

DESARROLLO DE UN INVERSOR MONOFÁSICO DIDÁCTICO

J. SANDOVAL, W. SALAMANCA, V. CARDOZO, J. DUARTE Y F. FERNÁNDEZ
Facultad Seccional Duitama. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Colombia.

En este trabajo se plantea el desarrollo de un inversor monofásico didáctico, que puede ser utilizado en practicas de Electrónica de Potencia. Como interruptores se escogieron IGBTs conectados en la configuración puente y manejados por un microcontrolador. Como resultado se obtuvo un inversor monofásico de 150 W, con una entrada de 30 VCC y una señal cuadrada de salida de 100 V_{RMS} cuya frecuencia se puede variar entre 50 y 120 Hz.

1. Introducción

La generación de una señal alterna (CA) a partir de una fuente de corriente continua (CC) es uno de los procesos de conversión de potencia eléctrica más empleados en la actualidad. Entre sus aplicaciones cabe mencionar el control de motores de inducción, control de motores de imán permanente, sistemas de iluminación de emergencia y autotrónica (Rodríguez *et al.*, 2002; Yamamoto *et al.*, 2004; Radecker y Dawson, 2004; Naidu y Walkers, 2003). Otro campo de gran demanda para los inversores es el de los sistemas de alimentación ininterrumpidos que permiten la operación segura de cargas críticas como los sistemas satelitales, equipo para control de tráfico aéreo, nodos de Internet, transacciones bancarias y equipos para soporte de la vida, entre otros (Alves *et al.*, 2002; Lawrence *et al.*, 2003).

Dada su importancia, es indispensable que los estudiantes de tecnología e ingeniería en electricidad y electrónica se familiaricen con los principios de funcionamiento de los inversores, al igual que con el de los dispositivos electrónicos de potencia, y aprendan a utilizarlos en diversas situaciones (Idowu, 2004). Para ello, las prácticas de laboratorio se constituyen en actividades fundamentales que permiten reforzar los conocimientos impartidos en teoría. En este punto los módulos de experimentación para la realización de practicas de laboratorio, se convierten en una herramienta importante en el proceso de enseñanza - aprendizaje no solo porque fortalecen la comprensión acerca del comportamiento real de los dispositivos de potencia, sino porque afianzan las destrezas y capacidades requeridas por el estudiante y lo motivan al desarrollo de sus propios diseños (Williams *et al.*, 2004).

Desafortunadamente, el material didáctico disponible para electrónica de potencia es escaso, costoso y normalmente se presenta a manera de cajas negras que limitan la creatividad y no le permiten al estudiante apropiarse del conocimiento subyacente. Es por ello que en este trabajo se plantea el desarrollo de un inversor monofásico didáctico de onda cuadrada, con potencia nominal de 150 W, que podrá ser utilizado en las prácticas de laboratorio tanto en el área de electrónica de potencia como en la de máquinas eléctricas.

En el diseño se aplicó el criterio de modularidad, lo cual permitió el desarrollo de bloques estructurales que pueden emplearse de forma independiente o interconectarse para lograr el funcionamiento del inversor. Como elementos de conmutación se escogieron los IGBTs, conectados en la configuración puente, ya que estos dispositivos permiten un mejor rendimiento en la operación del inversor, a la vez que su funcionamiento como interruptores puede ser fácilmente asimilado por los estudiantes.

La técnica de control digital por microcontrolador fue implementada para manejar los transistores de potencia, lo cual simplifica el proceso de diseño y abre la posibilidad de estudiar diversas estrategias de control. Sin embargo, el estudiante podrá diseñar y utilizar sus propios circuitos de control, lo cual le brinda una mayor flexibilidad a la hora de afianzar sus conocimientos.

Adicionalmente, el usuario puede tener acceso a los diferentes módulos del inversor, e incluso es posible estudiar otras configuraciones como la de transformador de toma media.

Como resultado del proceso de diseño y fabricación se obtuvo un prototipo compacto, accesible y fácil de utilizar, que permite el estudio del principio de inversión de forma didáctica y motivante para los estudiantes, a la vez que facilita el trabajo de los docentes. A continuación se describe el desarrollo del inversor monofásico didáctico y se presentan los resultados más relevantes en cuanto a su funcionamiento y aplicación.

