

## NUEVOS DESARROLLOS PARA EL SISTEMA "PLATAFORMA III"

María I. Giménez; José A. Restrepo; Antonio J. Millán; Víctor M. Guzmán; Julio C. Viola;  
José M. Aller; Alexander Bueno.  
Universidad Simón Bolívar, Caracas

**Resumen:** Se presenta la versión actual del Sistema de Pruebas Integrado denominado "Plataforma", y las aplicaciones más recientes en las que se ha utilizado. "Plataforma" es un sistema modular, flexible e instrumentado para realizar experimentos de validación dinámica de nuevas estrategias y esquemas de control avanzado (vectorial, neuronal, difuso, etc.) de máquinas eléctricas, para determinar sus efectos tanto sobre el comportamiento de las máquinas como sobre la calidad de la línea de alimentación, destinada a usarse en Laboratorios de Investigación y Postgrado. Plataforma incluye las etapas de potencia y los sensores del sistema de alimentación, la etapa de emulación de las cargas mecánicas, la etapa de instrumentación y la etapa de procesamiento de señales y control del sistema. Esta versión mejora la etapa de instrumentación e incluye un sistema de carga dinámica, realizado con un motor DC controlado por par eléctrico, con control doble (PI tradicional y PI difuso).

**Palabras claves:** Control vectorial, Sistema de Pruebas, máquina de inducción, DSP.

### 1. INTRODUCCIÓN

La teoría de control vectorial [1] ha permitido utilizar los sistemas de manejo de máquinas AC en aplicaciones que requieren una excelente respuesta dinámica, que anteriormente solo se podían realizar con sistemas de manejo de máquinas DC. Sin embargo, al revisar la literatura disponible, se observa que muchos de los nuevos sistemas de control para motores AC se prueban bajo condiciones de carga estáticas, con cargas muy simples, generalmente de tipo inercial. Esto se debe a que las pruebas dinámicas para sistemas AC son complejas, y requieren cierto tipo de instrumentación que no está disponible en cualquier laboratorio. Debido a esta necesidad, el Grupo de Sistemas Industriales de Electrónica de Potencia (SIEP) de la Universidad Simón Bolívar desarrolló un Sistema de Pruebas Integrado, denominado "Plataforma", para poder validar nuevas técnicas de control, basadas principalmente en los principios de control vectorial en los que el Grupo está interesado [2,3,4].

La primera versión de "Plataforma" se desarrolló en 1998, y se reportó por primera vez en 1999 [5]. Dicha versión se montó en un gabinete industrial, lo cual la hacía muy compacta y adecuada para su uso en ambientes hostiles, pero no resultaba práctica para realizar mediciones sobre

ella, porque era muy difícil tener acceso a todos los puntos de interés. Por lo tanto se desarrolló una nueva versión [6], con una configuración modular y una mejor etapa de procesamiento de señales y control. Esta segunda versión se utilizó para probar las posibilidades del rectificador controlado utilizando técnicas de control vectorial para corregir el factor de potencia, y para analizar el comportamiento de las máquinas de inducción y de los motores de imán permanente controlados mediante las técnicas de Campo Orientado y de Manejo Directo del Par eléctrico [7, 8, 9], entre otras aplicaciones.

