

Banco de pruebas para motores de inducción

Edinson Franco Mejía ^{*a}, Johnny Posada ^b, José M. Ramírez ^a

^a *Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle
Cali, Colombia*

^b *Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia*

* *edinsonfm@univalle.edu.co*

(Recibido: Abril 29 de 2008- Aceptado: Julio 4 de 2008)

RESUMEN

En este documento se muestra un banco de pruebas para motores de inducción desarrollado en la Universidad del Valle para propósitos de investigación y docencia. Se describen las partes y las características, incluyendo una descripción del sensor de par, el emulador de cargas y el sistema de prototipado rápido usado para la simulación y las estrategias de control. Finalmente, se muestra un caso de aplicación con la implementación de una estrategia de control voltaje/frecuencia.

PALABRAS CLAVES: Motor de Inducción, Control V/f, emulador de cargas, prototipado rápido de controladores.

benchmark to induction motors

ABSTRACT

This paper shows a benchmark for induction motors which was developed in Universidad del Valle for teaching and research purposes. The most important features and parts are described, including a description of the torque sensor, the torque load emulator and the rapid control prototyping used for the simulation and control strategies. Finally, an application of voltage/frequency control strategy is shown.

KEYWORDS: Induction Motor, V/fControl, Load emulation, rapid control prototyping.

1. INTRODUCCIÓN

El Motor de Inducción –MI- es ampliamente usado en la industria, llegando a remplazar en un amplio porcentaje al motor Corriente Directa –MCD-. Los MI se caracterizan por un mantenimiento más simple y su operación más sencilla, además de su robustez, menor costo, confiabilidad, versatilidad y los rangos de velocidad y par amplios. Las estrategias más utilizadas para el control industrial del MI son el control V/f, el control vectorial y el control directo de par –DTC-. A partir de los 90's, en control por campo orientado –CCO- se han usado estimadores y observadores de flujo en lugar de sensores, el desarrollo de la teoría de estimación y de observadores permitió no sólo observar el flujo, sino también la variable de velocidad del rotor en el MI midiendo los voltajes y corrientes en el estátor [1].

Existen dos problemas que aún llaman la atención de investigadores, uno asociado con la correcta estimación de las resistencias rotóricas y estáticas, y el otro al desempeño a frecuencias de excitación cero; aparecen varios trabajos heurísticos en los que se ilustra cómo los investigadores han logrado cada vez más obtener mejores desempeños, pero el análisis formal del problema no ha sido agotado [2]. Además, en las áreas de análisis energético, de accionamientos basados en electrónica de potencia y en la detección de fallas, se considera que quedan temas abiertos.

El trabajo con los MI representa para los investigadores en automatización y control un muy buen ejemplo de un proceso difícil de controlar [3]. Es normal encontrar en los laboratorios de investigación en control, entre sus plataformas de investigación, bancos de pruebas para motores de inducción –BPMI-. Estos BPMI están destinados a probar gran número de algoritmos de control, de estimación y de observación dedicados al MI. Por otra parte, una gran preocupación en la formación superior es la renovación de los contenidos de cursos de máquinas eléctricas y los accionamientos para las máquinas eléctricas [4]. Una alternativa es generar bancos de trabajo con herramientas de cálculo poderosas (usando Procesadores Digitales

de señal, en Inglés DSP) y control en tiempo real. El objetivo es que los estudiantes, a través de herramientas conceptuales como por ejemplo los tensores y los vectores espaciales, las simulaciones, y las implementaciones en el banco, comprendan mejor el funcionamiento de los MI. Por tanto, el objetivo del banco es servir como herramienta en el área de los accionamientos eléctricos de motores de inducción para docencia e investigación, permitiendo comparar los desempeños de accionamientos para motores de inducción de bajas potencias, estudiar e investigar estrategias de control y observación novedosas.

El objetivo de este artículo es socializar el diseño y la construcción de un banco de pruebas para prototipado rápido de controladores para motores de inducción [2][5][6], diseñado y construido en el laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle por el grupo de Investigación en Control Industrial –GICI-, con aporte de la nación a través de Colciencias, de la Universidad del Valle y con aportes de los desarrolladores del BPMI. En el trabajo no se presenta un formalismo fuerte ya que el control que se presenta al final del trabajo no tiene como objetivo una revisión de conceptos del control de motores de inducción, por el contrario, lo que se pretende es mostrar la herramienta desarrollada y ponerla a disposición de la comunidad académica e investigativa en el área.

