



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INTERRUPTOR  
BIDIRECCIONAL DE CORRIENTE ALTERNA BASADO  
EN TRANSISTORES BIPOLARES DE COMPUERTA  
AISLADA**

---

**TRABAJO DE TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**PRESENTA  
AARON NASIM NOH**

**DIRECTOR  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA**

**ASESORES  
M.C. EMMANUEL TORRES MONTALVO  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC  
M.E.S. ROBERTO ACOSTA OLEA  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL**



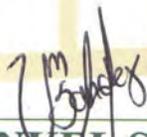


UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

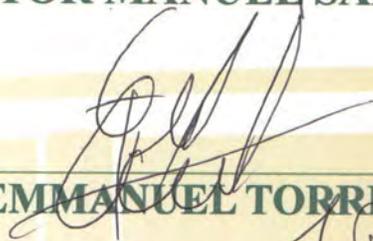
**TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ  
DE ASESORÍA Y APROBADA COMO REQUISITO PARA  
OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**COMITÉ DE TESIS**

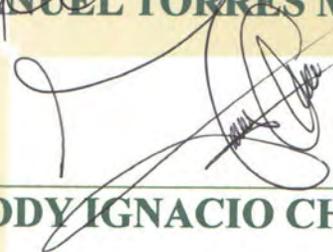
**DIRECTOR:**

  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

**ASESOR:**

  
M.C. EMMANUEL TORRES MONTALVO

**ASESOR:**

  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, JULIO DE 2015.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darme la vida y llenarme de bendiciones, dándome a los mejores padres y familiares.*

*A mis padres, a mi madre Dulce Noh y mi padre Virgilio Noh, por educarme de la mejor manera posible, por todo el amor que me brindan, por siempre apoyarme en mis decisiones, por guillarme en el camino correcto, y por todo lo que soy, que sin ellos no sería nadie.*

*A mi hermano Glen por ser mi modelo a seguir y por siempre estar para mí en buenos y malos momentos.*

*A mi hermanita Keyla por ser la personita por el cual trato de hacer bien las cosas y ser un ejemplo para ella.*

*A mi sobrino Ithiel por ser un motivo más para superarme.*

*A toda mi familia: tíos, tías, primos, y primas por el cariño y apoyo que siempre me brindan.*

*A mis profesores por haberme impartido sus conocimientos y apoyo a largo de mi carrera.*

*A mi asesor, el Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta, por todo el apoyo que me brindo, por el tiempo que me dedicó, y por los consejos que me dio durante el desarrollo de este trabajo.*

*A los encargados de laboratorio, Ing. Gabriel, Ing. Jesús, e Ing. Set, por su tiempo y por facilitarme los aparatos y materiales necesitados.*

*A mis amigos Leiber, Cristian, Marco, José Roberto, por su amistad, por todo el apoyo que me dieron, y por los momentos de trabajo y diversión*

*A mis compañero de generación por su amistad.*

## DEDICATORIA

*A mi Mamá*

*A mi Papá*

*A mis hermanos:*

*Glen y Keyla*

*A la memoria de mis abuelos:*

*Teofilo y Matea*

*Que siempre quisieron lo mejor para mi....*

## INDICE

<b>CAPITULO 1. Introducción</b> .....	9
<b>1.1 Problemática</b> .....	9
<b>1.2 Solución propuesta</b> .....	9
<b>1.3 Justificación</b> .....	10
<b>1.4 Objetivos</b> .....	10
<b>1.4.1 Objetivo General</b> .....	10
<b>1.4.2 Objetivos Específicos</b> .....	10
<b>CAPITULO 2. Dispositivos semiconductores de potencia</b> .....	11
<b>2.1 Introducción</b> .....	11
<b>2.1.1 Características ideales de un interruptor ideal</b> .....	11
<b>2.2 Dispositivos semiconductores de potencia</b> .....	12
<b>2.2.1 Semiconductores de potencia no controlados</b> .....	13
<b>2.2.2 Semiconductores de potencia semicontrolados</b> .....	13
<b>2.2.3 Semiconductores de potencia controlados</b> .....	15
<b>2.3 Circuitos de disparo de semiconductores de potencia</b> .....	17
<b>2.3.1 Aislamiento de compuerta y excitadores de base</b> .....	17
<b>2.3.2 Transformadores de pulsos</b> .....	17
<b>2.3.3 Optoacopladores</b> .....	20
<b>2.3.4 Circuitos de disparo para TIRISTORES</b> .....	21
<b>2.3.5 Excitador de compuerta para MOSFET</b> .....	22
<b>2.4 Cuadrantes de operación de dispositivos de estado solido</b> .....	23
<b>2.4.1 Interruptor de un cuadrante no controlado</b> .....	24
<b>2.4.2 Interruptor de un cuadrante controlado</b> .....	24
<b>2.4.3 Interruptor bidireccional de corriente con MOSFET</b> .....	25
<b>2.4.4 Interruptor bidireccional de corriente</b> .....	26
<b>2.4.5 Interruptor bidireccional de voltaje de dos cuadrantes</b> .....	26
<b>2.4.6 Interruptor de cuatro cuadrantes</b> .....	27
<b>CAPITULO 3. Interruptor Bidireccional</b> .....	29
<b>3.1 Introducción</b> .....	29
<b>3.2 Configuraciones de interruptores bidireccionales</b> .....	29
<b>3.2.1 IGBT con puente rectificador</b> .....	29

3.2.3 Dos IGBTs en antiparalelo con diodos en serie .....	31
3.3 Conmutación .....	33
<b>CAPITULO 4. Diseño y construcción del interruptor bidireccional .....</b>	<b>35</b>
4.1 Introducción .....	35
4.2 Diseño del interruptor de CA.....	35
4.2.1 Configuración Empleada.....	35
4.3 Circuito de detección de cruce por cero .....	36
4.5 Buffer .....	38
4.6 Circuito de disparo .....	39
4.7 Diagrama de bloques .....	40
4.8 Prototipo del interruptor de CA .....	41
<b>CAPITULO 5. Resultados.....</b>	<b>43</b>
5.1 Introducción .....	43
5.2 Prueba de cruce por cero.....	43
5.3 Circuito de generación de señales de disparo .....	45
5.4 Circuito de disparo de los IGBTs.....	47
5.5 Prueba del interruptor bidireccional .....	49
<b>CAPITULO 6. Conclusiones .....</b>	<b>52</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>54</b>
ANEXO A. Hoja de datos de los IGBTs.....	54
ANEXO B. Hoja de datos de los Optoacopladores. ....	55
ANEXO C. Símbolo lógico del buffer.....	56
ANEXO D. Diagrama lógico del buffer. ....	56

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Símbolo del diodo de potencia.....	13
Figura 2. Símbolo de un Rectificador de Silicio Controlado.....	14
Figura 3. Símbolo del TRIAC.....	14
Figura 4. Símbolo del BJT.....	15
Figura 5. Símbolo del MOSFET.....	16
Figura 6. Símbolo del IGBT.....	16
Figura 7. Circuito de disparo de compuerta aislada por transformador.....	18
Figura 8. Aislamiento con transformador de pulso cortó.....	19
Figura 9. Aislamiento con transformador de pulso largo.....	19
Figura 10. Generador de tren de pulsos.....	20
Figura 11. Tren de pulsos con reloj y compuerta lógica AND.....	20
Figura 12. Aislamiento de compuerta por optoacoplador.....	21
Figura 13. Aislador de foto-SCR acoplado.....	22
Figura 14. Circuito de excitación rápida de compuerta.....	22
Figura 15. . (a) Interruptor de un cuadrante. (b) Interruptor de corriente bidireccional de dos cuadrantes. (c) Interruptor de voltaje bidireccional de dos cuadrantes. (d) Interruptor de cuatro cuadrantes.....	23
Figura 16. Símbolo del diodo y su cuadrante de operación.....	24
Figura 17. Símbolo del BJT e IGBT y su cuadrante de operación.....	25
Figura 18. Símbolo del MOSFET y su cuadrante de operación.....	25
Figura 19. BJT con diodo en antiparalelo y su cuadrante de operación.....	26
Figura 20. Diodo en serie con un BJT y su cuadrante de operación.....	27
Figura 21. (a) Configuración de puente rectificador. (b) Configuración de interruptor en paralelo. (c) Configuración de interruptores en antiparalelo. (d) Cuadrantes de operación.....	28
Figura 22. Configuración de IGBT con puente rectificador.....	30
Figura 23. Interruptor en paralelo.....	31
Figura 24. Interruptor de emisor-común.....	32
Figura 25. Interruptor de colector-común.....	33
Figura 26. (a) Ambos interruptores abiertos. (b) Ambos interruptores cerrados.....	34
Figura 27. Configuración empleada- emisor-común.....	36
Figura 28. Circuito de detección de cruce por cero.....	37
Figura 29. Circuito del conmutador lógico.....	38
Figura 30. Circuito de disparo para la compuerta del IGBT.....	39
Figura 31. Diagrama de bloques del proceso llevado a cabo para el diseño y la construcción del interruptor bidireccional.....	40
Figura 32. Imagen descriptiva del circuito de conmutación construido.....	41
Figura 33. Imagen descriptiva del interruptor bidireccional construido.....	42
Figura 34. Circuito de prueba de detección de cruce por cero.....	43

