

**Construcción de módulos didácticos de  
Convertidores AC/DC para el aprendizaje práctico  
de los estudiantes de la carrera de Ingeniería de  
la Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito,  
Ecuador, Diciembre del 2008**

**Autores:**

**Ing. Marcelo Javier Arévalo Luzuriaga  
Ing. Juan Carlos Rivera Gaibor**

# Resumen Abstract

El proyecto tiene como objetivo diseñar y construir circuitos de control electrónico y/o micro procesados para el control de convertidores AC/DC, para cargas de tipo resistiva e inductiva-resistiva, con el fin de capacitar a los estudiantes en el uso de tecnología industrial, considerando que existen carreras como Ingeniería Mecatrónica, Industrial, las cuales requieren equipamiento adecuado para el aprendizaje, y que en ciertos casos resulta ser muy costoso, se hace necesario pensar en la opción de construir estos equipos en la Universidad, tomando en cuenta que de esta forma se estarían disminuyendo costos. Además, no se dependería de una empresa proveedora que sería la propietaria del equipamiento y por ende la UTE dependería de éstas en el caso de que se diese algún tipo de actualización o reparación por algún daño. Para el diseño se consideró la utilización del microcontrolador PIC16F877A, a través del cual se ejecutan las tareas de control de fase en las configuraciones de convertidores AC/DC semicontrolados y totalmente controlados monofásicos y trifásicos. Para la construcción de los convertidores se emplearon rectificadores de silicón controlados (SCR), empaquetados en módulos lo cual brinda facilidades al momento del ensamblaje del equipo final. Al construir el equipo que incluye convertidores monofásicos y trifásicos tipo puente semicontrolados y totalmente controlados, se determina que los micro controladores ofrecen una gran ventaja en relación con la forma tradicional de control análogo, lo cual queda plenamente confirmado con los resultados obtenidos. Adicionalmente, que de los resultados obtenidos se puede establecer que este proyecto sirve de base para el desarrollo de control en lazo cerrado de dispositivos o maquinaria, así como también en la construcción de inversores que son utilizados para el control de motores de corriente alterna.

The aim of the Project is to design and build electronic and/or micro processed control circuits for the AC/DC converter control, for resistive and inductive-resistive charges with the purpose of training students on industrial technology use, considering that there are careers like Mechatronic and Industrial Engineering, which require the adequate equipment along the learning process, and that in certain cases it ends to be very expensive. Therefore, it has been necessary to think of the option of building this equipment in the University, taking into account the cost reduction this would result. Moreover, we would not depend on a supplying company which would become the equipment owner and as a consequence, UTE would depend on it in the case of any new kind of update or repair needed as well. For its design, the microcontroller PIC16F877A utilization has been considered, through which phase control tasks are executed in the semi-controlled and totally controlled monophasic and triphasic AC/DC converter configuration. For the converters construction, silicon controlled rectifiers (SCR) have been used, packed in modules, which ease the assembling process of the final product. While building the equipment that includes bridge-like, semi-controlled and totally controlled monophasic and triphasic AC/DC converters, it has been determined that the micro controllers offer a great advantage compared with the analog control traditional way, which has been completely confirmed by the results obtained. In addition, from the results obtained, it can be established that this project will be the base to control development in device or machinery closed link, as well as the construction of inverters used for alternating current engines control.

## Introducción

Considerando que en la Universidad Tecnológica Equinoccial existen carreras de Ingeniería Mecatrónica, Industrial, las cuales requieren de equipamiento adecuado para el aprendizaje, y que en ciertos casos resulta ser altamente costoso, se hace necesario pensar en la opción de construir estos equipos en la Universidad, tomando en cuenta que se estarían disminuyendo costos y se lograría contar con estos equipos.

Así mismo, la Institución no dependería de empresas proveedoras de los mismos, sería la propietaria del equipamiento y consecuentemente, en el caso de que se diese algún tipo de actualización o reparación por algún daño, estaría dentro de nuestras capacidades.

Por otro lado, con el aprendizaje y manejo de este equipamiento por los estudiantes, tendrán la posibilidad de tener contacto con equipos similares al que encontrarán en la industria, y por consiguiente podrán aplicar los conocimientos recibidos en las distintas materias de formación que debido al carácter académico tiene mayor fundamentación teórica.

Al mismo tiempo, los dispositivos semiconductores, desde sus inicios hasta la actualidad, se han convertido en los elementos motores del desarrollo de la industria dada su versatilidad y aplicabilidad en todos los ámbitos posibles. Hoy no existe empresa en la que no se utilicen estos dispositivos, razón por la cual su desarrollo es muy vertiginoso, lo cual obliga a que constantemente los equipos sean renovados para conseguir una mayor fiabilidad y rendimiento en una época en la cual la reducción del consumo de energía es una de las prioridades.

Este proyecto se propuso construir módulos didácticos de circuitos de control para convertidores AC/DC monofásicos y trifásicos. Módulos estos orientados a la realización de prácticas y aprendizaje

de los futuros profesionales en las ramas de Ingeniería Industrial y Mecatrónica de la Universidad Tecnológica Equinoccial.

Los módulos pedagógicos permitirán que los estudiantes empleen los conocimientos teóricos y verifiquen su aplicabilidad en el campo práctico y real, combinación fundamental para crear el conocimiento.

Se estará entonces aportando al desarrollo en el campo práctico del futuro profesional de tal forma que éste tenga un conocimiento claro de lo que es el mundo de la industria.

## Materiales, Métodos y Procedimientos

Para el desarrollo de la investigación se trabajó el método lógico-deductivo, el cual permite a los educandos conocer y desarrollar los fundamentos de circuitos electrónicos y eléctricos para la construcción de convertidores AC-DC. Igualmente, para la realización del proyecto fue necesario identificar la bibliografía especializada en dos áreas: Control digital de circuitos de potencia operación de los convertidores mencionados. De estas fuentes se tomó información y datos relacionados con las actividades pertinentes a estos circuitos.

### ➤ **Convertidores AC-DC**

Los convertidores (rectificadores) AC-DC con conmutación natural, son circuitos que permiten obtener potencia DC a partir de una Fuente de AC.

La operación de un convertidor AC-DC está basado en el encendido y apagado de los elementos rectificadores, los cuales son generalmente diodos y/o tiristores. El uso de tiristores como rectificadores a los cuales se les puede retardar en su activación, permiten la posibilidad de obtener un voltaje variable DC en los terminales del convertidor.



La elección de un tipo de convertidor para una determinada aplicación depende de ciertos criterios tales como:

- Naturaleza o tipo de la fuente de alimentación.
- Rizado de la corriente de carga.
- Armónicos inyectados en la línea.
- Rango de voltaje de salida DC., etc.

