

# Control de velocidad difuso aplicado a una mezcladora de pinturas.

## Speed fuzzy control applied to a paint-mixer machine.

Álvaro Hernández Sol (1).  
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.  
ing\_sol10@yahoo.com.mx

José Ángel Zepeda Hernández (2). I.T. Tuxtla Gutiérrez. jzpedah@ittg.edu.mx.

Raúl Moreno Rincón (3). I.T. Tuxtla Gutiérrez. rmoreno@ittg.edu.mx.

Francisco Ronay López Estrada (4). I.T. Tuxtla Gutiérrez. frlopez@ittg.edu.mx.

Karla del Carmen Chimeca Rossier (5). CONALEP plantel 244. krossier69@hotmail.com.

**Artículo recibido en junio 23, 2015; aceptado en octubre 12, 2015.**

### Resumen.

*El presente artículo describe la aplicación de técnicas de control de lógica difusa aplicado en el motor de una mezcladora de pinturas, para controlar la velocidad de mezclado. Se implementó un prototipo de mezcladora que consta de un motor de 24 volts a 7.5 amperes. Se propuso la utilización de cinco conjuntos difusos tanto de entrada como de salida para obtener un sistema de control estable y con un porcentaje de error menor al 1%. Se realizaron las pruebas en el prototipo obteniendo una optimización en los tiempos de mezclado, así como una reducción de costos en el consumo de energía.*

**Palabras clave:** Control, mezcladora de pintura, lógica difusa, conjuntos difusos.

### Abstract.

*This paper describes the application of control techniques fuzzy logic that applies on motors of paint mixer that mixes for the control in the speed. A prototype mixer comprising a motor between 24 volts to 7.5 amperes. The use of five fuzzy sets both input and output looking for stable control system and a lower error ratio 1%. The tests were conducted on the prototype to obtain an optimization of mixing times and a cost reduction in power consumption.*

**Keywords:** Control, paint mixer, fuzzy logic, fuzzy sets.

## 1. Introducción.

La igualación del color es una tarea compleja para el pintor, por diversos motivos. Por un lado, los efectos de color son cada vez más difíciles de reproducir; por otro lado, la pintura utilizada en primeros equipos es de diferente naturaleza y se aplica con sistemas distintos a los del taller de reparación. Por añadidura, puede ocurrir que el pintado se realice sobre trabajos anteriores que no se hubiesen igualado apropiadamente.

La máquina mezcladora; es usada para mezclar mecánicamente. Equipada para tener todas las pinturas a utilizar en las mezclas. El usuario acciona un reloj sincronizado que remueve a cada pintura en ciclos de 15 a 20 minutos. Se utilizan para que la pintura no se concentre en el fondo de cada recipiente.

Los sistemas con que se cuentan en el mercado son sistemas electrónicos sofisticados y de costos elevados; éste proyecto pretende abaratar los costos de implementación, inversión y de mantenimiento, al sector industrial dedicados a éste ramo. Automatizando la rotación de una mezcladora en la igualación de colores reduciendo con esto: tiempos y mejora en la calidad del servicio. Cabe mencionar que en nuestra localidad las industrias (ya sean pequeñas o medianas) dedicadas a éste rubro no cuentan con este tipo de sistema.

## 2. Métodos.

### 2.1. Lógica difusa.

La lógica difusa define la realidad en diferentes grados de verdad. Sigue patrones de razonamiento similar a los del pensamiento humano. Es Flexible.

Ejemplo: según la lógica convencional, un recinto está solamente “oscuro” (0) o “claro” (1). Para la Lógica Difusa son posibles condiciones intermedias como “muy claro”, “algo oscuro”, “ligeramente claro”, etc.

La lógica Difusa nos permite ser relativamente “imprecisos” en la representación de un problema y aun así llegar a una muy buena solución. Maneja la incertidumbre y la imprecisión. Un ejemplo clásico es el de “aparcarse un coche”.

Este se puede aparcarse fácilmente cuando no se ha fijado una posición final exacta. Pero si se fija una posición final deseada en milímetros y segundos de arco, la solución de este problema tardaría mucho (cálculos complejos) y su costo sería elevado.