2. Materiales y métodos

2.1. Requerimientos de diseño

El desarrollo del Inversor Monofásico Didáctico, IMD, surgió como una necesidad del curso de Electrónica Industrial ofrecido en la Facultad Seccional Duitama de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. En esta asignatura se estudian algunos de los dispositivos de potencia más comunes así como sus principales aplicaciones, entre las cuales se tienen los convertidores de potencia. Como parte importante en el desarrollo del curso, los estudiantes deben realizar diversos montajes prácticos que permitan corroborar los conceptos vistos en teoría.

Estos montajes se elaboran en grupos de 2 ó 3 estudiantes, sobre protoboards y con elementos adquiridos por ellos mismos. A parte del costo de los componentes, que en muchas ocasiones son inadecuados para la ejecución de las prácticas, una de las principales dificultades encontradas con esta metodología es el tiempo excesivo que invierte el estudiante en el ensamble, calibración y puesta a punto de los circuitos. Estas dificultades hacen que se desvíe la atención del estudio de los conceptos involucrados y se concentre en una manipulación que, en muchas ocasiones, resulta infructuoso e ineficiente con respecto al objetivo pedagógico que se persigue.

Teniendo en cuenta lo anterior, se planteó el desarrollo de un prototipo didáctico que cumpla con los siguientes requerimientos pedagógicos:

- ? Desarrollar un inversor monofásico seguro y fácil de operar, que permita estudiar y comprender los principios involucrados en su funcionamiento.
- ? El prototipo deberá facilitar el acceso a los diversos componentes, permitiendo al usuario interactuar con ellos, evitando en lo posible el efecto de caja negra. Esto con el fin de generar una mayor confianza y de potenciar la creatividad del estudiante para producir innovaciones a partir de algo conocido.
- ? Utilizar en el diseño componentes actualizados que ilustren la interacción de la electrónica digital y de potencia.
- ? El IMD deberá estar acompañado de guías de práctica que indiquen los diferentes aspectos tanto funcionales como de aplicación del prototipo, facilitando su utilización por parte de docentes y estudiantes.

Desde el punto de vista técnico se planteó el diseño y construcción de un inversor monofásico de 150 W, con frecuencia variable entre 50 y 120 Hz, que utiliza una señal de entrada CC de 30 V, y provee una señal cuadrada de salida de $100 V_{RMS}$.

2.2. Diseño propuesto

El principal objetivo de un inversor es el de permitir la conversión de potencia de corriente continua en potencia de corriente alterna, que puede tener frecuencia variable, con el fin de alimentar cargas que requieren una señal alterna. Como se muestra en la figura 1, la estructura propuesta para el IMD se basa en tres bloques funcionales: el bloque de potencia, el de transformación y el de control,

los cuales brindan la facilidad de observar y manipular paso a paso todo el proceso de inversión eléctrica.

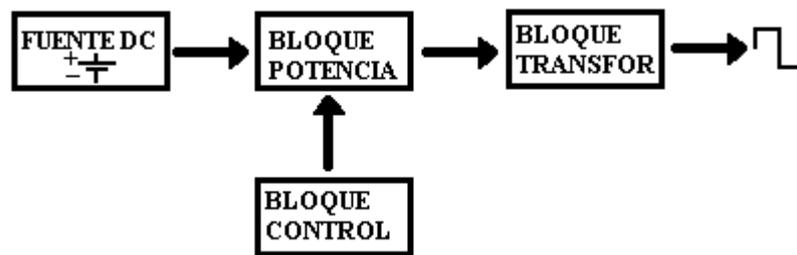


Figura 1. Diagrama esquemático del inversor monofásico didáctico.

Bloque de potencia. Es el corazón del sistema y su objetivo es el de generar una señal cuadrada bipolar a partir de la señal continua entregada por la fuente de alimentación. En la práctica este bloque se puede considerar como una matriz de interruptores electrónicos los cuales, al ser activados adecuadamente, permiten invertir el flujo de corriente a través de la carga; de esta manera se obtienen los dos semiciclos de la señal cuadrada, cuya amplitud sería igual al valor de la fuente CC si no existieran pérdidas en el circuito (Ocampo, 1986).

