

CONTROL DIFUSO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN UN SISTEMA DE DESARROLLO PSoC 5

Mier Quiroga Luis Antonio^{1,a}, Benítez Read Jorge Samuel^{1,2,b},
López Callejas Régulo^{1,2}, Segovia de los Ríos José Armando^{1,2}.

¹Instituto Tecnológico de Toluca

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Av. Tecnológico, Ex rancho La Virgen, Metepec, Edo. de México, C.P. 52140. Tel. y Fax: (722)2087224

²Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Departamento de Automatización e Instrumentación

Carretera México-Toluca, La Marquesa, Ocoyoacac, Estado de México, C.P. 52750. Tel.(55)53297200

^aluanmiq@yahoo.com.mx, ^bjorge.benitez@inin.gob.mx

RESUMEN

Se presenta un sistema de control difuso de velocidad por etapas para un motor de inducción trifásico. El sistema de control es implementado en un sistema de desarrollo PSoC (Programmable System on Chip por su acrónimo en inglés). Se mejora la respuesta dinámica del sistema de control del motor, dividiendo el intervalo total de velocidad en tres subintervalos y utilizando un controlador difuso para cada uno. La respuesta obtenida al unir los tres controladores es comparada con la respuesta de un controlador difuso que trabaja sobre el intervalo total de velocidad del motor.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos se pueden encontrar en casi todos los procesos de producción. Se estima que los motores eléctricos consumen cerca del 46% de la energía eléctrica generada en el mundo [1]. No obstante, las deficiencias en el diseño de los motores eléctricos y la operación de éstos en regímenes inadecuados provocan que cerca del 40% de la energía consumida se disipe en pérdidas. Dicho problema puede ser resuelto mediante la optimización del diseño y construcción de los motores, así como de los sistemas de control [2].

El control difuso es una alternativa práctica para una amplia variedad de retos en el control aplicado. Proporciona un método práctico para realizar controladores no lineales mediante el uso de información obtenida por la experiencia [3].

El avance tecnológico de los sistemas de procesamiento digital facilita la implementación del sistema de control difuso. Esto ha permitido que se incremente su utilización en el campo de la electrónica de potencia, específicamente, en el control de máquinas eléctricas [4], [5].

2. DESARROLLO

Se comienza describiendo la arquitectura y funcionamiento del microcontrolador PSoC 5. Posteriormente se determina la forma en que se puede variar la velocidad del motor de inducción trifásico. Finalmente, se plantea el sistema de control difuso del motor.

2.1 El Microcontrolador PSoC 5

PSoC es una tecnología aplicada al desarrollo de microcontroladores. Dicha tecnología nos permite integrar en un solo circuito integrado microcontrolador, memoria, bloques analógicos y digitales. Estos bloques se programan mediante lenguaje C o ensamblador.

Existen tres categorías; PSoC 1, PSoC 3 y PSoC 5. El PSoC 5 es la categoría utilizada para este trabajo. Este microcontrolador tiene las siguientes características:

- 32 bits con arquitectura ARM Cortex M3. 67MHz y 84MIPS.
- Se programa mediante el software PSoC Creator 2.0.

La cantidad de bloques analógicos y digitales varía de acuerdo a la familia de microcontrolador seleccionada. El número de bloques consumidos depende del dispositivo montado para el desarrollo del proyecto.

En cada bloque se puede montar:

- Memoria programable.
- Memoria RAM.
- Convertidores analógico-digitales (resolución de hasta 14 bits.)
- Convertidores digital-analógicos (resolución de hasta 9 bits.)
- Amplificadores de ganancia variable.
- Amplificadores inversores.
- Comparadores.
- Filtros analógicos y digitales.

- Temporizadores de 8, 16 y 32 bits.
- Moduladores de ancho de Pulso.
- Interfaces de comunicación.

