

PROTOTIPO PARA LA ENSEÑANZA DE LOS CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA

JULIO AUGUSTO GÉLVEZ FIGUEREDO

*Ingeniero Electricista, MPE.
Profesor Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
Grupo CEMOS (Control Electrónico, Modelamiento y Simulación)
jagelvez@uis.edu.co*

JAVIER ENRIQUE MIER MARTINEZ

*Ingeniero Electrónico
Universidad Industrial de Santander
Grupo CEMOS (Control Electrónico, Modelamiento y Simulación)
jemier@uis.edu.co*

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un módulo didáctico para la enseñanza de la Electrónica de Potencia, en donde se pueden implementar diferentes aplicaciones de convertidores estáticos de potencia, tales como: control AC de línea (monofásico y trifásico), rectificadores controlados (monofásico y trifásico), troceador reductor y puentes inversores (monofásico y trifásico). El equipo está protegido contra sobrecorrientes, (por un sistema software y hardware), que por su rápida respuesta permite la protección de los semiconductores de potencia en caso de una conexión incorrecta o una mala operación. El módulo puede ser programado y controlado en modo local empleando un teclado y display o en modo remoto desde un PC mediante una aplicación de Labview. El prototipo desarrollado, a bajo costo, se constituye en una herramienta que le permite a los estudiantes de la asignatura de Electrónica de Potencia observar, empleando un osciloscopio, las diferentes formas de ondas obtenidas en los diferentes convertidores; incrementando su interés y facilitando la conceptualización de las diferentes aplicaciones de los convertidores.

PALABRAS CLAVE: Convertor, controlador, electrónica, rectificador, inversor, troceador, potencia, semiconductor.

ABSTRACT

In this article the design of a didactic module is presented for the teaching of the Power electronics, where different applications of static power converters can be implemented, such as: AC voltage controllers (single phase and three phase), controlled rectifiers (single phase and three phase), choppers and bridges inverters (single phase and three phase). The device has an overload protection which avoid semiconductor damage in case of an incorrect or bad operation. The module can be programmed and controlled in local way using a keyboard and display or in remote way from a PC by an application of Labview. The developed prototype, at low cost, it is constituted in a tool that allows to the students to observe, using an oscilloscope, the different wave forms obtained in the different converters; increasing their interest and facilitating the conceptualization of the different applications of the converters.

KEYWORD: Converters, controller, electronic, rectifiers, inverters, choppers, power, semiconductor.

INTRODUCCIÓN

Después de muchas décadas de desarrollo tecnológico, uno de los puntos de interés científico e industrial sigue siendo el control del flujo de la energía eléctrica, para las numerosas aplicaciones que se le puedan dar a esta. Este interés ha dado lugar al desarrollo de la electrónica de potencia que consiste en controlar y convertir la energía eléctrica, básicamente por la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia, empleando para el control dispositivos electrónicos (microcontroladores) que realizan operaciones lógicas y de cálculo en forma rápida y con gran precisión.

En el prototipo se pueden implementar en forma no simultánea 4 diferentes tipos de convertidores, para un total de 15 diferentes configuraciones, el equipo dispone de un sistema de protección contra sobrecorrientes controlado tanto por software como por hardware que permite ser utilizado por operarios no expertos como estudiantes, garantizando la seguridad de los operarios y del equipo.

CONVERTIDORES DE POTENCIA

El equipo desarrollado (Figura 1) permite implementar cuatro tipos de convertidores estáticos de potencia, realizando solo el cableado tanto de potencia como de control.

Las partes que conforman el equipo son las siguientes:

- 1- Pantalla modo local
- 2- Teclado modo local
- 3- Conector serial con PC
- 4- Señales del sistema de control
- 5- Conector señales puertas SCRs
- 6- Entrada potencia AC monofásico
- 7- Señales sensores corrientes
- 8- Conectores señales puertas Mosfets
- 9- Entrada potencia DC
- 10- Conectores sensores corrientes
- 11- Entrada potencia AC trifásica
- 12- Conectores redes snubbers
- 13- Conectores puerta SCRs
- 14- Conectores potencia SCRs
- 15- Conectores potencia diodo
- 16- Conectores potencia Mosfets

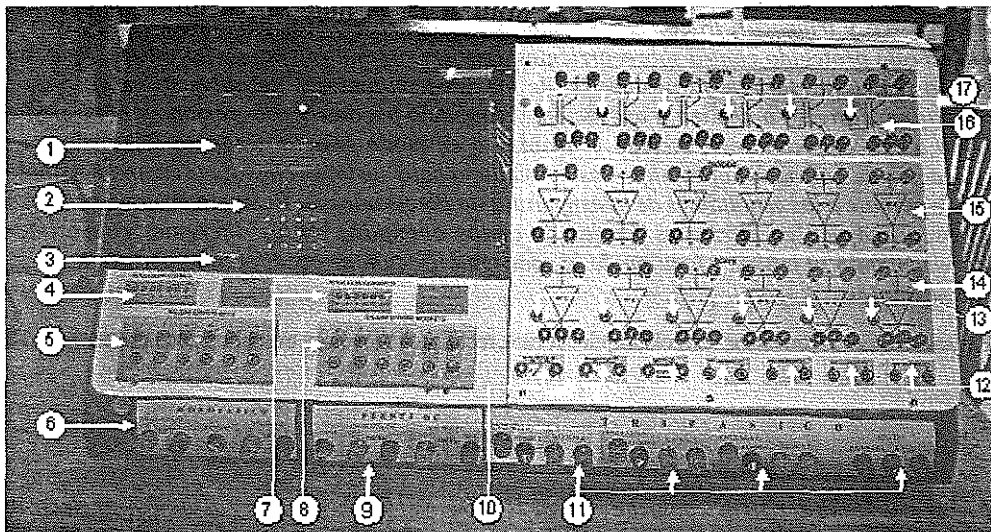


Figura 1. Equipo conversores estáticos de potencia

Convertidores CA - CD.