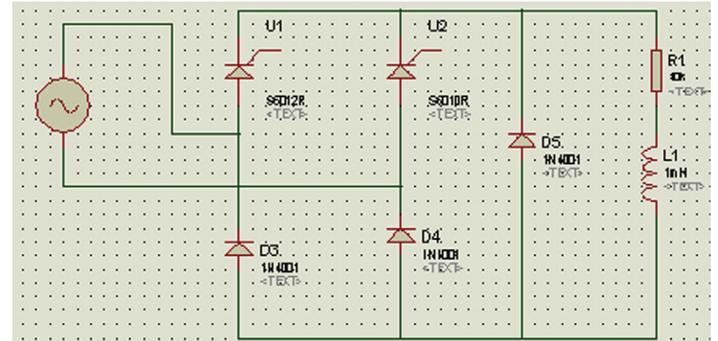
Los convertidores AC-DC generalmente se clasifican de acuerdo a las siguientes características:

- Número de fases de la red de alimentación.
- Número de pulsos del convertidor (número de pulsos existentes en el voltaje DC de salida en un período de voltaje AC).
- Conexión de los elementos del convertidor (diodos y tiristores).
- Uso de los elementos no controlados únicamente, o una combinación de controlados y no controlados. Conociéndolos como convertidores no controlados, semicontrolados o controlados.
- Utilización o no de un diodo de conmutación.

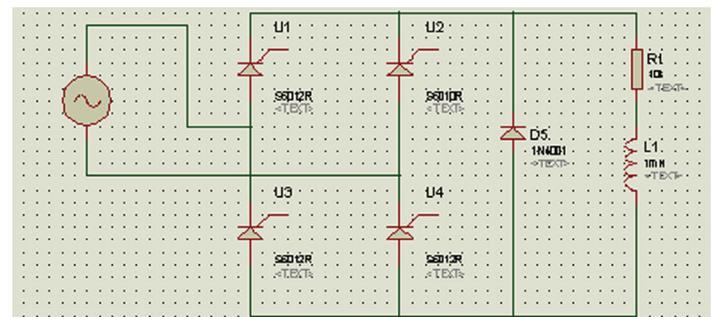
En la figura a continuación se indican los tipos de convertidores más comúnmente utilizados.

Figura No1

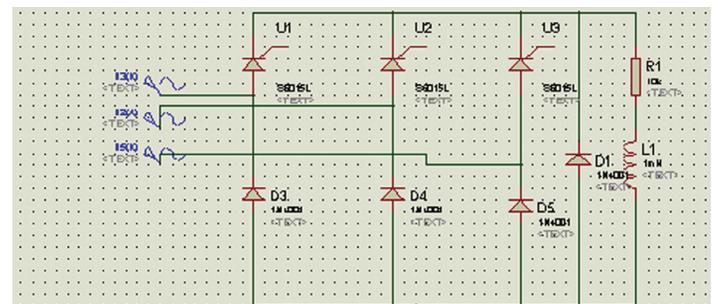
Tipos de Convertidores



- Convertidor AC-DC monofásico semicontrolado



- Convertidor AC-DC monofásico totalmente controlado

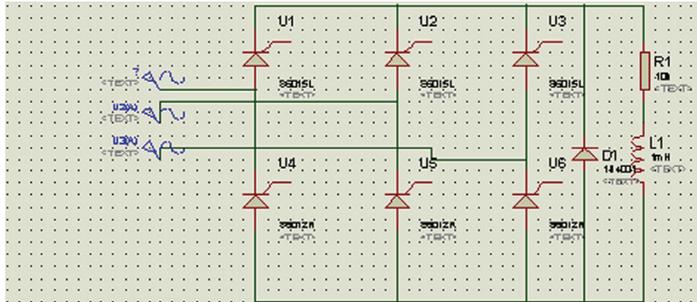


- Convertidor AC-DC trifásico semicontrolado



Figura No 2

### Convertidor AC-DC trifásico totalmente controlado



Los convertidores que tienen alimentación monofásica se emplean generalmente para aplicaciones de baja potencia. Para potencias mayores a unos kilovatios existen razones que a continuación se anotan, para preferir un esquema trifásico:

- La fuente trifásica es cargada en forma simétrica.
- Bajo contenido armónico en la corriente de línea; por consiguiente existe menor distorsión en el voltaje de línea que en el caso monofásico.
- El rizado del voltaje DC a la salida del convertidor tiene componentes armónicos de mayor frecuencia pero de menor amplitud, requiriendo entonces componentes de filtrado menor, causando menos pérdidas en la carga.
- El comportamiento dinámico de los convertidores trifásicos es mejor debido a que los tiristores son activados en intervalos más cortos; esto reduce el retardo ante a las señales de control y permite una respuesta más rápida.

Se toma la opción de un puente trifásico para tener un mayor número de pulsos (seis), con lo que el factor de rizado de la corriente será menor que el caso de un convertidor monofásico, y consecuentemente el voltaje generado presentará una menor distorsión.

### Control digital de un Convertidor AC-DC

Un micro controlador permite entregar datos para los cálculos y la toma de decisiones para la operación de un sistema. La parte principal de un microcontrolador es la unidad central de procesamiento (CPU), y en adición a ésta consta de los siguientes elementos:

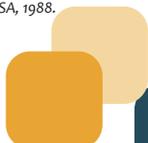
- Reloj.
- Bus de dirección y datos (opcional).
- Memoria de programa (ROM).
- Memoria de datos (RAM).
- Controlador de interrupciones.
- Señales de entrada/salida digitales.
- Señales de entrada/salida análogas.
- Interface de comunicación serial.

Los micros controladores y, en general, el diseño de sistemas digitales para control tienen algunos méritos y limitaciones los cuales se resumen a continuación:<sup>1</sup>

### Bajo costo de Hardware.

La simplificación del hardware de control, y su correspondiente reducción en el costo en comparación con el control análogo, es la ventaja principal del control basado en un microcontrolador. Esta tendencia es evidente al aumentar la velocidad y el número de funciones del microcontrolador. Chips de la tecnología VLSI (Very Large Scale Integration) con la integración de un hardware total de control para una aplicación específica en grandes volúmenes de producción pueden ser significativamente económicos. Peso y tamaño reducido, con menor consumo de potencia son ventajas adicionales.

<sup>1</sup>Bose K., "Microcomputer Control of Power Electronics and Drives", IEEE press, USA, 1988.



▪ **Confiabilidad.**

La confiabilidad de los circuitos integrados con tecnología LSI (Large Scale Integration) o VLSI (Very Large Scale Integration) es considerablemente mayor que cualquier circuito electrónico con un gran número de componentes. Experiencias anteriores han demostrado que los controladores micro procesados tienen más alta confiabilidad que otros componentes y sistemas controladores de potencia.

▪ **Menores problemas de interferencia electromagnética.**

El alto nivel de integración de un microcontrolador, evita el acoplamiento de transitorios de voltaje y corriente en un sistema de electrónica de potencia. El acoplamiento de ruido a través de la fuente de alimentación y señales de entrada puede ser minimizado mediante el uso de filtros digitales o análogos.

