

En español

## Técnicas de filtrado de IEM en convertidores electrónicos de potencia

Fredy Edimer Hoyos Velasco<sup>1</sup>, Camilo Younes Velosa<sup>2</sup> y Eduardo Antonio Cano Plata<sup>5</sup>

### RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de la aplicación de algunas técnicas de reducción de EMI en convertidores electrónicos de potencia. Las técnicas aplicadas incluyen el apantallamiento de señales de control y de potencia, la separación de las referencias del sistema de potencia de las señales y medidas, la implementación de filtros análogos y la configuración de un adecuado sistema de disparo, de tal forma que se disminuyan al máximo las emisiones tipo IEM. En este artículo se presentan los resultados obtenidos antes y después de aplicar las técnicas de reducción de interferencias. Además los resultados son verificados usando dos técnicas de control en tiempo real RCP (*Rapid Control Prototyping*).

**Palabras clave:** EMI reduction, DSP, power electronic converters, shielding, rapid control prototyping (RCP).

Recibido: junio 24 de 2009

Aceptado: junio 11 de 2010

### Introducción

Las interferencias electromagnéticas (IEM) han ganado importancia debido al constante incremento de cargas electrónicas, y la situación se ha visto agravada al crecer la densidad de integración de los circuitos (Josep Balcells *et al.*, 1992).

Usando las ventajas de la electrónica digital y de potencia más trabajos y procesos pueden ahora ser hechos con mayor eficiencia, seguridad y bajo costo. Estudios recientes (Huibin Zhu y Lai, J. S., 1999; Chingchi, Chen, 2003; Paul, C. R. y Hardin, K. B., 1998; Ran, L. y Gokani, S., 1998) han demostrado que los altos  $dv/dt$  y  $di/dt$  son los responsables de la mayoría de emisiones conducidas. Los convertidores electrónicos trabajan en régimen transitorio, conmutando tensiones y corrientes entre diversas ramas del circuito, dando lugar a generación de armónicos, sobretensiones locales, picos de corriente, altos  $dv/dt$  y  $di/dt$  que, como consecuencia, generan interferencias IEM que afectan a la propia red de alimentación, a los receptores conectados a ella, a los circuitos

<sup>1</sup> Ingeniero Electricista. M. Sc., en ingeniería - Línea Automatización Industrial. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Línea - Automática, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Miembro del Grupo de investigación PCI, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. fehoyosv@unal.edu.co.

<sup>2</sup> Ingeniero Electricista, M. Sc., en Ingeniería Eléctrica, Ph. D., en ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Profesor Asociado, miembro del grupo de investigación GREdYP, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. cyounesv@unal.edu.co.

<sup>3</sup> Ingeniero Electricista. Especialización en Transitorios Electromagnéticos, Universidad Nacional de San Juan. Especialización en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Ph. D., en ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Profesor Asociado, miembro del grupo de investigación GREdYP, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. ecano@ieee.org.

In English

## EMI filter techniques in power electronic converters

Fredy Edimer Hoyos Velasco<sup>4</sup>, Camilo Younes Velosa<sup>5</sup> and Eduardo Antonio Cano Plata<sup>6</sup>

### ABSTRACT

This paper presents the results of EMI reduction techniques applied to power electronic converters. The techniques applied included shielding control and power signals, separating power system references regarding reference for instrumentation and measurement signals, implementing analog filters and configuring an appropriate switch trigger system for electronic power to decrease shifting EMI emissions to the maximum. This paper presents the results before and after applying the techniques to reduce interference. The results were also verified by using two real time control strategies rapid control prototyping (RCP).

**Keywords:** EMI reduction, DSP, power electronic converters, shielding, rapid control prototyping (RCP).

Received: jun 24th 2009

Accepted: jun 11th 2010

### Introduction

Electromagnetic interference (EMI) has gained importance due to the constant increase of electronic charges. The situation has been aggravated by circuits' increased integration density of (Josep Balcells *et al.*, 1992).

More jobs and processes can now be done more efficiently, safer and at lower cost using advances in digital and power electronics. Recent studies (Huibin Zhu and J.S. Lai, 1999), (Chingchi Chen, 2003), (Paul C. R and Hardin K. B, 1998), (Ran L and Gokani S, 1998) have shown that high  $dv/dt$  and  $di/dt$  are responsible for most conducted emissions. Electronic converters perform in transient regime, switching voltage currents between different circuit branches, resulting in the generation of harmonics, local surges, power peaks, high  $dv/dt$  and  $di/dt$ , which in turn generate EMI interference affecting their own supply, the connected receivers, the supply circuits

<sup>4</sup> Electrical Engineer. M. Sc., in Engineering - Industrial Automation Line. Ph.D. Student, en Automatic Engineer, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Member, Grupo de investigación PCI, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. fehoyosv@unal.edu.co.

<sup>5</sup> Electrical Engineer, M. Sc., Electrical Engineering, Ph. D., Electrical Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Associate Professor, Member, Grupo de investigación GREdYP, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. cyounesv@unal.edu.co.

<sup>6</sup> Electrical Engineer. Electromagnetic Transient Specialization, Universidad Nacional de San Juan. Specialization Electrical Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Ph. D., in engineering, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Associate Professor, Member, Grupo de investigación GREdYP, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. ecano@ieee.org.

En español

alimentados y a los circuitos que reciben las perturbaciones por radiación (Josep Balcells *et al.*, 1992).

Se pueden generar IEM conducidas y radiadas. Muchas conclusiones han sido sacadas y muchas clases de filtros han sido propuestos con el fin de minimizar su efecto, por ejemplo un filtro de modo diferencial ha sido propuesto en (S. J. Kim y S. K. Sul, 1997) y uno de modo común ha sido propuesto por S. Ogasawara y H. Akagi (2001).

Aplicaciones industriales y tecnológicas a nivel mundial requieren que la energía eléctrica sea de buena calidad, pues de lo contrario los equipos sufrirán daños significativos en sus componentes internos, pérdidas de información y errores en los datos. Se estima que el 90% de la energía eléctrica se procesa a través de convertidores de potencia (Angulo, F., 2004 y 2006). Los sistemas electrónicos sensibles a las IEM consumen aproximadamente el 1% de toda la energía producida, y el 99% restante es gastado principalmente en alumbrado, motores eléctricos y calefacción (Francesc Daura, 1987; IEEE, 1982). En estos procesos es donde se produce la gran mayoría de IEM que afectan a los equipos y al medio que los rodea.

