



INSTITUTO TECNOLÓGICO

DE CD. MADERO

Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica



Dirección General de Educación Superior Tecnológica

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“INVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO POR SCR´s”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. ADRIÁN VÁZQUEZ VÁZQUEZ

ASESOR:

M.C. AARÓN GONZÁLES RODRÍGUEZ.

CD. MADERO, TAM. MÉXICO.

DICIEMBRE 2007.

SEP



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD. MADERO

Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica



Dirección General de Educación Superior Tecnológica

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“INVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO POR SCR´s”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA

ADRIÁN VÁZQUEZ VÁZQUEZ

MIEMBROS DEL JURADO:

PRESIDENTE:	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ.
SECRETARIO:	M.C. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
VOCAL:	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS GUTIÉRREZ
SUPLENTE:	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

CD. MADERO, TAM. MEXICO A 14 DE NOVIEMBRE DE 2007₂



D.I.

Instituto Tecnológico de Cd. Madero

Cd. Madero, Tam. a 04/Diciembre/2007

Área: Posgrado
Nº oficio: U2.372/07
Asunto: Autorización de Impresión de tesis

C. ING. ADRIÁN VÁZQUEZ VÁZQUEZ
Presente.

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"INVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO POR SCR's"

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

Atentamente
"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

Mra. Yolanda Chávez Cisneros
M.P. María Yolanda Chávez Cisneros
Jefa de la División



S.E.P.
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION
I T C M

MYCHC  cerc*

“INVERSOR TRIFASICO CONTROLADO POR SCR´s”

Adrián Vázquez Vázquez

Resumen

En la actualidad, para la elaboración de circuitos que conviertan la corriente directa en corriente alterna se ha dejado en desuso la utilización de SCR´s ya que al utilizarlos se encuentran con un problema para llevarlo al estado de apagado, con ello se hace más fácil el ocupar otros dispositivos menos complicados para dicha aplicación.

Sin embargo esto no quiere decir que al emplear otros dispositivos tengan la misma característica que un SCR, por lo contrario se pierde la capacidad de llevar al inversor trifásico a soportar un voltaje en el SCR de hasta 7 KV y una corriente de 2000-3000 A [3] y quedar limitados en un rango en la carga mucho menor al del SCR.

Se ve la necesidad de diseñar un inversor trifásico controlado por SCR´s para poder así dar una idea del circuito de disparo y paro del SCR, para cuando se requiera manejar corrientes y voltajes como los mencionados anteriormente en las que otros dispositivos quedan incapaces de ser utilizados.

Con esto dar la pauta a seguir en la fabricación de inversores tomando de nueva cuenta las propiedades del SCR haciendo así un inversor trifásico de mayor rango ha utilizarse.

En memoria de DR. EMANUEL DEL ÁNGEL CERVANTES a quien fue mi padre espiritual y doy gracias por todos sus consejos y ejemplo a seguir.

En memoria de Enfra. Irene Vázquez Escobar, por su ejemplo de servicio a toda la familia.

“No que seamos competentes por nosotros mismo para pensar algo como de nosotros mismos, sino que nuestra competencia proviene de Dios”

2 de Corintios 3:5

Agradecimientos:

A Dios que siempre esta conmigo en todo momento. A mis padres que siempre me han instruido para ser responsable, trabajador, sincero y honesto en todos momentos de mi vida. A mis hermanos que me abrieron camino para transitar terrenos que eran desconocidos para mí. A mis maestros que me enseñaron todo cuanto estuvo de su parte, en especial a mi asesor el M.C. AARON GONZALEZ RODRIGUEZ por su paciencia y todos sus consejos.

“Y aquel que es poderoso para hacer todas las cosas mucho mas abundantes de lo que pedimos o entendemos, según el poder de actuar en nosotros, a el sea gloria en la iglesia en Cristo Jesús por todas las edades, por los siglos de los siglos. Amen “

Efesios 3:20,21

Adrián Vázquez Vázquez

Índice.

Página

Capítulo 1: Introducción

1.1.	ANTECEDENTES.	9
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	9
1.3.	JUSTIFICACIÓN.	10
1.4.	HIPÓTESIS.	10
1.5.	OBJETIVO GENERAL.	11
1.5.1.	OBJETIVOS PARTICULARES.	11
1.6.	LIMITACION.	11
1.7.	DELIMITACION.	12

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1.	EL SCR	14
2.1.1.	DEFINICIÓN.	14
2.1.2.	ESTRUCTURA.	14
2.1.3.	CURVA CARACTERÍSTICA Y FUNCIONAMIENTO.	16
2.1.4.	CARACTERÍSTICAS GENERALES.	17
2.1.4.1.	CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS.	18
2.1.4.2.	CARACTERÍSTICAS DE CONTROL.	19
2.1.4.3.	CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS.	21
2.1.4.4.	CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN.	23
2.1.4.5.	CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS.	26
2.1.5.	MÉTODOS DE DISPARO.	26
2.1.6.	EXTINCIÓN DEL TIRISTOR. TIPOS DE CONMUTACIÓN. ..	30
2.1.7.	APLICACIONES DEL SCR.	31
2.2.	INVERSORES	33
2.2.1.	EL CONVERTIDOR EN PUENTE DE ONDA COMPLETA....	33
2.2.2.	EL INVERSOR DE ONDA CUADRADA.	35
2.2.3.	EL INVERSOR EN MEDIO PUENTE.	39
2.2.4.	INVERSORES TRIFÁSICOS.	41
2.2.4.1.	CONDUCCION A 120 GRADOS.	44

Capítulo 3: Desarrollo del Proyecto.

3.1.	DISEÑO DEL INVERSOR.	49
3.2.	ELECCION DEL CONTROLADOR.	55
3.3.	SEÑALES DE DISPARO.	58
3.3.1.	SEÑAL DE 5000 HZ	59
3.3.2.	SEÑAL DE 60 HZ	60
3.4.	PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 8535.	65
3.4.1.	HERRAMIENTAS REQUERIDAS.	65
3.4.2.	ARQUITECTURA DEL SOFTWARE.	65

Capítulo 4: Construcción del Proyecto.

4.1.	Etapa de Control	77
4.1.1.	ACOPLAMIENTO DE LA SEÑAL DIGITAL.	77
4.1.2.	TRANSFORMADOR DE PULSOS.	78
4.1.3.	DIAGRAMA DE ALAMBRADO.	79
4.2.	ETAPA DE POTENCIA.	81
4.2.1.	SCR AUXILIARES	81
4.2.2.	SCR PRINCIPALES.	82

Capítulo 5 Pruebas y Conclusiones.

5.1.	PRUEBAS Y CONCLUSIONES	
5.1.1.	RUEBAS AL INVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO POR SCR'S	84
5.1.2.	CONCLUSIONES	88
5.1.3.	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	
	BIBLIOGRAFIA:.....	89

Lista de Figuras

		<i>Página</i>
Figura 2..1	Símbolo del SCR.	14
Figura 2.2.	Estructura básica del SCR.	15
Figura 2.3.	Curva característica del SCR.	16
Figura 2.4.	Curva características de puerta del tiristor.	20
Figura 2.5.	Curva de limitación de impulsos de corriente.	22
Figura 2.6.	Ángulo de bloqueo y conducción de un tiristor.	23
Figura 2.7	Tiempo de encendido.	24
Figura 2.8.	Tiempo de apagado.	25
Figura 2.9.	Circuito de control por puerta de un SCR.	27
Figura 2.10.	Recta tangente a la curva de máxima disipación de potencia.	28
Figura 2.11.	Zona de disparo por gradiente de tensión.	29
Figura 2.12	Convertidor de C.D. a C.A. tipo puente completo monofásico	33
Figura 2.13.	Circuitos equivalentes de las combinaciones de interruptores.	34
Figura 2.14	Convertidor en medio puente	40
Figura 2.15	Inversores monofásicos tipo puente en paralelo	41
Figura 2.16.	Circuito con tres transformadores monofásicos, 12 interruptores y 12 diodos	42
Figura 2.17	Inversor tipo puente trifásico.	43
Figura 2.18	Conducción a 120°.	44
Figura 2.19	Modos de operación en un medio ciclo	45
Figura 3.1.	Diagrama esquemático de un inversor trifásico operando un motor de inducción conectado en estrella.	50
Figura 3.2	Operación cíclica del circuito en puente de los SCR	51
Figura 3.3.	Formas de onda de Voltaje (y corrientes) de los devanados.	52
Figura 3.4	Circuito de apagado del SCR.	53
Figura 3.5.	Circuito de disparo / apagado.	54
Figura 3.6	Diagrama del PIC 16F84A.	55
Figura 3.7.	Fotografía del Microcontrolador ATMEGA8535.	56
Figura 3.8.	Estructura interna del Microcontrolador ATMEGA8535.	58
Figura 3.9.	Señal de 5000 Hz.	59
Figura 3.10.	Señal de 5000 Hz en ms.	60
Figura 3.11.	Señal de 5000 Hz periódica.	60
Figura 3.12.	Señal multiplexada en los intervalos.	62
Figura 3.13.	Señales de disparo de los SCR para sentido positivo.	63
Figura 3.14.	Señales de disparo de los SCR para sentido negativo.	64
Figura 4.1	MJE 13007A.	77
Figura 4.2.	Barra de ferrita.	78
Figura 4.3.	Dona de ferrita.	78
Figura 4.4.	Alambrado del circuito de control.	79
Figura 4.5.	Circuito de control.	80

Figura 4.6.	SCR C 106D.	81
Figura 4.7.	SCR TIC106D.	82
Figura 5.1.	Motor Jaula de ardilla de ¼ de hp.	84
Figura 5.2.	Motor Jaula de ardilla de ¼ de hp vista aérea.	85
Figura 5.3.	Conexión del Circuito de control al Motor Jaula de ardilla de ¼ de H.P	86
Figura 5.4.	Microcontrolador conectado a los Transistores	87
Figura 5.5.	Conexión de los transformadores de Pulso a los SCR's.	88

Capítulo

1

Introducción

1.1. ANTECEDENTES [1].

Los inversores son circuitos que convierten la corriente continua en corriente alterna. Más exactamente, los inversores transfieren potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna.

Los convertidores en puente de onda completa pueden funcionar como inversores en algunos casos, pero en esos casos deben preexistir una fuente de alterna. En otras aplicaciones, el objetivo es crear una tensión alterna cuando sólo hay disponibles una fuente de tensión continua.

Los inversores se utilizan en aplicaciones tales como motores de alterna de velocidad ajustable, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) y dispositivos de corriente alterna que funcionen a partir de una batería de automóvil.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad, para la elaboración de circuitos que conviertan la corriente directa en corriente alterna se ha dejado en desuso la utilización de SCR's ya que al utilizarlos se encuentran con un problema para llevarlo al estado de apagado, con ello se hace más fácil el ocupar otros dispositivos menos complicados para dicha aplicación.

Sin embargo esto no quiere decir que al emplear otros dispositivos tengan la misma característica que un SCR, por lo contrario se pierde la capacidad de llevar al inversor trifásico a soportar un voltaje en el SCR de hasta 7 KV y una corriente de 2000-3000 A [3] y quedar limitados en un rango en la carga mucho menor al del SCR.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Se ve la necesidad de diseñar un inversor trifásico controlado por SCR's para poder así dar una idea del circuito de disparo y paro del SCR, para cuando se requiera manejar corrientes y voltajes como los mencionados anteriormente en las que otros dispositivos quedan incapaces de ser utilizados.

Con esto dar la pauta a seguir en la fabricación de inversores tomando de nueva cuenta las propiedades del SCR haciendo así un inversor trifásico de mayor rango ha utilizarse.

1.4. HIPÓTESIS.

H1.- Es posible diseñar y construir un inversor trifásico robusto y confiable con el empleo de SCR's como elementos finales de control.

H2.- Se podrá diseñar un circuito capaz de controlar el encendido y el apagado de un SCR para la elaboración de un inversor trifásico.

H3.- El tiempo de apagado y encendido será el suficiente para que el SCR genere la señal trifásica.

H4.- Se podrán dejar las bases del circuito de control para que en caso de necesitar llevar al SCR a controlar corrientes y voltajes diferentes se pueda escalar el circuito.

H5.- Es posible modificar la secuencia de disparo de los tiristores, de tal manera que cuando la carga fuese un motor trifásico, se invierta su sentido de rotación sin cambiar las conexiones del motor al inversor.

1.5. OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y construir un inversor trifásico utilizando SCR's proponiendo un circuito de control capaz de encender y apagar un SCR dando una idea de control para posibles aplicaciones en la que se requiera utilizar una corriente y un voltaje que solo el SCR puede soportar. Y a su vez modificar la secuencia de disparo de los tiristores, en el caso que la carga fuese un motor trifásico, para invertir el sentido de rotación sin cambiar las conexiones del motor al inversor.

1.5. OBJETIVO PARTICULAR.

Dar al estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, en especial en las materias de Electrónico de Potencia y Convertidores Estáticos de Potencia una idea de la utilización de los SCR's en un inversor trifásico.

Proveer las bases para aplicaciones futuras en las que los dispositivos de control queden limitados en corriente y voltaje y solo la utilización del SCR cumpla los requerimientos para tal aplicación.

1.6. LIMITACION.

Aunque la teoría presentada en este trabajo, puede y debe ser mejor aplicada para el caso de cargas trifásicas que requieran voltajes y corrientes grandes, sin embargo, por cuestiones técnicas y económicas, la carga que se manejará será un motor trifásico jaula de ardilla de $\frac{1}{4}$ H.P.; con un voltaje de alimentación de 220 V y una corriente nominal de 1.6 A. El motor debe tener sus devanados conectados en estrella y el centro de la estrella debe estar disponible.

1.7. DELIMITACION.

Se pretende diseñar y construir un prototipo para comprobar el funcionamiento de un modelo de inversor trifásico a base de tiristores para un motor con sus devanados conectados en estrella; con un esquema que reduce el número de componentes en el circuito de potencia.

Capítulo

2

Marco Teórico

2.1. EL SCR. [15]

2.1.1. DEFINICIÓN.

El SCR (Silicon Controlled Rectifier o Rectificador Controlado de Silicio, como se muestra en la Figura 2.1), es un dispositivo semiconductor biestable formado por tres uniones pn con la disposición pnpn como se observa en la figura 2.2. Está formado por tres terminales, llamados Ánodo, Cátodo y Puerta. La conducción entre ánodo y cátodo es controlada por el terminal de puerta. Es un elemento unidireccional (sentido de la corriente es único), conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez.

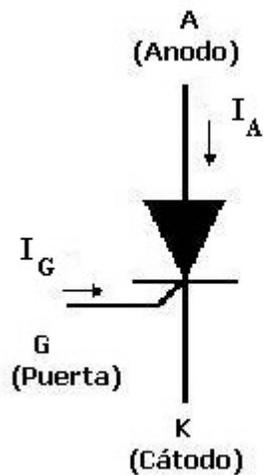


Figura 2..1 Símbolo del SCR.

2.1.2. ESTRUCTURA.

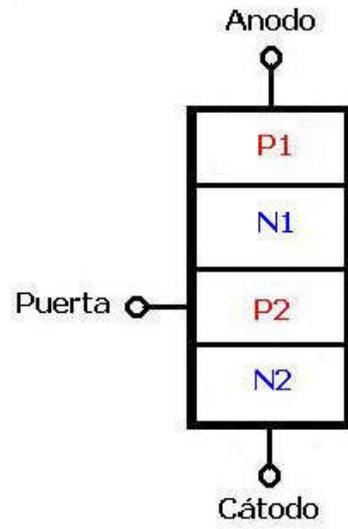


Figura 2.2. Estructura básica del SCR.

2.1.3. CURVA CARACTERÍSTICA Y FUNCIONAMIENTO.

La curva característica del SCR es la representada en la figura 2.3:

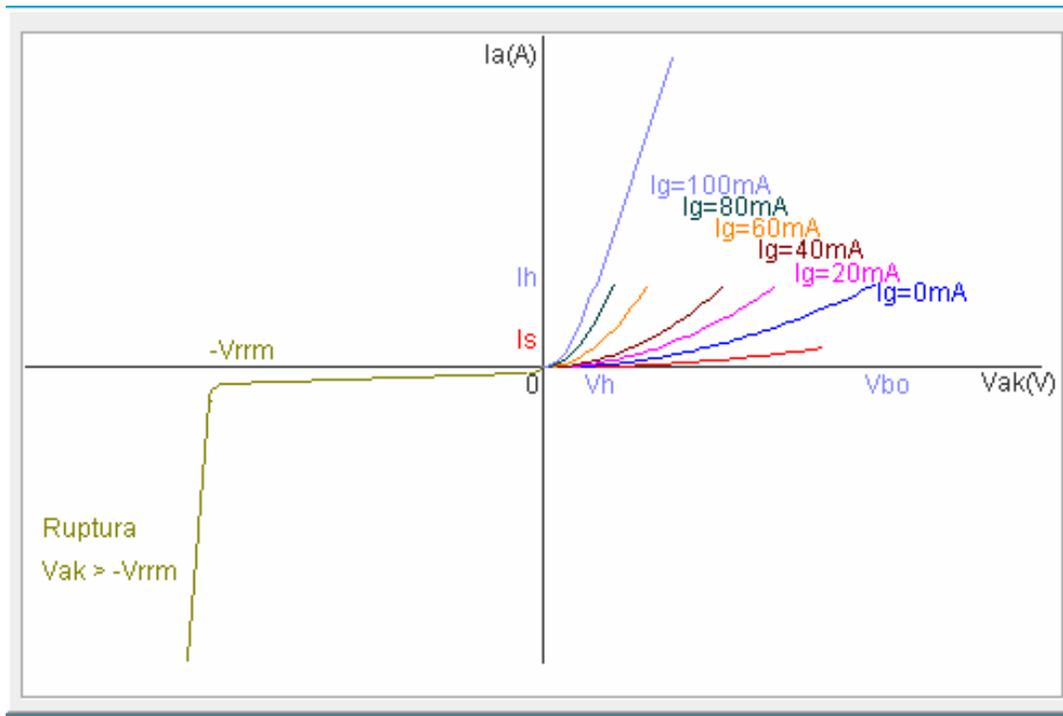


Figura 2.3.. Curva característica del SCR.