También llamados rectificadores controlados, el valor medio de la tensión aplicada a la carga y por lo tanto la potencia media de salida, se puede variar controlando el tiempo de conducción de los SCR's o, lo que es lo mismo, variando el ángulo de "disparo" α . En el módulo se pueden analizar

las siguientes configuraciones:

- Rectificador monofásico controlado.
- Rectificador monofásico semicontrolado.
- Rectificador trifásico controlado.
- Rectificador trifásico semicontrolado.

La Figura 2 muestra el esquema de conexión para el rectificador trifásico controlado; en esta Figura no se muestran los circuitos de control que manejan las señales de puerta.

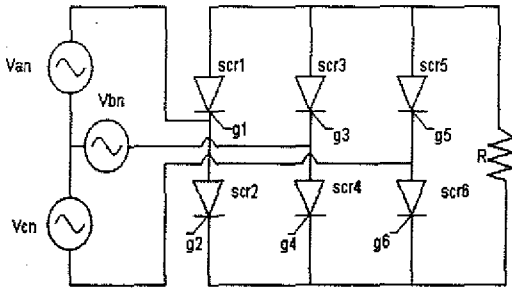


Figura 2. Rectificador trifásico controlado.

Su principal aplicación industrial se encuentra en el control de velocidad de los motores de corriente continua.

Después de cableado y configuración del puente rectificador trifásico controlado ($\alpha=30^\circ$), se capturo la señal de tensión aplicada a la carga resistiva, empleando el osciloscopio Fluke 99B.

La forma de onda se puede observar en la Figura 3.

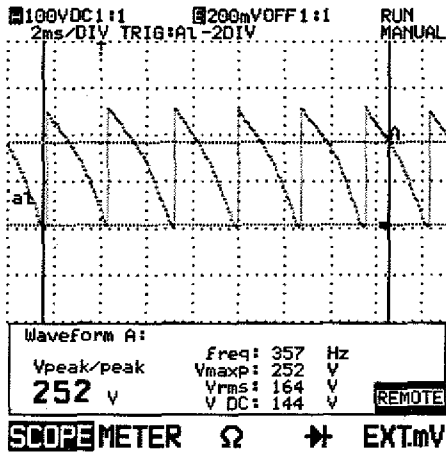


Figura 3. Rectificador trifásico controlado ángulo $\alpha=30^\circ$

Convertidor CA - CA (control AC de línea)

Estos convertidores se utilizan para obtener una tensión alterna cuyo valor eficaz de salida es variable, cuando se conectan a una red de corriente alterna con valor eficaz fijo. La principal aplicación industrial es el arranque suave o arrancador electrónico para los motores de inducción, también es empleado en el control de la temperatura de los hornos eléctricos.

Las configuraciones que se pueden implementar en el prototipo son:

- Control AC monofásico
- Control AC monofásico semicontrolado.
- Control AC trifásico, carga en estrella con neutro.
- Control AC trifásico semicontrolado, carga en estrella con neutro.
- Control AC trifásico, carga en estrella sin neutro.
- Control AC trifásico, carga en delta con SCR's en la línea.
- Control AC trifásico semicontrolado, carga en delta con SCR's en la línea.
- Control AC trifásico, carga en delta con SCR's en la fase.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo del circuito de potencia de este tipo de convertidores

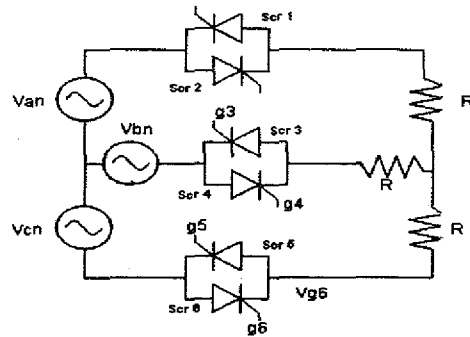


Figura 4. Control AC trifásico, carga en estrella sin neutro.

En las Figuras 5, 6, 7 se muestran algunas de las señales de los convertidores implementados en el módulo.

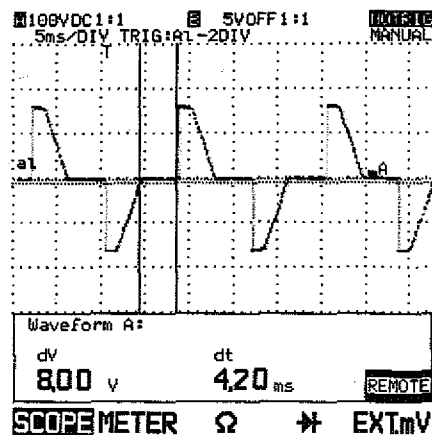


Figura 5. Tensión en la de carga para el control AC monofásico controlado, con $\alpha=90^\circ$.