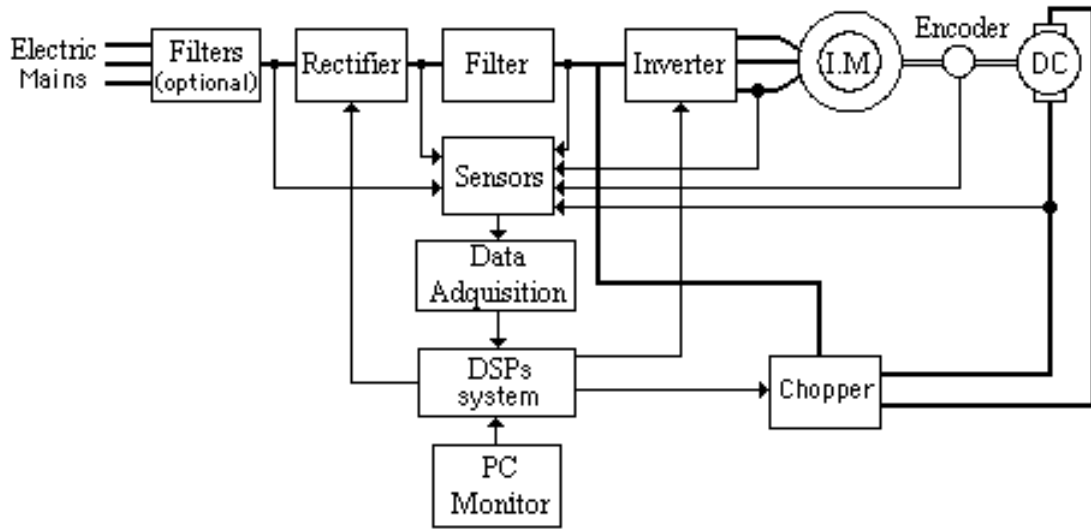
El uso de esta versión de "Plataforma" demostró que era necesario un mejor sistema de adquisición de datos con mayor inmunidad al ruido, la incorporación de un simulador de carga dinámica y un sistema de control más flexible y que permita la carga directa de los algoritmos de control que desarrollan diferentes usuarios desde distintas estaciones de trabajo. Las siguientes secciones presentan una descripción detallada del sistema, haciendo énfasis en los nuevos desarrollos introducidos en "Plataforma III" así como sus más recientes aplicaciones.

### 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

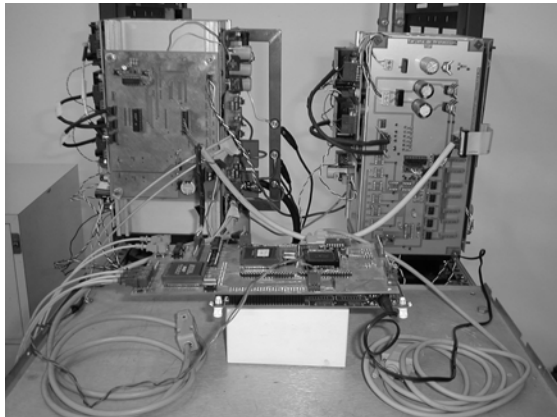
La Figura 1 muestra el diagrama de bloques de "Plataforma III". Las líneas gruesas conectan los bloques de las etapas de potencia y las líneas finas corresponden a las conexiones de las etapas de instrumentación y control.

#### 2.1. La etapa de potencia:

Incluye tres bloques activos principales: El Rectificador controlado (opcional), el Inversor (siempre presente) y el Circuito "Chopper" (opcional) y dos circuitos pasivos: el filtro del enlace DC (siempre presente) y el filtro de línea de entrada (opcional). La Figura 2.A presenta una vista frontal de plataforma III constituida por dos módulos de potencia (inversor y "chopper") en la que se pueden observar al frente las tarjetas de adquisición y control. La Figura 2.B presenta la parte posterior del mismo sistema, donde se pueden observar los tres módulos de IGBTs para el inversor y los dos módulos para el "chopper" mas el filtro de línea DC. Para garantizar la modularidad se utilizó el mismo circuito convertidor en los tres bloques activos de potencia. El Rectificador controlado y el Inversor (idénticos e intercambiables) están implementados con una configuración de puente trifásico, con tres módulos de IGBTs duales, tipo EUPEC FF50R12KF2, cada uno de los