En este artículo se presentan fenómenos de IEM característicos de fuentes conmutadas, para este caso un ondulator monofásico es controlado desde el computador usando *simulink* mediante un RCP. Se implementan algunas técnicas de reducción IEM, entre ellas: filtros análogos, manejo de tierras, apantallamiento y distribución de los componentes a interconectar. Además se muestran los resultados antes y después de aplicar las técnicas.

## Convertidor en estudio

El convertidor en estudio tiene la configuración mostrada en la figura 1. Está conformado por una llave que hace la conmutación, un filtro LC, y la carga que alimenta es resistiva pura (R). Con esta configuración se parte de una tensión no regulada (E) a la entrada y mediante modulación de ancho de pulsos PWM a frecuencia constante de hasta 20 kHz.

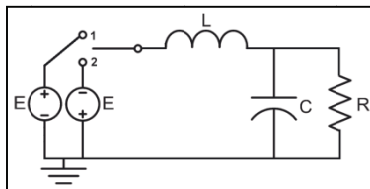


Figura 1. Convertidor DC-DC y DC-AC

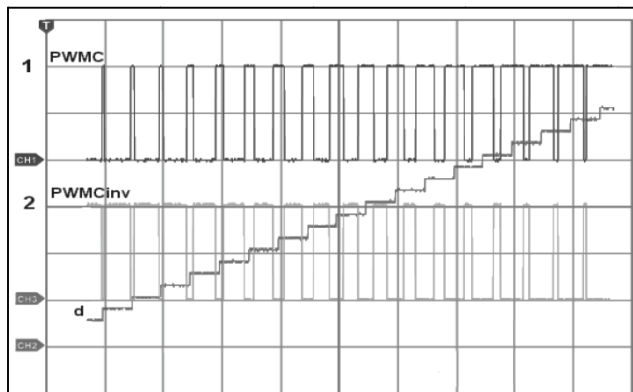


Figura 2. Señales PWM y PWMInv controladas mediante d

In English

the circuits receiving radiation disturbance (Josep Balcells *et al.*, 1992).

Conducted and radiated EMI might be generated. Many conclusions have been drawn and many kinds of filters have been proposed for minimising their effect. Kim and Sul have proposed a differential mode filter (SJ Kim and SK Sul, 1997) and Ogasawara and Akagi have proposed a common mode filter (S. Ogasawara and H Akagi 2001).

Industrial and technological world-wide applications require high-quality electrical energy, otherwise the equipment will suffer significant damage to its internal components, data loss and data errors. It is estimated that 90% of electrical energy is processed through power converters (FG Angulo 2004). Electronic systems, sensitive to EMI, consume about 1% of all produced energy and the other 99% are mainly used in lighting, electric motors and heating systems (Francesc Daura, 1987), (IEEE, 1982). The vast majority of EMI affecting equipment and their surroundings is produced during these processes.

This paper presents EMI phenomena characteristic of switching power supplies. For this case a single-phase ondulator was controlled using simulink by rapid control prototyping (RCP). Some EMI reduction techniques were implemented, among them analog filters, land management, screening and distribution of the components to be interconnected. The results are shown before and after these techniques were applied.

## The converter being studied

The design of the converter being studied is shown in Figure 1. It has switching, an LC filter and feeding load which is a pure resistive load (R). It begins with non-regulated voltage (E) at the entrance. A regulated, variable frequency and width exit was achieved through modulating PWM width pulses at a constant frequency of up to 20 kHz.

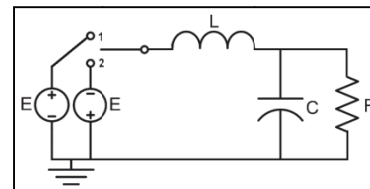


Figure 1: DC-DC and DC-AC converter

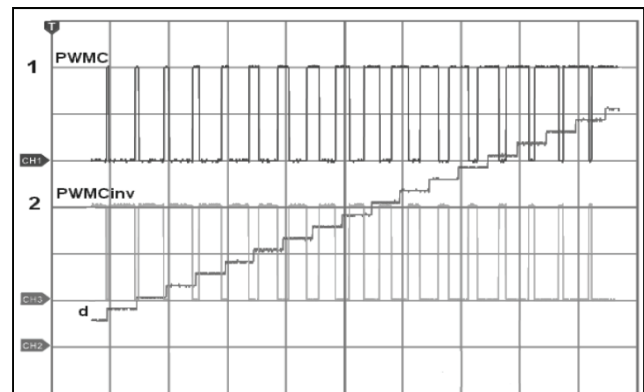


Figure 2: PWM and PWMInv signals controlled by d

En español

In English

La llave estará ubicada en 1 ó 2 dependiendo de la señal de control, como muestra la figura 2, donde se aprecian las salidas: d, PWMc y PWMcinv. Estas señales de control son las encargadas de controlar el tiempo en que cada una de las fuentes estará conectada al filtro. La figura 3 registra un esquema simplificado del convertidor, de él se toman las señales necesarias para efectuar alguna técnica de control, ellas son: la corriente en el inductor (iL), la tensión en el capacitor (Vc) y la corriente en la carga (iR). Estas señales, junto a la señal de referencia Vref, se procesan digitalmente dentro de una plataforma adecuada, en este caso una tarjeta de control y desarrollo (dSPACE, 2009), (DS1104 Controller Board, 2005), (DS1104 Features, 2005), (DS1104 RTI Reference, 2005), (DS1104 RTLib Reference, 2005).

The switching was located in 1 or 2 depending on the control signal as shown in Figure 2 where outputs d, PWMc and PWMcinv can be seen. These control signals were responsible for controlling the time that each of the sources would be connected to the filter. Figure 3 shows a simplified diagram of the converter. The signals needed to implement control techniques were taken from the converter. Among them, were inductor current (iL), voltage on the capacitor (Vc) and the current in the load (iR). These signals, along with the Vref reference signal, were digitally processed in an appropriate platform, in this case a control and development card (dSPACE, 2009), (DS1104 controller board, 2005), (DS1104 features, 2005), (DS1104 RTI reference, 2005), (DS1104 RTLib reference, 2005).