En la figura 2.3 se muestra la curva característica típica de un tiristor SCR, representándose la corriente de ánodo (I_a) en función de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo (V_{ak}). Cuando la tensión V_{ak} es nula, también lo es la intensidad de corriente I_a . Al aumentar dicha tensión en sentido directo, con corriente de puerta nula, si se supera la tensión V_{bo} , la transición de estado OFF a ON deja de ser controlada. Si se desea que el paso al estado "ON" se realice para tensiones V_{ak} inferiores a V_{bo} , será necesario dotar al dispositivo de la corriente de puerta (I_g) adecuada para que dicha transición se realice cuando la intensidad de ánodo supere la intensidad de enganche (I_L). Por el contrario, si el dispositivo está en conducción, la transición al estado "OFF" se produce cuando la corriente

de ánodo caiga por debajo de la intensidad de corriente de mantenimiento (I_h).

Tanto para el estado de bloqueo directo, como para el estado de polarización inversa, existen unas pequeñas corrientes de fugas. Cuando se polariza inversamente se observa una débil corriente inversa (de fuga) hasta que alcanza el punto de tensión inversa máxima que provoca la destrucción del mismo.

El SCR es, por tanto, un dispositivo conductor solo en el primer cuadrante, en el cual el disparo se provoca por:

- Tensión suficientemente elevada aplicada entre ánodo y cátodo,
- Intensidad en la puerta. Se puede controlar así la tensión necesaria entre ánodo y cátodo para la transición OFF \rightarrow ON, usando la corriente de puerta adecuada.

2.1.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES.

- Interruptor casi ideal.
- Soporta tensiones altas.
- Amplificador eficaz.
- Es capaz de controlar grandes potencias.
- Fácil controlabilidad.
- Relativa rapidez.
- Características en función de situaciones pasadas (memoria).

2.1.4.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS.

Las características estáticas corresponden a la región ánodo - cátodo y son los valores máximos que colocan al elemento en límite de sus posibilidades:

- Tensión inversa de pico de trabajo: VRWM
- Tensión directa de pico repetitiva: VDRM
- Tensión directa: VT
- Corriente directa media: ITAV
- Corriente directa eficaz: ITRMS
- Corriente directa de fugas: IDRМ
- Corriente inversa de fugas: IRRM
- Corriente de mantenimiento: IH

Las características térmicas a tener en cuenta al trabajar con tiristores son:

- Temperatura de la unión: Tj
- Temperatura de almacenamiento: Tstg
- Resistencia térmica contenedor-disipador: Rc-d
- Resistencia térmica unión-contenedor: Rj-c
- Resistencia térmica unión-ambiente.....: Rj-a
- Impedancia térmica unión-contenedor.....: Zj-c

2.1.4.2. CARACTERÍSTICAS DE CONTROL.

Corresponden a la región puerta-cátodo y determinan las propiedades del circuito de mando que responde mejor a las condiciones de disparo. Los fabricantes definen las siguientes características:

- Tensión directa máx.: VGFM
- Tensión inversa máx.: VGRM
- Corriente máxima.....: IGM
- Potencia máxima: PGM
- Potencia media: PGAV
- Tensión puerta-cátodo para el encendido.....: VGT
- Tensión residual máxima que no enciende ningún elemento.....: VGNT
- Corriente de puerta para el encendido: IGT
- Corriente residual máxima que no enciende ningún elemento.....: IGNT

Entre los anteriores destacan:

- VGT e IGT , que determinan las condiciones de encendido del dispositivo semiconductor.
- VGNT e IGNT, que dan los valores máximos de corriente y de tensión, para los cuales en condiciones normales de temperatura, los tiristores no corren el riesgo de dispararse de modo indeseado.

Área de disparo seguro.

En esta área que se muestra en la figura 2.4. se obtienen las condiciones de disparo del SCR. Las tensiones y corrientes admisibles para el disparo se encuentran en el interior de la zona formada por las curvas:

- Curva A y B: límite superior e inferior de la tensión puerta-cátodo en función de la corriente positiva de puerta, para una corriente nula de ánodo.
- Curva C: tensión directa de pico admisible VGF.
- Curva D: hipérbola de la potencia media máxima PGAV que no debemos sobrepasar.

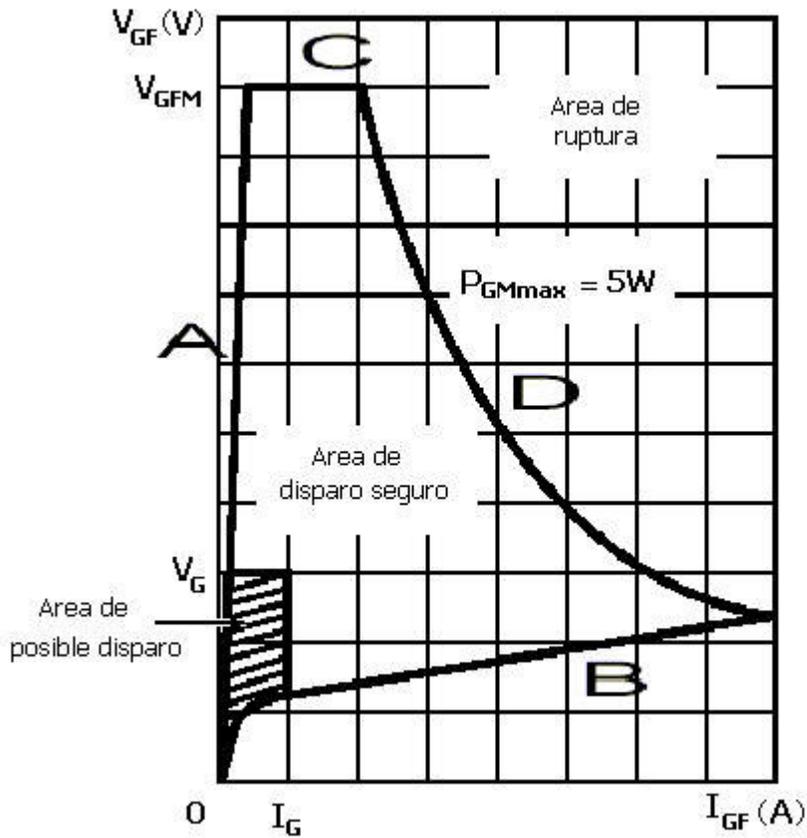


Figura 2.4. Curva características de puerta del tiristor.

El diodo puerta (G) - cátodo (K) difiere de un diodo de rectificación en los siguientes puntos:

- Una caída de tensión en sentido directo más elevada.
- Mayor dispersión para un mismo tipo de tiristor.

2.1.4.3. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS.

- Tensiones transitorias:

- Valores de la tensión superpuestos a la señal de la fuente de alimentación.
- Son breves y de gran amplitud.
- La tensión inversa de pico no repetitiva (VRSM) debe estar dentro de esos valores.

- Impulsos de corriente:

- Para cada tiristor se publican curvas que dan la cantidad de ciclos durante los cuales puede tolerarse una corriente de pico dada según se ve en la figura 2.5.
- A mayor valor del impulso de corriente, menor es la cantidad de ciclos.
- El tiempo máximo de cada impulso está limitado por la temperatura media de la unión.

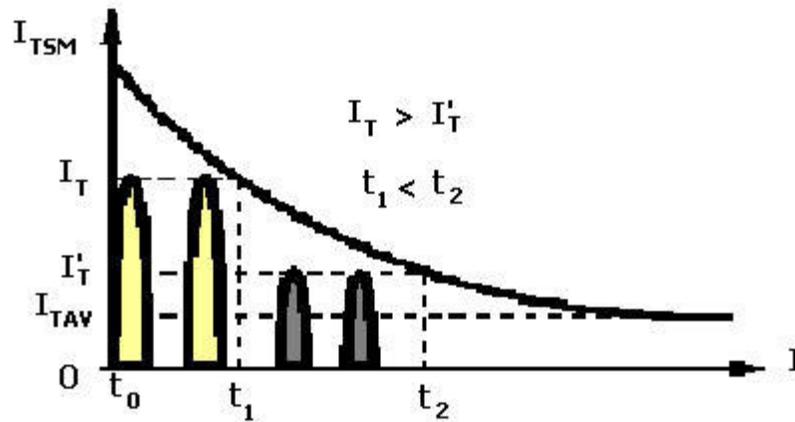


Figura 2.5. Curva de limitación de impulsos de corriente.

- Ángulos de conducción:

- La corriente y tensión media de un SCR dependen del ángulo de conducción.
- A mayor ángulo de conducción, se obtiene a la salida mayor potencia.
- Un mayor ángulo de bloqueo o disparo se corresponde con un menor ángulo de conducción como se observa en la figura 2.6, ángulo de conducción = 180° - ángulo de disparo
- Conociendo la variación de la potencia disipada en función de los diferentes ángulos de conducción podremos calcular las protecciones necesarias.

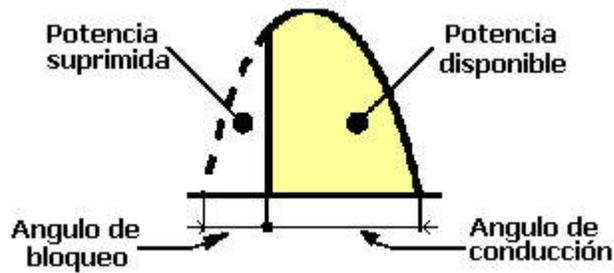


Figura 2.6. Ángulo de bloqueo y conducción de un tiristor.

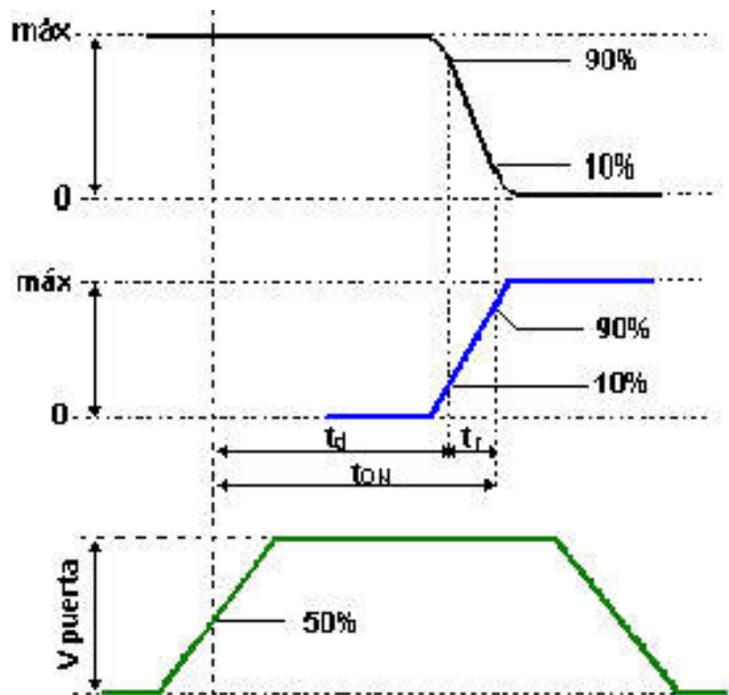
2.1.4.4. CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN.

Los tiristores no son interruptores perfectos, necesitan un tiempo para pasar de corte a conducción y viceversa. Vamos a analizar este hecho.

Tiempo de encendido (T_{on}):

Es el tiempo que tarda el tiristor en pasar de corte a conducción. Se divide en dos partes como se muestra en la figura 2.7:

- Tiempo de retardo (t_d): tiempo que transcurre desde que la corriente de puerta alcanza el 50 % de su valor final hasta que la corriente de ánodo alcanza el 10 % de su valor máximo. Depende de la corriente de mando, de la tensión ánodo - cátodo y de la temperatura (t_d disminuye si estas magnitudes aumentan).
- Tiempo de subida (t_r): tiempo necesario para que la corriente de ánodo pase del 10 % al 90 % de su valor máximo, o, el paso de la caída de tensión en el tiristor del 90 % al 10 % de su valor inicial.



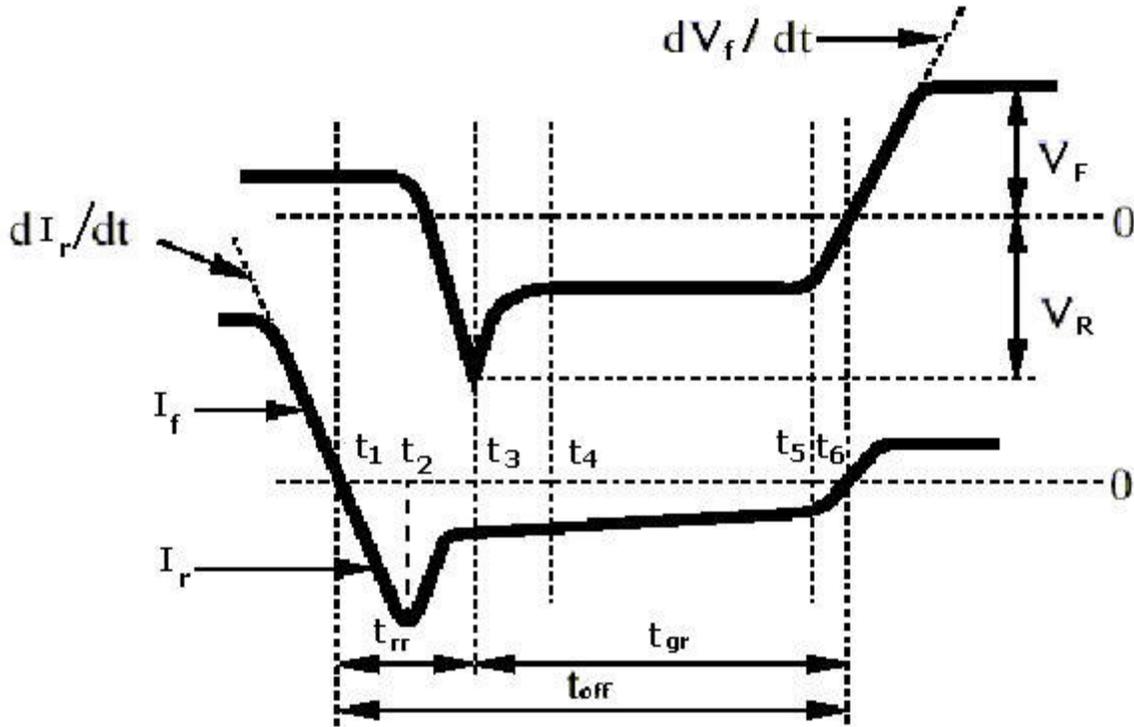
$$T_{on} = t_d + t_r$$

Figura 2.7. Tiempo de encendido.

Tiempo de apagado (Toff):

Es el tiempo que tarda el tiristor en pasar de conducción a corte. Se divide en dos partes como se observa en la figura 2.8:

- Tiempo de recuperación inversa (t_{rr}): tiempo en el que las cargas acumuladas en la conducción del SCR, por polarización inversa de este, se eliminan parcialmente.
- Tiempo de recuperación de puerta (t_{gr}): tiempo en el que, en un número suficiente bajo, las restantes cargas acumuladas se recombinan por difusión, permitiendo que la puerta recupere su capacidad de gobierno.



$$T_{off} = t_{rr} + t_{gr}$$

Figura 2.8. Tiempo de apagado.

La extinción del tiristor se producirá por dos motivos: reducción de la corriente de ánodo por debajo de la corriente de mantenimiento y por anulación de la corriente de ánodo.

2.1.4.5. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS.

Dependiendo de las condiciones de trabajo de un tiristor, éste disipa una cantidad de energía que produce un aumento de la temperatura en las uniones del semiconductor. Este aumento de la temperatura provoca un aumento de la corriente de fugas, que a su vez provoca un aumento de la temperatura, creando un fenómeno de acumulación de calor que debe ser evitado. Para ello se colocan disipadores de calor.

2.1.5. MÉTODOS DE DISPARO.

Para que se produzca el cebado de un tiristor, la unión ánodo - cátodo debe estar polarizada en directo y la señal de mando debe permanecer un tiempo suficientemente larga como para permitir que el tiristor alcance un valor de corriente de ánodo mayor que I_L , corriente necesaria para permitir que el SCR comience a conducir. Para que, una vez disparado, se mantenga en la zona de conducción deberá circular una corriente mínima de valor I_H , marcando el paso del estado de conducción al estado de bloqueo directo.

Los distintos métodos de disparo de los tiristores son:

- Por puerta.
- Por módulo de tensión.

- Por gradiente de tensión (dV/dt)
- Disparo por radiación.
- Disparo por temperatura.

El modo usado normalmente es el disparo por puerta. Los disparos por módulo y gradiente de tensión son modos no deseados.

DISPARO POR PUERTA.

Es el proceso utilizado normalmente para disparar un tiristor. Consiste en la aplicación en la puerta de un impulso positivo de intensidad, entre los terminales de puerta y cátodo a la vez que mantenemos una tensión positiva entre ánodo y cátodo.

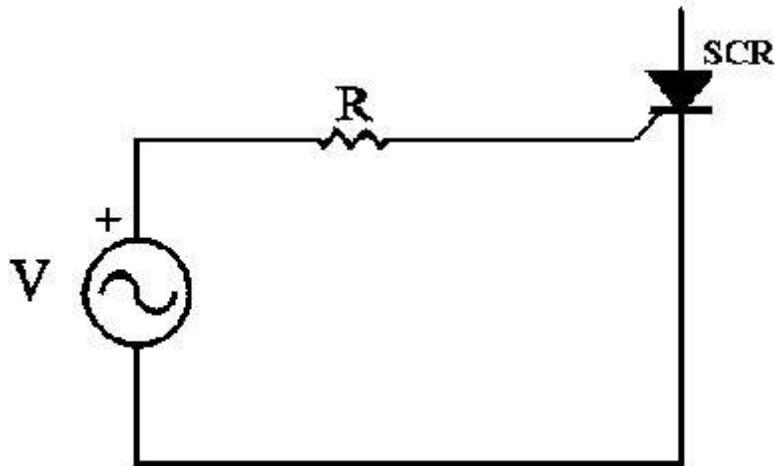


Figura 2.9. Circuito de control por puerta de un SCR.

El valor requerido de V_T necesario para disparar el SCR es:

$$V_T = V_G + I_G \times R$$

- R viene dada por la pendiente de la recta tangente a la curva de máxima disipación de potencia para obtener la máxima seguridad en el disparo el cual se muestra en la figura 2.10.

$$R = V_{FG} / I_{FG}$$

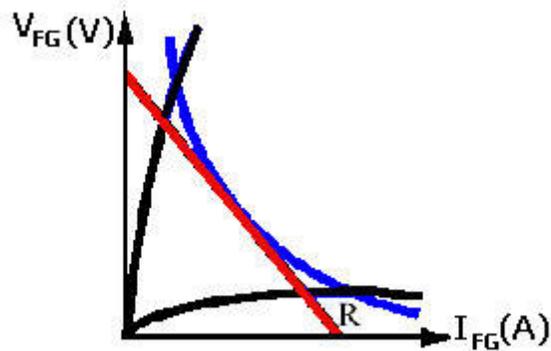


Figura 2.10. Recta tangente a la curva de máxima disipación de potencia.