El artículo se ha organizado de la siguiente manera: en la segunda sección se hace una descripción de la plataforma, ilustrando la parte electromecánica, la parte informática y los sistemas de adquisición y acondicionamiento de señal; en la tercera sección se muestra la operación del BPMI a través de la implementación de la estrategia de control más simple para los MI, esto es, un controlador V/f.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA

El banco está estructurado en dos componentes: la plataforma electromecánica (Figura 1), y la plataforma informática (Figura 2). La plataforma electromecánica está conformada por la estructura mecánica que soporta los motores, un MI que es el sujeto de pruebas o a controlar, un MCD y un

sensor de par. La plataforma informática contiene la electrónica de potencia, los sensores de corriente y voltaje con los acondicionadores de señal, la tarjeta de procesamiento de señal, y un computador personal. Además, se dispone del módulo de emulación de carga como ventiladores, bombas centrífugas, ascensores, puentes grúas, etc., trabajando en los cuatro cuadrantes con par de carga máximos de $\pm 24\text{Nm}$.

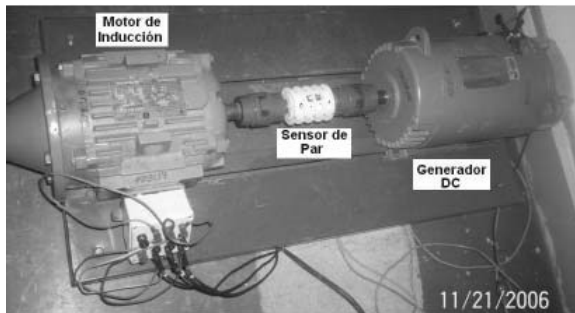


Figura.1. Estructura Electromecánica BPMI.

El BPMI permite evaluar accionamientos para MI trifásicos con tensiones de alimentación de 220 Vac, rangos de velocidad hasta 1700 rpm, corrientes máximas de 5 amp, simulando cargas de hasta 8 Nm. A continuación se describirá con más detalle cada una de las componentes y sus características.

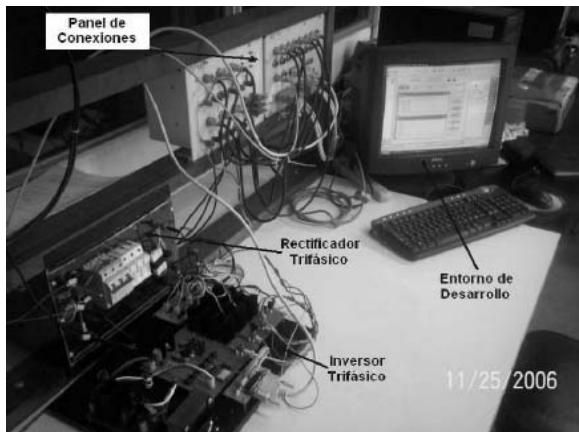


Figura 2. Componentes electrónicos y PC del BPMI

2.1 Plataforma electromecánica

La plataforma electromecánica del BPMI (Figuras 1 y 2) está especificada para soportar mecánicamente el conjunto MI-Sensor de Par-

MDC. Además de las características de rigidez mecánica, está concebida para absorber las vibraciones mecánicas de la operación del conjunto y facilidad de desplazamiento.



Figura 3. Tablero Interfase de señales del BPMI: 1)Entrada sensores de voltaje, 2)Entrada sensores de voltaje, 3)Filtros análogos, 4)Puerto comunicación con dSPACE, 5)Conectores RS485 y RS232, 6)Salidas de usuario, 7)Entradas encoders, 8)Salidas conversores D/A, 9)Entradas conversores A/D.

El MI del banco es trifásico con tensión de alimentación a 220/440 Vac, 1 HP, NEMA B, par nominal 8 Nm, 0-900 rpm. El MCD es de 1 HP, armadura en shunt a 240 Vdc, rangos de velocidad de 850/1700 rpm, Aislamiento clase F, y rangos de tensión de campo de 120/240 Vdc. El sensor de par será descrito en la plataforma informática.