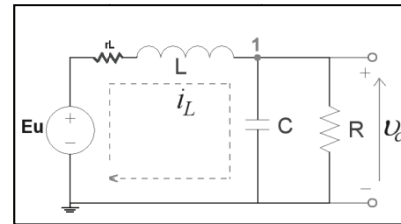
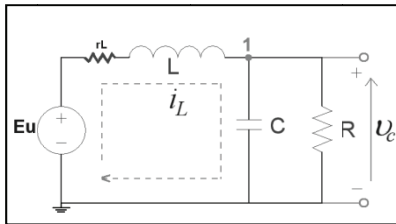


Figura 3. Circuito eléctrico en estudio

Figure 3: The electric circuit being studied

Si la señal de referencia es de tipo sinusoidal el convertidor se comportará como uno DC-AC, si es continua será DC-DC. En la figura 2 se observan las señales de control, las cuales indican cuánto tiempo estará conectada la alimentación +E o -E al filtro. A la fracción del periodo T en que la fuente +E está conectada recibe el nombre de ciclo de trabajo (d). La presencia del PWM genera una señal de control que permite modelar el sistema como uno de estructura variable, ya que conmuta de una topología a otra cada vez que cambia la señal de control. Luego se puede realimentar el sistema a través de pulsos de control en alta frecuencia, que activen +E o -E a la entrada para alimentar al convertidor, logrando disminuir la diferencia entre la tensión real Vc y la de referencia Vref.

If the reference signal was sinusoidal, then the converter would behave as DC-AC, but if it were continuous, then the converter would behave as DC-DC. Figure (2) shows the control signals which indicated the time that the +E o -E supply would be connected to the filter. The period of time T in which the supply +E was connected was called the work cycle (d). The presence of PWM generated a control signal which allowed the modeling of the system as a variable structure because each time the control signal changed it switched from one topology to another. The system could then be replenished through high frequency control pulses to activate +E o -E at the entrance to feed the converter, which would decrease the difference between real Vc voltage and Vref reference voltage.

**Modelado del sistema**

**System modeling**

El modelo lineal en variables de estado del sistema es el siguiente:

The model in system state variables as follows:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{L} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{L} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

Donde las variables de estado son la tensión en el condensador (Vc) y la corriente en la inductancia (iL).

Where capacitor voltage (Vc) and inductor current (iL) were the state variables.

La variable de control (u) toma valores discretos +1 y -1 y para un mejor manejo de las ecuaciones el sistema se representa como en (2).

The control variable (u) took discrete values +1 and -1. The system is represented as in (2) for better operation of the equations.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & h \\ m & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{L} \end{bmatrix} u \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & h \\ m & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{L} \end{bmatrix} u \quad (2)$$

Donde:  $a = -\frac{1}{RC}, h = \frac{1}{C}, m = -\frac{1}{L}, p = -\frac{r_L}{L}$

Where:  $a = -\frac{1}{RC}, h = \frac{1}{C}, m = -\frac{1}{L}, p = -\frac{r_L}{L}$

Este sistema se puede representar como  $\dot{x} = Ax + Bu$ .

This system can be represented as  $\dot{x} = Ax + Bu$ .

En español

Se puede notar que para controlar este sistema es necesario tener conocimiento real de algunas variables de estado de él, que pueden ser: la tensión en el condensador ( $V_c$ ), la corriente en el inductor ( $i_L$ ) o la corriente en la carga ( $i_R$ ) en el caso de conectar cargas complejas. Pero es necesario tener en cuenta que estas señales no deben estar contaminadas con IEM, ya sea del mismo equipo o de su vecindad.

En la figura 4 se muestra el puente inversor que maneja la parte de potencia del circuito, es importante anotar que para poder controlar el interruptor desde la tarjeta DSP es necesario tener una tierra flotante con el objetivo de poder controlarlo.

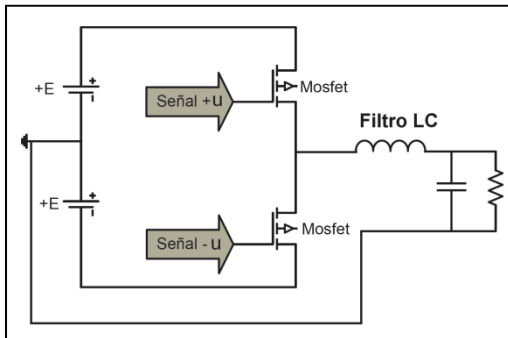


Figura 4. Puente inversor implementado

## Técnicas de reducción IEM aplicadas al convertidor en estudio

En esta sección se va a describir la correcta conexión de dispositivos y acondicionamiento de señales, las cuales entran o salen de la tarjeta de control, con el objetivo de minimizar al máximo las IEM. Es importante comentar que estas notas se pueden aplicar a cualquier otro dispositivo digital inteligente tales como FPGA, microcontroladores, microprocesadores, DSP, tarjetas de control y desarrollo, tarjetas de adquisición y control, entre otros. Hay cuatro clases de señales que muchas veces son llamadas señales de tierra: señales de retorno, señales de potencia, apantallado y sistema de puesta a tierra (DS1104 Controller Board, 2005), (DS1104 Features, 2005), (DS1104 RTI Reference, 2005), (DS1104 RTLib Reference, 2005).

Para mejorar los resultados con respecto a la calidad de la señal rechazo de ruido y al comportamiento electromagnético, esas diferentes señales de tierra no deben ser mezcladas. La línea de señal de retorno, que corresponde a la referencia de la señal que se quiere llevar, conduce la misma corriente de la señal y por lo general es de bajo valor. La tierra de la señal de potencia es el camino de retorno de la fuente de potencia eléctrica, ésta lleva gran cantidad de energía que por lo general es de forma alterna. El apantallamiento es una barrera para proteger las señales que estén dentro de ella, por lo general se conecta a un potencial del equipo y no es necesario que se conecte a la tierra del sistema; y por último, la tierra de protección se refiere al sistema de puesta a tierra diseñado para la protección de los equipos y de los usuarios. La correcta conexión de las señales externas ( $V_c$ ,  $i_L$ ,  $i_R$ ) provenientes del sistema real se realizó con base en la figura 5, en ella se resalta que cada señal debe ser llevada desde el mundo exterior a la tarjeta a través de un cable par trenzado apantallado y que esta pantalla debe estar puesta a tierra a través de la tarjeta. Además es necesario evitar conectar el apantallamiento con los pines GND de la tarjeta.

In English

Real knowledge about state variables, such as condenser voltage ( $V_c$ ), inductor current ( $i_L$ ) or load current ( $i_R$ ) was needed to control this system in case complex loads were to be connected. However, these signals should not have been contaminated with EMI from the same or any other nearby equipment.

Figure 4 shows the inverter bridge operating the power circuit. It is worth noting that a floating ground was needed if the aim was to control the switch using a DSP card.