DISPARO POR MÓDULO DE TENSIÓN.

Es el debido al mecanismo de multiplicación por avalancha. Esta forma de disparo no se emplea para disparar al tiristor de manera intencionada; sin embargo ocurre de forma fortuita provocada por sobre tensiones anormales en los equipos electrónicos.

DISPARO POR GRADIENTE DE TENSIÓN.

Una subida brusca del potencial de ánodo en el sentido directo de conducción provoca el disparo. Este caso más que un método, se considera un inconveniente.

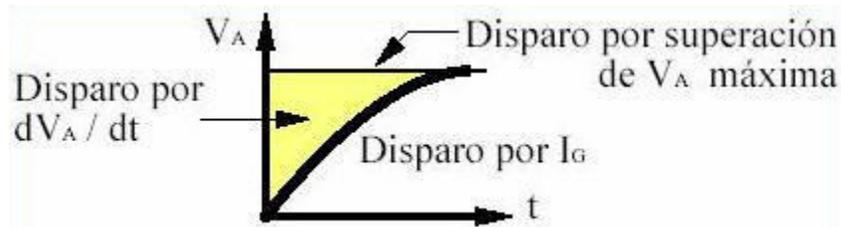


Figura 2.11. Zona de disparo por gradiente de tensión.

DISPARO POR RADIACIÓN.

Está asociado a la creación de pares electrón-hueco por la absorción de la luz del elemento semiconductor. El SCR activado por luz se llama LASCR.

DISPARO POR TEMPERATURA.

El disparo por temperatura está asociado al aumento de pares electrón - hueco generados en las uniones del semiconductor. Así, la suma ($\alpha_1 + \alpha_2$) tiende rápidamente a la unidad al aumentar la temperatura. La tensión de ruptura permanece constante hasta un cierto valor de la temperatura y disminuye al aumentar ésta.

CONDICIONES NECESARIAS PARA EL CONTROL DE UN SCR.

Para el control en el disparo:

- Ánodo positivo respecto al cátodo.
- La puerta debe recibir un pulso positivo con respecto al cátodo.
- En el momento del disparo $I_{ak} > I_L$.

Para el control en el corte:

- Anulamos la tensión V_{ak} .
- Incrementamos RL hasta que $I_{ak} < I_H$.

2.1.6. EXTINCIÓN DEL TIRISTOR. TIPOS DE CONMUTACIÓN.

Entenderemos por extinción, el proceso mediante el cual, obligaremos al tiristor que estaba en conducción a pasar a corte. En el momento en que un tiristor empieza a conducir, perdemos completamente el control sobre el mismo.

El tiristor debe presentar en el tiempo ciertas condiciones para pasar de nuevo a corte. Este estado implica simultáneamente dos cosas:

1. La corriente que circula por el dispositivo debe quedar completamente bloqueada.
2. La aplicación de una tensión positiva entre ánodo y cátodo no debe provocar un disparo indeseado del tiristor.

Existen diversas formas de conmutar un tiristor, sin embargo podemos agruparlos en dos grandes grupos:

CONMUTACIÓN NATURAL.

- a) Libre.
- b) Asistida.

CONMUTACIÓN FORZADA.

- a) Por contacto mecánico.
- b) Por circuito resonante.
 - Serie
 - Paralelo
- c) Por carga de condensador.
- d) Por tiristor auxiliar.

2.1.7. APLICACIONES DEL SCR.

Las aplicaciones de los tiristores se extiende desde la rectificación de corrientes alternas, en lugar de los diodos convencionales hasta la realización de determinadas conmutaciones de baja potencia en circuitos electrónicos, pasando por los onduladores o inversores que transforman la corriente continua en alterna.

La principal ventaja que presentan frente a los diodos cuando se les utiliza como rectificadores es que su entrada en conducción estará controlada por la señal de puerta. De esta forma se podrá variar la tensión continua de salida si se hace variar el momento del disparo ya que se obtendrán diferentes ángulos de conducción del ciclo de la tensión o corriente alterna de entrada. Además el tiristor se bloqueará automáticamente al cambiar la alternancia de positiva a negativa ya que en este momento empezará a recibir tensión inversa.

Por lo anteriormente señalado el SCR tiene una gran variedad de aplicaciones, entre ellas están las siguientes:

- Controles de relevador.
- Circuitos de retardo de tiempo.
- Fuentes de alimentación reguladas.
- Interruptores estáticos.
- Controles de motores.
- Recortadores.
- Inversores.
- Ciclo conversores.
- Cargadores de baterías.
- Circuitos de protección.
- Controles de calefacción.
- Controles de fase.

2.2. INVERSORES: Conversión de continua en alterna [1].

2.2.1. EL CONVERTIDOR EN PUENTE DE ONDA COMPLETA.

El convertidor en puente de onda completa de la Figura 2.1 es el circuito básico que se utiliza para convertir continua en alterna. A partir de una entrada de continua se obtiene una salida de alterna cerrando y abriendo interruptores en una determinada secuencia. La tensión de salida V_0 puede ser $+V_{cc}$, $-V_{cc}$, o cero, dependiendo de qué interruptores están cerrados. La figura 2.2 muestra los circuitos equivalentes de las combinaciones de interruptores.

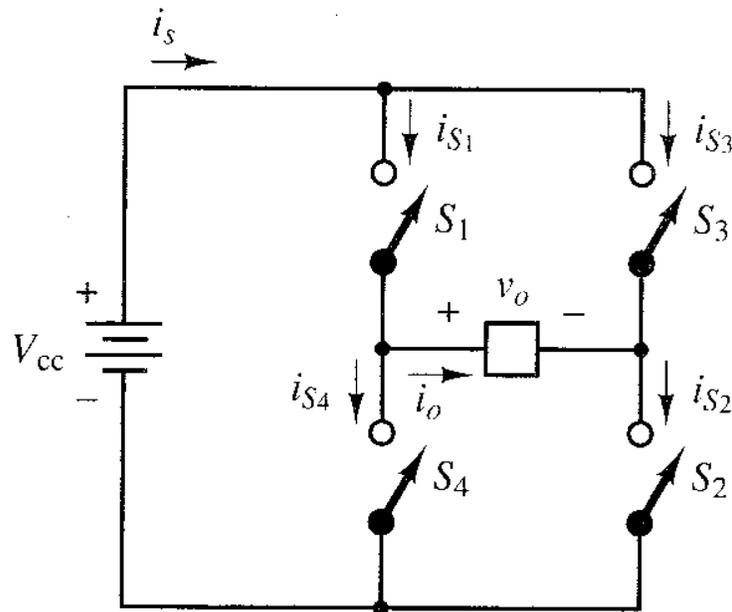


Figura 2.12.- Convertidor de C.D. a C.A. tipo puente completo monofásico.

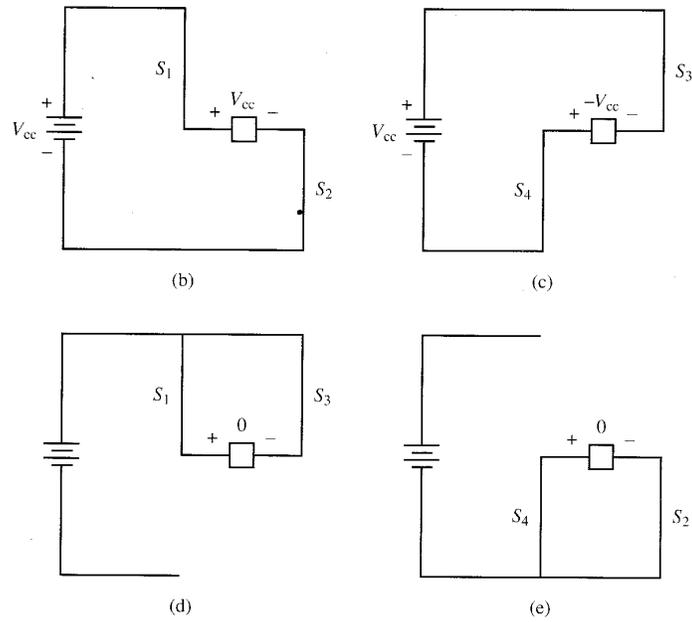


Figura 2.13.- Circuitos equivalentes de las combinaciones de interruptores.

Observe que S_1 y S_4 no deberían estar cerrados al mismo tiempo al igual que S_2 y S_3 . De otra manera habría un cortocircuito en la fuente de continua. Los interruptores reales no se abren y se cierran instantáneamente. Por tanto, deben tenerse en cuenta los tiempos de transición de la conmutación al diseñar el control de los interruptores. El empalme de los tiempos de conducción de los interruptores resultaría en un cortocircuito, denominado en ocasiones fallo de empalme en la fuente de tensión continua. El tiempo permitido para la conmutación se denomina tiempo muerto (blanking time).

2.2.2. EL INVERSOR DE ONDA CUADRADA.

El esquema de conmutación más sencillo del convertidor en puente de onda completa genera una tensión de salida en forma de onda cuadrada. Los interruptores conectan la carga a $+V_{cc}$ cuando S_1 y S_2 están cerrados y a $-V_{cc}$ cuando S_3 y S_4 están cerrados. La conmutación periódica de la tensión de la carga entre $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$ genera en la carga una tensión con forma de onda cuadrada. Aunque esta salida alterna no es sinusoidal, puede ser una onda de alterna adecuada para algunas aplicaciones.

La forma de onda de la corriente en la carga depende de los componentes de la carga. En una carga resistiva, la forma de onda de la corriente se corresponde con la forma de la tensión de salida. Una carga inductiva tendrá una corriente con más calidad sinusoidal que la tensión, a causa de las propiedades de filtrado de las inductancias. Una carga inductiva requiere ciertas consideraciones a la hora de diseñar los interruptores en el circuito en puente de onda completa, ya que las corrientes de los interruptores deben ser bidireccionales.

Para una carga serie R-L y una tensión de salida con forma de onda cuadrada, suponemos que los interruptores S_1 y S_2 de la figura 2.1 se cierran en $t=0$. La tensión en la carga es $+V_{cc}$, y la corriente comienza a aumentar en la carga y en S_1 y S_2 . La corriente se expresa como la suma de las respuestas natural y forzada:

$$\begin{aligned} i_0(t) &= i_f(t) + i_n(t) \\ &= \frac{V_{cc}}{R} + Ae^{-t/\tau}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \end{aligned} \tag{1.1}$$

donde A es una constante que se calcula a partir de la condición inicial y $\tau = L/R$.

En $t = T/2$, S_1 y S_2 se abren, y S_3 y S_4 se cierran. La tensión en la carga R-L pasa a ser $-V_{cc}$, y la corriente tiene forma:

$$i_0(t) = \frac{-V_{cc}}{R} + Be^{-(t-T/2)/\tau}, \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T \quad (1.2)$$

donde la constante B se calcula a partir de la condición inicial.

Cuando se proporciona energía al circuito por primera vez y la corriente inicial de la inductancia es cero, se tiene un transitorio antes de que la corriente de la carga alcance el régimen permanente. En régimen permanente, i_0 es periódica y simétrica con respecto a cero, figura 2.2. Hacemos que la condición inicial de la corriente que se describe en la Ecuación 1.1 sea $I_{mín}$, y que la condición inicial de la corriente que se describe en la Ecuación 1.2 sea $I_{máx}$.

Calculando la Ecuación 1.1 en $t = 0$,

$$i_0(0) = \frac{V_{cc}}{R} + Ae^0 = I_{mín}$$

o

$$A = I_{mín} - \frac{V_{cc}}{R} \quad (1.3)$$

De igual manera, evaluamos la Ecuación 1.2 en $t = T/2$:

$$i_0(T/2) = \frac{-V_{cc}}{R} + Be^0 = I_{máx}$$

o

$$B = I_{m\acute{a}x} - \frac{V_{cc}}{R} \quad (1.4)$$

En régimen permanente, la formas de onda de la corriente descrita por la Ecuación 1.1 y 1.2 se convierte en

$$i_0(t) = \begin{cases} \frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{m\acute{m}n} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-t/\tau} & \text{para } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ \frac{-V_{cc}}{R} + \left(I_{m\acute{a}x} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-(t-T/2)/\tau} & \text{para } \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (1.5)$$

Obtenemos una expresión de $I_{m\acute{a}x}$ evaluando la primera parte de la Ecuación 1.5 en $t = T/2$

$$i(T/2) = I_{m\acute{a}x} = \frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{m\acute{m}n} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-(T/2\tau)} \quad (1.6)$$

y, por simetría,

$$I_{m\acute{m}n} = -I_{m\acute{a}x} \quad (1.7)$$

Sustituyendo $-I_{m\acute{a}x}$ por $I_{m\acute{m}n}$ en la Ecuación 1.6 y despejando $I_{m\acute{a}x}$,

$$I_{m\acute{a}x} = -I_{m\acute{i}n} = \frac{V_{cc}}{R} \left[\frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}} \right]$$

(1.8)

As\i, las Ecuaciones 1.5 y 1.8 describen la corriente en una carga R-L en r\egimen permanente cuando se le aplica una tensi3n con forma de onda cuadrada. La figura 2.2 muestra las corrientes resultantes en la carga, la fuente y los interruptores.

La potencia absorbida por la carga puede calcularse a partir de $I_{rms}^2 R$, donde la corriente rms de la carga viene determinada por la ecuaci3n que la define. Se puede simplificar la integraci3n aprovech\andose de la simetr\i de la onda. Como el cuadrado de cada uno de los semiperiodos de la corriente es id\entico, s3lo hemos de evaluar la primera mitad del per\iodo:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[\frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{m\acute{i}n} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-t/\tau} \right]^2 dt}$$

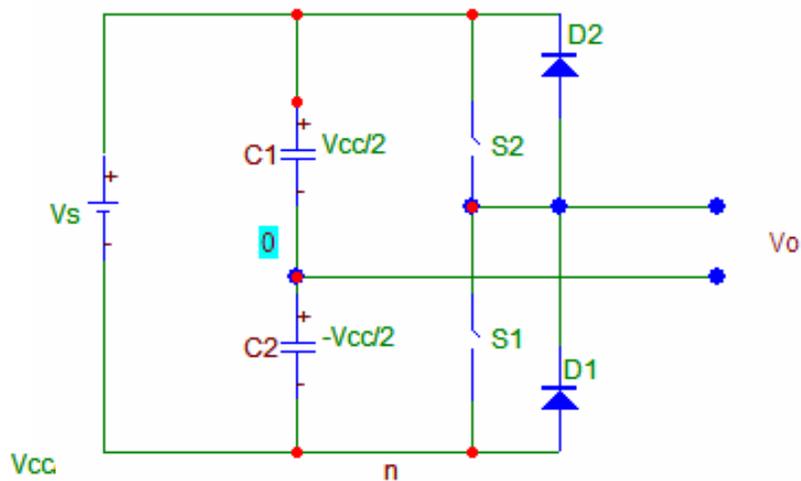
Si los interruptores son ideales, la potencia entregada por la fuente debe ser la misma que la absorbida por la carga. La potencia de una fuente de continua viene determinada por

$$P_{cc} = V_{cc} I_s$$

2.2.3. EL INVERSOR EN MEDIO PUENTE

El convertidor en medio puente de la figura 2.3 se puede utilizar como inversor. En el inversor en medio puente, el número de interruptores se reduce a dos, dividiendo la tensión de la fuente de continua en dos partes mediante los condensadores. Cada condensador deberá tener el mismo valor y tendrá en la salida del mismo una tensión de $V_{cc}/2$. Cuando se cierra S_1 , la tensión en la carga es de $-V_{cc}/2$. Cuando se cierra S_2 , la tensión en la carga es de $+V_{cc}/2$. Así, se puede generar una salida con forma de onda cuadrada o una salida bipolar con modulación por anchura de impulsos.

La tensión en bornes de un interruptor abierto es el doble de la tensión de la carga, o V_{cc} . Al igual que en el puente inversor de onda completa, se requiere un tiempo muerto para los interruptores, con el fin de prevenir un cortocircuito en la fuente, y se necesitan los diodos de realimentación para garantizar una continuidad de la corriente para las cargas inductivas.



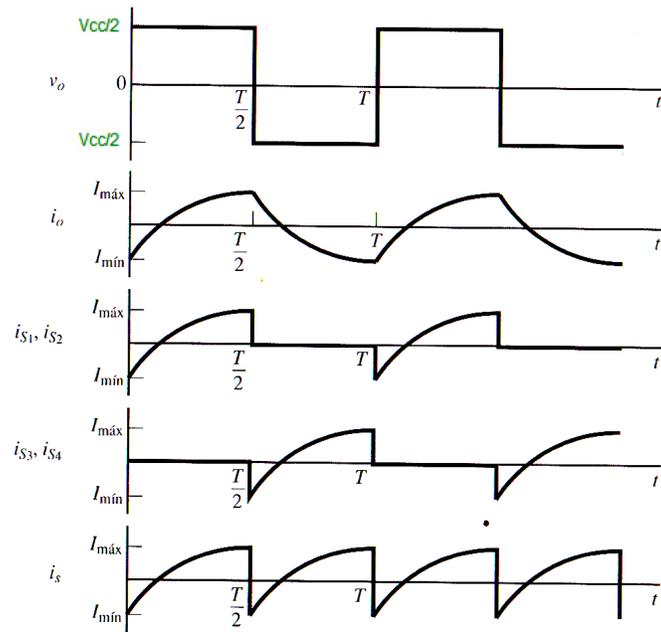


Figura 2.14.- Convertidor en medio puente

2.2.4. INVERSORES TRIFÁSICOS [2].

Comúnmente, los inversores trifásicos se usan en aplicaciones de grandes potencias. Se pueden conectar tres inversores monofásicos tipo puente completo, en paralelo, como se ve en la figura 2.4, para formar la configuración de un inversor trifásico.