En el caso del IMD, la función descrita anteriormente se puede cumplir con las configuraciones de transformador de toma media, que requiere únicamente dos interruptores, o con la configuración en puente, que requiere cuatro interruptores pero a la vez efectúa un uso más eficiente del transformador (Gualda *et al.*, 2003). En éste caso se escogió la configuración puente mostrada en la figura 2.

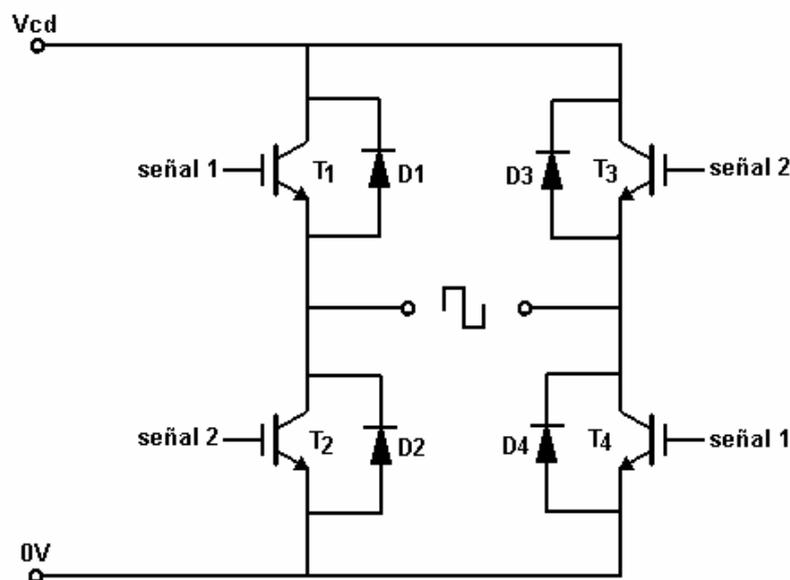


Figura 2. Estructura del puente inversor monofásico con cuatro IGBTs y sus respectivos diodos de recuperación.

En el circuito de la figura 2 los transistores conmutan por parejas: T_1 y T_4 permiten generar el semiciclo positivo de la señal alterna de salida, mientras que T_2 y T_3 se activarán para inducir el semiciclo negativo. Para una correcta operación será necesario que el bloque de control genere dos señales desfasadas 180° entre sí, señal 1 y señal 2 en la figura 2, las cuales harán conmutar los transistores de potencia a la velocidad requerida.

En el caso de cargas con componente inductiva es posible que se presenten problemas de conmutación de los transistores debido a la corriente reactiva que fluye por ellas. Además, si la

inductancia es muy elevada, se presentarán transitorios que pueden deteriorar el funcionamiento de los semiconductores de potencia. Para minimizar estos inconvenientes se opta por conectar diodos en antiparalelo con los transistores, D_1 a D_4 en la figura 2, los cuales redireccionan la corriente reactiva hacia la batería, o fuente CC, permitiendo mantener una corriente constante sobre ella, y previniendo a la vez el calentamiento de los transistores (Ocampo, 1986).

Existen varios dispositivos que pueden emplearse como interruptores de potencia: el SCR, el BJT y el MOSFET de potencia son algunos de ellos (Williams, 1992). En este caso se optó por utilizar transistores de compuerta aislada, IGBTs, los cuales son muy populares en la actualidad para aplicaciones de media y alta potencia (Li *et al.*, 2004). El IGBT seleccionado fue el MGW20N60D, el cual trae integrado el diodo en antiparalelo, que puede soportar una tensión entre colector y emisor de hasta 600 V y conmutar una corriente de 32 A, valores adecuados al los requerimientos del circuito (Sandoval y Salamanca, 2004).

Bloque de control. Es el encargado de generar las dos señales que gobiernan la activación y desactivación de los transistores de potencia, función que puede ser cumplida por un simple circuito oscilador de onda cuadrada. Sin embargo, en este caso se decidió utilizar un microcontrolador, lo cual provee una mayor flexibilidad a la hora de aplicar técnicas de control como la modulación por ancho de pulsos, PWM, y facilita la variación de la frecuencia en el rango deseado. En el desarrollo del IMD se empleó el microcontrolador MC68HC908JK3 de Motorola, cuyo diagrama de conexión se ilustra en la figura 3. La programación se elaboró a través de MICROGRADES, que es un sistema gráfico para la programación de microcontroladores Motorola cuya filosofía de trabajo simplifica enormemente el diseño y puesta a punto de la aplicación (Control Key Ltda., 2005).