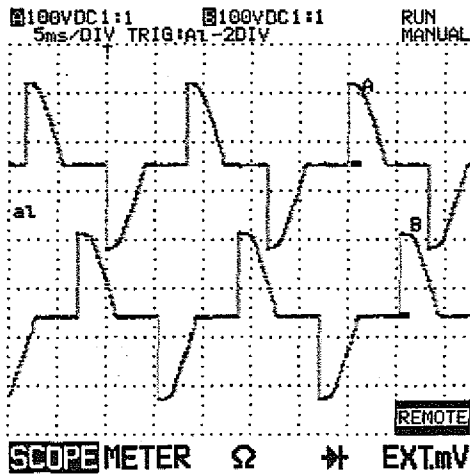


Figura 6. Tensión de fase en la carga conexión en Y con neutro, para un ángulo de $\alpha=90^\circ$.

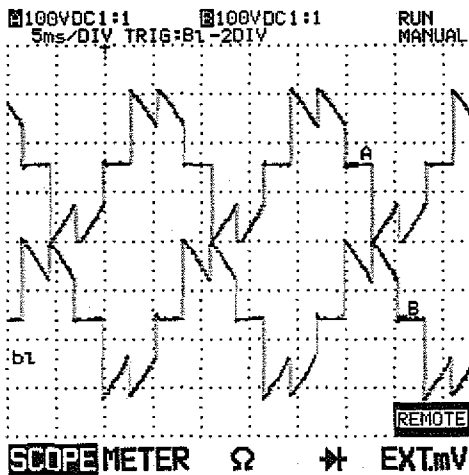


Figura 7. Tensión de fase en la carga conexión en Y sin neutro, para un ángulo de $\alpha=60^\circ$.

Convertidor DC - DC (Chopper reductor)

También llamado troceador o regulador de conmutación. En la Figura 8 se muestra el esquema básico para un troceador reductor a transistor.

La tensión promedio de salida se controla mediante la variación del tiempo de conducción t del transistor Q1, desde un valor de cero hasta un máximo igual a la tensión de alimentación. Se emplea con frecuencia en el control de velocidad de los motores de corriente continua de baja potencia.

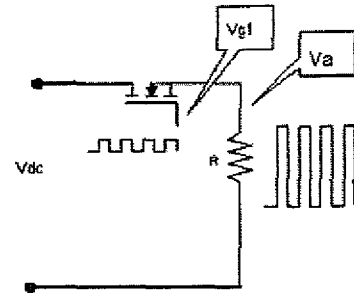


Figura 8. Circuito Troceador con carga resistiva

La Figura 9 muestra la señal de salida cuando se configura el troceador reductor, energizado a partir de una fuente de corriente continua de 160 volts y un ciclo de trabajo de 80%. Obsérvese que la tensión media (V_{DC}) es de 128 volts, que equivale al producto del ciclo de trabajo por la tensión de la fuente.

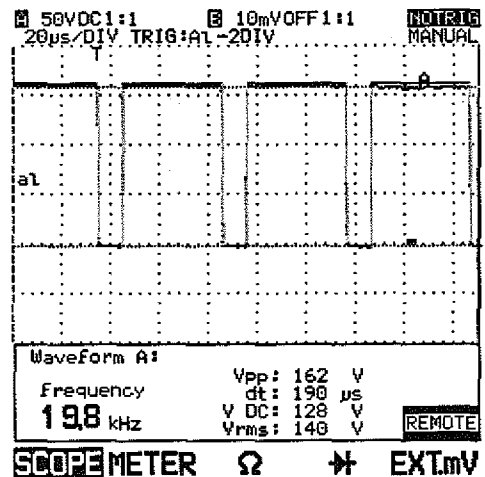


Fig 9. Tensión de salida para el troceador reductor operando con un $k=80\%$

Convertidor CD - CA.

Este tipo de convertidor es también conocido como puente inversor, el cual se puede conectar en dos configuraciones:

- Puente inversor monofásico.
- Puente inversor trifásico.

En la Figura 10 se presenta el circuito de un inversor monofásico (o puente en H) empleando, como elementos de conmutación, transistores Mosfets. En este caso, si los transistores M1 y M2 conducen durante un tiempo $t1$

la carga estará sometida a una tensión positiva; cuando conducen, por un tiempo igual, los transistores M3 y M4 la carga estará sometida a una tensión negativa. Luego la tensión de salida será una onda cuadrada alterna con periodo igual a $2 \cdot t_1$.

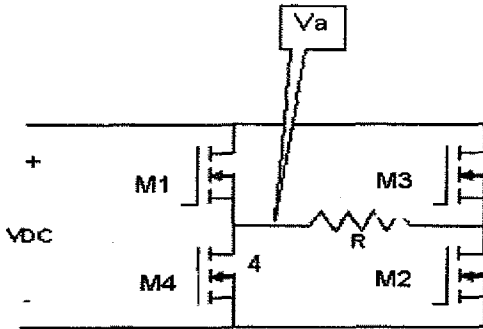


Figura 10. Puente inversor monofásico.