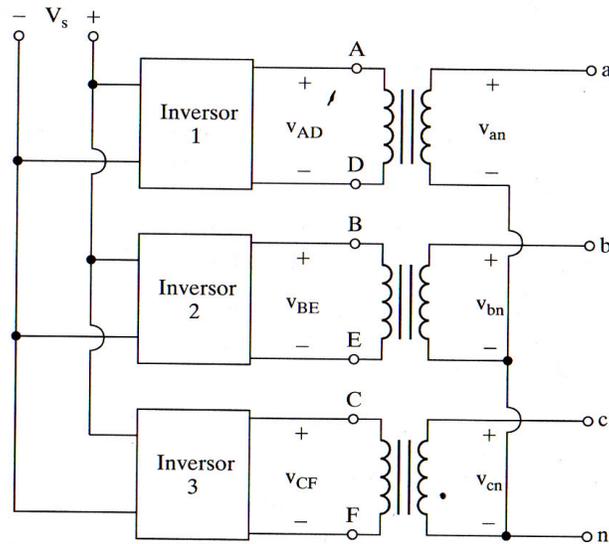


Figura 2.15.- Inversores monofásicos tipo puente en paralelo

Las señales de control de los inversores monofásicos se deben adelantar o atrasar 120° entre sí, para obtener voltajes (fundamentales) trifásicos balanceados. Los devanados primarios de transformadores se deben aislar entre sí, mientras que los secundarios se pueden conectar en Y o en delta. El secundario del transformador se suele conectar en delta, para eliminar armónicos múltiplos de tres ($n = 3, 6, 9, \dots$) que aparecen los voltajes de salida, y el arreglo del circuito se ve en la figura 2.5.

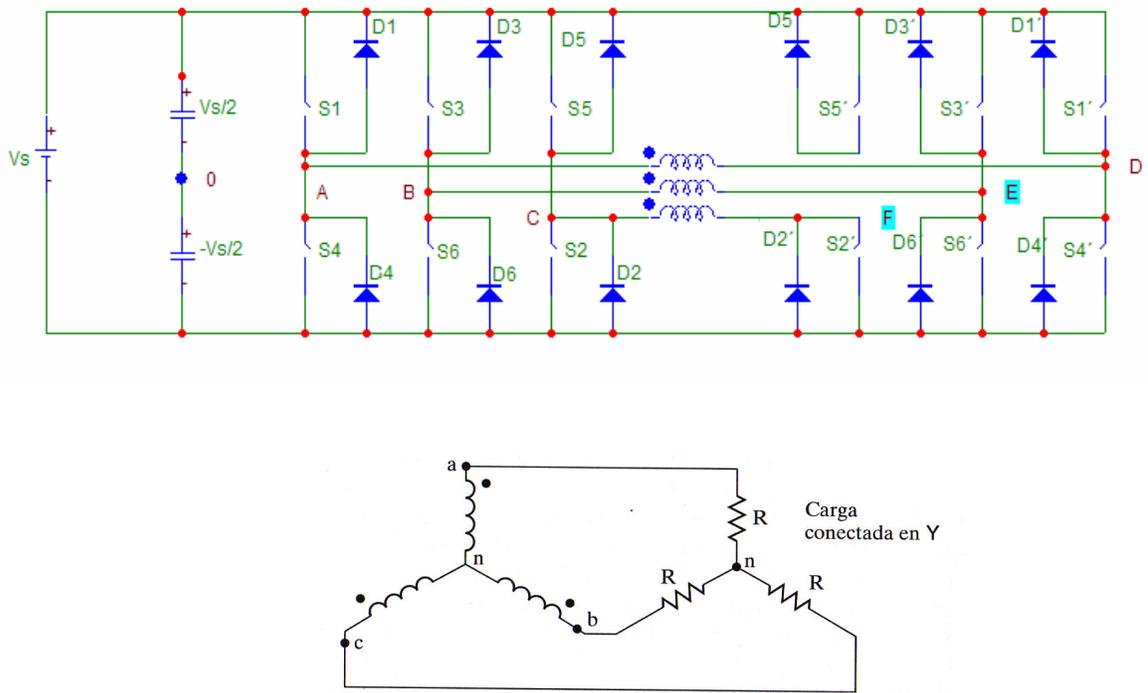


Figura 2.16.- Circuito con tres transformadores monofásicos, 12 interruptores y 12 diodos

En este arreglo se requieren tres transformadores monofásicos, 12 interruptores y 12 diodos. Si las magnitudes y las fases de los voltajes de salida de los inversores monofásicos no están perfectamente balanceados, los voltajes trifásicos de salida estarán desbalanceados.

Se puede tener una salida trifásica con una configuración de seis interruptores y seis diodos, como se ve en la figura 2.6. A este esquema se le conoce como inversor tipo puente trifásico.

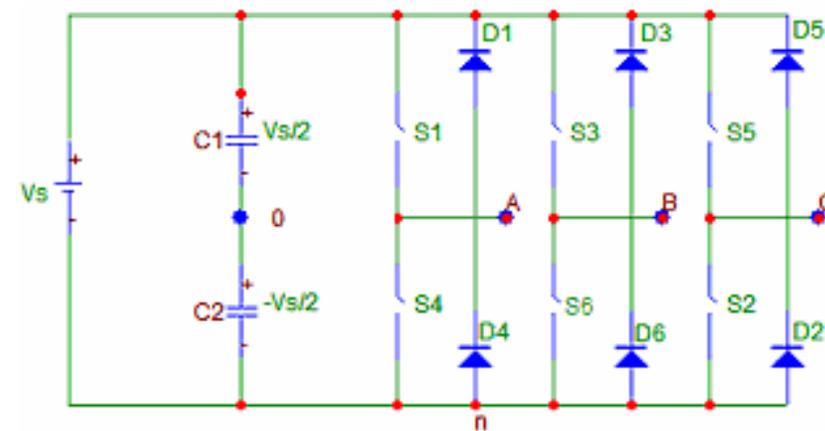


Figura 2.17.- Inversor tipo puente trifásico.

Se pueden aplicar dos clases de señales de control a los transistores: conducción a 180° o conducción a 120° . La conducción a 180° utiliza mejor los interruptores, y es el método que se prefiere pero para este proyecto se manejara conducción a 120° ya que se estarán usando SCR's y para que dejen de conducir se requiere de más tiempo que los transistores (BJT, MOSFET, IGBT.).

2.2.4.1. CONDUCCION A 120 GRADOS

En esta clase de control, cada interruptor conduce durante 120° . En cualquier momento sólo hay dos interruptores encendidos. Las señales de disparo se ven en la figura 2.7.

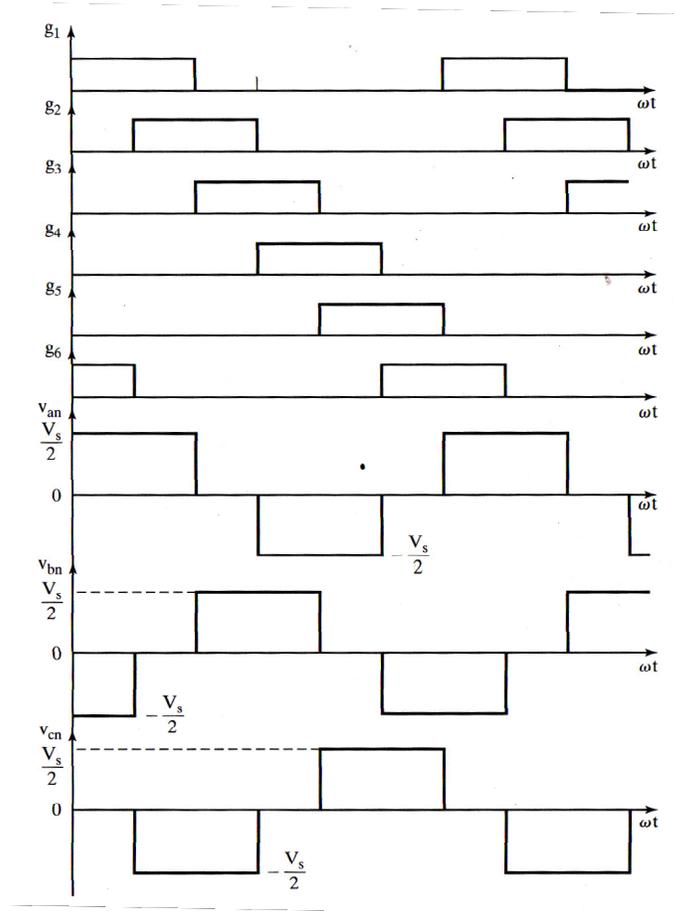


Figura 2.18.- Conducción a 120° .

El orden de conducción de los interruptores es S6 S1, S1 S2, S2 S3, S3 S4, S4 S5, S5 S6, y S6 S1. Hay tres modos de operación en un medio ciclo, y en la figura 2.8, se ven los equivalentes para una carga conectada en Y.

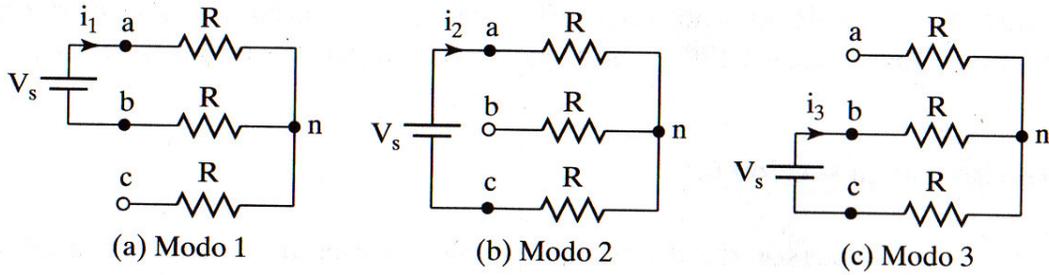


Figura 2.19.- Modos de operación en un medio ciclo

Durante el modo 1(a), para $\leq \omega t < \pi/3$, los transistores 1 y 6 conducen:

$$v_{an} = \frac{V_s}{2} \quad v_{bn} = -\frac{V_s}{2} \quad v_{cn} = 0$$

Durante el modo 2(b), para $\pi/3 \leq \omega t < 2\pi/3$, los transistores 1 y 2 conducen:

$$v_{an} = \frac{V_s}{2} \quad v_{bn} = 0 \quad v_{cn} = -\frac{V_s}{2}$$

Durante el modo 3(c), para $2\pi/3 \leq \omega t < 3\pi/3$, los transistores 2 y 3 conducen:

$$v_{an} = 0 \qquad v_{bn} = \frac{V_s}{2} \qquad v_{cn} = -\frac{V_s}{2}$$

Los voltajes de línea a neutro que se ven en la figura 1.7, se pueden expresar como series de Fourier:

$$v_{an} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \operatorname{sen} \frac{n\pi}{3} \operatorname{senn} \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (3.1a)$$

$$v_{bn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \operatorname{sen} \frac{n\pi}{3} \operatorname{senn} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.1b)$$

$$v_{cn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \operatorname{sen} \frac{n\pi}{3} \operatorname{senn} \left(\omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \quad (3.1c)$$

El voltaje de línea a a b es $v_{ab} = \sqrt{3}v_{an}$ con un avance de fase de 30° . En consecuencia, los voltajes instantáneos de línea a línea (para una carga conectada en Y), son:

$$v_{ab} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}V_s}{n\pi} \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi}{3} \right) \operatorname{senn} \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \quad \text{para } n = 1,3,5,\dots \quad (3.1a)$$

$$v_{bc} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}V_s}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{3}\right) \operatorname{senn}\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{para } n = 1,3,5,\dots \quad (3.1b)$$

$$v_{ca} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}V_s}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{3}\right) \operatorname{senn}(\omega t - \pi) \quad \text{para } n = 1,3,5,\dots \quad (3.1c)$$

Hay un retardo de $\pi/3$ desde el apagado de S1 y el encendido de S4. Por tanto no debe haber cortocircuito del alimentación de cd a través de uno de los transistores superiores y uno de los inferiores. En cualquier momento hay dos terminales de carga conectadas a la alimentación de cd, y la tercera queda abierta. El potencial de esta terminal abierta depende de las características de la carga y podría ser impredecible. Como el transistor conduce durante 120° , se utiliza menos en comparación con los de conducción a 180° , para las mismas conducciones de carga. Por lo anterior se prefiere la conducción a 180° cuando los interruptores se implementan con transistores, por su rápida conmutación de conducción; en cambio, en caso de SCR's se prefiere la conducción a 120° por que es mas largo el tiempo de apagado.

Puntos clave.

El puente inversor trifásico requiere seis dispositivos interruptores y seis diodos. La componente fundamental rms, V_{L1} , del voltaje de línea de salida, es $0.7798V_s$, y la del voltaje de fase es $V_{p1} = V_{L1} / \sqrt{3} = 0.45V_s$, para conducción a 180° . Para conducción a 120° , $V_{p1} = 0.3898V_s$ y $V_{L1} = \sqrt{3}V_{p1} = 0.6753V_s$.

El diseño de un inversor requiere determinar las corrientes promedio, rms y pico, en los dispositivos de conmutación y en los diodos.

Capítulo

3

Desarrollo del Proyecto.

3.1. DISEÑO DEL INVERSOR.

Puesto que la mayoría de las veces la carga que es conectada a un inversor trifásico será un motor trifásico conviene tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

Los motores de C.A. no son tan adecuados para las aplicaciones de velocidad variable como los motores de C.D., pues su velocidad no puede controlarse satisfactoriamente mediante la simple variación del voltaje de alimentación. La reducción del voltaje de alimentación para un motor de inducción de 60 Hz, trifásico ciertamente reducirá su velocidad, pero también empeora drásticamente la capacidad de regulación de velocidad del motor. Un motor de inducción de C.A. operando a un voltaje reducido es incapaz de mantener una velocidad de eje razonablemente estable ante pequeñas cambios en la demanda de par impuesta por la carga mecánica.

El control satisfactorio de velocidad de un motor de inducción de C.D. sólo puede lograrse variando la frecuencia de alimentación mientras se varía simultáneamente el voltaje de alimentación.

Hay dos métodos básicos para producir una fuente trifásica de frecuencia variable y alta potencia, para el ajuste de velocidad de un motor industrial de inducción de C.A.. Los dos métodos son:

1.- Convertir un suministro de C.D. en C.A. trifásica, disparando un banco de SCR en cierta secuencia y a cierta razón. Un inversor.

2.- Convertir un suministro de C.A. de 60 hz, tres fases, en un suministro de C.A. trifásico de menor frecuencia, nuevamente disparando bancos de SCR en cierta secuencia y a cierta velocidad. Un cicloconvertidor.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama esquemático de un inversor trifásico

operando un motor de inducción conectado en estrella en donde, los interruptores de la figura 2.6 han sido sustituidos por SCR's. Encender y apagar los SCR en secuencia adecuada, hace que el suministro de C.D. se conmute a través de los devanados de estator A, B y C del motor de tal manera que se produzca un campo giratorio, duplicando entonces la acción de una fuente de C.A. trifásica.

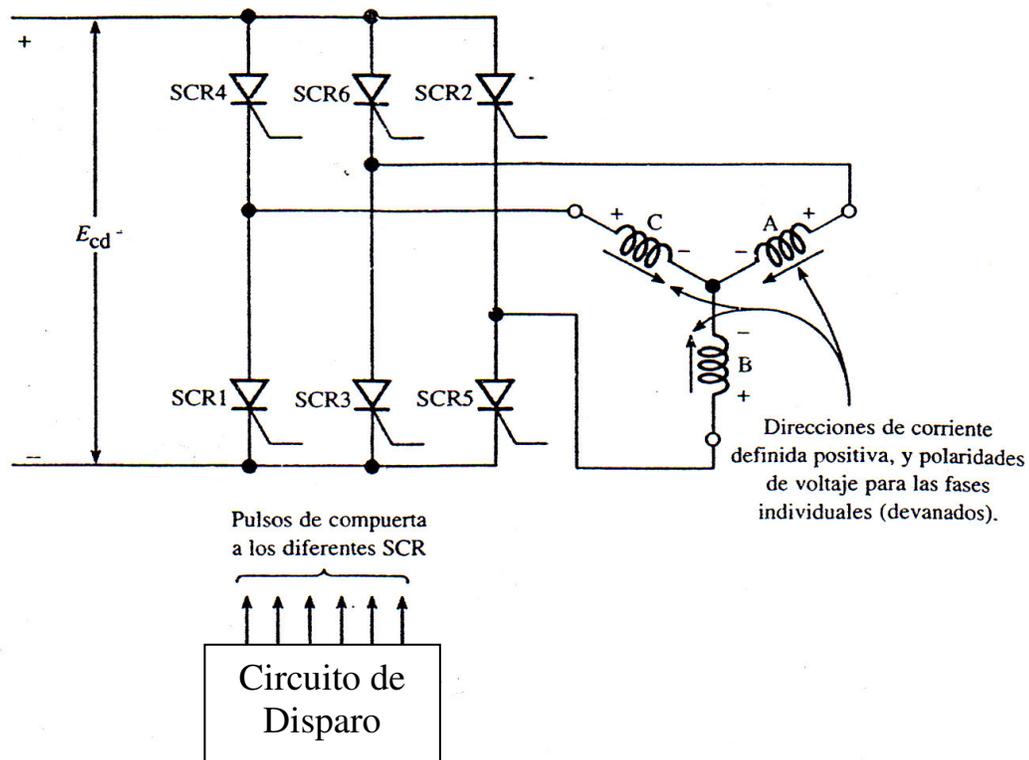


Figura 3.1.- Diagrama esquemático de un inversor trifásico operando un motor de inducción conectado en estrella.

Debido a su coacción física, el devanado A del estator produce un componente de campo magnético orientado desde la posición mecánica de 60° , cuando hay un flujo de corriente a través suyo en la dirección definida positiva. Si hay un flujo de corriente a través del devanado A en la dirección negativa, su componente de campo magnético se reorienta en 180 grados mecánicos proviniendo de la posición de 240° .

Ocurre igual con los devanados de estator B y C. una corriente positiva a través de B produce un componente de campo desde los 180°, y una corriente negativa a través de B produce un componente de 0°. Para el devanado C, una corriente positiva de una componente de campo desde los 300°, y una corriente negativa da un componente de campo desde los 120°, ya que $300^\circ - 180^\circ = 120^\circ$.

La operación cíclica del circuito en puente de los SCR está dividida en seis intervalos de igual duración. Se definirá el primer intervalo para que sea el momento en que el circuito electrónico de disparo haga que los SCR 6 y 5, se encienda, y todos los otros estén apagados. Esta condición se indica en la primera columna de la tabla de la figura 3.2.

	Número de Intervalo.	1	2	3	4	5	6	Repetición
	Devanados manejados y Dirección.	+A, -B	+A, -C	+B, -C	+B, -A	+C, -A	+C, -B	+A, -B
	SCR encendido	6,5	6,1	2,1	-2,3	4,3	4,5	6,5
En el instante de conmutación.	este SCR es disparado.	1	2	3	4	5	6	
	este SCR es apagado.	5	6	1	3	3	4	

Figura 3.2.- Operación cíclica del circuito en puente de los SCR

Con los SCR's 6 y 5 encendidos, hay una trayectoria de flujo de corriente como sigue: de la terminal positiva del suministro de C.D., a través del SCR 6, a través del devanado A del estator en la dirección positiva, a través del devanado B del estator en la dirección negativa, a través del SCR 5, y por la línea de suministro de C.D. a la terminal negativa de la fuente de C.D.. No hay corriente en el devanado C del estator en este momento, pues los SCR 4 y 1 están apagados.