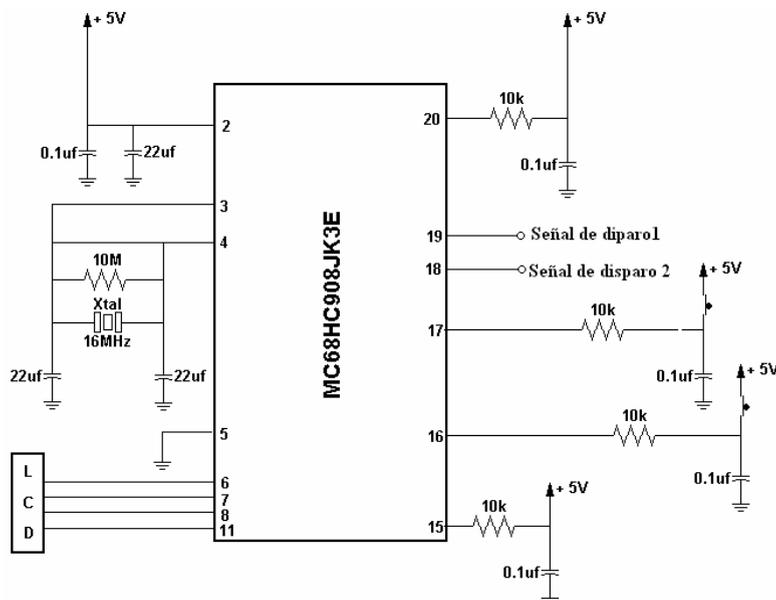


Figura 3. Diagrama circuital del bloque de control que incluye una pantalla de cristal líquido para visualizar la frecuencia.

Bloque de transformación. Este bloque se encarga de llevar la señal alterna generada por el bloque de potencia a la amplitud requerida por la carga que se quiere alimentar. Esta función la cumple un transformador elevador que en este caso se seleccionó de entre los disponibles comercialmente y tiene las siguientes características: potencia nominal 200 W, tensión de salida 120 V y tensión de entrada 24 V con toma media entre cuyos terminales se puede obtener una tensión máxima de 48 V. Esto último permite adaptar el mismo transformador tanto a la configuración del inversor en puente como a la de transformador de toma media, ya que sus terminales se encuentran accesibles al usuario.

3. Resultados y discusión

3.1. Prototipo resultante

Una vez diseñados se procedió al montaje y puesta a punto de los circuitos en el laboratorio. Como resultado, la figura 4 muestra el montaje del bloque de control en el circuito impreso.

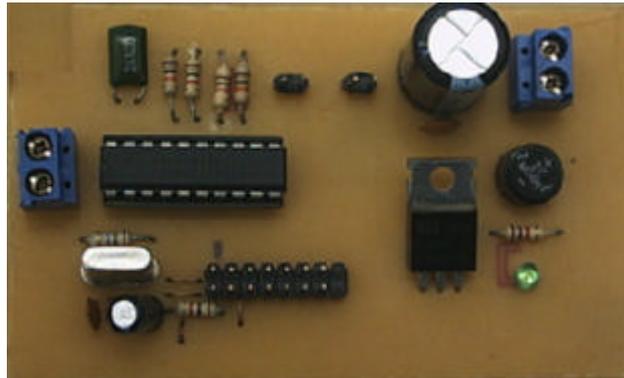


Figura 4 Disposición final del circuito de control.

El circuito de la figura 4 está programado para generar dos señales cuadradas con amplitud de 5 V y cuya frecuencia se puede variar entre 50 y 120 Hz, en intervalos de 10 Hz, a través de dos pulsadores externos. La figura 5 presenta las dos señales de disparo, las cuales están desfasadas 180° eléctricos una de la otra, y que son aplicadas directamente a la compuerta de cada pareja de transistores de potencia para conseguir la secuencia correcta de conmutación. La calibración de esta etapa es un punto crucial en el buen funcionamiento del IMD, ya que una secuencia incorrecta o la superposición del tren de pulsos puede llevar a la conducción simultánea de los cuatro IGBTs causando un cortocircuito.