**Figura 1: Diagrama de bloques de Plataforma III**

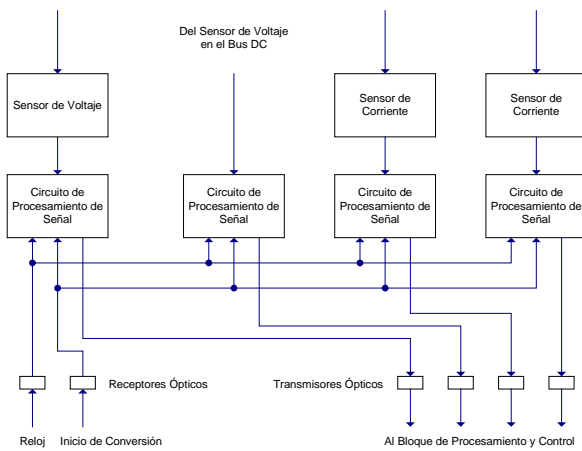


**A: Vista frontal de Plataforma III**

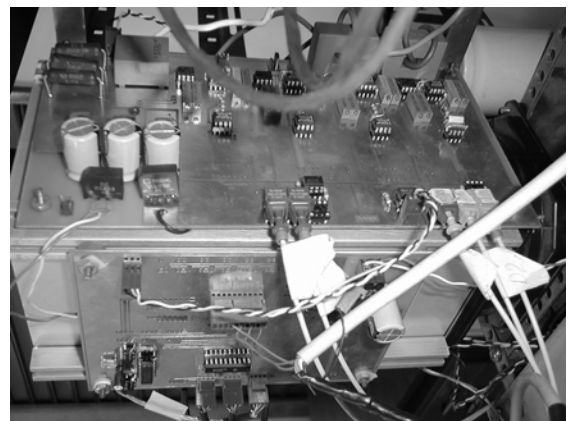


**B: Vista posterior de Plataforma III**

**Figura 2. Plataforma III**



**A: Diagrama de Bloques**



**B: Fotografía de la nueva Tarjeta**

**Figura 3. Nueva Tarjeta de Sensores**

cuales presenta un arreglo de dispositivos superior e inferior con sus correspondientes diodos en antiparalelo, que pueden manejar  $V_{ce} = 1200V$ ,  $i_c = 50A$ ; con  $t_{on} = 0.4 \mu s$ ,  $t_{off} = 0.2 \mu s$  and  $P = 400 W$  por IGBT. Cada convertor tiene un disipador de calor tipo H31 y es enfriado mediante un pequeño ventilador. La impedancia térmica es inferior a  $0.07 \text{ }^\circ C/W$ . Los circuitos de disparo de los IGBTs se han implementado con tres módulos integrados IHD280 de CONCEPT. Se han incluido circuitos de protección entre cada módulo de manejo y los terminales de puerta de los IGBTs. Cada circuito manejador consume menos de 2 W; su voltaje de entrada es de 15 V y puede entregar 200 mA. Los tiempos de retardo de encendido y apagado están por debajo de los 60 ns. Se necesita un circuito de protección para garantizar la operación de los circuitos de disparo. Hasta esta versión no se han introducido en el diseño circuitos “snubber” para los IGBTs, pero es posible incluir diferentes tipos de circuitos “snubber”, tanto clásicos como de bajas pérdidas, para analizar el comportamiento del sistema con cada configuración. En el bloque del “Chopper” se utiliza un puente completo monofásico, para lo cual se emplea un circuito como el del Inversor, omitiendo un módulo de IGBTs.

**2.2. La etapa de instrumentación:**

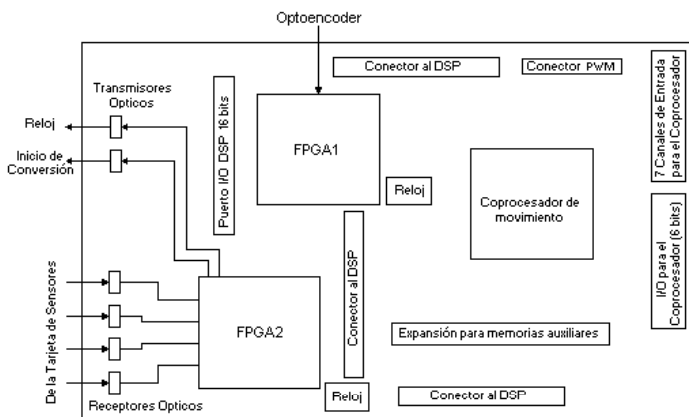
**2.2.1.- Mediciones de corriente y voltaje: Nueva tarjeta de conversión análoga a digital.**

Como en las versiones anteriores, la circuitería de la Tarjeta de Sensores puede medir voltajes y corrientes en los terminales tanto de primario como del secundario del transformador de entrada, corrientes de salida del Inversor y el voltaje y la corriente del enlace DC. Cada tarjeta incluye dos sensores de corriente por efecto Hall (LEM LA-55-P/SPI), un sensor de voltaje (LEM LV-25-P), y la circuitería