<b>Figura 35. Reducción de la tensión electrica.</b> .....	44
<b>Figura 36. Onda rectificada por el diodo D1.</b> .....	44
<b>Figura 37. Grafica de la prueba de detección de cruce por cero.</b> .....	45
<b>Figura 38. Circuito de generación de señales de disparo.</b> .....	46
<b>Figura 39. Señales de disparo hacia los IGBTs.</b> .....	46
<b>Figura 40. Señales de los optoacopladores aplicadas a las compuertas de los IGBTs T1 y T2.</b> .....	47
<b>Figura 41. . Circuito del interruptor bidireccional monofásico de corriente alterna.</b> .....	48
<b>Figura 42. Banco de pruebas del interruptor de CA.</b> .....	49
<b>Figura 43. Conmutación subcíclica del interruptor de CA. (a) Conmutación subcíclica durante el semiciclo positivo. (b) Conmutación subcíclica durante el semiciclo negativo.</b> .....	50
<b>Figura 44. Conmutación del interruptor de CA. (a) Voltaje de entrada: 60Vpico. (b) Voltaje de entrada: 184 Vpico.</b> .....	51

# **CAPITULO 1. Introducción**

## **1.1 Problemática**

En aplicaciones de circuitos eléctricos existen dos tipos de interruptores: los interruptores convencionales y los interruptores estáticos. La principal diferencia entre los convencionales y los estáticos se encuentra en la forma de efectuar el corte y el restablecimiento del circuito eléctrico. Un interruptor estático consta de uno o más elementos semiconductores que constituyen el “contacto” y un circuito de mando que determina la posición del contacto. En estado abierto los semiconductores ofrecerán una alta impedancia de entrada al paso de corriente y en estado cerrado la impedancia será prácticamente nula.

En la actualidad, en aplicaciones de CA (Corriente Alterna), es necesario el uso de interruptores que sean capaces de conducir corrientes en ambos sentidos y bloquear voltajes positivos y negativos. Un interruptor bidireccional es capaz de conducir sin importar el cambio de polaridad de la energía eléctrica. Este tipo de interruptor es un interruptor estático ya que su composición cuenta con elementos semiconductores de potencia. Estos interruptores deben ser capaces de conducir en los cuatro cuadrantes. Disponibles comercialmente se encuentran los de tipo tiristor, tal es el caso del TRIAC (Triode for Alternating Current). El problema con estos interruptores es controlar su apagado ya que requiere de circuitos auxiliares para lograrlo y su frecuencia de conmutación es muy baja comparada con las de los IGBTs (Integrated-Gate Bipolar Transistor) o MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor). Estas desventajas tienden a incrementar el volumen y el costo del interruptor bidireccional.

## **1.2 Solución propuesta**

En este trabajo de tesis se propone un arreglo de interruptores unidireccionales (IGBTs) y diodos de potencia para integrar un interruptor bidireccional con frecuencia de conmutación superior a la frecuencia de línea (60 HZ). Los IGBTs a utilizar cuentan con el diodo de potencia integrado en un solo dispositivo, por lo que son bidireccionales en corriente pero unidireccionales en voltaje. Esto es una ventaja ya que se reduce el costo y tamaño del diseño a realizar. El sistema de control que se va a utilizar será una consecuencia de la topología elegida para el arreglo de los IGBTs.

### **1.3 Justificación**

Con el paso del tiempo, los interruptores bidireccionales son cada vez más comunes en equipos eléctricos y electrónicos para la circulación de energía de la fuente a la carga y vice-versa. Es necesario encontrar maneras más eficaces que reduzcan el costo e incrementen el tiempo de vida de un interruptor bidireccional ya que la transferencia de energía eléctrica entre fuentes de CA y sus cargas eléctricas es una de las aplicaciones en donde se refleja esta topología. Son ascensores, molinos, motores eléctricos, entre otros.

Por otra parte, los interruptores de potencia bidireccionales basados en dispositivos semiconductores pueden ser utilizados en convertidores electrónicos de potencia en donde se requiere que la frecuencia de conmutación de estos interruptores sea mayor que la frecuencia de línea. Con el desarrollo de este trabajo de tesis se ganará experiencia en el diseño y desarrollo de la etapa de potencia y de control de estos interruptores bidireccionales.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un interruptor bidireccional de estado sólido de corriente alterna en base de dispositivos semiconductores de potencia.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1. Explorar las características y funcionamiento de los dispositivos semiconductores de potencia.
2. Obtener conocimiento de las topologías existentes para interruptores bidireccionales
3. Probar el interruptor bidireccional a diferentes niveles de tensión eléctrica.

## **CAPITULO 2. Dispositivos semiconductores de potencia**

### **2.1 Introducción**

Actualmente la electrónica de potencia tiene un papel importante en el desarrollo de productos comerciales e industriales como en control de motores, de iluminación, de temperatura, entre otras cosas. La electrónica de potencia se define como las aplicaciones de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica; en donde a potencia, la electrónica, y el control se unen para dar como resultado la electrónica de potencia.

Los semiconductores de potencia son elementales en el desarrollo de la electrónica de potencia ya que es uno de los elementos básicos en los convertidores electrónicos de potencia. Los dispositivos semiconductores de potencia actúan como interruptores en circuitos electrónicos de potencia y se encargan de controlar o modificar una tensión o una corriente.

Un interruptor electrónico tiene dos estados, conducción (ON) y no conducción (OFF). Debido a que no existe un interruptor ideal, existen pérdidas de energía en el proceso de conmutación y conducción en el dispositivo semiconductor de potencia. Debido a esta razón, es importante tener en cuenta las características ideales de un interruptor ideal como un punto de referencia para la selección del dispositivo semiconductor de potencia con características más semejante a este. En la siguiente sección se describen las características ideales de un interruptor.

#### **2.1.1 Características ideales de un interruptor ideal**

1. En el estado cerrado, cuando el interruptor está cerrado, debe a) tener la capacidad de conducir una gran corriente directa  $I_F$ , que tienda al infinito; b) una caída de voltaje baja en estado cerrado,  $V_{ON}$ , que tienda a cero, y c) una baja resistencia en estado cerrado, que tienda a cero. Una baja  $R_{ON}$  causa poca pérdida de potencia  $P_{ON}$  en estado cerrado. (Estas simbologías se usa normalmente bajo condiciones de cd de estado estable).
2. En el estado abierto, cuando el interruptor está abierto, debe tener a) la capacidad de resistir un voltaje alto, directo o inverso,  $V_{BR}$ , que tienda al infinito; b) una baja corriente de fuga  $I_{OFF}$  en estado abierto, que tiende a cero, y c) una gran resistencia en estado abierto,  $R_{OFF}$ ,

que tienda a infinito. Una gran  $R_{OFF}$  causa baja pérdida de potencia en estado abierto  $P_{OFF}$ . (Estas simbologías se usa normalmente en condiciones de estado estable de cd).

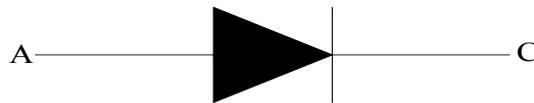
3. Durante el proceso de cerrado y abertura, se debe cerrar y abrir en forma instantánea, de modo que pueda funcionar con altas frecuencias. Así, debe tener a) tiempo corto de demora  $t_d$ , que tienda a cero; b) tiempo corto de subida  $t_r$ , que tienda a cero; c) tiempo corto de almacenamiento  $t_s$ , que tienda a cero y d) tiempo corto de caída  $t_f$ , que tienda a cero.
4. Para el cerrado y la abertura debe necesitar a) poca potencia de activación de compuerta  $P_G$ , que tienda a cero; b) un bajo voltaje de activación de compuerta  $V_G$ , que tienda a cero y c) una corriente pequeña de activación de compuerta  $I_G$ , que tienda a cero.
5. Debe tener  $dv/dt$  grande, que tienda a infinito. Esto es, el interruptor debe ser capaz de manejar un aumento rápido de la corriente que lo atraviesa
6. Debe tener  $di/dt$  grande, que tienda a infinito. Esto es, el interruptor debe ser capaz de manejar un aumento rápido de la corriente que lo atraviesa.
7. Requiere impedancia térmica muy pequeña entre la unión interna y temperatura ambiente,  $R_{IA}$ , que tiende a cero, para poder transmitir con facilidad calor al ambiente.
8. Se necesita la capacidad de sostener cualquier corriente de falla durante largo tiempo; esto es, debe tener un valor alto de  $i^2t$ , que tienda a infinito.
9. Se requiere un coeficiente térmico negativo para la corriente conducida, para obtener una división igual de corriente cuando los dispositivos se conectan en paralelo.
10. Bajo costo.

## 2.2 Dispositivos semiconductores de potencia

En los últimos años se han desarrollado dispositivos semiconductores de potencia que son capaces de manejar mayores potencias y realizar conmutaciones con mayor rapidez. Estos dispositivos semiconductores de potencia se pueden dividir en forma general en tres clases: 1) no controlados, 2) semicontrolados, y 3) controlados.

### 2.2.1 Semiconductores de potencia no controlados

En esta categoría se encuentran los diodos de potencia. La composición del diodo consiste de un cátodo y un ánodo. El diodo conduce cuando su voltaje de ánodo es mayor que de cátodo. La caída de voltaje en el diodo es de 0.5 a 1.2 V. En caso contrario, si el voltaje de cátodo es mayor que de ánodo, se dice que diodo esta en modo de bloqueo. La Figura 1 muestra el símbolo electrónico del diodo de potencia.



