

**CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTENCIA:
SISTEMA DE CONTROL**

**ALIRIO SANTOS SANCHEZ
LEONARDO ANDRES CAMPIS FREYLE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

**CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTENCIA:
SISTEMA DE CONTROL**

ALIRIO SANTOS SANCHEZ

LEONARDO ANDRES CAMPIS FREYLE

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para
optar el título de
Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones**

Director:

Ing. Julio Augusto Gelvez

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

A mis padres por su incondicional apoyo para lograr esta meta, a mis hermanos por todo su animo y confianza, y a toda mi familia por creer en mi y en especial a Dios por permitirme alcanzar este objetivo.

Alirio.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Julio Gélvez Figueredo, MPE, Ingeniero electricista y director del proyecto por sus valiosa colaboración y asesoría en el desarrollo de este proyecto.

Javier Enrique Mier, Ingeniero electrónico y codirector del proyecto, por su interés, colaboración y asesoría en la construcción del prototipo del proyecto proyecto.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCION	
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.1.1 Objetivo general	1
1.1.2 Objetivos específicos	1
1.2 BREVE DESCRIPCION DEL PROYECTO	2
1.3 APLICACIONES	4
2. SEMICONDUCTORES DE POTENCIA	5
2.1 DIODOS DE POTENCIA	5
2.2 SCR	6
2.3 MOSFETS	8
3. APLICACIONES	12
3.1 RECTIFICADORES	12
3.1.1 Rectificador monofásico controlado	12
3.1.2 Rectificador monofásico semicontrolado	14
3.1.3 Rectificador trifásico controlado	15
3.1.4 Rectificador trifásico semicontrolado	17
3.2 CONTROL AC DE LINEA	18
3.2.1 Control AC monofásico controlado	20
3.2.2 Control AC monofásico semicontrolado	21
3.2.3 Control AC trifásico controlado carga resistiva (balanceada) en Y sin neutro.	22
3.2.4 Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva (balanceada) en Y sin neutro.	24
3.2.5 Control AC trifásico controlado carga resistiva en Y con	25

neutro.	
3.2.6 Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva en Y con neutro	26
3.2.7 Control AC trifásico controlado carga resistiva (balanceada) en triangulo SCR's en la línea	27
3.2.8 Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva(balanceada) en triangulo SCR's en la línea	28
3.3 TROCEADOR	28
3.4 INVERSORES	31
3.4.1 Inversor Monofásico	32
3.4.2 Inversor Trifásico	33
4. CIRCUITOS PARA EL CONTROL	36
4.1 SISTEMA OPERATIVO	36
4.1.1 Características y descripción de pines del microcontrolador MC68HC908GP32.	37
4.1.2 Implementación del teclado y del display LCD.	39
4.2 CIRCUITO DETECTOR DE CRUCES POR CERO.	43
4.3 CIRCUITO COMUNICACIÓN PARALELA Y SERIAL.	45
4.3.1 Circuito de comunicación serial.	46
4.3.2 Comunicación paralela.	48
4.4 CIRCUITO PARA EL SISTEMA DE CONTROL.	49
4.5 INTERFAZ DE AISLAMIENTO.	52
5. DESCRIPCION DE LAS RUTINAS Y SUBRUTINAS IMPLEMENTADAS EN EL MODULO CONVERTOR ESTATICO DE POTENCIA.	54
5.1 RUTINAS Y SUBRUTINAS DEL SISTEMA OPERATIVO.	54
5.1.1 Rutina de interrupción por teclado	55
5.1.2 Subrutina de lectura del teclado	56
5.1.3 Subrutina de almacenamiento de datos.	56
	58

5.1.4. Subrutina de transmisión de datos paralela.	59
5.1.5 Subrutina de recepción y transmisión de datos serial.	70
5.2 RUTINAS Y SUBRUTINAS DEL SISTEMA PARA EL CONTROL.	71
5.2.1 Subrutina de recepción paralela.	72
5.2.2 Subrutinas para las aplicaciones de rectificación trifásica y monofásica.	73
5.2.3 Subrutinas para las aplicaciones de control AC monofásico y trifásico.	74
5.2.4 Subrutinas para el troceador	74
5.2.5 Subrutinas para el inversor	77
6. PRUEBAS	77
6.1 PULSOS DE CONTROL RECTIFICADORES MONOFASICOS	79
6.2 TENSION DE SALIDA RECTIFICADOR MONOFASICO SEMICONTROLADO Y CONTROLADO	80
6.3 PULSOS DE CONTROL RECTIFICADOR TRIFASICO SEMICONTROLADO Y CONTROLADO	82
6.4 TENSIÓN DE SALIDA RECTIFICADOR TRIFASICO SEMICONTROLADO Y CONTROLADO(CARGA RESISTIVA).	83
6.5 CONTROL AC MONOFÁSICO CONTROLADO Y SEMICONTROLADO	85
6.6 TENSIÓN DE SALIDA CONTROL AC MONOFÁSICO CONTROLADO.	86
6.7 CONTROL AC MONOFÁSICO SEMICONTROLADO	89
6.8 CONTROL AC TRIFASICO CONTROLADO	90
6.9 CONTROL AC TRIFASICO CONTROLADO CARGA EN DELTA SCR'S EN LA LINEA(CARGA RESISTIVA)	91
6.10 COTROL AC TRIFÁSICO CONTROLADO CARGA EN Y CON NEUTRO	92
6.11 CONTROL AC TRIFÁSICO CONTROLADO CARGA EN Y SIN	

NEUTRO	94
6.12 TROCEADOR	
6.13 INVERSOR MONOFASICO	98
6.14 INVERSOR TRIFÁSICO	98
7. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	100
8. BIBLIOGRAFIA	105

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Diagrama de bloques del módulo conversor estático de potencia	2
Figura 2. Característica V-I del Diodo	5
Figura 3. Símbolo del tiristor y tres uniones pn	7
Figura 4. Circuito Tiristor y característica V-I	8
Figura 5. Tipos de Mosfets	9
Figura 6. Característica MOSFET tipo n	10
Figura 7. Rectificador monofásico controlado	13
Figura 8. Formas de onda para el rectificador monofásico controlado	13
Figura 9. Rectificador monofásico semicontrolado	14
Figura 10. Rectificador trifásico controlado	15
Figura 11. Formas de onda de las tensiones de línea y los pulsos de disparo para un rectificador trifásico controlado	16
Figura 12. Rectificador trifásico semicontrolado	17
Figura 13. Control AC monofásico controlado	20
Figura 14. Formas de onda para el control AC monofásico controlado	20
Figura 15. Control AC monofásico semicontrolado	21
Figura 16. Formas de onda para un controlador monofásico semicontrolado	22
Figura 17. Control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro.	23
Figura 18. Formas de onda para el control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro	23
Figura 19. Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva en Y con neutro.	24
Figura 20. Control AC trifásico controlado carga resistiva en Y con	25

neutro.

Figura 21. Control AC trifásico semicontrolado carga en Y con neutro	26
Figura 22. Control AC trifásico controlado carga resistiva en triangulo SCR's en la línea	27
Figura 23. Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva en triangulo SCR's en la línea.	28
Figura 24. Circuito Troceador con carga resistiva	29
Figura 25. Troceador con carga RL	30
Figura 26. Inversor monofásico con carga resistiva	32
Figura 27. Puente inversor trifásico(PIT)	33
Figura 28. Señales de puerta, tensiones de línea y tensiones de fase para un PIT con tres transistores encendidos en todo momento (conducción a 180°)	34
Figura 29. Conexión PIT con carga en estrella, para conducción a 180°	35
Figura 30 . Diagrama de bloques del módulo conversor estático de potencia	36
Figura 31. Diagrama de pines del microcontrolador GP32	38
Figura 32. Esquema del Teclado y el display	39
Figura 33. Arreglo de transformadores para la detección de cruces por cero de las tensiones trifásicas	44
Figura 34. Detector de cruces por cero y de ventana de polaridad	44
Figura 35. Interfaz RS-232	47
Figura 36. Comunicación paralela	48
Figura 37. Circuito de sincronización, generación de pulsos y switcheo	50
Figura 38. Circuito manejador de puerta para Mosfets y SCR's	53

Figura 39. Fuente para el circuito manejador de puerta	53
Figura 40 Diagrama de flujo del sistema operativo	60
Figura 41 Pulsos de control para el troceador	74
Figura 42 Pulsos de control para el inversor trifásico	75
Figura 43. Pulsos de control para el rectificador monofásico	77
Figura 44. Tensión de salida para el rectificador monofásico semicontrolado y controlado(carga resistiva)	79
Figura 45. Pulsos de control para el rectificador trifásico semicontrolado y controlado	80
Figura 46. Tensión en la carga para el rectificador trifásico semicontrolado y controlado(carga resistiva)	82
Figura 47. Pulsos de control para el control AC monofásico semicontrolado y controlado.	84
Figura 48. Tensión de carga para el control AC monofásico controlado	85
Figura 49. Tensión de salida para el control AC monofásico semicontrolado (carga resistiva)	86
Figura 50. Pulsos de control para los diferentes controladores AC trifásicos controlados	88
Figura 51. tensión de salida para el control AC controlado carga en delta SCR's en la línea(carga resistiva)	89
Figura 52. Tensión de salida para el control AC trifásico controlado carga en Y con neutro(carga resistiva)	90
Figura 53. Tensión de salida para el control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro(carga resistiva)	91
Figura 54. Tensión de salida para el troceador (carga resistiva)	93
Figura 55. Ciclo de trabajo 50%, variando la frecuencia	94
Figura 56. Frecuencia constante de 60 Hz, variando el ciclo de	97

trabajo

Figura 57. Tensión de salida del inversor trifásico

99

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Aplicaciones	4
Tabla 2. Secuencia de encendido de los mosfets	35
Tabla 3. Funciones de los pines	38
Tabla 4. Códigos módulo LCD	41
Tabla 5. Descripción de las abreviaturas	42
Tabla 6. Rangos de control para los diferentes conversores implementados en el modulo conversor estático de potencia	57
Tabla 7. Porcentajes de error rectificador monofásico	79
Tabla 8. Porcentajes de error rectificador trifásico	81
Tabla 9. Porcentajes de error control AC monofásico	83

TITULO: CONVERSORES ESTATICOS DE POTENCIA-SISTEMA DE CONTROL

AUTORES:

ALIRIO SANTOS SÁNCHEZ

LEONARDO CAMPIS FREYLE**

PALABRAS CLAVES: aislamiento, cruce por cero, pulsos, interrupción, comunicación.

DESCRIPCIÓN:

Se desarrolló un módulo de convertidores estáticos de potencia que permite programarse desde un PC o en el mismo módulo a través de un teclado y un display. En el módulo se pueden implementar aplicaciones de electrónica de potencia tales como: controles AC de línea, rectificadores, troceadores e inversores. El sistema operativo está implementado por un microcontrolador GP32, éste maneja el teclado y display desde donde se va a dar selección de la aplicación y los parámetros a implementar, y la puesta en marcha del equipo; de igual manera se puede realizar desde el PC mediante comunicación serial (RS-232). El sistema de control está implementado por un JL3 que maneja las aplicaciones de control, rectificación e inversor monofásicas y de troceador, y 2 JK3 que van a manejar las fases restantes en las aplicaciones trifásicas.

El Troceador fue implementado a una frecuencia fija de 20 KHz pudiendo variarse el ciclo de trabajo entre un 5% y un 95%. El Inversor fue implementado para una frecuencia variable de 10 a 80 Hz y un ciclo de trabajo variable también entre el 5% y el 95%. En la etapa de aislamiento, se utilizaron medios ópticos mediante el circuito integrado PS9634, que utiliza una fuente dual y un ancho de banda de 100KHz. Este circuito está diseñado para manejar Mosfets, los cuales son controlados por tensión, por esta razón fue necesario implementar un circuito adicional para poder manejar los SCRs los cuales son controlados por corriente.

*Proyecto de grado

** Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Director: Mpe Julio Gelvez Figueredo.

*TITLE: POWER STATICS CONVERTERS – CONTROL SYSTEM

AUTHORS:

ALIRIO SANTOS SÁNCHEZ

LEONARDO CAMPIS FREYLE**

KEY WORDS: isolation, crossing by zero, pulses, interruption, shot angle, communication.

DESCRIPTION:

It was developed a module Power Statics Converters that permits be programmed from an PC or in the same module through a keyboard and a display. In the module can be implemented applications of power electronics such as: controls AC of line, rectifiers, choppers and investing. The operative system is implemented by a microcontroller GP32, this handles the keyboard and display from where goes to give selection of the application and the parameters to implement, and the implementation of the equipment; of equal way can be accomplished from PC through serial communication (RS - 232). The system of control is implemented by a JL3 that handles the applications of control, rectification and investing monophasics and of chopper, and 2 JK3 that go to handle the remaining phases in triphasics applications . The character of the module is exclusively didactic, in spite this the work tensions are those of net, in the case of chopper and Investor the power supply is 160 Vdc aprox.

Chopper was implemented to a fixed frequency of 20 KHz being able to be varied the work cycle between a 5% and a 95%. The Investor was implemented for a variable frequency of 10 to 80 Hz and a variable work cycle also between 5% and 95%. In the isolation stage, were used optical means through the integrated circuit PS9634, that uses a dual source and a broad of band of 100KHz. This circuit is designed to handle Mosfets, those which are controlled by tension, by this reason was necessary to implement an additional circuit for power to handle the SCRS those which are controlled by current.

*Grade Project

** Electrical Engineering School, Electronics and of Telecommunications
Electronics Engineering

Director: Mpe Julio Gelvez Figueredo.

INTRODUCCION

Dentro del programa de las Ingenierías Eléctrica y Electrónica se encuentra la posibilidad de estudiar el área de las aplicaciones de los dispositivos de potencia en asignaturas como Electrónica de Potencia y Electrónica Industrial. En estas asignaturas y en especial en el estudio de los convertidores de potencia los circuitos para el análisis del funcionamiento y las características se hace más complejo a medida que se va avanzando en el tema del curso.

El módulo conversor estático de potencia fue desarrollado para ser utilizado en los laboratorios de electrónica de potencia e industrial, donde se requiere implementar diferentes configuraciones de convertidores. En el capítulo 1 se hace un breve descripción del módulo, en el capítulo 2 se encuentra un pequeño marco teórico, en el 3 se encuentran las aplicaciones, en el capítulo 4 hace una descripción de los circuitos para el control, en el 5 se hace una breve descripción del software y en el capítulo 6 se encuentran los resultados de las pruebas realizadas con el módulo.

1.DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de control para el prototipo “Módulo Conversores estático de potencia”, el cual permita implementar las siguientes aplicaciones industriales: control AC de línea (monofásico, trifásico), puente rectificador controlado y semicontrolado (monofásico, trifásico), inversor (monofásico, trifásico) y troceador reductor.

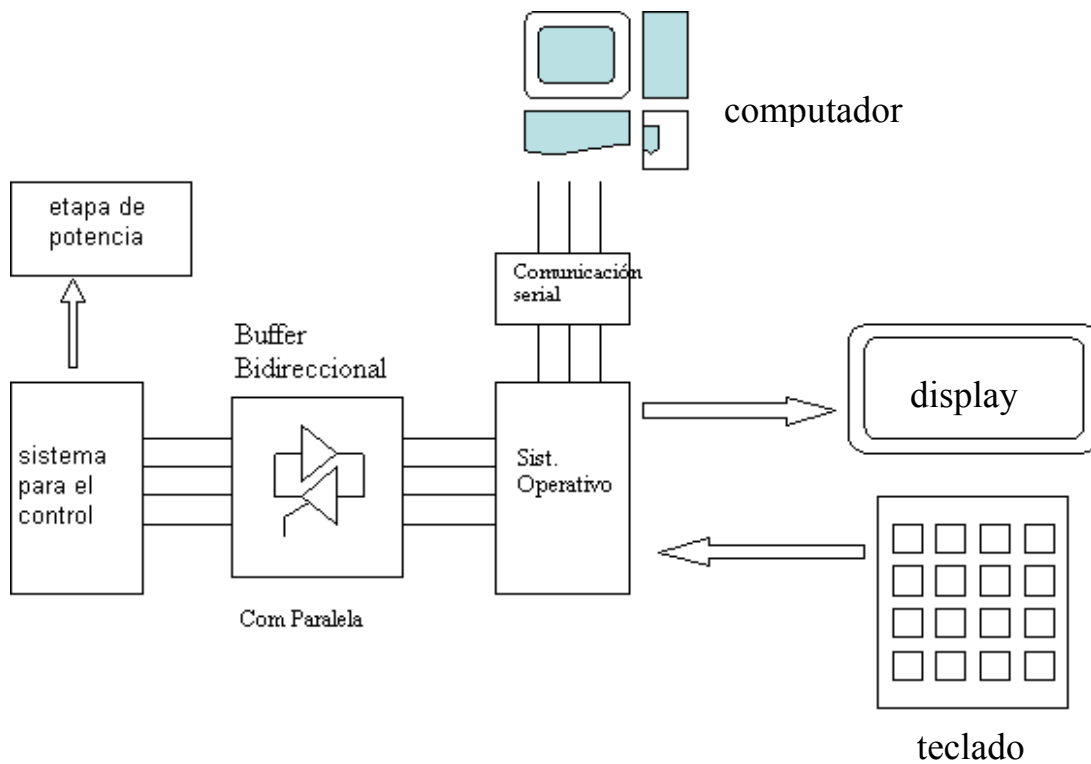
1.1.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar con microcontroladores la estrategia de control para el prototipo “Módulo de convertidores Estáticos de potencia”.
- implementar un sistema de operación y visualización para la aplicación con un teclado y display.
- implementar las rutinas de comunicación serial que permitan la selección y la puesta en marcha de la aplicación a realizar desde el PC.
- diseñar e implementar las tarjeta de aislamiento óptico.

1.2 BREVE DESCRIPCION DEL PROYECTO

En este proyecto se desarrolló un módulo para la realización de las prácticas de las asignaturas de electrónica de potencia e industrial. En este módulo se pueden implementar aplicaciones tales como: controles AC de línea, rectificadores, troceadores e inversores.

Figura 1. Diagrama de bloques del módulo conversor estático de potencia



El módulo está compuesto de varios bloques interconectados entre sí como se puede apreciar en la Figura 1; cada uno de estos bloques cumple una función específica.

El sistema operativo se implementó empleando un microcontrolador MC68HC908GP32 de la familia Motorola, al cual se le adaptó un LCD(display de cristal líquido), y un teclado matricial 4*4. Por medio de la pantalla, el usuario puede ver los diferentes menús y submenús que le permiten, utilizando el teclado seleccionar las diferentes aplicaciones que se pueden implementar en el modulo.

La tarjeta de control fué desarrollada empleando 2 microcontroladores MC68HC908JK3 y un microcontrolador MC68HC908JL3; Su principal función es generar los pulsos de control que son enviados a los elementos semiconductores de potencia.

La tarjeta de control y el sistema operativo se comunican entre si mediante un sistema de comunicación paralelo de 5 hilos. El buffer bidireccional usado en la comunicación paralela permite que la comunicación se pueda realizar en ambos sentidos. Los datos del computador son transmitidos al sistema operativo de forma serial usando una interfaz rs-232 implementada con un MAX-232. Una vez el sistema operativo ha recibido los datos provenientes del computador, los transmite al sistema de control usando la comunicación paralela a 5 hilos.

Los pulsos generados por la tarjeta de control son enviados a los elementos semiconductores de potencia a través de una tarjeta de optocuplas, cuya función es garantizar el aislamiento óptico entre la etapa de control y la etapa de potencia.

1.3 APLICACIONES

El módulo fue diseñado para implementar 15 diferentes esquemas de convertidores.

Tabla 1. Aplicaciones

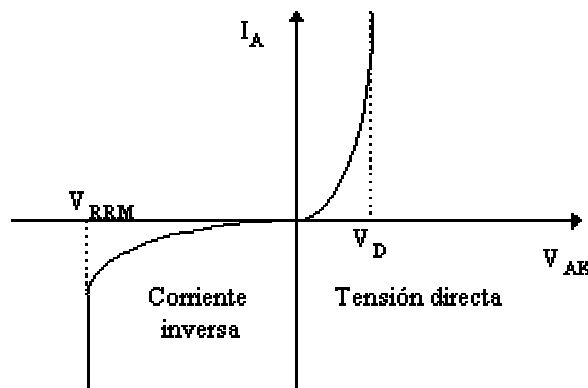
No	Tipo de Conversor
1	Rectificador monofásico controlado
2	Rectificador monofásico semicontrolado
3	Rectificador trifásico controlado
4	Rectificador trifásico semicontrolado
5	Control AC monofásico controlado
6	Control AC monofásico semicontrolado
7	Control AC trifásico controlado carga en Y con neutro
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
14	Inversor monofásico
15	Inversor trifásico

2. SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

2.1 DIODOS DE POTENCIA

Para la mayor parte de las aplicaciones de potencia se puede suponer que un diodo es un interruptor ideal controlado por tensión. Un diodo de potencia es un dispositivo de unión pn de dos terminales, ánodo y cátodo, este último conectado a la base metálica del elemento. Cuando el potencial del ánodo es positivo con respecto al cátodo, se dice que el diodo tiene polarización directa o positiva y el diodo conduce una corriente significativa cuyo valor depende de los elementos del circuito al cual se encuentre conectado, en esta condición presenta una caída de voltaje relativamente pequeña. Cuando el potencial entre ánodo y cátodo es negativo, se dice que el diodo está polarizado inversamente y una corriente despreciable circulará en sentido inverso (figura 2). Si el potencial sigue aumentando negativamente el diodo alcanzará el voltaje de ruptura y volverá a conducir esta vez con una corriente en sentido inverso limitada por la carga.

Figura 2. Característica V-I del Diodo



El comportamiento del diodo se puede representar mediante el siguiente modelo matemático expresado mediante la ecuación¹ :

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1)$$

donde I_D : es la corriente a través del diodo.

V_D : voltaje del diodo con el ánodo positivo con respecto al cátodo.

I_S : corriente de fuga, entre 10^{-6} y 10^{-5}

n : constante empírica, factor de idealidad de 1 a 2.

V_T : voltaje térmico (kT/q), aproximadamente 25,8 mV

2.2 SCR

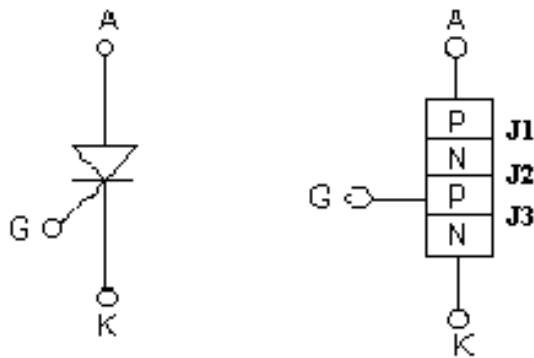
El SCR es uno de los tipos más importantes de los dispositivos semiconductores de potencia, los cuales se utilizan en forma extensa en los circuitos electrónicos de potencia. Se operan como conmutadores biestables, pasando de un estado no conductor a un estado conductor; en el presente trabajo se supone que los SCR's son interruptores o conmutadores ideales.

Un SCR es un dispositivo semiconductor de cuatro capas de estructura pnpn con tres uniones pn; tiene tres terminales: ánodo cátodo y compuerta. La Figura 3 muestra el símbolo del SCR y una sección recta de tres uniones pn. Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, las uniones J1 y J3 tienen polarización directa o positiva, mientras la unión J2 tiene polarización inversa y solo fluirá una pequeña corriente de fuga del ánodo al cátodo; se dice entonces que el SCR está en condición de bloqueo directo o en estado desactivado llamándose a la corriente fuga corriente de estado inactivo I_D .

¹ Rashid ,Muhamad H. *Electrónica de Potencia*. Prentice Hall. México 1993, P 194

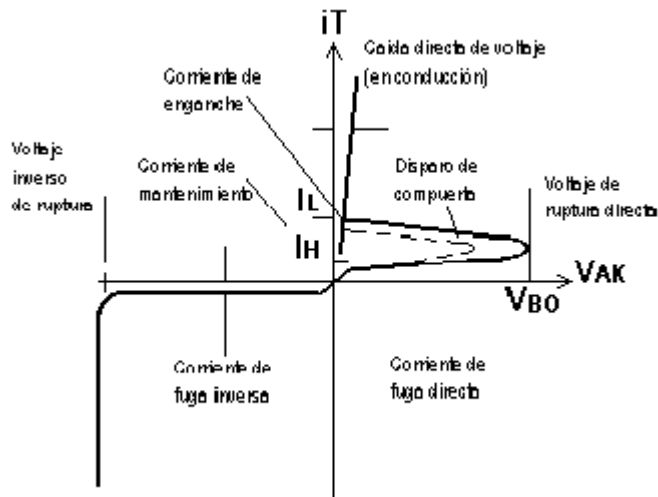
Si el voltaje ánodo a cátodo V_{AK} se incrementa a un valor lo suficientemente grande la unión J2 polarizada inversamente entrará en ruptura. Esto se conoce como ruptura por avalancha; cuando el SCR se encuentra polarizado directamente y aplicando una señal adecuada a la puerta, el dispositivo conmuta al estado de conducción, se dice entonces que el dispositivo está en estado de conducción o activado.

Figura 3. Símbolo del tiristor y tres uniones pn.



La caída de voltaje en conducción se debe a la caída óhmica de las cuatro capas y es de aproximadamente 1V. La corriente del ánodo debe ser mayor que un valor conocido como corriente de enganche I_L , figura 4, a fin de mantener la cantidad requerida de flujo de portadores a través de la unión; de lo contrario, al reducirse el voltaje de puerta-cátodo, el dispositivo regresará a la condición de bloqueo.

Figura 4. Circuito Tiristor y característica V-I



Una vez que el SCR es activado , se comporta como un diodo en conducción y ya no hay control sobre el dispositivo; sin embargo si se reduce la corriente directa del ánodo por debajo de un nivel conocido como corriente de mantenimiento I_H , se genera una región de agotamiento alrededor de la unión J_2 debida al número reducido de portadores; el SCR entrará entonces al estado de bloqueo.

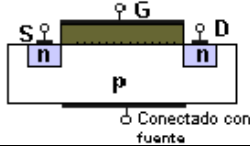
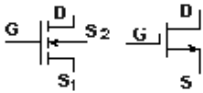
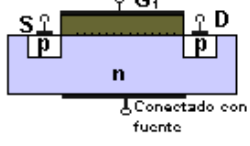
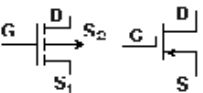
2.3 MOSFETS

Un transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field effect transistor), es una barra de silicio con un sector oxidado sobre el que se produce un metalizado. Este metalizado está por lo tanto aislado de la barra de silicio pero suficientemente cercano como para cambiar la magnitud de la corriente circulante por la barra. Los MOSFETs de potencia ofrecen grandes ventajas en la construcción de convertidores de baja y media potencia ya que dichos

dispositivos tienen velocidades de operación más altas que los transistores bipolares y que los SCR's.

Existen diferentes versiones de MOSFETs, en función del tipo de barra de silicio (canal tipo P y canal tipo N) y del funcionamiento del dispositivo. Existen MOSFET de ensanchamiento de canal y otros de estrechamiento del canal (los primeros tiene una resistencia intrínseca alta, que se reduce al aplicar tensión a la compuerta y los segundos tienen una resistencia intrínseca baja, que aumenta al aplicar tensión a la compuerta).

Figura 5. Tipos de Mosfets

<p>Modelo de transistor MOSFET canal n</p>		
<p>Modelo de transistor MOSFET canal p</p>		

El principio de funcionamiento de un transistor MOSFET es simple: de acuerdo a la tensión existente entre los terminales de compuerta y fuente, la barra de silicio se torna un conductor de muy baja resistencia intrínseca o un aislador casi perfecto.