La tensión eficaz de salida puede ser controlada variando el tiempo de conducción de los transistores durante el tiempo t_1 , y la frecuencia se puede modificar, modificando el tiempo t_1 . Las principales aplicaciones de este convertidor son los variadores de velocidad de los motores de inducción y las fuentes ininterrumpidas de potencia (UPS).

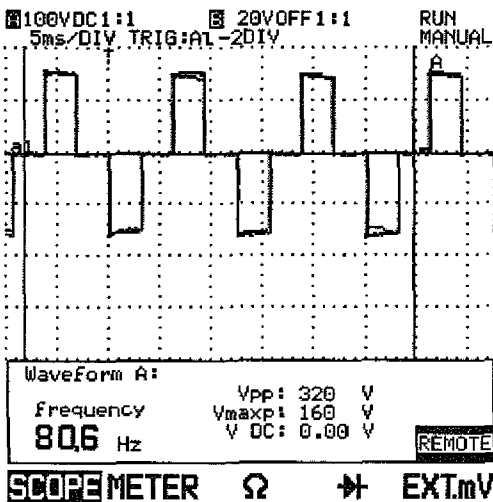


Figura 11. Inversor monofásico, Ciclo de trabajo 50% y frecuencia de 80 Hz.

EL SISTEMA DE CONTROL

Para el control del módulo conversor estático de potencia, se implementaron varios circuitos electrónicos en PCB (printed circuit board) o tarjetas de circuito impreso, cuyo nombre se le asigna según las funciones que cumplen. En la Figura 12 se muestra la interconexión de las diferentes tarjetas; entre las que se tienen: tarjeta de sincronismo, de generación de señales, del sistema operativo y de aislamiento.

Tarjeta del sistema operativo

Está diseñada a partir de un microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola. Este micro es el encargado de manejar una pantalla LCD (Display de Cristal Líquido) y un teclado matricial de 4×4 , con los cuales el usuario puede operar el módulo, al introducir los parámetros de configuración del convertidor (15 posibles opciones); además de la transmisión de los parámetros a la tarjeta de generación de pulsos. Para la transmisión se emplea un bus de 5 hilos.

Tarjeta de generación de señales y de conmutación.

Para generar los pulsos de encendido o disparo correspondientes a los elementos semiconductores necesarios en la aplicación seleccionada mediante el teclado, se implementó un circuito con 2 microcontroladores MC68HC908JK3 y 1 microcontrolador MC68HC908JL3; en estos microcontroladores residen los diferentes programas en lenguaje ensamblador que generan las señales de control para los semiconductores de potencia y además almacenan los datos iniciales, por lo que el procesador del sistema operativo queda libre facilitando el ingreso de nuevos datos los cuales serán enviados a los procesadores de esta tarjeta; esto permite modificar datos de operación del convertidor en forma dinámica sin necesidad de detener la aplicación.

Para tener un máximo de 6 salidas de control en el módulo y permitir la fácil operación por parte del usuario, independiente del tipo de convertidor configurado, se instalaron tres circuitos integrados CI 74157 (Figura 13) y compuertas OR para conmutar las diferentes señales de control que son generadas por los microcontroladores, de acuerdo al convertidor seleccionado por el operador del módulo

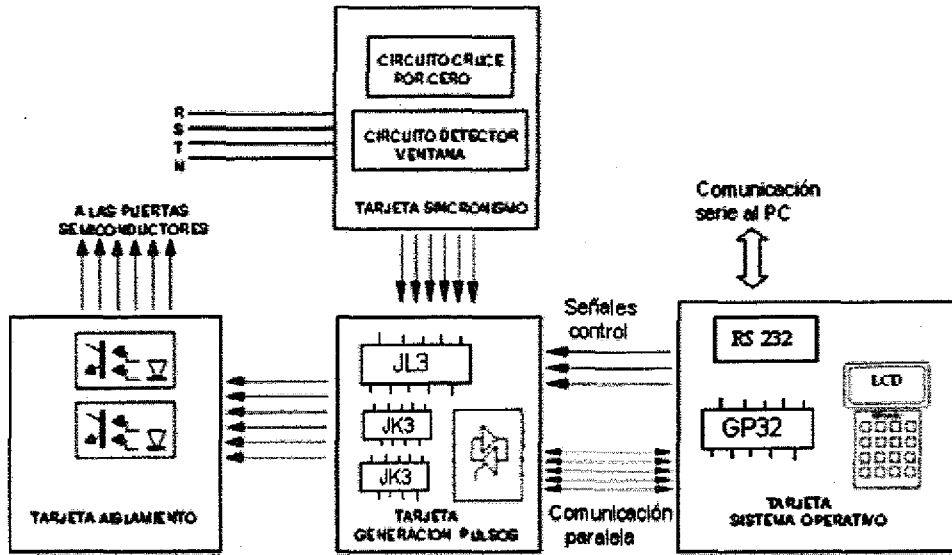


Figura 12. Diagrama de conexión de las tarjetas del módulo de control convertidor estático de potencia.