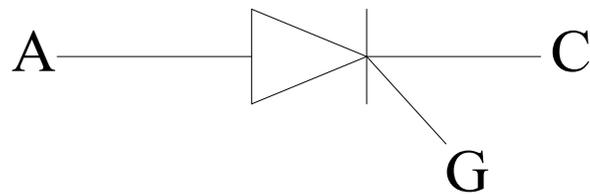
**Figura 1 Símbolo del diodo de potencia.**

Los diodos de potencia son de tres tipos: de propósito general, de alta velocidad (o recuperación rápida), y de Schottky. Los diodos de propósito general se consiguen hasta para 6000 V y 4500 A. Los diodos de recuperación rápida se aplican más en los convertidores de potencia ya que pueden realizar conmutaciones a altas frecuencias. La capacidad de los diodos de recuperación rápida puede llegar hasta 6000 V y 1100 A. El tiempo de recuperación inversa varía entre 0.1 y 5  $\mu$ s. En estado activo (o de conducción), los diodos Schottky tienen un bajo voltaje y un tiempo de recuperación de nanosegundos y sus capacidades se limitan a 100 V y 300 A. Cuando se sube la capacidad de voltaje, la corriente de pérdida (corriente de fuga) aumenta.

### 2.2.2 Semiconductores de potencia semicontrolados

En esta clase se ubican los tiristores, los cuales consisten de un ánodo, un cátodo, y una compuerta. El tiristor conduce cuando se le aplica una pequeña corriente en la terminal de la compuerta hacia el cátodo, siempre y cuando exista un mayor potencial en el ánodo que en el cátodo. En modo de conducción la caída de voltaje directo se encuentre entre 0.5 a 2 V. La Figura 2 muestra el símbolo

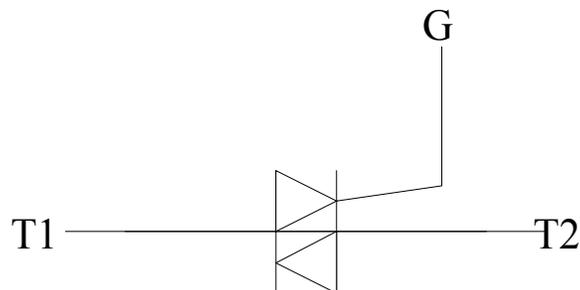
electrónico de un Rectificador de Silicio Controlado (SCR por sus siglas en inglés. Silicon Controlled Rectifier), el cual pertenece a la familia de los tiristores



**Figura 2. Símbolo de un Rectificador de Silicio Controlado.**

En modo de conducción, el circuito de la compuerta de un tiristor no tiene control. Hay dos formas de apagar un tiristor: de forma natural y forzada. La forma natural consiste en igualar o hacer menor el potencial del ánodo al del cátodo. Un circuito adicional se usa para realizar el apagado del tiristor de forma forzada.

Un caso especial es el TRIAC (Triode for Alternating Current). El TRIAC es capaz de conducir en ambas direcciones sin importar la polaridad de la corriente debido a su configuración que es similar a tener dos SCR's conectados en antiparalelo, que solo tienen una terminal de compuerta. Esta propiedad permite que su uso sea posible en aplicaciones de CA de baja potencia. Los tiristores tienen como ventaja que pueden conducir grandes cantidades de corriente; sin embargo tienen como desventaja que sólo pueden operar a frecuencia bajas de conmutación. La Figura 3 muestra el símbolo electrónico de un TRIAC.



**Figura 3. Símbolo del TRIAC.**

### 2.2.3 Semiconductores de potencia controlados

En esta categoría de interruptores basados en dispositivos semiconductores de potencia encontramos a los transistores de potencia. Los transistores de potencia se dividen en tres clases: 1) BJT (Bipolar Junction Transistor), 2) MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), y 3) IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor).

#### 2.2.3.1 Bipolar Junction Transistor (BJT)

Los BJTs suelen usarse en convertidores de potencia de baja frecuencia. Estos se encuentran en un rango de frecuencia de conmutación menor a 10 kHz y tienen capacidades de hasta 1200 V y 400 A. En el estado de conducción, su caída directa está entre 0.5 a 1.5 V. Los estados de conducción y no conducción del transistor de potencia son controlados por la corriente de base, por lo que se dice que es un interruptor controlado por corriente. La Figura 4 muestra el símbolo de un transistor bipolar del tipo NPN.

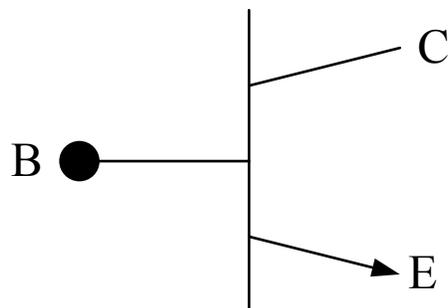
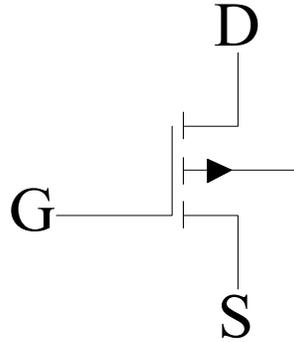


Figura 4. Símbolo del BJT.

#### 2.2.3.2 Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)

Al igual que los BJTs, los MOSFETs son utilizados ampliamente en convertidores electrónicos de potencia. Los MOSFETs son más rápidos que los BJTs y los IGBTs, ya que pueden conmutar en frecuencias de cientos de kilohertz. En cuanto a capacidades de potencia, el MOSFET se encuentra debajo de los BJTs e IGBTs, teniendo una capacidad de 1000 V y 100 A. en los MOSFETs, a diferencia de los transistores BJT, los estados de conducción y no conducción son controlados por

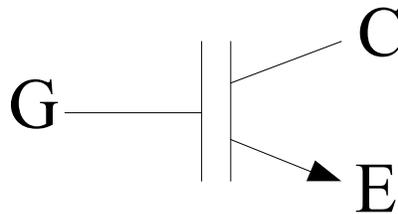
el voltaje aplicado a su terminal de compuerta, por lo que se dice que los MOSFETs son interruptores de potencia controlados por voltaje. La Figura 5 muestra el símbolo electrónico de un MOSFET de potencia del tipo N.



**Figura 5. Símbolo del MOSFET.**

### 2.2.3.3 Integrated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)

Los IGBT's son interruptores de potencia híbridos ya que son el resultado de conjuntar las características de los transistores BJT y los MOSFETs. Los IGBTs, al igual que los MOSFETs, son transistores de potencia controlados por voltaje. Se puede decir que son el punto de balance entre los BJTs y MOSFETs, ya que son más rápidos que los BJTs pero no tanto como los MOSFETs, trabajando con frecuencias de hasta 20 kHz. Los IGBTs son de adecuados para voltajes altos y grandes corrientes; 1700 V y 2400 A respectivamente. La Figura 6 muestra el símbolo electrónico de un IGBT de tipo N.



**Figura 6. Símbolo del IGBT.**

## **2.3 Circuitos de disparo de semiconductores de potencia**

Los circuitos de disparo son los circuitos electrónicos encargados de proporcionar los niveles de corriente o voltaje necesarios para que el dispositivo semiconductor de potencia conmute entre los estados de conducción y no conducción. El circuito de disparo es fundamental para obtener la salida deseada de cualquier convertidor de potencia. Para realizar un buen diseño del circuito de disparo es necesario conocer las características de conmutación de los dispositivos semiconductores que integran al interruptor de potencia.

### **2.3.1 Aislamiento de compuerta y excitadores de base**

Para el proceso de conmutación de los semiconductores de potencia se requiere de un voltaje de compuerta o una corriente de base para excitar a los transistores. Adicional a estos, en ocasiones se requiere que exista un aislamiento eléctrico entre el circuito de disparo y el dispositivo de potencia con la finalidad de tener un punto de referencia diferente a la terminal de tierra del convertidor electrónico de potencia.

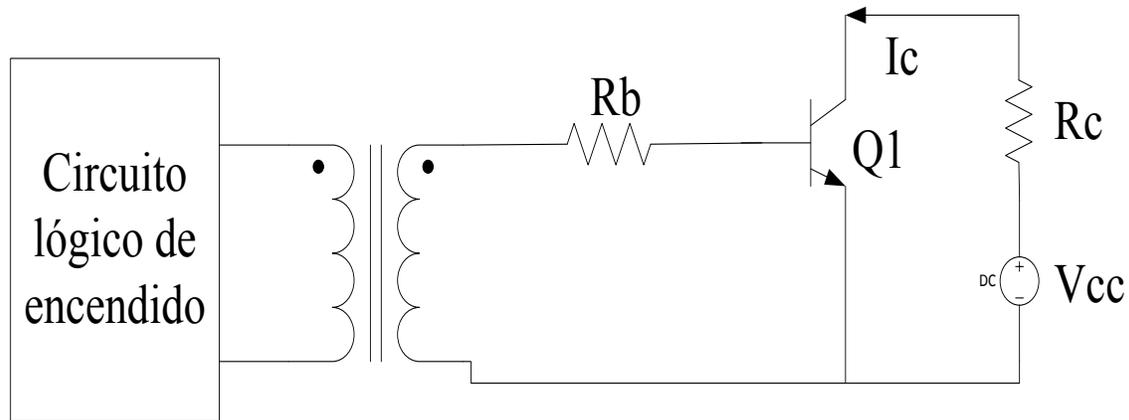
Para el caso de proveer de aislamiento eléctrico al circuito de disparo se pueden utilizar algunos de los siguientes dispositivos electrónicos:

1. Transformadores de pulsos
2. Optoacopladores

### **2.3.2 Transformadores de pulsos**

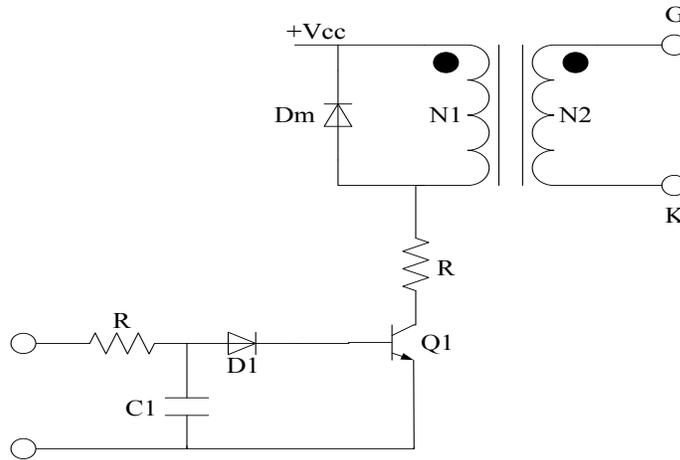
Los transformadores de pulso solo tienen un devanado primario y uno o más devanados secundarios. La opción de tener más de un devanado secundario permite que se puedan generar señales simultáneas de compuerta para distintos transistores conectados en serie o en paralelo. El circuito de la Figura 7 muestra el empleo de un transformador de pulsos para el control de la conmutación de un transistor BJT. Entre las características deseables en un transformador de

pulsos se encuentran el que debe tener una inductancia de fuga y un tiempo de subida del pulso de salida muy pequeño. La salida del transformador se distorsiona si el pulso es relativamente largo y de baja frecuencia de conmutación.



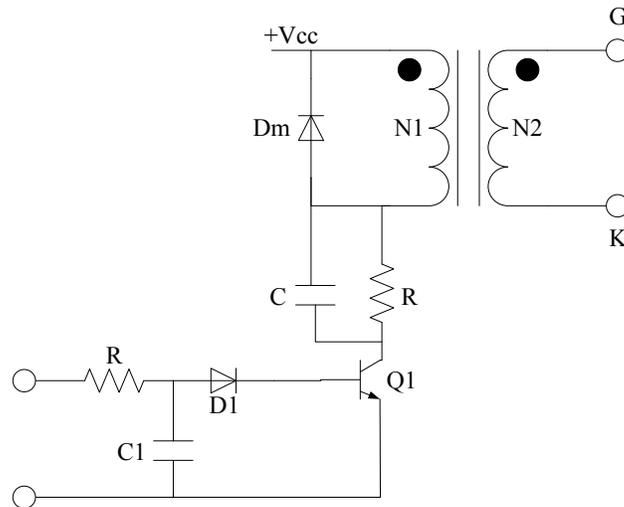
**Figura 7. Circuito de disparo de compuerta aislada por transformador.**

En la Figura 8 se puede apreciar un arreglo de aislamiento con transformador de pulso corto. Al aplicar un pulso de voltaje adecuado en la compuerta base del transistor  $Q_1$ , este se satura y el voltaje cd,  $V_{cc}$ , aparece a través del primario del transformador. Este induce un voltaje pulsante en el secundario del transformador y se le aplica entre la compuerta y el cátodo del tiristor. Cuando se retira el pulso de la base del transistor, este se apaga e induce un voltaje de polaridad contraria e el devanado primario a través del diodo  $D_m$ . La corriente disminuye hasta cero transitoriamente induciendo un el correspondiente voltaje inverso al secundario.



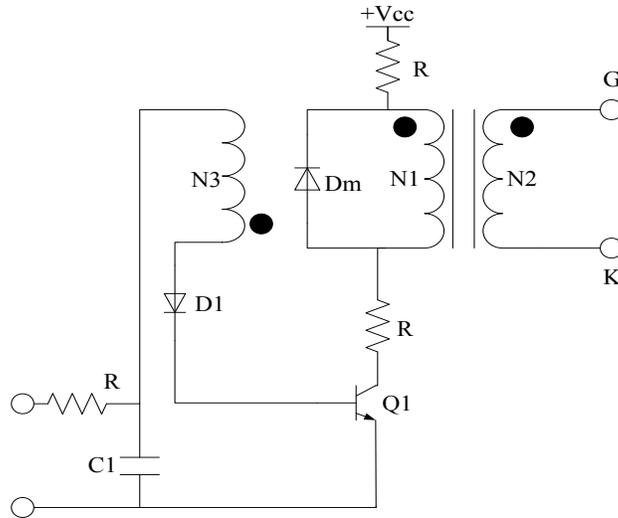
**Figura 8. Aislamiento con transformador de pulso cortó.**

El pulso se puede hacer largo agregando un capacitor en paralelo con el resistor R. Este arreglo se demuestra en la Figura 9.



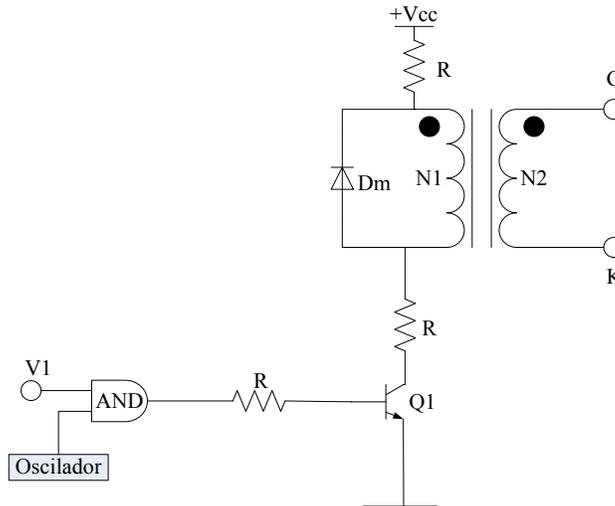
**Figura 9. Aislamiento con transformador de pulso largo.**

Otra manera de disparar un tiristor es generando un tren de pulsos. Este se puede obtener con la ayuda de un devanado auxiliar como se muestra en la Figura 10. Se induce un voltaje en el devanado auxiliar  $N_3$  cuando se enciende el transistor  $Q_1$ , el diodo  $D_1$  se polariza en sentido inverso apagando  $Q_1$ . El capacitor  $C_1$  se carga a través de  $R_1$  encendiendo  $Q_1$  de nuevo. Este proceso se repite siempre y cuando haya una señal de entrada  $v_1$ .



**Figura 10. Generador de tren de pulsos.**

Similar al caso anterior, pero en vez de usar el devanado auxiliar, se podría generar el tren de pulsos usando una compuerta AND como se ve en la Figura 11.

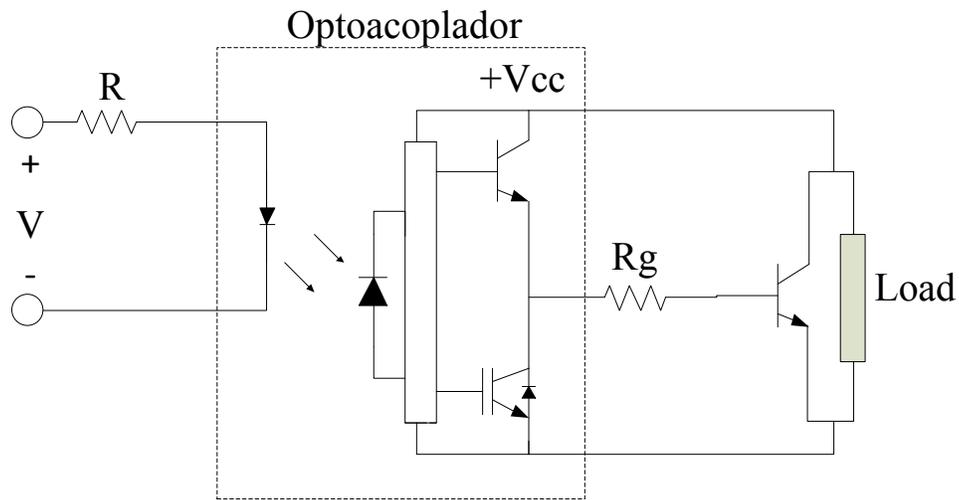


**Figura 11. Tren de pulsos con reloj y compuerta lógica AND.**

### 2.3.3 Optoacopladores

El optoacoplador consiste de un diodo emisor de luz infrarroja (ILED, por sus siglas en inglés infrared light-emitting diode) y un fototransistor de silicio. En la Figura 12 se muestra el circuito

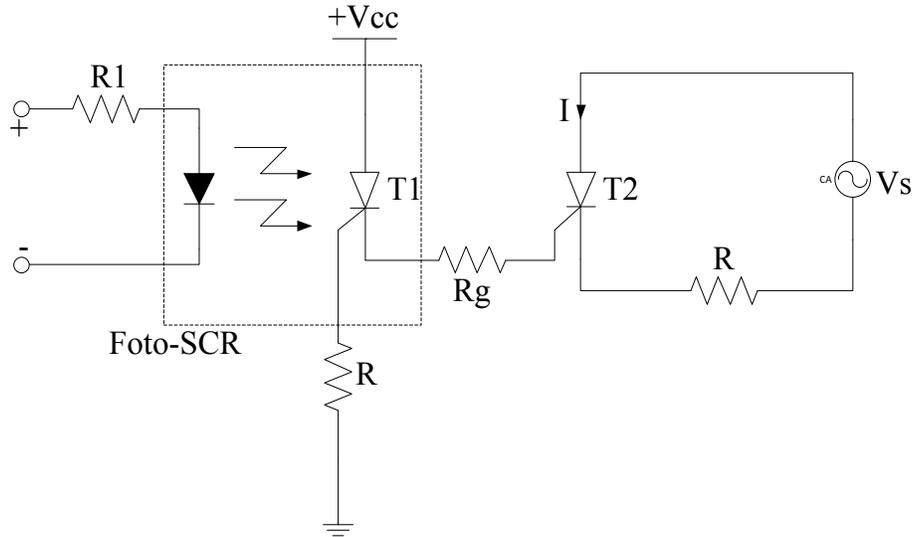
de aislamiento de compuerta por un optoacoplador. La señal de entrada se aplica al ILED y la señal de salida se obtiene del fototransistor. La señal de salida se aplica a la compuerta del transistor. Los tiempos típicos de encendido  $t_{on}$  y de apagado  $t_{off}$  son de 2 a 5  $\mu s$  y de 300 ns respectivamente. En la Figura 12 se muestra el circuito básico de un circuito de disparo con un optoacoplador para obtener el aislamiento eléctrico.



