

Desarrollo de un inversor monofásico didáctico

Development of a Didactic Single-Phase Inverter

JOSÉ LUIS SANDOVAL

Licenciado en Educación Industrial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama (Colombia). Integrante Grupo de Didáctica para la Enseñanza de la Ciencia y la Tecnología en Niños (DECTEN).

sandovaljluis@yahoo.com

WILMAN AUGUSTO SALAMANCA CARDOZO

Licenciado en Educación Industrial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama (Colombia), Integrante Grupo de Didáctica para la Enseñanza de la Ciencia y la Tecnología en Niños (DECTEN).

wigu617@lycos.es

VÍCTOR MANUEL CARDOZO CÁRDENAS

Licenciado en Educación Industrial, Joven Investigador Colciencias-UPTC Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama, integrante Grupo de Didáctica para la Enseñanza de la Ciencia y la Tecnología en Niños (DECTEN)

vimanuel05@yahoo.com

JULIO ENRIQUE DUARTE

Licenciado en Física, Universidad Industrial de Santander, Doctor en Física Universidad de Barcelona, Profesor Titular Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama (Colombia). Integrante Grupo de Didáctica para la Enseñanza de la Ciencia y la Tecnología en Niños (DECTEN).

julioenriqueduarte@latinmail.com

FLAVIO HUMBERTO FERNÁNDEZ MORALES

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Doctor en Ingeniería Electrónica de la Universidad de Barcelona. Profesor categoría Asociado Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Duitama (Colombia). Integrante Grupo de Didáctica para la Enseñanza de la Ciencia y la Tecnología en Niños (DECTEN).

flaviofm@telecom.com.co

decten@duitama.uptc.edu.co

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 2 de junio de 2006

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2005

Palabras clave: inversor monofásico, electrónica de potencia, prototipo didáctico, enseñanza de la electrónica.

Keywords: single-phase inverter, power electronics, didactic prototype, teaching of electronics.

RESUMEN

La conversión de señales de corriente continua en corriente alterna es un proceso muy utilizado en aplicaciones domésticas e industriales; por esto los conceptos de conversión de energía deben ser dominados por los estudiantes de carreras tecnológicas y de ingeniería en electricidad y electrónica. Sin embargo, usualmente no existe el material didáctico adecuado para la enseñanza de estos conceptos, o si existe éste es costoso y se constituye en una caja negra que impiden la apropiación del conocimiento subyacente. En este trabajo se plantea el desarrollo de un inversor monofásico didáctico que puede ser utilizado en prácticas 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 200 VA, con una entrada de 24 VCC y una señal cuadrada de salida de $115 V_{RMS}$ cuya frecuencia puede variar entre 50 y 120 Hz.

ABSTRACT

Conversion from direct current to alternating current, so-called inversion, is an important process very used in industry and domestic applications. It implies that concepts of energy conversion must be well known by students and professionals of electric and electronics technologic programs and engineering. However, it is noticeable the lack of learning materials, adequate to teach these principles, or if available they are expensive and usually behave as black boxes that prevent the student's appropriation of the underlying knowledge. This paper proposes the development of a didactic single-phase inverter that can be used in experiments of power electronics. IGBTs connected in a bridge configuration were selected as switching devices. Microcontroller-based digital techniques were employed to control the power transistors. As a result, it was obtained a single-phase inverter of 200 VA, with an input voltage of 24 VDC and a square signal output of $115 V_{RMS}$ which frequency can be calibrated between 50 and 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 [1-4]. Otro campo que demanda inversores son los sistemas ininterrumpidos de alimentación, que permiten la operación segura de cargas críticas como sistemas satelitales, equipo para control de tráfico aéreo, nodos de Internet, transacciones bancarias y equipos para soporte de la vida, entre otros [5] y [6].

Dada su importancia, es indispensable que los estudiantes de carreras tecnológicas y de ingeniería en electricidad y electrónica se familiaricen con los principios de funcionamiento de inversores y dispo-

sitivos electrónicos de potencia, y aprendan a utilizarlos en diversas situaciones [7]. Para ello, las prácticas de laboratorio se constituyen en actividades fundamentales que permiten reforzar los conocimientos teóricos impartidos; para efectuarlas, los módulos de experimentación se convierten en una herramienta importante en el proceso de enseñanza-aprendizaje, no sólo porque fortalecen la comprensión acerca del comportamiento real de los dispositivos de potencia, sino también porque afianzan las destrezas y capacidades requeridas por el estudiante y lo motivan al desarrollo de sus propios diseños [8].