2.2 El motor de inducción trifásico

El motor de inducción trifásico está formado por un conjunto de láminas delgadas de aluminio o hierro fundido sujetas para formar un cilindro con ranuras como se muestra en la figura 1. En dichas ranuras son insertadas bobinas. Cada grupo de bobinas, junto con el núcleo alrededor, forman un electroimán. El número de polos de un motor de inducción, depende de la conexión interna de los embobinados del estator. Al conectar los embobinados del estator a la fuente de alimentación, la corriente que circula a través de ellos magnetiza al estator, generando un campo magnético rotacional que gira a una velocidad síncrona.

El rotor de jaula de ardilla consiste de un núcleo cilíndrico hecho con barras de aluminio. Las barras son unidas mecánica y eléctricamente en sus extremos por anillos, dando forma de una jaula cerrada. El campo magnético rotacional del estator se induce en el rotor generando un campo electromagnético. Los campos magnéticos de estator y rotor interactúan generándose una fuerza de repulsión entre ellos provocando así, el giro del rotor [6].

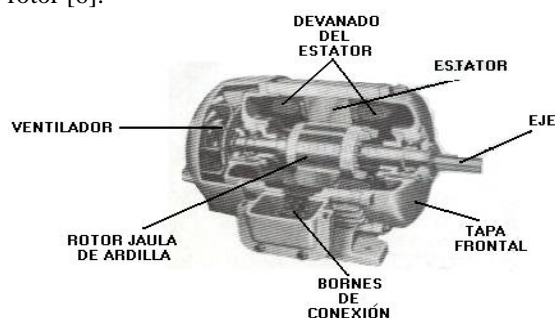


Fig. 1. Motor de inducción con rotor de jaula de ardilla.

Existen tres formas de variar la velocidad de los motores de inducción de jaula de ardilla:

1. Cambiando el número de polos del estator.
2. Reduciendo el voltaje aplicado al estator.
3. Cambiando la frecuencia del voltaje aplicado al estator.

Con el primer método se requieren motores especialmente diseñados para el cambio del número de polos. El cambio se realiza mediante la conmutación adecuada de dispositivos que permitan la conexión serie o paralelo de los devanados del estator. Cuando se aplica el segundo

método, al reducir el voltaje aplicado al estator, se reduce el par máximo y el nominal en proporción al cuadrado del voltaje aplicado al estator. Al reducir el voltaje lo suficiente como para producir una disminución de la velocidad del motor, genera que la regulación de velocidad sea mala e incluso inestable ante cambios de carga. El método que comúnmente se aplica es la variación de frecuencia del voltaje aplicado al estator, ya que la velocidad del motor responde de acuerdo a la siguiente ecuación [7]:

$$S_r = 120 (f / P) \quad (1)$$

Donde f es la frecuencia del voltaje que se aplica al estator del motor y p es el número de polos del motor. Cuando se modifica la velocidad del motor de inducción se debe mantener el mismo flujo magnético en el estator. Si se reduce la frecuencia del voltaje aplicado al estator, se debe disminuir en la misma proporción el voltaje del estator. A menor velocidad, se reduce la capacidad del motor para autoventilarse, la corriente demandada por el motor y por consiguiente la potencia de entrada se incrementa para mantener constante el flujo magnético del estator generándose más calor interno. También se ve afectada la eficiencia, decrementándose ésta al disminuir la velocidad. En grandes velocidades ocurre lo contrario, a mayores frecuencias y voltajes de estator se reduce la corriente y potencia de entrada, por lo que se incrementa la velocidad, eficiencia y ventilación propia del motor [7].

2.3 El control difuso

El control difuso es una de las técnicas más utilizadas cuando no se tiene el conocimiento exacto del sistema que se desea controlar. En el diseño del controlador se establecen un conjunto de reglas sobre el control del proceso. Las reglas pueden ser establecidas mediante las decisiones tomadas y acciones realizadas por el operador que controla el proceso. También la base de reglas puede ser construida a partir de la experiencia de un ingeniero en control que ha realizado el modelo matemático, un amplio análisis y algoritmos de control del proceso a controlar [3].

Tal conocimiento es cargado en el controlador difuso para automatizar el proceso en cuestión.