▪ **Variación nula de parámetros.**

El procesamiento digital de señales elimina la variación de parámetros, los cuales son prevalentes en controladores analógicos. El cálculo digital es 100% exacto, y los problemas de truncamiento y “overflow” se evitan con un escalamiento adecuado.

▪ **Hardware Software y universal.**

El hardware universal puede ser diseñado para cierta clase de sistemas en donde el software puede ser modificado para satisfacer especificaciones adicionales. Por ejemplo, todos los “drivers” de inversores de voltaje pueden ser controlados por el mismo hardware, pero con diferentes especificaciones de funcionamiento que pueden ser conseguidas mediante alteraciones en el software. La ventaja adicional del software es su flexibilidad para ser construido, alterado o actualizado de acuerdo a como el sistema lo requiera.

▪ **Diagnósticos.**

Una ventaja más del control con microprocesador es su software poderoso de diagnóstico, que puede ser diseñado por un técnico con mediana experiencia. Adicionalmente, la adquisición de datos, monitoreo de señales, precauciones y muestra de valores en “displays” pueden ser fácilmente realizados.

▪ **Cálculos lentos.**

La ejecución de una función en un microcontrolador, es más lenta que en un circuito análogo dedicado a un hardware de control, y la razón para esto es que el microcontrolador calcula la función en forma serial, mientras que el hardware dedicado lo hace en forma paralela. Si un microcontrolador manipula múltiples tareas, se debe disponer de un tiempo para cada una, a través de una “multiplexación” adecuada, lo cual aumenta más el tiempo de ejecución. Grandes retardos de muestreo pueden causar deterioro en el funcionamiento y estabilidad en los lazos de realimentación. Cada vez se están construyendo microprocesadores con mayor velocidad de cálculo y esta tendencia continuará en el futuro para superar esta desventaja.

▪ **Error de cuantización.**

En un sistema físico se tiene señales analógicas y, cuando éstas son convertidas a digitales para el microprocesador por medio de un convertidor A/D, existe un error finito. El error de cuantización puede ser minimizado al incrementar el número de bits del microprocesador y del convertidor.

▪ **Deficiencia en el acceso a las señales de software.**

El control con microprocesador no provee un fácil acceso a las señales de software para ser monitoreadas y comparadas con las de un hardware de control. Un sistema que permita el monitoreo de estas señales puede ser construido para este propósito.

▪ **El desarrollo de software puede ser muy costoso.**

El desarrollo de software especialmente en lenguaje “assembler” puede consumir mucho tiempo y ser muy costoso. El costo adicional puede justificarse desde el punto de vista de las otras ventajas. El incremento de costo en un alto volumen de producción puede no ser muy considerable.

▪ **Técnicas de control de convertidores AC-CD con microprocesador**

Existen varias técnicas desarrolladas para controlar el disparo de convertidores con conmutación natural, unas analógicas, otras digitales y otras como combinación de las dos anteriores. Así, se pueden citar las siguientes: comparadores análogos, contadores digitales, PLL (“Phase Locked Loop”) entre otras. En la mayoría de estos esquemas, la señal de activado se genera cuando una señal variable en el tiempo (señal triangular o diente de sierra), se iguala a una de referencia (voltaje continuo normalizado de 0 a 10 V).

La construcción se la puede realizar de manera análoga por el método del coseno inverso, o de forma digital, como una tabla de “look-up” o tabla de traducción grabada en una memoria y contadores, pero el ángulo de activado es siempre calculado con respecto al cruce por cero de la forma de onda del voltaje de entrada (caso monofásico) o cambio de fase para el caso trifásico.

Por consiguiente, todos estos métodos pueden agruparse en uno solo llamado “métodos de activado absoluto” debido al hecho de que el disparo se realiza sin tomar en cuenta disparos anteriores; sin embargo éstos no son fáciles de realizar en los microprocesadores, a causa de los tiempos de operación de estos (cálculos), habiéndose tan solo realizado simples adaptaciones del software. Por esta razón, en la mayoría de casos se han desarrollado métodos relativos de ángulo de disparo. En el presente trabajo se va a realizar un método de disparo absoluto, ya que el intervalo entre los dos pulsos de disparo es

constante e igual a  $120^\circ$ .

▪ **Método relativo de control del ángulo de activado.**

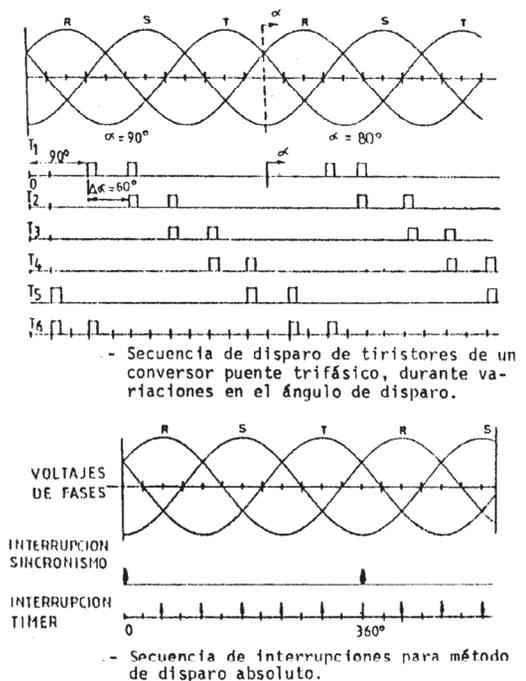
Con este método, el ángulo de disparo es controlado variando el intervalo de tiempo entre los disparos de dos tiristores consecutivos (ver figura No.3). Por supuesto en estado estable, este intervalo ( $\delta$ ) es de  $120^\circ$ .

Este esquema de control tiene algunas ventajas a nivel industrial:

- El costo de instrumentación es extremadamente reducido debido a la eliminación de detectores de los cruces por cero del voltaje.
- El intervalo entre disparos es directamente controlado.
- La detección de los instantes de cruce por cero (o puntos de sincronización) en voltaje de alterna se hace una sola vez cada  $360^\circ$ .

Figura No. 3

**Intervalo de tiempo entre los disparos**



A pesar de que la mayoría de esquemas de disparo utilizan la detección del cruce por cero de cada fase para obtener un punto de referencia entre el ángulo de disparo y el tiristor correspondiente, las señales de cruce por cero no son exactamente espaciadas  $120^\circ$  debido a la distorsión armónica en las formas de onda de entrada y las desigualdades en los componentes de los tres detectores. Por tanto, aún cuando los circuitos de disparo sean idénticos para todos los tiristores, los ángulos de activado diferirán en algo causando incertidumbre y generando armónicos de orden impar.