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 permiten al estudiante apropiarse del conocimiento subyacente. En este trabajo se plantea el desarrollo de un inversor monofásico didáctico

de onda cuadrada, con potencia nominal de 200 VA, 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, el 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; asimismo, su funcionamiento como interruptores puede ser fácilmente asimilado por los estudiantes.

Para manejar los transistores de potencia fue implementada la técnica de control digital por microcontrolador, 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, brindándole mayor flexibilidad a la hora de afianzar sus conocimientos. Además, el usuario puede tener acceso a los diferentes módulos del inversor; 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, didáctico y motivador para los estudiantes y facilitador del trabajo de los docentes. A continuación se describe el desarrollo del equipo 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 respuesta a una necesidad específica¹. En los cursos de «electrónica industrial» se estudian algunos de los dispositivos de potencia más comunes y sus principales aplicaciones, entre

ellas los convertidores de potencia; en su desarrollo los estudiantes deben realizar diversas prácticas de montaje que permitan corroborar los conceptos teóricos previamente estudiados; los montajes se realizan en grupos de dos o tres estudiantes, sobre *protoboards* y con elementos adquiridos por ellos mismos.

Además de que el costo de los componentes limita la ejecución de ciertas prácticas, una de las principales dificultades de este proceso de enseñanza-aprendizaje es el tiempo excesivo que invierte un estudiante en el ensamble, calibración y puesta a punto de los circuitos; esto hace que su atención se desvíe del estudio de los conceptos involucrados y se concentre en un «cacharreo»² que, en general, es infructuoso e ineficiente con respecto al objetivo pedagógico que se persigue.

Como alternativa de solución se planteó el diseño y desarrollo de un prototipo didáctico que cumpliera con los siguientes requerimientos pedagógicos:

- Seguro y fácil de operar, permitiendo estudiar y comprender los principios involucrados en el funcionamiento de un inversor monofásico.
- Facilidad de acceso a los diversos componentes; posibilidad de interacción con cada uno por parte del usuario, evitando en lo posible el efecto de «caja negra». Con este requisito se pretende generar mayor confianza y potenciar la creatividad del estudiante para producir innovaciones a partir de algo conocido.
- Utilización de componentes actualizados, ilustrativos de la interacción entre la electrónica digital y la de potencia.

¹ El curso de Electrónica Industrial ofrecido en la Facultad Seccional Duitama de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

² En Colombia y Cuba «cacharrear» es intentar arreglar algún aparato o máquina sin ser profesional. En: Diccionario de la Lengua Española, 22^a. ed, Real Academia de la Lengua Española.

- Acompañamiento de guías de práctica que indiquen los aspectos funcionales y de utilización del prototipo, facilitando su manejo por parte de docentes y alumnos.

Desde el punto de vista técnico se planteó el diseño y construcción de un inversor monofásico de 200 VA, con frecuencia variable entre 50 y 120 Hz, que utiliza una señal de entrada CC de 24 V, y provee una señal cuadrada de salida de $115 V_{RMS}$.

2.2. Diseño propuesto

El principal objetivo de un inversor es permitir la conversión de potencia de corriente continua en potencia de corriente alterna (esta última puede tener frecuencia variable), con el fin de alimentar las cargas que requieren una señal alterna. La estructura propuesta para el IMD se basa en tres bloques funcionales: de potencia, de transformación y de control, los cuales permiten observar y manipular paso a paso todo el proceso de inversión eléctrica (véase figura 1).

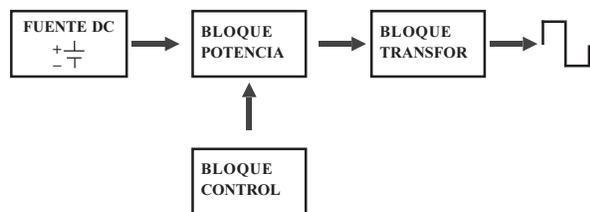


Figura 1. Diagrama esquemático del inversor monofásico didáctico.