Los controladores difusos, al igual que los “controladores clásicos”, toman los valores de las variables de entrada, realizan algún procedimiento con ellas y deciden como modificar las variables de salida, afectando estas últimas a la planta. La diferencia esencial es que no procesan ecuaciones

ni tablas, procesan reglas para decidir como cambiar las salidas [3].

Un sistema de control difuso está compuesto de los siguientes elementos [3].

1. Base de reglas (conjunto de reglas If-Then). Contiene una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del operador experto sobre cómo lograr un buen control.
2. Mecanismo de inferencia (también llamado máquina de inferencia o módulo de inferencia difusa). Emula la decisión del experto. Interpreta y aplica el conocimiento adquirido sobre cómo realizar el mejor control de la planta.
3. Interface de difusificación. Convierte las entradas del controlador en información que el mecanismo de inferencia puede usar fácilmente para activar y aplicar reglas.
4. Interface de desdifusificación. Convierte las conclusiones del mecanismo de inferencia en las correspondientes entradas del proceso.

3. SISTEMA DE CONTROL DEL MOTOR

Se diseñó inicialmente un controlador difuso para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico en un intervalo de velocidad de 0rpm hasta 600rpm. El diagrama a bloques del sistema de control se muestra en la figura 2.

Se comenzó por determinar la velocidad que desarrolla el motor al modificar la frecuencia del voltaje trifásico generado por el inversor. La frecuencia del voltaje varía al modificar el parámetro “ α ” en la programación del microcontrolador. El parámetro “ α ” permite variar la frecuencia de las senoidales utilizadas como moduladoras en los bloques PWM del PSoC.

El fabricante del microcontrolador PSoC, proporciona código en lenguaje C llamado interface de programación de aplicación (API), para la configuración y manejo de los módulos del PSoC.

Mediante las API se indica el valor de la señal moduladora que se compara con la señal portadora del PWM. Con esta comparación se determina el ancho del pulso generado. El módulo PWM permite comparar valores en un rango de magnitud de 0 a 249.

En la tabla 1 se muestran los valores de frecuencia y velocidad desarrollados por el motor de inducción al modificar el parámetro “ α ”.

Tabla 1. Comportamiento del motor de inducción.

α	Frecuencia (Hz)	Velocidad (rpm)
10	77	500
20	64	496
30	50	480
40	40	458
50	34	416
60	31	396
70	28	375
80	25	333
90	23	292
100	21	271
110	19	250
120	18	230
130	17	208
140	16	167

En la figura 3 se muestran las funciones de pertenencia de las entradas del controlador difuso “vel” (velocidad del motor), “error” (error en la velocidad del motor) y de la salida “ α ”.

Para realizar una modulación senoidal trifásica, primero se generó un arreglo de 956 elementos que contiene los valores de magnitud de un ciclo, de una señal senoidal con frecuencia de 1Hz. Su amplitud varía desde 0 hasta 249. Este arreglo será la señal moduladora de un primer PWM, es decir, una fase del sistema trifásico. Para obtener el arreglo que sirva como señal moduladora de un segundo PWM, se recorren los datos del primer arreglo el equivalente a 120°. De forma similar se recorren los datos del primer arreglo el equivalente a 240° o los datos del segundo arreglo 120° para obtener un arreglo que modulará un tercer PWM. Cada módulo PWM genera dos salidas complementarias con su respectivo tiempo muerto.