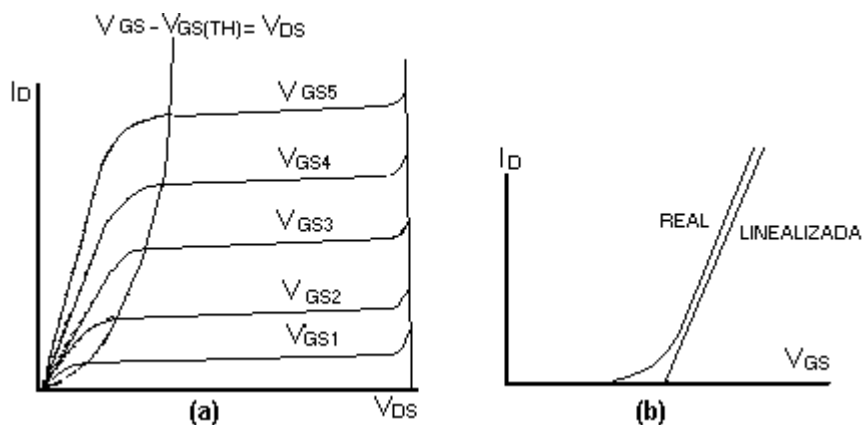
El MOSFET está en corte cuando el voltaje puerta surtidor V_{GS} es inferior al voltaje de umbral $V_{GS(TH)}$, el cual es típicamente de algunos voltios para los MOSFET de potencia; en este caso el dispositivo se comportará como un

circuito abierto. Bajo esta condición de operación el voltaje aplicado al circuito debe ser inferior al voltaje drenador-surtidor de ruptura para evitar que el dispositivo entre en ruptura, ya que en esta condición las potencias disipadas pueden ser altas. Cuando el dispositivo es manejado por un voltaje alto entre puerta y surtidor V_{GS} , opera en la región óhmica con un voltaje entre drenador y surtidor V_{DS} pequeño. Además se debe mencionar que la compuerta no consume energía ya que se trata de una lámina metálica aislada.

El MOSFET al igual que el BJT es un dispositivo de tres terminales, donde la puerta en el caso del MOSFET controla el flujo de corriente entre el drenador y surtidor, las características de salida corriente de drenador (I_D) en función del voltaje drenador surtidor (V_{DS}) con el voltaje puerta surtidor (V_{GS}) como parámetro se muestra en la figura 6, para un MOSFET canal n. La característica de salida de los MOSFET canal p es igual excepto que las polaridades de los voltajes son invertidas.

Figura 6. Característica MOSFET tipo n.

(a) característica de salida (v-i). (b) curva de transferencia



En aplicaciones de electrónica de potencia el MOSFET se usa como interruptor para controlar el flujo de potencia hacia la carga en forma análoga como se usaría un BJT, en estas aplicaciones cuando el dispositivo es encendido va desde el corte a lo largo de la región lineal hasta la región óhmica y en sentido contrario en el bloqueo.

3. APLICACIONES

Para facilitar la comprensión de las estrategias de control, se explican a continuación, los tipos de convertidores que se pueden implementar en el módulo, junto con el principio de control para cada uno de ellos; las tensiones de salida en la carga para la mayoría de aplicaciones mostradas en este capítulo se muestran en el capítulo 6.

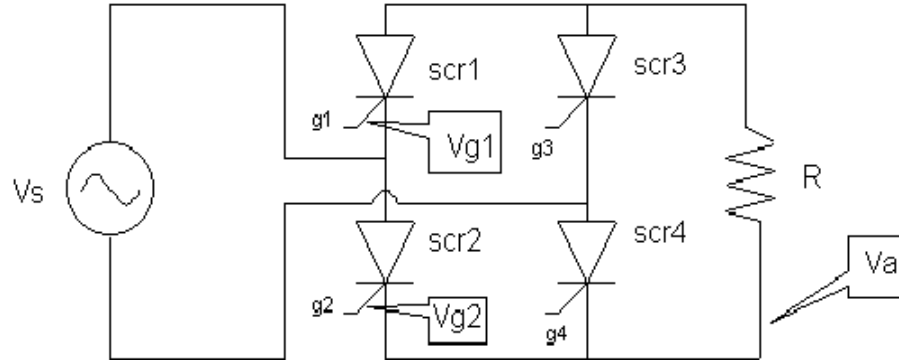
3.1 RECTIFICADORES

Un rectificador es un conversor de potencia que debe proporcionar una salida de tensión DC, a partir de una tensión de entrada AC. Al estudiar los rectificadores se analizan las diferentes configuraciones que se pueden obtener a partir de elementos semiconductores como SCR's y diodos. Se hace el estudio de rectificación monofásica y trifásica, trabajando con el modelo ideal de los semiconductores de potencia.

3.1.1 Rectificador monofásico controlado

En este tipo de configuración, cuando se tienen cargas altamente inductivas, se presentan tensiones negativas en ellas; esto debido a que el elemento semiconductor no conmuta al estado de no conducción hasta que la corriente que está pasando a través de él disminuya a 0; para evitar esto se puede implementar este esquema con un diodo de libre paso, en paralelo con la carga. Si la carga es netamente resistiva, no es necesario colocar diodo de libre paso en la carga, ya que la tensión y la corriente están en fase y por lo tanto en el momento en que la tensión cae a 0, la corriente también lo hará.

Figura 7. Rectificador monofásico controlado



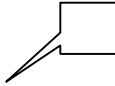
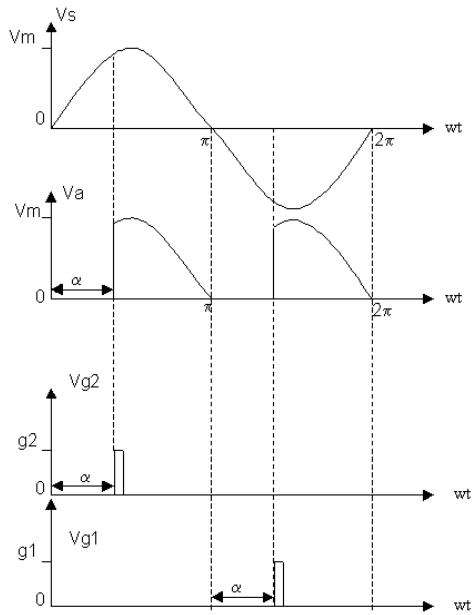
Convención: La flecha  señala el terminal positivo de la tensión mostrada.

Figura 8. Formas de onda para el rectificador monofásico controlado



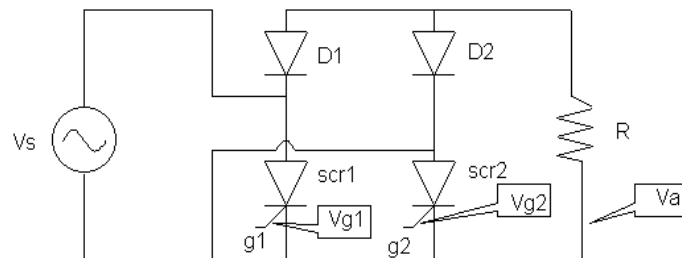
En este convertidor, la estrategia de control se elabora tomando como referencia el cruce por cero de la tensión senoidal de entrada V_s , para generar el ángulo de disparo α ; en semiciclo positivo de la tensión de entrada se envía pulso de disparo al los SCR's 2 y 3 (V_{g2} Fig. 7), en tanto que en el semiciclo negativo se envía pulso de disparo al los SCR's 1 y 4 (V_{g1} Fig. 7). Los pulsos de disparo del SCR 3 están en fase con el del SCR2, mientras que los del SCR 4 están en fase los del SCR1.

3.1.2 Rectificador monofásico semicontrolado

En este tipo de convertidor la forma de onda de la tensión de salida es igual que la del rectificador monofasico controlado. Se sigue la misma estrategia de control que en el caso controlado solo que en el semiciclo positivo de la onda de tensión se envía pulso de disparo al SCR 1 (V_{g1} Fig. 9) y cierra el lazo el diodo D2, en tanto que en el semiciclo negativo se envía pulso de disparo al SCR2 (V_{g2} Fig. 9) y cierra el lazo el diodo D1.

En este tipo de configuración no es necesario usar diodo de marcha libre en caso de tener cargas inductivas, ya que los diodos D1 y D2 del convertidor cumplen esta función en asocio con el respectivo SCR.

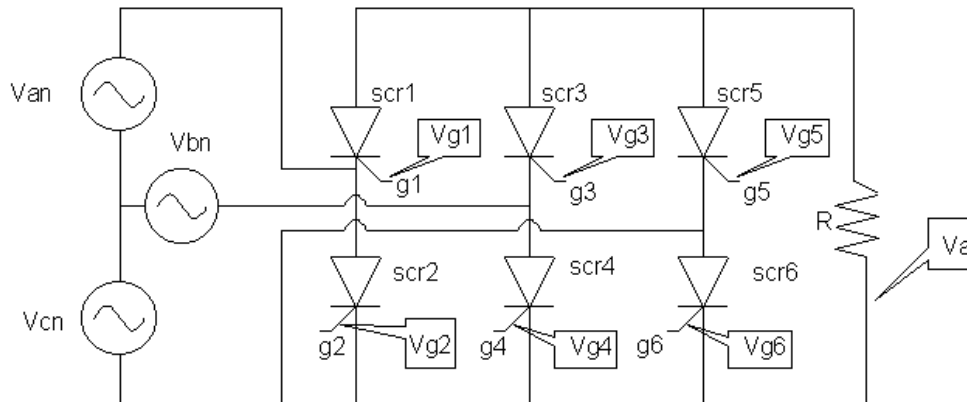
Figura 9. Rectificador monofásico semicontrolado



3.1.3 Rectificador trifásico controlado

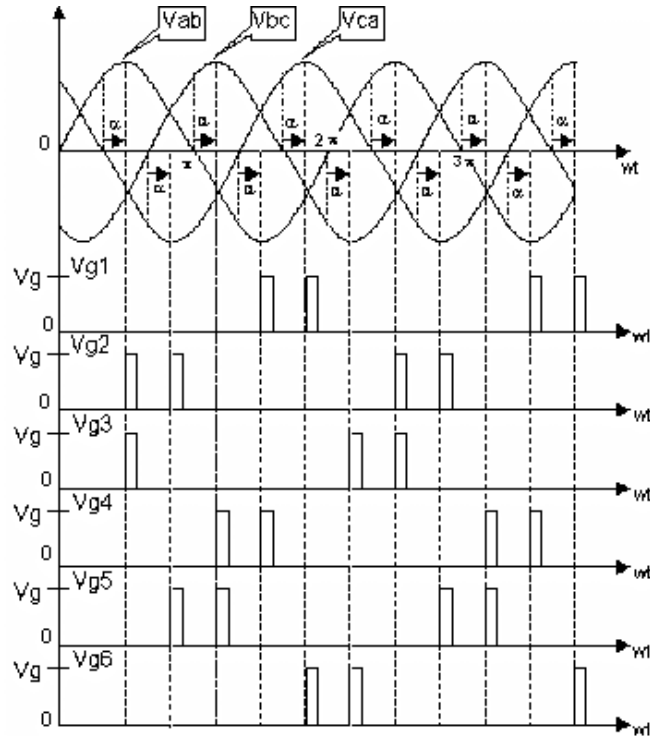
Para este rectificador, si los SCR's operan como diodos el instante de conducción natural se obtiene $\omega t = \pi/3$ después del cruce por cero del voltaje de línea, y este es precisamente el ángulo de referencia para el disparo de los tiristores; por lo tanto el rango de control para este convertidor será entre $0 < \alpha < 2\pi/3$, Cabe anotar que la estrategia de control para este convertidor, se realiza tomando como referencia el cruce por cero de las tensiones de línea, para generar los pulsos de disparo a un ángulo α determinado y medido a partir de $\omega t = \pi/3$.

Figura 10. Rectificador trifásico controlado.



Si se conectan cargas altamente inductivas a este convertidor, se debe colocar diodo de libre paso en paralelo con la carga, para evitar que en la carga se presenten tensiones negativas; si son cargas netamente resistivas no es necesario dicho diodo, ya que el SCR conmutará de forma natural cuando la tensión de línea caiga a cero.

Figura 11. Formas de onda de las tensiones de línea y los pulsos de disparo para un rectificador trifásico controlado.



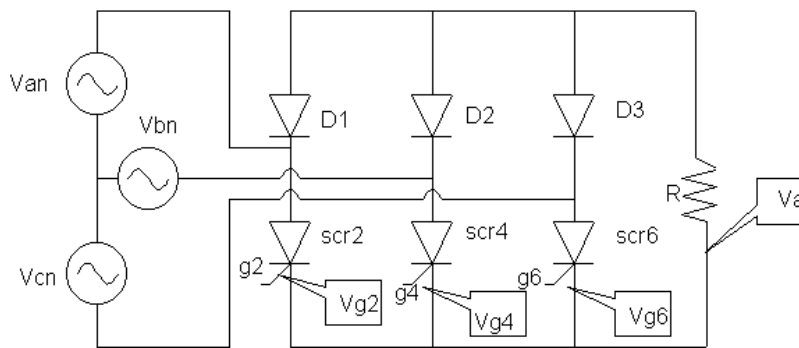
Los pulsos de disparo para secuencia positiva se muestran en la Figura 11, y corresponden a un ángulo $\alpha=30$ grados.

Como se puede ver en las figuras 10 y 11, en el semiciclo positivo de la tensión de línea V_{ab} , se envía pulso de disparo a los SCR's 2 y 3 (V_{g2} y V_{g3} Fig. 11), mientras que en el semiciclo negativo de esta misma onda de tensión se envía pulso de disparo a los SCR's 1 y 4 (V_{g1} y V_{g4} Fig. 11); para semiciclo positivo de la tensión de línea V_{bc} , se envía pulso de disparo a los SCR's 4 y 5 (V_{g4} y V_{g5} Fig. 11), y en el semiciclo negativo de esta tensión, se envía pulso de disparo a los SCR's 3 y 6 (V_{g3} y V_{g6} Fig. 11); por último en el semiciclo positivo de la tensión de línea V_{ca} se envía pulso de disparo a los SCR's 1 y 6 (V_{g1} y V_{g6} Fig. 11), y en su semiciclo negativo se envía pulso

de disparo a los SCR's 2 y 5 (V_{g2} y V_{g5} Fig. 11). Por tanto asumiendo secuencia positiva, la secuencia de disparo para este convertidor es: SCR's (2 y 3), (2 y 5), (4 y 5), (1 y 4), (1 y 6), (3 y 6).

3.1.4 Rectificador trifásico semicontrolado

Figura 12. Rectificador trifásico semicontrolado.



Para este convertidor la estrategia de control es similar a la del rectificador trifásico controlado, solo que se reemplazan los SCR's 1,3 y 5, por diodos, y por lo tanto los pulsos de control ya no irán por parejas sino que se envía pulso de disparo a solo un SCR en cada semiciclo; por ejemplo en el semiciclo positivo de la tensión de línea V_{ab} , se envía pulso de disparo al SCR2, y en el semiciclo negativo al SCR4.

Cabe anotar que la estrategia de control mostrada en las figuras 20 y 21 para el rectificador trifásico controlado se puede emplear para este convertidor, solo que los pulsos de control para los SCR's 1,3 y 5 no están conectados a ningún elemento semiconductor; se toman como referencia los cruces por

cero de la tensión de línea para generar los pulsos de disparo que se envían a los SCR's a un ángulo α determinado.

Para cargas altamente inductivas, los diodos del conversor en asocio con el SCR en conducción hacen de diodos de libre paso.

3.2 CONTROL AC DE LINEA

La función del Control A.C. de Línea, es regular la tensión en la carga, utilizando las características de funcionamiento de los semiconductores como SCR y Diodos. El control de tensión se hace variando el ángulo de disparo α de los diferentes semiconductores conectando la carga a la fuente durante un tiempo de cada semiciclo del voltaje de entrada. Algunas de las aplicaciones más comunes son: calefacción industrial, control de luces, arranque de motores de inducción etc.

Para la transferencia de potencia se pueden configurar dos tipos de control: Control de abrir y cerrar, y el control de ángulo de fase.

- ❖ El principio de abrir y cerrar consiste en conectar la fuente a la carga durante un número entero de ciclos suministrándole pulsos a los SCR's en los cruces por cero, luego se dejan de enviar los pulsos otro tiempo desactivándose los tiristores cuando su corriente cruza por cero. El control de abrir y cerrar se usa en aplicaciones que tienen alta inercia mecánica (motores) o una alta constante de tiempo térmica (calefacción industrial). Una de las consecuencias de las conmutaciones en voltaje y del cruce por cero de la corriente de los tiristores con diferentes tipos de carga, es la generación de armónicos los cuales deben ser filtrados o reducidos.

- ❖ En el principio de control de fase puede variarse el flujo de potencia hacia la carga, utilizando elementos controlados (SCR's y triac's) como interruptores que conectan la carga a la fuente durante un tiempo de cada semiciclo del voltaje de entrada. El SCR entra en conducción un ángulo preestablecido posterior al cruce por cero de la señal de tensión, y se desactiva naturalmente al disminuir su corriente a cero. Si hay presencia de un diodo en antiparalelo con el SCR, el rango de control se limita y el voltaje RMS efectivo de salida sólo puede variar entre 70 y 100%, además de adicionar una componente de DC. Un ejemplo de este circuito es un controlador monofásico de media onda, adecuado sólo para cargas resistivas de poca potencia, como son la iluminación y la calefacción. Dado que el flujo de potencia está controlado durante un solo semiciclo del voltaje de entrada, este tipo de controlador también se conoce como controlador unidireccional.

En el diseño del módulo se escogió al SCR por la simplicidad de su circuito de control en el cual no es necesario mantener el pulso en la puerta todo el ciclo de conducción y además la conmutación ocurre naturalmente cuando la corriente a través del elemento de potencia disminuye a cero; además el SCR soporta mayores dv/dt , permitiendo conectar cargas de tipo RL.

Según la fuente de tensión los controladores de voltaje de AC se pueden clasificar en dos tipos: Controladores monofásicos y Controladores trifásicos; pudiéndose subdividir en: unidireccional o control de media onda y bidireccional o control de onda completa; Por otro lado existen varias configuraciones de controladores trifásicos, dependiendo de las conexiones de los SCR's.

3.2.1 Control AC monofásico controlado

Figura 13. Control AC monofásico controlado

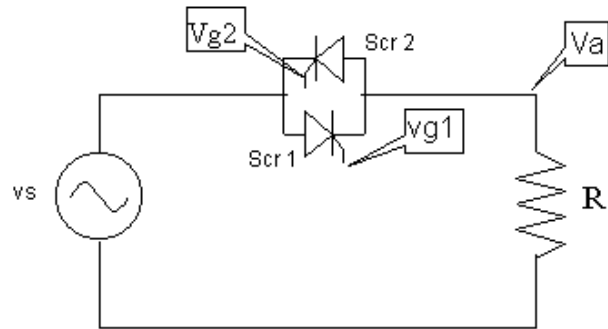
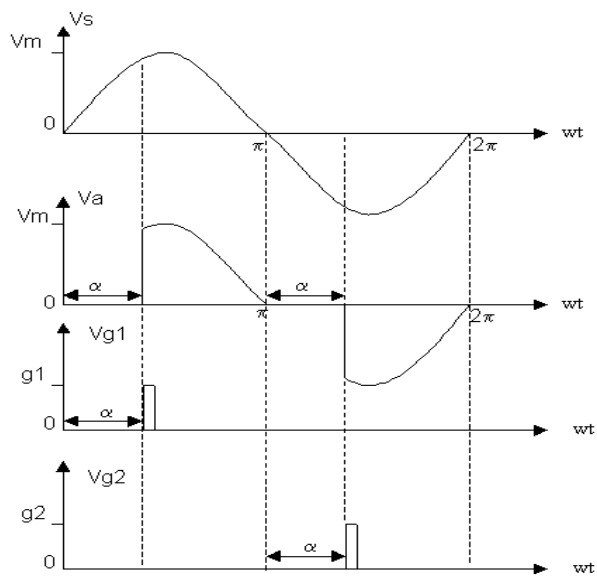


Figura 14. Formas de onda para el control AC monofasico controlado.



En este caso, el ángulo de control se mide respecto del cruce por cero de la onda de tensión de entrada V_s . En el semiciclo positivo de la onda de tensión V_s , se envía pulso de disparo al SCR1 (V_{g1} Fig. 14), en tanto que en el semiciclo negativo se envía pulso de disparo al SCR2 (V_{g2} Fig. 14). El rango de control para este convertidor esta entre $0 < \alpha < \pi$.

3.2.2 Control AC monofásico semicontrolado

En éste conversor sólo es controlado el semiciclo positivo mediante la variación del ángulo de disparo α del SCR1 (v_{g1} Fig. 14), el semiciclo negativo por su parte pasa libremente a la carga a través del diodo.

Al igual que para el rectificador monofásico controlado, se toma como referencia el cruce por cero de la tensión de entrada V_s , para generar los pulsos de disparo para el SCR. El conversor tiene un rango de control entre $0 < \alpha < \pi$, pero solo se puede realizar control en un semiciclo de la onda de tensión de entrada.

Figura 15. Control AC monofásico semicontrolado

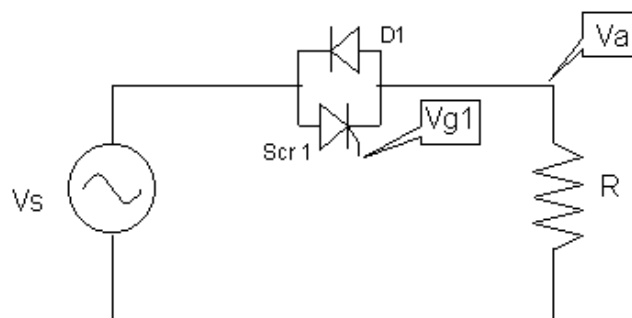
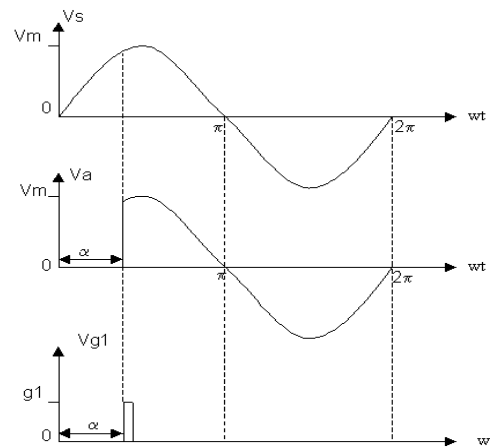


Figura 16. Formas de onda para un controlador monofásico semicontrolado.

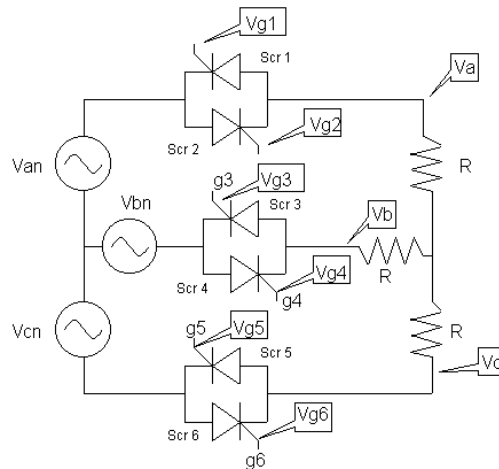


3.2.3 Control AC trifásico controlado carga resistiva (balanceada) en Y sin neutro.

En este convertidor, cuando conducen los SCR's la carga soporta en sus terminales tensiones de fase y no tensiones de línea como en el rectificador trifásico, por lo tanto se toma como referencia para el ángulo α el cruce por cero de la tensión de fase. En este proyecto se implementó la detección de cruce por cero de la tensión de línea, debido a esto es necesario tener en cuenta los 30 grados de desfase de la tensión de línea con respecto de la tensión de fase, para todos los controles AC trifásicos controlados y semicontrolados que se implementan en él.

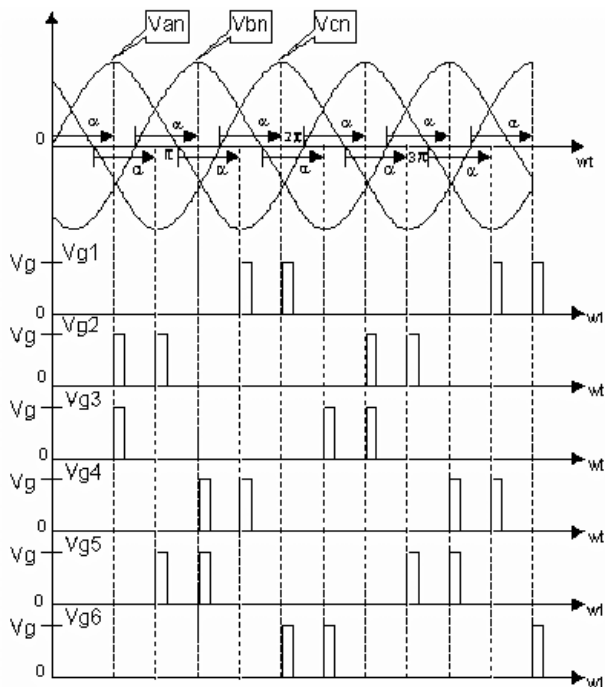
También es necesario tener secuencia positiva para poder realizar la estrategia de control para este convertidor. El rango de control para este convertidor es $0 < \alpha < 5\pi/6$, medido a partir del cruce por cero de la tensión de fase.

Figura 17. Control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro.



Como se puede ver en la Figura 18, la estrategia de control se realiza tomando como referencia el cruce por cero de las tensiones de fase para enviar los pulsos de disparo a los tiristores, para un ángulo $\alpha = 90$ grados.

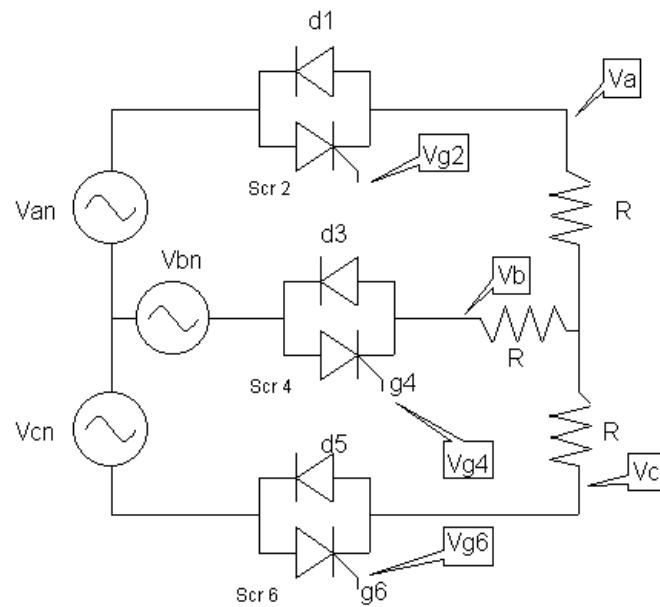
Figura 18. Formas de onda para el control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro.



En el semiciclo positivo de la tensión de fase V_{an} , se envía pulso de disparo a los SCR's 2 y 3 (V_{g2} y V_{g3} Fig. 18), y en su semiciclo negativo a los SCR's 1 y 4 (V_{g1} y V_{g4} Fig. 18); para semiciclo positivo de la tensión de fase V_{bn} , se envía pulso de disparo a los SCR's 4 y 5 (V_{g4} y V_{g5} Fig. 18), y en el semiciclo negativo de esta onda se envía pulso de control a los SCR's 3 y 6 (V_{g3} y v_{g6} Fig. 18); en el semiciclo positivo de la tensión de fase V_{cn} , se envía pulso de disparo a los SCR's 1 y 6 (V_{g1} y V_{g6} Fig. 18), y en el semiciclo negativo de la tensión V_{cn} , se envía pulso de disparo a los SCR's 2 y 5 (V_{g2} y V_{g5} Fig. 18). Asumiendo secuencia positiva, el orden de los disparos es: SCR's (2 y 3), (2 y 5), (4 y 5), (1 y 4), (1 y 6), (3 y 6).

3.2.4 Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva(balanceda) en Y sin neutro.