### 2.2.- Conjuntos difusos.

Es un conjunto que puede contener elementos con grados parciales de pertenencia, a diferencia de los conjuntos clásicos en los que los elementos pueden “pertener” ó “No Pertener” a dichos conjuntos.

Un conjunto no tiene límites claramente definidos o precisos. La transición de la pertenencia o no-pertenencia de un elemento, es gradual, y esta transición está caracterizada por funciones de membresía; como se muestra en la ecuación 1.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

Dónde:

$\mu_A(x)$  se conoce como la función de membresía.  
 $X$  es llamado el universo de discurso.  
 $x$  son los elementos de ese universo.

El grado de pertenencia de un elemento a un conjunto viene determinado por una función de pertenencia, que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo  $[0,1]$ .

### 2.3 Funciones de membresía.

Como menciona Ross Timothy J (2002) las funciones de membresía corresponden a una curva que determina el grado de pertenencia de los elementos de un conjunto. Se denota generalmente por  $\mu_A$  y puede adoptar valores entre 0 y 1.

Es una representación asociada a intervalos del universo del discurso que mapean un valor entrada exacta o medible y le asignan un grado de pertenencia a los conjuntos difusos entre 0 y 1. La forma de las funciones de pertenencia puede ser diversa, entre las más comunes son las siguientes:

- Trapezoidales.
- Triangulares.
- Exponenciales.
- Polinómicas.

#### 2.4 Sistemas de control difuso.

Se basa en reglas producto de la experiencia, la intuición y el sentido común del ser humano. Utiliza técnicas para manejar la imprecisión. Implementa estrategias de control en términos lingüísticos, por ende impreciso, propio de la lógica difusa.

Esta técnica soporta el razonamiento aproximado, en particular el razonamiento con sentido común y por ello escapa del alcance de la lógica clásica. La imprecisión que se modela con la lógica difusa no hace referencia a errores en las medidas (entradas), ni en las variables aleatorias (perturbaciones), ni a procesos estocásticos. Bajo cualquiera de estas circunstancias, un controlador difuso toma una decisión de actuación más acertada que uno convencional. Controladores difusos.

Trabajan diferente que los convencionales; el conocimiento experto se utiliza en vez de las ecuaciones diferenciales para describir un sistema. Con variables lingüísticas, descritas por los conjuntos difusos.

Propósito: influenciar el comportamiento cambiando una entrada de información según una regla o conjunto de las reglas que modelan cómo el sistema funciona.

La teoría de control clásica utiliza un modelo matemático. Típicamente infiere los consecuentes de un conjunto más o menos grande de reglas simples (base de conocimiento); tal proceso de razonamiento se puede realizar en paralelo, obteniéndose el resultado mediante una sencilla suma lógica. Esta capacidad de procesamiento en paralelo permite que incluso controladores relativamente complejos puedan realizar la inferencia difusa en un tiempo de cálculo mínimo.

Además, debido a las características de la lógica difusa, muchas veces es posible llegar a diseñar un regulador bien ajustado al proceso aprovechando la experiencia previa de un operador, eliminando de esta manera la necesidad de complejos y laboriosos estudios técnicos del problema de control.

Componentes de un sistema de control difuso.

Estos modelos se basan en un conjunto de reglas heurísticas donde las variables lingüísticas de las entradas y salidas se representan por conjuntos difusos. Entre los componentes de un controlado difuso se tienen:

- Escalado de entrada.
- *Fuzzificación* de entradas.
- Inferencia o reglas de activación.
- *Defuzzificación* de salidas.
- Desnormalización de salida.

La figura 1 muestra las principales componentes de un sistema de control difuso:

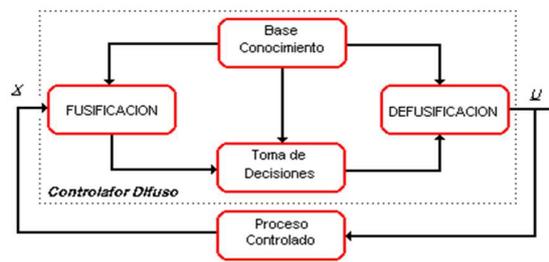


Figura 1. Componentes de un sistema difuso.

