

# Control de velocidad mediante relación voltaje-frecuencia

## Speed Control Using Voltage-Frequency Relation

Alfonso Álzate<sup>1</sup>, Duberney Murillo Yarce<sup>2</sup>, Marcela González Valencia<sup>3</sup>

Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

alalzate@utp.edu.co

duberm@utp.edu.co

mgonzalez@ohm.utp.edu.co

**Resumen**— Se presenta la aplicación de un control digital utilizando un DSP, para controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico en lazo cerrado mediante la técnica de control voltaje-frecuencia. También se presenta un panorama general de las técnicas de control escalar y vectorial, analizando en detalle la técnica escalar voltaje-frecuencia.

**Palabras clave**— Control escalar, control voltaje-frecuencia, control PI, DSP, PWM, inversor, motor de inducción.

**Abstract**— This paper presents the application of digital control using a DSP to control the speed of a three phase induction motor with closed loop using frequency-voltage control technique. It also presents an overview of techniques for scalar and vector control, analyzing in detail the voltage-frequency scaling technique.

**Key Word** — Scalar control, voltage-frequency control, PI control, DSP, PWM, inverter, induction motor.

### I. INTRODUCCIÓN

El motor de inducción es una de las máquinas eléctricas más utilizadas en aplicaciones industriales por su simplicidad, fiabilidad, bajo costo y porque prácticamente no requiere mantenimiento. Existen dos tipos de rotor para un motor de inducción, el rotor jaula de ardilla y el rotor bobinado, siendo el primero el más utilizado a nivel industrial. El auge en la utilización del motor de inducción en nuevos campos se debe al avance en la electrónica de potencia y al desarrollo de los algoritmos de control [1].

El rango normal de operación de un motor de inducción típico está asociado a menos del 5% de deslizamiento y la variación de velocidad en ese rango es proporcional a la carga sobre el eje del motor. Si el deslizamiento aumenta, la eficiencia del motor es muy baja puesto que las pérdidas en el cobre del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del motor.

### II. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Estas estrategias se pueden clasificar en dos categorías: el control escalar y el control vectorial.

#### A. CONTROL ESCALAR

Con este método la tensión de alimentación varía proporcionalmente a la frecuencia. Cuando la relación voltaje-frecuencia es constante el motor funciona con flujo aproximadamente constante en régimen permanente. La proporcionalidad V/f desaparece en las bajas frecuencias, además la característica de la curva de par depende también de la frecuencia del rotor y de su temperatura, por lo que el dispositivo de control del convertidor ha de incluir las correspondientes correcciones.

Esta estrategia de control se puede lograr de dos formas:

- Control Voltaje-Frecuencia (V/f).
- Control de la corriente del estator y de la frecuencia del deslizamiento (Control del Deslizamiento).

Con el control escalar se puede obtener un control satisfactorio en lazo abierto cuando el motor trabaja a valores estables del par, sin muchos requerimientos de la velocidad. Cuando la aplicación requiere de una respuesta dinámica rápida, con exactitud en la velocidad o el control del par, es necesario operar el motor en lazo cerrado [2].

#### 1. CONTROL VOLTAJE-FRECUENCIA (V/f)

Cuando se trabaja a velocidades inferiores a la velocidad base del motor es necesario reducir el voltaje aplicado a los terminales del estator. El voltaje aplicado debe disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia. Este proceso se

<sup>1</sup> Ingeniero Electricista MSc

<sup>2</sup> Ingeniero Electricista MSc.

<sup>3</sup> Ingeniera Electrónica.

conoce como *degradación* (derating). Si esto no se hace, se satura el acero del núcleo del motor de inducción y fluyen corrientes de magnetización excesivas en las máquina [3].

Una justificación matemática se obtiene al calcular el flujo en el núcleo de un motor de inducción aplicando la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Si se aplica un voltaje  $v(t) = V_m \text{sen}(wt)$  al núcleo, el flujo  $\phi$  resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v(t) dt = \frac{1}{N_p} \int V_m \text{sen} wtdt \quad (2.2)$$

$$\phi(t) = -\frac{V_m}{wN_p} \cos wt \quad (2.3)$$

La frecuencia eléctrica aparece en el denominador de la ecuación 3. Entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10%, mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementa cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización [3].