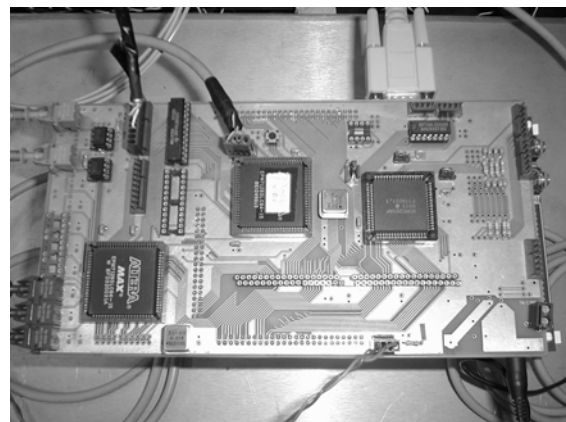
para el sensor de voltaje del bus DC (el cual está instalado físicamente sobre dicho bus DC). Los sensores de voltaje pueden operar hasta 500  $V_{rms}$  a 8 kHz, con una precisión de  $\pm 0.05\%$  y un tiempo de retardo inferior a los 3  $\mu s$ . Los sensores de corriente pueden medir hasta 50  $A_{rms}$  a 150 kHz. Estos sensores aíslan el Circuito de Conversión del Circuito de Potencia. Cada circuito de Conversión incluye una etapa amplificadora, dos comparadores para definir los límites de protección y el convertor análogo-digital (A/D), cuya salida está conectada al correspondiente transmisor de fibra plástica. La señal digital se transmite en forma serial a la Tarjeta de Adquisición y Control mediante la fibra plástica. Para operar correctamente, los convertidores A/D necesitan dos señales, el reloj y el inicio de conversión, las cuales se envían desde la Tarjeta de Adquisición y Control mediante las correspondientes fibras plásticas, cuyos receptores están colocados en la parte superior de la Tarjeta de Sensores. La figura 3.A muestra el diagrama de bloques de la nueva Tarjeta de Sensores y la Figura 3.B presenta una foto de la misma.

**2.2.2.- Sistema de adquisición: Nueva Tarjeta de Adquisición y Control.**

La nueva Tarjeta de Adquisición y Control (la Figura 4.A muestra el diagrama de bloques de la nueva Tarjeta de Adquisición y Control y la Figura 4.B presenta una foto de la misma) incorpora los transmisores y receptores de fibra plástica necesarios para conectarse con la Tarjeta de Sensores. Asimismo mantiene la posibilidad de utilizar el coprocesador de movimiento ADMC201 para recibir las señales de corriente y voltaje ya convertidas a formato digital y pasarlas al DSP si la Tarjeta de Adquisición se utiliza en conjunto con las anteriores Tarjetas de Sensores.