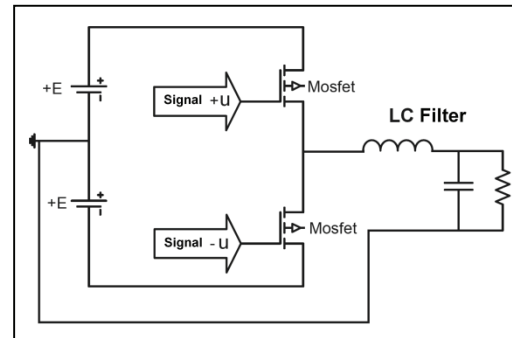


Figure 4: Implemented inverter bridge

## EMI reduction techniques applied to the converter being studied

This section describes proper device connection and signal conditioning coming in or going out of the control card to minimise EMI to the maximum. It is important to note that this can be applied to any other smart digital devices such as FPGA, microcontrollers, microprocessors, DSPs, control and development cards, and acquisition and control cards. Return, power, shield and grounds signals are very often called ground signals (DS1104 controller board, 2005), (DS1104 features, 2005), (DS1104 RTI reference, 2005), (DS1104 RTLib reference, 2005).

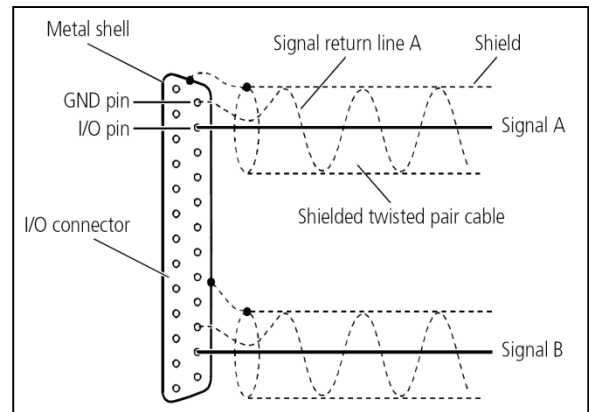
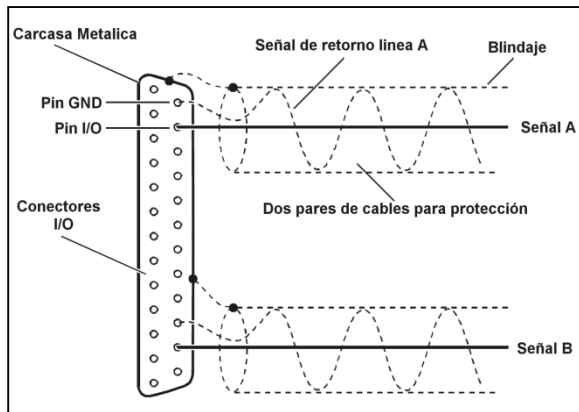
The different ground signals had not to be combined if the aim were to improve the results regarding signal quality, noise rejection and electromagnetic behavior. The return signal line corresponding to the reference signal to be lead had the same signal current and was usually of low value. The ground for the power signal was the way back for the electric power supply, and had a great amount of energy, usually alternating energy. The shielding was a barrier to protect the signals therein. It was usually connected to the power equipment and it was not necessary to be connected to the ground for the system. The ground protection was the ground system designed to protect the equipment and the users. The correct connection of external signals ( $V_c$ ,  $i_L$ ,  $i_R$ ) coming from the real system was accomplished based on Figure 5. Each signal had to be brought from the outside to the card using a shielded twisted pair cable with the shield grounded through the card. It was necessary to avoid connecting the shielding to the card's GND pins.

En español

In English

Figura 5. Apantallado de señales (cortesía de DS1104 Controller Board, 2005).

Figure 5: Signal shielding (courtesy of [DS1104 controller board, 2005])



Se recomienda usar una línea de retorno para cada señal y llevarla a la tarjeta con cable par trenzado apantallado, pues éste protege la señal contra IEM, tiene baja inductancia y cancela los campos electromagnéticos parásitos.

It is recommended that a return line be used for each signal and brought to the card using a shielded twisted pair cable as this protects the signal against EMI, has low inductance and also cancels electromagnetic parasite fields.

Para realizar un apantallamiento completo del sistema donde se protejan todas las señales y dispositivos hubo la necesidad de encerrar el sistema a una jaula de Faraday, la cual presenta baja resistencia y especialmente baja inductancia.

To perform a comprehensive shielding of the system where all signals and devices are protected, it was necessary to enclose the system in a Faraday cage, as it has low resistance and particularly low inductance.

Se han implementado varios tipos de filtros análogos usando amplificadores operacionales y elementos pasivos como resistencia y capacitancias.

Several types of analog filters were implemented using operational amplifiers and passive elements, such as resistance and capacitance.

En las figuras 6 y 7 se muestran los montajes ejecutados con los operacionales a éstos, además se les agregaron los circuitos necesarios para la protección contra sobretensiones y sobrecorrientes usando diodos zener de 9 voltios y un fusible de 0,5 amperios.

Figures (6) and (7) show the assembly implemented using the operational amplifiers. Circuits needed for protection against surges in the voltage and the current were added using 9-volt zener diodes and a 0.5 Amp fuse.

Figura 6. Sensado, protección y filtrado de tensión a la salida

Figure 6: Sensing, protection and output voltage filtering

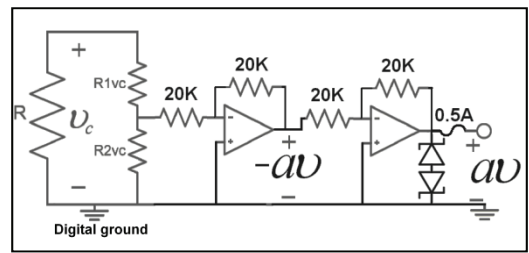
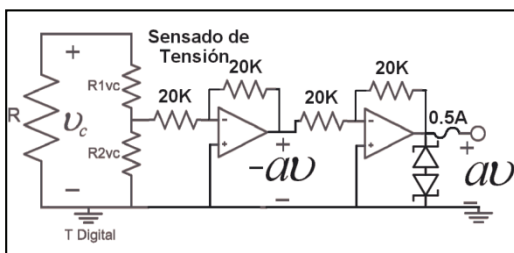
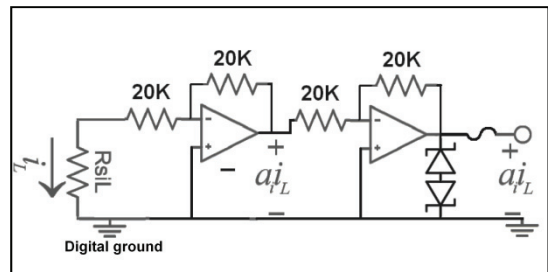
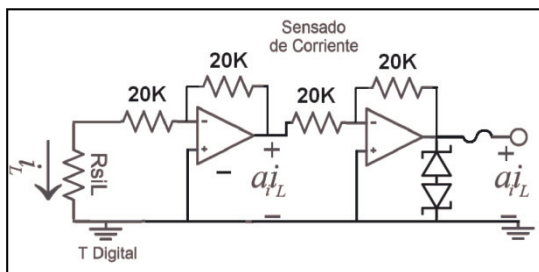


Figura 7. Sensado, protección y filtrado de corriente a la salida

Figure 7: Sensing, protection and output current filtering



Resultados

Results

En esta sección se presentan los resultados obtenidos antes y después de aplicar las técnicas mencionadas.

