to first order sugeno FIS. IEEE international conference on Fuzzy systems, London, United Kingdom.
- Magaña, C. M. (2014).** Implementación y prueba experimental de un controlador por lógica difusa en un microcontrolador (ATMEGA328P-Arduino uno) para un motor de CD. Electro 2014. Pp. 63-68.
- Urbieta, R. (1995).** Sistema de control de lógica difusa aplicado a un motor de C.D. Polibits.
- Valenzuela Hernández, J. G., Montoya Giraldo, O. D., & Giraldo Buitrago, D. (2013).** Lógica Difusa Aplicada al Control Local del Péndulo Invertido con Rueda de Reacción. Scientia Et Technica, vol. 18, núm. 4. Pp. 623-632.

### Información de los autores.



**Álvaro Hernández Sol**, es Ingeniero en electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y es investigador desde 1997. Certificado en SolidWorks Associate. Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundo y asesora el “Club de robótica del ITTG”. Colabora en la línea de investigación de “Robótica” de Ingeniería electrónica. Dirige el área de trabajo en “Robótica” y es parte del cuerpo académico “sistemas de control inteligentes”. Ha realizado investigaciones en el área de los sistemas alternativos de comunicación y en sistemas robóticos, así como en sistemas traductores de lenguaje.



**Alejandro Isidoro Méndez Hernández** es ing. Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Durante su etapa académica fue parte del Club de Robótica del I.T.T.G., siendo parte del equipo de diseño para los concursos del torneo de VEX ROBOTIC temporada 2014-2016. Certificado en SolidWorks Associate. En la actualidad tiene empleo como ingeniero de servicios en la compañía ENMED SYSTEM en la ciudad de Querétaro, Querétaro. Es el encargado de proporcionar el servicio de mantenimiento preventivo y correctivo a equipos de ultrasonido. Además de desarrollar e implementar proyectos comunitarios tales como “Recursos de Energía Alternativa”. Se especializa en el desarrollo de aplicaciones. Experto en programación en Matlab.



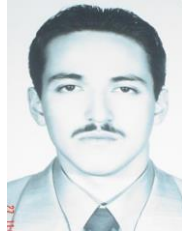
**Raúl Moreno Rincón** es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, egresado de la ESIME-IPN, en la ciudad de México, D.F. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca. Maestro en Educación Superior por la Universidad Autónoma de Chiapas. Certificado en SolidWorks Associate. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y Jefe de Proyectos de Docencia de Ingeniería Electrónica. Es investigador desde 1999 y Colabora en la línea de investigación “Robótica” de Ingeniería electrónica y es parte del cuerpo académico en formación “sistemas de control inteligentes”. Ha realizado proyectos como: Sistema de alarma para personas con deficiencia auditiva basado en XBEE, robot de cafetería, araña hexápoda, sistema de control de animatronic, entre otros.



**José Ángel Zepeda Hernández**, es Ingeniero Industrial en Eléctrica y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez e investigador desde 1999, Imparte cátedra en el área de Ingeniería Electrónica y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el ITTG, donde imparte las asignaturas de Diseño con Transistores y Electrónica Básica respectivamente. Líder del cuerpo académico en formación “sistemas de control inteligentes”.



**Aldo Esteban Aguilar Castillejos** obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el 2011 y el título de Ingeniero en Electrónica en el mismo Instituto, con especialidad en Instrumentación y Control. Certificado en SolidWorks Associate y SolidWorks Professional Avanzado, con Diplomado en Competencias para la enseñanza de las ciencias, Diplomado en Unreal Engine. Actualmente es parte del cuerpo académico en formación “sistemas de control inteligentes” del I.T.T.G. y parte del grupo de investigación en la Universidad del Valle de México, con desarrollos de proyectos financiados por CONACyT y empresas privadas. Con campos de interés en: dispositivos opto-mecatrónicos, manufactura, sensores de fibra óptica, instrumentación y control.



**Osbaldo Ysaac García Ramos**, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Académico de Tiempo Completo en UVM desde 2005. Tiene 12 años de experiencia docente. Tiene Cursos especialización en Mecatrónica en Universidad de Esslingen Alemania, en la empresa Emco Salzburgo Austria, en la empresa Festo Estados Unidos y Festo México. Responsable técnico del proyecto de investigación “Consolidar un centro de investigación y desarrollo de vehículos eléctricos funcionales y confortables e impulsados por energía limpia” junto con la empresa Invemex S.A de C.V., 2015. Ha desarrollado proyectos de investigación como ‘Sistema de medición de hélices de barco para la secretaria de marina financiado por Conacyt y Semar’, ‘Diseño y caracterización de Biomateriales a partir de macromicetos como alternativa al uso del unicef’ en el año 2014 (financiados por Conacyt). Tiene participaciones en congresos internacionales como congreso TecnoLaser Habana Cuba 2013 con artículo y ponencia ‘Método de registro automático de imágenes de rango tridimensionales para restauración de piezas arqueológicas’.