- **Bloque de potencia.** Es el corazón del sistema; su objetivo es generar una señal cuadrada bipolar a partir de la señal continua entregada por la fuente de alimentación. En la práctica este bloque puede considerarse como una matriz de interruptores electrónicos que, 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 [9].

La función descrita anteriormente puede cumplirse con las configuraciones de transformador de toma media, que requiere sólo dos interruptores, o con la configuración en puente, que requiere cuatro interruptores, pero también hace uso más eficiente del transformador [10]. En el caso del IMD se escogió la configuración puente mostrada en la figura 2.

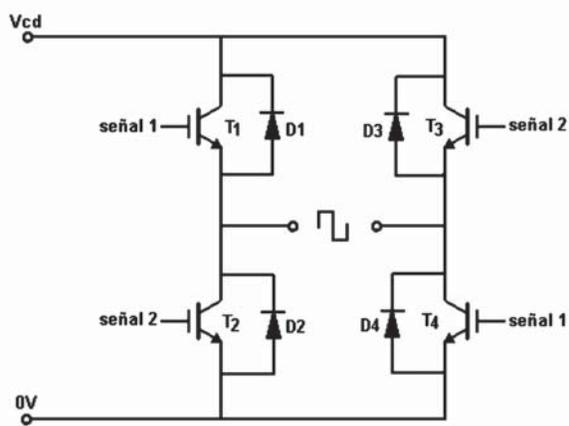


Figura 2. Estructura del puente inversor monofásico con cuatro IGBTs y sus respectivos diodos de recuperación.

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 (señales 1 y 2 de 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 optó 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 [9].

- Bloque de control.** Es el encargado de generar las dos señales que gobiernan la activación y desactivación de los transistores de potencia; esta función puede ser cumplida por un simple circuito oscilador de onda cuadrada; sin embargo, en este caso se decidió utilizar un microcontrolador, para obtener mayor flexibilidad en la aplicación de técnicas de control como modulación por ancho de pulsos (PWM), y facilitar 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 bastante el diseño y puesta a punto de la aplicación [10].

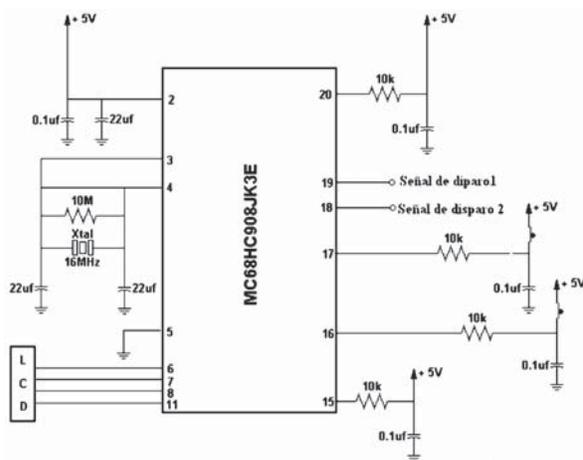


Figura 3. Diagrama circuital del bloque de control que incluye una pantalla de cristal líquido para visualizar la frecuencia.

- Bloque de transformación.** 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 es cumplida por un transformador elevador, que en este caso se seleccionó entre los disponibles comercialmente, con las siguientes características: potencia nominal 200 W, tensión de salida 120 V y tensión de entrada 24 V con toma media, y tensión máxima de 48 V entre terminales. Esta última especificación permite que el mismo transformador pueda ser adaptado a configuración en puente o a la correspondiente a transformadores de toma media, ya que sus terminales se encuentran accesibles al usuario.

2.3. Selección de los elementos de potencia

La elección de los interruptores de potencia es un paso importante en el diseño del inversor y para ello es necesario establecer la corriente que deben soportar los diodos y los transistores; igualmente, debe tenerse en cuenta los tiempos de encendido y apagado de los transistores, ya que de ellos depende la máxima frecuencia de operación y la correcta conmutación del circuito de potencia.