### 3. Desarrollo.

Este proyecto pretende tener un control sobre la velocidad de rotación de una mezcladora que se utilizará en la igualación de colores para pinturas; ya que en algunos negocios o microempresas dedicadas a éste rubro, por ejemplo: talleres mecánicos automotrices, de motocicletas, talleres de rotulación. Los procesos se hacen de manera manual con lo cual el proceso resulta lento.

El sistema va a constar de un motor de 24 volts de C.C. que tiene acoplado en un extremo del eje un *encoder* del tipo óptico (también llamado del tipo ventana, por su forma); del cual obtendremos una señal de frecuencia respecto a la velocidad del motor, ésta señal es procesada a través de un convertidor de frecuencia a voltaje y luego se amplifica. Esta señal obtenida del amplificador es encaminada a una terminal del puerto A del microcontrolador, la cual es configurada como entrada analógica y en la cual se hará el proceso de la velocidad que deseamos y la velocidad que estamos obteniendo del sensor.

Consta de un teclado y un *display*, en la cual se le introducirá la velocidad deseada y se desplegará dicho valor. El motor será montado de forma horizontal sobre una base metálica, en un extremo de su eje tiene un engrane que a su vez va acoplado a un engrane del tipo vertical, en el cual va colocada la varilla con las aspas que servirá para el mezclado de pinturas.

#### 3.1 Diagrama a bloques del sistema.

Nuestro sistema al inicio solicita por medio de un *display* de cristal líquido seleccionar una de las cinco velocidades para la que está configurado el motor, ese valor es introducido a nuestro sistema mínimo (basado en un microcontrolador PIC16F877) el cual lo procesa y actúa conforme a la información recibida y transmite esta información a la etapa de acoplamiento de la señal en la cual habilita al motor para su funcionamiento. El motor cuenta con un *encoder* del tipo óptico, en la cual obtenemos una señal de salida y es introducida a nuestro sistema mínimo tomando los flancos de subida de la señal, para que compare la información que se está midiendo y la solicitada por el usuario. En la figura 2 se muestra el diagrama a bloques de nuestro sistema (Coughlin y Driscoll, 1998).

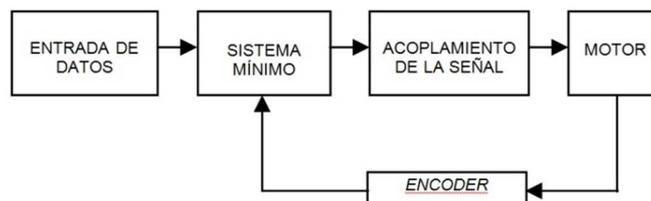


Figura 2. Diagrama a bloques del Sistema.

### 3.2 Sistema mínimo.

El microcontrolador es la parte más importante del sistema, dado que es quien toma las decisiones sobre las acciones ejecutadas. Las funciones que realiza el microcontrolador son las de verificar los datos que introduce el usuario y verificar los datos recibidos por el *encoder*; para comparar ambos y con esta información controlar la velocidad del motor. (González Vázquez José Adolfo, 2000).

El microcontrolador utilizado es el PIC16F877, con frecuencia de ejecución de 20 MHz. Una de las terminales del puerto A es utilizada para registrar los cambios de la señal del *encoder* y es configurado como entrada. Una terminal del puerto C es configurada para la salida de PWM, que habilita al motor de CD. En la figura 3 se muestra el esquema del sistema mínimo

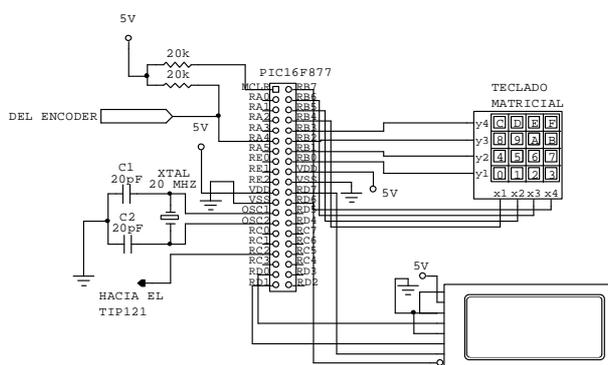


Figura 3. Sistema mínimo.

