

**“ENERGY SAVER” DIGITAL CONTROL OF A SINGLE PHASE INDUCTION  
MOTOR USING A DSP**

**CONTROL DIGITAL BASADO EN DSP PARA UN MOTOR DE INDUCCIÓN  
MONOFÁSICO “AHORRADOR DE ENERGÍA”**

**PhD. Omar Pinzón Ardila, Esp. Mario Iván Useche Gamboa  
Esp. Jorge Iván Díaz Martínez**

**Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería Electrónica**  
Bucaramanga, Santander, Colombia. Tel.: 57-6796220, Ext. 593  
E-mail: omar.pinzon@upb.edu.co, mario.gamboa@correo.upbbga.edu.co

**Abstract:** This paper focuses on the study of different control techniques applied to other single phase induction for optimal performance and reduce levels of disturbance caused by these machines in industry or home. This work implements the control of a single phase motor speed induction by two types of controls: the first called control voltage / frequency and the second control called proportional and integral (PI). The system controller implemented with a DSP 56F8322, which is developed low level programming and running modules display of speed and control parameters.

**Keywords:** SPWM modulation, single phase motor, motor control, switch module power.

**Resumen:** El presente artículo se centra en el estudio de las diferentes técnicas de control aplicadas a motores monofásicos de inducción para obtener un óptimo desempeño y reducir los niveles de perturbaciones ocasionados por estas máquinas en la industria o el hogar. En este trabajo se implementa el control de velocidad de un motor monofásico de inducción mediante dos tipos de controles: el primer control denominado tensión/frecuencia y el segundo control denominado proporcional e integral (PI). El controlador del sistema se implementa con un DSP 56F8322, donde se desarrolla la programación en bajo nivel y se ejecutan los módulos de visualización de velocidad y los parámetros de control.

**Palabras clave:** Modulación SPWM, motor monofásico, control de motores, módulo de commutación de potencia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los principios de funcionamiento de los inversores al igual que los dispositivos electrónicos de potencia se basan en la conmutación generando distorsiones armónicas y perturbaciones en la onda fundamental de la red eléctrica.

Por lo anterior, es necesario mitigar y controlar este tipo de fenómenos para conseguir un mejor suministro eléctrico y un ahorro de energía.

Buscando aplicar tecnologías de punta, en este trabajo se plantea diseñar un control digital utilizando un DSP para controlar la velocidad de motores monofásicos de inducción con el fin de encontrar un funcionamiento más eficiente y tener la posibilidad de probar las diferentes técnicas de control de velocidad del sistema.

## 2. METODOLOGÍA

En el estudio de los controles de motores monofásicos el modelo es multivariable, no lineal y con un efecto de acoplamiento interno. Dado que el análisis de estabilidad es complejo, se requiere utilizar la simulación por computador para comprobar el desempeño de un nuevo sistema de control. Una vez que la estructura y los parámetros del sistema se determinan mediante simulación se puede implementar un prototipo.

El sistema se puede modelar linealizando el sistema en un punto de operación estable para una perturbación de pequeña señal, obteniéndose la función de transferencia del modelo entrada-salida. Con este modelo se consigue una función de trasferencia donde se puede utilizar la teoría clásica de control de control clásico. Dado que el sistema es no lineal, los polos, ceros, y ganancia de la función de transferencia variaran conforme cambia el punto de operación del sistema. Lo anterior se supera diseñando los parámetros de control de tal forma que el sistema es estable y con un desempeño aceptable para el peor punto de operación.

### 2.1 Diseño e implementación de electrónica de potencia aplicada a motores monofásicos de inducción

En esta etapa se realiza el algoritmo de programación de la modulación SPWM. Adicionalmente se hace la adecuación del controlador de IGBT's con un tiempo muerto que permite una conmutación adecuada.

### 2.2 Diseño y aplicación de las técnicas de control

En esta etapa se implementa el control de velocidad de un motor monofásico de inducción mediante dos tipos de controles: el primer control denominado tensión/frecuencia (V/Hz) se integra una rampa de aceleración y un potenciómetro se utiliza para ajustar la velocidad.

El segundo control denominado proporcional e integral (PI). Para la aplicación de estas técnicas de control se implementa una modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM) que produce las señales de disparo puerta de un módulo monofásico de interruptores de potencia. El lazo cerrado del sistema se cierra realimentando la señal del *encoder* de cuadratura.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 3.1 Modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM)

En la fig. 1 se muestra un esquema generalizado de un circuito SPWM. La construcción del circuito SPWM se lleva a cabo utilizando un circuito comparador. Una de las entradas al comparador es una señal tipo rampa a frecuencia constante.