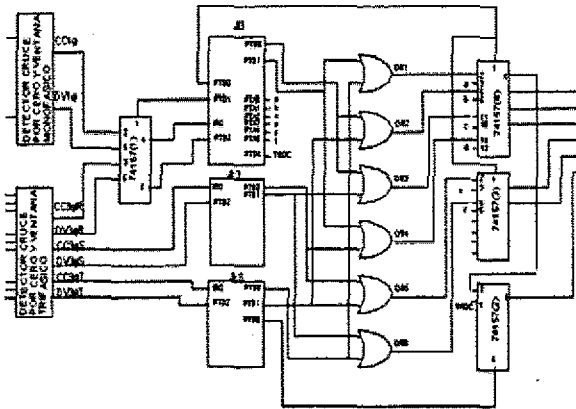


Figura 13. Circuito de generación de pulsos y conmutación.

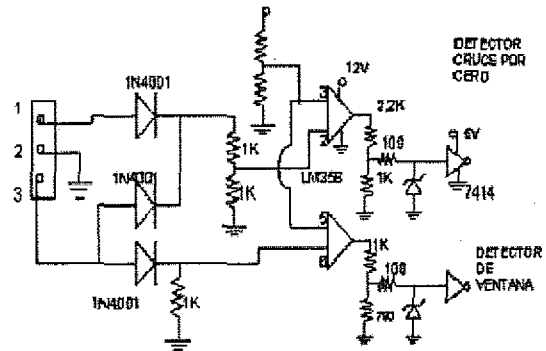


Figura 14. Detector de cruces por cero y de ventana de polaridad.

Tarjeta de sincronismo.

La principal función de estos circuitos es detectar el cruce por cero de la onda de tensión alterna suministrada por la red eléctrica; además del semiciclo correspondiente (acción que se ha definido como "ventana de polaridad"), siendo esta la referencia para medir el ángulo de disparo a configurado por el usuario. En este ángulo deben empezar a conducir los SCR's que conforman las diferentes configuraciones de rectificación y control AC de línea. El circuito que realiza estas funciones se muestra en la Figura 14.

Tarjeta de aislamiento.

Esta tarjeta garantiza el aislamiento galvánico entre los circuitos que generan las señales de control y los circuitos que adecuan las señales a ser aplicadas en el terminal de control (puerta o base) de los semiconductores y que están referenciados a un terminal (cátodo o surtidor) que conduce la corriente de carga. El driver o manejador utilizado fue el circuito integrado PS9634 (Figura 15) que está diseñado para proporcionar las tensiones necesarias para controlar los Mosfets de potencia; este integrado provee un nivel

de aislamiento de 5000 volts. Con el propósito de emplear este driver para el control tanto de Mosfet's y SCR's, fue necesario implementar un circuito adicional que suministrará la corriente mínima requerida por las puertas de los SCR's para que basculen al estado de conducción.

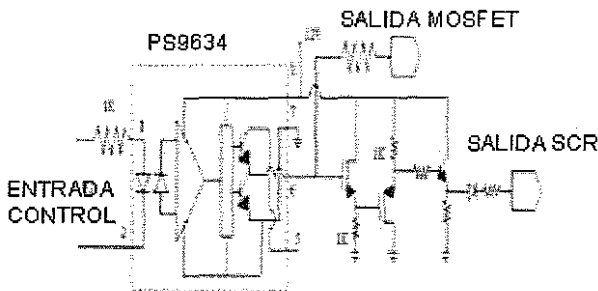


Figura 15. Circuito manejador de puerta para Mosfets y SCR's.

SOFTWARE PARA EL CONTROL, IMPLEMENTADOS EN LOS MICROCONTROLADORES

En este apartado se describen los principales programas o rutinas que realizan el control y generan las señales de mando para los diferentes convertidores que se pueden implementar en el módulo prototipo. Estos programas fueron escritos en lenguaje de bajo nivel en los microcontroladores Motorola.

Rutina de interrupción por teclado

Se implementó mediante el módulo KBI (keyboard interrupt) del microcontrolador GP32; el cual proporciona 8 pines de interrupción externa (puerto A); controladas mediante un registro de 8 bits que permite habilitar/deshabilitar separadamente cada una de ellas. Su función es la de activar el sistema operativo en el momento de la interrupción por teclado.

Rutina de lectura del teclado

Una vez aparece el menú de selección en la pantalla LCD, el microcontrolador empieza a rotar un 1 lógico (5 V) por la parte alta del puerto A (terminales PTA4 - PTA7 conectado a las filas del teclado); en el momento en que se presione una tecla, el uno lógico que se está rotando se verá reflejado en uno de los pines de la parte baja del puerto A (PTA0-PTA3), conociendo con exactitud la tecla que está siendo digitada, de las 16 teclas dispuestas en una matriz de 4 filas y cuatro columnas.

Rutina de almacenamiento de datos

En esta subrutina se verifica que los datos digitados por el usuario tengan la sintaxis previamente programada y estén dentro de los rangos establecidos (ver *Tabla 1* en las conclusiones). Una vez se ha establecido su validez los datos son almacenados; seguidamente, se ejecuta la subrutina de transmisión paralela de los datos, hacia los microprocesadores encargados de generar los pulsos de control según la configuración dada por el usuario.