### 3.3 Acoplamiento de la señal.

El motor de CD que se utiliza es de 24 volts y de 7.5 amperes, y tiene un *encoder* del tipo óptico en uno de los extremos del eje, el cual nos sirve para obtener la señal entrada hacia el microcontrolador. El disco que pasa por el sensor óptico tiene 116 ranuras y la relación de vueltas es de 17-1. En la figura 4 se muestra un diagrama de este *encoder*.

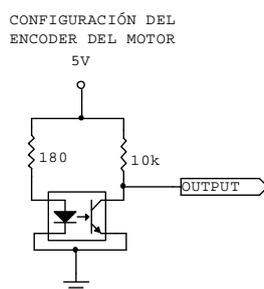


Figura 4. Diagrama del *encoder*.

La señal que obtenemos de una terminal del microcontrolador, configurada como salida de PWM; sirve como señal de habilitación para un TIP121 y que a su vez sirve como driver para el motor de CD, se coloca un diodo 1N5406 en paralelo al motor para protección (Lilen Henri, 2001).. En la figura 5 se muestra el diagrama de conexión de ésta etapa. Para calcular la frecuencia del PWM se emplea la ecuación 2.

$$F \equiv \frac{20 \times 10^6}{4 \times 1 \times PR2} \equiv 19.3 \text{ KHz.} \tag{2}$$

En donde: PR2= 255.

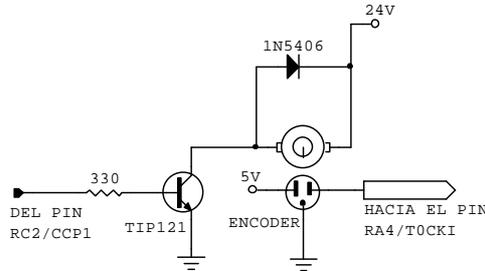


Figura 5. Diagrama de acoplamiento de la señal.

Para calcular la velocidad del motor se utilizó la ecuación 3.

$$S\omega \equiv \frac{f_c \times 60}{n \times r}. \tag{3}$$

En donde:

$S_w$  es el valor de la velocidad en r.p.m.

$f_c$  es la frecuencia de salida

$n$  es el número de slots (ventanas) en el disco

$r$  es la relación de vueltas.

### 3.4 Cálculo del control difuso.

En la figura 6 podemos observar que se utilizaron 5 conjuntos difusos de tipo trapezoidal para la variable de entrada, mientras que en la figura 7 se muestra los 5 reglas de INFERENCIA de salida. Se seleccionaron 5 rangos de valores de RPM que utilizaremos para determinar que tan alejado del valor de referencia está el sistema (tabla 1).

La variable de entrada es el error =  $V_{DESEADA} - V_{MEDIDA}$

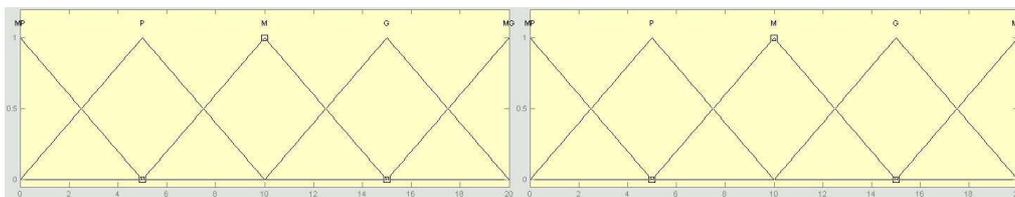


Figura 6. Conjuntos de entrada.

Tabla 1. Valores de los conjuntos de entrada.

Conjunto.	Valor en rpm.	Valor hexadecimal.
Muy Pequeño (MP)	0-5	0-5
Pequeño(P)	0-5-10	0-5-0A
Mediano (M)	5-10-15	5-0A-0F
Grande (G)	10-15-20	0A-0F-14

Muy Grande (MG)	15-20	0F-14
-----------------	-------	-------

Los conjuntos de salida están designados con los valores que se muestran en la tabla 2.