Con el esquema de ángulo de disparo relativo, los activados equidistantes se mantienen aún cuando exista algún error en la detección del cruce por cero. El error modificará el ángulo de disparo pero todos los tiristores se dispararán con un ángulo idéntico.<sup>3</sup>

El principal inconveniente de este método es que no se dispone de un tiempo fijo para el procesamiento de funciones de control y protección llevadas a cabo por el microcontrolador puesto que:

$$\delta_\alpha = \alpha_n - \alpha_{n-1} + 60^\circ$$

Donde:

$\alpha_n$  = próximo ángulo de disparo.

$\alpha_{n-1}$  = anterior ángulo de disparo.

$\delta\alpha$  = intervalo entre dos pulsos consecutivos.

Si por ejemplo se desea cambiar el ángulo de disparo de  $90^\circ$  a  $80^\circ$  se dispone de un tiempo entre disparos equivalentes a  $50^\circ$  para ejecución de las funciones de control, protección y reportes encargados al microcontrolador. En cambio, en el caso de disminuir el ángulo de  $38^\circ$  a  $2^\circ$ , el tiempo disponible se reduce a  $24^\circ$ . Una situación como la reseñada, podría comprometer el funcionamiento del sistema en general.

<sup>3</sup>Bose, K., " Microprocessor Based Design of a Firing Circuit for Three Phase Full Wave Thyristor Dual Converter, IEEE press, USA, 1982.

Para resolver esta situación, se propone un esquema de disparo absoluto, en el cual los pulsos de disparo a los tiristores del convertidor se efectúan mediante una secuencia de interrupciones. Con ello, se consigue disponer de un tiempo fijo equivalente a  $120^\circ$  para procesamiento de las restantes tareas del microcontrolador.

Es aconsejable procurar que exista una relación lineal entre el voltaje de control (entrada) y el voltaje medio de salida del convertidor. Si la corriente en la carga es considerada continua, este efecto puede ser alcanzado incluyendo una función coseno inverso en el controlador que compense la no linealidad propia del convertidor. Existen muchas maneras de hacer esto con controladores analógicos. En sistemas digitales, la manera más simple y rápida es utilizando tablas de traducción ("look-up tables").

#### ▪ Sistema de potencia

El equipo será diseñado para controlar convertidores monofásicos y trifásicos semicontrolados y totalmente controlados tipo puente, dentro de los límites del rango de funcionamiento determinado por los siguientes parámetros:

#### - Especificaciones de salida.

- Voltaje nominal de salida de: 0 a  $120 V_{DC}$
- Corriente nominal de salida:  $20 A_{DC}$
- Corriente máxima de salida:  $25 A_{DC}$

#### - Especificaciones de entrada.

- Voltaje nominal de entrada:  $220 V_{AC}$
- Variación de voltaje entre: 80% - 120%
- Número de fases: 3
- Frecuencia: 60 Hz.

- Variación de frecuencia:  $\pm 10\%$

- **Condiciones de temperatura y enfriamiento.**

- Temperatura ambiente:  $0^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$
- Enfriamiento natural

- **Altura.**

- El equipo operará hasta 2800 m sobre el nivel del mar.

- **Sistema de Control**

El sistema básicamente estará orientado al control de voltaje y corriente que proporciona el convertidor estático AC-DC.

Adicionalmente el sistema debe realizar la supervisión de fallas en forma permanente y confiable, tanto en software como en hardware.

En resumen, se requiere de un microcontrolador, que junto a otros elementos electrónicos, reúnan las condiciones necesarias para realizar las siguientes tareas:

- **Control del convertidor estático AC-DC**

Para la operación de éste se requiere la generación de señales de control de compuerta de los tiristores del convertidor estático AC-DC. Para tal propósito se debe poseer una adecuada sincronización con la red, para el apropiado cálculo del ángulo de activado ( $\alpha$ ).

- **Supervisión y monitoreo de fallas**

El microcontrolador se encargará de supervisar y monitorear constantemente falla por sobre-corriente a la salida del convertidor. Frente a esta falla el microcontrolador sacará de operación al sistema y mostrará en LED la falla producida.

- **Acción de Control**

En esta tarea el microcontrolador debe realizar las operaciones necesarias para generar los pulsos de activación de los tiristores en el ángulo que se haya indicado por medio del teclado.

- **Protecciones**

El equipo estará protegido contra fallas en potencia y control, para lo cual se tendrán los siguientes elementos y funciones:

- Fusibles en las líneas de alimentación.
- Detección electrónica de sobre corriente en la salida del convertidor.
- Limitación de picos de voltaje transitorio.
- Limitación de  $dv/dt$ .

La acción posterior a una falla será el cese de operaciones y regreso a un estado de Stand By. Para la parte referente a fallas de tipo aleatorio, transitorios y  $dv/dt$  en el convertidor AC-DC, se tendrán redes "snubber" (limitadoras) de forma individual en cada elemento del convertidor para atenuar estas perturbaciones, así como de redes equalizadoras para equilibrar el voltaje inverso en todos los elementos de potencia. La detección de ausencia de fase se realiza monitoreando con el microcontrolador alguna alteración en el normal ingreso de las señales de sincronización.

La detección de sobre corriente se lo realiza tomando muestras de corriente y voltaje; estas muestras son acondicionadas e ingresadas al microcontrolador donde se efectuará una comparación con sus valores máximos.

- **Descripción general del Sistema**

El sistema construido está conformado por dos unidades: Unidad de control y Unidad de potencia. En la unidad de control se



consideran todos los circuitos electrónicos, tales como: circuito de control maestro, circuito de sincronización, circuito de activado y filtrado, circuito de acondicionamiento de señales analógicas, circuitos auxiliares y protección. La unidad de potencia está conformada por un convertidor estático AC-DC.

El sistema proporciona un método de ingreso de datos accesible y comprensible para un operador a través de un teclado independiente.

El sistema básico de control está construido en el bloque denominado control maestro, constituido por el  $\mu\text{C PIC16F877A}$ , el cual realiza las funciones:

- Generación de pulsos de activado.
- Manejo de teclado.
- LED indicadores de estado.
- Acciones de control.
- Supervisión y monitoreo de fallas.

El circuito de sincronismo está conformado, entre otros elementos, por un arreglo de diodos que permiten obtener los pulsos de interrupción para el microcontrolador en cada cruce entre las fases de la red trifásica. Estos pulsos constituyen la interrupción de más alta prioridad en el microcontrolador.

La unidad de control es alimentada de la red monofásica a través de un transformador, y luego hacia un circuito de rectificación y regulación para obtener el voltaje de polarización adecuado.

Con alimentación trifásica, la interrupción de sincronismo es un tren de pulsos desfasados  $120^\circ$  entre sí, y que es detectada por flanco.

La interrupción del timer interno del microcontrolador que genera el retardo en el ángulo de activado y la de sincronismo son las de más alta prioridad, puesto que son las que determinan el instante

en que deben activarse los tiristores.