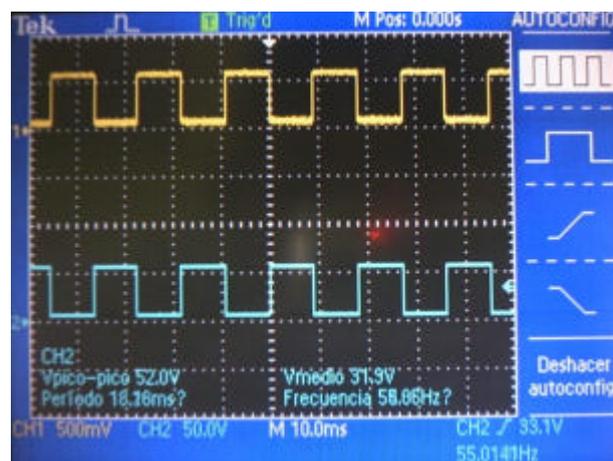


Figura 5. Señales de control generadas por el microcontrolador, con amplitud de 5 V y frecuencia de 50 Hz.

En la figura 6 se observan todos los componentes del bloque de potencia ubicado en su circuito impreso; en ella se destacan los cuatro transistores de potencia con sus respectivos disipadores.

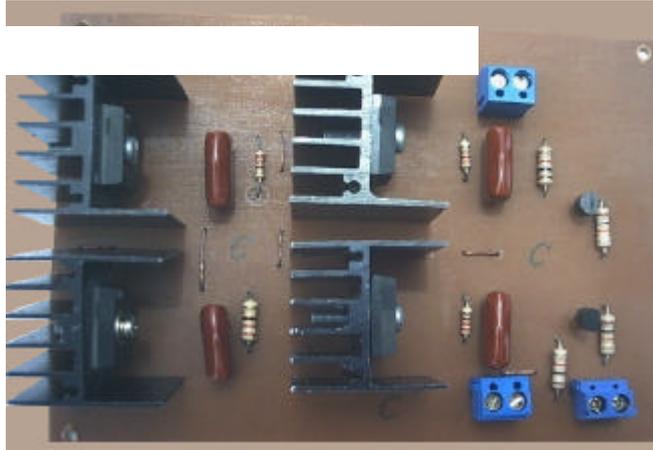


Figura 6. Montaje del bloque de potencia en el circuito impreso.

Al alimentar el bloque de potencia y conectar las señales de disparo a las compuertas de los transistores IGBT estos conmutan, obteniéndose a la salida del puente una señal alterna de forma cuadrada, como se muestra en la figura 7, cuya amplitud pico es igual al valor de la fuente CC menos la suma de las caídas de tensión de los dos transistores que conducen en cada semiciclo.

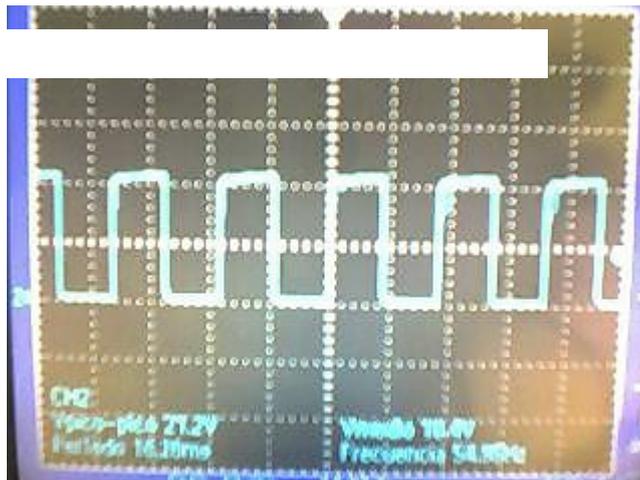


Figura 7. Señal de salida del bloque de potencia generada a partir del tren de pulsos de la figura 5, cuando el puente inversor se alimenta con una señal CC de 30 V.