El diseño del puente inversor parte del requerimiento de manejar una carga resistivo-inductiva de 200 VA con un factor de potencia $\cos\phi = 0,85$, cuya frecuencia de alimentación podrá variar entre 50 y 120 Hz en intervalos de 10 Hz; además se dispone de un transformador que permite 24 V en el primario y 120 V en el secundario, ofreciendo una relación de transformación $n = 5$. A continuación se describen las principales operaciones en el cálculo de los elementos de potencia.

En primer lugar, es necesario determinar el valor de la impedancia de carga, $Z_L = R + jX$, y para ello se tiene que:

$$R = \frac{P}{I_{L(RMS)}^2}, \quad (1)$$

En (1), P corresponde a la potencia disipada en la carga e $I_{L(RMS)}$ es la corriente eficaz que fluye por

la carga, la cual está dada por:

$$I_{L(RMS)} = \frac{P}{V_{L(RMS)} \cos\phi} \quad (2)$$

Para una potencia de 200 W y una tensión de 120 V la ecuación (2) arroja $I_{L(RMS)} = 1,96$ A; reemplazando este valor en la ecuación (1) se obtiene $R = 52 \Omega$. La componente reactiva de la carga viene dada como $X = R \tan\phi$, que en este caso corresponde a $32,25 \Omega$.

Conociendo Z_L se procede a calcular la corriente eficaz en la carga cuando se alimenta con una señal cuadrada como la producida por el IMD; en este punto se utiliza la descomposición en serie de Fourier para una onda cuadrada, cuyos primeros cinco términos se describen en la siguiente expresión:

$$e(t) = \frac{4E_m}{\pi} \left(\cos\omega t - \frac{1}{3}\cos 3\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t + \frac{1}{9}\cos 9\omega t \right) \quad (3)$$

La ecuación (3) indica que la tensión y, por tanto, la corriente en la carga variará en función de la frecuencia aplicada; por este motivo se calculó el valor de los voltajes y corrientes eficaces, $E_{k(RMS)}$ e $I_{k(RMS)}$, de los cinco primeros términos de la serie para los ocho posibles frecuencias de operación, hallándose que la máxima corriente se presenta a frecuencias de 60 y 120 Hz, véase la tabla 1.

k	$E_{k(RMS)}$ (V)	Z_k (\dot{U})	$I_{k(RMS)}$ (A)
1	108,02	$52 + j32,25$	1,76
3	36,00	$52 + j96,75$	0,32
5	21,60	$52 + j161,25$	0,12
7	15,43	$52 + j225,75$	0,06
9	12,00	$52 + j290,25$	0,04

Tabla 1. Tensión y corriente eficaces, e impedancia para los primeros cinco términos de la serie, considerando una frecuencia de 120 Hz.

La corriente eficaz en la carga para los cinco primeros términos de la serie de Fourier, $I_{P(RMS)}$, se expresa como:

$$I_{P(RMS)} = \sqrt{I_{k1}^2 + I_{k2}^2 + I_{k3}^2 + I_{k4}^2 + I_{k5}^2} \quad (4)$$

Reemplazando los valores de la tabla 1 en la ecuación (4) se obtiene $I_{P(RMS)} = 1,79$ A. Ahora es posible determinar la corriente que fluye por diodos y transistores, cuya forma de onda se muestra en la figura 4.

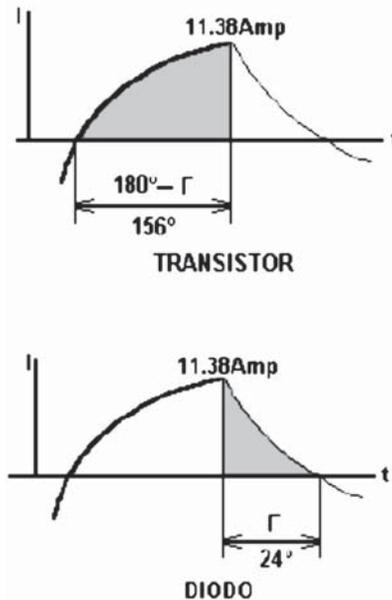


Figura 4. Corriente en el primario del transformador indicando la conducción del transistor y su diodo de recuperación.