La interrupción correspondiente al teclado es la de más baja prioridad, y permite ingresar el ángulo de activado para los tiristores.

Durante los instantes en los cuales no existe interrupción, el programa entra en un lazo en el cual se realizan las siguientes tareas: lectura del valor de la corriente del convertidor para ser comparado con el valor máximo permitido, de tal forma que si se exceden estos valores se tomarán las acciones necesarias para la reducción de estos valores.

El circuito de control maestro al recibir una información de falla incrementará el ángulo de disparo a  $180^\circ$ , enviará la señal a los LED (Light Emitting Diode) correspondientes y entrará en un lazo de Stand By, por medio de un reseteo por software.

#### ▪ Diseño del circuito de potencia

##### - Diseño del convertidor estático AC-DC

Las especificaciones dadas en el numeral anterior, entre las cuales se tienen, corriente media de 20 A. y una máxima de 25 A., con un voltaje de  $220 V_{\text{rms}}$  entre líneas de alimentación, imponen los parámetros de diseño del convertidor estático AC-DC, para la explicación se tomará como referencia el convertidor semicontrolado trifásico.

Para el diseño, si la corriente que entrega el convertidor en condiciones de régimen permanente en conducción continua tiene un valor igual a  $I_{\text{dmax}} = 25 \text{ A.}$ , cada elemento del puente conducirá esa corriente durante un tercio del período de línea y los dos tercios permanecerán bloqueado. Por consiguiente, la corriente media de cada elemento es:

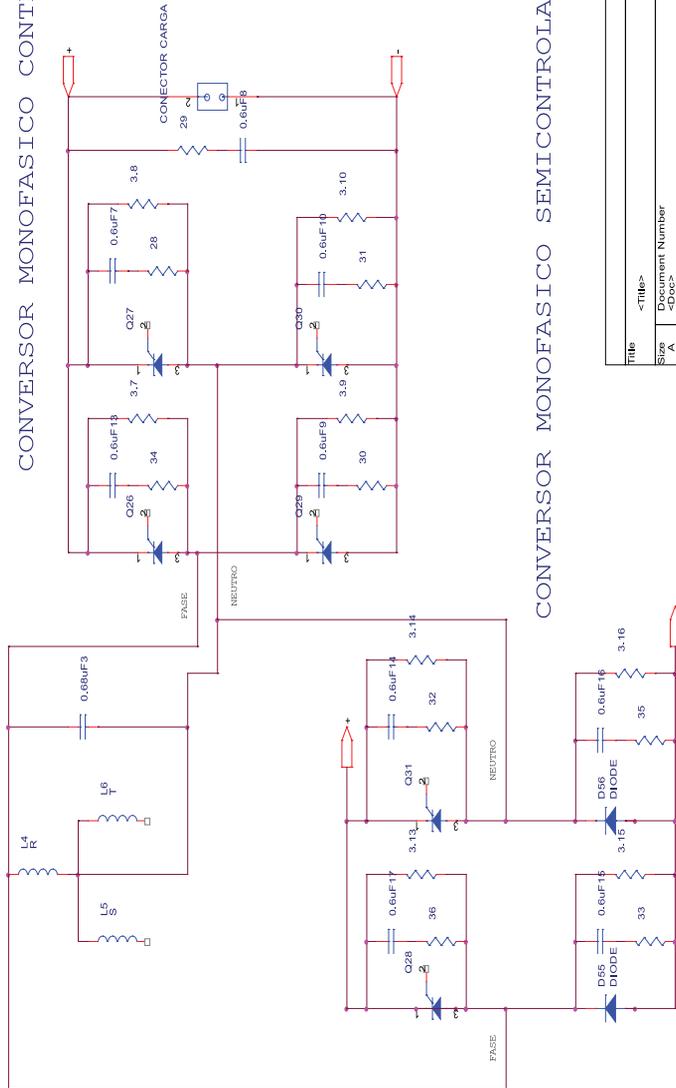
$$I_{\text{med}} = I_d / 3$$

y la corriente RMS a través del elemento será:

$$I_{\text{rms}} = I_d / \sqrt{3}$$



CONVERTOR MONOFÁSICO CONTROLADO



CONVERTOR MONOFÁSICO SEMICONTROLADO

Title	<Title>
Size	Document Number
A	<Doc>
Date	Friday, November 28, 2008
Sheet	1 of 1
Rev	<Rev Code>

▪ Diseño de los circuitos de protección y filtrado

En paralelo a cada uno de los elementos del convertidor (diodos y tiristores), se ha colocado una resistencia (red equalizadora) y una red conformada por una resistencia en serie con un condensador para limitar el dv/dt.

El dimensionamiento de la resistencia equalizadora se lo hace en base a la corriente inversa del elemento y el máximo voltaje aplicado en estado de bloqueo. Así, en paralelo a cada tiristor o diodo se ha puesto una resistencia de 33 KΩ (2 W), considerando un voltaje inverso máximo de 311.13 V. y una corriente inversa de 1mA.

El método más utilizado para limitar la velocidad de crecimiento del voltaje consiste en la colocación de una red R-C. Una manera sencilla y muy usual para estimar los valores de R y C, en función de los valores de la corriente que circula por el tiristor (diodo) y el voltaje directo repetitivo ( $V_{drm}$ ), se basa en las siguientes ecuaciones:<sup>3</sup>

$$C = 2.5 (n F/A) I_t$$

$$R \gg 1.11 V_{drm} / I_{tm}$$

Donde:

$I_t$  = corriente DC de trabajo continuo = 8.33 A.

$V_{drm}$  = Voltaje máximo repetitivo del tiristor = 600 V.

$I_{tm}$  = corriente directa repetitiva máxima = 350 A.

Con base en este método los valores calculados son:

$$C = 20.8 \text{ nF.}$$

$$R \gg 1.90 \Omega.$$

Así los elementos de la red snubber a utilizar en el circuito podrían tener los siguientes valores:

$$C = 22 \text{ nF} / 600\text{V.}$$

$$R = 20 \Omega / 5 \text{ W.}$$

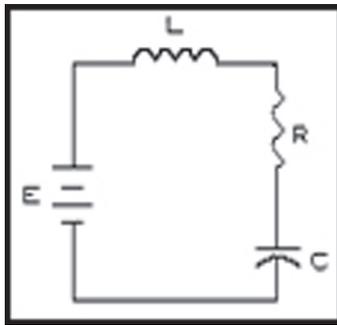
Este método, sin embargo no siempre ha dado buenos resultados, verificándose activados indeseados de los tiristores provocados por un excesivo dv/dt.

<sup>3</sup>SIEMENS, "Power Semiconductors Thyristors, Triacs, Diacs", SIEMENS, 1975.