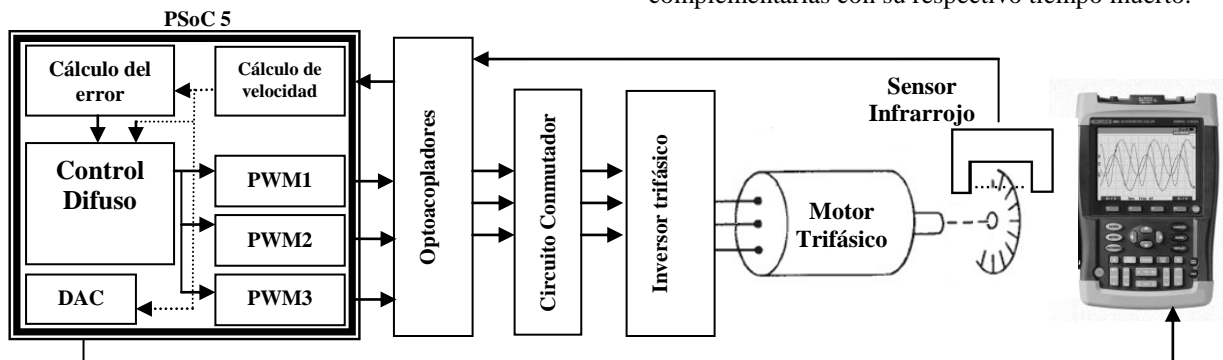


Fig. 2 Diagrama de bloques del sistema de control.

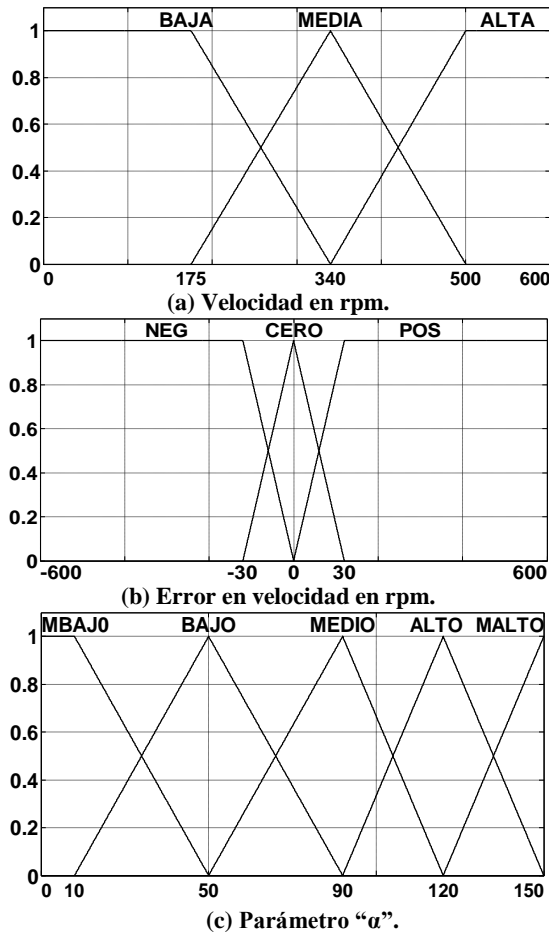


Fig. 3 Funciones de pertenencia del control difuso.

A continuación se muestra la base de reglas del controlador difuso:

α		Vel		
		BAJA	MEDIA	ALTA
Error	NEG	MALTO	ALTO	MEDIO
	CERO	MALTO	MEDIO	BAJO
	POS	ALTO	BAJO	MBAJO

Posteriormente se diseñó un controlador difuso integrado por tres controladores difusos. Ahora el bloque del controlador difuso mostrado en la figura 2 se divide en tres controladores difusos. Cada controlador está formado por los elementos mencionados en la sección 2.3. Cada uno trabaja en un intervalo de velocidad del motor diferente. Se mantuvieron las funciones de pertenencia del "error" del primer controlador, sólo se redujo el intervalo del universo de -200 a 200. Se modificaron las funciones de pertenencia de la

entrada "vel" y de la salida " α ". En la figura 4 se muestra la función de pertenencia de "vel" y de la salida " α " del controlador en baja velocidad (0 – 200 rpm). En la figura 5 se muestran las funciones de pertenencia de "vel" y del parámetro " α " del controlador de media velocidad (201 – 400rpm). La figura 6 muestra las funciones de pertenencia del controlador para velocidad alta (401 – 600 rpm).