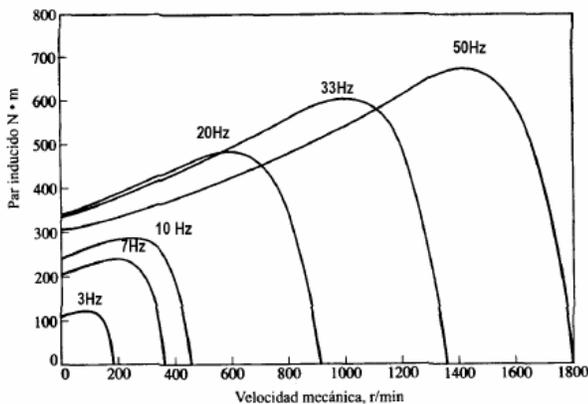


Figura 1. Curvas par-velocidad para velocidades por debajo de la velocidad base, suponiendo que el voltaje de línea disminuye linealmente con la frecuencia [2].

Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varía linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante [3].

La figura 1 muestra una familia de curvas características par-velocidad del motor de inducción para velocidades menores que la velocidad base suponiendo que la magnitud del voltaje del estator varía linealmente con la frecuencia [2].

Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede su frecuencia nominal, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal. Cuanto mayor sea la

frecuencia eléctrica sobre la velocidad base, mayor es el denominador de la ecuación 2.3. Puesto que el término del numerador se mantiene constante cuando se trabaja sobre la frecuencia nominal, disminuyen el flujo resultante en la máquina y el par máximo.

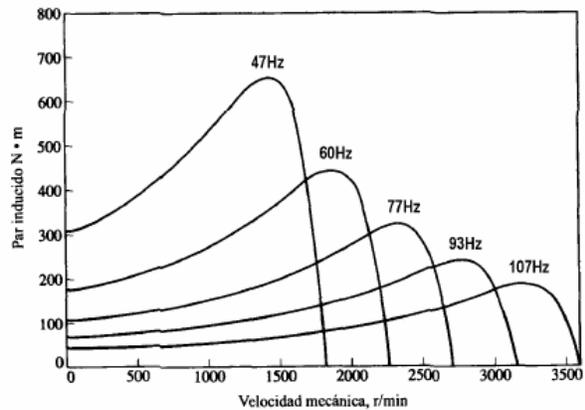


Figura 2. Familia de curvas características par-velocidad para velocidades por encima de la velocidad base y voltaje constante.

La figura 2 muestra una familia de curvas características par-velocidad del motor de inducción a velocidades por encima de la nominal, si el voltaje del estator permanece constante [3].

## B. CONTROL VECTORIAL

En un control escalar las variables de control tienen valores escalares y pueden ser voltajes, corrientes, frecuencias, velocidades, flujos magnéticos, par electromagnético, entre otras. Estas variables presentan un acoplamiento entre ellas, siendo ésta la causa fundamental que ha restringido el uso de la máquina de inducción con accionamientos eléctricos de alto desempeño.

Las técnicas de control vectorial permiten desacoplar las variables de control. Estas estrategia se puede alcanzar mediante tres técnicas:

1. Control por Campo Orientado (FOC):
  - i) Método Indirecto
  - ii) Método Directo
2. Control sin sensor (Sensorless Control).
3. Control Directo del Par (Direct Torque Control o DTC).

## III. DESCRIPCIÓN DE HARDWARE

A continuación se describen los elementos básicos para el desarrollo de la aplicación:

- Módulo DMC 1500 de Spectrum Digital [4].
- DSP y Code Composer Studio [5].

- Motor de inducción trifásico y sensor de velocidad.

El DMC 1500 y el DSP se muestran en la figura 3. El DSP es el controlador y el DMC es el actuador.



Figura 3. Elementos básicos para el desarrollo de la aplicación.