Al variar la frecuencia en el bloque de control se obtiene un cambio similar en la señal de salida del puente inversor. Esta situación se ilustra en la figura 8 para un valor de polarización CC de 30 V.

El paso final en la puesta a punto del IMD es la conexión del transformador elevador cuyas características se mencionaron en la sección 2.2. Por último, se procedió al montaje del prototipo en su bastidor, cuya distribución final se muestra en la figura 9. La caja está cubierta por una tapa transparente que permite observar todos los componentes del inversor. Así mismo, las señales de entrada y salida de cada uno de los bloques funcionales se hallan disponibles en conectores externos debidamente etiquetados para evitar confusiones. Igualmente, se ha dispuesto una pantalla de cristal líquido, LCD, que permite visualizar la frecuencia de trabajo, y junto a ella se tienen dos pulsadores para incrementar o decrementar su valor.

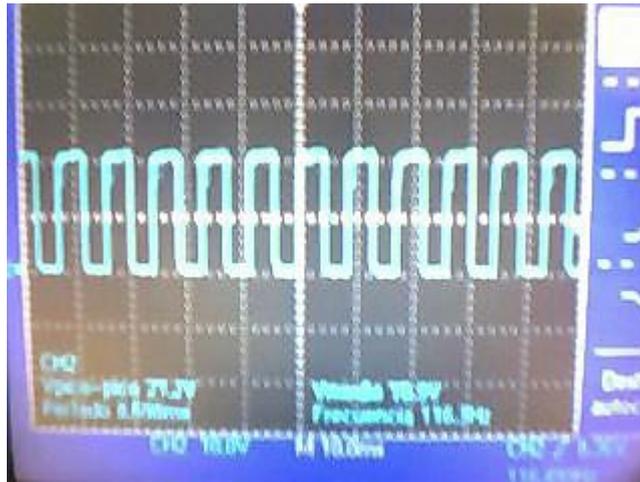


Figura 8. Señal de salida del bloque de potencia para una frecuencia de 120 Hz en los pulsos de disparo.



Figura 9. Disposición final del inversor monofásico didáctico.

Desde el punto de vista técnico, se obtuvo un inversor monofásico de onda cuadrada que permite alimentar cargas de hasta 150 W, con una tensión de 100 V_{RMS} y frecuencia variable entre 50 y 120 Hz, en intervalos de 10 Hz, a partir de una fuente CC de 30 V y 5.5 A.

3.2. Prácticas de laboratorio

Como resultado del diseño descrito anteriormente, se obtuvo un equipo liviano, portátil y fácil de operar, lo cual potencia el trabajo de docentes y alumnos a la hora de utilizarlo como material didáctico para la enseñanza del concepto de inversión eléctrica y sus aplicaciones.

Una vez disponible el prototipo se procedió a complementar el aspecto pedagógico del proyecto, y para ello se plantearon algunas prácticas de laboratorio como las siguientes:

- ? Estudio del funcionamiento de los transistores de potencia como interruptores y su aplicación en los inversores
- ? Estudio del funcionamiento de un inversor monofásico en la configuración puente.
- ? Comportamiento de un inversor monofásico con carga resistivas e inductivas.
- ? Control de velocidad de motores de CA.

Igualmente se sugieren otros experimentos en los cuales será necesario implementar módulos adicionales o modificar el IMD; entre estas prácticas se tienen:

- ? Estudio del funcionamiento del inversor monofásico con transformador de toma media. Para ello habrá que implementar el módulo de potencia, utilizando el bloque de control y el transformador ya disponibles.
- ? Control del disparo de un inversor mediante la técnica de PWM y su influencia en el contenido armónico de la señal de salida. Aquí será necesario modificar el programa del microcontrolador.
- ? Obtención de una señal sinusoidal a partir de la señal cuadrada que entrega el IMD. Para ello será necesario añadir el módulo de filtraje adecuado

4. Conclusiones

Un breve vistazo a la literatura técnica permite establecer que el concepto de inversión eléctrica cuenta con una gran cantidad de aplicaciones en la automatización de procesos industriales, en la alimentación de cargas críticas y en aparatos de uso doméstico, entre otras. Por ello, se hace indispensable el estudio de los inversores por parte de tecnólogos e ingenieros en electricidad y electrónica, empleando para ello el material didáctico adecuado.