La otra entrada del comparador es una señal de control sinusoidal que determina la salida del inversor. La SPWM se utiliza para reducir la potencia total entregada a la carga sin generar pérdidas, por otro lado, reduce el consumo de potencia, disminuyendo el posible calentamiento del motor.

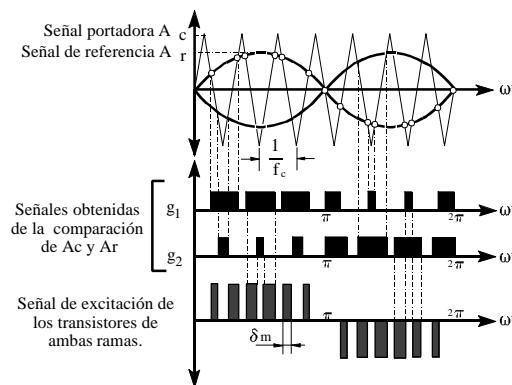


Fig. 1. Formas de onda SPWM.  
Fuente: Modern Power Electronics and AC Drives.

La relación entre las frecuencias portadora y referencia se denomina índice de modulación de frecuencia

$$mf = \left( \frac{f_{portadora}}{f_{referencia}} = \frac{f_{triangular}}{f_{seno}} \right) \quad (1)$$

Las frecuencias armónicas existen alrededor de los múltiplos de la frecuencia de conmutación (al aumentar la frecuencia de la portadora aumentan las frecuencias en las que se producen los armónicos).

En la fig. 2 se observa la modulación medida en ambos interruptores del prototipo experimental. Las señales poseen una amplitud de 15V suficientes para disparar el controlador del inversor.

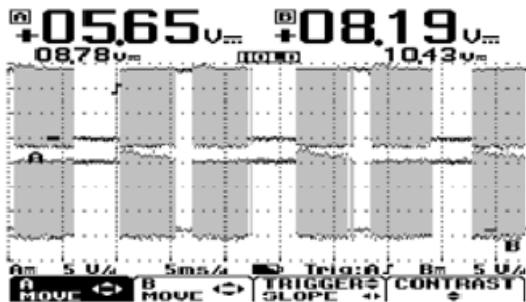


Fig. 2. Modulación medida en el prototipo.

Fuente: Los autores.

Datablock	
Name = Input A	Input B
Date = 28/03/2008	28/03/2008
Time = 10:32:44 p.m.	10:32:44 p.m.
Y Scale = 5 V/Div	5 V/Div
Y At 50% = -5.0V	13.8V
X Scale = 5 ms/Div	5 ms/Div
X At 0% = -10.0 ms	-10.0 ms
X Size = 250 (250)	250 (250)
Maximum = 15.0V	16.6V
Minimum = -2.2V	-2.4V
Cursor Values	
X1: 0.0 ms	
X2: 16.6 ms	
dX: 16.6 ms	
Y1: -1.2 14.2V	
Y2: -1.4 14.0V	
dY: -0.2 -0.2V	

Fig. 3. Datos de la modulación.

Fuente: Los autores.

En la fig. 3 se muestra los datos de la modulación donde se observa la frecuencia fundamental de la modulación en 60Hz.

### 3.2 Control en lazo abierto (V/Hz)

Para mantener el flujo constante en una máquina de inducción, la tensión del estator debe ser proporcional a la frecuencia. En la tabla 1 se muestra la relación V/Hz utilizada en el prototipo experimental.

Tabla 1. Control Tensión/Frecuencia

V	Hz
25.6	7
36.6	10
73.3	20
110	30
146.6	40
183.3	50
220	60

### 3.3 Control en lazo cerrado (PI)

La expresión de un controlador proporcional-integral se define mediante la función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2)$$

Donde  $T_i$  se denomina el tiempo integral.

El control PI para el circuito esta dado por.

$$v = p + i_{k+1} \quad (3)$$

Donde I es:

$$p = K_p * (b * r - y) \quad (4)$$

$$i_{k+1} = i_k + b_i * (r - y) + (u - v) \quad (5)$$

Dónde:

r = Set Point o referencia (canal ADC)

y = Lectura del encoder (canal ADC)

b = Es la variación de la referencia

K<sub>p</sub> = Constante proporcional

I<sub>k+1</sub> = Nuevo estado

I<sub>k</sub> = estado anterior

b<sub>i</sub> = k<sub>i</sub> \* h = constante integral \* tiempo de muestreo

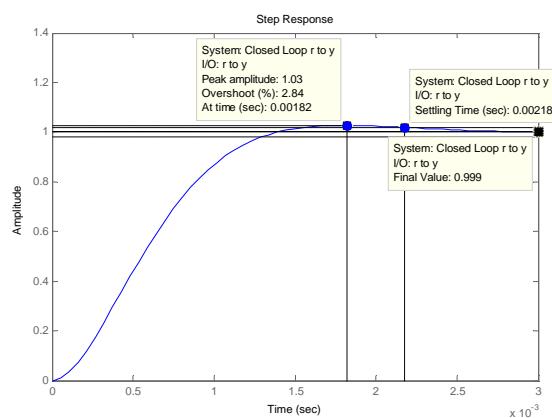
u = Control volt/Hz

$$v = p + i_{k+1}$$

Si la función de trasferencia del motor de inducción es:

$$P = \left( \frac{600}{s + 1} \right) \quad (6)$$

Utilizando la herramienta sisotool de Matlab se diseña el controlador para un tiempo de establecimiento de 2ms y un porcentaje de sobreceso 2.84% dando como resultado la fig. 4.

Fig. 4. Parámetros de diseño.  
Fuente: Los autores.

Obteniéndose como resultado una constante proporcional de K<sub>p</sub>= 11615 y un tiempo integral de K<sub>i</sub>= 2.93.

### 3.4 Comutación del inversor

La función de un inversor es producir una señal sinusoidal alterna en la salida con magnitud y frecuencia controladas. En la fig. 5 se muestra el circuito de un inversor de medio puente. Su estructura consta de dos condensadores conectados en serie. Los condensadores son elevados para mantener constante la tensión.

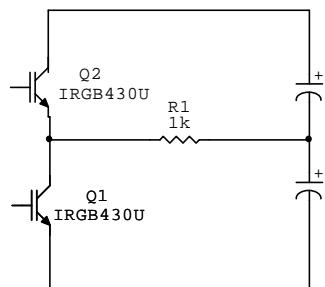


Fig. 5. Circuito inversor.  
Fuente: Los Autores.

### 3.5 Control mediante el IR2136

Para implementar los disparos a los interruptores de potencia se utiliza el circuito integrado IR2136 de la empresa *International Rectifier*.

Este dispositivo permite disparar seis salidas simultáneamente y cuenta con una señal de falla para indicar que hay sobre-corriente o sobre-voltaje. En la fig. 6 se muestran las señales de entrada SPWM en el circuito integrado IR2136. La señal que se muestra en el canal A pertenece a la entrada Hi (alta) y el canal B pertenece a la entrada L<sub>o</sub> (Baja). Estas señales realizan un tiempo muerto (1.5μS) y se comparan con una lógica que se encarga de la protección de sobre-corriente.

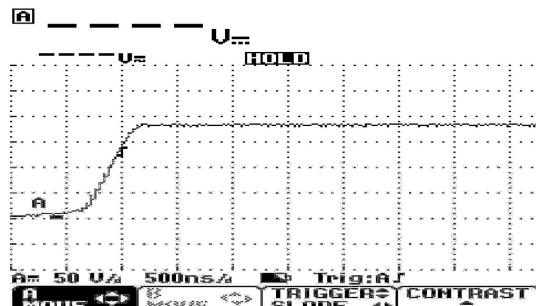


Fig. 6. Tiempo muerto.  
Fuente: Los autores.

### 3.6 Disparo y comutación de los IGBT's

En la fig. 7 se observan la tensión colector- emisor del IGBT alto, la señal de disparo de alta posee una tierra flotante, con una amplitud de 155 V.

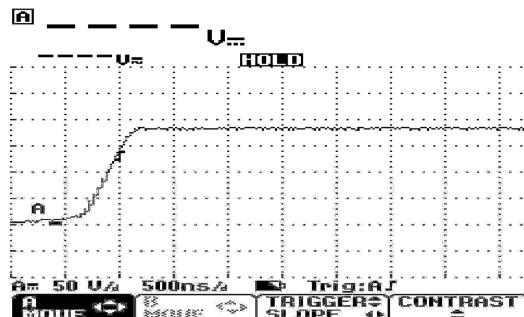


Fig. 7. Comutación IGBT alto.

Fuente: Los Autores.

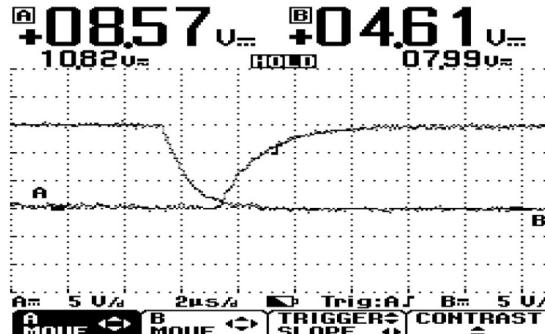


Fig. 8. Comutación IGBT bajo.