#### A. MÓDULO DMC1500

El módulo DMC 1500 (Digital Motor Controller) es una tarjeta que incorpora el hardware necesario para realizar el control de una máquina de corriente alterna y tiene como elemento fundamental un inversor PWM. Uno de los usos de los inversores (transformación de corriente continua en corriente alterna) es en controles de velocidad para motores de corriente alterna. Se conocen comúnmente como inversores controlados y son de dos clases: *VSI o inversor fuente de tensión* y *CSI o inversor fuente de corriente*. Un inversor fuente de tensión se emplea para controlar la magnitud y la frecuencia de la señal de salida mediante una composición de pulsos de ancho variable (modulación PWM) para evitar la saturación magnética en el motor, manteniendo una relación aproximadamente constante.

El inversor PWM está compuesto por transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada), cuyo principio de funcionamiento es transformar la energía eléctrica de frecuencia fija en energía eléctrica de frecuencia variable. Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie: una etapa rectificadora que transforma la energía alterna en continua y otra inversora, que transforma la energía continua en alterna, con una frecuencia y tensión regulables que dependen de los valores de consigna?? (Ley de Mando).



Figura 4. Tarjeta de desarrollo eZdspF2812.

#### B. DSP Y CODE COMPOSER STUDIO

Un procesador digital de señales (DSP) es un microprocesador especializado y diseñado específicamente para procesar señales digitales en tiempo real. Este provee secuencias de instrucciones ultra-rápidas, como:

- MAC (operación multiplicar-acumular en un sólo ciclo de reloj).
- La posibilidad de actuar como un dispositivo de DMA (acceso directo a memoria).
- Arquitectura Harvard, memoria de programas y memoria de datos separadas.

Los DSPs están diseñados para soportar tareas de altas prestaciones, repetitivas y numéricamente intensas. A la vez que cada dato llega, éste debe ser multiplicado, sumado y además de eso transformado de acuerdo a fórmulas complejas. Lo que permite realizar todo ello es la velocidad del dispositivo. Los sistemas basados en DSPs deben trabajar en tiempo real, capturando y procesando información a la vez que ocurre.

Las principales características del eZdspF2812 son:

- Procesador Digital de Señal TMS320F2812
- Velocidad 150 MIPS
- Memoria RAM 18k x 16
- Memoria SRAM 64k x 16
- Memoria FLASH 128k x 16
- Reloj de 30 MHz
- 2 Conectores de expansión (Análogo, I/O)
- 5V de operación mediante adaptador AC
- Herramienta de desarrollo Code Composer Studio
- Controlador IEEE 1149.1 JTAG
- Conector de emulación IEEE 1149.1 JTAG

El algoritmo de control se programa utilizando Code Composer Studio (CCS) que es una herramienta de desarrollo para la programación de DSP's de la familia Texas Instruments. El control se ejecuta en la tarjeta de desarrollo eZdspF2812, que incorpora pines de entrada y salida del DSP TMS320F2812.

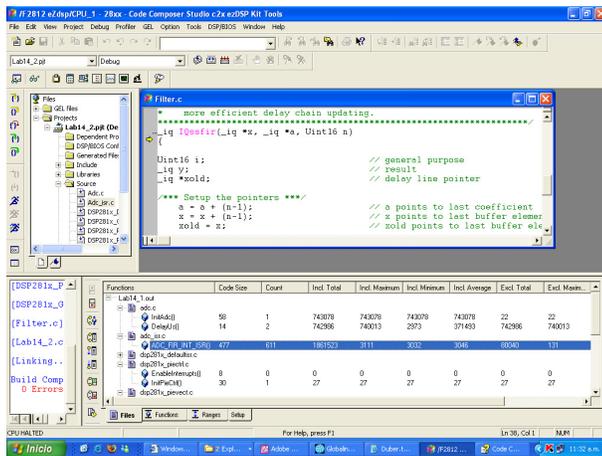


Figura 4. Code Composer Studio.

La figura 4 muestra una vista general del CCS. En ella se observa a la izquierda una ventana en la que se ha *declarado* el proyecto (el que actualmente se está trabajando) y los diferentes módulos que éste posee. Los módulos están formados por los archivos en C, librerías de funciones, archivos include y otros más específicos a la aplicación que se esté realizando. La ventana principal puede mostrar el editor de texto que se utiliza para escribir el código, un mapa de la memoria de programa y/o datos, etc.