Las tres formas de onda de la figura 3.3 muestran gráficamente estas corrientes del devanado del estator. Durante el primer intervalo de tiempo, la corriente (y el voltaje) del devanado A es positiva, la corriente del devanado B es negativa, y la corriente del devanado C es cero.

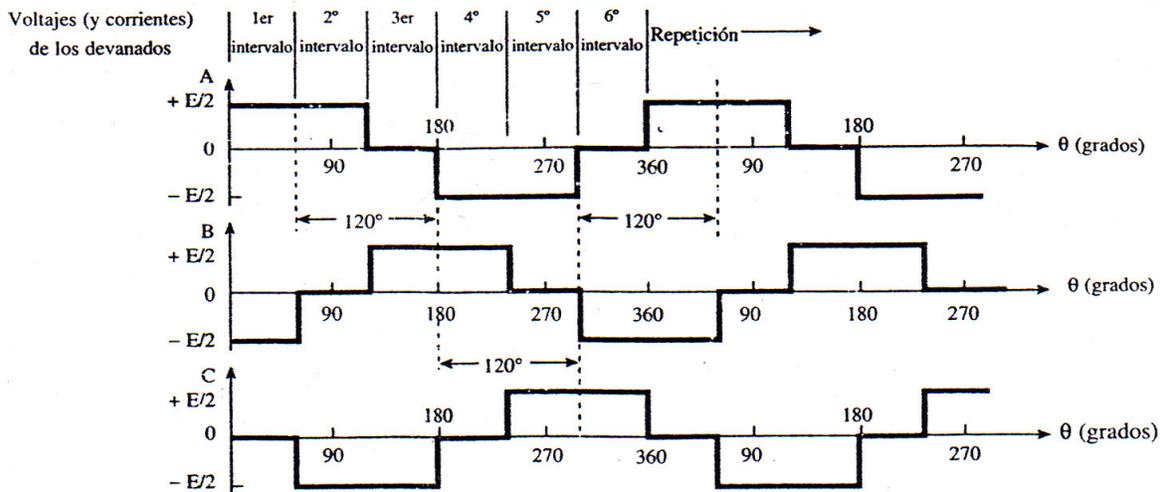


Figura 3.3. Formas de onda de Voltaje (y corrientes) de los devanados.

Al final del primer intervalo de tiempo, el circuito de disparo dispara el SCR 1 y obliga al SCR 5 a apagarse. Estos eventos están tabulados en la figura 3.2.

PROCEDIMIENTO PARA EL APAGADO.

En un circuito alimentado por C.D., el encendido de un SCR no es problema. El apagado es el que resulta problemático. Naturalmente, un inversor debe lidiar con este problema. Se han desarrollado muchos arreglos para obligar a un SCR a apagarse; lo que se intentará emplear es usar un dispositivo de conmutación de estado sólido (otro SCR) para

conectar un capacitor cargado a través de un SCR encendido, a fin de que el voltaje del capacitor polarice inversamente las terminales del SCR.

La figura 3.4. ilustra este método de apagado: Una vez disparado el SCR principal (SCR1), la carga R_c queda alimentada. Desde la fuente y a tierra a través de R_L , C_1 y el SCR1, se carga al condensador C_1 con un potencial igual al de la fuente con su placa positiva del lado derecho y negativa del lado izquierdo. Si ahora, se dispara el SCR auxiliar, C_1 quedará conectado en paralelo con el SCR1 y polarizándolo inversamente, lo que resulta en el apagado del SCR1.

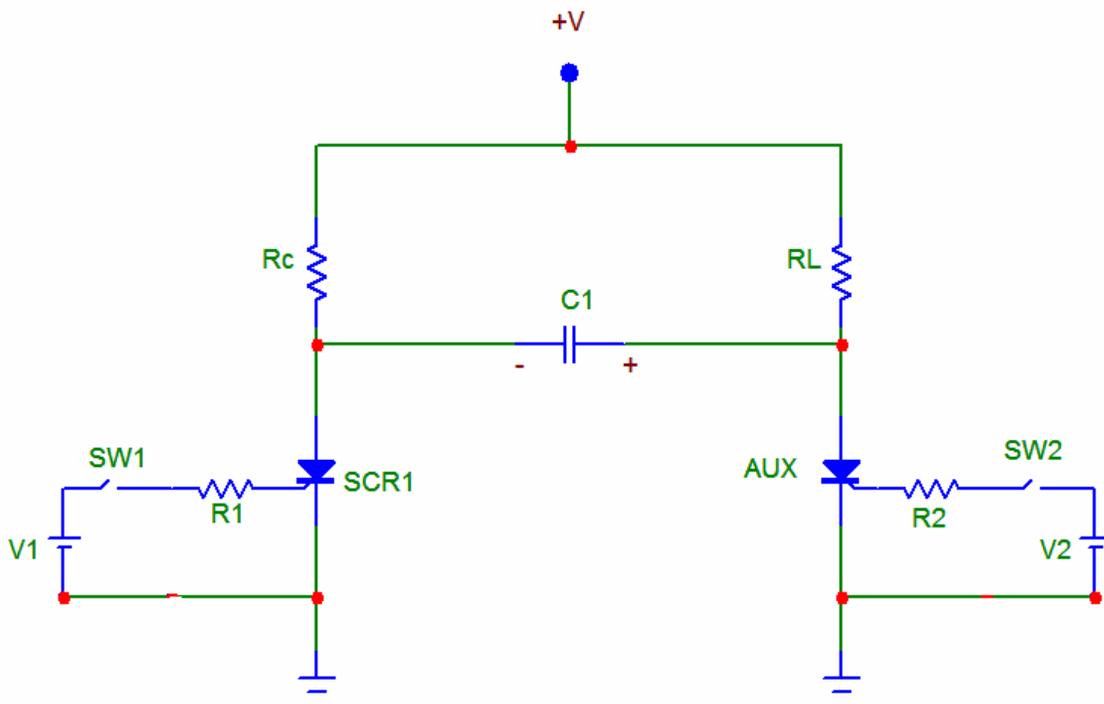
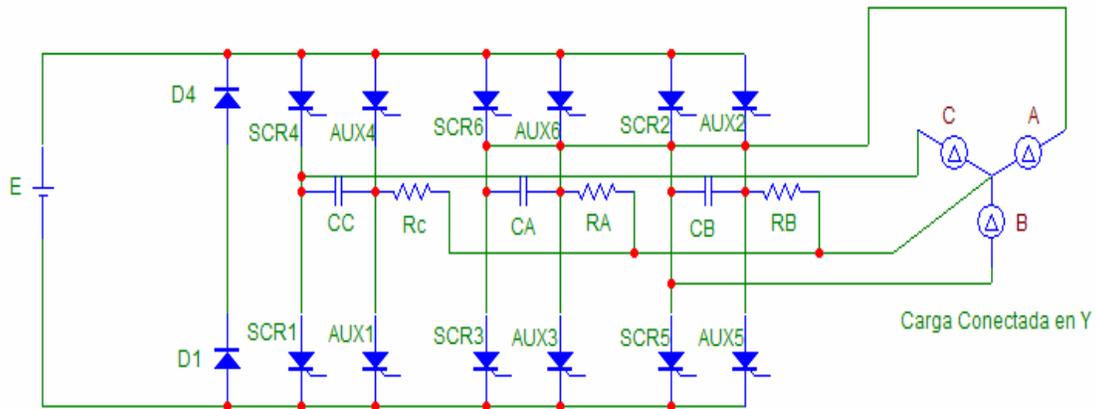


Figura 3.4. Circuito de apagado del SCR.

Este método aplicado a los SCR's de la figura 3.1 conduce finalmente al esquema mostrado en la figura 3.5, que es el que se propone emplear en el presente trabajo.



12 terminales que van a 12 compuertas SCR

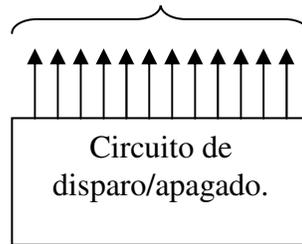


Figura 3.5.- Circuito de disparo / apagado.

3.2. ELECCION DEL CONTROLADOR.

Para poder seleccionar el controlador que se necesitaría para poder tener 12 terminales que van a 12 compuertas SCR y generar los pulsos de disparo de estos, se empezó a programar el PIC16F84A,

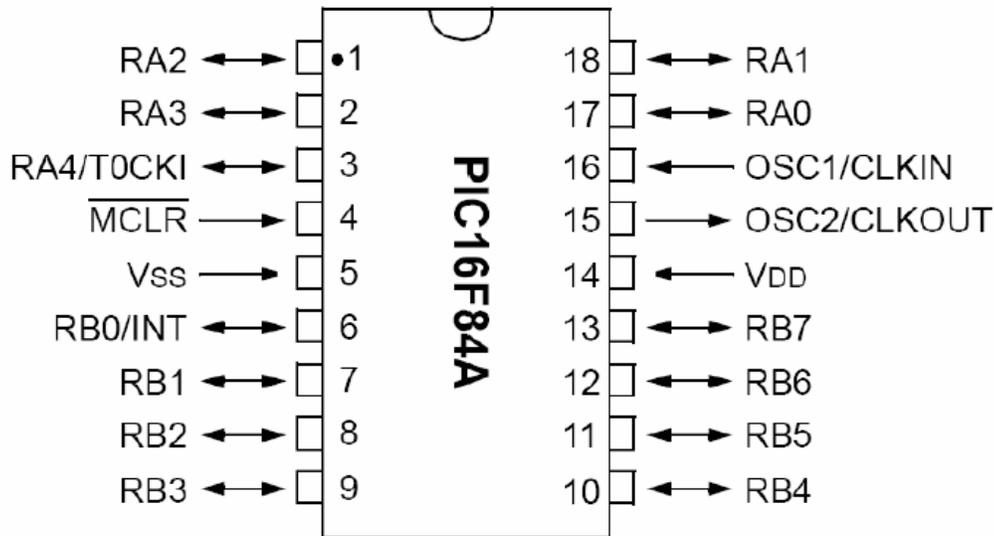


Figura 3.6.- Diagrama del PIC 16F84A.

El cual era el controlador que tenía todas las cualidades ya que cuenta con dos puertos, el puerto RA con cuatro terminales y el puerto RB con 8 terminales, con lo que se podrían tener las 12 terminales que van a los 12 SCR's. Su programación constaba de 11 instrucciones con las cuales se tenían que programar para obtener los pulsos necesarios para excitar la compuerta de los 12 SCR's. Al empezar a programarlo la primera limitante que se encontró fue que eran muy pocas las instrucciones para obtener los pulsos necesarios de disparo, otra limitante fue que se necesitaba una interrupción para invertir el sentido de giro del motor, lo cual ya no se tenía ya que se ocupan todas los terminales de todos los puertos, por todas estas razones se decidió utilizar mejor un microcontrolador.

El microcontrolador Atmega8535 (figura 3.7) es un microcontrolador AVR 8-bit RISC fabricado por Atmel Corporation [4]. Su arquitectura combina una amplia lista de instrucciones con 32 registros de propósito general, los cuales están directamente conectados a la Unidad Aritmética Lógica (ALU) (Figura 8).

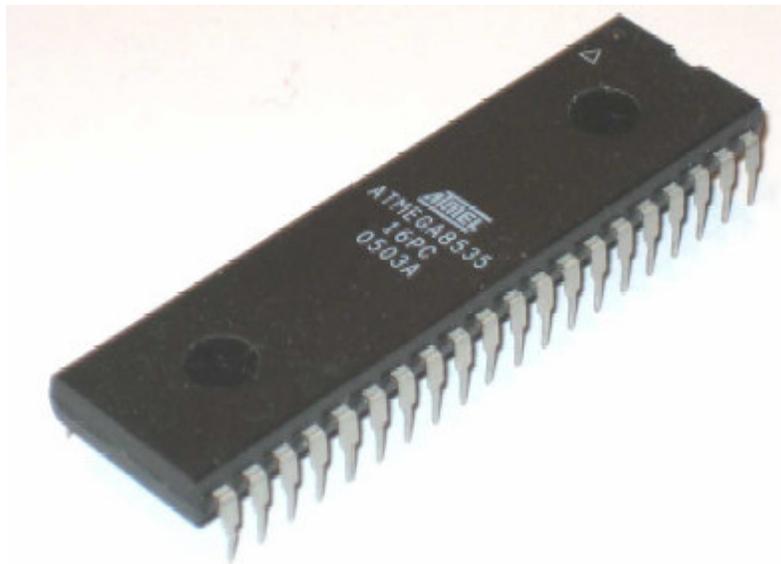


Figura 3.7.-Fotografía del Microcontrolador ATMEGA8535.

Como el nombre indica, se trata de un micro de estructura RISC (Reduced Instruction Set Computer). Los microcontroladores con estructura RISC se caracterizan por:

- Realizan una instrucción por ciclo de máquina, para lo cual enfatizan en la segmentación.
- Carece de microprogramas.
- Emplean modos de direccionamiento sencillo: direccionamiento a registro en casi todas las instrucciones. Tiene pocos modos de direccionamiento, reduciendo el conjunto de instrucciones y simplificando la unidad de control.

Las principales características de este microcontrolador se exponen a continuación:

- 8Kbytes de memoria Flash programable mediante ISP (In System Programming), con opciones de lectura mientras se está escribiendo.
- 512 bytes de memoria EEPROM.
- 512 bytes de memoria SRAM.
- 32 líneas de entrada/salida de propósito general. Repartidas en 4 puertos de 8 bits cada uno.
- Temporizadores/contadores con modo de comparación entre ellos.
- 8 conversores analógico digital de 10 bits de resolución.
- Interrupciones internas y externas.
- Un puerto serie programable (UART/USRT).
- Un puerto serie SPI.
- Un watchdog interno programable con reloj propio.

La memoria Flash que ofrece este microcontrolador permite la opción de reprogramarse en la propia placa en la cual debe funcionar a través del interfaz serie ISP (In-System-Programming), mediante el empleo de un programador convencional, o bien mediante un proceso de autoprogramación que se incluye en el núcleo de los microcontroladores AVR “AVR core”. A este método se le llama ISSP (In-System-Self-Programming).

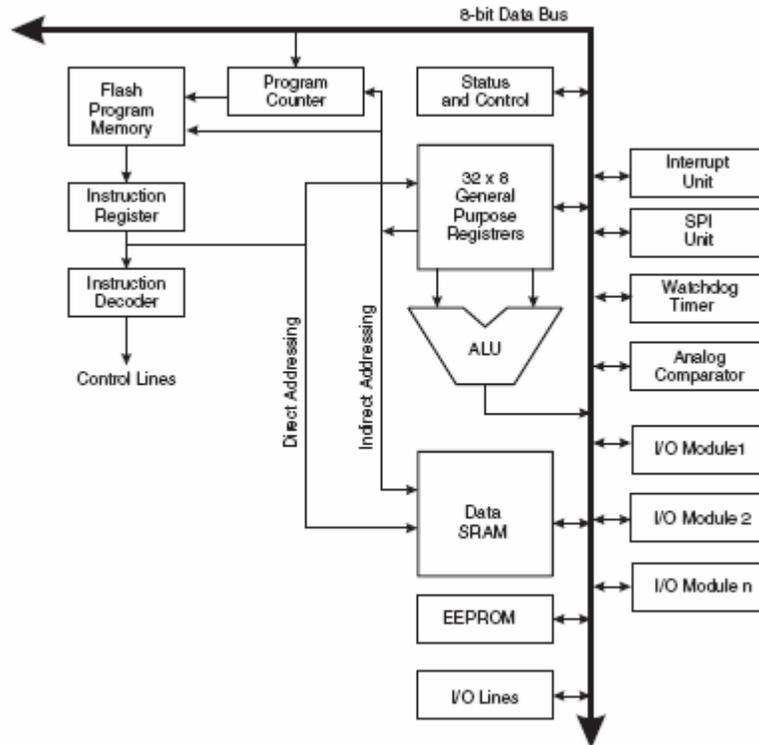


Figura 3.8.- Estructura interna del Microcontrolador ATMEGA8535.

3.3. SEÑALES DE DISPARO.

Para poder obtener las señales de disparo de los SCR's se necesitaban dos tipos de señales con diferente frecuencia:

a) Señal de 5000 Hz que sería para los transformadores de pulsos, que a su vez excitarían la base de los SCR's

b) Señales de 60 Hz que sería la frecuencia a la que operaría el inversor.

3.3.1. SEÑAL DE 5000 HZ

Esta señal se tenía que diseñar de tal forma que un tercio de su periodo quedara en alto y los dos tercios restantes en bajo y así periódicamente, como se muestra en la figura siguiente:

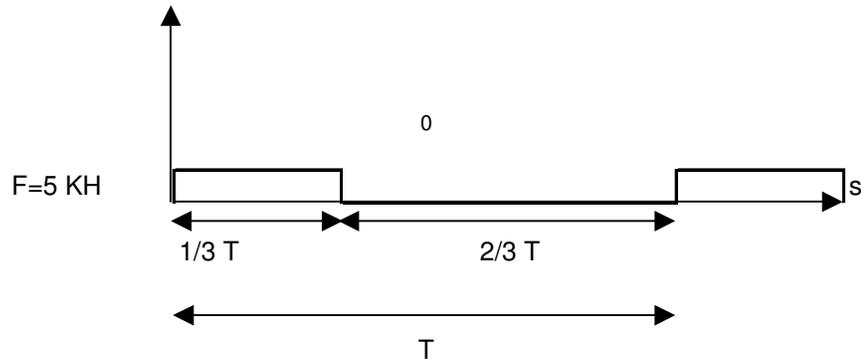


Figura 3.9.- Señal de 5000 Hz.

Para poder tener una frecuencia de 5 000 Hz el periodo T debe ser de 0.2 ms con un Ton = 0.06 ms y un Toff=0.13 ms

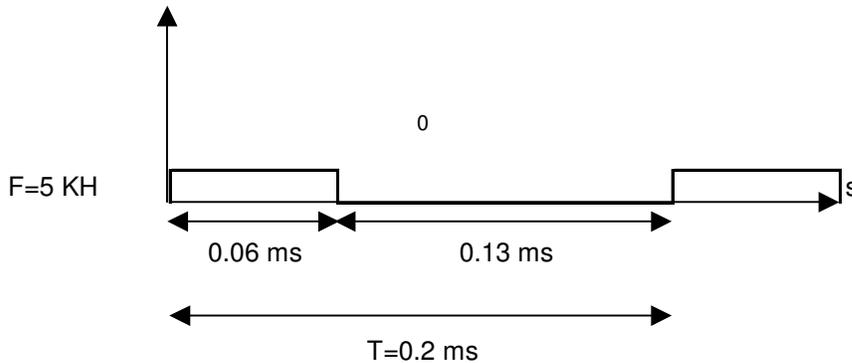


Figura 3.10.- Señal de 5000 Hz en ms.