2.2 Plataforma Informática

El banco está instrumentado con tres señales de corriente y tres señales de voltajes debidamente aisladas y filtradas, una entrada para medición de la temperatura en los devanados del estator del MI, una entrada para medición de posición y velocidad a través de encoder de 2048 pulsos, un sensor de par inalámbrico y una entrada para medición de par de carga, un inversor trifásico totalmente controlado y la electrónica para emulación de cargas.

2.3 Sensor de par

El BPMI está dotado con un sensor de par –SP - diseñado entre las escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle, para efectos de investigación y comparación (por costos, en la gran mayoría de aplicaciones industriales el sensor de par no es utilizado). Para la construcción del SP (ver Figura

1) se consideró: la capacidad de acuerdo con las aplicaciones; los materiales (sensibilidad a esfuerzos de torsión), la geometría del eje (sensibilidad a la deformación), la magnitud, signo y dirección de las deformaciones a medir, la conectividad y las interfaces. La capacidad del sensor se ajustó en tres veces el par nominal ($\pm 24\text{N.m.}$).

El SP usa Galgas extensiométricas y la transmisión se realiza con un emisor de radio frecuencia en el rango de 433 Mhz. El circuito de acondicionamiento del transmisor y la batería se encuentran localizados sobre el eje del motor. La recepción se realiza en una entrada análoga en el tablero de conexiones del banco (ver Figura 3), el alcance de la señal de par es de aproximadamente 152 m dependiendo de la antena empleada y de las condiciones del medio; el circuito de recepción de señal interpreta la información transmitida y la ajusta a los rangos de entrada de la tarjeta DS1104 para su procesamiento [6].

2.4 Sensores de corriente

Las corrientes son leídas a través de sensores de efecto hall y filtradas para evitar el "Aliasing" en las señales digitalizadas (para disminuir las componentes de ruido se utilizan filtros "Butterworth" de 4° orden). La sensibilidad calculada del sensor de corriente es de 0.7878, el error absoluto es de 1% de plena escala, en el rango de corrientes es de $\pm 25\text{A}$ (escalados a $\pm 10\text{V}$ para lectura a través de la dSPACE©), con un ancho de banda superior a 5 kHz (ver Figura 4).

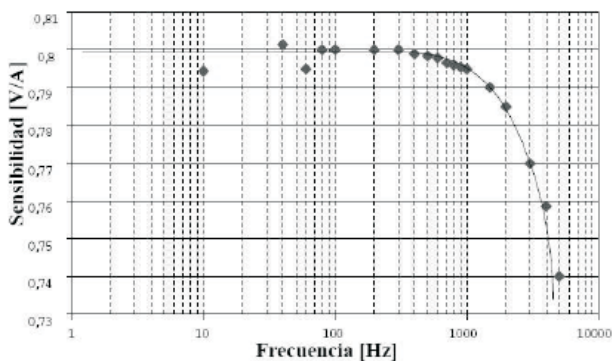


Figura 4. Característica de frecuencia del Sensor de corriente

2.5 Sensores de voltaje

Al igual que el sistema de medición de corriente, cada canal de medición de voltaje cuenta con filtros "Antialiasing" configurables. La sensibilidad calculada del sensor de voltaje es de 0.00944, el error absoluto es de 0.07 % de plena escala, rango de entrada de $\pm 1000\text{V}$, rango de salida de $\pm 10\text{V}$ con un ancho de bando superior a 15 kHz (Figura 5).

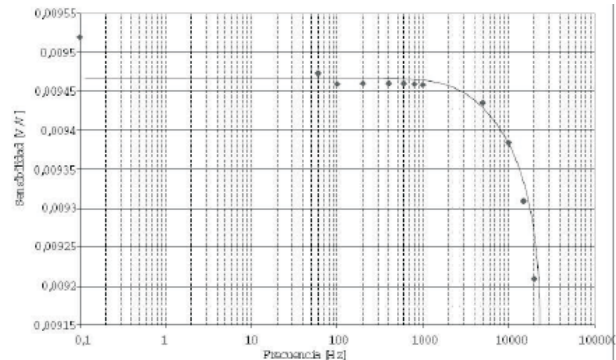


Figura 5 Característica de frecuencia del Sensor de Voltaje.