**Figura 12. Aislamiento de compuerta por optoacoplador.**

### 2.3.4 Circuitos de disparo para TIRISTORES

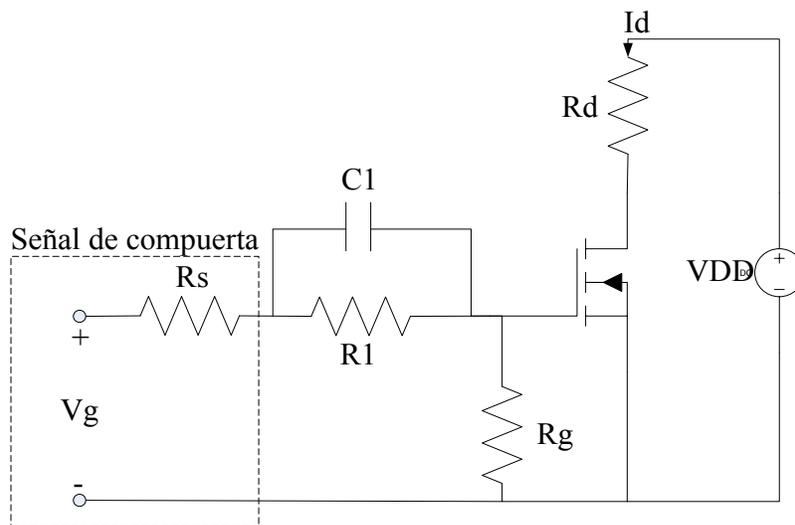
En el caso de los tiristores, se requiere de un aislamiento entre el tiristor y su circuito de disparo. El aislamiento se puede hacer usando optoacopladores o transformadores de pulso. En la Figura 13 se muestra el circuito de disparo acoplado con un aislador foto-SCR.



**Figura 13. Aislador de foto-SCR acoplado.**

### 2.3.5 Excitador de compuerta para MOSFET

El MOSFET es un dispositivo que es controlado por voltaje. La compuerta consume una corriente de fuga muy pequeña cuando este es activado. El tiempo de carga de la capacitancia de compuerta es un factor crucial para el tiempo de encendido del MOSFET. En la Figura 14 se puede apreciar la conexión de un circuito RC a la entrada de la compuerta. Esta conexión se realiza para reducir el tiempo de encendido cargando con mayor rapidez la capacitancia de la compuerta.



**Figura 14. Circuito de excitación rápida de compuerta.**

## 2.4 Cuadrantes de operación de dispositivos de estado sólido

Los dispositivos de estado sólido pueden operar en diferentes cuadrantes formados por los ejes de corriente y voltaje que le son aplicados. De esta forma, los interruptores de potencia se pueden clasificar como interruptores de un cuadrante, dos cuadrantes, o cuatro cuadrantes. La Figura 15 muestra la representación gráfica de los cuadrantes de operación de los interruptores de potencia.

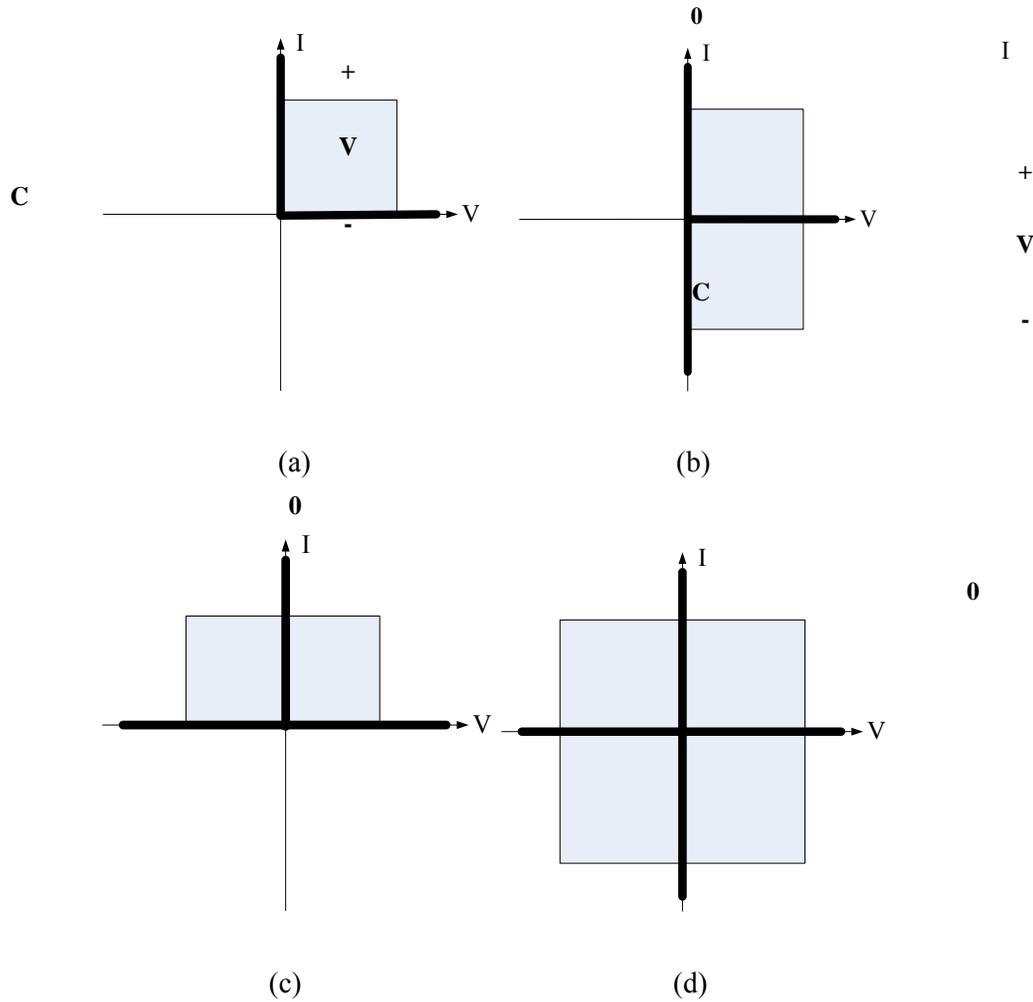


Figura 15. . (a) Interruptor de un cuadrante. (b) Interruptor de corriente bidireccional de dos cuadrantes. (c) Interruptor de voltaje bidireccional de dos cuadrantes. (d) Interruptor de cuatro cuadrantes.

### 2.4.1 Interruptor de un cuadrante no controlado

+

El diodo se considera un interruptor pasivo, debido a que encendido o apagado es controlado por una corriente o voltaje aplicado a sus terminales. El diodo solo opera en un cuadrante conduciendo corriente positiva y bloqueando voltaje negativo, en la Figura 16 se muestra el cuadrante de operación del diodo semiconductor.

0

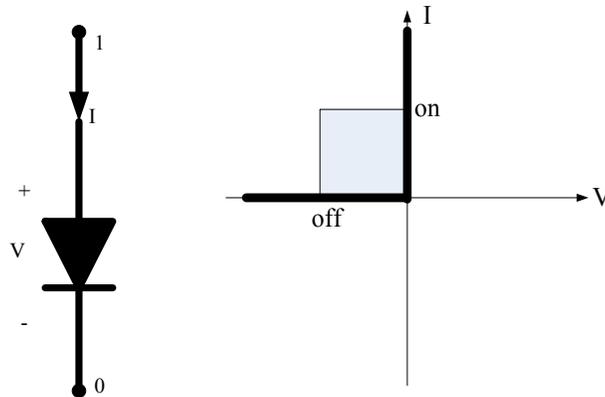
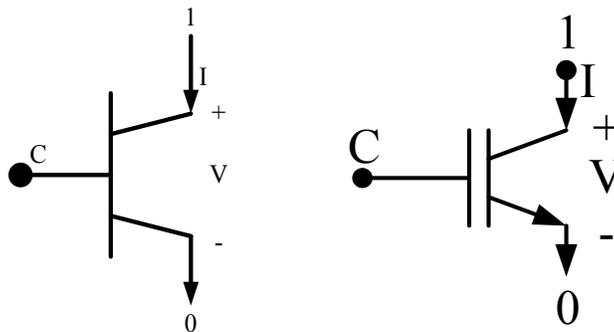


Figura 16. Símbolo del diodo y su cuadrante de operación.

### 2.4.2 Interruptor de un cuadrante controlado

Los interruptores controlados son los dispositivos que son apagados y encendidos por una tercera terminal (compuerta). El BJT e IGBT operan en solo cuadrante conduciendo corriente positiva y bloqueando voltaje positivo. La Figura 17 muestra el cuadrante de operación de estos dispositivos semiconductores.