En esta ocasión se prefirió realizar los cálculos de las redes R-C en base a simulaciones digitales en computador personal, tal como se explica a continuación: tomando en cuenta los valores calculados anteriormente, y simulando el circuito equivalente (figura No. 5) que se tiene cuando actúa la red snubber,

Figura No5

Circuito equivalente



Donde los elementos de circuito corresponden a:

L =Inductancia por fase de la red que alimenta al convertor, la cual tiene un valor igual a 9.05mH.

R =Resistencia de la red snubber.

C =Capacitor de la red snubber.

E =Fuente de alimentación que es igual a 311 V.

Mediante simulaciones se llegó a determinar que los valores más adecuados de la red son:

$$C = 0.68 \mu\text{F} / 400 \text{ V}$$

$$R = 20 \Omega / 5 \text{ W}$$

También se utilizó una red RC a la salida del convertor el cual tiene los siguientes valores que se determinaron con base en experimentación y simulación:

$$C = 2 \mu\text{F} / 400 \text{ V}$$

$$R = 34 \Omega / 25 \text{ W}$$

Para la atenuación de los transitorios provocados por la conmutación de los tiristores se ha colocado entre las líneas de entrada condensadores de 0.1  $\mu\text{F}$  / 600 V. y varistores del tipo Z320LA15A.

Con respecto a la temperatura de operación de los semiconductores, ésta debe permanecer dentro de valores seguros para evitar que los esfuerzos térmicos en el cristal de silicio pueden dañar a los elementos. No se tienen fórmulas definidas para el diseño y selección de disipadores; en la mayoría de casos se ha recurrido a resultados experimentales de transferencia de calor para diferentes tipos y formas de materiales.

El disipador elegido es de aluminio extrusado de color aluminio mate, de aletas verticales planas a los dos lados.

Los fusibles para la protección de los elementos semiconductores del convertor estático deberían ser de acción rápida, y cumplir con una efectiva limitación de corriente y tener una alta capacidad de ruptura frente a un cortocircuito.

Lamentablemente en el mercado local no se encuentran fusibles de acción rápida para protección de semiconductores, y se ha optado por utilizar fusibles comunes de los cuales no se ha podido conseguir hojas de especificaciones o curvas de operación. En todo caso, la carencia de esta información puede ser superada si se considera el hecho de que los elementos semiconductores han sido ampliamente sobredimensionados en su capacidad de corriente. Los fusibles, se han seleccionado en base a la máxima corriente RMS (14.43 A) que circula por cada línea que alimenta al convertor. En el mercado se consiguieron fusibles de 20 A.



▪ Diagramas de flujo de los programas (Software) para control del ángulo de disparo para los convertidores monofásicos y trifásicos

Figura No 6

Programa Maestro PIC16F877A

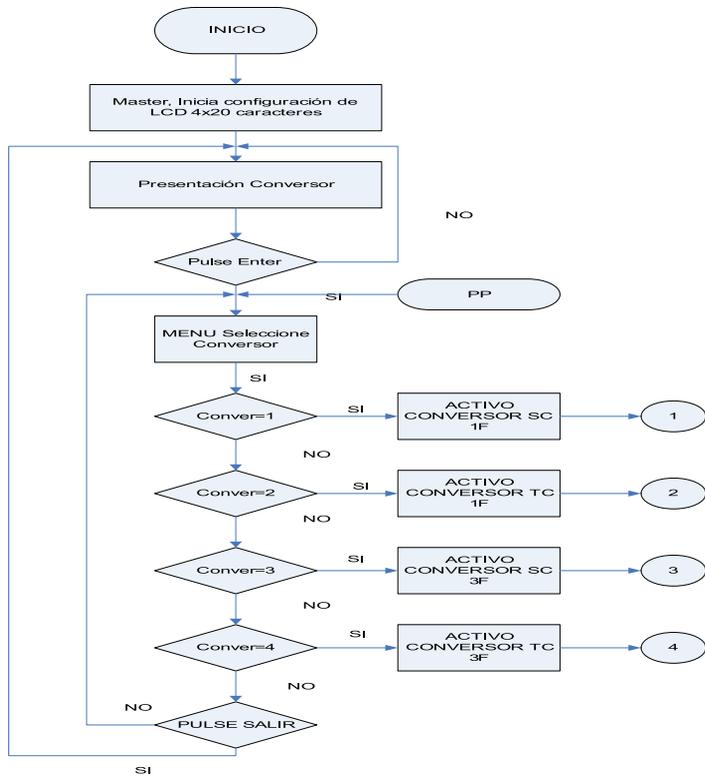
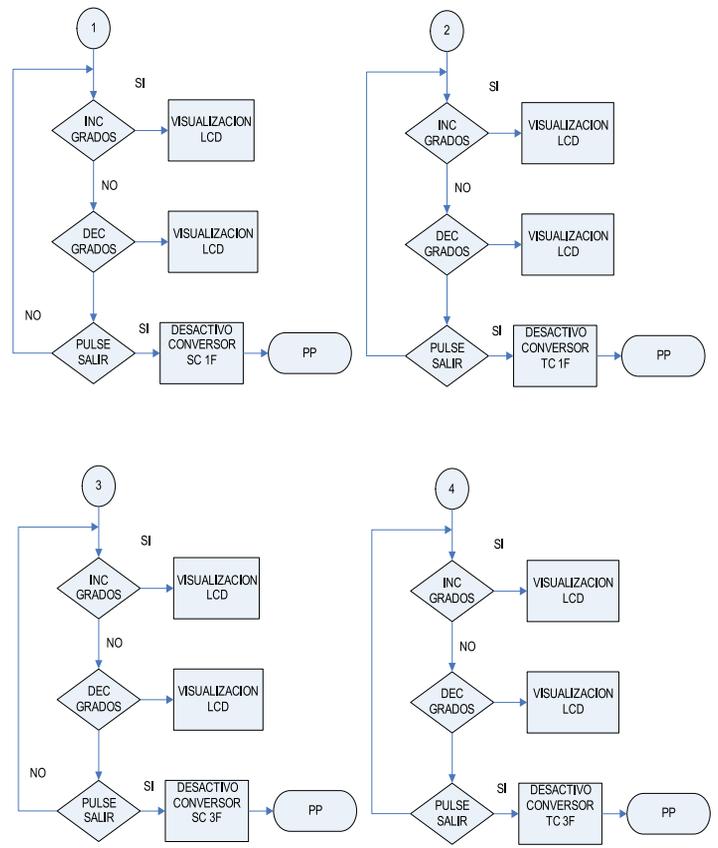


Figura No.7

Barrido de Teclado y Visualización LCD.



Programa del esclavo PIC 16F628A

Figura No 8

Habilitación de Interrupciones y Sincronismo Convertor Monofásico.