Si se considera que la corriente en el diodo es triangular su valor eficaz, $I_{D(RMS)}$ se puede expresar como:

$$I_{D(RMS)} = I_m \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{\Gamma}{360}\right)}, \quad (5)$$

En (5), I_m corresponde al valor pico de la corriente que fluye por el primario del transformador y Γ es el ángulo de conducción del diodo expresado en grados; estos dos parámetros son función del factor de potencia de la carga y se pueden determinar con la ayuda de tablas de diseño como la siguiente:

Tabla 2. Valores de I_m y Γ para diversos valores en el factor de potencia de la carga [9].

$\text{Cos } \phi$	$I(\%)$	$\tilde{\Delta}(\circ)$
1,00	100,00	0
0,95	99,98	13
0,90	99,69	19
0,85	98,75	24
0,80	97,01	29
0,75	94,48	33
0,70	91,20	38

I_m tiene la misma forma de la corriente en la carga, pero multiplicada por la relación de transformación; su valor viene expresado como:

$$I_m = n I_{(\%)} \left(\frac{V_2}{R} \right) \quad (6)$$

Substituyendo en la ecuación (6) los valores correspondientes a esta aplicación se tiene $I_m = 11,38$ A; a su vez, reemplazando los parámetros correspondientes en la ecuación (5) se tiene una $I_{D(RMS)} = 1,69$ A.

La corriente eficaz en el primario, $I_{I(RMS)} = n I_{P(RMS)} = 8,95$ A, puede considerarse formada por cuatro secciones: dos que corresponden a corriente en los transistores y dos a corriente en los diodos; por consiguiente la corriente eficaz en cada transistor, $I_{T(RMS)} = 6,1$ A, se puede expresar como:

$$I_{T(RMS)} = \sqrt{\frac{I_{1(RMS)}^2 - 2I_{D(RMS)}^2}{2}} \quad (7)$$

Los valores obtenidos anteriormente ($I_{T(RMS)} = 6,1$ A, $I_{D(RMS)} = 1,69$ A, $I_m = 11,38$ A y $V_{CC} = 24$ V) sirven como base para seleccionar los transistores de potencia del IMD; es recomendable dejar un margen de seguridad en voltajes y corrientes, de modo que el inversor sea robusto frente a fallas en la manipulación.

Existen varios dispositivos que pueden emplearse como interruptores de potencia: el SCR, el BJT y el MOSFET de potencia son algunos de ellos [12]. En este caso se optó por utilizar transistores bipolares de compuerta aislada, IGBTs, muy populares en la actualidad para aplicaciones de media y alta potencia [13]. El IGBT seleccionado fue el MGW20N60D; éste 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, todos ellos valores acordes con los requerimientos del circuito [14]. Vale decir que, para los niveles de voltaje, corriente y frecuencia aquí requeridos, el MOSFET de potencia sería una buena opción; sin embargo, este dispositivo está siendo reemplazado por los IGBTs en aquellas situaciones en las cuales las pérdidas en conducción deben mantenerse lo más bajas posibles [15].

2.4. Modulación por ancho de pulso

Como se mencionó en la sección 2.2, el correcto funcionamiento del inversor se basa en que el disparo y bloqueo de los transistores se realice en los instantes de tiempo apropiados; en este caso se optó por la alternativa más sencilla, que consiste en atacar la base de los transistores con una onda cuadrada cuya frecuencia es igual a la de la señal de salida deseada; ello implica que el tiempo que la señal de disparo permanece en alto es igual a la mitad del periodo requerido en la salida, y permanecerá constante durante todo el tiempo de operación; sin embargo, esta forma de control resulta inadecuada cuando se requiere variar la amplitud y/o reducir el contenido armónico de la señal de salida; en estos casos hay que recurrir a otras estrategias de control [10].

La figura 5 ilustra una posible configuración circuital que permite generar los trenes de pulsos a ser aplicados en la base de cada pareja de transistores de potencia; aquí el generador de onda triangular produce una señal de alta frecuencia, la cual se aplica directamente al amplificador A_1 donde se compara con una señal sinusoidal de referencia.