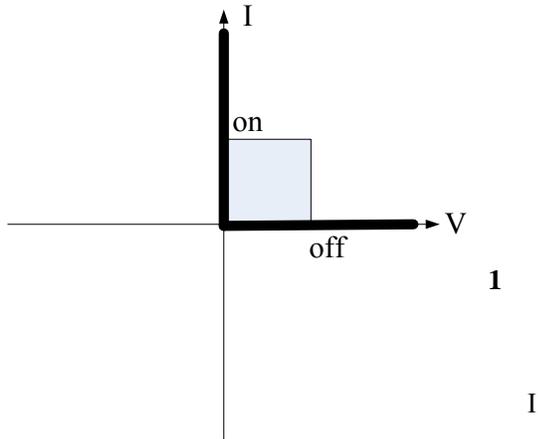


Figura 17. Símbolo del BJT e IGBT y su cuadrante de operación.

### 2.4.3 Interruptor bidireccional de corriente con MOSFET

Al igual que el BJT e IGBT, el MOSFET es controlado por una tercera terminal (compuerta). Sin embargo, el MOSFET puede operar en dos cuadrantes ya que es capaz de conducir corriente positiva al igual que corriente negativa y bloquear voltaje positivo, sin embargo la circulación negativa de corriente a través del MOSFET no está optimizada por lo que puede generar pérdidas importantes de potencia. La figura Figura 18 los cuadrantes de operación del MOSFET.

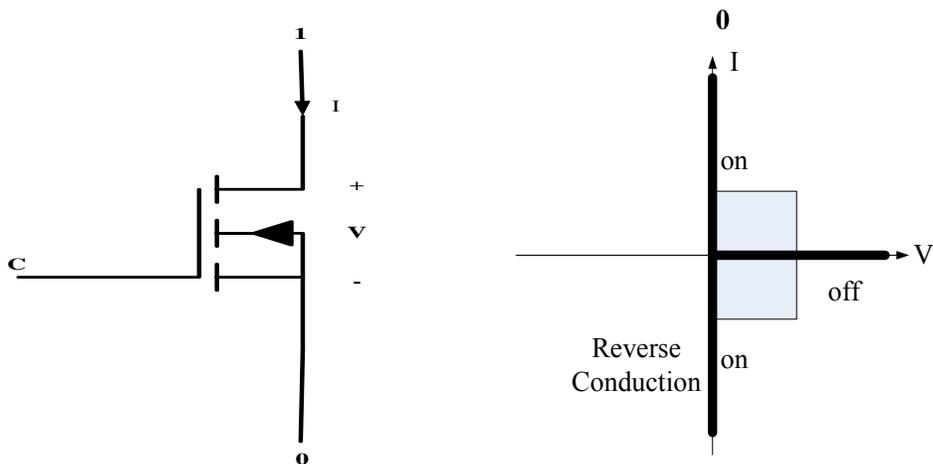


Figura 18. Símbolo del MOSFET y su cuadrante de operación.

#### 2.4.4 Interruptor bidireccional de corriente

Para realizar este tipo de interruptor es necesario conectar un diodo en antiparalelo con un transistor de un cuadrante. El interruptor es capaz de conducir corriente positiva o negativa, sin embargo solo bloquea voltaje positivo como se muestra en la Figura 19.

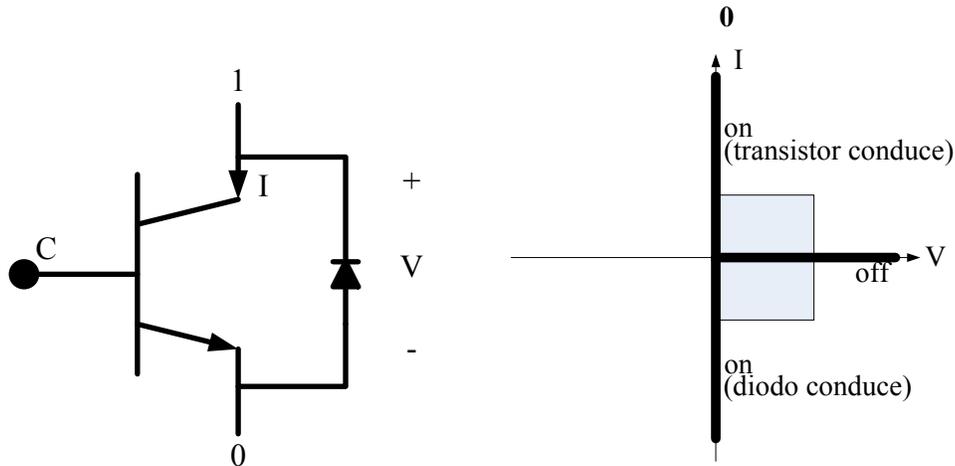


Figura 19. BJT con diodo en antiparalelo y su cuadrante de operación.

#### 2.4.5 Interruptor bidireccional de voltaje de dos cuadrantes

En esta configuración un diodo se conecta en serie con un transistor de potencia, en la Figura 20 se muestra la configuración de este interruptor utilizando un transistor BJT. Este interruptor solo es capaz de conducir corriente positiva y bloquear voltajes positivos y negativos.

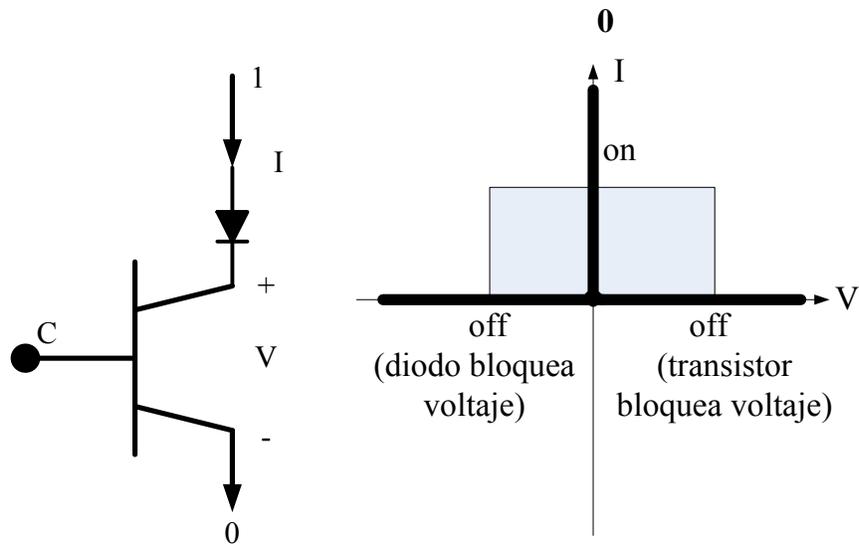
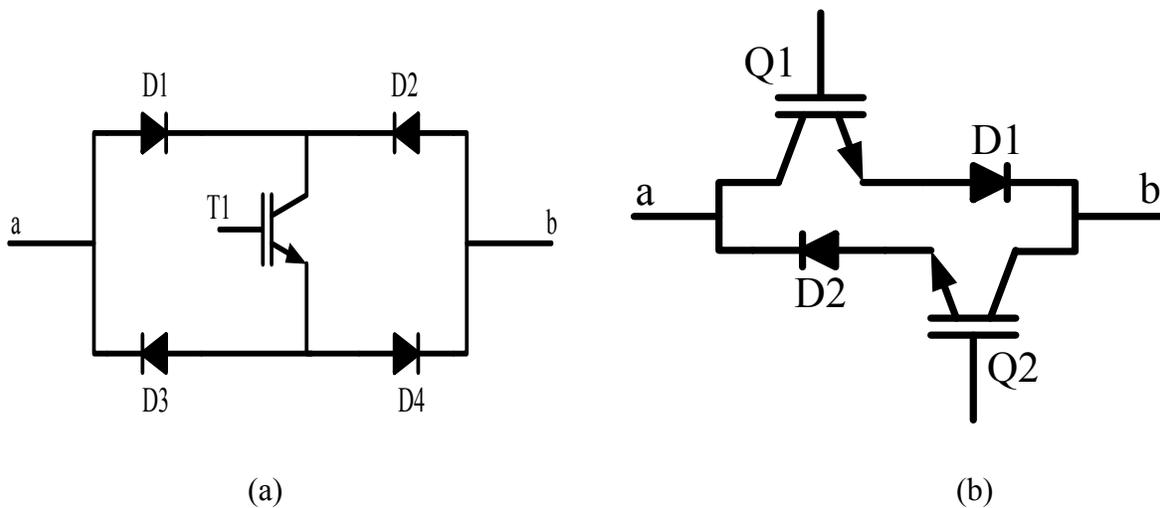


Figura 20. Diodo en serie con un BJT y su cuadrante de operación.

#### 2.4.6 Interruptor de cuatro cuadrantes

Existen tres tipos de arreglos para realizar este interruptor. Estos arreglos se muestran en la Figura 21. Este interruptor es capaz de conducir corrientes positivas al igual que negativas y es capaz de bloquear voltajes positivos y negativos, por lo que opera en los cuatro cuadrantes del plano I-V.