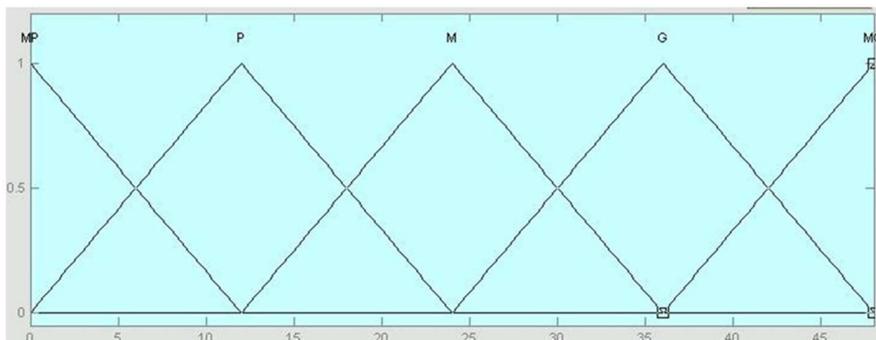


Figura 7. Conjuntos de Salida

Tabla 2. Valores de los conjuntos de salida.

Conjunto.	Valor hexadecimal.
Muy Pequeño (MP)	0-12
Pequeño(P)	0-12-24
Mediano (M)	12-24-36
Grande (G)	24-36-48
Grande (MG)	36-48

En la figura 8, se muestra un ejemplo para el cálculo de las pendientes  $m_1$  y  $m_2$ , de un conjunto difuso.

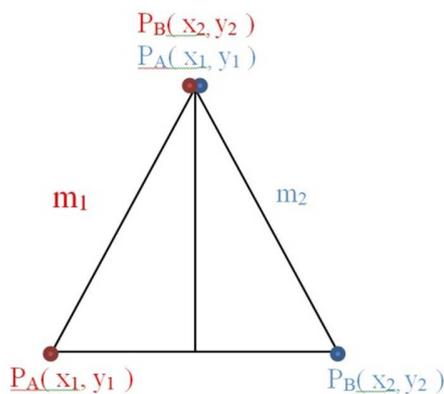


Figura 8. Cálculo de las pendientes en un conjunto difuso.

$$m_1 \equiv \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{4}$$

$$m_2 \equiv \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{5}$$

Los valores de las Pendientes para cada conjunto de la variable de entrada, se obtienen sustituyéndolos en las ecuaciones 4 y 5:

**Tabla 3.** Valores de pendientes a utilizar.

Rango.	Pendientes.	
Muy Pequeño (MP)	$m_1 \equiv 0$	$m_2 \equiv \frac{0-14}{5-0} \equiv -4$
Pequeño (P)	$m_1 \equiv \frac{14-0}{5-0} \equiv 4$	$m_2 \equiv \frac{0-14}{A-5} \equiv -4$
Medio (M).	$m_1 \equiv \frac{14-0}{A-0} \equiv 4$	$m_2 \equiv \frac{0-14}{F-A} \equiv -4$
Grande (G)	$m_1 \equiv \frac{14-0}{F-A} \equiv 4$	$m_2 \equiv \frac{0-14}{F-A} \equiv -4$
Muy Grande (MG)	$m_1 \equiv \frac{14-0}{14-F} \equiv 4$	$m_2 \equiv 0$

Determinación del offset para las diferentes combinaciones que puedan existir de los conjuntos activados.

Si se activa únicamente el conjunto Muy Pequeño (MP),  $off = 0$ .

Si se activa los conjuntos Muy Pequeño (MP) y Pequeño (P),  $off = 0$ .

Si se activa los conjuntos Pequeño (P) y Medio (M),  $off = 5$ .

Si se activa los conjuntos Medio (M) y Grande (G),  $off = A$

Si se activa los conjuntos Grande (G) y Muy Grande (MG),  $off = F$ .