CCS dispone de una herramienta denominada *Real Time* que permite visualizar el valor de las variables actuales del DSP en tiempo real y de forma continua; además puede mostrar gráficamente el progreso de las variables de interés para realizar un seguimiento del algoritmo. Otra herramienta muy importante, es que permite programar la memoria flash del DSP.

### C. MOTOR DE INDUCCIÓN

Se ha utilizado un motor de inducción trifásico que permite acoplar al eje un tacogenerador, que produce una tensión de salida de 2mV por revolución. Los bornes del motor se conectan según el nivel de alimentación.

El accionamiento eléctrico implementado está constituido por un inversor fuente de tensión, donde la amplitud de la señal modulada que excita el motor depende de la tensión del condensador. En los bornes del tacogenerador se obtiene un voltaje proporcional a la velocidad, pero esta señal debe ser acondicionada antes de llegar al controlador.

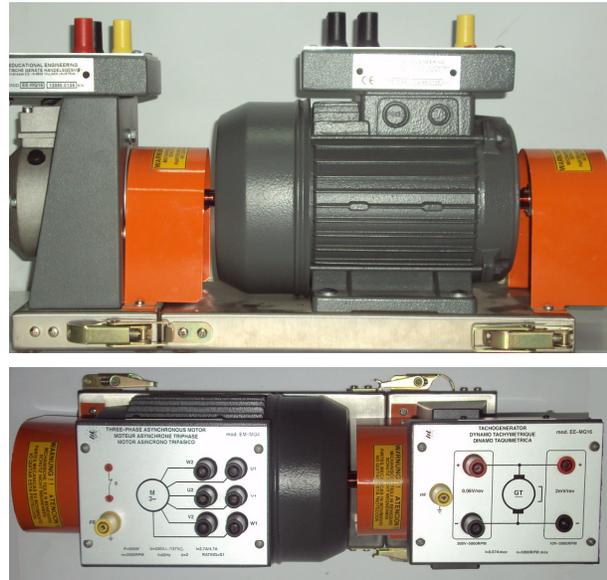


Figura 5. Sistema motor-tacogenerador.

## IV. DISEÑO DEL CONTROLADOR

En este tipo de control la relación entre el voltaje y la frecuencia se conoce como *Ley de Mando*. Al mantener constante la relación  $V/f$ , se debe considerar que para voltaje reducido la mayor parte de la potencia de entrada se disipa en la resistencia de los devanados. El resultado es que a bajas frecuencias se disminuye el par. Una solución es aumentar un poco más la tensión a bajas frecuencias. En la figura 6, se presenta la ley de mando utilizada.

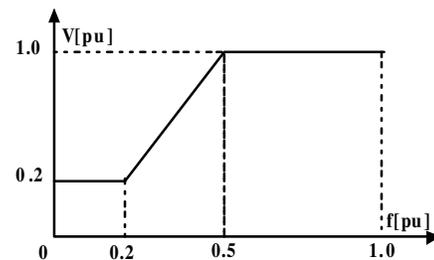


Figura 6. Ley de Mando Control  $V/f$ .

Un esquema simple de control voltaje-frecuencia se muestra en la figura 7. La velocidad de referencia es la entrada de un regulador de frecuencia que permite aumentar o disminuir gradualmente la velocidad. El comportamiento de este bloque es útil para la condición de arranque y cambios de referencia durante la operación normal. La salida del regulador es comparada con la señal de realimentación, y en virtud del error se obtiene una salida de control voltaje-frecuencia utilizada para la modulación del inversor PWM.