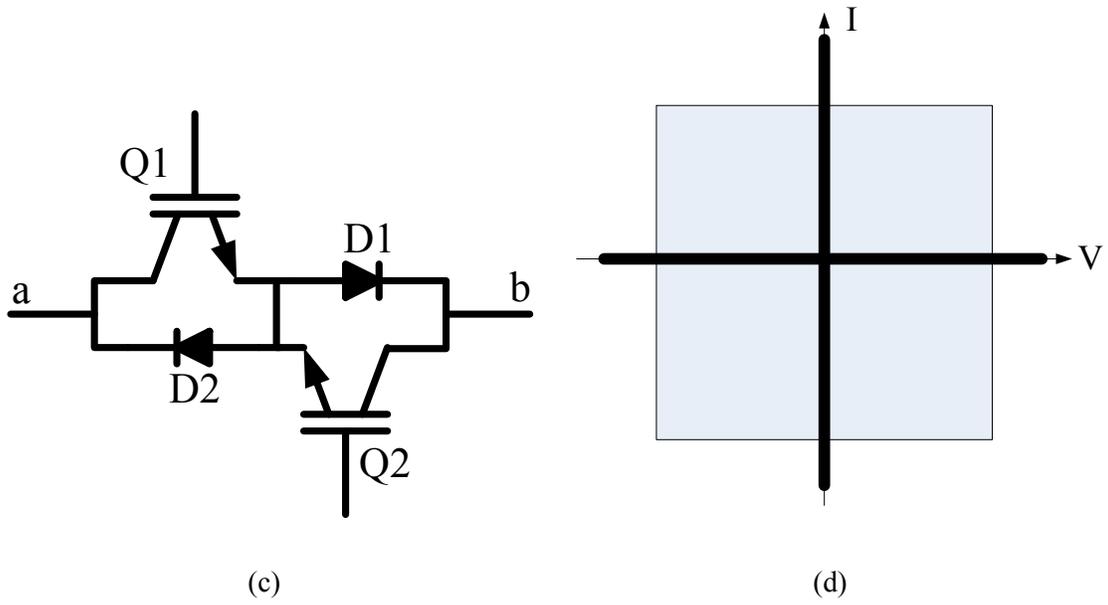


Figura 21. (a) Configuración de puente rectificador. (b) Configuración de interruptor en paralelo. (c) Configuración de interruptores en antiparalelo. (d) Cuadrantes de operación.

## **CAPITULO 3. Interruptor Bidireccional**

### **3.1 Introducción**

Un interruptor de CA o interruptor de cuatro cuadrantes, debe ser capaz de conducir corrientes positivas y negativas así como bloquear voltajes de ambas polaridades. El interruptor bidireccional consiste de un interruptor de un solo cuadrante (diodo) e interruptores de dos cuadrantes (IGBT). El IGBT es un dispositivo de alta potencia y gran velocidad de conmutación, motivo por el cual son empleados en el diseño de convertidores de potencia. Actualmente no existe un interruptor bidireccional comercialmente, por lo que se tiene que realizar un arreglo de semiconductores unidireccionales para conformarlo.

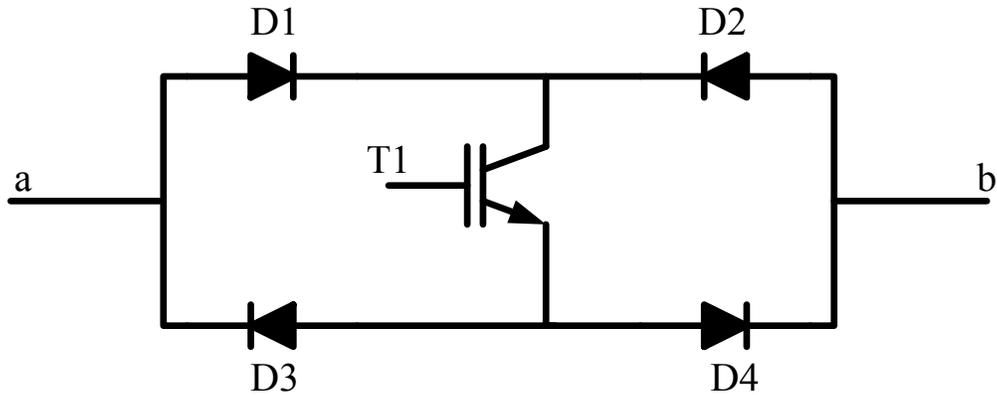
La conmutación de los interruptores bidireccionales ha sido un obstáculo en el desarrollo de esta tecnología para la industria. Además de las dificultades con la conmutación de los interruptores, existen las del volumen, las pérdidas por conmutación y el costo del interruptor bidireccional. Se han hecho propuestas de diferentes configuraciones para los interruptores bidireccionales, como se muestra en la Figura 21. Estos arreglos otorgan ventajas en la conmutación del interruptor, operación en altas frecuencias y control de la dirección de la corriente. La desventaja principal de estos arreglos es que se presentan efectos parásitos como el inductivo y el capacitivo.

### **3.2 Configuraciones de interruptores bidireccionales**

En esta sección se presenta un análisis de las diferentes configuraciones para formar un interruptor de CA utilizando IGBTs como interruptor controlado de potencia.

#### **3.2.1 IGBT con puente rectificador**

En la Figura 22 se muestra la configuración IGBT con puente rectificador. Se puede apreciar que el flujo de corriente de la termina 'a' a la 'b' y vice-versa se controla con un solo IGBT.



**Figura 22. Configuración de IGBT con puente rectificador.**

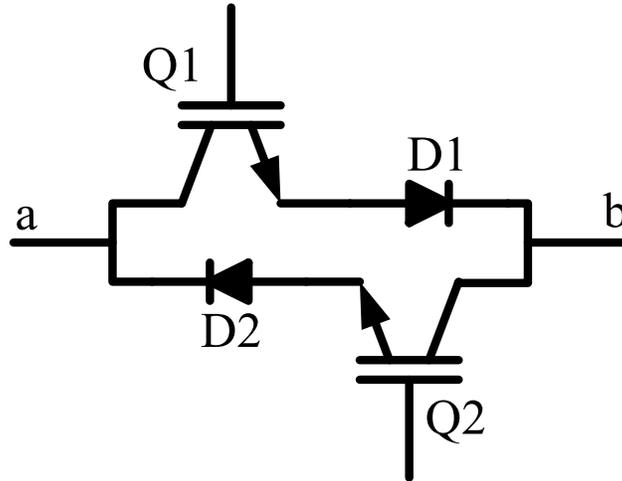
Cuando la terminal ‘a’ tiene un voltaje positivo con respecto a ‘b’, los diodos D<sub>2</sub> y D<sub>3</sub> quedan polarizados inversamente actuando como un circuito abierto ya que quedan deshabilitados. Los diodos encargados de conducir son D<sub>1</sub> y D<sub>4</sub> mientras que el IGBT ‘T<sub>1</sub>’ se encarga de abrir y cerrar el interruptor.

En caso contrario, cuando la terminal ‘b’ tiene un voltaje positivo con respecto a ‘a’, los diodos D<sub>1</sub> y D<sub>4</sub> quedan polarizados inversamente actuando como un circuito abierto ya que quedan deshabilitados. Los diodos encargados de conducir son D<sub>2</sub> y D<sub>3</sub> mientras que el IGBT ‘T<sub>1</sub>’ encarga de abrir y cerrar el interruptor.

La ventaja de esta configuración es que solo requiere un circuito de disparo ya que contiene solamente un IGBT. Su desventaja es que produce una alta pérdida por conducción ya que siempre están conduciendo tres dispositivos (2 diodos y el IGBT).

### **3.2.2 Interruptor en paralelo**

Este arreglo ilustrado en la Figura 23 tiene un conjunto de un interruptor-diodo en serie. Este conjunto se encuentra en paralelo con otro conjunto interruptor-diodo. La configuración de interruptor en paralelo es frecuentemente utilizado en aplicaciones monofásicas.



**Figura 23. Interruptor en paralelo.**

Es posible controlar la dirección de la corriente y las pérdidas por conducción son menores debido a que la corriente solo es conducida por dos dispositivos en cada caso. La desventaja de este arreglo es que los emisores no se encuentran en un punto común, por lo que el circuito de disparo deberá proveer doble aislamiento eléctrico, uno para cada interruptor.

### **3.2.3 Dos IGBTs en antiparalelo con diodos en serie**

En la Figura 24 se muestra la configuración de dos IGBTs en antiparalelo con diodos en serie, en donde se observan dos de conjuntos de transistor-diodo conectados en antiparalelo, y a la vez estos conjuntos están conectados en serie. Esta configuración permite un camino de conducción para cada polaridad accionando un transistor para cada sentido de corriente y pueden ser controlados de manera independiente. Cada IGBT conduce junto con el diodo en antiparalelo del IGBT complementario. Se pueden realizar dos arreglos en este tipo de configuración: interruptor de emisor común e interruptor de colector común.

### 3.2.3.1 Interruptor de emisor común

Esta configuración de interruptor de CA se muestra en la Figura 24. La configuración consiste de dos diodos de potencia y dos IGBTs unidos por los emisores. La función del diodo en serie es de bloquear voltajes negativos.