2.6 Sensores de posición-velocidad

La señal de posición se mide con un encoder incremental de 2048 pulsos por revolución, CB-2048LD ©LINE SEYKY CO LTDA., cuyas características más importantes son: alimentación $5\pm 10\%[\text{VDC}]$, consumo de corriente de 50[mA] máx, corriente de salida 20 [mA], voltaje de salida compatible TTL, velocidad máxima en el eje 6000 [rpm],(Figura 6). La medida de posición se realiza aplicando un algoritmo de diferencias hacia atrás de las medidas de posición.

2.7 Emulador de cargas, ECUV-2005

Una característica importante del banco es su capacidad para reaccionar a cargas variables y con dinámicas rápidas. Para realizar este tipo de pruebas es necesario aplicar una carga controlada sobre el motor de inducción. La solución que se adoptó fue emplear un MCD accionado por un convertor de cuatro cuadrantes permitiendo variar la carga. El MCD directo actúa como generador devolviendo la energía a la red de forma controlada a través de un inversor controlado

(puente de tiristores en la Figura 8). El ECUV-2005 [7], está diseñado para manejar cargas en los cuatro cuadrantes, emulando cinco patrones de par: T_L constante, T_L proporcional a la velocidad angular, T_L proporcional a w^2 , T_L proporcional a $1/w$ y T_L proporcional a dw/dt , donde w : frecuencia del rotor, y T_L : par de carga.

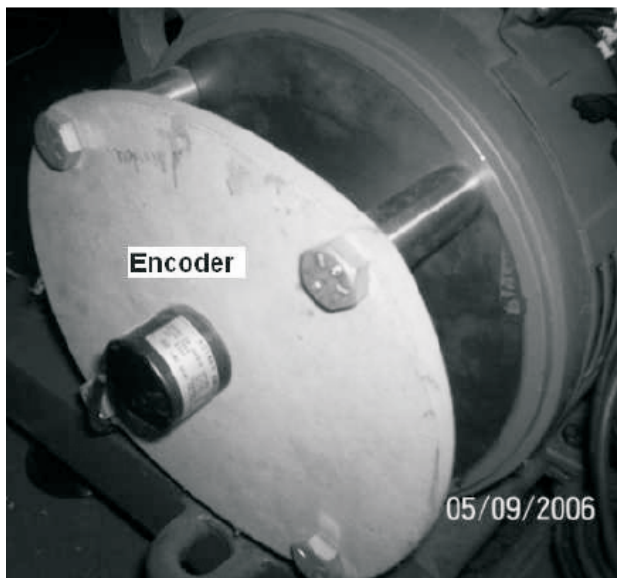


Figura 6. Montaje del Encoder incremental.

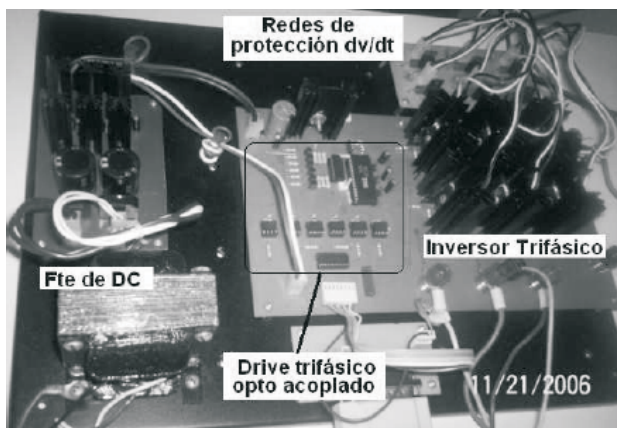


Figura 7. Inversor trifásico para el BPMI.