Si se activa únicamente el conjunto Muy Grande (MG),  $off = F$ .

En la ecuación 6, se calcula el valor de pertenencia del primer conjunto activado.

$$\mu_1 \equiv 14 - (Error \vee -off) * m_2 \vee \quad (6)$$

$\mu_1$  = es el valor de la pertenencia del primer conjunto activado.

$Error$  = magnitud del error.

$off$  = offset del origen del universo de trabajo al origen de la pendiente  $m_2$  del primer conjunto activado.

En la ecuación 7, se calcula el valor de pertenencia del segundo conjunto activado.

$$\mu_2 \equiv (Error \vee -off) * m_1 \vee \quad (7)$$

$\mu_2$  = valor de pertenencia en el segundo conjunto activado.

$off$  = offset del origen del universo de trabajo al origen de la pendiente  $m_1$  del segundo conjunto activado.

### 3.5 Diagrama de flujo del sistema.

El sistema despliega un menú de cinco velocidades al inicio, con el teclado matricial se selecciona la velocidad que deseamos. El microcontrolador realiza el proceso; mediante el cual se logra que el motor alcance dicha velocidad. En la figura 9 y 10 se muestran los diagramas de flujo del sistema.

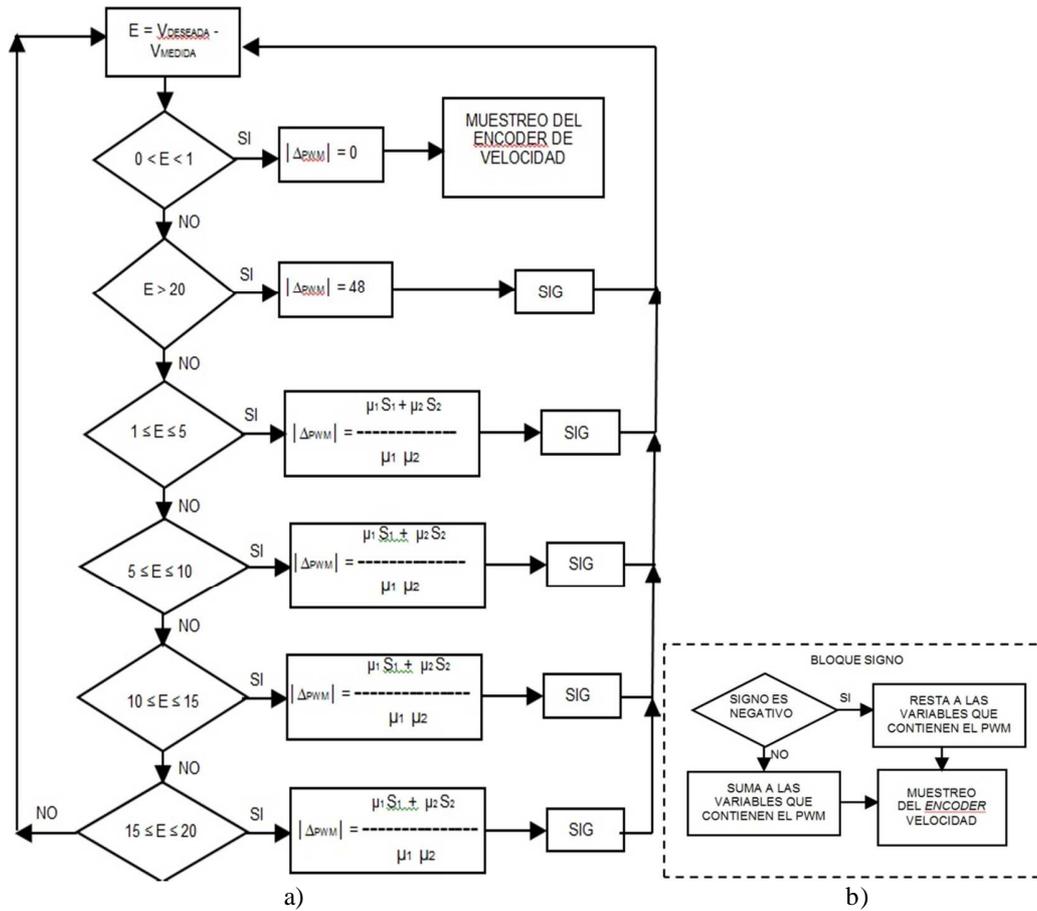


Figura 10. Diagrama de flujo del Proceso Difuso. a) Principal. b) Función signo.