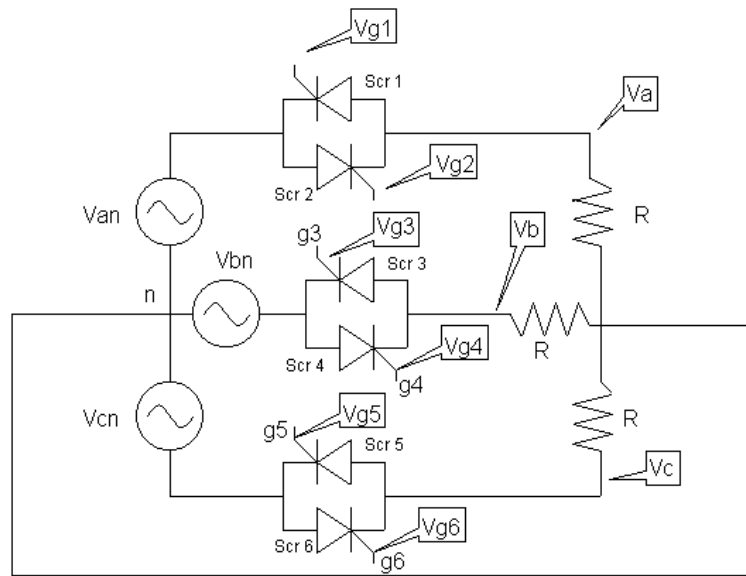
Figura 19. Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva en Y sin neutro.



En éste caso los SCR's 2, 4 y 6 controlan el flujo de corriente hacia la carga, los diodos por su parte proporcionan la trayectoria de retorno para la corriente. Al igual que en el caso anterior, la estrategia de control toma como referencia el cruce por cero de las tensiones de fase en secuencia positiva para generar los pulsos de control de los SCR's. Se utiliza la misma estrategia de control mostrada en la figura 18, la diferencia es que solo están conectados los pulsos de disparo de los SCR's 2, 4, y 6.

3.2.5 Control AC trifásico controlado carga resistiva en Y con neutro.

Figura 20. Control AC trifásico controlado carga resistiva en Y con neutro.

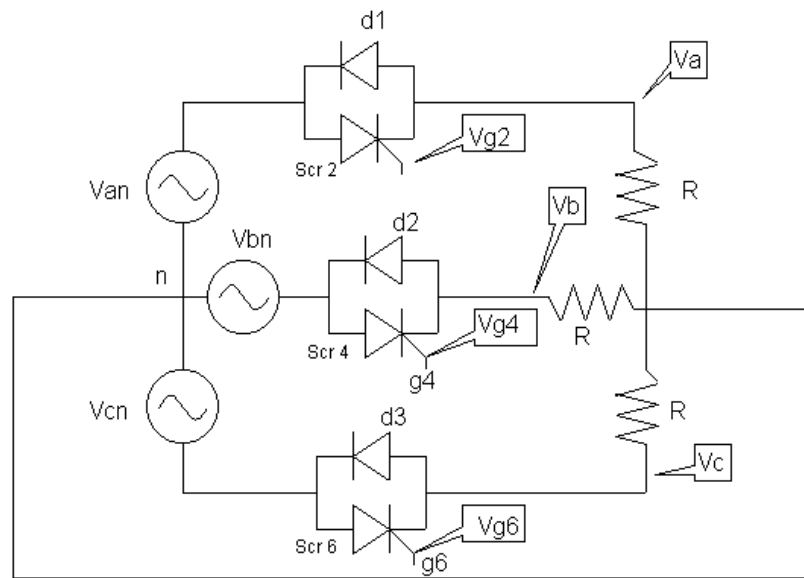


En este tipo de conversor se utiliza la misma estrategia de control que en el control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro (Fig. 18); se toman como referencia los cruces por cero de las tensiones de fase en secuencia positiva para generar los pulsos de disparo para los SCR's, el rango de control para este conversor esta entre $0 < \alpha < \pi$.

3.2.6 Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva en Y con neutro

En esta configuración el circuito para cada fase se comporta como un control monofásico.

Figura 21. Control AC trifásico semicontrolado carga en Y con neutro.



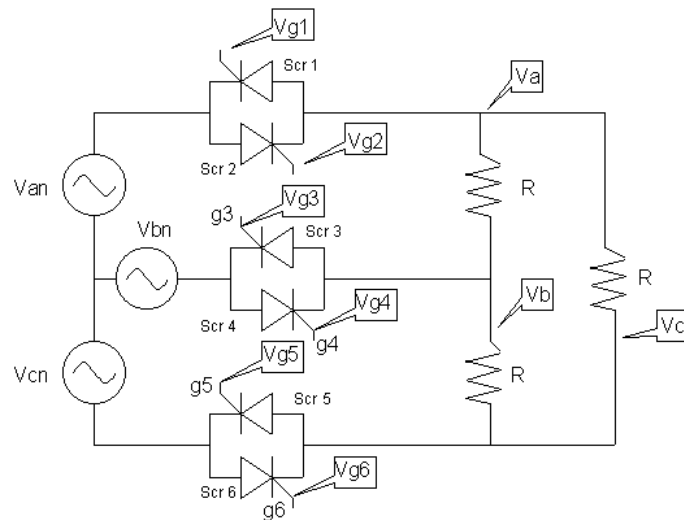
Para generar los pulsos de control al igual que el caso anterior se toman como referencia los cruces por cero de la tensión de fase y en cada semiciclo positivo se envía pulso de control a solo un SCR; se utiliza la estrategia de control mostrada en la Figura 18, solo que los SCR's 1, 3 y 5 se reemplazan por diodos.

3.2.7 Control AC trifásico controlado carga resistiva(balanceda) en triangulo SCR's en la línea

En esta configuración se puede realizar el equivalente en Y. Por lo tanto para generar los pulsos de disparo se toman como referencia los cruces por cero de las tensiones de fase.

Se usa la misma estrategia que en el control AC trifásico controlado carga resistiva en Y sin neutro (Fig. 18); asumiendo secuencia positiva el orden de los pulsos de disparo es: SCR's (2 y 3), (2 y 5), (4 y 5), (1 y 4), (1 y 6), (3 y 6), como se aprecia en la Figura 18.

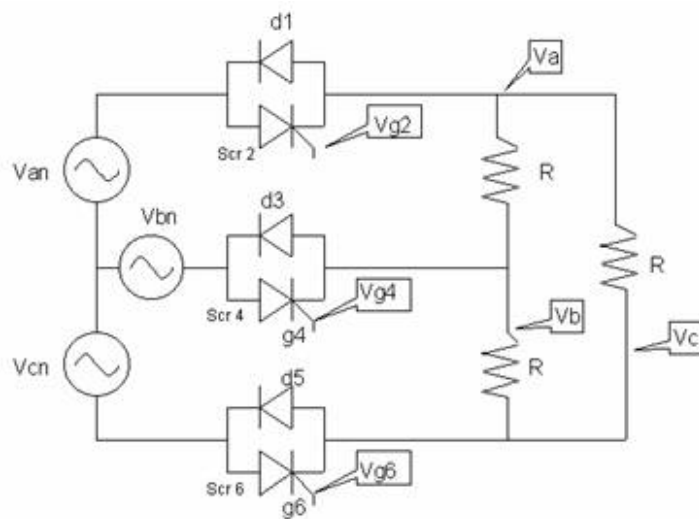
Figura 22. Control AC trifásico controlado carga resistiva en triangulo SCR's en la línea.



El rango de control para este convertidor es: $0 < \alpha < 5\pi/6$, α medido a partir del cruce por cero de la tensión de fase.

3.2.8 Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva(balanceda) en triangulo SCR's en la línea.

Figura 23. Control AC trifásico semicontrolado carga resistiva en triangulo SCR's en la línea.



Se usa la misma estrategia de control que en el caso anterior, solo que los tiristores 1, 3 y 5, se reemplazan por diodos. El control se realiza enviando pulsos de disparo a los SCR's 2, 4 y 6, de acuerdo al orden mostrado en la figura 18; los diodos proporcionan el camino de retorno para la corriente. En este conversor se toman como referencia los cruces por cero de las tensiones de fase, para generar los pulsos de disparo para los tiristores solo en el semiciclo positivo.

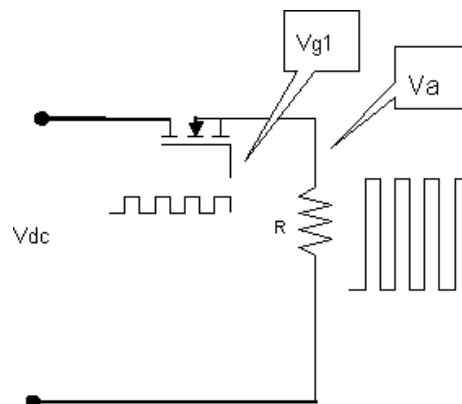
3.3 Troceador

En la industria hay aplicaciones en las que se hace necesario convertir una fuente de D.C. de voltaje fijo a una fuente de D.C. de voltaje variable. Lo que se conoce como pulsador DC, chopper, troceador o como convertidor de D.C. a D.C. Los pulsadores DC se utilizan en el control de motores DC para la tracción de automóviles eléctricos, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas y elevadores de minas. Proporcionan control en aceleraciones continuas, una alta eficiencia y una respuesta dinámica rápida; también se utilizan en el frenado regenerativo de motores de DC para devolver la energía a la fuente de alimentación, características que dan como resultado

un ahorro en aquellos sistemas de transporte que tienen paradas frecuentes. Se tiene dos tipos de operación en el Troceador:

- ❖ *Operación a frecuencia constante:* La frecuencia de pulsación f (o el periodo de pulsación T), se mantiene constante variando solo el tiempo activo t_1 (Fig. 25). Así, el ancho del pulso variará sin variar la frecuencia. Este tipo de control se conoce como control por modulación de ancho de pulso (PWM).
- ❖ *Operación a frecuencia variable:* En este caso se varía la frecuencia de pulsación f manteniendo constante t_1 o t_2 (Fig. 25). Lo que se conoce como modulación por frecuencia. La frecuencia debe variarse en un amplio rango para obtener todos los posibles valores de voltajes de salida. Este tipo de control genera armónicos a frecuencias no predecibles, lo que aumenta la complejidad en el diseño de los filtros que los reducen o eliminan. En este proyecto se implementa el troceador reductor.

Figura 24. Circuito Troceador con carga resistiva



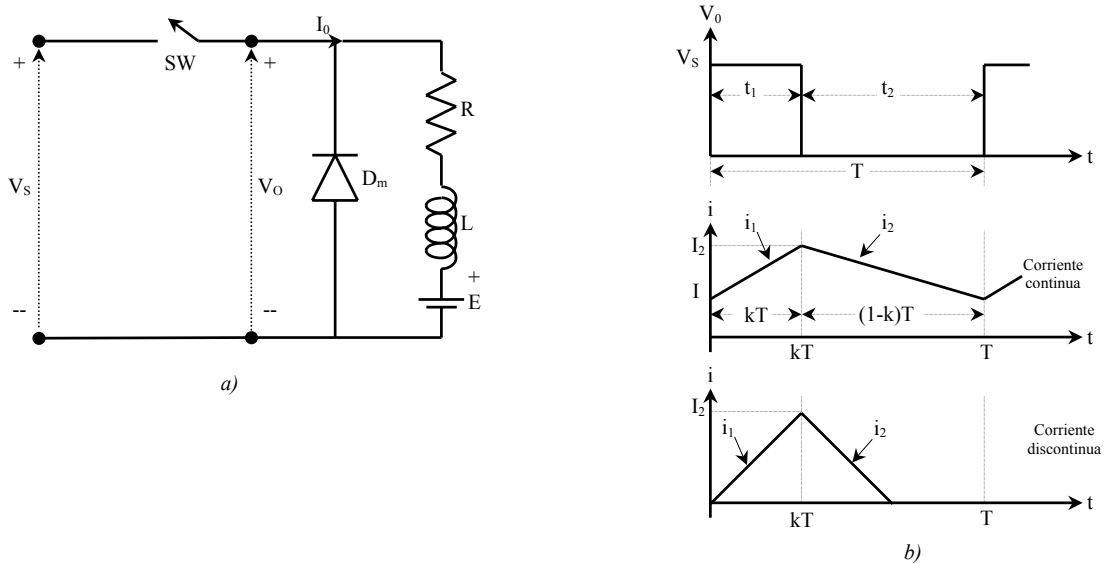
En el caso de un Troceador reductor con carga RL. Mientras el MOSFET o elemento semiconductor de potencia permanece en conducción se almacena energía en la bobina, cuando este se abre es necesario crear un camino para descargar esta energía, esto se logra colocando un diodo de marcha libre

como se muestra en la figura 25. Las formas de onda para la tensión y la corriente en la carga en los casos continuo y discontinuo se muestran en la figura 25.

Figura 25. Troceador con carga RL.

a) Circuito.

b) Formas de onda de tensión y corriente de salida.



Cuando se conecta una carga altamente inductiva, la corriente se hace aproximadamente continua con un pequeño rizado; por el contrario si la inductancia es pequeña la corriente es discontinua como se puede observar en la Figura 25.

En este trabajo se implementa el troceador reductor usando transistores de efecto de campo, los cuales conmutan a una gran velocidad, tan pronto como se coloca o retira la señal en la base, lo que los hace ideales en las aplicaciones con corriente continua ya que esta no va a cero por si sola y por lo tanto no podría hacer conmutar un SCR sin la utilización de un circuito de

conmutación forzada. El troceador reductor implementado opera a una frecuencia constante de 20 KHz, variando el ciclo de trabajo o tiempo t_1 de encendido entre un 5% y un 95 % del periodo T.

3.4 INVERSORES

En los inversores se produce el efecto contrario que en los rectificadores, aquí la necesidad es obtener corriente alterna partiendo de corriente continua, para esto se utilizan elementos que actúan como interruptores convirtiendo la energía DC en AC con tensión y frecuencia de salida variable, lo que permite regular la tensión entregada a la carga y mantener constante la densidad de flujo en el caso de un motor A.C, para evitar variaciones de par cuando se está regulando la velocidad. Se debe considerar que la señal de salida de un inversor no es completamente senoidal sino que presenta una fundamental más algunas armónicas cuyas magnitudes dependen principalmente del método de modulación empleado, y sus efectos negativos deben tratar de eliminarse.

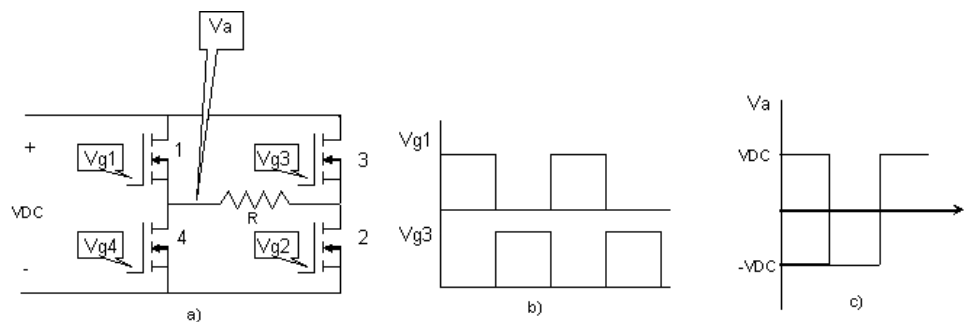
Los inversores se pueden encontrar implementados con diferentes tipos de elementos de potencia. En este proyecto se realiza el control para el Puente Inversor Monofásico y el Puente Inversor Trifásico(onda cuadrada), y se realiza el diseño y montaje de estos empleando MOSFETS. Es importante resaltar que el desarrollo tecnológico y los esfuerzos de los investigadores en el ámbito de los semiconductores, ha acelerado la aparición de transistores de potencia aptos para el manejo de corrientes cada vez mayores, lo que unido a su excelente desempeño en aplicaciones de alta frecuencia hace que el uso de los SCR's sea cada vez menos frecuente en variadores de velocidad de baja potencia.

El uso de inversores es muy común en aplicaciones industriales tales como la propulsión de motores de inducción a velocidad variable, la calefacción por inducción, las fuentes de respaldo y las fuentes de poder.

3.4.1. Inversor Monofásico

Es el montaje más sencillo de inversor, en éste como en los demás inversores la frecuencia de salida está determinada por la velocidad de conmutación a que se coloquen a operar los elementos de potencia. En el inversor monofásico con carga resistiva la señal de corriente tiene la misma forma que la señal de tensión.

Figura 26. Inversor monofásico con carga resistiva, a) circuito, b) pulsos de control para los mosfets, c) tensión de carga.



En este trabajo se implementó el inversor monofásico onda cuadrada, variando la frecuencia de operación entre 10 Hz y 80 Hz, y variando el ciclo de trabajo entre un 5% y un 95 % del periodo de tensión de salida. La señal de puerta de los mosfets 1 y 2 están en fase, lo mismo que las señales de puerta de los mosfets 3 y 4.

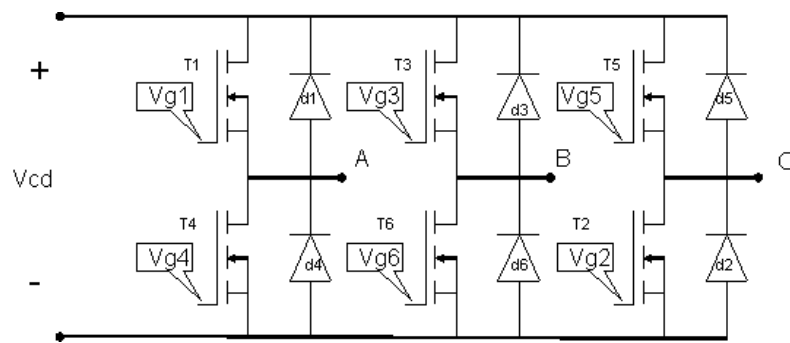
Se debe tener en cuenta que la conmutación de los mosfets no puede ser simultánea, por ejemplo en el momento de apagar los mosfets 1 y el 2, se debe dejar transcurrir un pequeño tiempo antes de encender los mosfets 3 y

4; esto debido a que los tiempos de conmutación(T_{on} y T_{off}) son diferentes y por lo tanto se presentaría un corto circuito.

3.4.2. Inversor Trifásico

El inversor trifásico se puede construir añadiendo una columna más al monofásico del circuito anterior.

Figura 27. Puente inversor trifásico



Según la estrategia de control el puente inversor trifásico se puede poner en funcionamiento con tres transistores conduciendo en todo momento(conducción a 180°) o simplemente con dos(conducción a 120°), en la Figura 28 muestra la estrategia de control para un inversor trifásico con 3 transistores conduciendo en cualquier instante. Por ejemplo en el intervalo uno, los transistores T1 y T5 conducen en la mitad superior, y T6 en la inferior. En el intervalo dos los transistores T2 y T6 conducen en la mitad inferior y T1 en la superior. Nótese que necesariamente debe cambiar a estado de no conducción uno de los transistores del par que esta encendido en la mitad superior o inferior, y a conducción uno de la mitad opuesta para lograr la rotación de fases; además si cada uno de los intervalos de conducción tiene una duración de $\pi/3$, se tiene un sistema trifásico balanceado. En este proyecto se implementó el inversor trifásico conducción

a 180° , lo que implica que están en conducción 3 mosfets a todo momento. Se implementó este inversor con una frecuencia variable entre 10 Hz y 80 Hz onda cuadrada.

La figura 28, muestra la forma de onda de las tensiones de línea en los puntos V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} ; las tensiones de fase mostradas en la figura 28 se obtienen tomando como referencia el punto común de la carga (ver Fig. 29).

Figura 28. Señales de puerta, tensiones de línea y tensiones de fase para un PIT con tres transistores encendidos en todo momento (conducción a 180°).

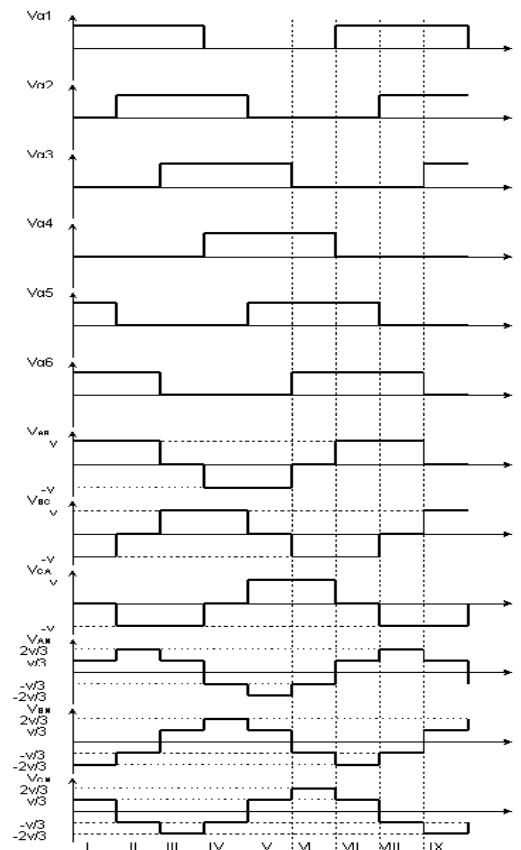


Figura 29. Conexión PIT con carga en estrella, para conducción a 180° .

- a) Forma general del circuito equivalente.
- b) Circuito equivalente para el intervalo I.

c) Circuito equivalente para el intervalo II.

d) Circuito equivalente para el intervalo III.

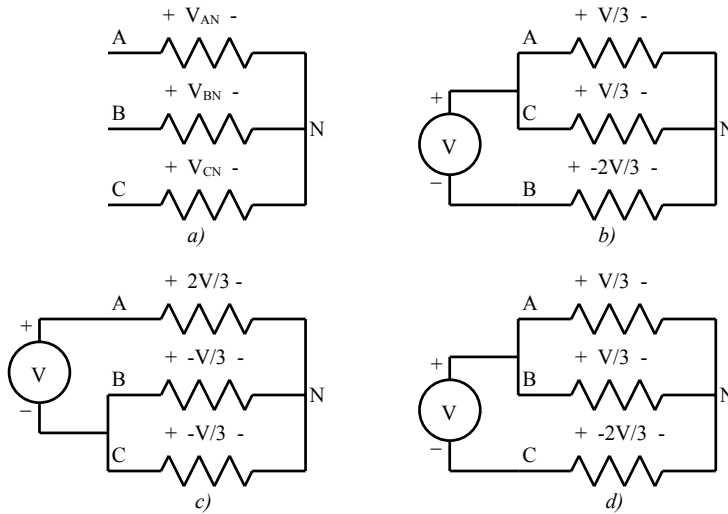


Tabla 2. Secuencia de encendido de los mosfets.

INTERVALOS	I	II	III	IV	V	VI
TRANSISTORES	O	1	1	4	4	4
DIODOS	EN	6	6	3	3	6
CONDUCCIÓN		5	2	2	2	5

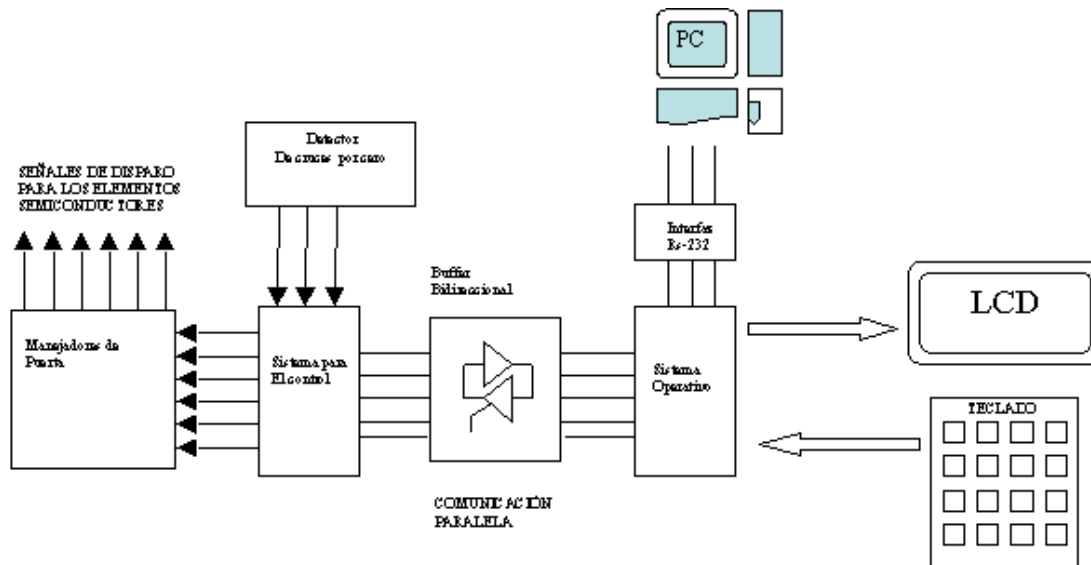
La figura 29 muestra la forma en que queda conectada la carga a la fuente para los 3 primeros intervalos de conducción del PIT y la tabla 2, muestra la secuencia de encendido y apagado de los mosfets del PIT.

Aquí como en el caso anterior se debe tener cuidado con los tiempos de conmutación de los mosfets, para evitar cortocircuitos en la fuente de alimentación.

4. CIRCUITOS PARA EL CONTROL

El módulo conversor estático de potencia consta de varias etapas, que conectadas entre si, permiten su funcionamiento. A continuación se muestra un diagrama de bloques del módulo conversor estático de potencia.

Figura 30. Diagrama de bloques del módulo conversor estático de potencia



4.1 SISTEMA OPERATIVO

Está diseñado a partir de un microcontrolador MC68HC908GP32 de la familia Motorola; Este microcontrolador está encargado de manejar una pantalla LCD (*Display* de Cristal Liquido) y un teclado matricial de 4*4, con los cuales el usuario puede operar el módulo; también esta encargado de la recepción de datos provenientes de un computador y la transmisión de estos al sistema para el control.

4.1.1 Características y descripción de pines del microcontrolador MC68HC908GP32.

Las características más destacables de este microcontrolador, son las siguientes:

- 32 KBytes de memoria Flash de programa.
- 512 Bytes de memoria RAM.
- Frecuencia de Bus interno de máximo 8 Mhz.
- Selección de oscilador a XTAL clásico, u oscilador PLL sintetizable.
- Programación de la Flash “en circuito”, por medio de un solo pin.
- Bit de seguridad para garantizar la No lectura de la memoria Flash.
- Conversor A/D de 8 bits, 8 canales multiplexados.
- Interface serial sincrónica SPI (Serial peripheral Interface).
- Interface serial asincrónica SCI (Serial Comunicación interface).
- 2 Timer’s de 16 bits y 2 canales c/u con selección de modos Input Capture, Output Compare, y funciones PWM(Pulse Width Modulation).
- 33 pines I/O de propósitos generales (10 mA sink/source, 15 mA en 5 I/O’s).
- Resistores de Pull-Ups seleccionables en los puertos A,C y D.
- 18 interrupciones (por software y hardware) vectorizadas por registro de banderas y banderas propios de c/u de las interrupciones activas.
- 8 bits Keyboard Wakeup Port (activa rutinas de interrupción por teclado)
- watchdog RESET .
- LVI (Low Voltage Interrupt) con reset opcional y puntos de disparo seleccionables según tensión de operación (3.0 V y 5.0 V).
- Reset por código y dirección ilegal.
- Modos de bajo consumo STOP y WAIT.

Figura 31. Diagrama de pines del microcontrolador GP32.