Rutina de transmisión paralela de datos

Esta rutina se encarga de enviar los datos desde el microcontrolador que cumple las funciones de sistema operativo hacia los microprocesadores que generan los pulsos de control. Para la implementación de la transmisión paralela se utilizan 5 líneas conductoras del PCB que corresponden a: 1 de reloj y 4 de datos; para la salida de datos se usa la parte baja del puerto B (pines PTB0 - PTB3) del GP32 y para la señal de reloj se utiliza el pin 5 del puerto C (PTC4). El pin de reloj sirve para sincronizar la transmisión de los datos. Los datos enviados corresponden a:

- Tipo de convertidor.
- Ciclo de trabajo K. Si el convertidor seleccionado es el de troceador o chopper.
- Ángulo de disparo α . Cuando se configuran rectificadores o control AC de línea.
- Frecuencia de operación. Si el convertidor seleccionado es el puente inversor.
- Byte de check sum o comprobación.

Para la verificación de la correcta comunicación entre los microcontroladores del sistema de control se utiliza un byte de check sum que consiste en generar un byte con la suma de todos los datos enviados y transmitirla al final; en la recepción se suma los datos recibidos y se compara con el byte de check sum, para confirmar que los datos recibidos en el sistema de control correspondan con los datos transmitidos por el sistema operativo.

Rutina de recepción y transmisión de datos serial

Esta subrutina permite la comunicación del sistema operativo con un PC mediante el puerto RS232. Para configurar el módulo de comunicación serial del microcontrolador GP32, primero se configura el registro de velocidad de transmisión SCBR a una velocidad de 9600 baudios; seguidamente se configura el registro de control SCC1 el cual habilita el módulo de comunicación serial, se configura la transmisión a 8 bits y la opción de paridad de

transmisión (bit de paridad); seguidamente se habilita la opción de interrupción por comunicación serial. Luego de esto y a través de un protocolo sencillo se realiza la transmisión de datos desde o hacia el PC.

Rutina de recepción paralela

Los datos llegan a los microcontroladores (que cumplen las funciones de sistema de control) de forma paralela, todos utilizan la parte alta del puerto B para la recepción de datos; cada vez que llega el primer pulso de reloj, los microcontroladores leen el puerto B, y almacenan el dato de 4 bits en un registro, cuando llega el segundo dato de 4 bits lo concatenan con el primer registro recibido quedando así armado el primer dato de 8 bits, de esta forma se reciben 5 bytes correspondientes a los 4 bytes de datos y el de check sum.

SISTEMA PARA LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTES

Una parte fundamental dentro del módulo es la implementación de un sistema de protección de

sobrecorriente que efectúe el sensado de la corriente tanto por un sistema software como por hardware (ver **Figura 16**). Dependiendo de los valores de corriente y de la velocidad de crecimiento de la misma la protección actuará inhibiendo la generación de pulsos de control, llevando los semiconductores de potencia al estado de bloqueo o induciendo la actuación de un fusible que aisle el módulo de la red eléctrica.

Implementación de la protección de sobrecorriente

La protección debe asegurar que el tiempo entre la detección de la sobrecorriente y la suspensión de la misma va a ser el suficientemente corto para no comprometer el funcionamiento del dispositivo semiconductor. Para asegurar esto, la característica de tiempo inverso (curva de corriente contra tiempo ver **Figura 18**) de la protección debe estar por debajo de la curva del componente. Una buena protección tendrá que tener una curva bastante aproximada a la del componente, para no sobreproteger en algunas zonas y hacer que el dispositivo opere por debajo de sus características, y no desproteger en otras zonas y hacer que el dispositivo y todo el módulo corra el riesgo de dañarse.

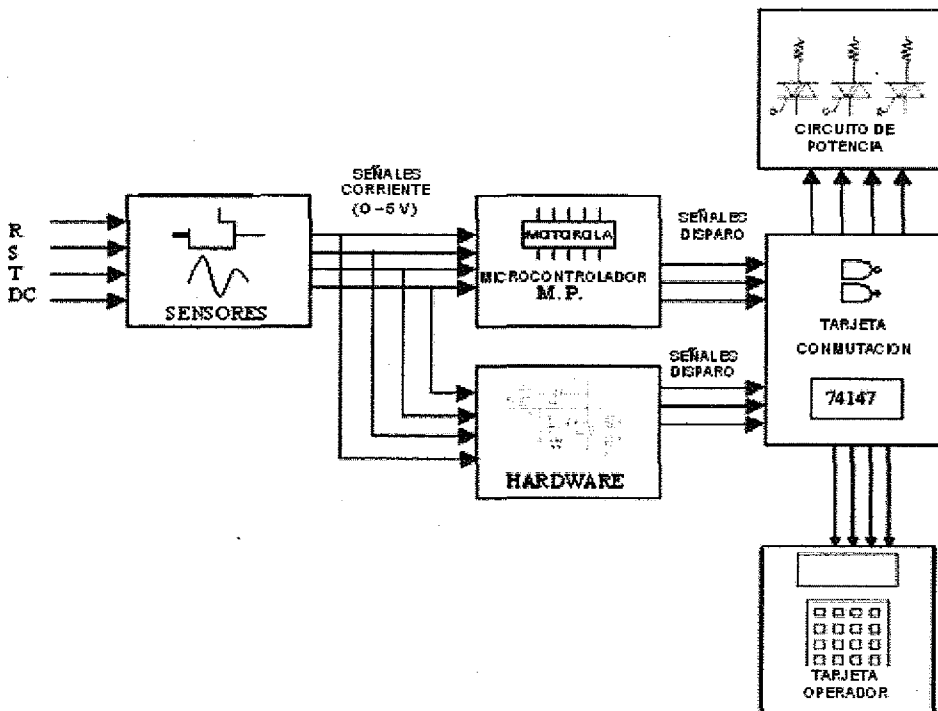


Figura 16. Diagrama de bloques sistema de protección.