Ahora bien ya que se tiene esta frecuencia es necesario hacerla periódica, como se muestra en la figura 3.11.

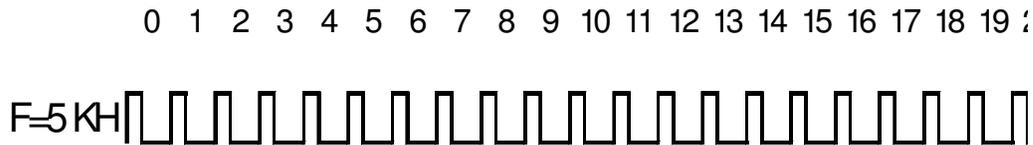


Figura 3.11.- Señal de 5000 Hz periódica.

3.2.2. SEÑAL DE 60 HZ

La señal de 5000 Hz estará fija y solo se multiplexará para excitar los SCR`s que se requieran como se muestra en la Figura 3.12, solo observa una parte de las señales del proceso de encendido y apagado; el SCR 6, y el SCR 1 se encuentran conduciendo se puede ver que el SCR 6 se encuentra a la mitad de su periodo de encendido que es de 120°.

Cuando termina los 120° se manda un tren de pulsos de 5000 Hz en el AUX 6

con lo que se interrumpe la conducción del SCR6, ahora se enciende el SCR 2 durante un periodo de 120° a la mitad de este periodo se manda un tren de pulsos al AUX 1 para apagar al SCR1 y encender el SCR 3 y de esta forma la señal de 5 000 Hz se va multiplexando hasta hacer todo el proceso y repetirse según se requiera.

Cada periodo que es de 120° necesita 28 periodos de la frecuencia de 5000 Hz en alto y 240° apagado para obtener una frecuencia de 60 Hz.

En esta grafica se muestra la señal multiplexada por los diferentes intervalos:

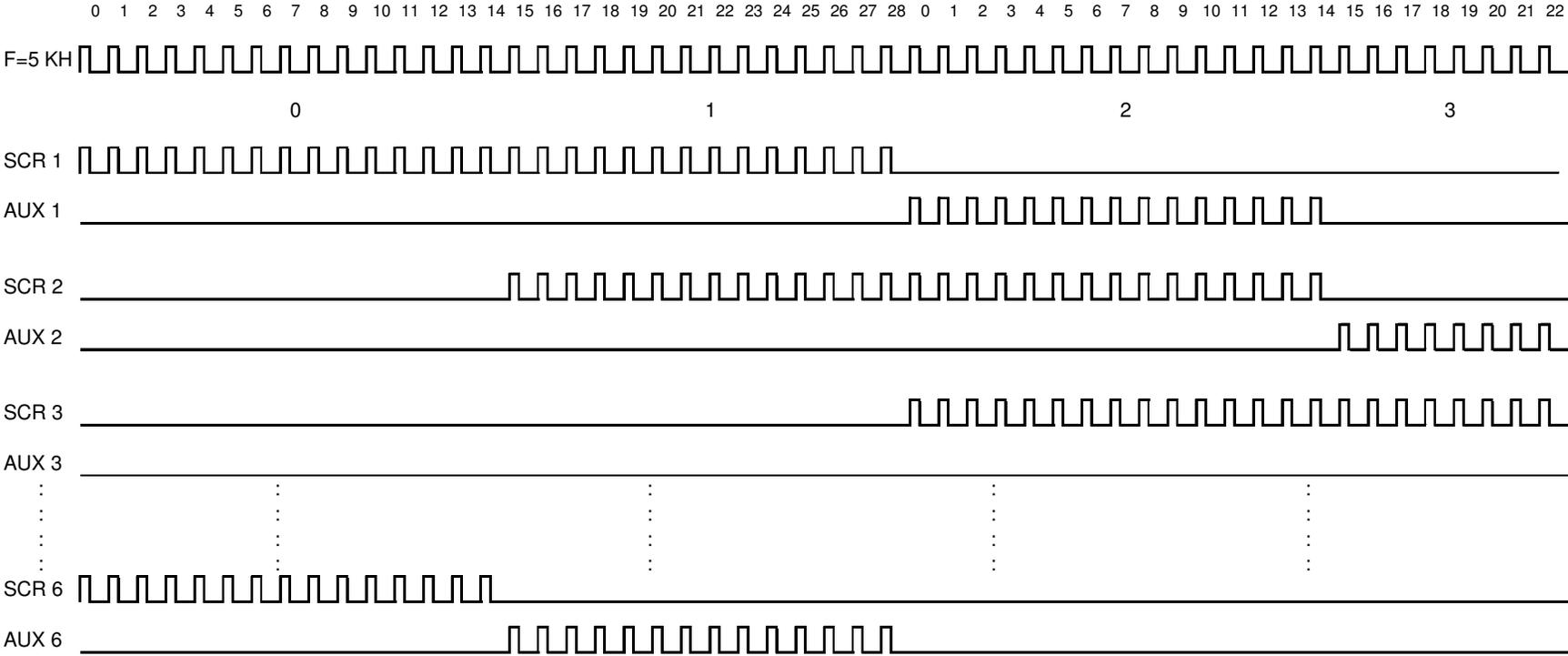


Figura 3.12.- Señal multiplexada en los intervalos.

Las señales de disparo para que el motor gire positivamente queda de la siguiente forma:

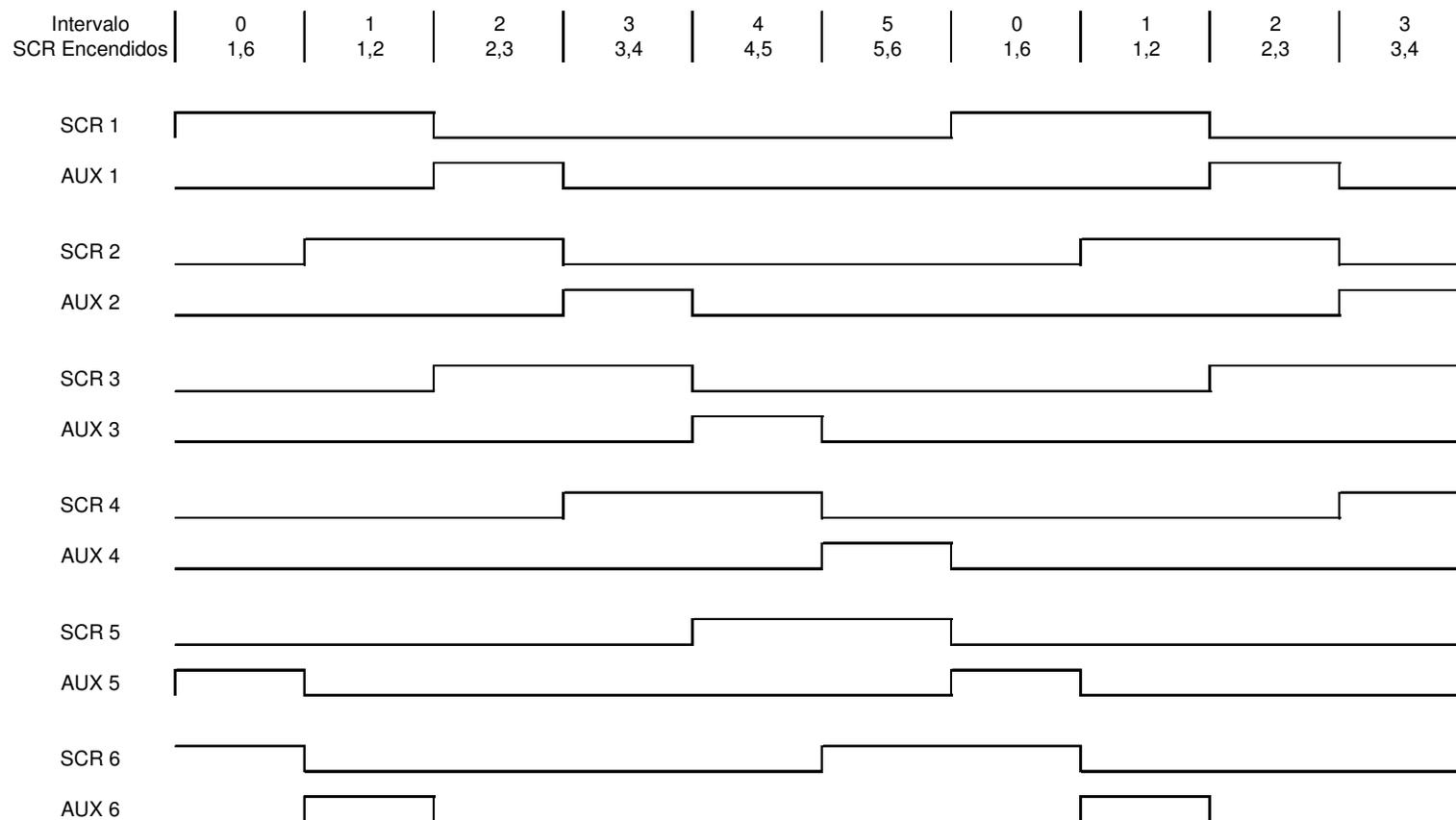


Figura 3.13.- Señales de disparo de los SCR para sentido positivo.

Las señales de disparo para que el motor gire en sentido negativa queda de la siguiente forma:

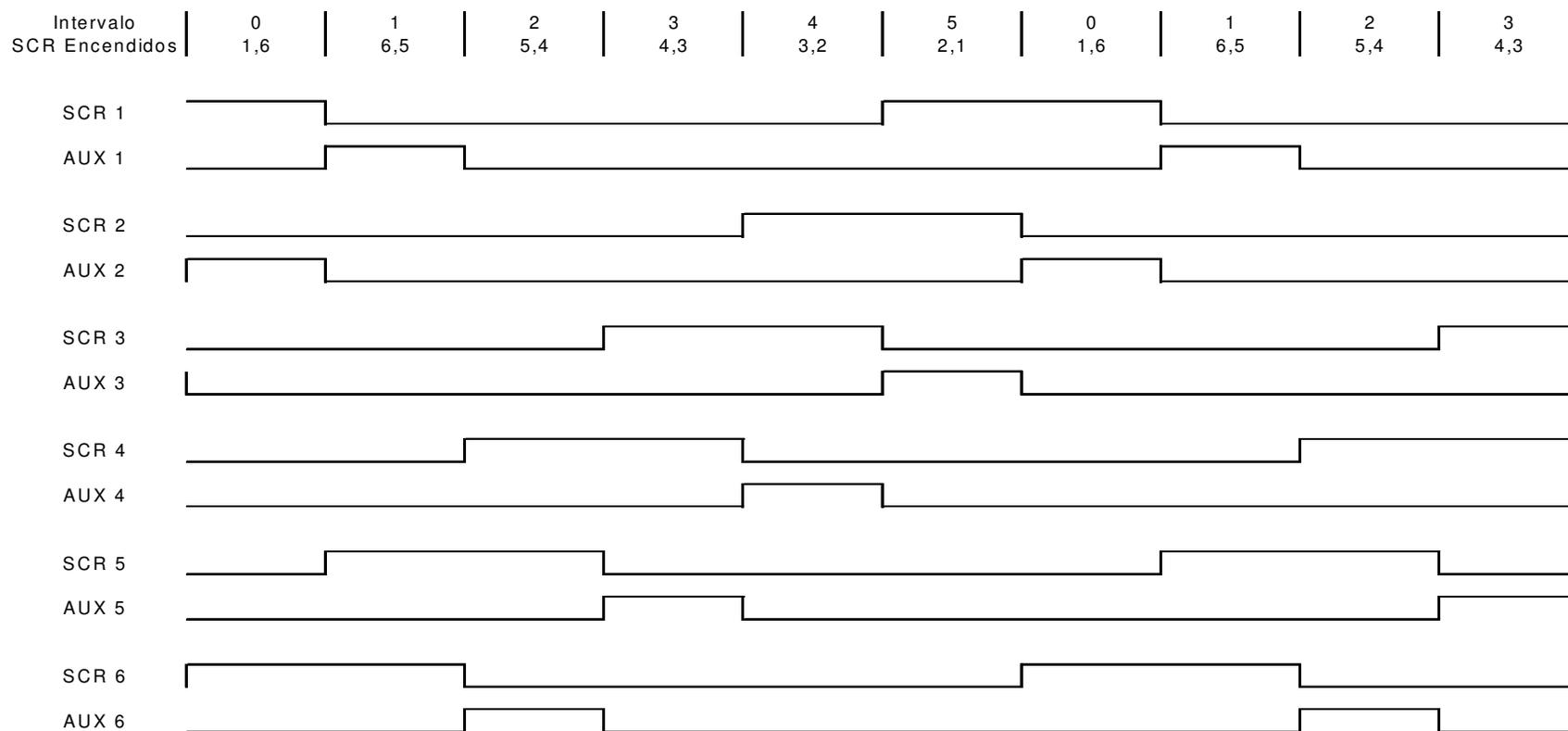


Figura 3.14.- Señales de disparo de los SCR para sentido negativo.

3.4. PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 8535.

3.4.1. HERRAMIENTAS REQUERIDAS.

AVR Studio

El programa AVR Studio es el programa que se utilizó para programar el ATMEGA 8535.

AVR Studio es un potente entorno de desarrollo integrado para escribir y depurar programas destinados a microcontroladores de la familia AVR de Atmel. Posee una herramienta de gestión de proyectos, un editor de código fuente y un simulador de micros. Además puede interactuar con emuladores y con placas de desarrollo disponibles para la familias AVR 8 bit RISC[12].

PonyProg

PonyProg es un Software de programación de dispositivos serie. Con él se pueden leer y escribir en la memoria de un gran número de dispositivos serie, incluyendo parte de la familia de microcontroladores AVR 8 bit RISC de Atmel. En su última versión disponible, la 2.06f, incorpora soporte para programar el micro ATmega8535. En la página web del creador se podrá encontrar una lista con todos los dispositivos soportados por este programador serie [13].

3.4.2. ARQUITECTURA DEL SOFTWARE.

```
;ESTE PROGRAMA GENERA LOS PULSOS DE DISPARO DE LAS COMPUERTAS DE LOS
;SCRs DE UN INVERSOR TRIFASICO A 120°
.DEVICE  ATmega8535  ;DEFINE TIPO DE MICRO
;R6 CONTIENE EL LIMITE DEL CICLO "CIRCULAR" DE LA TABLA A (COEFICIENTES)
;R7 CONTIENE EL LIMITE DEL CICLO "CIRCULAR" DE LA TABLA X[N]
.DEF AL   = R16      ;REGISTRO "ACOMULADOR BAJO"
.DEF AH   = R17      ;REGISTRO "ACOMULADOR ALTO"
.DEF N    = R18      ;LIMITE DEL NUMERO DE MUESTRAS
.DEF A    = R19      ;CONTIENE EL DATO O COMANDO QUE VA SER ESCRITO
.DEF OUTL = R20      ;CONTIENE EL VALOR DE LA SALIDA BAJA
.DEF OUTH = R21      ;CONTIENE EL VALOR DE LA SALIDA ALTA
.DEF P_A  = R22      ;5 ALMACENA UNIDADES DE mS
.DEF P_C  = R23      ;6 ALMACENA DECENAS DE mS
.DEF CONTA = R24
```

```

.DEF X_L    = R26          ;0 ALMACENA CENTENAS DE mS
.DEF BAN_ID = R25          ;0 ALMACENA UNIDADES DE S
.DEF X_H    = R27
.DEF X1     = R28
.DEF T_V_L  = R29
.DEF T_V_H  = R30
.INCLUDE "m8535def.inc"   ;Declaracion de archivo de cabecera
;*****
.NOLIST
.LIST
.CSEG
.ORG 0x0000
R JMP INICIO
.ORG 0x0001
R JMP INT_EXT0 ;INTERRUPCION 0
.ORG 0x0002
R JMP INT_EXT1 ;INTERRUPCION 0

.ORG 0x0008 ;EL TIMER CONTIENE LA FRECUENCIA DE MUESTREO
R JMP TIMER_1
.ORG 0x0009 ;EL TIMER CONTIENE LA FRECUENCIA DE MUESTREO
R JMP TIMER_0

.ORG 0x0012 ;
R JMP INT_EXT2
INICIO:
LDI A,HIGH(RAMEND) ;CONFIGURA EL STACK CON 0x025F
OUT SPH,A
LDI A,LOW(RAMEND)
OUT SPL,A
LDI A,0xFF
OUT DDRA,A ;PORT_A COMO SALIDA
OUT DDRC,A ;PORT_C COMO SALIDA

LDI A,0x00
OUT DDRD,A ;PORT_D COMO ENTRADA
OUT DDRB,A ;PORT_B COMO ENTRADA

CALL CONDICIONES_INICIALES
CALL CARGA_COEFICIENTES
CALL CONFIGURA_INTERRUPCIONES
CALL CONFIGURA_TIMER0
CALL CONFIGURA_TIMER1

SEI

LDI A, (0<< CS12) | (0<<CS11) | (1<<CS10) | (0 << WGM12) | (0 <<WGM13) ;ENTRE 1
;LDI A, (1<< CS12) | (0<<CS11) | (0<<CS10) | (0 << WGM12) | (0 <<WGM13) ;ENTRE 256
OUT TCCR1B,A
CALL PARA_TIMERS
LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x8A
LDI A,0x00
ST Z, A

CICLIYO:

R JMP CICLIYO