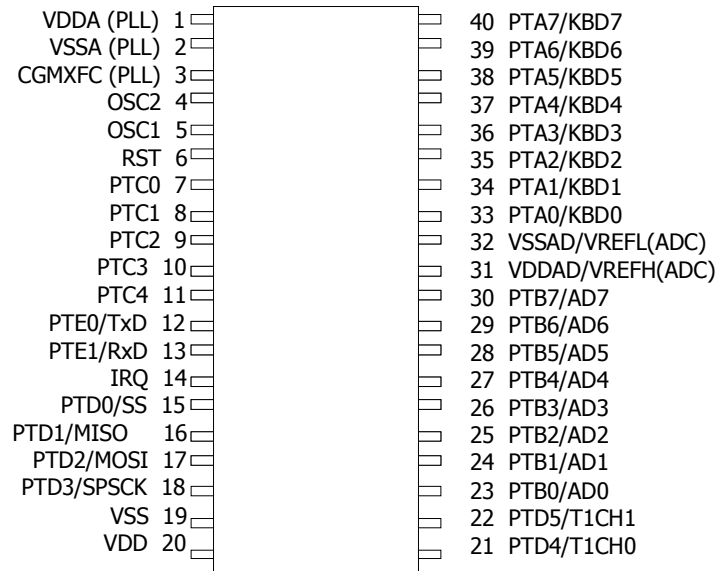
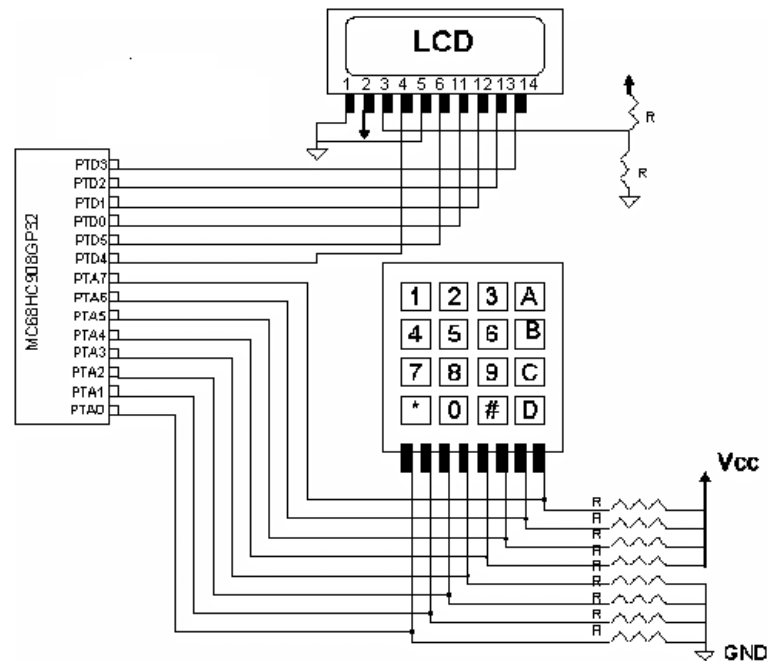


Tabla 3. Funciones de los pines

Nombre	Función
VDD y VSS	Pines de alimentación del microcontrolador
OSC1 Y OSC2	Permiten la conexión de un circuito oscilador externo, ya sea un cristal o una red RC.
RST	Este pin permite resetear externamente el microcontrolador.
IRQ	Permite generar una interrupción externa asíncrona para el microcontrolador.
PTA7-PTA0/KBD7-KBD0	PTA7-PTA0 son pines de entrada/salida de propósito general, estos pines también pueden ser usados como entrada para el módulo de interrupción por teclado.
PTB7-PTB0/AD7-AD0	Pines de entrada/salida de propósito general, también pueden ser usados como entradas para el conversor análogo/digital
PTC6-PTC0	Pines de entrada/salida de propósito general
PTD7/T2CH1-PTD0/SS	Pines de entrada/salida de propósito general, PTD0-PTD3 pueden ser usados para realizar comunicación serial SPI(Serial Peripheral Interface), y PTD4-PTD7 pueden ser usados como entrada/salida para el módulo temporizador.
PTE1-PTE0/RxD-TxD	Pines de entrada salida de propósito general, también pueden ser usados para implementar comunicación serial SCI(Serial Comunicación Interface)

4.1.2 Implementación del teclado y del display LCD.

Figura 32. Esquema del Teclado y el display.



Los 4 pines de la derecha del teclado están conectados a través de resistencias de 10K a Vcc y los 4 pines de la izquierda del teclado están conectados a tierra través de resistencias de 1 K, a su vez estos pines están conectados al puerto A del microcontrolador. De esta forma la parte alta del puerto A esta conectada constantemente a Vcc siempre y cuando no se presione ninguna tecla. Se habilitan inicialmente los 4 bits de la parte alta del KBI para que trabajen en la forma de interrupción por teclado (parte alta del puerto A). Cuando se presiona una tecla, se cortocircuita una fila y una columna del teclado, conectando un pin de la parte alta del puerto A, a un nivel de tensión bajo (cero lógico), generando de esta forma una interrupción por teclado. La subrutina de interrupción por teclado permite al usuario acceder al sistema en el momento que lo desee; una vez se presiona

cualquier tecla, en el LCD aparece un menú que permite seleccionar e introducir los datos del conversor de potencia que se desee implementar.

Además del teclado también usamos un módulo LCD para la interfaz con el usuario, el cual es de muy fácil manejo y presenta un bajo consumo de potencia. El pin 1 de la pantalla LCD se conecta a tierra y el pin 2 va conectado a Vcc, se debe tener cuidado de no exceder el voltaje máximo permitido a la entrada del pin 2 que es de aproximadamente $V_{cc}(5V)+0.3V_{cc}$, ya que si se excede dicho voltaje es muy probable que la pantalla LCD se dañe. Una forma de protegerlo es colocando un diodo zener de aproximadamente 5 V en el pin 2 del módulo LCD y a tierra a través de una resistencia. El pin 3 sirve para ajustar el voltaje de contraste de la pantalla LCD, se coloca un potenciómetro (10k), de tal forma que una terminal va conectada a tierra, la otra va conectada a Vcc y la terminal del centro o variable va conectada al pin 3, permitiendo de esta forma variar el voltaje de entrada en este pin y a la vez variar el contraste en la pantalla.

El pin 4(RS) le indica a la pantalla LCD si el registro colocado en los pines de datos del módulo es un dato de control o un carácter del mensaje; cuando en este pin se coloca un uno (5 V) lógico el modulo escribe o lee datos o caracteres, y cuando este pin esta a cero (0 V) lógico significa que estamos enviando instrucciones al módulo LCD. El pin 5(R/W) le indica a la pantalla si se van a escribir o a leer datos, cuando este pin esta a uno lógico significa que se van a leer datos del módulo y cuando esta a cero lógico significa que se van a escribir datos en la pantalla. Para el proyecto, como solo se envían mensajes al módulo LCD se conecta permanentemente este pin a tierra.

El pin 6 (E) sirve para habilitar y deshabilitar la pantalla LCD. Colocando un uno lógico en este pin se habilita la pantalla y colocando un cero lógico se deshabilita. Del pin 7 al pin 14 se encuentran los pines de entrada/salida de

datos para el módulo LCD, siendo el pin 7(D0) el menos significativo y el pin 14(D7) el más significativo. Los pines 15 y 16 están conectados a un led el cual proporciona luz de fondo para el módulo LCD, el pin 15 es el cátodo del led y el pin 16 es el ánodo. La pantalla LCD recibe un conjunto especial de instrucciones que se muestran en la tabla 4. para este proyecto se trabaja en modo a 4 bits por lo tanto solo se conecta la parte alta del bus de datos de la pantalla al microcontrolador; en el microcontrolador se utiliza la parte baja del puerto D para enviar estos datos.

Tabla 4. Códigos módulo LCD

INSTRUCCIONES	CODIGO										DESCRIPCION
	RS	R/ W	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Borrado de pantalla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Limpia el <u>display</u> y <u>direcciona</u> 00 a DD RAM
Cursor a casa	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	<u>Dirige</u> 00 a DD RAM Sin cambiar los datos en RAM.
Selección de modo	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	Configura Corrimiento cursor y <u>desplazamiento</u> del <u>display</u>
<u>Control On/Off de pantalla.</u>	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Configura parpadeo del <u>display</u> , <u>cursor</u> y carácter.
Corrimiento de Cursor o pantalla.	0	0	0	0	0	1	C	S/ R/L	*	*	Mueve el Cursor y el <u>Display</u> sin <u>cambiar</u> los datos en la RAM.
Selección de Función	0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*	Configura Bus de Datos (DL) Líneas (N) y <u>puntos matiz</u> (F).
Selección dirección CG RAM.	0	0	0	1	Dirección para generar en RAM						<u>Dirige</u> para la generación de caracteres en CG RAM.
Selección dirección DD RAM.	0	0	1	Dirección de RAM						<u>Dirige</u> para escribir un <u>carácter</u> en DD RAM.	
Leer bandera de ocupado.	0	1	BF	AC							Lectura Bandera <u>Busy FLAG</u> para saber el funcionamiento.
Escribir dato a CG o DD RAM	1	0	Escritura del dato.								Escribe el dato o carácter en DD RAM o en CG RAM
Lee dato desde CG o DD RAM	1	1	Lectura del dato.								Lee dato o carácter desde DD RAM o en CG RAM

En la siguiente tabla se muestra el significado de cada una de las abreviaturas utilizadas en la tabla 4.

Tabla 5. Descripción de las abreviaturas

I/D	= 1 Incrementa
	= 0 Decrementa.
S	= 1 Desplaza el mensaje en la Pantalla
	= 0 Mensaje Fijo en la Pantalla.
D	= 1 Encender (activar) la pantalla.
	= 0 Apagar la pantalla.
C	= 1 Activar el cursor
	= 0 Desactivar cursor.
B	= 1 Parpadea carácter señalado por el cursor
	= 0 No parpadea el carácter.
S/C	= 1 Desplaza pantalla.
	= 0 Mueve el cursor.
R/L	= 1 Desplazamiento a la derecha.
	= 0 Desplazamiento a la izquierda.
DL	= 1 Datos de 8 bits.
	= 0 Datos de 4 bits.
BF	= 1 Durante operación interna del módulo
	= 0 Finalizada la operación interna.
N	= 1 Dos Líneas de pantalla.
	= 0 Una línea de pantalla.
F	= 1 Matriz de 5 x 10 puntos.
	= 0 Matriz de 5 x 7 puntos.
*	no importa.

En este trabajo se implementó el *display* a 4 bits de datos, se conecta la parte alta del bus de datos de la LCD (pines 11, 12, 13, 14), al microcontrolador para recibir los datos; además se conectan al microcontrolador el pin 5 para habilitar/deshabilitar la pantalla LCD y el pin 6 para indicarle si los datos enviados son de control o son caracteres para visualizar en ella.

4.2 CIRCUITO DETECTOR DE CRUCES POR CERO.

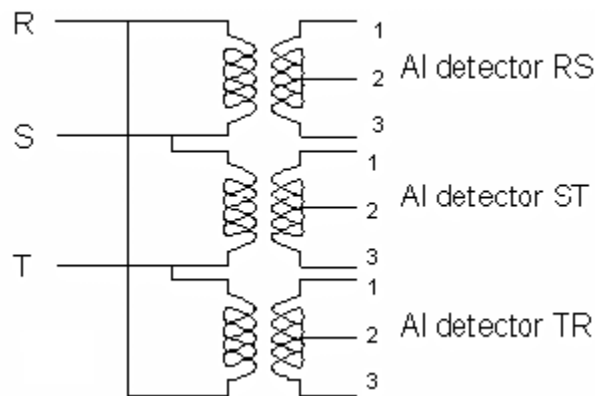
El circuito detector de cruce por cero como su nombre lo indica, detecta cada vez que una onda de tensión alterna cruza por cero, generando un pulso cuadrado cuyo periodo depende de la frecuencia de la red. Una forma de construir este circuito es mediante la utilización de un comparador donde el ancho del pulso estará limitado por la caída en los diodos durante la rectificación previa y el nivel de referencia, limitando la precisión para el instante en el cual ocurre el cruce por cero.

Se implementaron detectores de cruce por cero para tener referencia de las ondas de tensión sobre las cuales vamos a ejercer control. Para poder realizar este control es necesario identificar el semiciclo de la onda de tensión es decir se necesita saber si está en el semiciclo positivo o negativo para generar los pulsos de control para los SCR's que deben conducir en cada semiciclo.

Para realizar la identificación del semiciclo de la onda se implementó un detector de ventana de polaridad el cual es un circuito comparador que coloca en su salida una onda cuadrada que corresponde a "1" si está en el semiciclo positivo y "0" si está en el semiciclo negativo.

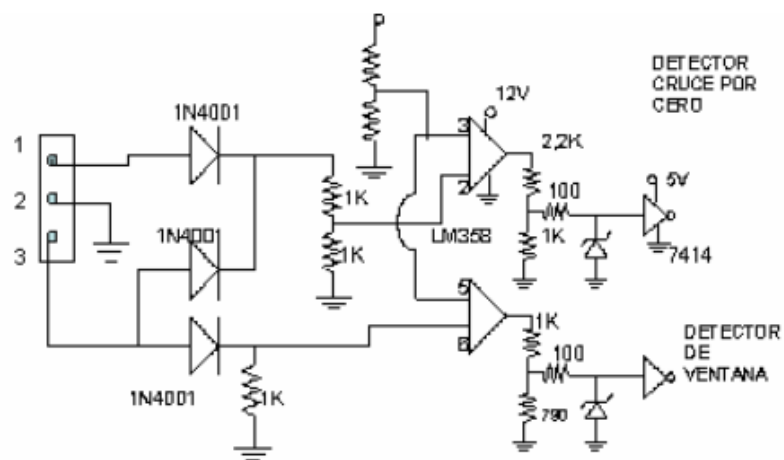
En este trabajo se implementaron detectores de cruce por cero y de ventana de polaridad trifásico y monofásico con transformadores de tap central.

Figura 33. Arreglo de transformadores para la detección de cruces por cero de las tensiones trifásicas.



Los transformadores de tap central utilizados en este trabajo reducen la tensión de línea de 240 V a 15 V para el caso trifásico y de 120 V a 15 V para el caso monofásico; se utilizan de tap central para que todas las tensiones de salida tengan una misma referencia.

Figura 34. Detector de cruces por cero y de ventana de polaridad



Como se puede ver en la figura 34, la señal proveniente del transformador con tap central se rectifica con diodos de germanio (voltaje de juntura 0.3V) y se coloca en la entrada de uno de los comparadores (LM358); cada vez que la señal de tensión rectificada esta por debajo del nivel de referencia, el comparador colocara un nivel alto en su pin de salida y lo mantiene hasta que la tensión de entrada vuelva a ser superior al nivel de referencia. La salida de este comparador esta conectada a un buffer inversor 74LS14(Smitch Triguer) el cual mejora los pulsos del detector de cruces por cero.

Al otro comparador le llega la señal proveniente del rectificador de media onda; cuando la tensión esta por encima del nivel de referencia, el comparador coloca su salida en alto, y cuando esta por debajo cambia su salida a bajo, lo que nos da una onda cuadrada en su salida que indica cuando la tensión de entrada corresponde al semiciclo positivo o al semiciclo negativo.

En total se implementan 4 detectores de cruce por cero y 4 de ventanas de polaridad, 3 para cuando se desea implementar rectificación o control AC trifásico, y uno para cuando se desea implementar rectificación o control AC monofásicos.

4.3 CIRCUITO COMUNICACIÓN PARALELA Y SERIAL.

En el módulo conversor estático de potencia se realizan dos formas de comunicaron bidireccional; la comunicación serial es utilizada para enviar datos desde un PC al módulo(sistema operativo), y la comunicación paralela es usada para enviar datos del sistema operativo al sistema de control(comunicación entre microcontroladores).

4.3.1 Circuito de comunicación serial.

La comunicación realizada con el puerto serie es una comunicación asíncrona, para la sincronización de una comunicación se precisa siempre de una línea adicional a través de la cual el emisor y el receptor intercambian la señal del pulso. Pero en la transmisión serie a través de un cable de dos líneas esto no es posible ya que ambas están ocupadas por los datos y la masa. Por este motivo se intercalan antes y después de los datos informaciones de estado según el protocolo RS-232. Esta información es determinada por el emisor y receptor al estructurar la conexión mediante la correspondiente programación de sus puertos serie. Esta información puede ser la siguiente:

- ❖ **Bit de paridad.-** con este bit se pueden descubrir errores en la transmisión. Se puede dar paridad par o impar. En la paridad par, por ejemplo, la palabra de datos a transmitir se completa con el bit de paridad de manera que el número de bits 1 enviados sea par.
- ❖ **Bit de parada.-** indica la finalización de la transmisión de una palabra de datos. El protocolo de transmisión de datos permite 1, 1.5 y 2 bits de parada.
- ❖ **Bit de inicio.-** cuando el receptor detecta el bit de inicio sabe que la transmisión ha comenzado y es a partir de entonces que debe leer las señales de la línea a distancias concretas de tiempo, en función de la velocidad determinada.

RS-232

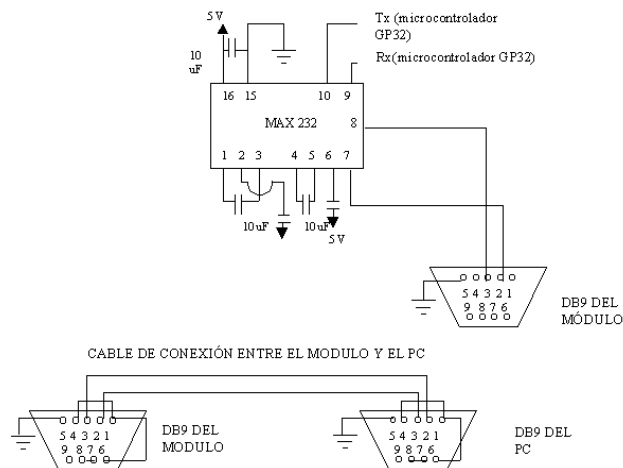
La interfaz RS-232 dispone de hasta 25 líneas que están orientadas a la comunicación de dos equipos PC (DTE) a través de módems (DCE). En este caso se utilizarán para la conexión de los equipos PC prescindiendo de los módems. Para ello de las 25 líneas que posee se han utilizado sólo las siguientes:

- ❖ **Línea de transmisión de datos (TxD).**- línea por la que el DTE (PC) envía los datos.
- ❖ **Línea de recepción de datos (RxD).** línea por la que el DTE (PC) recibe los datos.
- ❖ **Masa.** necesaria para que tenga lugar la transmisión.

Se implementó comunicación serial entre el sistema operativo y el PC a 3 hilos (Tx, Rx y GND) , aprovechando el módulo que posee el microcontrolador para tal fin. En la implementación utilizamos un circuito MAX232 para manejar la información, como lo muestra la figura 35.

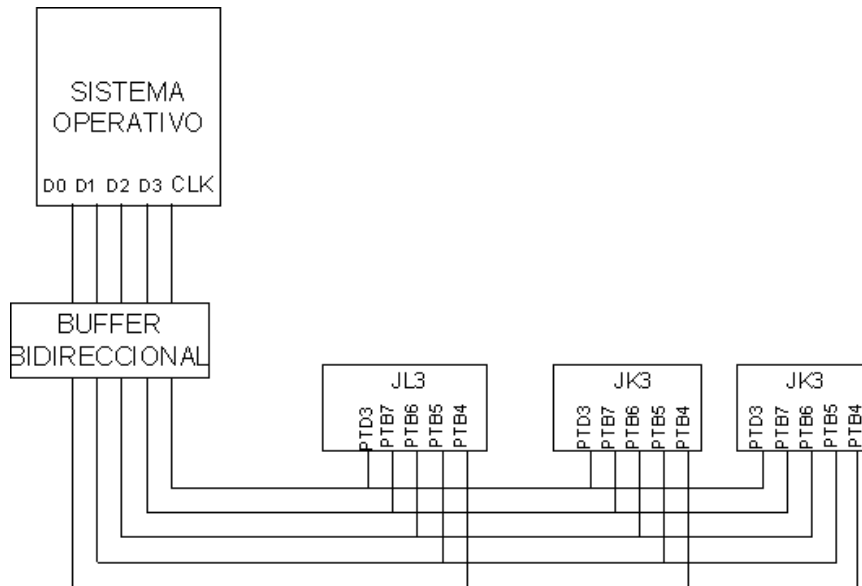
En el PC mediante una presentación en Labview(desarrollada en otro trabajo) el usuario puede elegir el conversor a trabajar y asignarle los parámetros a éste, el computador realiza la transmisión serial de los datos al sistema operativo. En esta comunicación los datos que transmite el computador van codificados en ASCII por lo tanto el sistema operativo debe convertir estos datos al sistema hexadecimal para poderlos transmitir al sistema de control.

Figura 35. Interfaz RS-232



4.3.2 Comunicación paralela.

Figura 36. Comunicación paralela



La comunicación entre el sistema operativo y el sistema para el control se implementó utilizando comunicación paralela a 4 bits más 1 bit de reloj. Se escogió comunicación paralela entre otras razones porque el módulo de comunicación serial del microcontrolador GP32 ya estaba siendo utilizado en la comunicación serial con el computador, por el tamaño de los datos a transmitir y por la disponibilidad de los pines en los microcontroladores. La comunicación se produce entre el microcontrolador que maneja el sistema operativo (GP32) y los microcontroladores del sistema para el control (JL3, JK3).

En la comunicación paralela que se realiza en este proyecto se transmiten los datos correspondientes al tipo de conversor elegido y sus parámetros

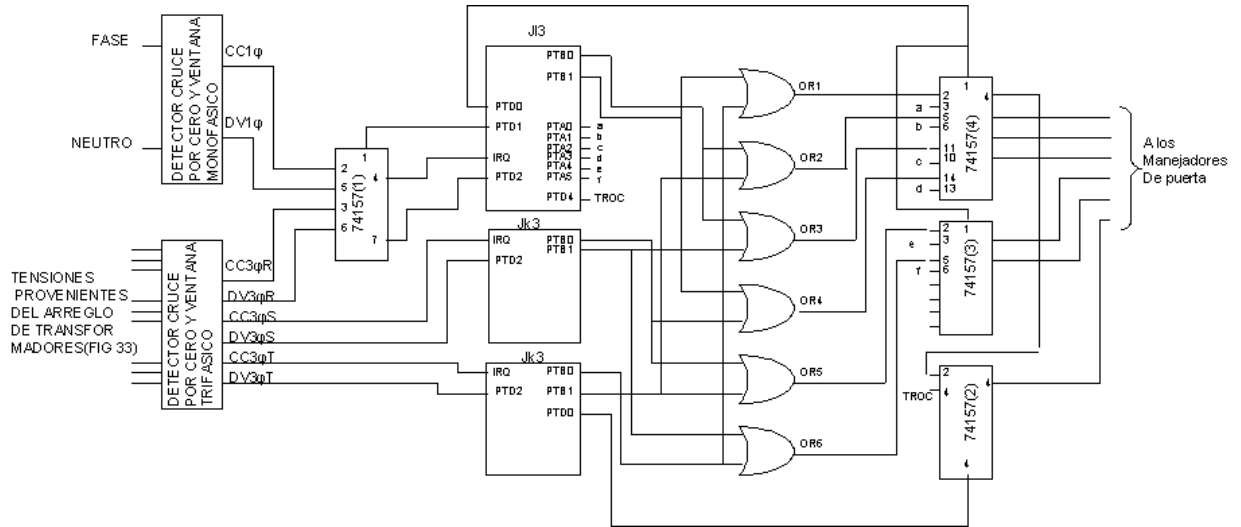
correspondientes, además de un byte de check-sum. Este check-sum no es más que un registro de ocho bits que resulta de la suma de todos los bytes de selección transmitidos, y su función es la de comprobación de transmisión; en el sistema para el control, cada uno de los microcontroladores (JL3, JK3), realiza la suma de los todos los bytes recibidos y compara este resultado con el byte de sheck-sum recibido, de no concordar estos datos, el sistema para el control procede a solicitar retransmisión de datos. Este proceso de retransmisión de datos se puede llevar a cabo hasta 5 veces si definitivamente no se confirma recepción satisfactoria el sistema operativo mostrará en el LCD el mensaje de error"error de comunicación entre micros".

4.4 CIRCUITO PARA EL SISTEMA DE CONTROL.

Para generar los pulsos de disparo correspondientes para los elementos semiconductores se implementó un circuito con 2 microcontroladores MC68HC908JK3 y 1 microcontrolador MC68HC908JL3.

Este sistema de control consta de tres partes, la etapa de sincronismo (cruce por cero), la generación de pulsos (microcontroladores), la de conmutación o switcheo (circuitos lógicos).

Figura 37. Circuito de sincronización, generación de pulsos y conmutación.



Las compuertas son colocadas para los casos en que es necesario enviar pulsos de disparo a parejas de SCR's, como en los casos de rectificador y control AC trifásico; para los casos de rectificación monofásica, control AC monofásico, troceador e inversores, los pulsos de disparo no pasan a través de las compuertas OR.

La parte de conmutación permite el uso de un solo circuito manejador de puerta (6 optocouplers) para enviar los pulsos de control tanto a los SCR's como a los mosfets dependiendo del conversor que se desee implementar, sin esta etapa de conmutación el número de manejadores aumentaría al doble.

En los casos de rectificación y control AC monofásicos, el circuito para el control toma como referencia el cruce por cero monofásico (CC1φ) para

generar los pulsos de disparo al ángulo α definido por el usuario, y la ventana de polaridad ($DV1\alpha$), para identificar el semiciclo en que se encuentra la onda de tensión monofásica y lanzar los pulsos de disparo a los SCR's que les corresponde conducir en dicho semiciclo (Ver capítulo de aplicaciones).

Para los casos de rectificación y control AC trifásicos, se toma como referencia el cruce por cero y la onda cuadrada que envía el detector de cruces por cero y ventana de polaridad trifásica. A cada uno de los microcontroladores (Jk3 y JL3), les llega una señal de cruce por cero y una onda cuadrada (ventana de polaridad); la señal de cruce por cero se toma como referencia para generar los pulsos de disparo y la señal de ventana para identificar el semiciclo de la tensión de entrada para enviar disparo a los SCR's que deben conducir en cada semiciclo.

Por ejemplo si el usuario elige implementar el rectificador trifásico controlado, al microcontrolador JL3 le llega la señal de cruces por cero y ventana de polaridad correspondientes a la tensión de línea V_{rs} , a un microcontrolador JK3 la señal de cruce por cero y ventana V_{st} , y al otro las correspondientes a V_{tr} .

De esta forma cada uno de ellos estará encargado de ejecutar control de una tensión de línea; el arreglo de compuertas OR permite conjugar dichos pulsos para poder lanzar pulso de disparo a parejas de SCR's; por ejemplo para el caso rectificador trifásico controlado en el semiciclo positivo de la tensión V_{rs} se debe enviar pulso de disparo a los SCR's 2 y 3, y en el semiciclo negativo a los SCR's 4 y 1(ver capítulo aplicaciones).

4.5 INTERFAZ DE AISLAMIENTO.

Para el circuito manejador de puerta (driver) se utilizó el circuito integrado PS9634 que está diseñado para manejar Mosfets y provee un nivel de aislamiento de aproximadamente 5000V(ver anexo 1); debido a que en el proyecto se manejan Mosfets y SCRs con el mismo circuito integrado, fue necesario implementar un circuito adicional a la salida de éste, ya que los Mosfets se disparan o enganchan con niveles de tensión y los SCRs con niveles de corriente.

Para lograr disparar los SCR's es necesario tener control sobre la corriente que se suministra a la puerta de estos, por este motivo se colocan dos Mosfets en serie para aislar y no generar carga a las optocouplas y a su salida un transistor BJT(fig. 38), de esta forma se puede controlar la corriente a suministrar; en últimas este circuito es muy parecido a un IGBT (entrada Mosfet, salida BJT).

Para cada circuito manejador de puerta es necesario tener fuentes independientes para cada uno de ellos ya que los disparos para cada uno de los SCR's o de los Mosfets según sea el caso, deben tener referencias diferentes; esto se debe a que por ejemplo en el caso de los SCR's los pulsos de disparo se colocan con referencia al cátodo y si se tiene una misma referencia para el los pulsos se presentaría un cortocircuito cuando se enciendan los SCR's. Para el diseño de las fuentes se utilizó un transformador con 6 devanados de salidas independientes.

Figura 38. Circuito manejador de puerta para Mosfets y SCR's.

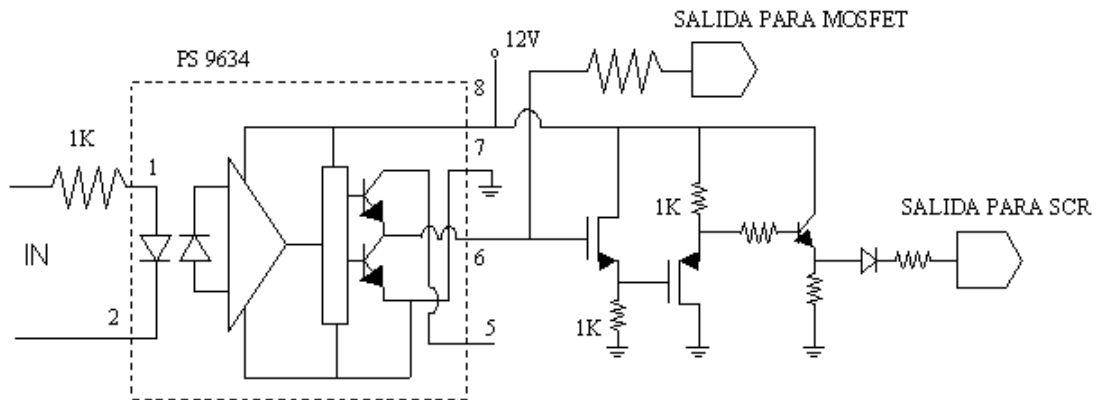
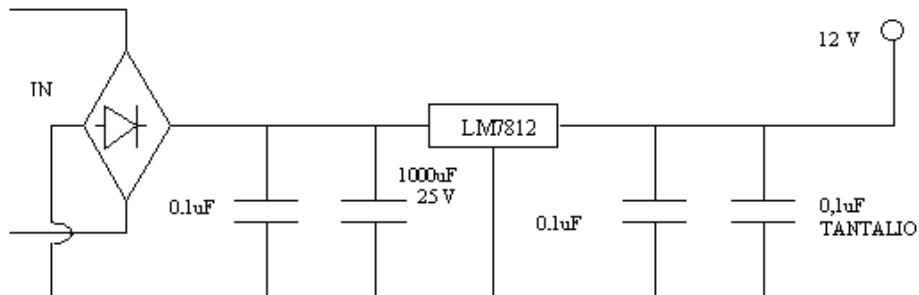


Figura 39. Fuente para el circuito manejador de puerta.