Tarjeta de Sensado de corriente.

El sensado de corriente en el módulo, se hace mediante el uso de una sonda de efecto hall CS25-NPA (ver Figura 17), se usa un valor de 12 amperios como full escala; obteniéndose, a la salida de la sonda 25mA que son convertidos a un valor de tensión empleando una resistencia de 500Ω.

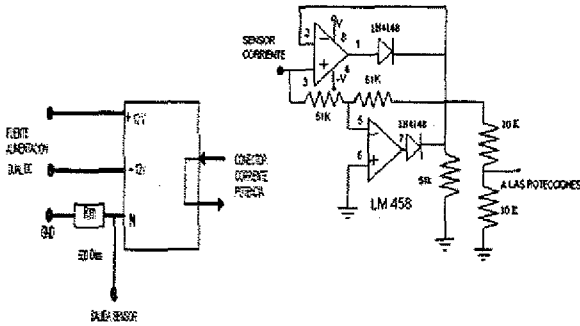


Figura 17. Circuito de sensado y acondicionamiento de la señal de corriente.

Cuando se registra 10 amperios se tiene una tensión de 5 voltios. Las señales entregadas por los transductores de corriente se rectifican para obtener una señal de salida de 0 a 5 voltios pico; este valor es leído por los microcontroladores.

Tarjeta de detección de sobrecorrientes

Para la detección de sobrecorriente se utiliza método de la "ventana deslizante" (ver Figura 18).

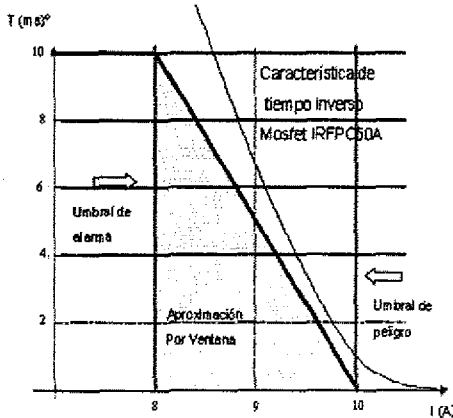


Figura 18. Característica de la ventana deslizante

El cual básicamente es un circuito comparador que determina si la corriente es superior a determinado valor conocido como umbral de alerta (8 amper) y menor que otro valor llamado umbral de peligro o de protección (10

amper); si cumple con dichas condiciones entonces inicializa un temporizador y si al finalizar el conteo, si la magnitud de la corriente permanece por encima del umbral de alerta actúa la protección; el valor del temporizador se autoajusta según la rata de crecimiento de la corriente. Si el valor de la corriente es superior al umbral de peligro entonces la protección debe actuar inmediatamente, independientemente de que el temporizador haya terminado el conteo o no (ver Figura19 y 20).

En la protección por software se utiliza el conversor analógico a digital de cada uno de los microcontroladores para poder digitalizar la señal de voltaje a la salida del transductor de corriente.

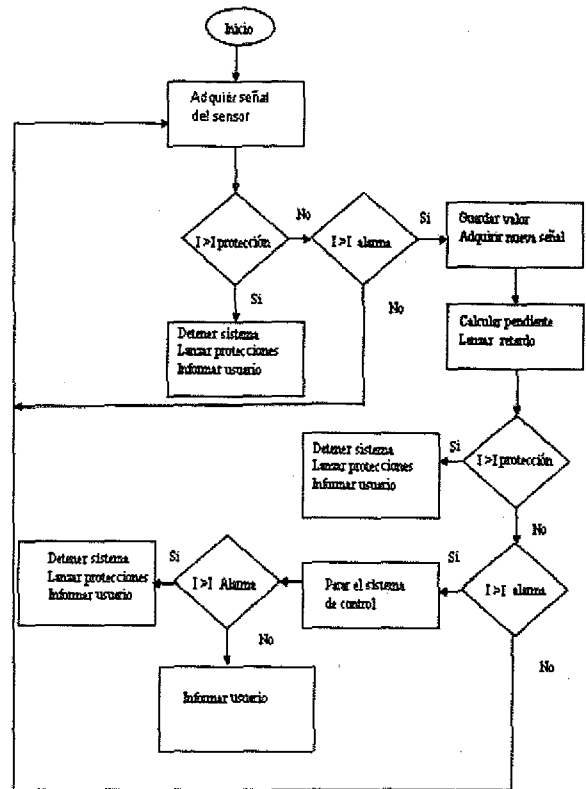


Figura 19. Diagrama de flujo rutina de protección por software

El valor digitalizado se procesa para determinar la acción a tomar (Ver Figura 19). La primera acción es inhibir la generación de los pulsos de control; si persiste la condición de sobrecorriente después de un tiempo determinado o si se ha excedido el límite de protección de los dispositivos, se toma la segunda acción la cual consiste en generar un pulso de control para los Triac's que permiten que fluya una corriente de 150 amperios a través de unas resistencias, como se ilustra en la Figura 21.