This section presents the results obtained before and after applying the techniques mentioned above.

En español

En la figura 8 se detallan la señal de control PWM, la señal PWM de potencia y la señal de corriente (iL), que en este caso es la afectada por las interferencias electromagnéticas producto de la conmutación de los transistores.

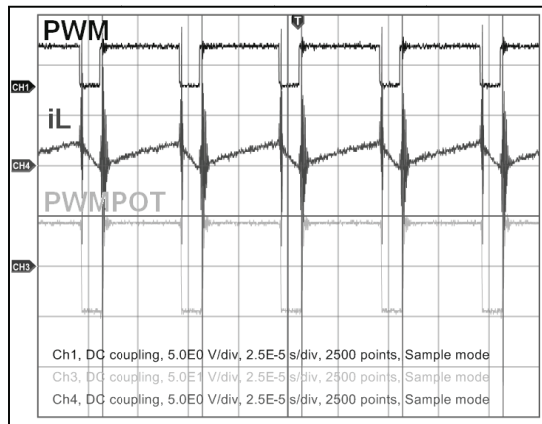


Figura 8. Señal de corriente (iL) afectada por las IEM

En la gráfica 9 se registran las señales de tensión en la carga (Vc) y corriente en el inductor (iL). Se puede apreciar que debido a los altos dv/dt se presentan fenómenos de IEM, los cuales se transmiten a estas variables. Si el control a ejecutar necesita esos estados del sistema en tiempo real sería necesario filtrar estas señales para poder aplicar la acción de control, pues de lo contrario no se tendrá un buen rendimiento de la técnica usada.

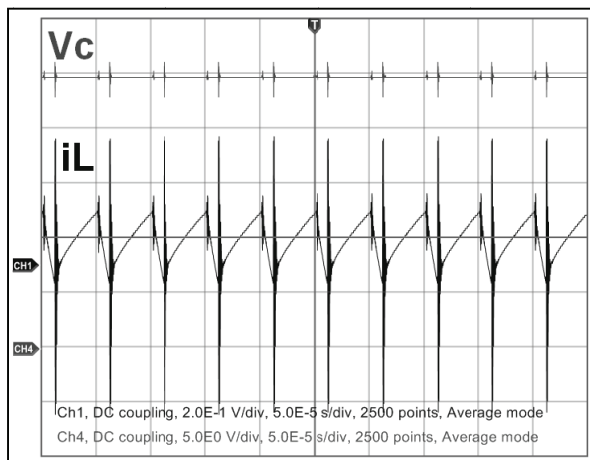


Figura 9. Señales Vc e iL afectadas por las IEM

En la gráfica 10 se exhibe una señal PWM de potencia de +/-130 voltios conmutando a 5 kHz la corriente en el inductor iL y la señal de ruido radiada, detectada con una sonda ubicada a 1 cm de las llaves de conmutación. Se comprobó experimentalmente que, a medida que se aleja de la fuente de interferencia, en este caso de los interruptores, el ruido radiado disminuye, y que este ruido era el que interfería en las señales sensadas y en general en todo el circuito. Por lo tanto, la señal radiada afecta el buen rendimiento de los controladores a implementar. En la gráfica 11 se reseña el mejoramiento en cuanto a la reducción del ruido; en la parte superior se muestra la señal PWM de potencia, luego está la salida de tensión en la carga (Vc), la corriente en el inductor (iL) y la corriente en la carga (iR); en todas ellas se puede ver que se ha reducido casi en su totalidad el ruido debido a la conmutación.

In English

Figure 8 shows the PWM control signal, the power PWM signal and the current signal (iL), which in this case was the one affected by the electromagnetic interference produced by the switching of the transistors.

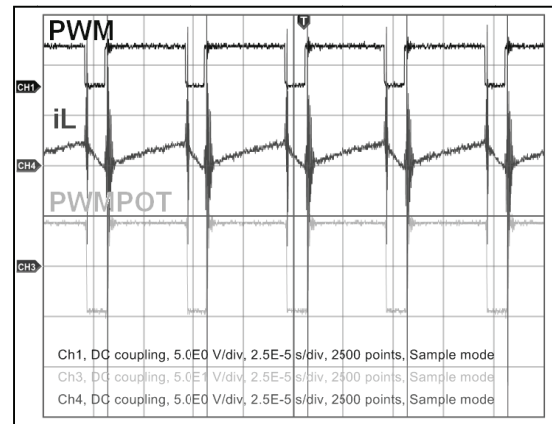


Figure 8: Current signal (iL) affected by EMI

Figure 9 shows the voltage signals on the load (Vc) and the inductor current (iL). EMI phenomena were present due to high dv/dt which were transmitted to the variables. If the control to be implemented required these system states in real time then signals should be filtered, otherwise the technique would not have had efficient performance.

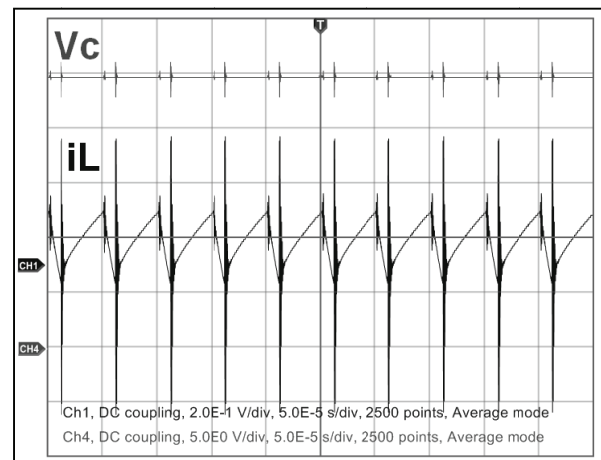


Figure 9: Signals Vc and iL affected by EMI

Figure 10 shows a +/-130 volt PWM power signal switching to 5kHz, the current in the inductor iL and also the radiated noise signal (detected with a probe located 1 cm from the switching). It was found, experimentally, that as the radiated noise moved away from the interference source, in this case the switches, it decreased, and that this noise was the one interfering with the sensing signals and in general with the entire circuit. The radiated signal thus affected the proper performance of the control cards. Figure 11 shows the improvement in noise reduction after applying the noise suppression techniques described above. The top shows the power PWM signal, the voltage output on the load (Vc), the current in the inductor (iL) and the current on the load (iR). All of them had almost complete noise reduction due to the switching.