```

```

;*****
;*****
;*****
CONDICIONES_INICIALES:
  LDI CONTA,0x03
  LDI AL,0xF0
  CLR N
  CLR BAN_ID
  CLC

RET
;
;-----|
;SUB-RUTINAS PARA LA CONFIGURACION DE MANEJO DE PERIFERICOS E INTEPCIONES I
;
;*****
CONFIGURA_TIMER0:
;CONFIGURACION DEL TIMER 0
LDI A, (0 << WGM01) | (0 <<WGM00) | (0 <<COM01) | (0 <<COM00) | (0 <<CS02) | (0 <<CS01) | (1
<<CS00)
LDI A, (0 << WGM01) | (0 <<WGM00) | (0 <<COM01) | (0 <<COM00) | (0 <<CS02) | (0 <<CS01) | (0
<<CS00)
OUT TCCR0,A

  LDI A,0xCC ;256 - 61-9 (FF-3D)-9
  OUT TCNT0,A

;HABILITA INTERRPCION DEL TIMER1 POR COMPARACION EN A
  LDI A, (0 << OCIE0 )|(1 << TOIE0)
  OUT TIMSK,A

RET
;*****
;*****
CONFIGURA_INT0:
;CONFIGURACION DE INTERRUPCIONES EXTERNAS
  LDI A,0xC0
  OUT GIMSK,A ;GENERAL INTERRUPT MASK REGISTER
  OUT GIFR,A ;INT1 INT0 X X X X X
  ; LDI A,0x0A ;SELECCION POR NIVEL ALTO O BAJO
  LDI A, 1<<(ISC11) | 0<<(ISC10) | 1<<(ISC01) | 0<<(ISC00)

  OUT MCUCR,A

RET
;*****
;*****
CONFIGURA_INTERRUPCIONES:
;CONFIGURACION DE INTERRUPCIONES EXTERNAS
  LDI A,0xE0
  OUT GIMSK,A ;GENERAL INTERRUPT MASK REGISTER
  OUT GIFR,A ;INT1 INT0 X X X X X
  ; LDI A,0x0A ;SELECCION POR NIVEL ALTO O BAJO
; SM2 SE SM1 SM0 ISC11 ISC10 ISC01 ISC00
; 1 0 1 0
  LDI A, 1<<(ISC11) | 0<<(ISC10) | 1<<(ISC01) | 0<<(ISC00)
  OUT MCUCR,A

```

```

    LDI A, 1<<(ISC2)
    OUT MCUCSR,A
    RET
;*****
;*****
ARRANCA_TIMERS:
;HABILITA INTERRPCION DEL TIMER1 POR COMPARACION EN A
    LDI A, (0 << TICIE1)|(0 << OCIE1A)|(0 << OCIE0)|(1 << TOIE1)|(0 << OCIE0)|(1 << TOIE0)
    OUT TIMSK,A
    CALL SELEC_IZQ_O_DER
    LDI A, (0<< CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10)|(0 << WGM12)|(0 <<WGM13);ENTRE 1
    OUT TCCR1B,A
    RET
;*****
;*****
SELEC_IZQ_O_DER:
    CALL CARGA_COEFICIENTESDER
    IN A,PINB
    ANDI A,0x01
    CPI A,0x00
    BRNE NOINCREMENTA ;SALTA SI NO HAY TECLA APLANADA
    CALL CARGA_COEFICIENTESIZQ
NOINCREMENTA:
    RET
;*****
;*****
PARA_TIMERS:

; LDI A, (0 << TICIE1)|(0 << OCIE1A)|(0 << OCIE0)|(0 << TOIE1)|(0 << OCIE0)|(0 << TOIE0)
; OUT TIMSK,A

    LDI P_A,0x00
    LDI ZH,0x00
    LDI ZL,0x8A
    LDI A,0x01
    ST Z, A
;DE ACUERDO CON EL VALOR DE N
;EL AUX VA A APAGAR EL SCR QUE LE CORRESPONDA
;N AUX AP
;0 6
;1 1
;2 2

;SI ES 1 DER

    IN A,PINB
    ANDI A,0x01
    CPI A,0x01
    BRNE PARA_IZQ
    CALL PARA_AUX_DER
    RJMP SALE_PARA_TIMERS
PARA_IZQ:
    CALL PARA_AUX_IZQ
SALE_PARA_TIMERS:
    RET
;*****
PARA_AUX_DER:
    CPI N,0x00 ; SI ES CERO APAGA AUX 6
    BRNE COMP_1

```

```

LDI A,0x20
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUX
COMP_1:
CPI N,0x01
BRNE COMP_2
LDI A,0x01
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUX
COMP_2:
CPI N,0x02
BRNE COMP_3
LDI A,0x02
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUX
COMP_3:
CPI N,0x03
BRNE COMP_4
LDI A,0x04
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUX
COMP_4:
CPI N,0x04
BRNE COMP_5
LDI A,0x08
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUX
COMP_5:
CPI N,0x05
BRNE SALE_AUX
LDI A,0x10
MOV P_C,A

```

```

SALE_AUX:
RET

```

```

;*****

```

```

;*****

```

```

PARA_AUX_IZQ:

```

```

    CPI N,0x00 ; SI ES CERO APAGA AUX 6
BRNE COMPI_1
LDI A,0x20
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUXI
COMPI_1:
CPI N,0x01
BRNE COMPI_2
LDI A,0x10
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUXI
COMPI_2:
CPI N,0x02
BRNE COMPI_3
LDI A,0x08
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUXI
COMPI_3:
CPI N,0x03
BRNE COMPI_4

```

```

LDI A,0x04
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUXI
COMPI_4:
CPI N,0x04
BRNE COMPI_5
LDI A,0x02
MOV P_C,A
RJMP SALE_AUXI
COMPI_5:
CPI N,0x05
BRNE SALE_AUXI
LDI A,0x01
MOV P_C,A

SALE_AUXI:
RET
;*****
;*****
;*****
CONFIGURA_TIMER1:
;SELECCIONA EL MODO NORMAL 000
    LDI A, (0 << WGM10) | (0 <<WGM11)
    OUT TCCR1A,A

    LDI A, (0 << WGM12) | (0 <<WGM13)
    OUT TCCR1B,A
;PRIMERO SE ESCRIBE EN EL HIGH
;DESPUES SE ESCRIBE EN EL LOW

    LDI A,0xF5
    OUT TCNT1H,A
    MOV R1,A

    LDI A,0x26
    OUT TCNT1L,A
    MOV R0,A

;HABILITA INTERRPCION DEL TIMER1 POR COMPARACION EN A
; LDI A, (0 << TICIE1 )|(0 << OCIE1A)| (0 << OCIE0 )|(1 << TOIE1)|(0 << OCIE0 )|(1 << TOIE0)
; OUT TIMSK,A

RET
;*****
;
;
;
;          |
; SUB-RUTINAS PARA MENEJO DE OPERACIONES ARITMETICAS      |
;
;*****
;
;
;
;          |
; SUB-RUTINAS PARA MENEJO DE INTERRUPCIONES                |
;
;*****
CARGA_COEFICIENTES:
;CARGO LOS COEFICIENTES ALMACENADOS EN LA MEMORIA EEPROM

LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x80

```

```

LDI A,0x21 ;00
ST Z+ ,A
LDI A,0x03 ;01
ST Z+ ,A
LDI A,0x06 ;02
ST Z+ ,A
LDI A,0x0C ;03
ST Z+ ,A
LDI A,0x18 ;04
ST Z+ ,A
LDI A,0x30 ;05
ST Z+ ,A

```

```

LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x90

```

```

LDI A,0x10 ;00
ST Z+ ,A
LDI A,0x20 ;01
ST Z+ ,A
LDI A,0x01 ;02
ST Z+ ,A
LDI A,0x02 ;03
ST Z+ ,A
LDI A,0x04 ;04
ST Z+ ,A
LDI A,0x08 ;05
ST Z+ ,A

```

```

RET
;*****

```

```

CARGA_COEFICIENTESDER:
;CARGO LOS COEFICIENTES ALMACENADOS EN LA MEMORIA EEPROM

```

```

LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x80

```

```

LDI A,0x21 ;00
ST Z+ ,A
LDI A,0x03 ;01
ST Z+ ,A
LDI A,0x06 ;02
ST Z+ ,A
LDI A,0x0C ;03
ST Z+ ,A
LDI A,0x18 ;04
ST Z+ ,A
LDI A,0x30 ;05
ST Z+ ,A

```

```

LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x90

```

```

LDI A,0x10 ;00
ST Z+ ,A
LDI A,0x20 ;01
ST Z+ ,A
LDI A,0x01 ;02
ST Z+ ,A
LDI A,0x02 ;03

```

```

ST Z+ ,A
LDI A,0x04 ;04
ST Z+ ,A
LDI A,0x08 ;05
ST Z+ ,A
RET
;*****
;
CARGA_COEFICIENTESIZQ:
;CARGO LOS COEFICIENTES ALMACENADOS EN LA MEMORIA EEPROM

LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x80

LDI A,0x30 ;00
ST Z+ ,A
LDI A,0x18 ;01
ST Z+ ,A

LDI A,0x0C ;02
ST Z+ ,A
LDI A,0x06 ;03
ST Z+ ,A
LDI A,0x03 ;04
ST Z+ ,A
LDI A,0x21 ;05
ST Z+ ,A

LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x90

LDI A,0x01 ;00
ST Z+ ,A
LDI A,0x20 ;01
ST Z+ ,A
LDI A,0x10 ;02
ST Z+ ,A
LDI A,0x08 ;03
ST Z+ ,A
LDI A,0x04 ;04
ST Z+ ,A
LDI A,0x02 ;05
ST Z+ ,A
RET
;*****
;
TIMER_0:

;CC = FRECUENCIA ALTA = 5000 Hz

LDI A,0xCC ;256 - 61 (FF-3D)
OUT TCNT0,A

;CONTADOR INCREMENTA

;SACAMOS
;EL SEGUNDO BIT DE CONTA
LDI X1,0xFF
SBRC CONTA,1
LDI X1,0x00

```

```

; AND X1,AL
;X1 TIENE EL TREN DE PULSOS DE ALTA FRECUENCIA
MOV AL,P_A
AND AL,X1
OUT PORTA,AL
MOV AL,P_C
AND AL,X1
OUT PORTC,AL
INC CONTA
CPI CONTA,6
BRNE SIGUE_NO_AJUSTA
LDI CONTA,3
SIGUE_NO_AJUSTA:

RETI
;*****
;*****
;*****
;*****
TIMER_1:
;DETIENE TIMER 0
LDI A, (0 << WGM01) | (0 <<WGM00) | (0 <<COM01) | (0 <<COM00) | (1 <<CS02) | (0 <<CS01) | (0
<<CS00)
OUT TCCR0,A
;DETIENE TIMER1
LDI A, (0<< CS12) | (0<<CS11) | (0<<CS10) | (0 << WGM12) | (0 <<WGM13) ;ENTRE 256
OUT TCCR1B,A
;SI LA BANDERA DE PARO FUE ACTIVADA ENTONCES DETIENE LOS DOS TIMERS
;*****

LDI X_H,0x00
LDI X_L,0x8A
LD A,X

CPI A,0x01 ; SI ES UNO ENTONCES HACE ...
BRNE SIGUE_NOMAL
LDI A, (0 << TICIE1)|(0 << OCIE1A)|(0 << OCIE0)|(0 << TOIE1)|(0 << OCIE0)|(0 << TOIE0)
OUT TIMSK,A
LDI ZH,0x00
LDI ZL,0x8A
LDI A,0x00
ST Z, A

LDI A, (0 << WGM01) | (0 <<WGM00) | (0 <<COM01) | (0 <<COM00) | (0 <<CS02) | (0 <<CS01) |
(0 <<CS00)
OUT TCCR0,A
LDI A, (0<< CS12) | (0<<CS11) | (0<<CS10) | (0 << WGM12) | (0 <<WGM13) ;ENTRE 256
OUT TCCR1B,A

LDI A, (0 << TICIE1)|(0 << OCIE1A)|(0 << OCIE0)|(1 << TOIE1)|(0 << OCIE0)|(1 << TOIE0)
OUT TIMSK,A

LDI A,0x00
OUT PORTC,A

RJMP SALE_PARA
;*****
SIGUE_NOMAL:

LDI A,0xEA

```

```

OUT TCNT1H,A

LDI A,0x4C
OUT TCNT1L,A
;SUB RUTINA QUE LLEVA UN CONTEO DE 0-5 EN LA VARIABLE "N"
INC N

CPI N,0x06
BRNE SIGUE_CONTANDO
LDI N,0
SIGUE_CONTANDO:
CLR X_H
LDI X_L,0x80
ADD X_L, N
LD P_A,X ;EN R0 ESTA PA0 SCRs

LDI X_L,0x90
ADD X_L, N
LD P_C,X ;EN R0 ESTA PA0 AUXs
SALE_TIMER1:
;ARRANCA TIMER CERO
LDI A, (0 << WGM01) | (0 << WGM00) | (0 << COM01) | (0 << COM00) | (0 << CS02) | (0 << CS01) |
(1 << CS00)
OUT TCCR0,A
;ARRANCA TIMER UNO
LDI A, (0 << CS12) | (0 << CS11) | (1 << CS10) | (0 << WGM12) | (0 << WGM13) ;ENTRE 256
OUT TCCR1B,A
;-----modificacion 2marzo
;ARRANCA TIMER UNO
;LDI A, (1 << CS12) | (0 << CS11) | (0 << CS10) | (0 << WGM12) | (0 << WGM13) ;ENTRE 256
;OUT TCCR1B,A

LDI A, (0 << TICIE1) | (0 << OCIE1A) | (0 << OCIE0) | (1 << TOIE1) | (0 << OCIE0) | (1 << TOIE0)
OUT TIMSK,A
SALE_PARA:

RETI
;*****
;*****
;-----RUTINA DE SERVICIO DE INT2-----
INT_EXT2:
;BAN_ID INICIA EN 0
BCLR INTF2
CPI BAN_ID,0x00
BRNE SIPARA
CALL ARRANCA_TIMERS
RJMP SALEINT0
SIPARA:
CALL PARA_TIMERS
SALEINT0:
COM BAN_ID
; CALL RETARDOTE
RETI

;*****
;-----RUTINA DE SERVICIO DE INT0-----
INT_EXT0:

RETI
;-----RUTINA DE SERVICIO DE INT0-----

```

Construcción del Proyecto.

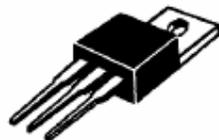
4.1 ETAPA DE CONTROL

4.1.1 ACOPLAMIENTO DE LA SEÑAL DIGITAL.

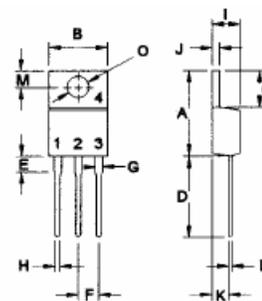
Una vez obtenidas las señales de disparo de los 6 SCR principales y los 6 SCR auxiliares, y probado que estén operando en la frecuencia deseada, ahora es necesario acoplar estas señales a doce transformadores de pulsos que son los que van a aislar la etapa de control de la etapa de potencia.

Para esto es necesario poner un transistor darlington para que la corriente que circule a través del transformador de pulsos sea la necesaria para excitar la compuerta del SCR, para ello se ocupó el transistor NPN MJE13007A.

El cual es un transistor que es utilizado en aplicaciones de voltaje alto, alta velocidad de conmutación, en especial posee una potencia de conmutación en circuitos inductivos por lo cual lo hace idóneo para trabajar en esta aplicación, el diagrama y sus características se muestran a continuación:



TO-220



PIN 1.BASE
2.COLLECTOR
3.EMITTER
4.COLLECTOR(CASE)

Characteristic	Symbol	MJE13007A	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	400	V
Collector-Emitter Voltage	V_{CEV}	850	V
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	9	V
Collector Current - Continuous	I_C	8	A
- Peak	I_{CM}	16	
Base current	I_B	4	A
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	80	W
Derate above 25°C		640	mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{STG}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

Figura 4.1.- MJE 13007A.

4.1.2 TRANSFORMADOR DE PULSOS.

Posteriormente la salida del transistor se colocaría al transformador de pulsos; para elaborar el transformador de pulsos se utilizó primeramente una barra de ferrita y enrollándole alambre esmaltado con una relación 1:1, con 10 vueltas;

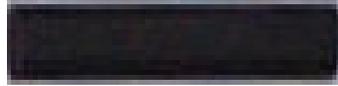


Figura 4.2.- Barra de ferrita.

Pero al hacerle pruebas de encendido del SCR, se observó que no se podía encender el SCR, por lo cual se decidió aumentar a 20 obteniendo el mismo resultado, por último se decidió cambiar la barra de ferrita para aumentar la corriente en el devanado secundario a una dona de ferrita como se muestra en la figura 4.3:



Figura 4.3.- Dona de ferrita.

Con este núcleo se logró encender el SCR tanto el auxiliar como el principal, logrando así obtener el transformador de Pulsos que se deseaba para la aplicación de encendido y apagado de los SCRs principales, quedando el circuito de control como se ilustra en la figura 4.4:

4.1.3 DIAGRAMA DE ALAMBRADO.

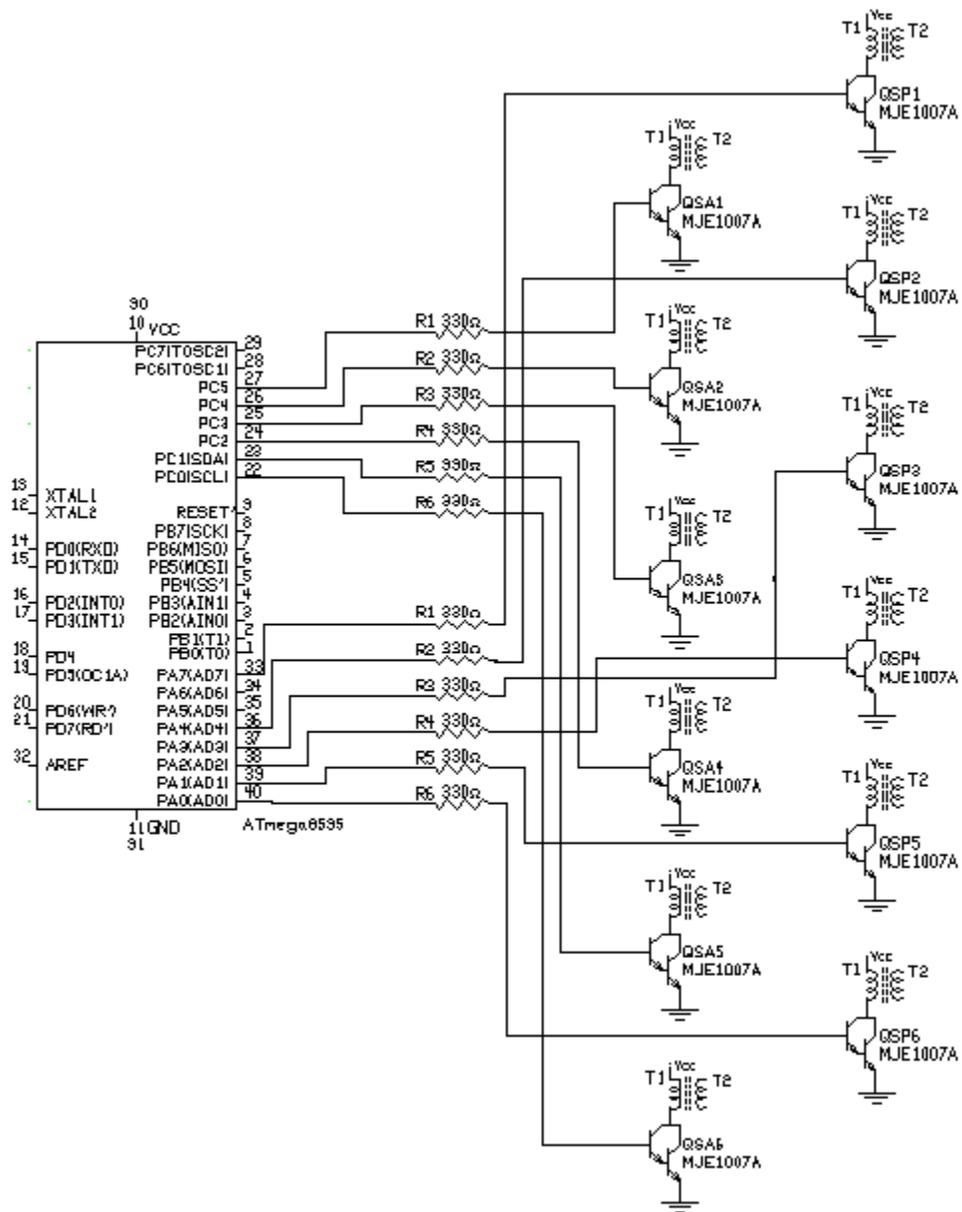


Figura 4.4.-Alambrado del circuito de control.