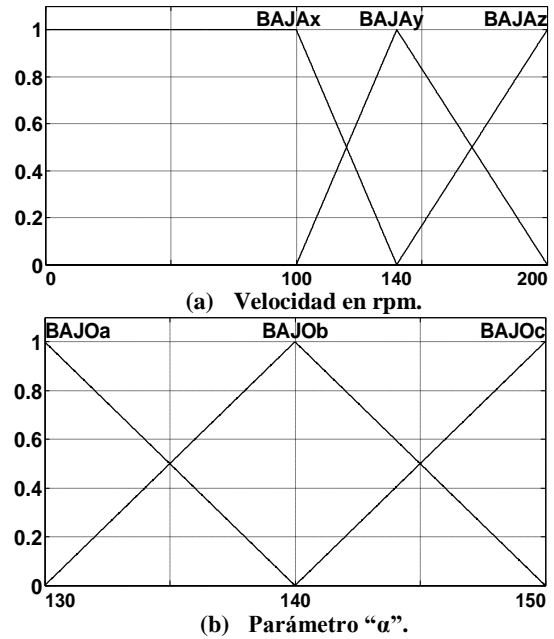
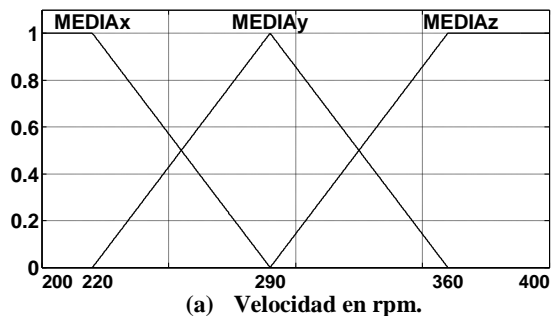


Fig. 4 Funciones de pertenencia del control difuso en baja velocidad.

La base de reglas del controlador en baja velocidad es:

α		Vel		
		BAJAx	BAJAY	BAJAz
Error	NEG	BAJOc	BAJOc	BAJO b
	CERO	BAJOc	BAJO b	BAJO a
	POS	BAJO b	BAJO a	BAJO a



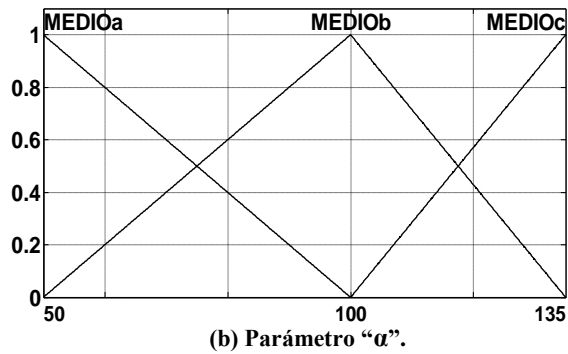


Fig. 5 Funciones de pertenencia del control difuso en media velocidad.

La base de reglas del controlador en media velocidad es:

α		Vel		
		MEDIAx	MEDIAy	MEDIAz
Error	NEG	MEDIOc	MEDIOc	MEDIOb
	CERO	MEDIOc	MEDIOb	MEDIOa
	POS	MEDIOb	MEDIOa	MEDIOa

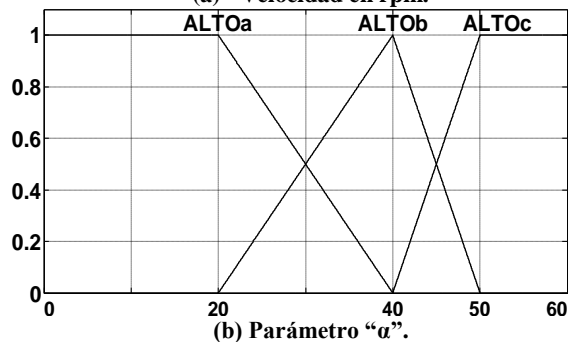
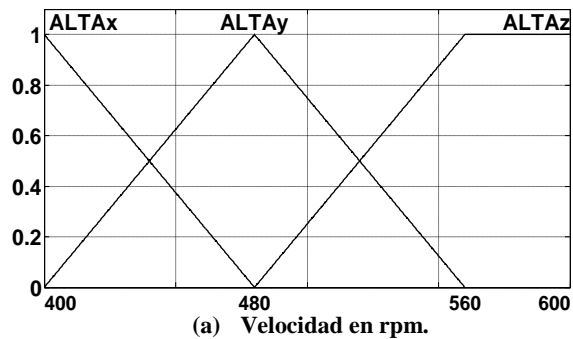


Fig. 6 Funciones de pertenencia del control difuso en alta velocidad.