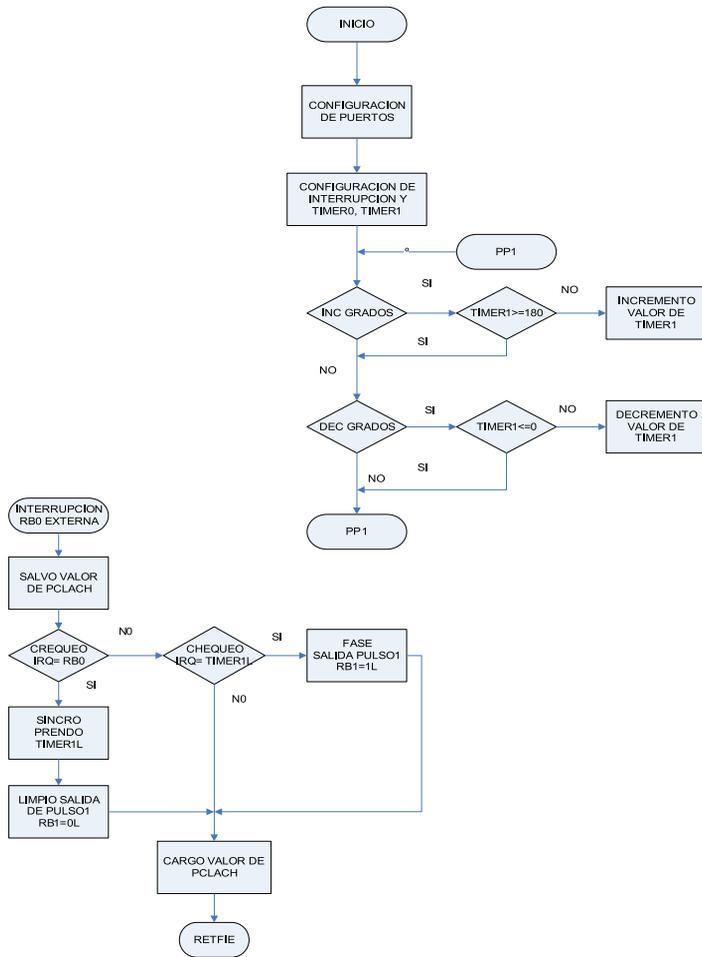
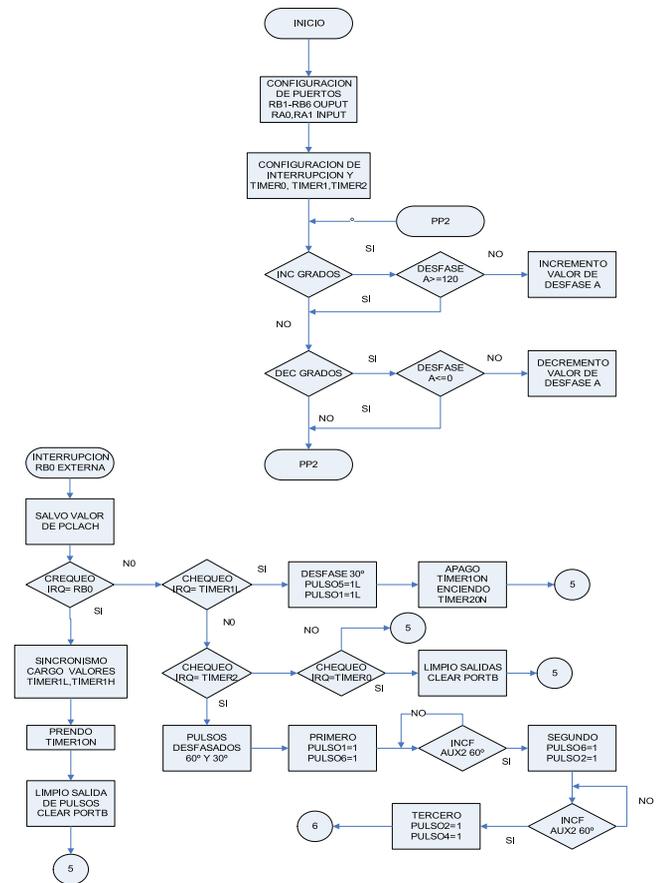


Figura No. 9

Habilitación de interrupciones y Sincronismo Convertor Trifásico.

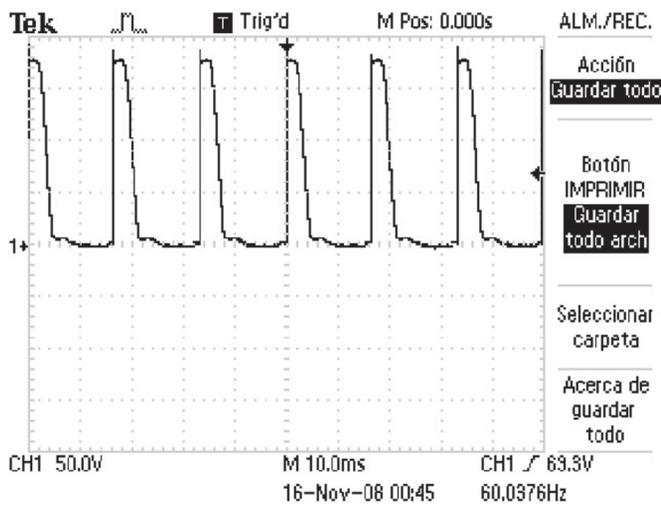


## Resultados y discusión

Como resultado de los experimentos, a continuación se presentan algunas imágenes de las formas de onda del voltaje de salida del convertidor.

Figura No 10

Formas de onda del voltaje de salida del convertidor monofásico, ángulo de activado =  $90^\circ$



Formas de onda del voltaje de salida del convertidor monofásico, ángulo de activado =  $60^\circ$