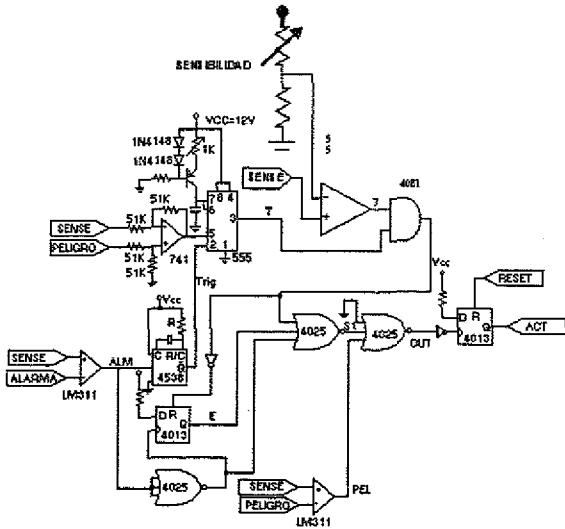


Figura 20. Circuito implementado para la protección por hardware.

Tabla 1. Tipos de convertidores

1	Rectificador monofásico controlado
2	Rectificador monofásico semicontrolado
3	Rectificador trifásico controlado
4	Rectificador trifásico semicontrolado
5	Control AC monofásico controlado
6	Control AC monofásico semicontrolado
7	Control AC trifásico controlado carga en Y con neutro
8	Control AC trifásico semicontrolado carga en Y con neutro
9	Control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro
10	Control AC trifásico semicontrolado carga en Y sin neutro
11	Control AC trifásico controlado carga en delta SCR's en la línea
12	Control AC trifásico semicontrolado carga en delta SCR's en la línea
13	Troceador reductor
14	Inversor monofásico
15	Inversor trifásico

Este valor de corriente garantiza que los fusibles (8 amperios) se fundan, aislando el módulo de la red del suministro eléctrico e informando al usuario a través de la pantalla cual de las líneas de entrada presenta la sobrecorriente.

- El empleo de un microprocesador para la implementación del "sistema operativo", permite actualizar los datos del conversor sin tener que reiniciar o detener la generación de las señales de control, además el continuo monitoreo de las corrientes en el módulo. La programación y configuración de tres microcontroladores (gama baja), para el "sistema para el control" posibilita la implementación desde un sistema monofásico hasta un sistema trifásico y permite el sensado de las corrientes de una forma discriminada para cada una de las fases de alimentación.

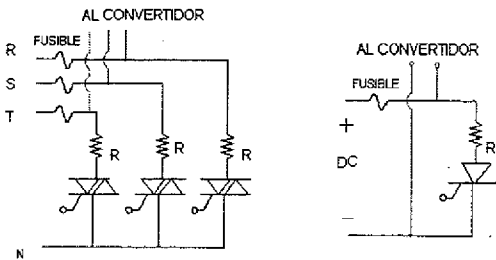


Figura 21. Circuito de potencia protección.s.

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un módulo prototipo didáctico para convertidores de potencia, a muy bajo costo; el prototipo construido consiste de:

- Una unidad de control basada en microcontrolador en la cual se puede configurar hasta 15 aplicaciones (Tabla 1).
- Una unidad de potencia que contienen los SCR's y los transistores Mosfet's que permiten el control del flujo de corriente hacia la carga.

En este módulo se deben cablear las señales de control hasta los terminales de los semiconductores de potencia (SCR, Mosfets, Diodos) de acuerdo a la configuración del convertidor deseado.

- Se desarrolló un sistema de conmutadores digitales controlados por los microcontroladores del "sistema de control" de modo tal, que permiten operar las 15 diferentes configuraciones con un máximo de 6 circuitos manejadores de puerta, las cuales garantizan el aislamiento galvánico independiente del convertidor configurado.

- El sistema de protección de sobrecorriente, empleando el método de "ventana deslizante" demostró ser altamente eficiente; pues en las pruebas realizadas, al conectar una carga mayor que la nominal (8 amper pico) actuaba la protección que inhibe la generación de las señales de control después de transcurrido un tiempo de acuerdo a la pendiente de incremento de corriente, y cuando se conectaba súbitamente una carga resistiva mucho mayor que la nominal o se ponían en corto los terminales de salida del convertidor, actuaba la protección que hace que el fusible se fundiera; en ningún caso se vieron afectados los semiconductores de potencia.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a los recursos brindados por la Universidad Industrial de Santander y a la cofinanciación por parte de la Dirección de Investigaciones de la Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas de la UIS. También, es importante reconocer el aporte de los ingenieros Alirio Santos y Leonardo Campis, quienes participaron en la implementación del equipo, elaborada como trabajo de grado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] RASHID Muhammad. Electrónica de potencia, Ctos, dispositivos, aplicaciones. México: Prentice Hall S.A., 1995.
- [2] MOHAN Ned, Power Electronics: Converter, Application, and Design New York: JHON WILEY & SONS, 1995.
- [3] "Analysis and desing of snuber circuits for high power converter". J.H.R. Enslin. IEEE EPMC 1999.
- [4] H.J. Beuker, High power auxiliary commuted pole converter for utility application. IEEE PESC, 1997
- [5] MOTOROLA. Microcontrollers, Tecnical data Motorola, Inc, 2002.