Como resultado de este trabajo se desarrolló el prototipo de un inversor monofásico didáctico, con IGBTs conectados en la configuración puente, el cual entrega una señal cuadrada de frecuencia variable entre 50 y 120 Hz, con una potencia de 150 W.

Para el disparo de los semiconductores de potencia se usó un microcontrolador, el cual facilita, flexibiliza y optimiza la operación y el manejo del inversor tanto en el aspecto técnico como en el didáctico. Una ventaja adicional es que, a partir del mismo hardware, bastará con una modificación del programa para estudiar otras estrategias de control de inversores como la modulación por ancho de pulsos.

El IMD se estructuró en bloques funcionales que permiten la interacción del usuario con las señales de control y potencia, facilitando el acceso a los diferentes componentes del prototipo, lo cual minimiza el efecto de caja negra y permite afianzar los conceptos impartidos en teoría. Así mismo, el inversor se desarrolló con microcontroladores e IGBTs que, a parte de ser dispositivos tecnológicamente actualizados, permiten ilustrar la complementariedad de la electrónica de potencia con la electrónica digital.

Se establecieron algunas prácticas básicas de laboratorio que involucran la conversión de señales de corriente continua en señales de corriente alterna. Con base en ellas se sugiere la realización de experimentos más complejos donde, a partir de modificaciones o adiciones al IMD, los usuarios podrán explorar otras posibilidades de la inversión eléctrica.

Desde el punto de vista pedagógico el IMD permite dinamizar el proceso de enseñanza – aprendizaje de la electrónica de potencia, ya que su utilización motiva a docentes y alumnos en el estudio y profundización de los inversores, a la vez que fomenta su creatividad. De esta manera se abre el camino de implementar módulos didácticos para el estudio de otros conceptos técnicos de forma eficiente y enriquecedora.

Bibliografía

- [1] Alves, E., Cabaleiro, P. y Donoso, P. (2002). Small-signal stability for parallel-connected converters in stand-alone AC supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38, 533 - 542.
- [2] Control Key Ltda. (2005). En: <http://www.microgrades.com>
- [3] Gualda, J., Martínez, S. y Martínez, P. (2003) *Electrónica Industrial: Técnicas de potencia*. 2ª Edición, Alfaomega – Marcombo, México D.F.

- [4] Idowou, P. (2004), In search of a perfect power engineering program. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 47, p. 410 - 414.
- [5] Lawrence, R., Craven, K. y Nichols, G. (2003). Flywheel UPS. *IEEE Industry Applications Magazine*, 9, 44 – 50.
- [6] Li, Y., Lee, F. y Boroyevich, D. (2004). IGBT device application aspects for 50-kW zero-current-transition inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40, 1038 - 1048.
- [7] Naidu, M. y Walters, J. (2003). A 4kW 42-V induction machine-based automotive power generation system with a diode bridge rectifier and a PWM inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39, 1287 - 1293.
- [8] Ocampo, G. (1986). *Electrónica de potencia aplicada*. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Bogotá.
- [9] Radecker, M. y Dawson, F. (2004). Ballast-on-a-chip: Realistic expectation or technical delusion?. *IEEE Industry Applications Magazine*, 10, 48 – 58.
- [10] Rodríguez, J., Pontt, J., Becker, N. y Weinstein, A. (2002). Regenerative drives in the megawatt range for high-performance downhill belt conveyors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38, 203 - 210.
- [11] Sandoval, J. L. y Salamanca, W. (2004). Diseño implementación de un inversor monofásico didáctico. Proyecto de grado Licenciatura en Educación Industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama.
- [12] Williams, B. (1992). *Power Electronics: Devices, drivers, applications and passive components*. 2ª Edición, McGraw Hill, New York.
- [13] Williams, J., Cale, J., Benavides, N., Wooldridge, J., Koenig, A., Tichenor, J., Pekarek, S. (2004), Versatile hardware and software tools for educating students in power electronics. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 47, p. 436 - 445.
- [14] Yamamoto, K., Shinohara, K. y Nagahama, T. (2004). Characteristics of permanent-magnet synchronous motor driven by PWM inverter with voltage booster. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40, 1145 - 1152.