**A. Diagrama de bloques**



**B. Foto**

**Figura 4. Nueva Tarjeta de Adquisición y Control**

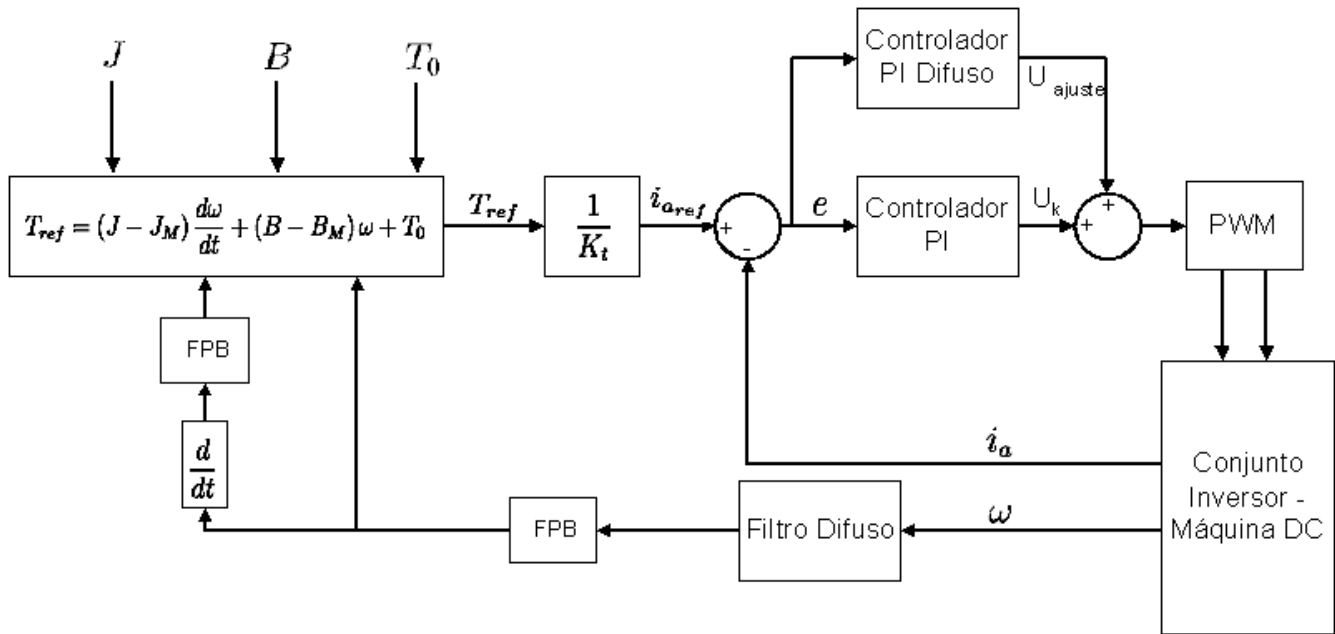


Figura 5.- Estrategia de control para la carga dinámica

El coprocesador de movimiento está conectado a un generador PWM, a un conector de siete canales de entrada y a un puerto I/O de seis bits para el control de las señales para los IGBTs. La tarjeta también incluye dos circuitos FPGA, el primero de los cuales está dedicado a realizar mediciones de velocidad y opera solamente cuando se utiliza el sensor de velocidad tipo “encoder”, mientras que el segundo FPGA procesa las señales de entrada seriales provenientes de los convertidores A/D, convirtiéndolas de formato serial a paralelo para poder pasarlas al DSP. Asimismo el segundo FPGA controla las señales de reloj y de inicio de conversión que deben enviarse a las Tarjetas de Sensores para los correspondientes convertidores A/D. La Tarjeta tiene tres conectores en su cara inferior para conectarse a la tarjeta del DSP.

### 3. CARGA DINÁMICA

En la tercera versión de Plataforma se incluyó un sistema de emulación de carga dinámica, implementado con un motor DC controlado por par eléctrico. El concepto de emulación de carga implica que al acoplar la máquina DC a la máquina bajo prueba se deben lograr sobre el eje las mismas características par/velocidad que la carga real considerada. Este nuevo módulo hace posible estudiar el comportamiento dinámico del sistema convertidor-motor con cualquier tipo de condiciones de carga, incluyendo cargas variables con el tiempo o con cualquier otro parámetro. El par del motor DC se determina al escoger tres parámetros en una ecuación general de la forma

$$T_{ref} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_0 \quad (1)$$

donde J representa al coeficiente de inercia, B es el coeficiente de fricción viscosa y  $T_0$  es un término de par constante e independiente de la velocidad angular  $\omega$ . Dado que en la máquina DC el par eléctrico y la corriente de armadura se encuentran relacionados por una constante, el control de par se reduce a un control de la corriente de armadura. El diagrama de bloques del esquema de control utilizado se observa en la figura 5, donde como controladores se utiliza una pareja PI lineal clásico/PI difuso. La acción del PI difuso está destinada a mejorar la acción del PI lineal en aquellos casos de cambios muy rápidos en la referencia en los que la respuesta del controlador PI lineal no es lo suficientemente rápida. La suma de la salida de ambos controladores se usa como referencia para el ancho de pulso de conmutación de las líneas del puerto PWM que maneja los interruptores del inversor puente H.

### 4. RESULTADOS

En este momento el Grupo de Sistemas Industriales y Electrónica de Potencia (SIEP) tiene operando seis equipos Plataforma III, que se están usando como base para el desarrollo de dos tesis doctorales y cuatro maestrías en el área de control de motores de inducción, así como en el desarrollo de investigaciones en el área de filtros de línea activos (algunos de estos trabajos se presentan en otras ponencias dentro de esta misma Conferencia), lo que demuestra la efectividad del sistema diseñado como base de experimentación.