La base de reglas del controlador en alta velocidad es:

α		Vel		
		ALTAx	ALTAy	ALTAz
Error	NEG	ALTOc	ALTOc	ALTOb
	CERO	ALTOc	ALTOb	ALTOa
	POS	ALTOb	ALTOa	ALTOa

4. RESULTADOS

En el PSoC se configuró un DAC para entregar $375\mu\text{V/rpm}$ del motor. En la figura 7 se muestra la respuesta del primer sistema de control difuso de velocidad del motor con una velocidad de referencia de 416 rpm y cambio en la referencia tipo escalón a una velocidad de 500 rpm.

En la figura 8 se muestra la respuesta del control con una velocidad de referencia de 333 rpm y cambio en la referencia a una velocidad de 475 rpm. En la figura 9 se muestra la respuesta del con una velocidad de referencia de 190 rpm y cambio en la referencia a una velocidad de 240 rpm.

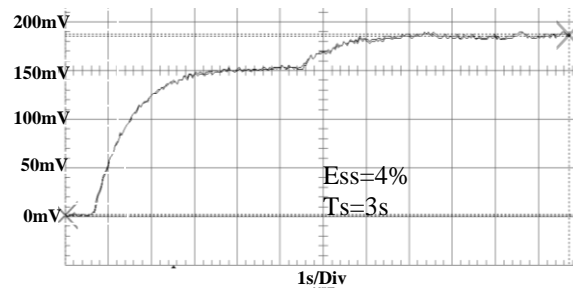


Fig. 7 Respuesta del control difuso en velocidad alta.

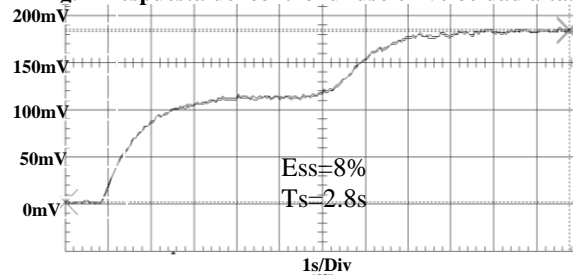


Fig. 8 Respuesta del control difuso en velocidad media.

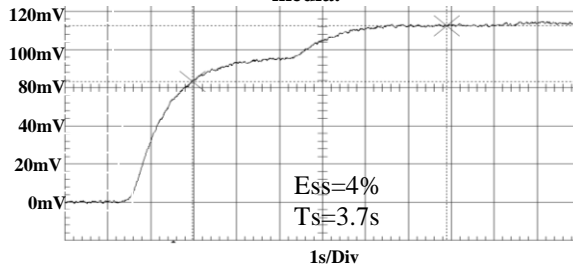


Fig. 9 Respuesta del control difuso en velocidad baja.

El control difuso por partes fue sometido a las mismas entradas con que fue evaluado el primer controlador difuso. Su respuesta en alta velocidad se muestra en la figura 10. La respuesta del control en media velocidad se muestra en la figura 11 y en la figura 12 se muestra la respuesta en baja velocidad.

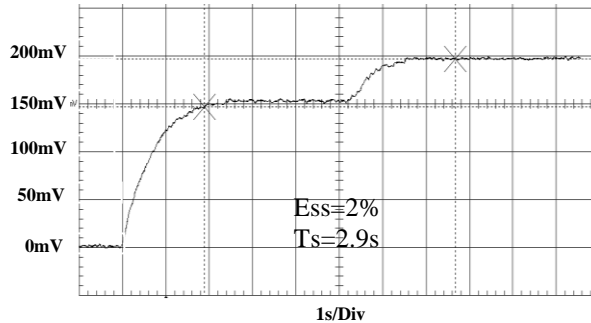


Fig. 10 Respuesta del control difuso por partes en velocidad alta.