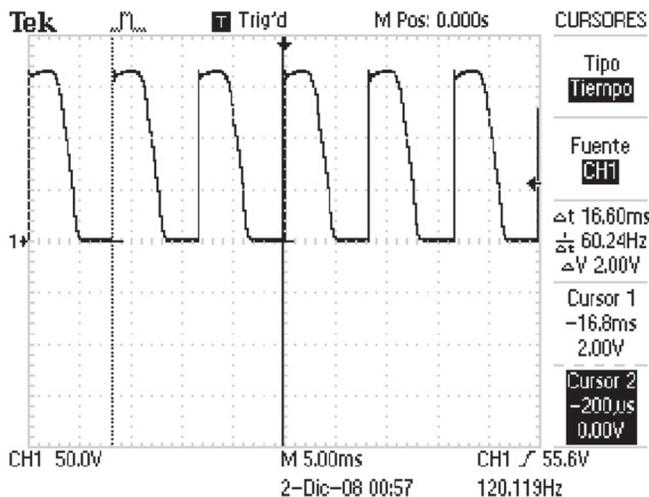
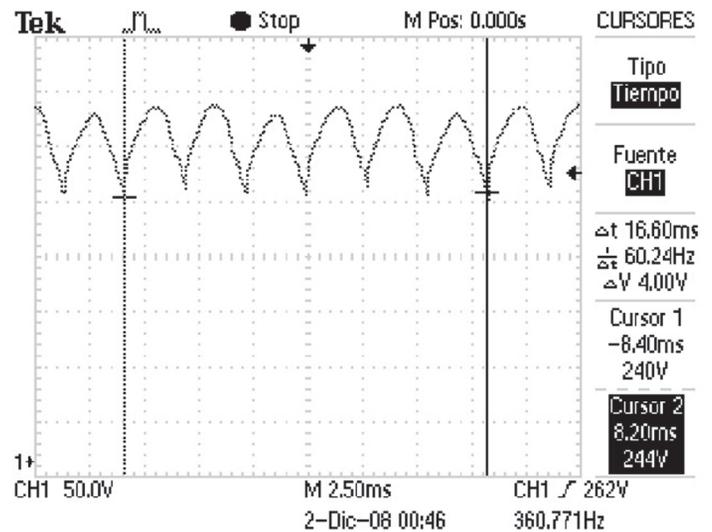
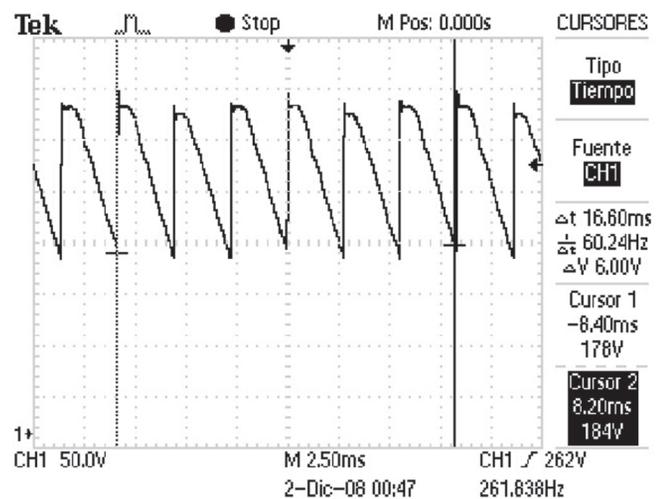


Figura No. 11

Formas de onda del voltaje de salida del convertidor trifásico totalmente controlado con ángulo de activado =  $0^\circ$



Formas de onda del voltaje de salida del convertidor trifásico totalmente controlado con ángulo de activado =  $30^\circ$



## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

Al evaluar la operación en estado estable del equipo, en lo que se refiere a voltaje y corriente de salida del convertidor estático AC-DC, se comprueba el cumplimiento de las condiciones de diseño. Esto es: puede entregar una corriente superior a la nominal 20 A, en forma permanente. En cuanto al voltaje de salida, se logra alcanzar de una forma fácil el máximo valor que este puede entregar, cuando al convertidor se lo hace operar en forma independiente sometido a condiciones de carga que permitan alcanzar las condiciones anteriormente especificadas.

Las pruebas que se efectuaron para verificar la operación de las protecciones de sobre voltaje y sobre corriente son satisfactorias tomando en cuenta que todas estas señales son acondicionadas para su mejor medición. De lo anteriormente expuesto se puede decir que el sistema de adquisición de datos tiene un comportamiento correcto.

Al haber concluido este trabajo, se hace necesario anotar las siguientes conclusiones:

Después de realizar el análisis de los diseños propuestos, de los circuitos construidos y considerando los resultados de las pruebas ejecutadas se puede concluir que el equipo opera satisfactoriamente y cumple los requisitos inicialmente planteados. Además se puede apreciar las facilidades que presta el microcontrolador PIC16F877A para la ejecución de multitareas para la consecución de un objetivo, como las que se desarrolla en el presente trabajo: cálculo del retardo de tiempo para el ángulo de activado de los tiristores del convertidor, y, detección de fallas

Los valores de los elementos que constituyen las redes snubber del puente convertidor calculados con base en las fórmulas indicadas,

no dan una protección adecuada, por lo que fue necesario realizar simulaciones digitales de los circuitos equivalentes, gracias a lo cual si se llegó a obtener valores apropiados de los elementos de protección.

El equipo construido tiene un menor costo que los comúnmente encontrados en el mercado, considerando además las ventajas que este ofrece, por lo que podría ser una buena alternativa de competición en el mercado.

Para el circuito de adquisición de datos, es recomendable que las señales que entran al convertidor A/D y posteriormente al microcontrolador sean lo más exactas posibles y sin ruido porque, debido a la velocidad de conversión este ruido puede provocar errores en la medición y en el caso de variables importantes, esto puede provocar serias alteraciones en la operación del sistema.

### Recomendaciones

Una vez concluido este proyecto es conveniente sugerir que como proyecto futuro que se vinculen con los resultados obtenidos, se elabore el módulo de control de fase, de esta forma se podrá tener el sistema en lazo cerrado para el control de voltaje que podrá ser integrado a cualquier dispositivo, como por ejemplo motores.

Además, se puede plantear avanzar en el proyecto de creación de módulos de inversores que son lo que actualmente se utilizan para el control de motores de corriente alterna y que serían de gran utilidad para el proceso de aprendizaje de los alumnos de las carreras de ingeniería de la Universidad.



## Bibliografía consultada

1. Anderson, P. M., Fouad A. A., “Power System Control and stability “, The Iowa State University Press, 1977.
2. Ledesma., Alvarado. D., “ Diseño y construcción de una Excitatriz Estática para un generador de 5 MVA “, E.P.N., Ecuador, 1990.
3. Ledesma, B., “ Efectos de la Operación de los Convertidores Estáticos en la Red de Suministro “, E.P.N., Ecuador, 1990.
4. Bose, K., “Microcomputer Control of Power Electronics and Drives “, IEEE press, USA, 1988.
5. Bose, K., “Microprocessor-Based Design of a Firing Circuit for Three Phase Full Wavv Thyristor Dual Converter “, IEEE press, USA, 1982.
6. Bose, K., “A Novel Microprocessor Based Controller for a Phase Controlled Rectifier Connected to a Weak AC System “, IEEE press, USA, 1985.
7. IEEE, “Standard Practices and Requirements for General Purpose Thyristor DC Drives “, IEEE press, USA, 1980.
8. SIEMENS. “Power Semiconductors Thyristors, Triacs, Diacs “, USA, 1975.

### El Investigador

**Ing. Juan Carlos Rivera Gaibor**  
lgusqui@ute.edu.ec

**Ingeniero en Control;** Escuela  
Politécnica Nacional, 1990

**Maestría en Administración de  
Empresas,** Escuela Politécnica  
Nacional, 2000

**Diplomado en Diseño de ambientes  
virtuales de enseñanza-aprendizaje,**  
Universidad del Norte, 2006