Fuente: Los Autores.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

### 4.1 Módulo de Potencia

Esta etapa consta de un filtro EMI, el cual se utiliza para disminuir las posibles interferencias electromagnéticas que existan entre dispositivos eléctricos. En el módulo de potencia también se integra una etapa de rectificación 600V/35A (KBPC3506), suficiente para soportar la carga utilizada. El módulo de potencia utiliza dos condensadores de 4700μF/450VDC que alimentan el puente inversor formando de esta forma el inversor de medio puente.



Fig. 9. Prototipo Obtenido.

Fuente: Los Autores.



*Fig. 10. Módulo de potencia.  
Fuente Los Autores*

Por otra parte se tiene la fuente, la cual será la encargada de energizar el driver IR2136 y la parte de control del prototipo conformada por un transformador que reduce el voltaje a 32VAC y pasa por un puente de diodos el cual va reduciendo su voltaje necesario progresivamente por medio de unos reguladores de tensión encargados de asegurar y distribuir la tensión adecuada al circuito.

El IR2136 es un actuador de potencia, el cual recibe la señal de la modulación SPWM y es la encargada de la conmutación correcta el Módulo de IGBT's para regular la velocidad del motor, éste módulo de IGBT's cuenta con tres terminales: el colector por el cual entra la corriente, el emisor por donde sale la corriente y la puerta por donde llega la señal de control y el Driver que posee una señal de falla para indicar si hay sobre-corriente o sobre-voltaje, en éste caso se mide la sobre-corriente por medio de una resistencia *Shunt*, el cual mide la corriente en el neutro del circuito de potencia. El voltaje producido en la resistencia *shunt* se compara en un (LM311) para disparar el modulo mediante la ITRIP del driver.



*ig. 11. Módulo de IGBT's.  
Fuente. Los Autores*

#### 4.2 Módulo de Control

El módulo de control se conforma principalmente por el DSP56f8322 el cual maneja los distintos tipos de control y la modulación. El sistema permite manipular las variables de velocidad y visualizarla en un LCD.

El módulo cuenta con reguladores de tensión, uno de 3.3V para el DSP (UA78M33) y otro regulador de 5V (LM7805) para la pantalla LCD donde se muestra el menú para la configuración o variación de los parámetros del sistema de control.

Es importante resaltar que el sistema cuenta con un circuito de aislamiento para el driver HCPL314j. Este opto-acoplador se utiliza para aislar las tierras del DSP y driver con el propósito asegurar la seguridad y confiabilidad del diseño.



*Fig. 12. Módulo de Control.  
Fuente. Los Autores*

En la fig. 12 se observan 4 Potenciómetros, los cuales van distribuidos de la siguiente forma: el primero es para la variación el Set Point, el segundo permite la variación de la velocidad del motor por medio del control Tensión/Frecuencia, el tercero regula la intensidad de luz del LCD y el cuarto regula el contraste del LCD.

Seguido de estos potenciómetros se encuentran 4 pulsadores (?) que se encargan del desplazamiento del menú que aparece en pantalla según los requerimientos del usuario.

El sistema cuenta con un pulsador de arranque inicial del motor para aplicaciones de arranque suave; el cual produce una rampa en tres segundos mediante un control Tensión/Frecuencia hasta alcanzar un valor máximo de la rampa de 220V (60Hz).

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se consigue controlar la variable de velocidad de un motor monofásico de inducción a través del diseño e implementación una señal de control por modulación sinusoidal (SPWM), para regular la velocidad del motor de inducción monofásico, elaborando un control PI en lazo cerrado. Adicionalmente se diseñó e implementó el circuito *driver* para el funcionamiento correcto (comutación) de los IGBT.

Se investigó y demostró la manera de cómo conmutar los IGBT's aplicando tecnología de punta, siendo los primeros estudiantes en la Universidad Pontificia Bolivariana en implementar este dispositivo de manera exitosa.

Se ha diseñado un control PI utilizando un DSP como procesador, y manipulando variables de velocidad dadas por el encoder y mostrándolas en un LCD. También se programó un arranque suave para el circuito evitando así la corriente pico de arranque del motor de inducción monofásico. Finalmente se implementó un circuito de medida de corriente para protección de sobre corriente en el módulo.

## REFERENCIAS

- Bose, B. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. United States of America: Prentice Hall.
- Freescale Semiconductor, Inc. 1999. Semiconductor Products Sector. United States of America: Motorola, Incorporated.
- Maloney & Timothy J. 2006. *Electrónica industrial moderna*. 5a.edición, México: Pearson Education, p. 753,755.
- Mourick P. 1989. *Application news. IGBT module application and control*. Semikron.
- Beaty, W & Kirtley, J. L. 2000. *Manual del Motor Eléctrico*. Mc Graw Hill.
- Astrom, K.J. & Wittenmark, B. *Computer-Controlled systems: theory and design*. 3a. edición.