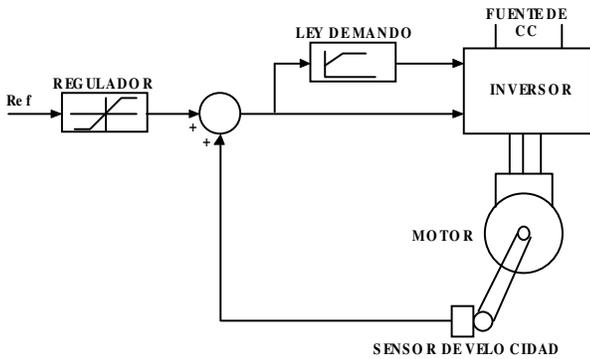


Figura 7. Control de velocidad V/f.

En este trabajo se cierra el lazo de control mediante un control proporcional-integral (Control PI). El diagrama de bloques del controlador implementado se muestra en la figura 8. En este diagrama se observan los diferentes elementos de control, también el actuador (inversor PWM) y la planta (motor de inducción trifásico). La salida del controlador se obtiene en el puerto digital del DSP y consiste en seis pulsos de ancho variable que excitan al inversor PWM que está alimentado a un nivel adecuado de tensión.

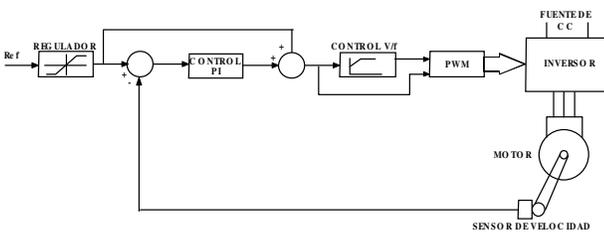


Figura 8. Control V/f implementado.

### V. IMPLEMENTACIÓN

La figura 9 muestra el esquema completo del accionamiento de un motor de inducción trifásico y la figura 10 la implementación. Un inversor fuente de tensión es utilizado para alimentar el motor de inducción. Seis canales del DSP son los encargados de regular los voltajes de fase del motor, controlando la conmutación de los 6 interruptores de potencia. Una señal de entrada analógica es utilizada para medir la velocidad del motor.

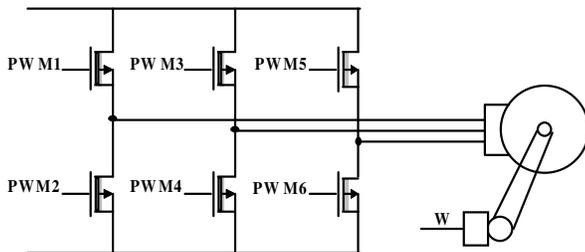


Figura 9. Implementación del drive del motor de inducción trifásico.

La señal de realimentación es la salida del tacogenerador acoplado al eje del motor. Se requiere también un circuito de acondicionamiento para acoplar impedancias y ajustar la tensión al valor de plena escala del DSP.

El algoritmo de control se programa en el DSP utilizando CCS. El programa consiste en un algoritmo que se ejecuta cuando se produce una interrupción asignada al tiempo de muestreo. La frecuencia de muestreo se ha definido mediante la configuración previa del *Timer2* asociado al *Event Manager A*, con un valor de 20 kHz. Durante la interrupción se realizan las siguientes tareas:

- Control PI
- Ley de Mando
- Generación PWM
- Adquisición de datos
- Actualización salidas digitales

El algoritmo se ejecuta en tres etapas, verificando en cada caso un buen desempeño del sistema. En la primera etapa se opera el DSP en forma independiente verificando las salidas digitales. En las etapas siguientes se trabaja el sistema completo, primero en lazo abierto y luego en lazo cerrado.

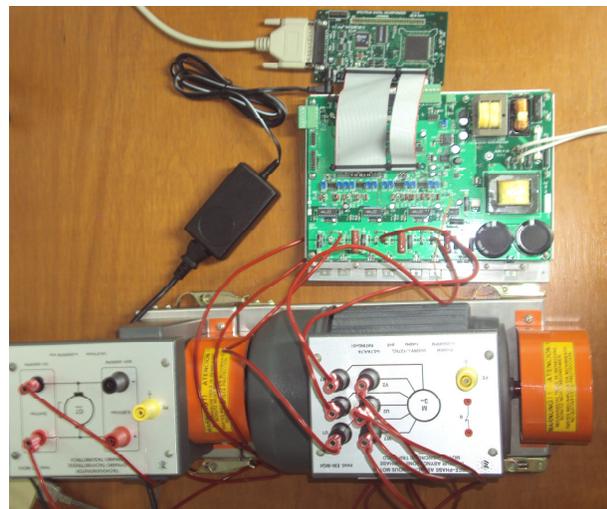


Figura 10. Aplicación del control de velocidad de un motor de inducción.