5. DESCRIPCION DE LAS RUTINAS Y SUBRUTINAS IMPLEMENTADAS EN EL MODULO CONVERTOR ESTATICO DE POTENCIA.

5.1 RUTINAS Y SUBRUTINAS DEL SISTEMA OPERATIVO.

El sistema operativo está estructurado por niveles; esto permite ir seleccionando por medio del teclado el tipo de convertor que se desea implementar y finalmente introducir los parámetros (ángulo, frecuencia de operación o el ciclo de trabajo según sea el caso elegido) para su funcionamiento; una vez se ha elegido el tipo de convertor e introducido sus datos, se envían al sistema para el control, utilizando la comunicación paralela a 4 bits. A medida que se avanza en la selección del tipo de convertor, se activan banderas que facilitan regresar secuencialmente a través de los submenús; esto permite que el operador pueda en caso de equivocarse en la selección, regresar y corregir su elección; Estas banderas también le permiten al sistema operativo regresar por si solo en caso de que el operador haya avanzado hasta un determinado nivel de selección y no complete los datos.

5.1.1 Rutina de interrupción por teclado

Esta rutina fue implementada aprovechando el modulo KBI (keyboard interrupt) del microcontrolador GP32; el módulo KBI proporciona 8 pines de interrupción externa(puerto A); con un registro de 8 bits para habilitar/deshabilitar separadamente cada una de ellas.

Inicialmente se programan los 4 pines de la parte baja del puerto A como pines de interrupción por teclado, colocando un uno lógico los 4 bits de la parte alta del registro INTKBIER(keyboard interrupt enable register),este registro permite seleccionar los pines que se desean configurar para la interrupción por teclado, y los 4 pines de la parte alta del puerto A se programan como pines de salida de datos; como se muestra en la Figura 32, al puerto A esta conectado el teclado de tal forma que cuando se presione una tecla, se estará colocando un nivel lógico bajo (aprox. 0 voltios) en uno de los pines de la parte baja del puerto A, y generará una interrupción por teclado que será atendida inmediatamente. Una vez el microcontrolador atiende la interrupción por teclado, deshabilita esta opción limpiando todo el registro INTKBIER y en la pantalla LCD aparece un menú que permite seleccionar e introducir los datos del conversor de potencia que se desee implementar, además se configuran los pines PTA0-PTA3 (parte baja del puerto A) como entrada y los pines PTA4-PTA7 como salida, seguidamente ejecuta la subrutina de lectura de teclado.

Para prevenir falsas interrupciones en la iniciación del KBI se inicializa el modulo de siguiente forma:

- ❖ Se enmascara la interrupción por teclado seteando el bit IMASK (keyboard interrupt mask bit)en el registro INTKBSCR(Keyboard status and control register)
- ❖ Se seleccionan los pines que van a trabajar en la forma de interrupción por teclado,seteando los 4 bits de la parte alta del registro INTKBIER (Keyboard Interrupt enable register)
- ❖ Se limpia el bit ACKK(keyboard acknowledge bit) en el registro INTKBSCR, para evitar cualquier falsa interrupción.
- ❖ Se limpia el bit MODEK(keyboard triggering sensinty bit) para que se produzcan interrupciones por flancos de caída únicamente.
- ❖ Se limpia el bit IMASK en el registro INTKBSCR.

Todos los registros mencionados en esta subrutina son registros propios del modulo KBI.

5.1.2 Subrutina de lectura del teclado.

Una vez aparece el menú de selección en la pantalla LCD, el microcontrolador GP32 ejecuta esta subrutina en la cual se empieza a rotar un 1 lógico(5 V) por la parte alta del puerto A(PTA 4-PTA7 conectado a las filas del teclado), en el momento en que el usuario presione una tecla el uno lógico que se esta rotando se verá reflejado en uno de los pines de la parte baja del puerto A (PTA0-PTA3 previamente configurados como entrada y que esta conectado a las columnas del teclado), como el microcontrolador tiene el registro de la posición del uno lógico que esta rotando por las filas, leyendo la parte baja del puerto A se puede saber la columna en que se ha oprimido la tecla e identificarla. Si la tecla oprimida corresponde a una de las opciones mostradas en la pantalla, aparece otro submenú y el microcontrolador vuelve a ejecutar la subrutina de lectura de teclado, y así sucesivamente hasta llegar a la subrutina de almacenamiento de datos.

5.1.3 Subrutina de almacenamiento de datos.

Esta subrutina se encarga de almacenar los parámetros del convertor elegido por el usuario, los cuales son diferentes en cada caso, dependiendo del tipo de convertor elegido, por ejemplo para los rectificadores y los controles AC el parámetro a introducir es el ángulo de disparo α , para el troceador el parámetro es el ciclo de trabajo K, para el inversor monofásico, la frecuencia de operación y el ciclo de trabajo K y para el inversor trifásico la frecuencia de operación.

Tabla 6. Rangos de control para los diferentes convertidores implementados en el modulo conversor estático de potencia

Tipo de conversor	Parámetro	Rango
Rectificador monofásico controlado	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Rectificador monofásico semicontrolado	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Rectificador trifásico controlado	Angulo de disparo α	Entre 5° y 115°
Rectificador trifásico semicontrolado	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Control AC monofásico controlado	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Control AC monofásico semicontrolado	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Control AC trifásico controlado carga en Y con neutro	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Control AC trifásico semicontrolado carga en Y con neutro	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro	Angulo de disparo α	Entre 5° y 145°
Control AC trifásico semicontrolado carga en Y sin neutro	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Control AC trifásico controlado carga en delta SCR's en la línea	Angulo de disparo α	Entre 5° y 145°
Control AC trifásico semicontrolado carga en delta SCR's en la línea	Angulo de disparo α	Entre 5° y 175°
Troceador	Ciclo de trabajo K	Entre 5% y 95%
Inversor monofásico	Frecuencia de operación	Entre 10Hz y 80Hz
	Ciclo de trabajo K	Entre 5% y 95%
Inversor trifásico	Frecuencia de operación	Entre 10Hz y 80 Hz

En esta subrutina se verifica que los datos digitados por el usuario sean datos válidos, y estén dentro de los rangos establecidos para dichos datos; para el ángulo de disparo α el rango está limitado por el ancho del pulso del cruce por cero y además porque para tensiones senoidales el SCR no empieza a conducir a partir de cero debido a que el voltaje de polarización es muy bajo por este motivo se coloca el rango a partir de 5 grados del límite inferior teórico y 5 grados menos del límite superior teórico.

Una vez se han almacenado los datos se ejecuta la subrutina de transmisión de datos paralela.

5.1.4. Subrutina de transmisión de datos paralela.

Esta subrutina se encarga de enviar los datos del tipo de conversor y sus parámetros elegidos por el operador; en total se transmiten 5 bytes que corresponden a: tipo de conversor, ciclo de trabajo K, ángulo de disparo α , frecuencia de operación, y byte de check sum; el byte de check sum se utiliza para verificar que los datos recibidos en el sistema para el control correspondan con los datos transmitidos por el sistema operativo; este byte corresponde a la suma de los 4 bytes de datos.

Para la implementación de la transmisión paralela se utilizan 5 hilos, 1 de reloj, y 4 de datos (Fig. 36); para la salida de datos se usa la parte baja del puerto B(PTB0-PTB3) del GP32 y para la señal de reloj se utiliza el pin 5 del puerto C(PTC 4); el pin de reloj sirve para sincronizar la transmisión de los datos.

Para realizar la transmisión de los 5 bytes, se trasmite primero la parte baja del byte (bit 0-bit3), y luego la parte alta (bit4-bit7) de cada uno de los bytes de datos; cada vez que se transmite medio byte se envía un pulso de reloj para indicarle al sistema para el control que se han enviado datos; luego que se han transmitido todos los datos, se configura la parte baja del puerto B como entrada para que en caso de que el sistema para el control reciba datos erróneos y solicite retransmisión de datos proceder a efectuar dicha retransmisión; o en caso de que cualquiera de los microcontroladores del sistema para el control se resetee poderle informar al operador por medio de la pantalla cual de ellos se ha reseteado.

En el sistema para el control se realiza la recepción de datos por la parte alta del puerto B (PTB4-PTB7) de cada uno de los microcontroladores(JL3, Jk3), como los datos son transmitidos de a 4 bits, se reciben los medios bytes de datos los cuales se concatenan de a 2 y se guardan los 5 registros para realizar su proceso.

5.1.5 Subrutina de recepción y transmisión de datos serial.

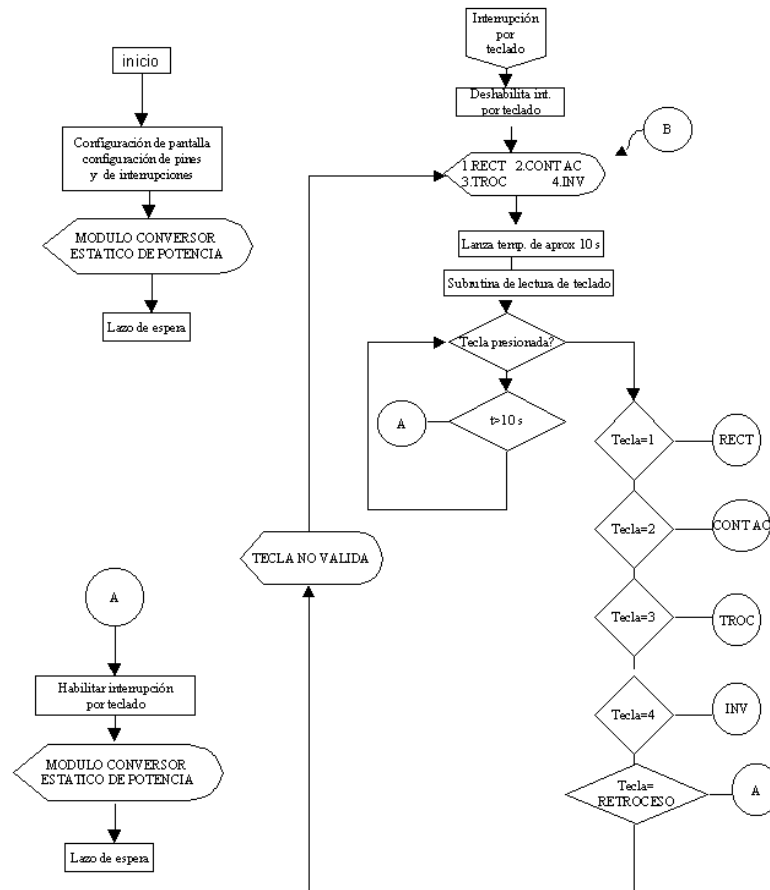
Esta subrutina permite la comunicación del sistema operativo con un PC; esto permite la operación del modulo por medio por medio de un computador personal.

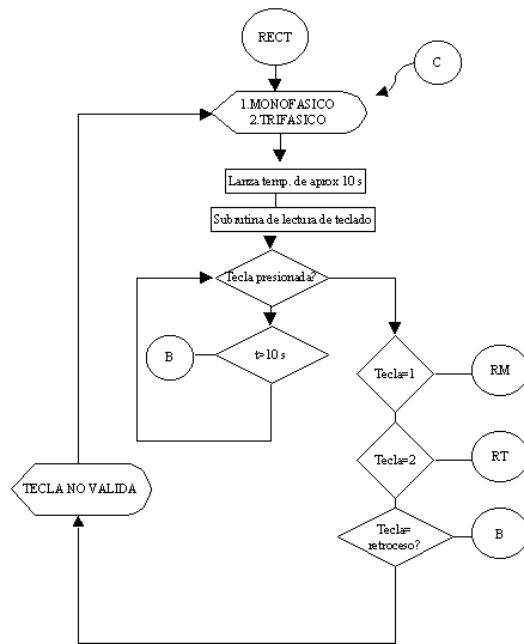
Para configurar el módulo de comunicación serial del microcontrolador GP32, primero se configura el registro de velocidad de transmisión SCBR, en este proyecto se trabaja a una velocidad de 9600 baudios; seguidamente se configura el registro de control SCC1, en este registro se habilita el módulo de 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.

Cada vez que el PC envía un dato genera una interrupción y el sistema operativo guarda en un registro el dato recibido; el sistema operativo espera recibir 12 bytes; una vez recibe los doce datos, realiza el proceso de verificación de estos datos y realiza la transmisión de los datos recibidos al computador, el PC compara los datos recibidos con los datos enviados para verificar la comunicación; si los datos recibidos difieren de los transmitidos el PC mostrara en pantalla un mensaje de error.

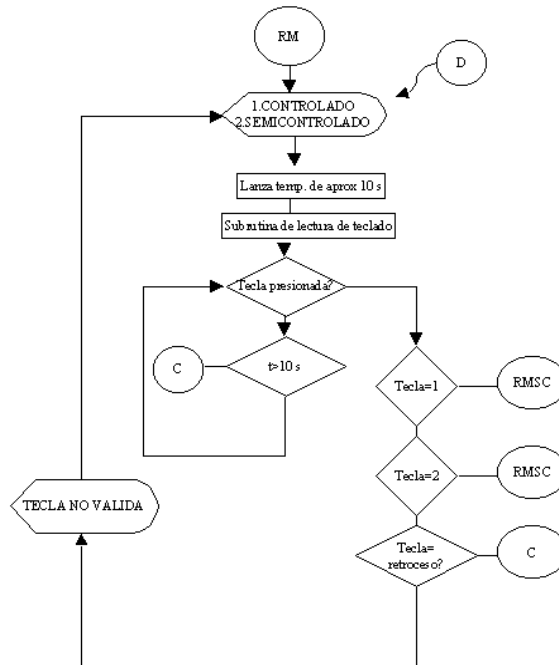
Para llevar a cabo la comunicación serial se usa la interfaz RS-232(Fig. 35),la cual adecua las señales enviadas por el microcontrolador a los niveles de tensión requeridos por el computador y viceversa.

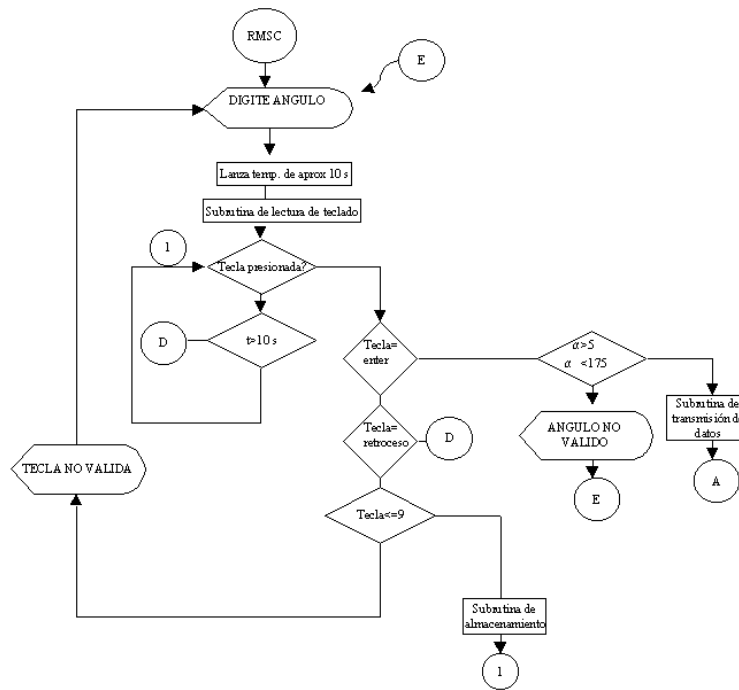
Figura 40 Diagrama de flujo del sistema operativo.





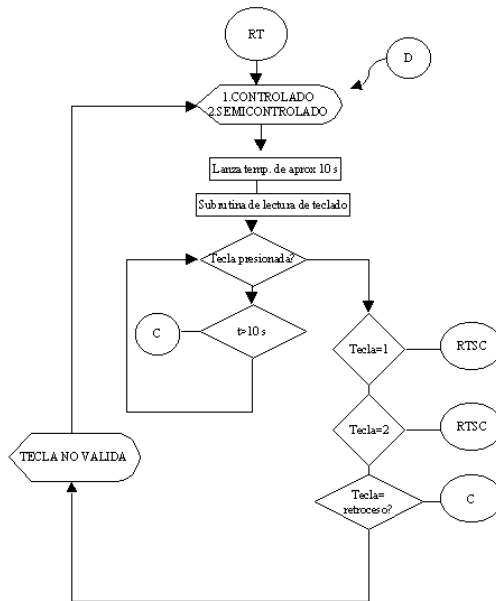
RECT: rectificador

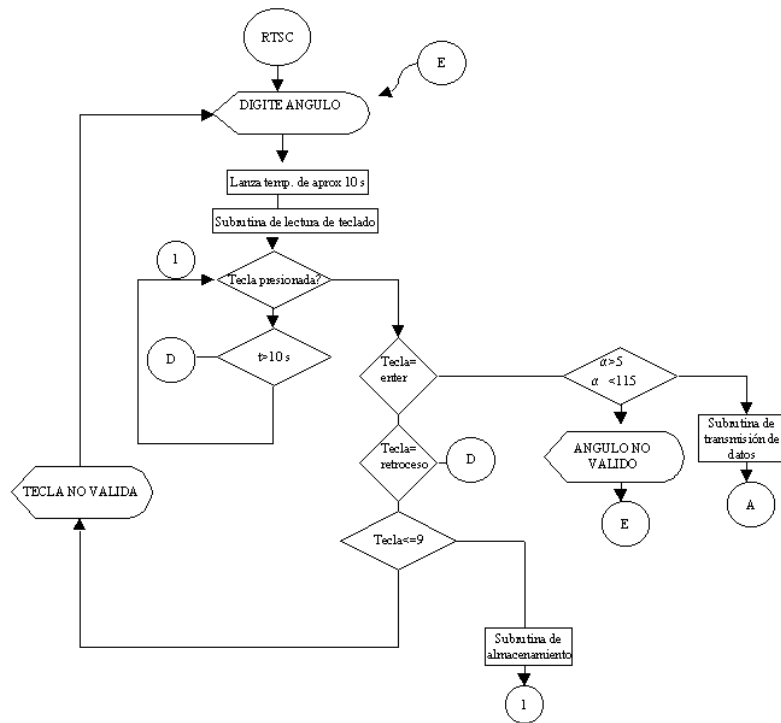




RM: rectificador monofásico

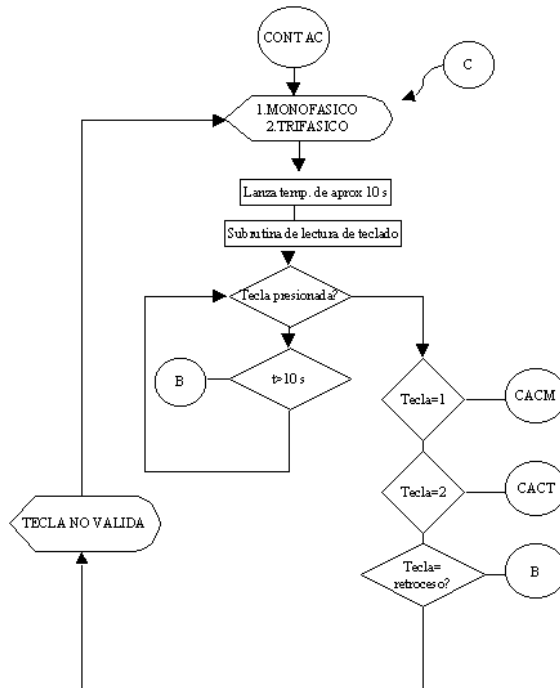
RMS: este lazo sirve para almacenar el dato de ángulo de disparo del rectificador monofásico semicontrolado y del rectificador monofásico controlado

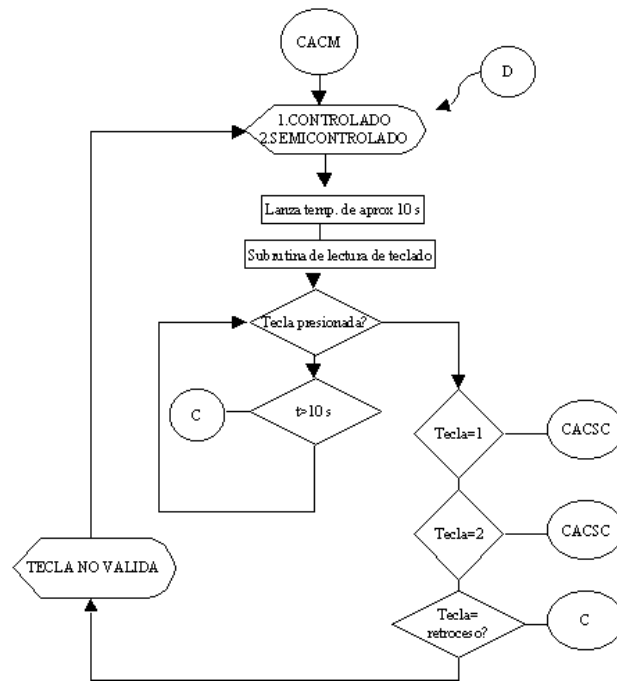




RT: rectificador trifásico

RTSC: este lazo sirve para almacenar el dato de ángulo de disparo del rectificador trifásico semicontrolado y controlado.

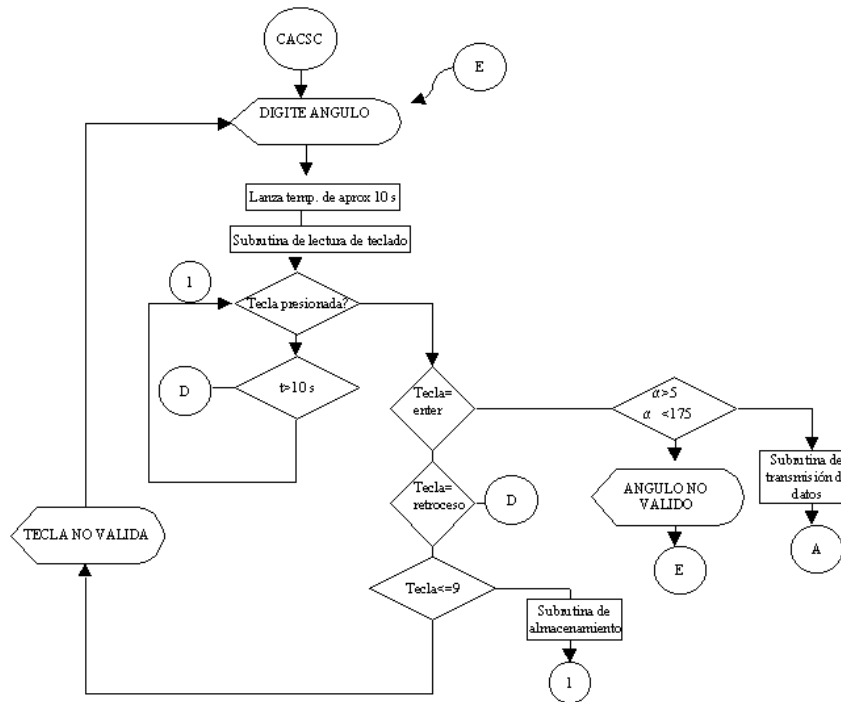




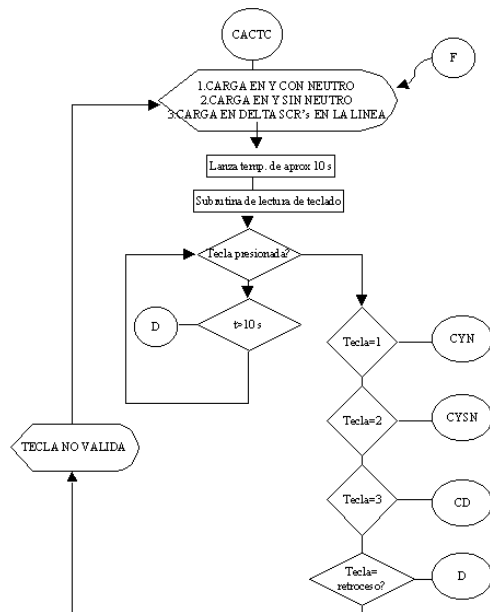
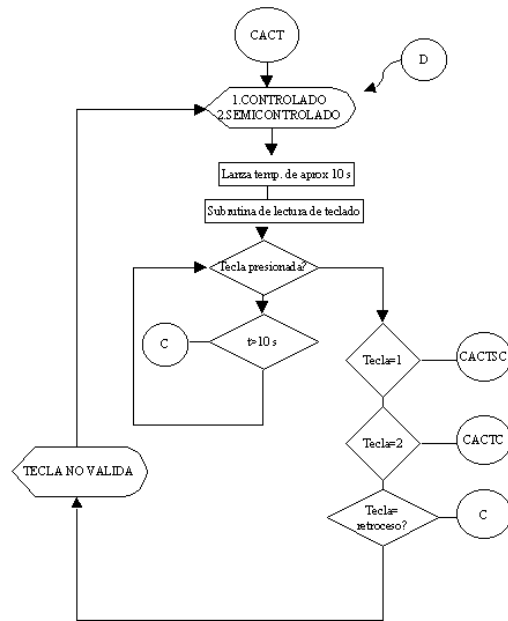
CONT AC: control ac

CACM: control ac monofásico

CAT: control ac trifásico



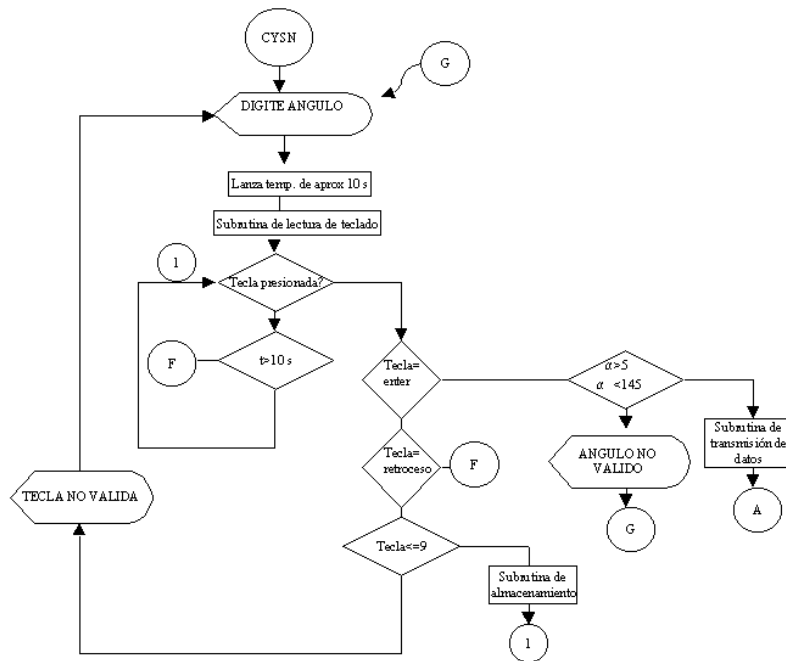
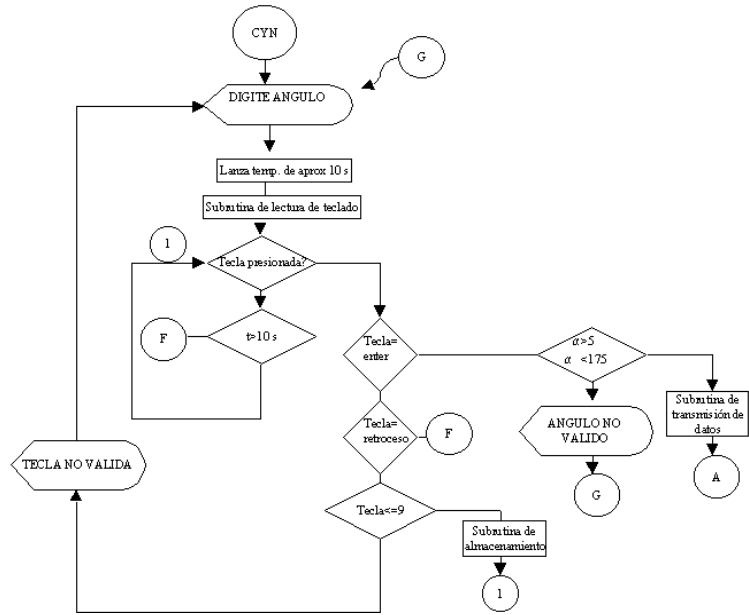
CACSC: este lazo sirve para almacenar el ángulo de disparo α para el control AC monofásico y trifásico