En español

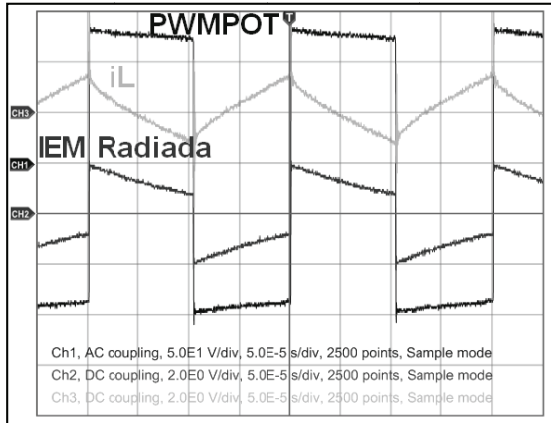


Figura 10. Señal EMI radiada medida con una sonda

In English

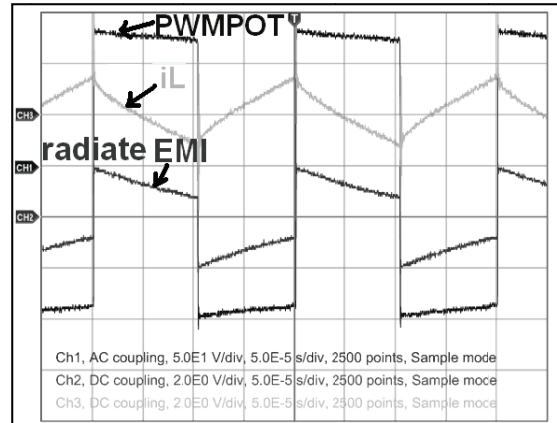


Figure 10: Radiated EMI signal measured with a probe

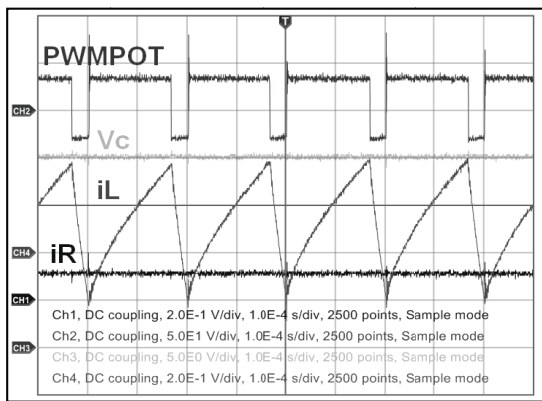


Figura 11. Señales Vc, iL e iR sin IEM para estado estable

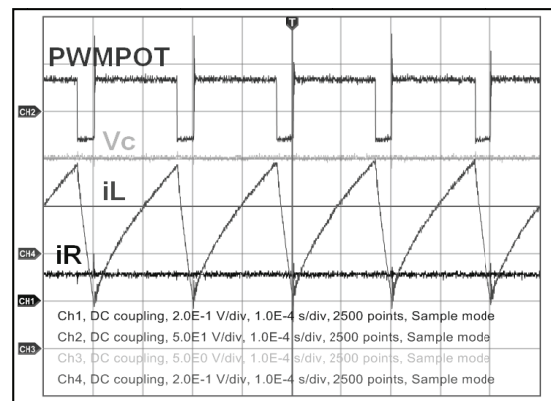


Figure 11: Signals Vc, iL and iR without EMI for the stable state

En las gráficas 12 y 13 se muestran estas mismas señales con bajo nivel de IEM radiado. La figura 12 despliega una señal periódica de periodo 6 y la segunda para cuando entran en zona de caos. Es de anotar que estas señales están libres de IEM y con ellas ya es posible ejecutar mejor la acción de cualquier controlador en tiempo real.

Figures 12 and 13 show the same signals but with low level radiated EMI. Figure 12 shows signals that are periodic (of period 6) and Figure 13 shows the signals entering the chaos zone. It should be considered that these signals were free of EMI and they could be used to implement a better real time control action.

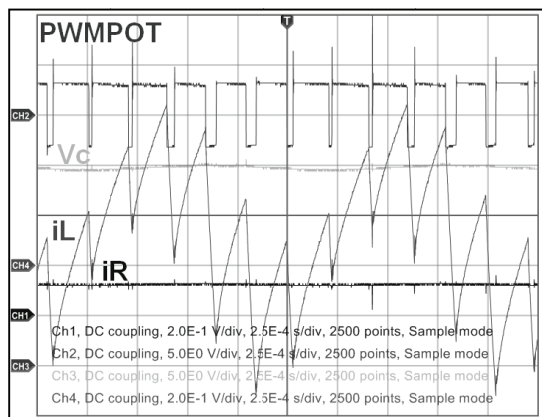


Figura 12. Señales Vc, iL e iR sin IEM para señales periódicas

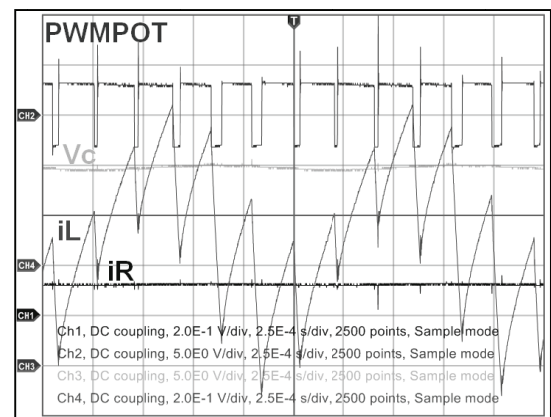


Figure 12: Vc, iL and iR signals without EMI for periodic signals

En la figura 14 (tomada de (Hoyos, F. E., 2008), se indica el rendimiento de una técnica de control ZAD —Zero Average Dynamics— (Angulo, F. et al., 2003; Angulo, F. et al., 2008; Taborda, J. et al., 2007), trabajando en conjunto con la técnica de control FPIC —control por inducción al punto fijo— (Angulo, F. et al., 2007; Olivar, G. et al., 2005)