La figura 6 muestra resultados obtenidos durante la evaluación de la respuesta de un controlador de velocidad

frente a incrementos de la inercia rotacional de la carga, la cual, para propósitos de demostrar la posibilidad de realizar en Plataforma pruebas difícilmente realizables con equipos convencionales, se lleva desde 0 hasta 0.01 Kg $\cdot$ m $^2$ .

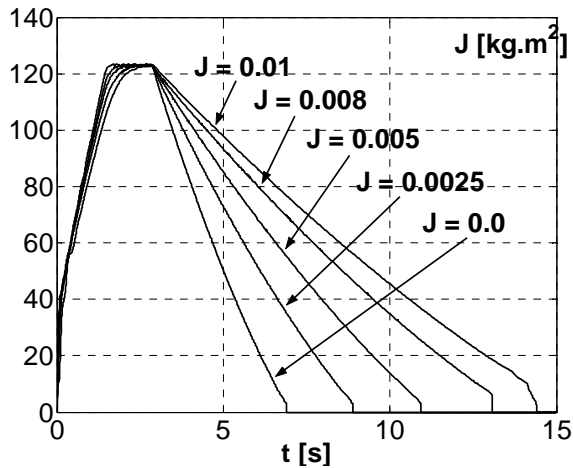
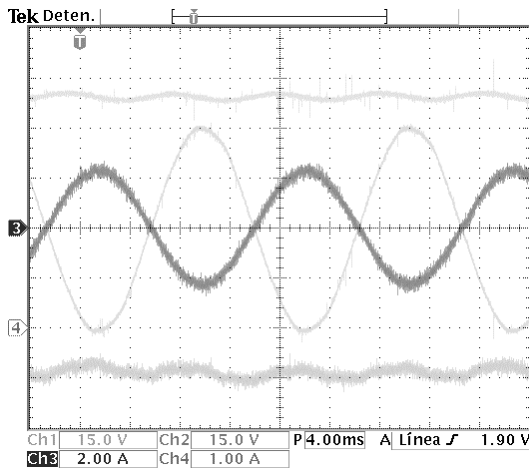
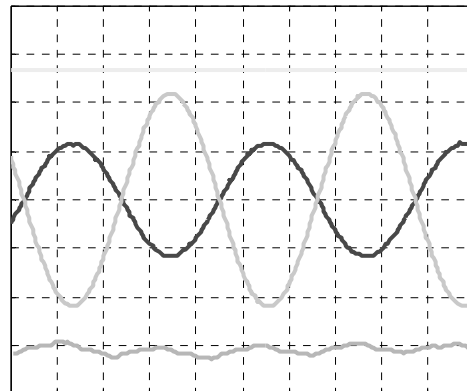


Figura 6. Gráficas de velocidad angular para distintos valores emulados de  $J$

Como ejemplo de la calidad de los resultados obtenidos por el sistema de adquisición de datos de Plataforma, la figura 6 se presenta una comparación entre una serie de formas de onda medidas durante una prueba en la que el sistema de emulación de carga está operando y se produce un cambio en la magnitud de la carga, con lo que la máquina DC pasa de operar como motor a operar como generador. Las mediciones presentadas en la Figura 7.A fueron hechas con un osciloscopio digital de 500 MHz (Tek. TDS3054, 2GS/s), utilizando una punta de corriente basada en el Efecto Hall. La Figura 7.B muestra las mismas variables presentadas en la pantalla de la computadora personal desde la cual se supervisa la operación de Plataforma, los valores son los tomados por la tarjeta de adquisición y control, medidos directamente sobre los sensores de Plataforma. Como puede apreciarse, los resultados son equivalentes, por lo que el uso de Plataforma permite prescindir de mucha parte del instrumental adicional que usualmente es necesario en este tipo de experimentos. se ha perdido parte de la información, produciendo resultados menos confiables que los de la tercera versión.



A: Osciloscopio



B Plataforma

Figura 7.- Comparación entre formas de onda medidas con un osciloscopio digital y con el sistema de adquisición de datos de Plataforma .