CACT: control ac trifásico

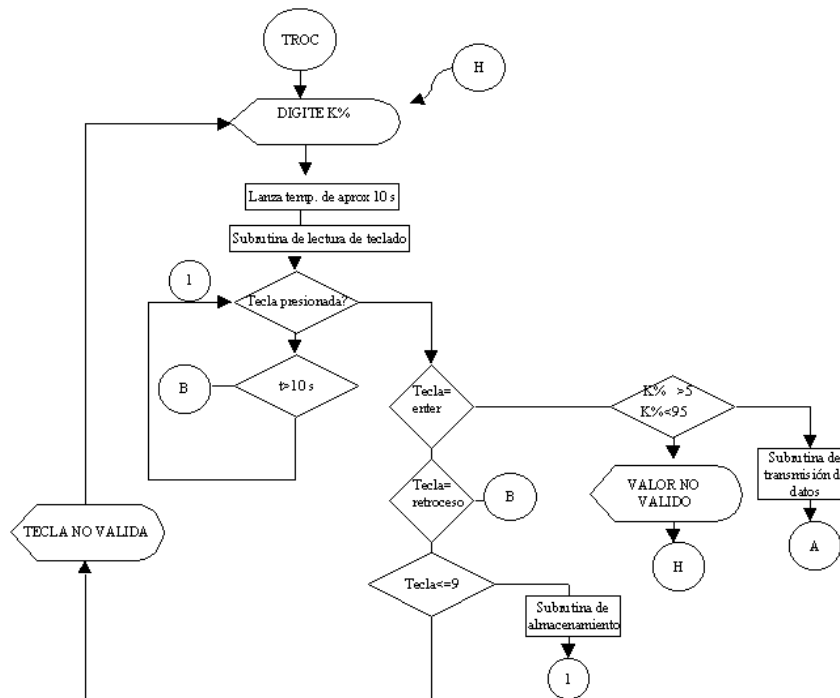
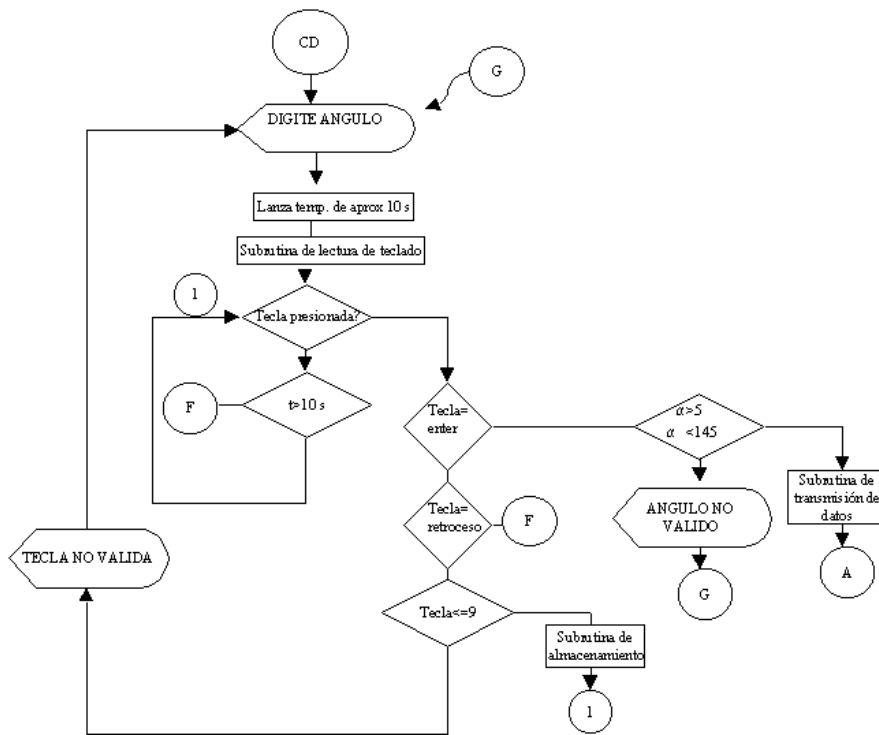
CACTC: control ac trifásico controlado

CACTSC: El lazo de selección para el control AC trifásico semicontrolado es similar al del control AC trifásico controlado por lo cual no aparece en este esquema.



CYN: carga en y con neutro

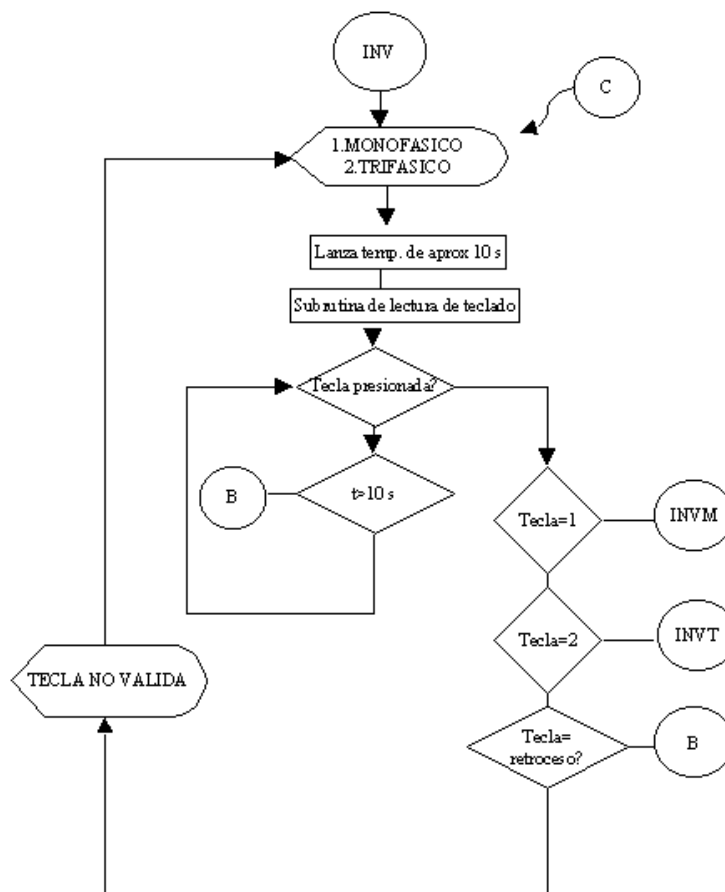
CYSN: carga en y sin neutro



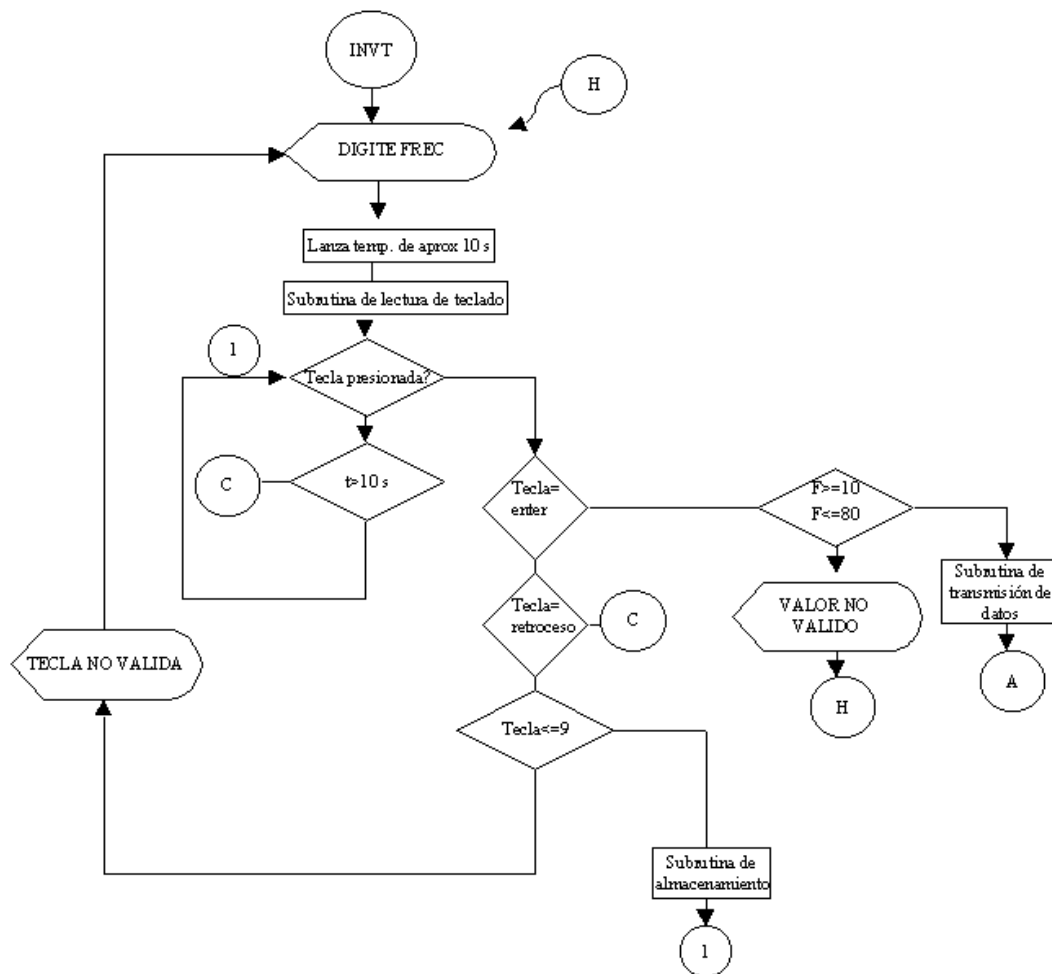
CD: carga en delta

TROC. troceador

Los lazos de almacenamiento para el control AC trifásico semicontrolado son similares a los del control AC trifásico controlado, solo difieren en que para el caso de carga en Y sin neutro y carga en delta el limite para el ángulo de disparo se extiende hasta 180° .



INV: inversor



INVT: inversor trifásico

5.2 RUTINAS Y SUBRUTINAS DEL SISTEMA PARA EL CONTROL.

En esta etapa se llevan a cabo las acciones de recepción de datos, temporización y envío de pulsos a los elementos semiconductores de potencia(SCR's y Mosfets). Uno de los bloques más importantes para llevar a cabo estas tareas es el módulo de temporización; este módulo puede ser utilizado para llevar a cabo funciones de temporización como lo son: entrada de captura, salida de comparación y modulación por ancho de pulso; las principales características de este módulo son:

- Dos canales de entrada.

- Reloj de entrada programable para el módulo, con 7 opciones de selección.
- Bits de parada y reset para el módulo de temporización.

La opción de entrada de captura (*input capture*), permite medir el tiempo en que un evento externo ocurre; cuando se presenta un flanco de caída/subida el módulo temporizador carga el contenido del módulo de conteo en dos registros del temporizador para que puedan ser leídos y procesados.

La función de salida de comparación (*output compare*), permite generar un pulso periódico de salida, de salida y frecuencia programable.

Cuando el contador alcanza el valor cargado en el registro de un canal programado como salida de comparación, el módulo de temporización activa una bandera y además tiene la posibilidad de generar una interrupción si esta es habilitada.

Con la función PWM se puede generar una salida PWM, el valor cargado en el registro de temporización del módulo temporizador determina el periodo de la señal y el valor cargado en el registro del canal configurado como PWM, determina el ancho del pulso de la señal PWM (Para mas información acerca del modulo de temporización consultar el manual de datos del microcontrolador MC68HC908JI3/JK3/jk1).

5.2.1 Subrutina de recepción paralela.

Como se puede ver en la figura 36, los datos llegan a los microcontroladores 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, este registro corresponde al

primer dato completo recibido, de esta forma se reciben los 5 bytes correspondientes a los 4 bytes de datos y el de check sum.

El byte de check sum corresponde a la suma de los 4 registros de datos transmitidos por el sistema operativo; una vez se han recibido los 5 bytes (4 de datos y el de chek sum), se procede a sumar los 4 bytes de datos y se compara con el byte de chek sum, si la suma de los datos recibidos no concuerda con el byte check sum el sistema para el control solicita retransmisión de datos; el sistema operativo realiza retransmisión de datos 5 veces, si en estas 5 veces no hay recepción satisfactoria el sistema operativo mostrará en pantalla el mensaje “ERROR DE COM ENTRE MICROS”, para indicarle al usuario que hay problemas de comunicación entre el microcontrolador del sistema operativo y los microcontroladores del sistema para el control.

5.2.2. Subrutinas para las aplicaciones de rectificación trifásica y monofásica.

Cuando la aplicación seleccionada corresponde a uno de los casos de rectificación trifásica, los microcontroladores toman el dato correspondiente al ángulo de control y lo multiplican por el valor correspondiente en tiempo a un grado, con este valor son llenados los registros TCHOH y TCHOL del timer, una vez cargados estos registros se configura el modulo temporizador para que trabaje en la opción salida de comparación(output compare), se habilita la interrupción externa IRQ y la interrupción por timer.

Cuando llega la interrupción proveniente del cruce por cero se identifica el semiciclo de la onda de tensión a controlar y se lanza el timer; cuando el timer alcanza el valor cargado en el canal genera una interrupción, en la

subrutina de atención de interrupción se coloca el pulso de disparo para los SCR's que les corresponde conducir en este semiciclo, y se carga el timer nuevamente con valor que corresponde a aproximadamente 300 milisegundos, y se lanza nuevamente, cuando alcanza este valor se conmuta el pulso de puerta de los SCR's que se habían encendido, esto con el fin de que los disparos sean de corta duración(aguja).

En el caso trifásico cada microcontrolador del sistema para el control está encargado de manejar una tensión de línea; para el caso monofásico es manejado por uno solo de ellos(JL3).

La diferencia entre el caso monofásico y trifásico es que en el caso trifásico se le deben sumar 60° al ángulo recibido, ya que en la rectificación trifásica el ángulo de disparo α se mide 60° grados después del cruce por cero de la tensión de línea.

5.2.3 Subrutinas para las aplicaciones de control AC monofásico y trifásico.

El llenado de registros del timer y envío de pulsos de control para los SCR's en esta subrutina es similar al caso de rectificación; de nuevo en el caso trifásico cada microcontrolador del sistema para el control esta encargado de generar los pulsos de control para una tensión de línea, mientras que en el caso monofásico solo el microcontrolador JL3 está encargado de realizar el control.

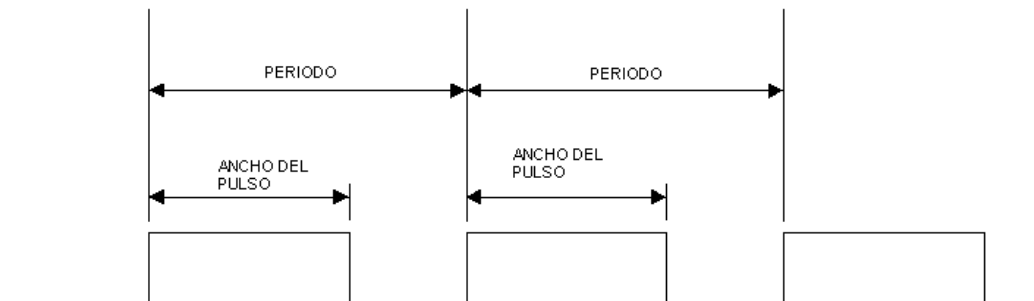
Para los casos de control AC trifásico implementados en este trabajo, la carga soporta en sus terminales tensiones de fase por lo tanto se deben sumar 30° al ángulo de disparo α para generar los pulsos de control, esto debido a que se implementaron detectores de cruce por cero de las tensiones de línea.

5.2.4 Subrutinas para el troceador.

En esta aplicación se toma el dato correspondiente al ciclo de trabajo, se configura el módulo PWM para que trabaje a una Frecuencia de 20KHz(periodo de 50 microsegundos), y se multiplica el periodo de esta señal por el ciclo de trabajo dado, luego se divide en 100 y de esta forma se halla el valor del ancho del pulso. El valor correspondiente al periodo se carga en el registro del módulo temporizador(TIM counter modulo register), y el valor del ancho del pulsos se carga en el registro del canal (TIM chanel register). Los pulsos de control para el troceador son generados por el microcontrolador JL3.

El valor del ciclo de trabajo k se puede variar entre 5% y 95% del periodo de la señal de salida.

Figura 41 Pulsos de control para el troceador



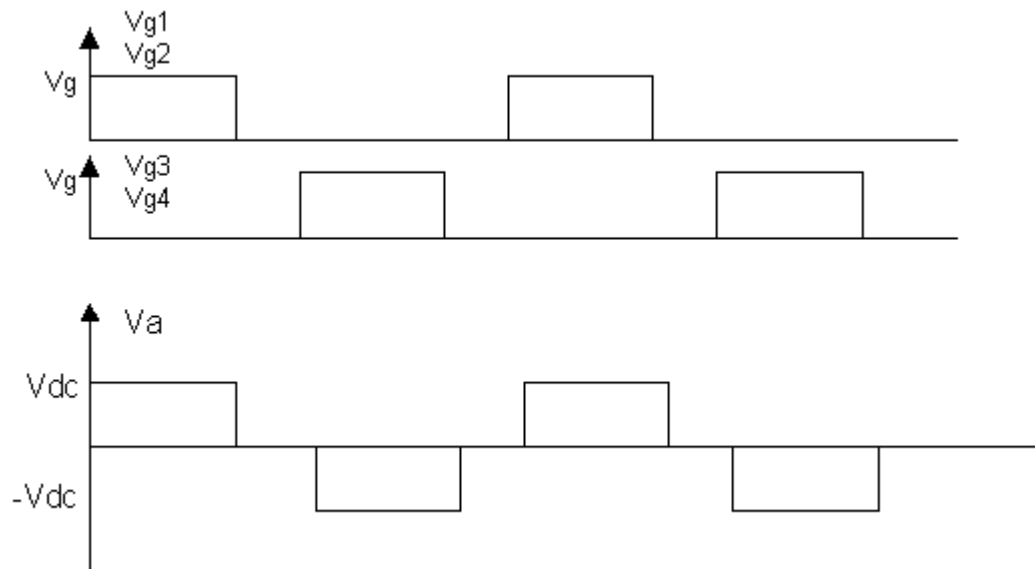
5.2.5 Subrutinas para el inversor.

En el caso del inversor monofásico se toma el dato correspondiente a la frecuencia de salida deseada y se carga un canal del timer con el valor correspondiente a $\frac{1}{2}$ del periodo de la frecuencia deseada, este mismo valor se multiplica por el dato correspondiente al ciclo de trabajo dado y se divide por 100 y se carga el otro canal del timer; de esta forma un canal lleva el tiempo del periodo y cuando alcanza el conteo genera interrupción, a su vez

cuando alcanza el conteo del segundo canal también se genera una interrupción.

Primero basculan a conducción los mosfets 1 y 2 (Fig. 26), cuando el temporizador alcanza el valor almacenado en el canal 2 correspondiente al ancho del pulso, genera interrupción; en esta subrutina de interrupción se conmutan a no conducción estos dos mosfets; cuando el temporizador alcanza el valor del segundo canal genera otra interrupción en la cual se encienden los mosfets 3 y 4 (Fig. 26), y se lanza nuevamente el modulo de conteo; este ciclo se repite hasta que el usuario pare el sistema o actualice los datos.

Figura 42 Pulsos de control para el inversor trifásico



El ancho del pulso se puede variar entre un 5 y un 95% del valor del periodo de la señal de salida; tanto el inversor monofásico como el trifásico son manejados por el microcontrolador JL3.

Para el caso del inversor trifásico se toma el dato correspondiente a la frecuencia de operación deseada, se carga un canal del modulo de temporización con el valor correspondiente a $1/6$ del periodo de esta señal, se configura para que trabaje de la forma output compare y se habilita la opción de interrupción por timer; una vez el timer alcanza el valor cargado en el canal genera una interrupción, cada vez que se genera esta interrupción se envía pulso a tres mosfets de acuerdo al esquema de la figura 28. en el caso del inversor trifásico es posible variar la frecuencia de operación entre 10 Hz y 80 Hz.

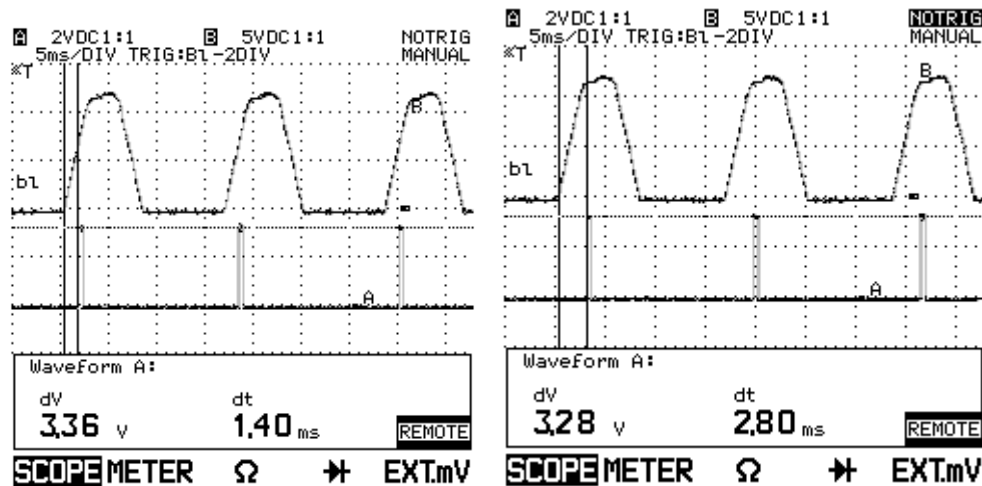
6. PRUEBAS

En el presente capítulo se presenta un resumen de las ondas adquiridas con el osciloscopio fluke 99B durante las pruebas de los diferentes circuitos convertidores de potencia; las gráficas corresponden a los pulsos de control y a las tensiones de salida en la carga, para todos los casos se trabajo con cargas resistivas.

6.1 PULSOS DE CONTROL RECTIFICADORES MONOFASICOS

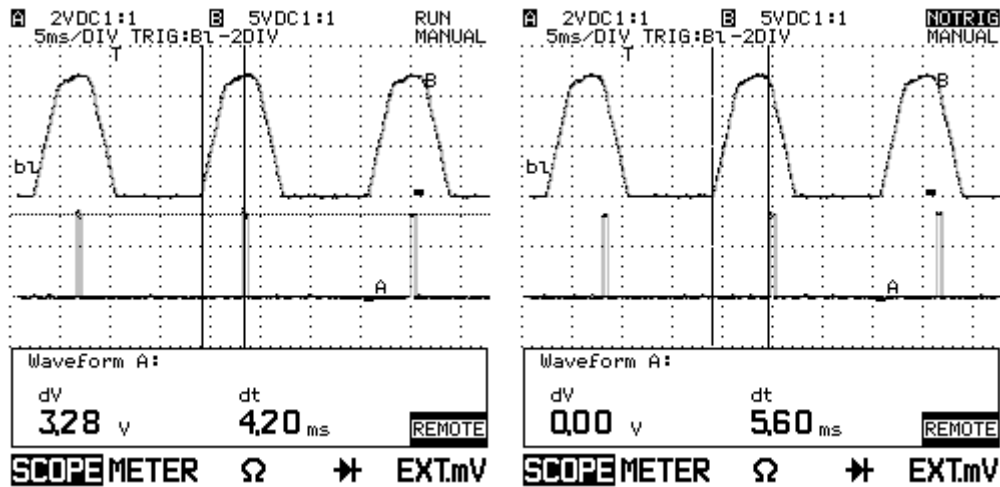
Figura 43. Pulsos de control para el rectificador monofásico

a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=60^\circ$, c) $\alpha=90^\circ$, d) $\alpha=120^\circ$



a)

b)



c)

d)

La gráfica 43 muestra los pulsos de control con respecto de la tensión de entrada del detector de ventana de polaridad para diferentes ángulos de disparo α , para el caso controlado estos pulsos corresponden a los SCR's 2 y 3(ver fig. 7) que controlan el semiciclo positivo de la onda de tensión, para el semiciclo negativo los pulsos de control son similares desplazados 180° . En el caso semicontrolado los pulsos corresponden al SCR1(ver fig. 9) para el semiciclo positivo; mientras que para el semiciclo negativo los pulsos son iguales desplazados 180° y corresponden al SCR2(fig. 9). Las gráficas obtenidas con el fluke nos proporcionan el tiempo de retraso del pulso de disparo para los diferentes ángulos, El porcentaje de error de este tiempo, con respecto del tiempo teórico se calcula con la siguiente expresión:

$$\%Error = ((valor\ teórico - valor\ leído) / valor\ teórico) * 100$$

Tabla 7. Porcentajes de error rectificador monofásico.

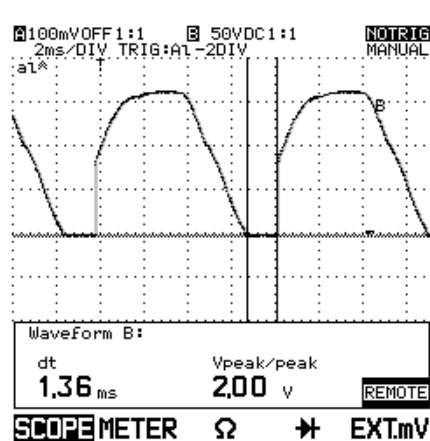
Angulo α	Tiempo teórico(ms)	Tiempo leído(ms)	%Error
30°	1.3888	1.4	0.8%
60°	2.7777	2.8	0.8%
90°	4.1666	4.2	0.8%
120°	5.5555	5.6	0.8%

6.2 TENSION DE SALIDA RECTIFICADOR MONOFASICO SEMICONTROLADO Y CONTROLADO.

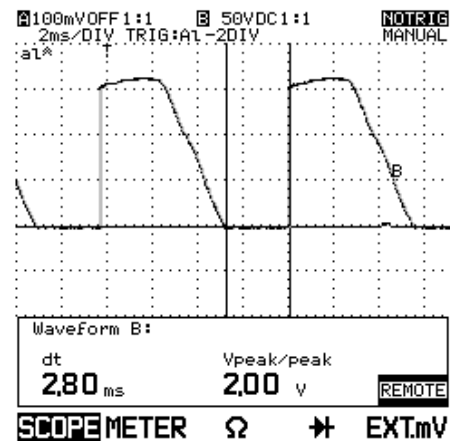
Se muestra una sola gráfica para las tensiones de salida de los dos casos puesto que son iguales, esto debido a que en el caso semicontrolado el diodo no entrara en conducción hasta que no se envíe pulso de disparo al SCR respectivo (ver fig. 9), por lo tanto la tensión de salida en la carga tendrá la misma forma para ambos casos.

Figura 44. Tensión de salida para el rectificador monofásico semicontrolado y controlado (carga resistiva).