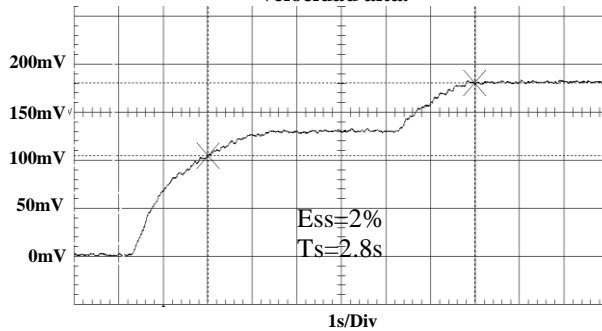


Fig. 11 Respuesta del control difuso por partes en velocidad alta.

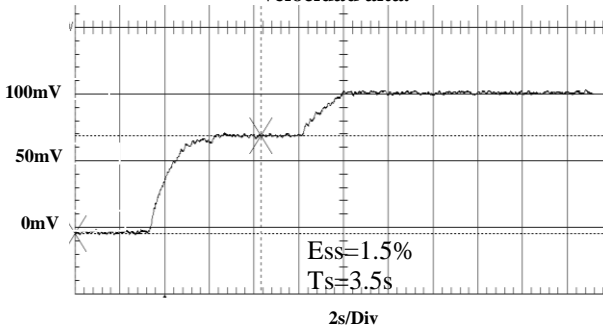


Fig. 12 Respuesta del control difuso por partes en velocidad baja.

5. CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de control difuso de velocidad de un motor de inducción trifásico mediante un sistema de desarrollo basado en el microcontrolador PSoC 5. Con este tipo de tecnología se aprovecha la inclusión de bloques analógicos y digitales en un solo circuito integrado. La división en partes del sistema de control de

velocidad del motor redujo el error en estado estable. También se logró reducir, aunque no significativamente, el tiempo de establecimiento. Se hará una adaptación difusa de un conjunto de funciones de pertenencia de la variable de salida del controlador difuso para analizar la respuesta de la velocidad del motor [8].

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACyT por el apoyo recibido para el desarrollo del proyecto y agradecemos al COMECyT por el apoyo recibido para asistir a la presentación de este artículo en el ELECTRO 2012.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Waide, P.; Brunner, C. U.; *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, Working Paper, Energy Efficiency Series, International Energy Agency, pp. 11-13. 2011.
- [2] Rodríguez A. J.; *Control Vectorial Óptimo de Accionamientos Eléctricos Asíncronos con Par Resistente Dependiente de la Velocidad*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1999.
- [3] Passino, K. M.; Yurkovich S.; *Fuzzy Control*, Editorial Addison Wesley, pp. 23-98. 1998.
- [4] Bostan, A. H.; Yazdian, V. A.; Asghar, T.; *Using Fuzzy Controller in Induction Motor Speed Control with Constant Flux*, World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 5. pp. 91-94. November 2005.
- [5] Díaz, R. J.; Acevedo, G. T.; Pardo, G. A.; *Controlador Lógico Difuso Aplicado al Control de Motores de Inducción*, Memoria del XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático y VI Congreso Venezolano de Automatización y Control, Universidad De Los Andes, pp. 45 – 53. v. 1, Noviembre 2008.
- [6] Parekh, R.; *AC Induction Motor Fundamentals*, Application Notes, Microchip Technology Inc., 2003.
- [7] Kosow, I. L.; *Máquinas Eléctricas y Transformadores*, Segunda Edición, Ed. Pearson – Prentice Hall, pp. 313 – 340, 1993.
- [8] Benitez, R. J.; Vélez, D. D.; *Controlling Neutron Power of a TRIGA Mark III Research Nuclear Reactor with Fuzzy Adaptation of the Set of Output Membership Functions*, Studies in Fuzziness and Soft Computing: Fuzzy Systems and Soft Computing in Nuclear Engineering, vol. 38, pp. 83-110, Physica-Verlag Heidelberg, 2000.