Formas de onda adquiridas durante la operación del rectificador PWM, operando en modo de regeneración de energía. Las formas de onda del canal 1 (amarilla), canal 2 (Azul) y canal 3 (magenta) tienen el cero en el mismo lugar; mientras que para el canal 4 (verde) el cero tiene un offset de 2 divisiones hacia abajo.

En el canal 1 se tiene el voltaje de salida DC que se está tratando de regular (40Vrms).

En el canal 2 se tiene la forma de onda del voltaje AC de entrada (22Vrms @ 60Hz).

En el canal 3 se tiene la forma de onda de la corriente de entrada (1,6Arms @ 60Hz).

En el canal 4 se tiene la corriente entregada a la carga (0,9Arms), se observa que el signo es negativo.

## 6. CONCLUSIONES

El sistema "Plataforma III" es capaz de aplicar diferentes técnicas de control, incluyendo control vectorial, control con redes neurales, control difuso, control directo de par, modulación delta y PWM, reducción de armónicos de la línea, estimación de parámetros en línea y mediciones de velocidad sin sensores. Aplicar diferentes estrategias significa elaborar un programa específico para el DSP, sin que por lo general sea necesario realizar ningún cambio en el resto de la circuitería. La nueva versión ofrece un sistema más completo, preciso, versátil y confiable, de gran utilidad tanto para investigadores como para estudiantes de postgrado.

## AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento al FONACIT (S1-97001762) y al DID de la Universidad Simón Bolívar (GID-04) por el soporte financiero otorgado a este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] W. LEONHARD. Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, Berlin, Heideberg, 1985.
- [2] A. BUENO, J.M. ALLER. Adaptive Control of Induction Machine by Oriented Field using Neural Networks. International Conference on Electrical Machines. ICEM'96. Vol. II, pp. 223-228. Vigo, Spain. September 1996.
- [3] J. RESTREPO, T. PEREZ, M. I. GIMENEZ. and V. GUZMAN. DSP Implementation of AC-Machine Sensorless Speed Measurement System Using the Wigner Distribution. 7th European Power Electronics and Applications. EPE'97. Vol.4, pp. 524-527, September 1997, Trondheim, Norway.
- [4] J. J. REIMONDEZ, M. I. GIMENEZ, V. M. GUZMAN, R. MONCADA, J. A. RESTREPO, Speed and Position Control of Brushless DC Machine employing Neural Networks. 7th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'97. Vol. 2, pp. 465-470, Trondheim, Norway, September 1997.
- [5] M. I. GIMÉNEZ, J. M. ALLER, F. QUINTERO, V. M. GUZMÁN, J. A. RESTREPO, An Integrated Test System for AC Machine Drives Performance Analysis. Proceedings of the 8th European Conference on Power Electronic and Applications EPE'99, CD, Sep. 1999
- [6] M. I. GIMÉNEZ, J. A. RESTREPO, V. M. GUZMÁN, J. M. ALLER, A. BUENO, Plataforma II: Un sistema integrado de pruebas para el análisis del rendimiento de las estrategias de control de motores, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación SAAEI-2000, pp. 259-262, Sept. 2000.
- [7] T. PAGA, A. BUENO, M. I. GIMÉNEZ, J. A. RESTREPO, V. M. GUZMÁN, J. M. ALLER, Sensorless Speed Control of the Induction Machine Combining Field Oriented Method and DTC, Proceedings of the Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, ICCDCS-2000, Cancun, Mexico, pag. P79-1 a P79-6, Marzo 2000.
- [8] J. A. RESTREPO, J. M. ALLER, T. PAGÁ, A. BUENO, M. I. GIMÉNEZ, V. M. GUZMÁN, Direct Torque Control of the induction machine using field oriented method and time frequency transformation for speed estimation and parameter adaptation, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines ICEM 2000, Pp 1105-1109, Aug 2000.
- [9] HYUNG-MIN RYU, SUNG-JUN KIM, SEUNG-KI SUL, TAE-SEOK KWON, KI-SU KIM YOUNG-SEOK SHIM, KI-RIONG SEOK, Dynamic load simulator for high-speed elevator system, Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002.