Figure 14, taken from (Hoyos F.E., 2008), shows the performance of the zero average dynamics (ZAD) control technique (F Angulo, 2003), (Angulo F, et al., 2008), (Taborda J, et al., 2007), working conjunction with the control of fixed point induction (FPIC) control technique (Angulo F, et al., 2007; ) (Olivar G, et al., 2005)

En español

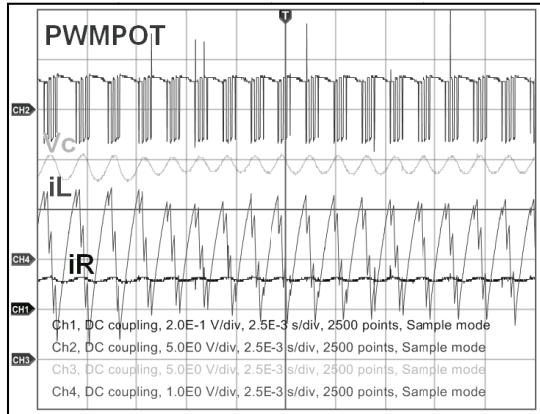


Figura 13. Señales Vc, iL e iR sin IEM para zona caótica

In English

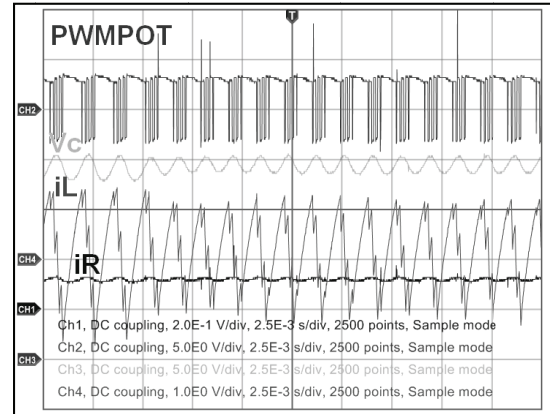


Figure 13: Vc, iL and iR signals without EMI in the chaos zone

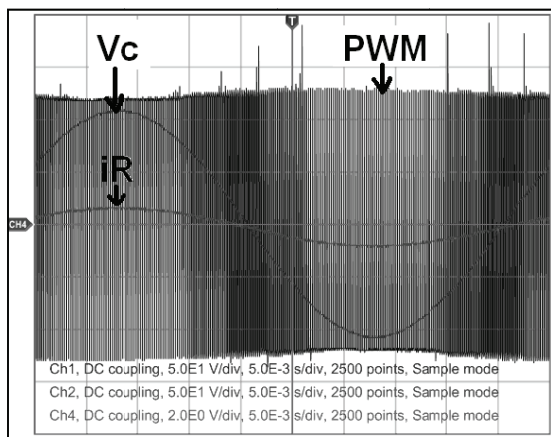


Figura 14. Señales PWM, Vc e iR sin IEM para señales periódicas

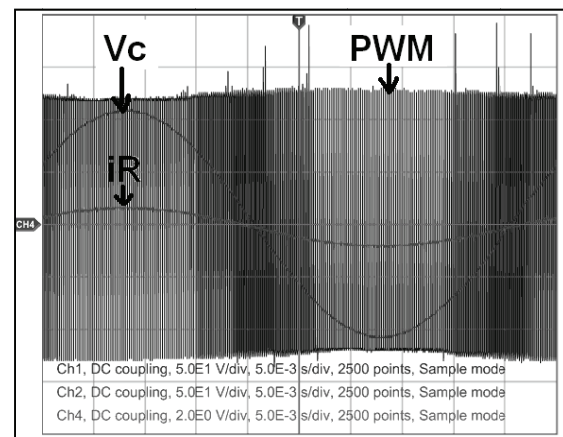


Figure 14: PWM, Vc and iR signals without EMI for periodic signals

Después de haber reducido la IEM al máximo se aplicó otra técnica de control —control con histéresis— (Angulo, F., 2007; Hoyos, C. *et al.*, 2007; Angulo, F. *et al.*, 2007), donde es indispensable que las señales sensadas estén libres de IEM. En la figura 15 se presenta el rendimiento de este controlador trabajando en tiempo real desde una DSP, para una referencia 40 sen ( $2\pi 10t$ ).

Once the EMI were reduced to the maximum, another control technique (control with hysteresis) was applied, (Angulo F, 2007), (Hoyos C, *et al.*, 2007), (Angulo F, *et al.*, 2007), where it was essential for the sensing signals to be EMI-free. Figure 15 shows the performance of the control from a DSP card in real time, with reference 40sen ( $2\pi 10t$ ).

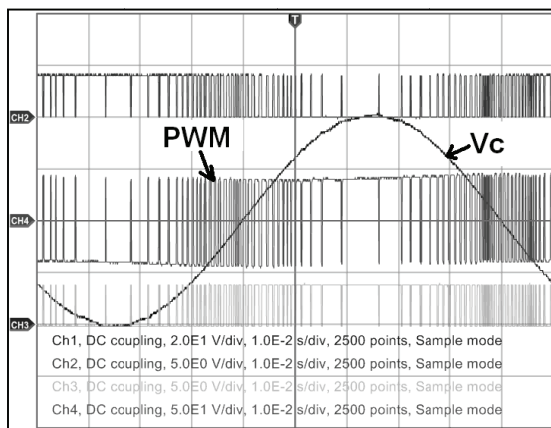


Figura 15. Señales Vc, iL e iR sin IEM para señales periódicas

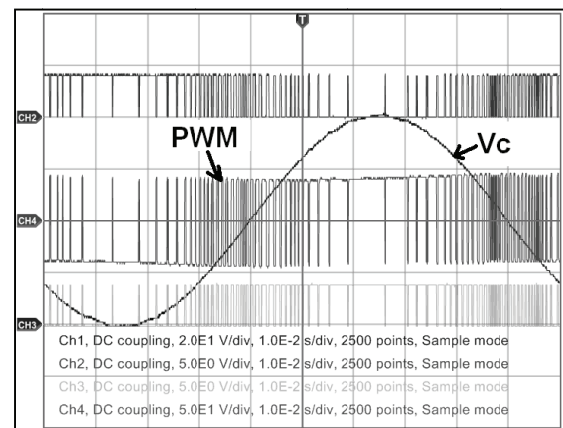


Figure 15: Vc, iL and iR signals without EMI for periodic signals



## Conclusiones

Las IEM producidas por el convertidor bajo estudio fueron reducidas en su gran mayoría, usando las técnicas de supresión.