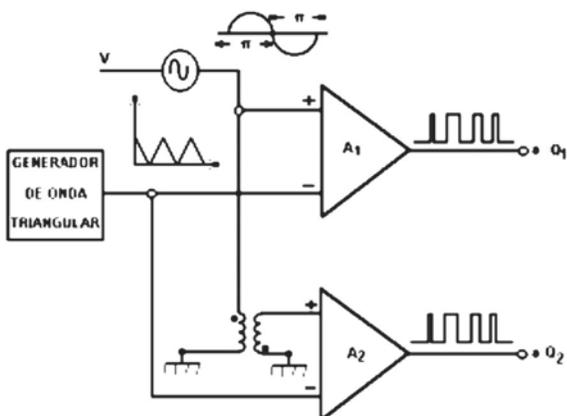
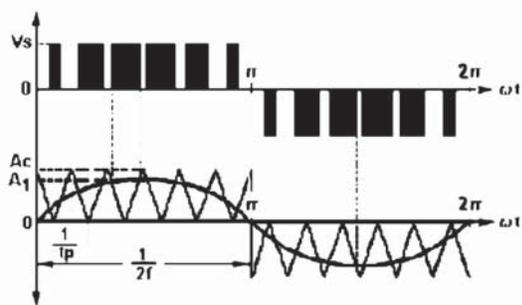


Figura 5. Circuito para generación de señales de disparo por PWM.

Cuando la señal sinusoidal sea mayor que la triangular, a la salida de A_1 se tendrá un «1» lógico; por el contrario, cuando la onda triangular sea mayor que la sinusoidal se tendrá un «0» lógico; el comparador A_2 produce un tren de pulsos invertido con respecto al generado por A_1 , obteniéndose así la señal complementaria para gobernar los transistores de potencia, como se muestra en la figura 6.



sinusoidal de varios impulsos por semiperíodo, SPWM.

De acuerdo con lo anterior, en este caso no existe un único pulso de control sino que a cada semiciclo de la señal de salida le corresponderá un tren de pulsos de mayor frecuencia, cuyo ancho o duración es proporcional a la señal de baja frecuencia aplicada, sinusoidal en este caso; debido a esta característica, el proceso descrito se conoce como modulación por ancho de pulsos, PWM; si el número de pulsos por semiciclo es alto, bastará con un pequeño filtrado para obtener a la salida una señal sinusoidal con baja distorsión; esto resulta útil para el control en la conmutación de inversores, ya que permite reducir el tamaño de los filtros.

3. Resultados y discusión

3.1. Prototipo resultante

Culminado el diseño del inversor monofásico se procedió al montaje y puesta a punto de los circuitos en el laboratorio. La figura 7 muestra el montaje del bloque de control en el circuito impreso.

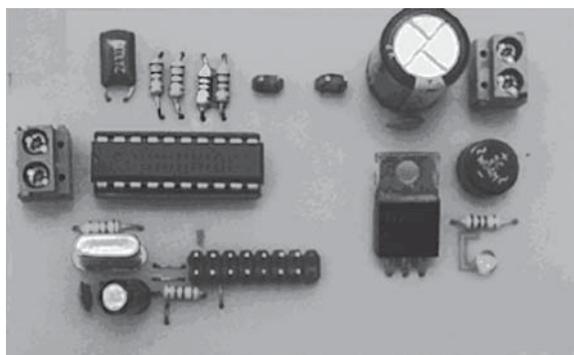


Figura 7 Disposición final del circuito de control.

El circuito de la figura 7 está programado para generar dos señales cuadradas con amplitud de 5 V, cuya frecuencia puede ser variada entre 50 y 120 Hz, en intervalos de 10 Hz, a través de dos pulsadores externos. La figura 8 presenta las dos señales de disparo, desfasadas 180° eléctricos una de la otra; ellas 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 para el buen funcionamiento del IMD; una secuencia

incorrecta o la superposición del tren de pulsos puede llevar a la conducción simultánea de los cuatro IGBTs causando un cortocircuito.