2.8 Sistema de prototipado rápido

Para el diseño y la simulación de los algoritmos de control y de observación, el BPMI dispone de un computador con el software Matlab-simulink ©MathWorks®; y para el alojamiento y ejecución de los algoritmos de control, se dispone de un controlador embebido en tiempo real compatible con matlab-simulink DS1104©dSPACE® [8]. Las características del DS1104 son: Tarjeta PSI con procesador digital de señales DSP TMS320F240, memoria de 8Mb RAM dinámica, 32 Mbyte DRAM global, 4 entradas ADC de 16 bits, 4 entradas ADC inputs of 12 bits, 8 salidas DA de 16 bits, 2 salidas DA de 12 bits, 20 I/O digital, interfase USB, una salida PWM trifásica mas una salida simple PWM. Para el monitoreo de señales, dSPACE dispone de la herramienta “ControlDesk”; con esta herramienta es posible, además de desarrollar instrumentos virtuales, crear la interface humano máquina para m monitoreo y registro de las señales [9]. En la siguiente sección se describe la implementación de un controlador V/f en el BPMI, incluyendo la herramienta de prototipado rápido.

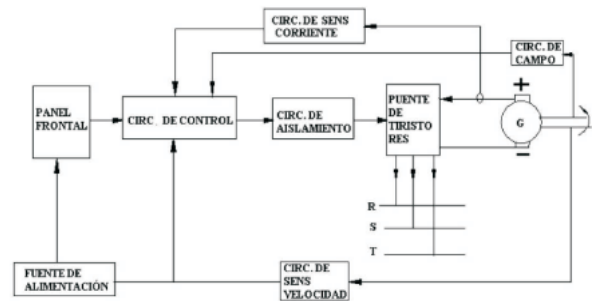


Figura 8. Esquemático del emulador de cargas ECUV2005.

3. OPERACIÓN DEL BPMI

La manipulación del BPMI se logra, como ya se mencionó, a través del sistema DS1104, al momento de su instalación, dSPACE instala las librerías necesarias para enlazar las aplicaciones realizadas en Simulink con la tarjeta y de ahí, mediante convertidores ADC y DAC, al proceso; el software ControlDesk nos permite desarrollar la interfaz de usuario. En lo restante del numeral, se presenta la operación del sistema DS1104 con un

ejemplo aplicativo de control U/F en lazo cerrado. Para aplicaciones donde no hay altas exigencias de desempeño dinámico del motor, se suelen implementar estrategias de control a partir del modelo en régimen estacionario del MI. En este caso, las variables de control son la tensión de alimentación del MI (U_s) y la frecuencia de dicha tensión ω_a ; las variables a controlar son el par (T_d) y la magnitud de flujo de estátor ψ_s . A media y alta velocidad, la resistencia de estator R_s del MI se puede despreciar, por lo que la tensión de estátor es proporcional a su flujo (ecuación 1), y bajo algunas consideraciones se puede concluir que el par es proporcional al deslizamiento w_s (ecuación 2).

$$|U_s| = \omega_a \times |\psi_s| \tag{1}$$

$$T_d \approx K \times \omega_s \tag{2}$$

A baja velocidad, frecuencias menores a 13Hz, la caída de tensión en R_s es considerable y se puede compensar mediante la ecuación (3). Un enfoque más simple es ajustar una tensión de compensación constante a un porcentaje de la tensión nominal del MI.

$$U_s = R_s I_s + J \omega_a |\psi_{snom}| \tag{3}$$

El esquema de control utilizado se muestra en las Figura 9, se denomina controlador V/f con autopilotaje donde la frecuencia de alimentación del MI es igual a la frecuencia de rotación mecánica más la frecuencia de deslizamiento impuesta por el controlador (4).

$$\omega_a = v\omega + \omega_s \tag{4}$$

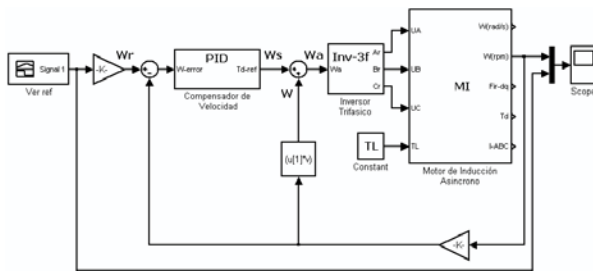


Fig. 9. Diagrama de Control por Autopilotaje.

La estrategia de control es implementada y simulada antes de ser descargada al dSpace. Después de funcionar correctamente el algoritmo de control en simulación se enlaza con la tarjeta DSpace usando los bloques funcionales de las librerías DSpace RTI1104. El proceso de descarga de la aplicación se realiza de forma automática después de la compilación. Para el desarrollo de la interfaz hombre-máquina se utiliza el ControlDesk©dSPACE, en la Figura 10 se muestra la interface creada para la aplicación con la aplicación del control V/f corriendo, el “set point2” es ajustado manualmente con una función “up/down”.