Después de haber eliminado la gran mayoría de las IEM fue posible ejecutar bien las técnicas de control y se observó un gran aumento en el rendimiento de éstas, implementadas en tiempo real.

Las siguientes son algunas consideraciones a tener en cuenta:

- Las líneas análogas de las digitales deben estar separadas.
- No usar conectores en paneles (correas) sin protección en áreas donde hay gran radiación electromagnética.
- Para llevar señales del exterior a la tarjeta es necesario usar cable par trenzado apantallado con el fin de llevar cada señal a un pin y devolverla por su señal de retorno, y que estén apantalladas.
- En lo posible, usar cables cortos entre el exterior y la tarjeta.
- No juntar líneas de señal con líneas de potencia, de lo contrario se pueden llevar en paralelo pero con una cierta distancia entre ellas, esto es con el fin de reducir acoples magnéticos entre líneas.
- Proteger las señales contra equipos que produzcan campos magnéticos tales como celulares, transformadores, bobinas, fuentes de poder, motores eléctricos, pantallas, etcétera.

## Agradecimientos

Agradecimientos infinitos a la profesora Fabiola Angulo García por todo el apoyo brindado; sin él, hubiera sido muy difícil la realización de estas investigaciones.

## Bibliografía / References

- Angulo, F. G., Análisis de la dinámica de convertidores electrónicos de potencia usando pwm basado en promediado cero de la dinámica del error (ZAD), PhD dissertation, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, Spain, 2004.
- Angulo, F., Desarrollo de una nueva técnica de control para sistemas discretos., Work presented for becoming promoted to fulltime Professor, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, October 2006.
- Angulo, F., Hoyos, C., Olivar, G., Dinámica de un Convertidor Buck Controlado en Tensión por banda de Histéresis Constante., Segundo Simposio Regional Electrónica y Aplicaciones Industriales, 2007.
- Angulo, F., Hoyos C., Olivar, G., Caracterización estadística del convertidor Buck en régimen caótico., 3<sup>rd</sup> International Electrical and Electronic Engineers Congress, 2007, Bogota.
- Angulo, F., Olivar, G., Tabora, J., Hoyos, F., Nonsmooth dynamics and FPIC chaos control in A DC-DC ZAD-strategy power converter., Sixth Euromech Nonlinear Dynamics Conference (Enoc 2008), Vol. 55, Saint Petersburg, 2008, pp. 2392-2401.
- Balcells, J., Daura, F., Esparza, R., Pallás, R., Interferencias Electromagnéticas en sistemas Electrónicos, Barcelona Spain, 1992.
- Chingchi, Ch., Characterization of power electronics IEM emission., IEEE Electromagnetic Compatibility Conf, pp. 553-557. 2003.
- DS1104 Controller Board., RTLib Reference, dSPACE, Release 5.0 – November, 2005.

## Conclusions

EMI produced by the converter being studied became greatly reduced when using noise suppression techniques.

The control techniques were efficiently applied once the vast majority of EMI were eliminated. Also, an enhancement in control technique performance was observed in real time.

Some considerations should be taken into account.

- Analog and digital lines should be kept separated.
- Connectors in unprotected panels (belts) should not be used in areas of high electromagnetic radiation.
- A shielded twisted pair cable should be used to carry signals from the outside to the card so each signal is carried out to a pin and sent back through the return signal. The signals should be shielded.
- Whenever possible, short cables should be used between the outside and the card.
- Signal lines should not be placed together with power lines. These lines may run parallel but with an adequate distance between them to reduce magnetic coupling.
- The signals should be protected against equipment and devices producing magnetic fields such as cell phones, transformers, coils, power supplies, electric motors and screens.

## Acknowledgements

We would like to thank Professor Fabiola Angulo Garcia; without her support it would have been very difficult to complete this research.

- DS1104 Controller Board., dSPACE, Hardware Installation and Configuration, For DS1104 and CP1104 CLP1104 Connector Panels, Release 5.0 – November, 2005.
- DS1104 Controller Board., Features, dSPACE, Release 5.0 – November, 2005.
- DS1104 Controller Board., RTI Reference, dSPACE, Release 5.0 – November, 2005.
- Francesc, D. L., El ruido en sistemas digitales I., Mundo Eléctrico No. 175, 1987.
- Hoyos, C., Olivar, G., Avendaño, L., Bifurcation analysis, instrumentation and voltage control in buck converter regulated by hysteresis band., CARS and FOF 2007, Bogota, 2007.
- Hoyos, C., Osirio, G., Control por modos deslizantes, diseño e implementación, aplicado a un convertidor Buck., Simposio internacional sobre calidad de la energía eléctrica, Manizales, 2007. <http://www.dspace.com/ww/en/pub/start.cfm>, Embedded Success dSPACE, Accelerating your success.
- Hoyos, F. E., Desarrollo de Software y Hardware para Manejo de un Convertidor DC-DC y DC-AC Controlado con ZAD y FPIC., MSC thesis, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2008.
- Huubin Z., Lai, J. S., Analysis of conducted IEM emissions from PWM inverter based on empirical models and comparative experiments., IEEE PESC 99, 2(27), 1999, pp.1727-1733.
- IEEE Guide for the Installation of Electrical Equipment to Minimize Electrical Noise Inputs to Controllers from External Sources., IEEE Std 518, 1982.

- Kim, S. J., Sul, S. K., A novel filter design for suppression of high also eliminate a small part of CM noise., Voltage gradient in voltage-fed PWM inverter, IEEE Proceeding Applied Power Electronics, 1997, pp. 122-127.
- Ogasawara, S. Akagi, H., Suppression of common-mode voltaje in a PWM rectifier/inverter system., IEEE Industry Applications, Conference 2001, pp. 2015-2021.
- Olivar, G., Ocampo, C., Angulo, F., Fossas, E., Stabilization of chaos with fpic: Application to zad-strategy buck converters., 16<sup>th</sup> IFAC World Congress in Prague, 2005.
- Paul, C. R., Hardin, K. B., Diagnosis and the common mode and differential mode conducted IEM noise., IEEE Trans, Electromagnetic Compatibility, 1998, pp. 553-560.
- Ran, L., Gokani, S., Conducted electromagnetic emission in induction motor drive systems part I: time domain analysis and requirement, should be met identification of dominant modes., IEEE Trans. Power Electron, 1998, pp. 757-767.
- Taborda, J., Hoyos, F., Hoyos, C., Perez, E., Diseño e Implementación de un Inversor Monofásico Usando una Topología buck, IV Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica (Sicel 2007), Manizales, 2007.