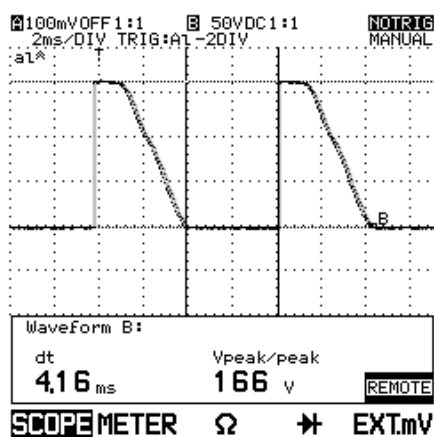
a) $\alpha=30^\circ$,b) $\alpha=60^\circ$,c) $\alpha=90^\circ$,d) $\alpha=120^\circ$



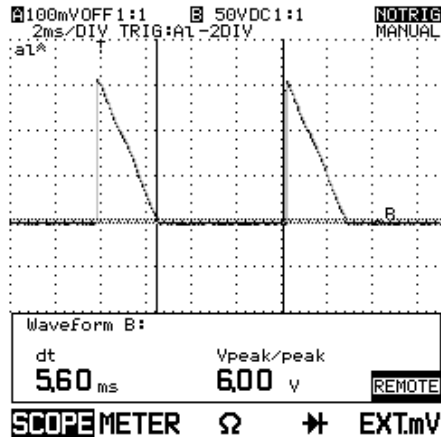
a)



b)



c)



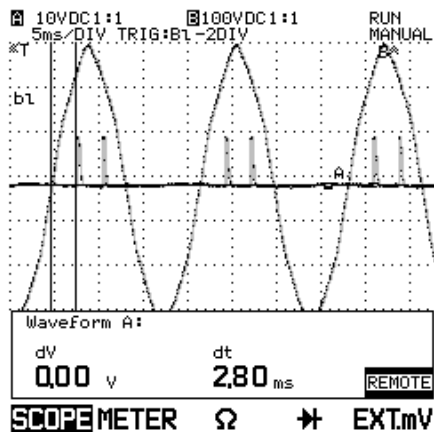
d)

La figura 44 muestra la tensión de salida (V_a) (ver fig. 7 y 8) en la carga para diferentes ángulos de disparo α . La tensión de entrada (V_s) (ver fig. 7 y 8) es de aproximadamente 120V rms, se puede observar que los SCR's conmutan de forma natural en cero grados por ser la carga netamente resistiva.

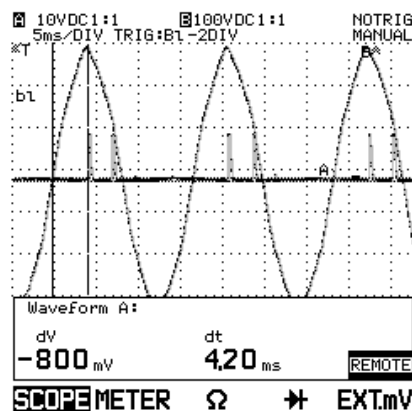
6.3 PULSOS DE CONTROL RECTIFICADOR TRIFASICO SEMICONTROLADO Y CONTROLADO

Figura 45. Pulsos de control para el rectificador trifásico semicontrolado y controlado.

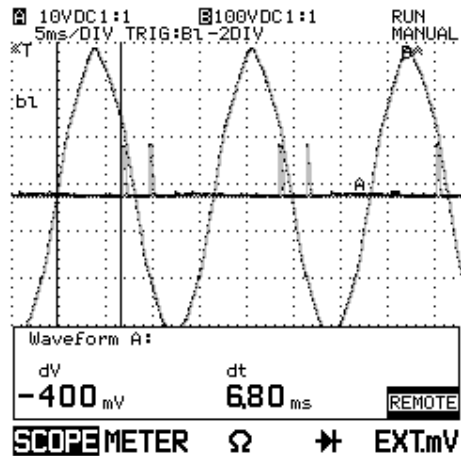
a) $\alpha=0^\circ$, b) $\alpha=30^\circ$, c) $\alpha=90^\circ$



a)



b)



c)

Los pulsos mostrados en esta gráfica fueron tomados en la puerta del SCR2(ver fig. 10) donde se observan pulsos dobles separados 60° , el primer pulso corresponde al pulso enviado en el semiciclo positivo de la tensión de línea V_{ab} , mientras que el segundo pulso corresponde al enviado en el semiciclo negativo de la tensión V_{ca} , el segundo pulso es redundante puesto que este SCR ya venia en conducción, esta redundancia se presenta debido a que se están enviando pulsos de control a parejas de SCR's en cada semiciclo de las ondas de tensión; los pulsos de disparo están retrasados en el tiempo ya que para este caso el ángulo α se mide a partir de 60° que es el instante a partir del cual se puede ejercer control. A continuación se relaciona el porcentaje de error en los ángulos de disparo dados.

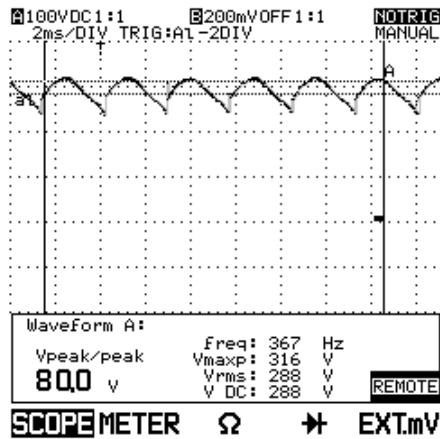
Tabla 8. Porcentajes de error rectificador trifásico.

Angulo α	Tiempo teórico(ms)	Tiempo leído(ms)	%Error
0°	2.7777	2.8	0.8%
30°	4.1666	4.2	0.8%
90°	6.94	6.8	2%

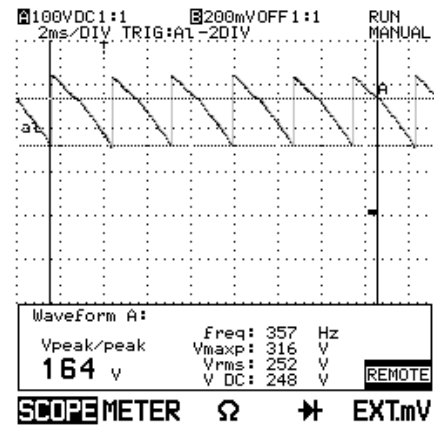
6.4 TENSIÓN DE SALIDA RECTIFICADOR TRIFASICO SEMICONTROLADO Y CONTROLADO (CARGA RESISTIVA).

Figura 46. Tensión en la carga para el rectificador trifásico semicontrolado y controlado(carga resistiva)

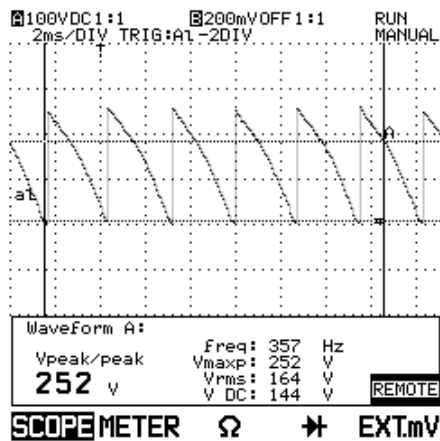
a) $\alpha=5^\circ$, b) $\alpha=30^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$, d) $\alpha=90^\circ$,



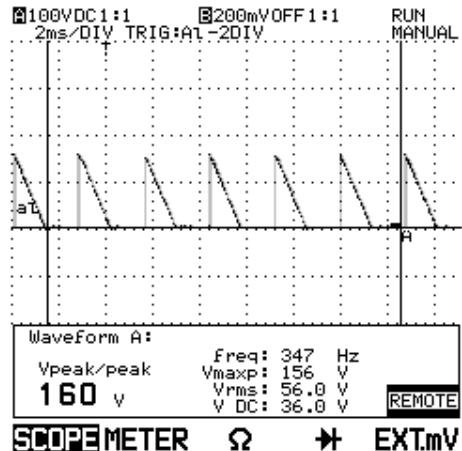
a)



b)



c)



d)

La tensión de salida (V_a) en la carga (ver fig. 10 y fig. 12) para el rectificador trifásico controlado y semicontrolado se muestra en la figura 46, las formas de onda de la tensión en la carga son similares en los dos casos, ya que en el caso semicontrolado a pesar de que hay diodos, estos no entraran en conducción hasta que no se envíe pulso de disparo a los SCR's

correspondientes, por lo cual la forma de onda de salida tendrá la misma forma que en el caso controlado. Las tensiones de entrada V_{an} , V_{bn} , V_{cn} (ver fig.10 y fig. 12) son de aproximadamente 120V RMS, por lo tanto las tensiones de línea corresponden a 240 V RMS aproximadamente. En las graficas se puede observar que dependiendo del ángulo de disparo α enviado a los semiconductores de potencia, la tensión RMS en la carga varia, por ejemplo para $\alpha=5^\circ$ $V_{RMS}=288$ V y para $\alpha=30^\circ$ $V_{RMS}=252$ V de lo cual se puede notar que a medida que se aumenta el ángulo de disparo la tensión RMS en la carga disminuye.

6.5 CONTROL AC MONOFÁSICO CONTROLADO Y SEMICONTROLADO.

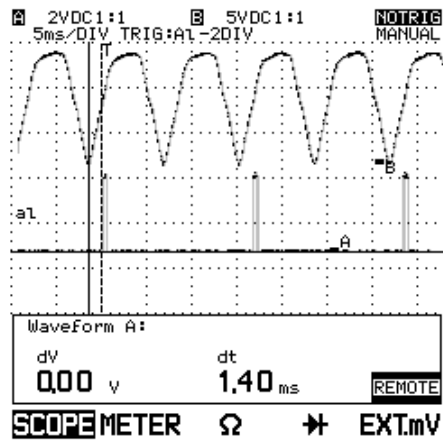
La figura 47 muestra los pulsos de control generados para esta aplicación con respecto de la señal de entrada al detector de cruces por cero; para el caso controlado estos pulsos corresponden al SCR1 (ver fig. 13) que controla el semiciclo positivo de la onda de tensión; para el semiciclo negativo, que es controlado por el SCR2 , los pulsos no aparecen en la gráfica pero son similares solo que están desplazados 180° con respecto a los pulsos del SCR1. En el caso semicontrolado los pulsos mostrados pulsos corresponden también al SCR1 (ver fig. 15), que controla el semiciclo positivo de la onda de tensión, el semiciclo negativo pasa libremente a la carga a través del diodo D1. el porcentaje de error en los ángulos de disparo para este caso se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentajes de error control AC monofásico.

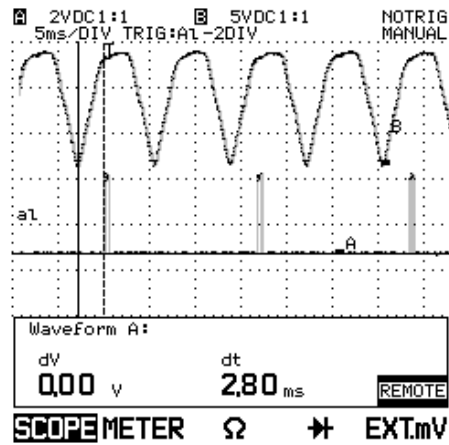
Angulo α	Tiempo teórico(ms)	Tiempo leído(ms)	%Error
30°	1.3888	1.4	0.8%
60°	2.7777	2.8	0.8%
90°	4.1666	4.2	0.8%
150°	6.9444	6.8	2%

Figura 47. Pulsos de control para el control AC monofásico semicontrolado y controlado.

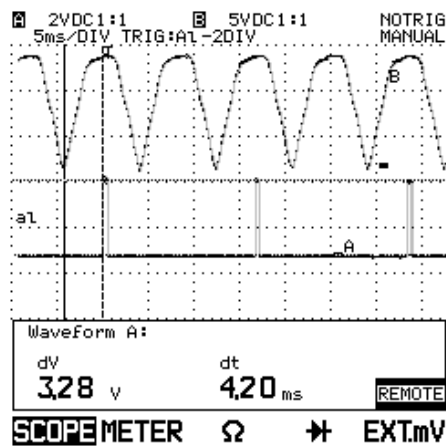
a) $\alpha = 30^\circ$, b) $\alpha = 60^\circ$, c) $\alpha = 90^\circ$, d) $\alpha = 150^\circ$,



a)



b)



c)

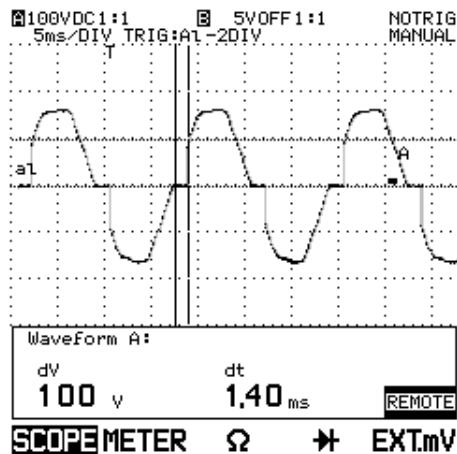


d)

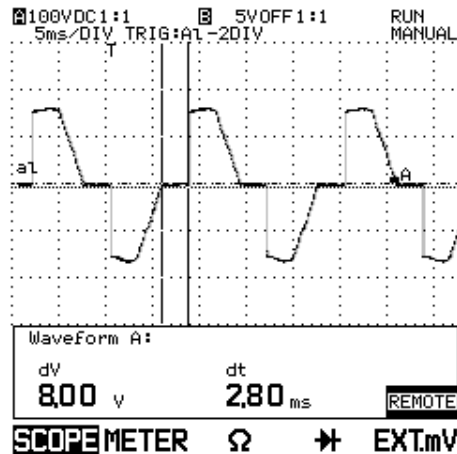
6.6 TENSIÓN DE SALIDA CONTROL AC MONOFÁSICO CONTROLADO (CARGA RESISTIVA).

Figura 48. Tensión de carga para el control AC monofásico controlado

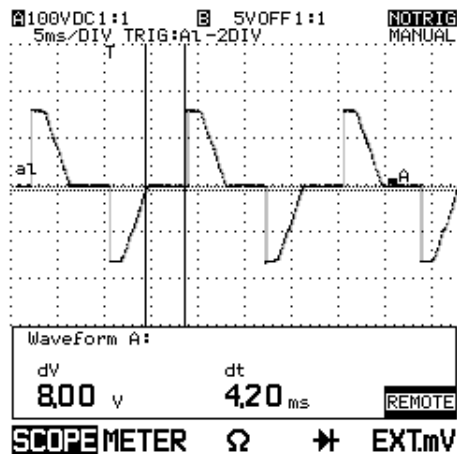
a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$,c) $\alpha = 90^\circ$,d) $\alpha = 150^\circ$,



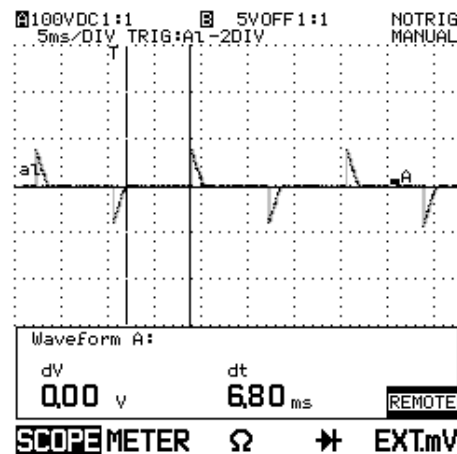
a)



b)



c)



d)

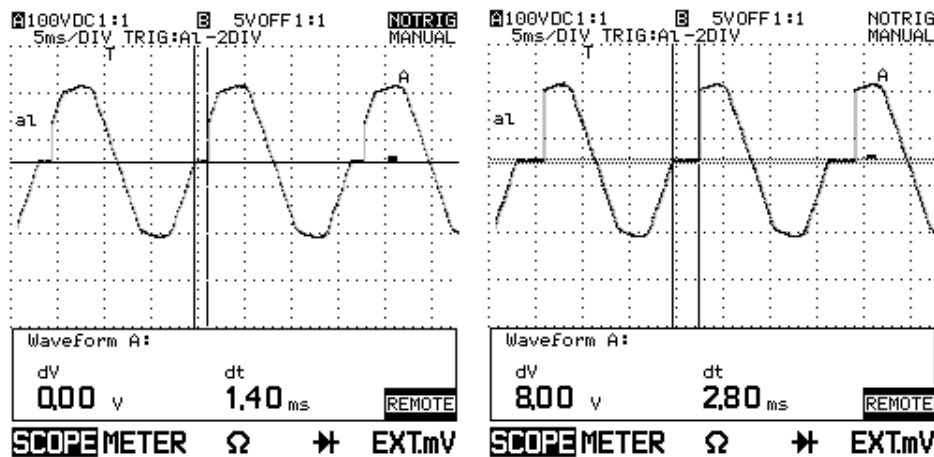
En la figura 48 se observan las formas de onda de salida (V_a)(ver fig. 13) en la carga para una tensión de entrada (V_s) de aproximadamente $120 V_{RMS}$; En las gráficas tomadas con el osciloscopio Fluke (ajustado a 100 V por división)

se puede apreciar que para ángulos menores a 90° se presentan en la carga tensiones pico de aproximadamente 170V, las cuales empiezan a disminuir a medida que se aumenta el ángulo de disparo por encima de este valor. En este caso en particular se puede ejercer control tanto en el, semiciclo positivo como en el negativo, los SCR's conmutan de forma natural en 0° debido a que la carga es netamente resistiva.

6.7 CONTROL AC MONOFÁSICO SEMICONTROLADO

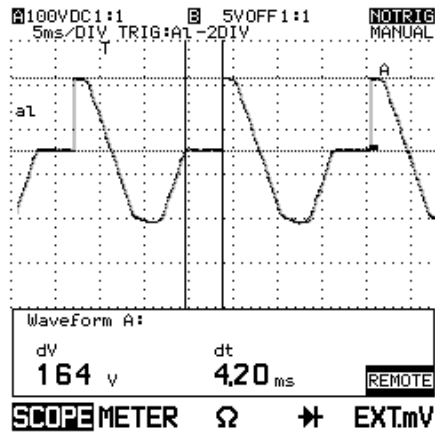
Figura 49. Tensión de salida para el control AC monofásico semicontrolado (carga resistiva)

a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$,c) $\alpha = 90^\circ$,d) $\alpha = 150^\circ$,

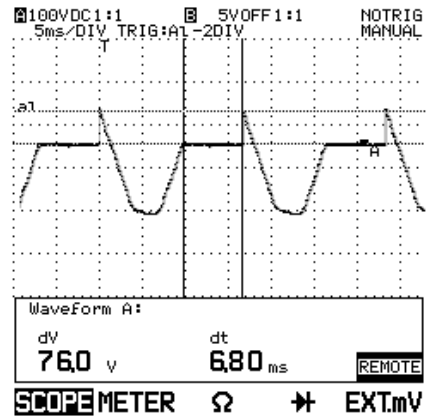


a)

b)



b)



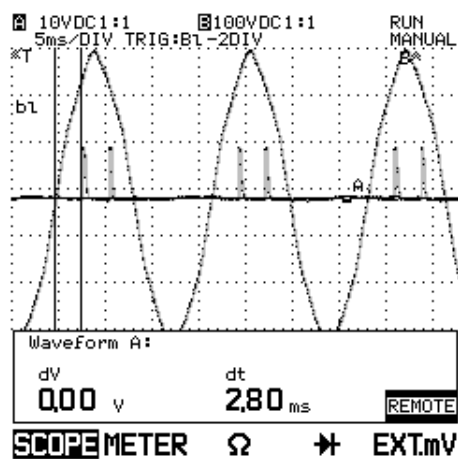
d)

En la figura 49 se pueden apreciar las formas de onda de la tensión de salida (V_a)(ver fig.15) para diferentes ángulos de disparo α ; se puede observar que la tensión en la carga varía de acuerdo al ángulo de disparo proporcionado, pero solo en el semiciclo positivo ya que en el semiciclo negativo el diodo D1 permite el paso de la tensión de entrada V_s durante todo este semiciclo. Se trabaja con una tensión de entrada V_s de aproximadamente $120 V_{RMS}$.

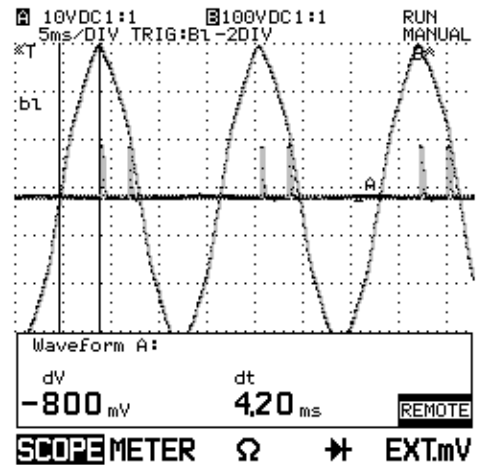
6.8 CONTROL AC TRIFASICO CONTROLADO

Figura 50. Pulsos de control para los diferentes controladores AC trifásicos controlados.

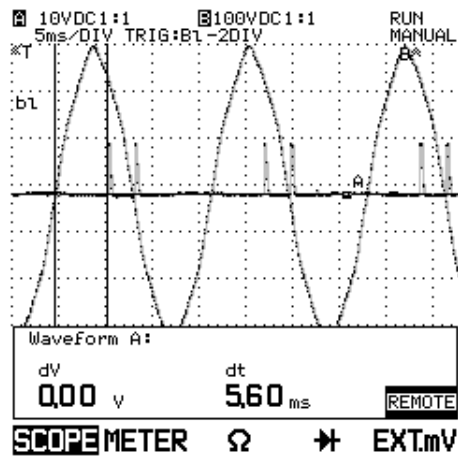
a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha=60^\circ$,c) $\alpha=90^\circ$.



a)



b)



c)

La figura 50 muestra los pulsos de control para los siguientes convertidores:

- Control AC trifásico controlado carga en delta SCR's en la línea.

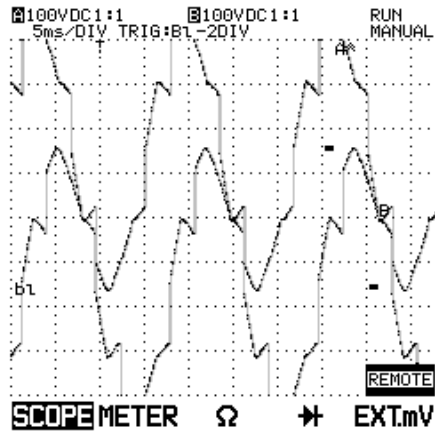
- Control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro.
- Control AC trifásico controlado carga en Y con neutro.

Debido a que con la estrategia de control implementada para los rectificadores trifásicos y los controles AC trifásicos controlados se envían pulsos de disparo a parejas de SCR's, se observan pulsos dobles en la puerta de los SCR's; en este caso los pulsos mostrados corresponden al SCR2 (ver fig. 17, 20 y 22), el primer pulso se envía en el semiciclo positivo de la tensión de fase V_{an} , mientras que el segundo se envía en el semiciclo negativo de la tensión de fase V_{cn} ; este último pulso es redundante puesto que el SCR ya viene conduciendo desde el semiciclo anterior. También se puede notar que hay un desfase de 30° en las gráficas mostradas debido a que en la gráfica aparece una tensión de línea (V_{ab}) y para estos convertidores se toman como referencia las tensiones de fase para generar los pulsos de control.

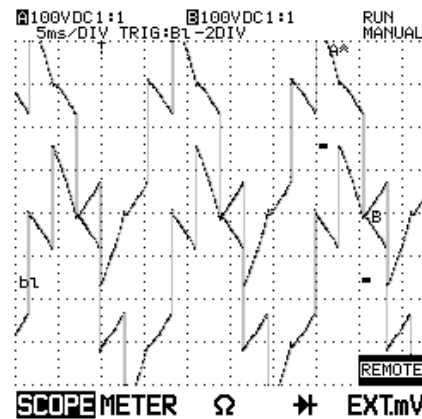
6.8 CONTROL AC TRIFASICO CONTROLADO CARGA EN DELTA SCR'S EN LA LINEA (CARGA RESISTIVA).

Figura 51 tensión de salida para el control AC controlado carga en delta SCR's en la línea (carga resistiva)

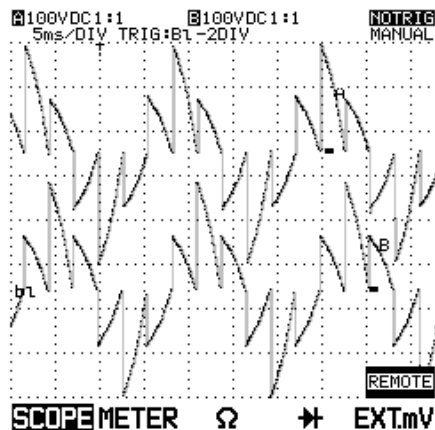
a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$,c) $\alpha = 90^\circ$ d) $\alpha = 120^\circ$



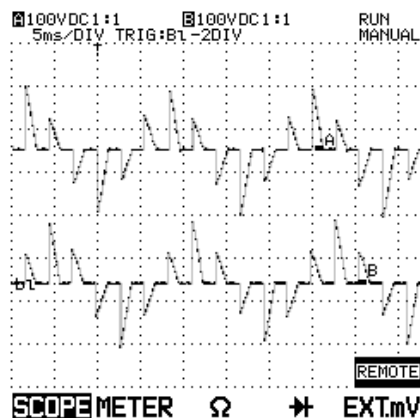
a)



b)



c)



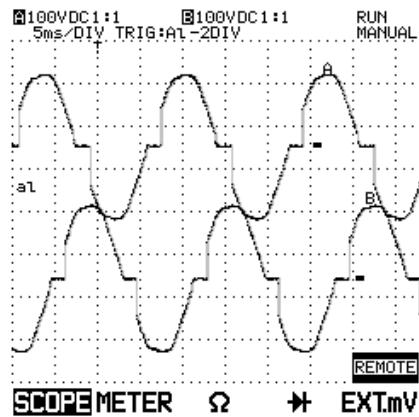
d)

La figura 51 muestra la tensión de salida V_a y V_b (fig. 22), para diferentes ángulos de disparo α , también se puede observar el desfase que existe entre ellas. Las tensiones de fase de entrada V_{an} , V_{bn} , V_{cn} (fig. 22) son de

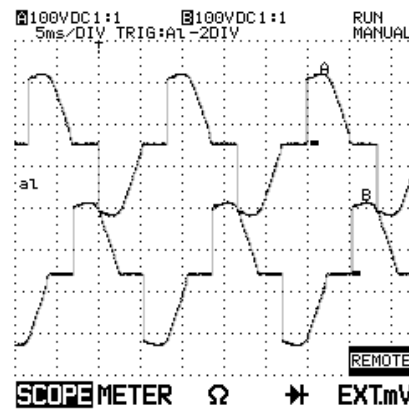
aproximadamente $120 V_{RMS}$, por lo que las tensiones de línea son de aproximadamente $240 V_{RMS}$.