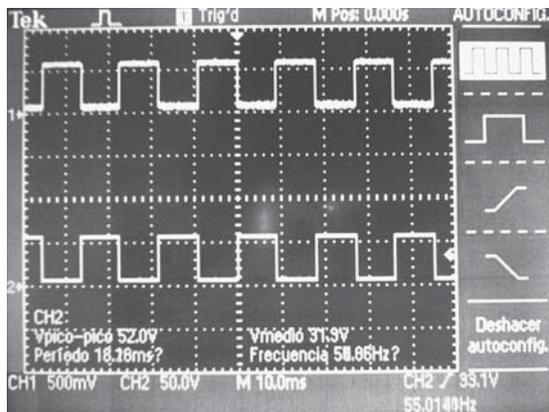


Figura 8. Señales de control generadas por el microcontrolador, con amplitud de 5 V y frecuencia de 50 Hz.

En la figura 9 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.

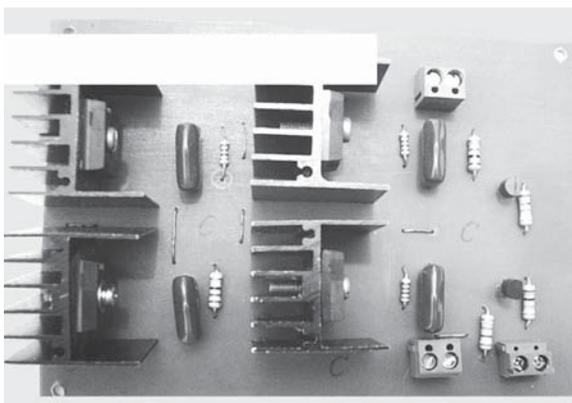


Figura 9. Montaje del bloque de potencia en el circuito impreso.

Al alimentar el bloque de potencia y conectar las señales de disparo a las compuertas de los transistores IGBT éstos conmutan, obteniéndose a la salida del puente una señal alterna de forma cuadrada, como se muestra en la figura 10, 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.

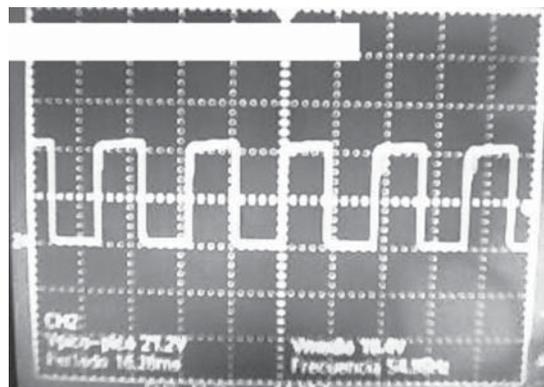


Figura 10. Señal de salida del bloque de potencia generada a partir del tren de pulsos de la figura 5, cuando el puente inversor se alimenta con una señal CC de 30 V.

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 11 para un valor de polarización CC de 30 V.

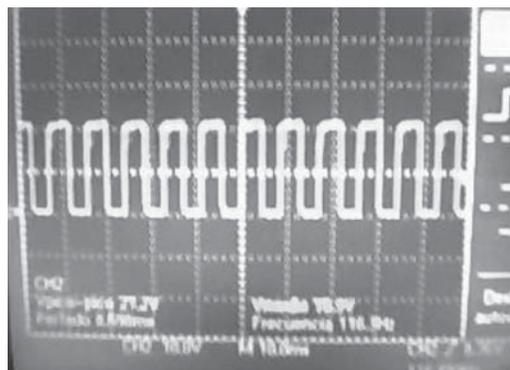


Figura 11. Señal de salida del bloque de potencia para una frecuencia de 120 Hz en los pulsos de disparo.

El paso final de 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 12. La caja está cubierta por una tapa transparente que permite observar todos los componentes del inversor. Asimismo, las señales de entrada y salida de cada uno de los bloques funcionales se hallan disponibles en conectores externos debida-

mente 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 disminuir su valor.



Figura 12. 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 200 VA, con una tensión de $115 V_{RMS}$ y frecuencia variable entre 50 y 120 Hz, en intervalos de 10 Hz, a partir de una fuente CC de 24 V y 9 A.

3.2. Prácticas de laboratorio

Como resultado del diseño descrito se obtuvo un equipo liviano, portátil y fácil de operar, que potencia el trabajo de docentes al utilizarlo como material didáctico para la enseñanza del concepto de inversión eléctrica y sus aplicaciones. Obtenido el prototipo se procedió a documentar la utilidad pedagógica del proyecto, planteando prácticas de laboratorio como las siguientes:

- Estudio del funcionamiento de los transistores de potencia como interruptores y su aplicación en inversores.
- Estudio del funcionamiento de un inversor monofásico en la configuración puente.
- Comportamiento de un inversor monofásico con cargas resistivas e inductivas.