**Resultados.**

Los valores de los conjuntos de salida se obtuvieron en base a pruebas de estabilidad y tiempo para alcanzar la velocidad deseada del motor. Con conjuntos de incremento muy pequeños (incrementos de 4 unidades), el tiempo para alcanzar dicha velocidad se hace demasiado lento. Si los conjuntos eran demasiado grandes (incrementos de 25 unidades) el sistema se hace demasiado inestable, con variaciones de 8 RPM -10 RPM en las velocidades medidas. Terminando los ajustes y correcciones, se implementó el algoritmo y se obtuvieron resultados finales:

Frecuencia máxima del PWM de 19.6 Khz., con la resolución de 10 bits. Las velocidades de control del motor que quedaron establecidas en el sistema debido a la estabilidad y a su funcionamiento, teniendo un margen de error de ± 1 RPM, son:

Revoluciones por minuto (RPM).	Tiempo para término de proceso.
80	240 seg.
120	210 seg.
160	180 seg.
200	150 seg.
240	120 seg.

Los resultados presentados en este artículo, fueron obtenidos sin tener en cuenta la viscosidad del líquido. Cuando se realizaron las pruebas en el recipiente de mezclado, se verificó una reducción del 1% en la velocidad que se quería obtener.

### Conclusiones.

Realizadas las pruebas necesarias al sistema de control y haber obtenido resultados satisfactorios, se llega a la conclusión que presenta un buen desempeño. Los conjuntos difusos obtenidos fueron los óptimos para las velocidades que se deseaban, estas velocidades se mantienen constantes y la estabilidad del mismo es confiable. Además los cambios de velocidad son suaves.

El proyecto en el aspecto económico presenta la característica de ser viable, ya que los componentes utilizados son comerciales (motor, TIP121, Microcontrolador PIC16F877) y además de un bajo costo.

### Referencias Bibliográficas.

**Coughlin Robert F., Driscoll Frederick F., (1998).** “*Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*”, Prentice Hall. México.

**González Vázquez José Adolfo, (2000).** “*Introducción a los microcontroladores. Hardware, software y aplicaciones*”. Mcgraw Hill. México.

**Lilen Henri, (2001).** “*Tiristores y triacs*”, Alfaomega-Marcombo. México.

**Ross Timothy J., (2002).** “*Fuzzy logic with engineering applications*”. Mc. Graw Hill. México.

### 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. Siendo Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundó y asesora el “Club de robótica del ITTG”. Colabora en la línea de investigación de “Robótica” de Ingeniería electrónica y dirige el área de trabajo en “sistemas aéreos autónomos”.



**José Ángel Zepeda Hernández** es Ingeniero Industrial en Eléctrica y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. 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 de la línea de investigación y generación del conocimiento “Instrumentación”.



**Raúl Moreno Rincón** 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. 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, en donde ha realizado proyectos como: Sistema de alarma para personas con deficiencia auditiva basado en XBEE, robot de cafetería, araña hexápoda, entre otros.



**Francisco Ronay López Estrada** recibió su Doctorado en Ciencias en Control Automático por la universidad de Lorraine, France, en 2014, y su doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación (CENIDET) en 2015. Recibió el grado de maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el CENIDET en 2008. Ha sido profesor del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2008 adjunto al departamento de Ingeniería Electrónica. Sus intereses de investigación son: Los sistemas lineales de parámetros variantes, sistemas de detección de fallas, sistemas descriptores, control de procesos y control de vehículos aéreos no tripulados.



**Karla del Carmen Chimeca Rossier** es Licenciada en Electrónica, egresada de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en Puebla, Puebla. Es profesor de tiempo parcial en el área de soporte y mantenimiento de equipo de cómputo del Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica CONALEP 312 de Tuxtla Gutiérrez desde 2005.