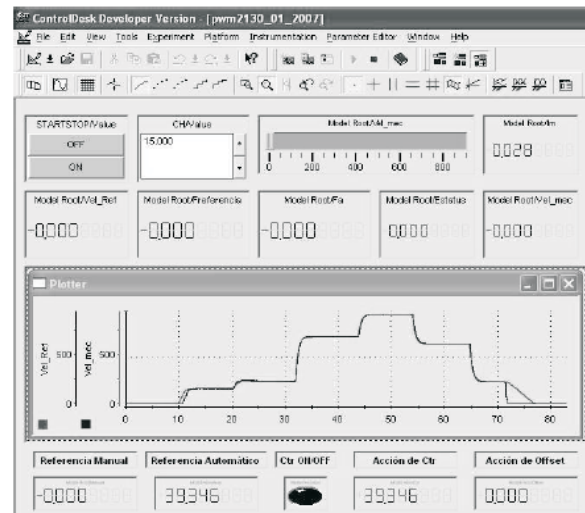


Figura 10. Interface creada con ControlDesk para la aplicación.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un banco de pruebas de motores de inducción (BPMI) para docencia e investigación. Las características de prototipado rápido permiten asimilar de forma más eficiente los estudios que se abordan alrededor de los accionamientos eléctricos para el motor de inducción.

Se desarrolló un sistema de medición de par inalámbrico con características industriales de relativamente fácil reproducción para dotar otros bancos de pruebas de sistemas electromecánicos y sistemas industriales que lo requieran.

Se abordó un trabajo multidisciplinar con éxito que deja un conocimiento para abordar otros proyectos de naturaleza similar.

Como futuros trabajos están la implementación inmediata de un controlador por campo orientado y un controlador directo de par, así como el desarrollo del ambiente de trabajo amigable para usuarios del banco.

5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido co-financiado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia "Francisco José de Caldas" \COLCIENCIAS y la UNIVERSIDAD DEL VALLE. Agradecimientos especiales a los estudiantes Luis Ardila y Alejandro Forero por la contribución a través de sus trabajos de grados a la construcción del BPMI, y a los profesores Hernando Vásquez P., Carlos R. Pinedo, Asfur Barandica, Jorge Quintero y José Isidro García por el apoyo al desarrollo del BPMI.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] D.J. Atkinson, P.P. Acanley y J. W. Finch, *Application of estimation techniques in vector-controlled induction motor drives*, Power Electronics and Variable-Speed drives, p.p 358-363, Fourth International Conference on, London, U.K, 1991.

[2] E. Franco M., *Contribución al control dinámico del par del Motor de Inducción sin sensor mecánico de velocidad*, Tesis Doctoral, Universidad del Valle, 2008.

[3] J. Barnier, T. Blanc, L. Dugard y D. Lubineau, *Plate-forme experimentale moteur asynchrone*, Reporte interno Laboratorio de Automática de Grenoble, 2000.

[4] T. Brekken y N. Mohan. *A strategy for the revival of electric machines and drives courses*, Documento importancia de accionamientos y control de máquinas, 2002.

[5] E. Franco, J. M. Ramírez y J. Posada, *Banco de pruebas para motores de inducción*, VII Congreso de la Asociación Nacional de Automática, Cali, 2007.

[6] J. Posada, *Variador de velocidad par motor de inducción usando control por campo orientado*, Trabajo de Investigación para optar al título de Master en Automática de la Universidad del Valle, 2007.

[7] L. F. Ardila, *Instrumentación y acondicionamiento de señal del banco de pruebas de para motores de inducción-interface con el KIT DS1104*, Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle, 2006.

[8] A. Sandoval, *Desarrollo de un emulador de cargas mecánicas para el banco de pruebas de motores de inducción*, Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 2006.

[9] dSpace, *Implementation reference in real-time interface (RTI and RTI-MP)*, Paderborn, Germany, 2004.

[9] A. Forero, *Control no lineal en tiempo real para el servomotor DC MS150-Aplicación del sisetam dSpace®*, Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle, 2006.