### VI. RESULTADOS

Inicialmente se verifica la modulación de ancho de pulso. Las señales tienen una forma similar con una diferencia de fase de 120 grados entre señales que pertenecen a ramas diferentes. En la figura 11 se observan las señales PWM de control para dos elementos de ramas diferentes (PWM1 Y PWM3 de acuerdo a la figura 9).

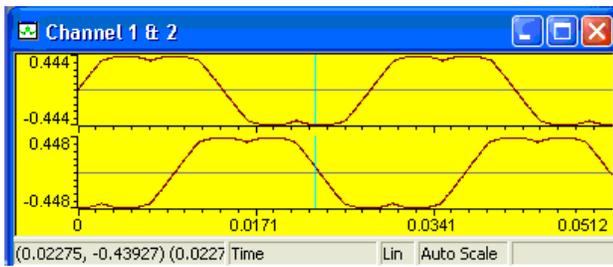


Figura 11. Señales PWM1 y PWM3.

Después se verifica el comportamiento en lazo abierto para un valor de referencia específico. La figura 12 muestra en la parte superior una referencia de velocidad de 0.3pu (valores por unidad) y en la parte inferior, la velocidad real del motor también en pu.

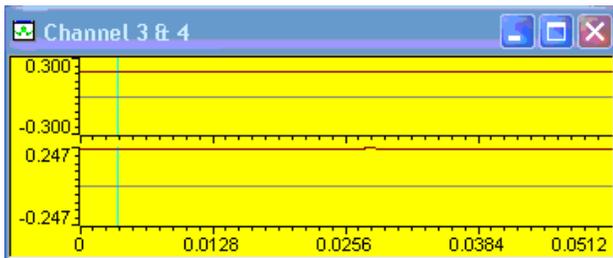


Figura 12. Comportamiento en lazo abierto.

En la última etapa, se realiza el control en lazo cerrado. El control PI es sintonizado para una velocidad de referencia de 0.3pu como se observa en la parte superior de la figura 13. En esta misma figura en la parte inferior, se verifica el buen comportamiento del controlador en torno a este punto de operación.

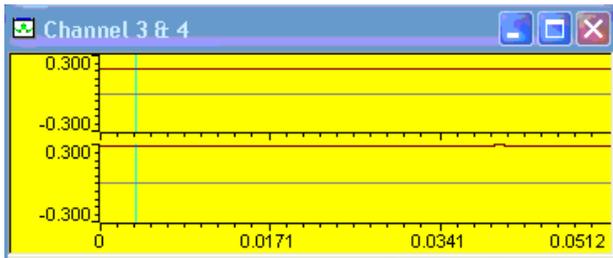


Figura 13. Comportamiento en lazo cerrado.

## VII. CONCLUSIONES

Se implementó el control escalar voltaje-frecuencia para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico. El controlador propuesto presenta un buen desempeño en lazo abierto, convirtiéndose en una alternativa de control para aplicaciones que no requieren un ajuste preciso de la velocidad. Para mejorar la respuesta del controlador, se utilizó un control PI en lazo cerrado con la realimentación de la velocidad sintonizado en un punto de operación fijo obteniendo buenos resultados.

## REFERENCIAS

- [1] Bocker Joachim, State of Art of Induction Motor Control, Electric Machines & Drives Conference, IEEE, May 2007.
- [2] Ponce Pedro y Sampé Javier, Máquinas Eléctricas y Técnicas Modernas de Control. Alfaomega, 2008.
- [3] Chapman, Stephen. Máquinas eléctricas. McGrawHill.
- [4] Spectrum Digital, DMC1500, Technical Reference, September 2000.
- [5] Spectrum Digital, *eZdsp™ F2812*, Technical Reference, September 2003