- Control de velocidad de motores de CA.

Asimismo, se sugieren otros experimentos cuya realización implica implementar módulos adicionales o modificar el IMD; entre ellos pueden mencionarse:

- Estudio del funcionamiento del inversor monofásico con transformador de toma media. Para ello habrá que implementar el módulo de potencia, y utilizar el bloque de control y el transformador ya disponibles.
- Control del disparo de un inversor mediante la técnica 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.
- Desarrollo de estrategias de protección contra fallas de corriente y voltaje. Para ello será necesario diseñar y adaptar circuitos de protección para cortocircuitos y sobretensiones, haciendo énfasis en la seguridad a la hora de manipular circuitos electrónicos de potencia.

4. Conclusiones

Una mirada a la literatura técnica permite establecer que el concepto de inversión eléctrica tiene infinidad de aplicaciones en la automatización de procesos industriales, alimentación de cargas críticas y aparatos de uso doméstico, entre otras. Por tanto el estudio de los inversores por tecnólogos e ingenieros en electricidad y electrónica se hace indispensable, y para ello deberá emplearse material didáctico adecuado.

Como resultado de este trabajo se desarrolló el prototipo de un inversor monofásico didáctico, con IGBTs conectados en la configuración puente, que entrega una señal cuadrada de frecuencia variable entre 50 y 120 Hz, con potencia de 200 VA. Para el disparo de los semiconductores de potencia se usó

un microcontrolador que facilita, flexibiliza y optimiza la operación y el manejo del inversor, en sus funciones técnica y didáctica. Como ventaja adicional, empleando el mismo hardware, el programa podrá modificarse para estudiar otras estrategias de control de inversores como 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; esto minimiza el efecto de caja negra y permite afianzar los conceptos teóricos impartidos. Además, el uso de microcontroladores e IGBTs (dispositivos tecnológicos actualizados) permiten demostrar la complementariedad de la electrónica de potencia con la electrónica digital.

Se definieron 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: con 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; su utilización motiva a docentes y estudiantes en el estudio y profundización en la temática de los inversores, fomentando a la vez su creatividad. De esta forma se avanza en la implementación de módulos didácticos para el estudio eficaz y enriquecedor de diferentes conceptos técnicos.

Referencias bibliográficas

- [1] 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, pp. 203-210.
- [2] 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, pp. 1145-1152.
- [3] Radecker, M. y Dawson, F. (2004). Ballast-on-a-Chip: Realistic Expectation or Technical Delusion?. *IEEE Industry Applications Magazine*, 10, pp. 48-58.
- [4] Naidu, M. y Walters, J. (2003). A 4-kW 42-V Induction Machine-Based Automotive Power Generation System with a Diode Bridge Rectifier and a PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39, pp. 1287-1293.
- [5] 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, pp. 533-542.
- [6] Lawrence, R., Craven, K. y Nichols, G. (2003). Flywheel UPS. *IEEE Industry Applications Magazine*, 9, pp. 44-50.
- [7] Idowou, P. (2004). In Search of a Perfect Power Engineering Program. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 47, pp. 410-414.
- [8] 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, pp. 436-445.
- [9] Ocampo, G. (1986). *Electrónica de potencia aplicada*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- [10] Gualda, J., Martínez, S. y Martínez, P. (2003) *Electrónica Industrial: Técnicas de potencia*. 2ª ed., Alfaomega – Marcombo, México D.F.
- [11] Control Key Ltda. (2005). Disponible en: <http://www.microgrades.com>
- [12] Williams, B. (1992). *Power Electronics: Devices, Drivers, Applications and Passive Components*. 2ª ed., McGraw Hill, New York.
- [13] 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, pp. 1038-1048.
- [14] 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.
- [15] Takesuye, J. y Deuty S. (1995). *Introduction to Isolated Gate Biopolar Transistors*. Motorola Semiconductor AN1541.