6.9 CONTROL AC TRIFÁSICO CONTROLADO CARGA EN Y CON NEUTRO

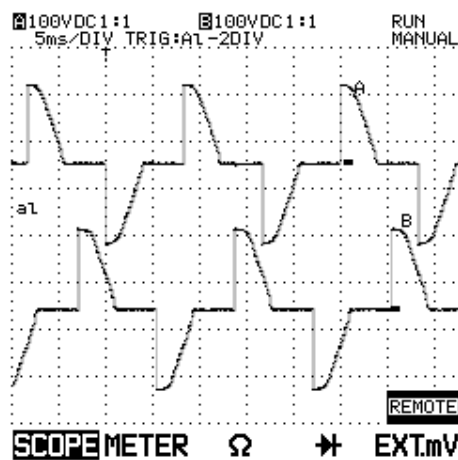
Figura 52. Tensión de salida para el control AC trifásico controlado carga en Y con neutro(carga resistiva). a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha=60^\circ$,c) $\alpha=90^\circ$ d) $\alpha= 120^\circ$



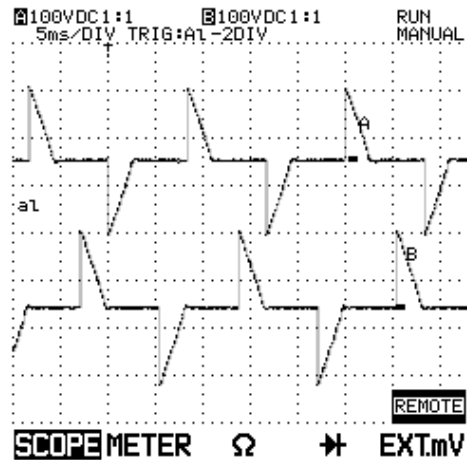
a)



b)



c)



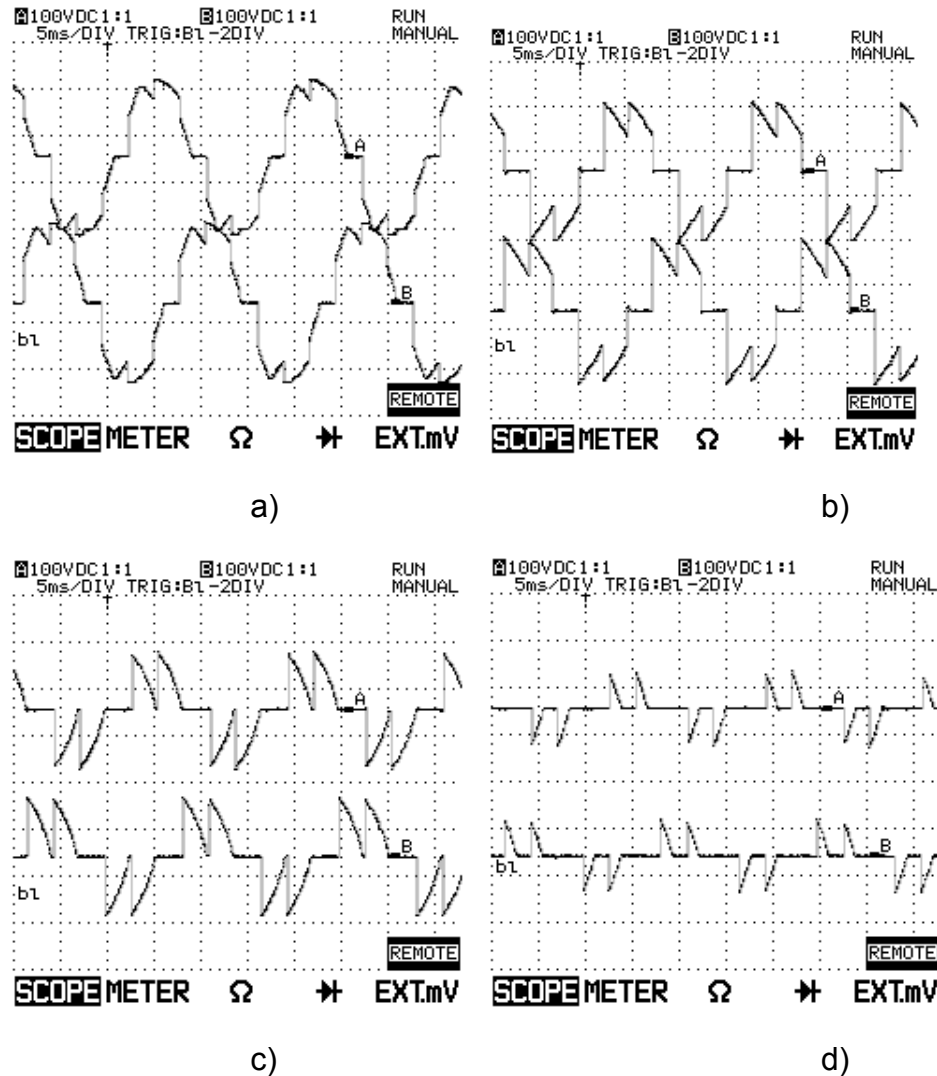
d)

En la figura 52 correspondiente a las pruebas de control AC trifásico controlado carga en Y con neutro, se aprecian las tensiones en la carga a

30°, 60°, 90° y 120°; como es sabido cuando el montaje se realiza con neutro el sistema de control para cada fase en la carga es similar a uno monofásico, en las gráficas tomadas del Fluke se observan las tensiones de fase Van y Vbn (fig. 20) y además podemos notar el desfase entre ellas.

6.10 CONTROL AC TRIFÁSICO CONTROLADO CARGA EN Y SIN NEUTRO

Figura 53. Tensión de salida para el control AC trifásico controlado carga en Y sin neutro (carga resistiva). a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$,c) $\alpha = 90^\circ$ d) $\alpha = 120^\circ$



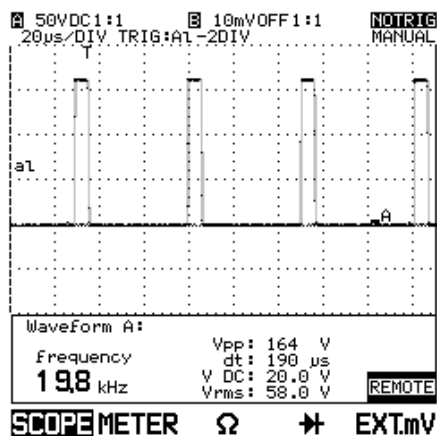
En la figura 53 se observan las tensiones de salida V_a y V_b (fig. 17) para un control AC trifásico controlado con carga en Y sin neutro, las tensiones de entrada V_{an} , V_{bn} , V_{cn} son de aproximadamente 170 Voltios pico (fig.17)

6.11 TROCEADOR

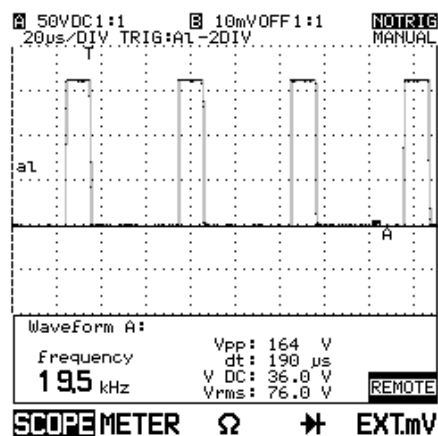
El montaje de la aplicación troceador reductor se realizó a una frecuencia única de 20 KHz variando su ciclo de trabajo de 5% a 95% con incrementos de 1, la figura 54 muestra la tensión de salida V_a (ver fig. 24) en la carga para valores de ciclo de trabajo de 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, y 90% respectivamente, teniendo una tensión de entrada V_{dc} (ver fig. 24) de aproximadamente 160 Vdc.

Figura 54. Tensión de salida para el troceador (carga resistiva)

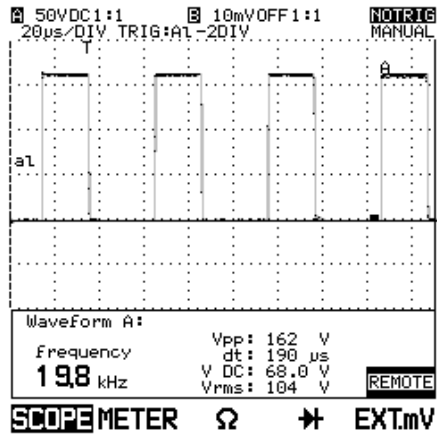
a) $k=10\%$, b) $k=20\%$, c) $k=40\%$ d) $k=60\%$, e) $k=80\%$, f) $k=90\%$.



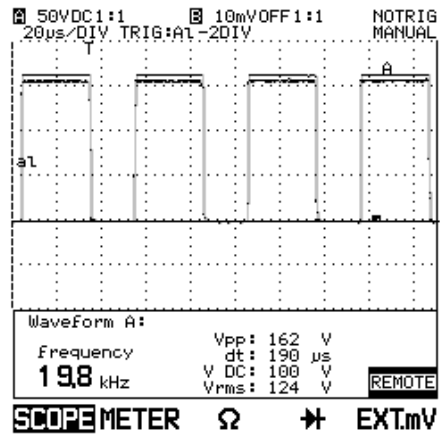
a)



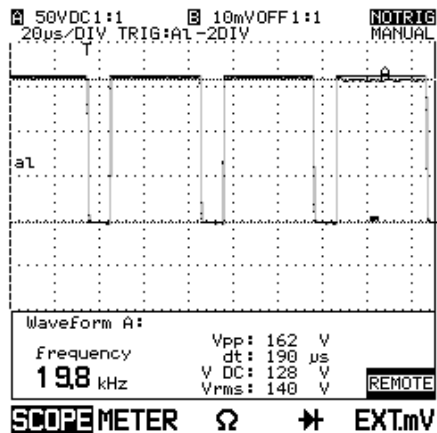
b)



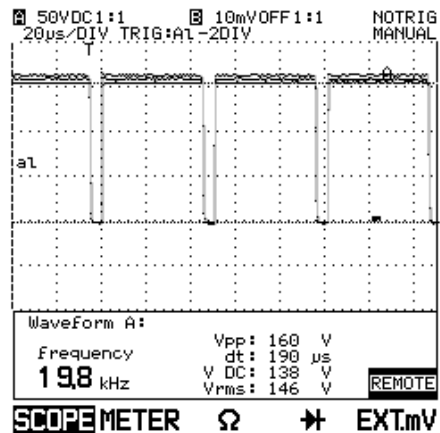
c)



d)



e)



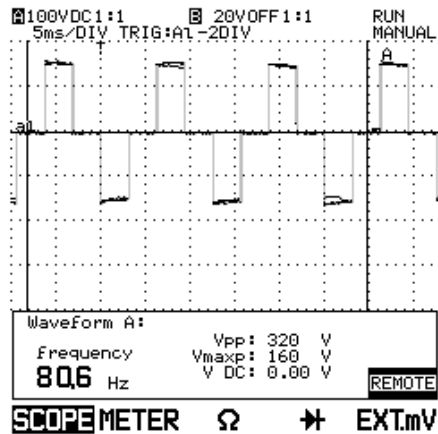
f)

En las graficas de la figura 54, se puede notar que a medida que se aumenta el ciclo de trabajo k , aumenta tanto la tensión DC como la tensión RMS de salida en la carga.

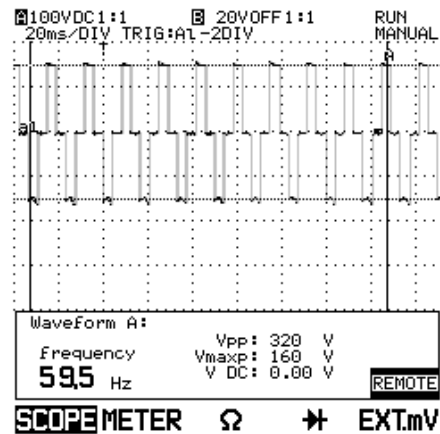
6.12 INVERSOR MONOFASICO

Figura 55. Ciclo de trabajo 50%, variando la frecuencia

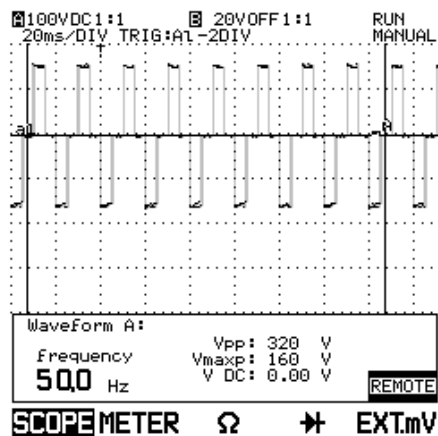
a) $f=80$ Hz, b) $f=60$ Hz, c) $f=50$ Hz, d) $f=40$ Hz, e) $f=20$ Hz



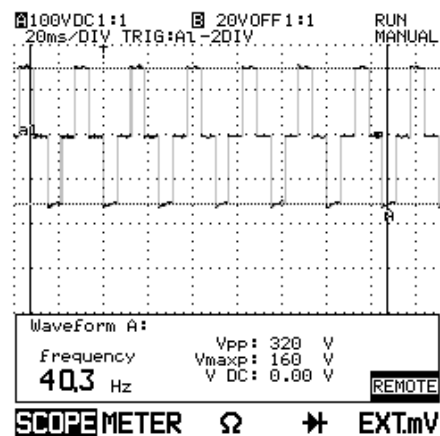
a)



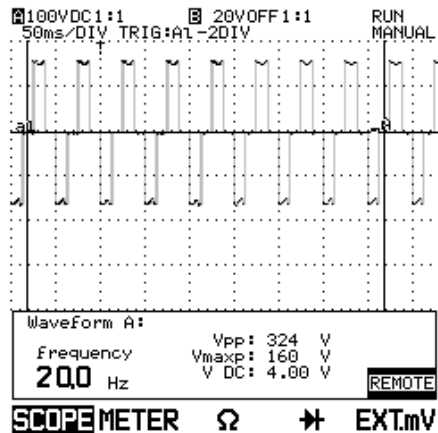
b)



c)



d)



e)

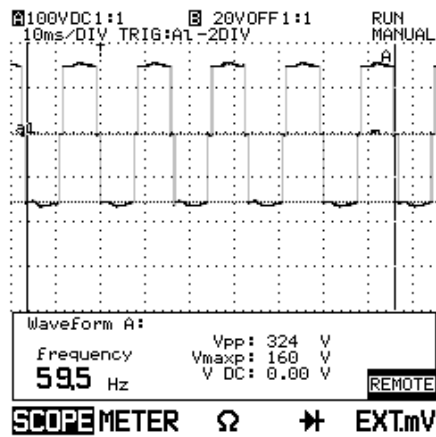
El módulo inversor se implementó con un rango de frecuencia de 10 a 80 Hertz con incrementos de 1 Hertz, el ciclo de trabajo se puede variar en un rango del 5% al 95%. En este convertor se trabajó con un voltaje de entrada Vdc (fig. 26) de aproximadamente 160 Vdc.

La prueba de inversores se realizó primero variando la frecuencia y luego variando el ciclo de trabajo; en la primera parte se implementó un ciclo de trabajo del 50% y se incrementó la frecuencia de 10 a 80 Hertz, en la figura 55 se observa la tensión de salida Va (fig. 26) para valores representativos de frecuencia de 80, 60, 50, 40 y 20 Hertz respectivamente.

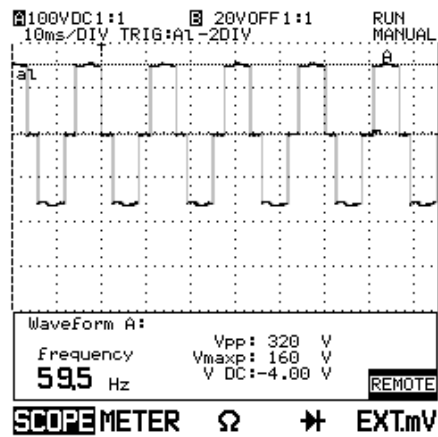
La siguiente prueba se realizó para una frecuencia de 60 Hertz para los mismos 160 Vdc de entrada, variando el ciclo de trabajo, en la figura 56 se observa la tensión de salida Va (fig. 26) para 60 Hz aproximadamente y variando el ciclo de trabajo del 95% al 10%.

Figura 56. Frecuencia constante de 60 Hz, variando el ciclo de trabajo

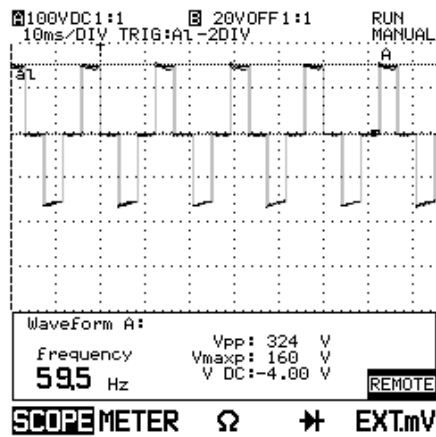
a) $k=95\%$, b) $k=80\%$, c) $k=50\%$, d) $k=30\%$, e) $k=10\%$



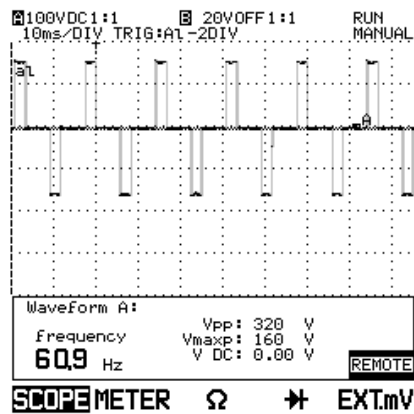
c)



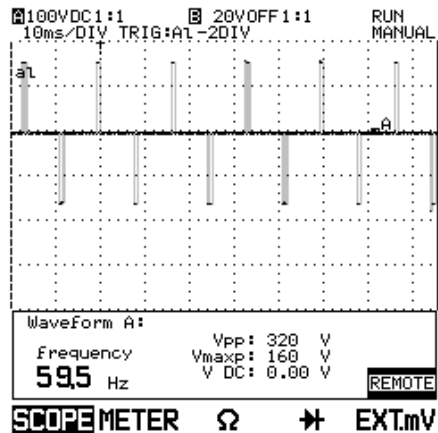
b)



c)



d)



e)

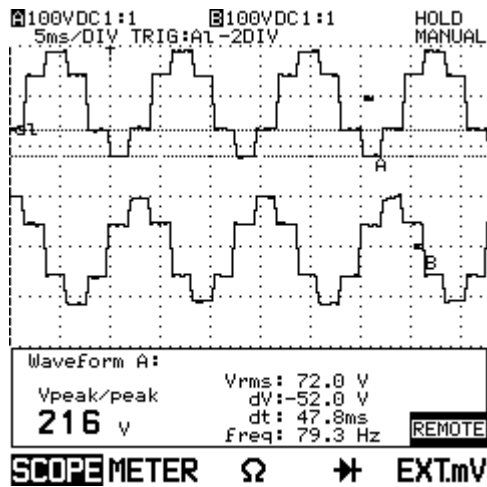
En las gráficas obtenidas de las tensiones de salida se puede para este convertidor se puede observar que se presentan tensiones de aproximadamente 320 voltios pico a pico.

6.13 INVERSOR TRIFÁSICO

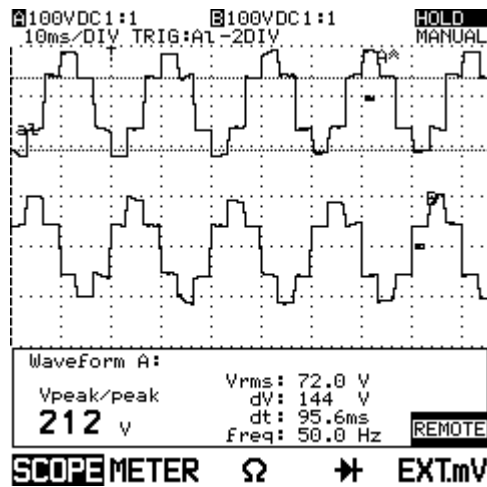
En el caso del inversor trifásico se implementó utilizando la estrategia de conducción 180° (tres mosfets conduciendo en todo momento). Las siguientes gráficas nos muestran la tensión de fase de salida en la carga resistiva (conectada en Y sin neutro) Van y Vbn (fig. 29). La tensión de entrada es de aproximadamente 160 Vdc; se puede observar que se presentan tensiones de aproximadamente 220 V pico a pico; también se puede ver el desfase que existe entre las tensiones de salida.

Figura 57. Tensión de salida del inversor trifásico

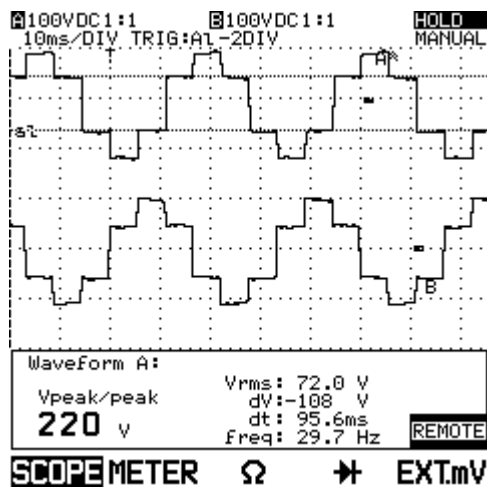
a) $f=80$ Hz, b) $f=50$ Hz, c) $f=30$ Hz, d) $f=10$ Hz



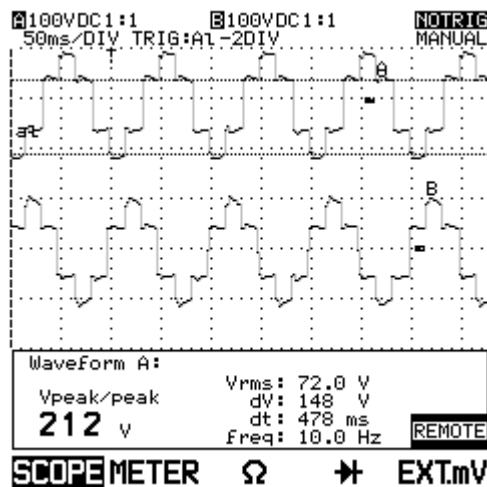
a)



b)



c)



d)

7. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.

1. Se diseñó y construyó un módulo que permite implementar los siguientes convertidores de potencia:

No	Tipo de Conversor
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
14	Inversor monofásico
15	Inversor trifásico

El equipo consta de tres partes que son:

- El módulo de operación y control, el cual consta de dos tarjetas, una que contiene los periféricos (teclado y display) para la interfaz con el usuario, los cuales le permiten ingresar datos y verificar la correcta operación del sistema. la otra tarjeta contiene tres

microcontroladores Motorola (gama baja) que generan, sincronizan y conmutan las señales de control para las puertas de los elementos semiconductores de potencia.

- El módulo de aislamiento de señal de puerta, el cual consta de dos tarjetas que entregan 6 señales aisladas para la puerta de los mosfets y 6 señales aisladas para la puerta de los SCR's.
 - El módulo de potencia que contiene 6 SCR's, 6 mosfets y 6 diodos con sus terminales disponibles en el panel frontal, lo que facilita permiten el cableado para las 15 configuraciones de convertidores.
2. Los periféricos(teclado y display) se implementaron para que el módulo tenga un manejo autónomo y no dependa exclusivamente de un computador para su operación; se diseñó e implementó un sistema operativo que facilita la configuración de los esquemas de forma fácil e intuitiva, empleando para ello menús y submenús que permiten navegar hasta seleccionar la opción deseada y asignarle sus parámetros.
 3. La implementación por separado de un sistema operativo y un sistema para el control permite actualizar los datos del convertidor(variar ángulo de disparo, variar ciclo de trabajo o variar frecuencia) sin tener que detener el sistema mientras se están digitando los nuevos datos para el convertidor.
 4. El desarrollo del sistema para el control se hizo empleando tres microcontroladores (gama baja), esto permite la implementación de un sistema monofásico hasta un sistema trifásico, facilitando el sensado de las corrientes y así poder realizar la protección del módulo de una forma discriminada para cada una de las fases, usando para este propósito los convertidores análogo/digital de los microcontroladores.

5. Se desarrolló un sistema de conmutadores digitales controlados por microcontroladores que permiten optimizar el sistema de control facilitando la operación de los 15 convertidores con un máximo de 6 optocouplares para el manejo de los disparos de puerta tanto de los mosfets como de los SCR's.
6. La comunicación bidireccional entre la tarjeta del sistema operativo y la tarjeta del sistema de control permite confirmar que la transmisión de datos ha sido exitosa y en caso contrario por problemas de hardware le indique al usuario a través de un mensaje de pantalla que hay problemas en la comunicación. También está implementado en caso de se encuentre en operación la tarjeta de control y se presente una condición de reset en cualquiera de los 3 microcontroladores le informe al usuario a través de un mensaje de pantalla.
7. Se implementó un circuito que permite aislar las señales de control de las señales de puerta de los mosfets y de los SCR's con un solo circuito integrado de aislamiento. El manejo de los SCR's y los mosfets por separado es necesario debido a que los mosfets son controlados por niveles de tensión mientras que los SCR's son manejados por niveles de corriente, por tal motivo sería necesario colocar por lo menos 12 optocouplares. Esta tarjeta permite que con solo 6 optocouplares se pueda manejar 6 SCR's y 6 mosfets.
8. Para el diseño de las estrategias de control para los convertidores AC-DC y los convertidores AC-AC se implementaron circuitos externos para la sincronización (circuito cruce por cero y ventana de polaridad) que proporcionan la referencia de la inicialización del timer en la generación de las señales de control para los elementos semiconductores de

potencia. La señal enviada por el detector de cruce por cero introduce un error en la generación de los pulsos de control debido a que el ancho del pulso de esta señal está condicionado al nivel de referencia(ver fig. 34); por lo cual esta señal se presentara aproximadamente 200 microsegundos antes del cruce por cero real de la onda de tensión; esta condición limita el disparo de los SCR's en los limites cercanos a cero grados(± 5 grados).

9. Para el diseño de las estrategias de control para los convertidores DC-AC se implementaron por software 2 tablas en las cuales están los valores equivalentes en tiempo para la generación de las señales de puerta a la frecuencia deseada, y la secuencia de encendido y apagado para los elementos semiconductores.
10. Para el convertidor DC-DC se utilizo el módulo PWM del microcontrolador JL3 para generar los pulsos a un ciclo de trabajo definido por el usuario.
11. Para verificar los porcentajes de error en los ángulos de disparo del sistema de control se hace una comparación entre las señales tomadas con el osciloscopio digital Fluke modelo 99B comparado con el tiempo del valor teórico para diferentes valores de ángulos(ver capítulo 6)

$$\%Error = ((\text{valor teórico} - \text{valor experimental}) / \text{valor teórico}) * 100$$

Para 30°

$$\%Error = ((1.3888 - 1.4) / 1.3888) * 100 = 0.8\%$$

Para 60°

$$\%Error = ((2.7777 - 2.8) / 2.7777) * 100 = 0.8\%$$

Para 90°

$$\%Error = ((4.1666-4.16)/4.1666)*100= 0.15\%$$

Para 120°

$$\%Error = ((5.5555-5.6)/5.5555)*100= 0.8\%$$

Para 150°

$$\%Error = ((6.9444-6.8)/6.9444)*100= 2\%$$

- Nota: La lectura en el osciloscopio está condicionada a la localización manual de los cursores que facilita el osciloscopio, haciendo que esta lectura sea subjetiva.

12. los elementos semiconductores de potencia adquiridos en el mercado nacional se sobredimensionaron en tensión, debido a que las características de fabricación no corresponden con las reales por lo cual entraban en conducción sin haberse dado pulso de puerta.

13. Debido a la implementación de los pulsos en forma de aguja para los convertidores AC-DC y AC-AC se presentan limitaciones en los casos en los cuales es necesario enviar pulso sostenido a los semiconductores.

8. BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS

[1]RASHID Muhammad. *Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1995. Capítulos 1, 4, 5 y 6.en donde se encuentran las técnicas de conversión, las características de los dispositivos y las principales aplicaciones de la electrónica de estado sólido en el control y la conversión de la energía eléctrica.

[2]PLATA CORDERO José Gabriel. *Conferencia de Electrónica Industrial*. Bucaramanga: 1984. Capítulos 2, 7 y 8, donde se presenta una descripción concreta del comportamiento, características y especificaciones de los elementos semiconductores de potencia; así como una exposición práctica de algunas de las principales aplicaciones, proporcionando un enfoque funcional de los circuitos de potencia.

[3]MOTOROLA. CENTRAL PROCESOR UNIT CPU08. MANUAL REV2.PHOENIXARIZONA USA. MOTOROLA LITERATURE DISTRIBUTION 08/96.

[4]“Analysis and desing of snuber circuits for high power converter”
J.H.R. Enslin. IEEE EPMC 1999. Contiene información de los cálculos para los circuitos de protección para tiristores.

TESIS

[5]AMAYA REYES Rafael Mauricio y ANGEL SILVA Miguel angel. Troceador de cuatro cuadantes. Circuito de control con microcontrolador. Bucaramanga,1998. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electronica y Telecomunicaciones.

[6]ARDILA BAUTISTA Nolbey Antonio y OLAYA ARGÜELLO Carmen Cecilia. Puente Rectificador y Control A.C de línea. Bucaramanga,2001. Trabajo de grado (Ingenieros Electricistas). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electronica y Telecomunicaciones.

[7]DIAZ Oscar. Generador de armónicos. Bucaramanga,1999. Trabajo de grado (Ingenieros Electricistas). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electronica y Telecomunicaciones.

[8]FORERO Ruben Dario y NUÑEZ Luis Carlos. Inversores y Troceadores. Bucaramanga,2001. Trabajo de grado (Ingenieros Electricistas). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electronica y Telecomunicaciones.