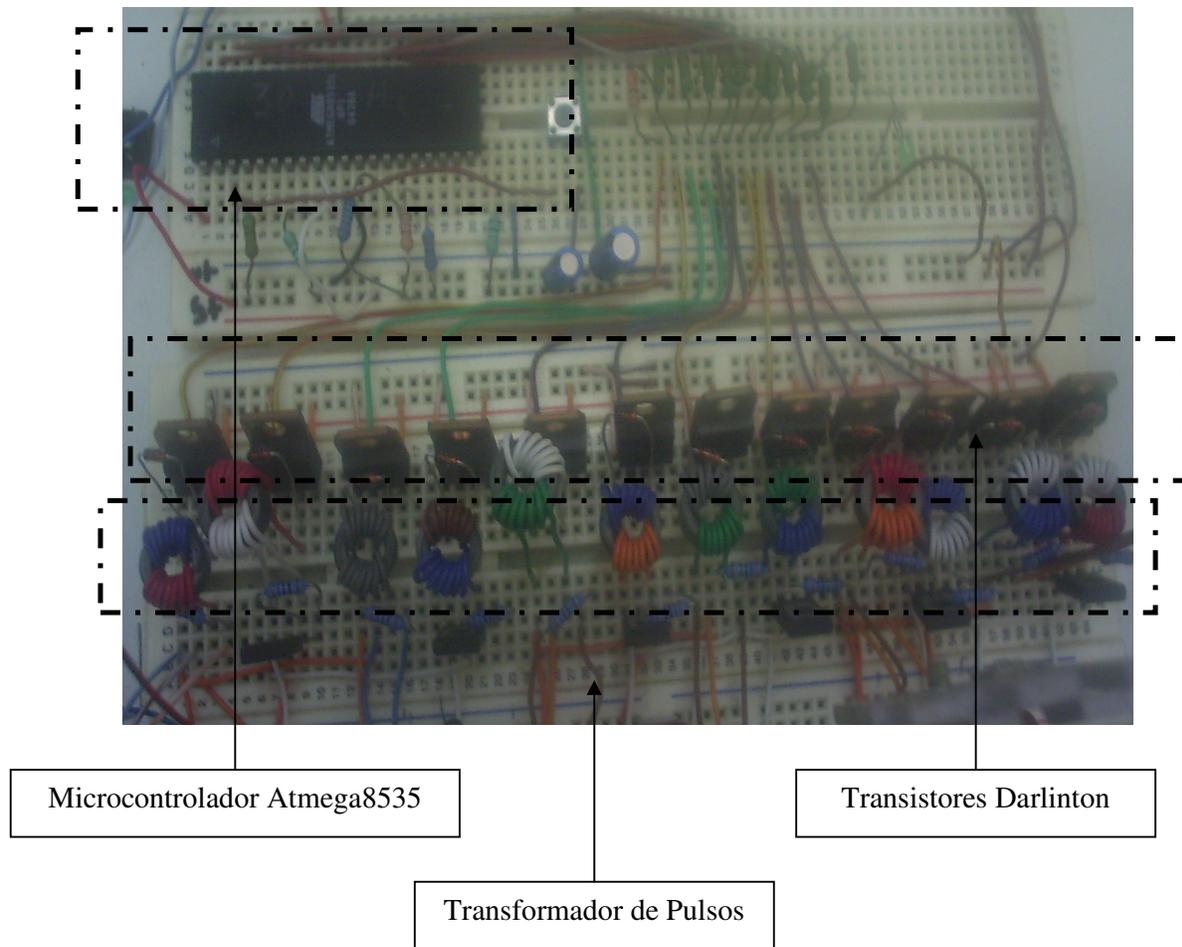


Figura 4.5.- Circuito de control.

4.2 ETAPA DE POTENCIA.

4.2.1. SCR AUXILIARES

Una vez probado que cada transformador de pulsos funcione bien, y que a su salida se obtenga la corriente necesaria para encender los SCR, ahora se conectan los SCR tanto auxiliares como principales.

Para el SCR auxiliar, se puede emplear un SCR pequeño ya que su trabajo solo será el de poner el capacitor en paralelo con el SCR principal, para esto se eligió el SCR C 106D que es de 400 V y 4 Amp. Lo cual es suficiente para llevar a que el capacitor cargado apague al SCR principal:

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	UNIT
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltages	400	V
V_{RRM}	Average on-state current	2.5	A
$I_{T(AV)}$	RMS on-state current	4	A
$I_{T(RMS)}$	Non-repetitive peak on-state current	38	A
I_{TSM}			

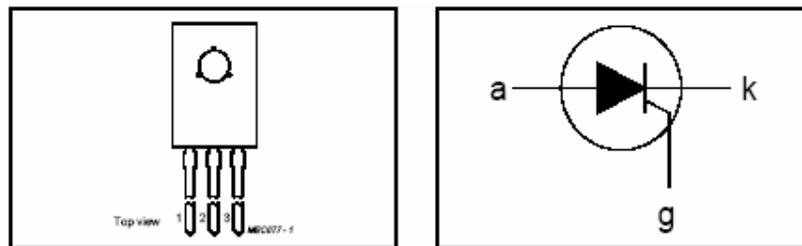


Figura 4.6.- SCR C 106D.

4.2.2. SCR's PRINCIPALES.

Los SCR's principales son los que en realidad estarán soportando la carga que se tenga a la salida y para escoger el tipo de SCR que se encuentre a la salida dependerá de la carga que se conectará, en este caso la carga, es un motor trifásico jaula de ardilla de ¼ de HP para lo cual se utilizará el SCR TIC106D que es de 400V y 5 Amp. Que es suficiente para soportar dicha carga. Cabe mencionar que si se quiere cambiar la carga por una más grande lo único que se cambiaría de este circuito es el SCR principal que sería obviamente de mayor capacidad dependiendo de la carga a conectar.

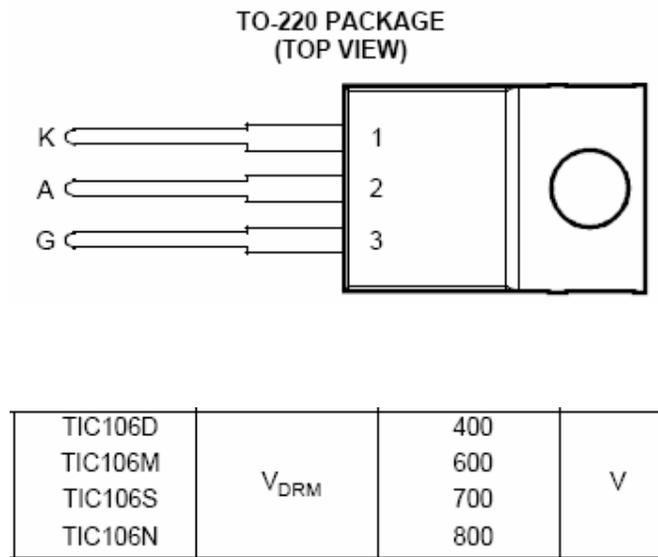


Figura 4.7.- SCR TIC106D.

Pruebas y Conclusiones.

5.1.1. PRUEBAS AL INVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO POR SCR'S

Las pruebas realizadas al Inversor Trifásico Controlado por SCR's se desarrollaron en el Módulo del Laboratorio de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, ya que en ese modulo se cuenta con una fuente de C.D. que varía de 0 V a 100 V, y se tienen en el mismo modulo instrumentos de medición como amperímetros, voltímetros y una perilla para variar el voltaje.

Para elaborar las pruebas se conectó como carga un motor trifásico de C.A. de ¼ de H.P. el cual se muestra en la figura 5.1, este motor está conectado en estrella y sus terminales A,B, y C, se encuentran interconectadas al inversor Trifásico Controlado por SCR's, al igual que su neutro.



Figura 5.1.- Motor Jaula de ardilla de ¼ de hp.

Primero se probó individualmente cada SCR que se pudiera encender y apagar por medio de su auxiliar una vez probado los 6 SCR's se conectó la salida de el inversor a las terminales del motor tanto los devanados como el neutro. Una vez conectado se programo el microcontrolador para que funcionara a una frecuencia de 5 Hz, a lo cual el motor se empezó a mover por pasos comprobando efectivamente que los SCR's se apagaban satisfactoriamente a la frecuencia de 5 Hz.

Ahora se programo nuevamente el microcontrolador a una frecuencia de 20 Hz, y se llevó a cabo la misma prueba, a lo cual el inversor respondió satisfactoriamente⁸⁶

moviendo al motor a una velocidad mayor, comprobando que en esta frecuencia también el inversor funcionaba.



Figura 5.2.- Motor Jaula de ardilla de ¼ de hp vista aérea.

Finalmente se programó el microcontrolador hasta llegar a la frecuencia deseada que es de 60 Hz, y se energizó el circuito y efectivamente el inversor logro mover al motor pero a una frecuencia mucho mayor a las pruebas anteriores, con esto pudimos constatar que verdaderamente la carga y descarga de los bancos de capacitares eran suficiente y tenían el tiempo necesario para apagar el SCR y volver a cargarse para esperar el siguiente periodo y nuevamente mandar a pagar el SCR.

El tiempo de apagado y encendido fue suficiente, para generar a la salida la señal trifásica que requiere el motor en sus terminales, con las cuales energizar los devanados del motor y provocar el movimiento del mismo.

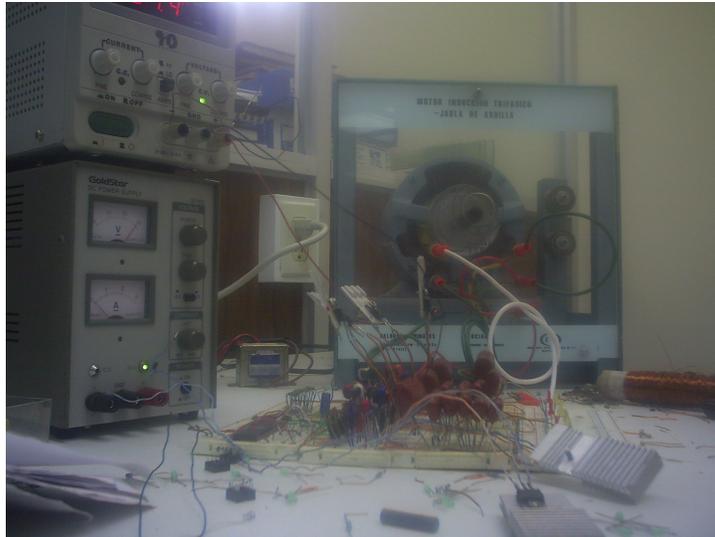


Figura 5.3.-Conexión del Circuito de control al Motor Jaula de ardilla de ¼ de H.P

Una vez probado el motor que girara en un solo sentido ahora se probó el motor para que gire en sentido inverso sin necesidad de cambiar la configuración en sus terminales, con cambiar solamente el software el sentido de disparo de los SCR, para esto se implementó un botón para encender la secuencia de disparo y el mismo para detenerlo y al oprimirlo nuevamente obtener el desplazamiento del motor en sentido inverso.

Cabe mencionar que cuando se implementó por primera vez el sentido inverso del giro del motor este se detuvo inmediatamente el giro del motor ya que en el instante que se oprimía el botón se quedaba conduciendo dos SCR's, y por lo tanto se dos devanados energizados provocando que se mantuviera estático el la flecha del motor, para solucionar esto, por medio de software una vez oprimido el botón para pararlo el software manda a apagar los SCR's últimos que se encontraban encendidos, y con esto el motor seguirá girando hasta detenerse por inercia.

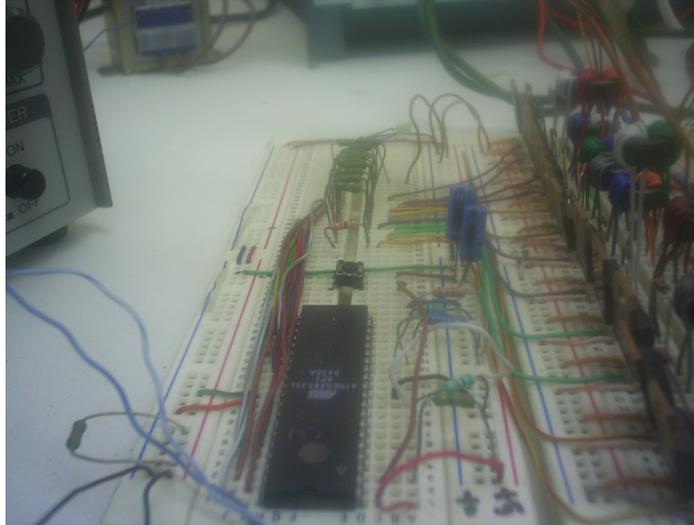


Figura 5.4.-Microcontrolador conectado a los Transistore.s

Ahora al aplicarle la secuencia inversa del sentido de giro del motor el microcontrolador desarrollo satisfactoriamente las señales ya que funcionó verdaderamente la secuencia programada al microcontrolador. Y así al detenerlo y volverlo a encender nuevamente podemos invertir el sentido de giro y comprobar que si funciona el inversor en ambos sentidos.

5.1.2. CONCLUSIONES

Es importante mencionar que si se requiere incrementar la carga al inversor será necesario cambiar el elemento de potencia que es el SCR principal para poder utilizar cargas mas grandes de las que en el presente trabajo se mencionan.

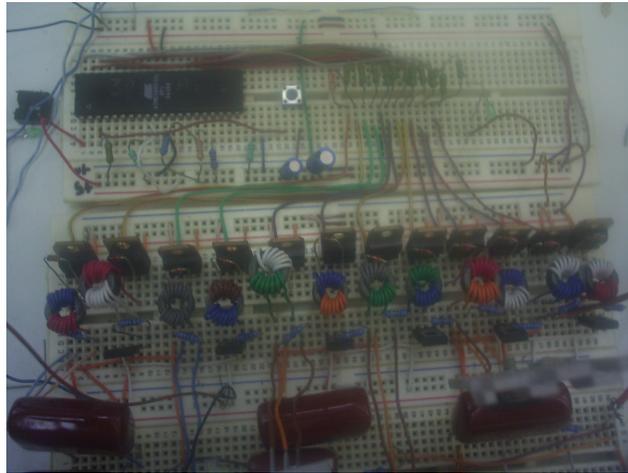


Figura 5.5.-Conexión de los transformadores de Pulso a los SCR's.

Con estas pruebas nos damos cuenta que el inversor trifásico controlado por SCR funcionó de acuerdo a los alcances que se proponían al inicio del trabajo, y se dejan las bases para que si alguien quisiera continuar enriqueciendo este proyecto pueda hacerlo, y con la confianza que nos da el implementar un elemento de control tan poderoso como lo es el SCR.

Referencias

A continuación se muestran diferentes formas de presentar las referencias dependiendo de la fuente. El orden en el que aparecen las referencias; puede ser en orden alfabético o bien en el orden en que aparecen en la tesis.

Libros:

- [1] Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones.
Por: Mohammad H. Rashid. 2004
- [2] Electronica de Potencia
Por: David W. Hart. Ed. 1997
- [3] POWER ELECTRONIC: Converters, applications and design
Por: Mohan, Undeland y Robbins.Ed. Wiley 2003

Tesis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica ITCM:

- [4] “Diseño y Construcción de un Inversor Puente Completo Monofasico con Control PWM Unipolar Sincronizado”
Ing. José David Gonzáles Osti.
Octubre 2005
- [5] “Optimización del Convertidor CD-CA con Salida Senoidal”
Ing. Alejandro Flores Niño.
Diciembre 2004
- [6] “Diseño y Construcción de un Prototipo Educativo para un Convertidor de C.D. a C.A. Trifásica por el Método de Modulación de Ancho de Pulso (PWM)”
Ing. Manuel Paredes Hernández

Artículos Vistos:

- [7] Diseño Y Construcción De Un Inversor Trifásico Multinivel De Cuatro Etapas Para Compensación Armónica Y De Reactivos
Alberto Andres Bretón Schuwirth
Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería
Enero 2005.
- [8] Control Vectorial de Inversores Trifásicos
Salvador Seguí Chilet,
Dept. de Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica de Valencia
Octubre 2004.

Paginas de Internet :

- [9] <http://woody.us.es/~leopoldo/elepot1.html>
Consultada por última vez Abril 2006.
- [10] <http://ingenierias.uanl.mx/>
Consultada por última vez Mayo 2006.
- [11] *Manual de Microcontrolador* <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/44968786d76a1.pdf>
Consultada por última vez Febrero 2007
- [12] Conjunto de desarrolladores independientes;WinAVR; <http://winavr.sourceforge.net/index.html>
Consultada por última vez Mayo del 2006.
- [13] Claudio Lan onelli;Ponyprog2000;<http://www.lan os.om/prog.html>;
Consultada por última vez el 07/05/2006.
- [14] Manual de Referencia del Microcontrolador PIC16F84A Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica
Consultada por última vez el 07/05/2006.
- [15] http://www.inele.ufro.cl/bmonteci/semic/applets/pag_scr/pag_scr.htm#1.%20DEFINICIÓN
Consultada por última vez el 11/08/2007.