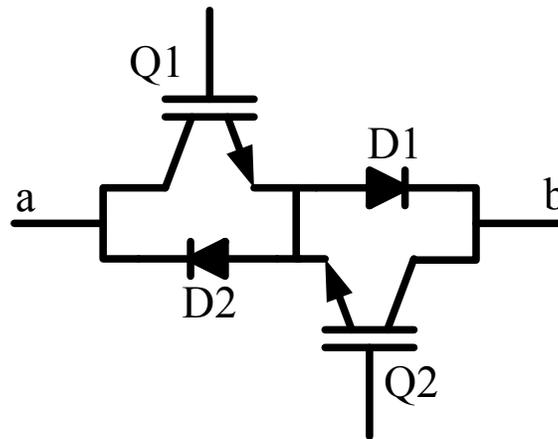
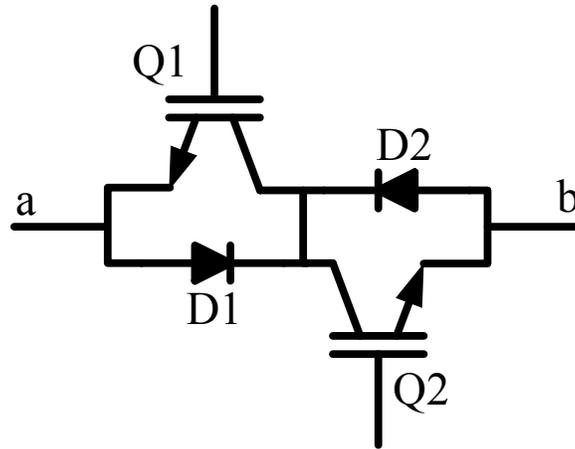


Figura 24. Interruptor de emisor-común.

Esta configuración permite controlar la dirección de la corriente de manera independiente y se reducen las pérdidas por conducción ya que únicamente conducen dos dispositivos en cada rama (IGBT y diodo). Solo requiere de una fuente de control ya que contiene un punto de referencia común en los emisores.

### 3.2.3.2 Interruptor de colector común

La Figura 25 muestra el interruptor bidireccional de colector común. Las pérdidas por conducción son similares a las del interruptor de emisor común. Sin embargo, en esta configuración se requiere de dos fuentes de alimentación independientes para el circuito de disparo para que pueda proveer de las dos señales de compuerta con diferente punto de referencia.



**Figura 25. Interruptor de colector-común.**

### 3.3 Conmutación

Para la conmutación de un interruptor de CA deben tomar en cuenta algunas consideraciones como:

- 1) No deben encenderse dos interruptores bidireccionales al mismo tiempo ya que produciría un corto circuito.
- 2) Los interruptores no deben apagarse simultáneamente en ningún instante.

En la Figura 26 se muestra de manera gráfica las dos consideraciones anteriores para la conmutación del interruptor de CA.

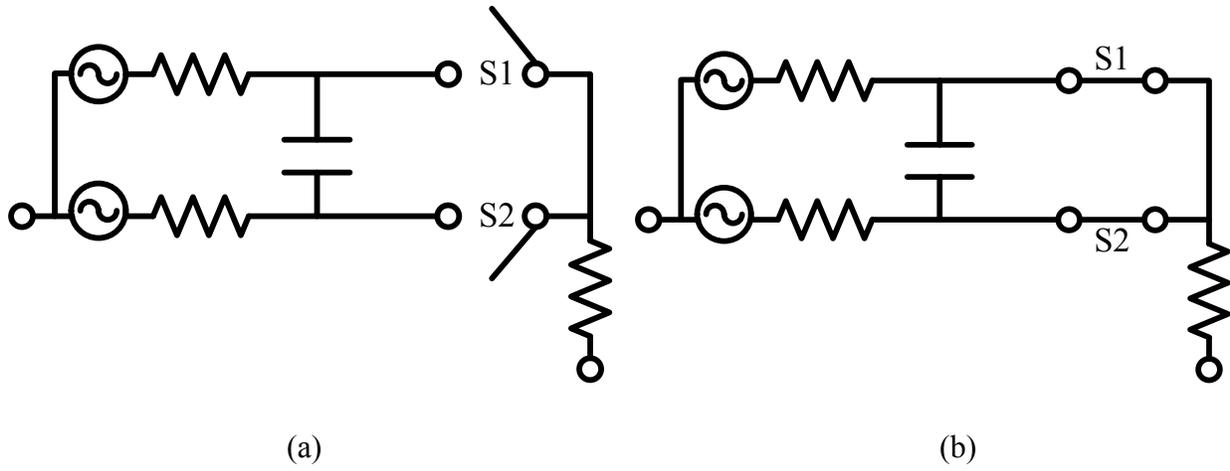


Figura 26. (a) Ambos interruptores abiertos. (b) Ambos interruptores cerrados.

## **CAPITULO 4. Diseño y construcción del interruptor bidireccional**

### **4.1 Introducción**

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y construir un interruptor bidireccional de CA. El interruptor deberá conmutar a los niveles de tensión de una conexión monofásica de CA de la red eléctrica. Para la operación del interruptor de CA correspondiente a la polaridad de tensión aplicada a sus terminales y la dirección de corriente correspondiente se requirió de diseñar circuitos adicionales de control.

De esta forma, se diseñó y construyó un circuito de detección de cruce por cero para realizar el proceso de conmutación adecuado en el interruptor de CA. El proceso de conmutación es importante ya que en ningún instante se puede tener ambos interruptores encendidos o apagados al mismo tiempo.

El circuito de disparo de los transistores depende del circuito de conmutación. El circuito de disparo fue diseñado y construido usando optoacopladores para proporcionar el aislamiento eléctrico entre el circuito de control y el interruptor de potencia. En las siguientes secciones se describe el proceso utilizado y las diferentes partes que se involucraron en la construcción del interruptor de CA.

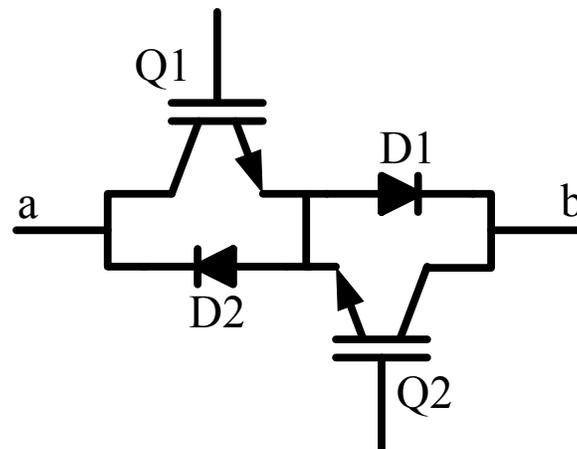
### **4.2 Diseño del interruptor de CA**

Los detalles de la construcción del interruptor bidireccional se relatan en esta sección. Se mencionan las distintas partes que conforman la configuración empleada y sus aportaciones en cuanto al funcionamiento del interruptor. Cabe mencionar que el interruptor bidireccional fue construido a partir de dos IGBTs (**IRG4PC40UD**) con diodos de potencia ya integrados.

#### **4.2.1 Configuración Empleada**

Después de estudiar las distintas configuraciones que existen para realizar un interruptor bidireccional usando IGBTs, se llegó a la determinación que se construiría empleando la

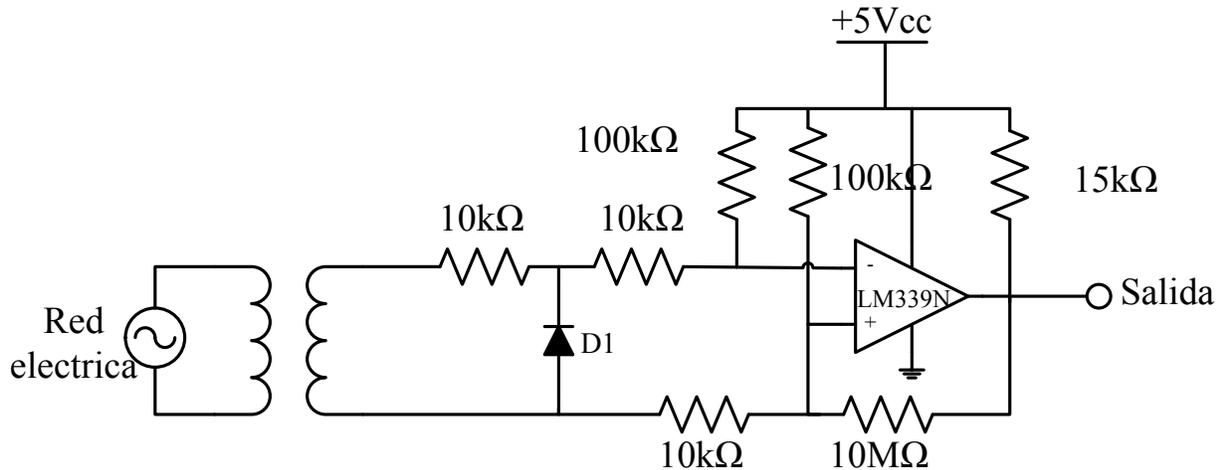
configuración de emisor común debido a que en esta configuración las terminales de control de los dispositivos semiconductores de potencia están unidos al mismo punto de referencia. Esta característica de esta topología permite que su circuito de disparo solo tenga que utilizar una fuente de alimentación independiente. En la Figura 27 se muestra la configuración usada en esta tesis para la construcción del interruptor de CA.



**Figura 27. Configuración empleada- emisor-común.**

#### **4.3 Circuito de detección de cruce por cero**

Para sincronizar la generación de las señales de control correspondiente a los transistores Q1 y Q2 del interruptor de CA se diseñó un circuito de cruce por cero de la señal de la red eléctrica. El detector de cruce por cero se conforma de un transformador de CA como etapa de entrada con la finalidad de reducir el voltaje de la red eléctrica a niveles de voltaje menores a 15 V. Además, el circuito de detección de cruce por cero utiliza un comparador (LM339N) cuya función consiste en generar una señal lógica de acuerdo a la polaridad del voltaje presente en el devanado secundario del transformador. En la Figura 28 se observa el circuito usado para la detección de cruce por cero.

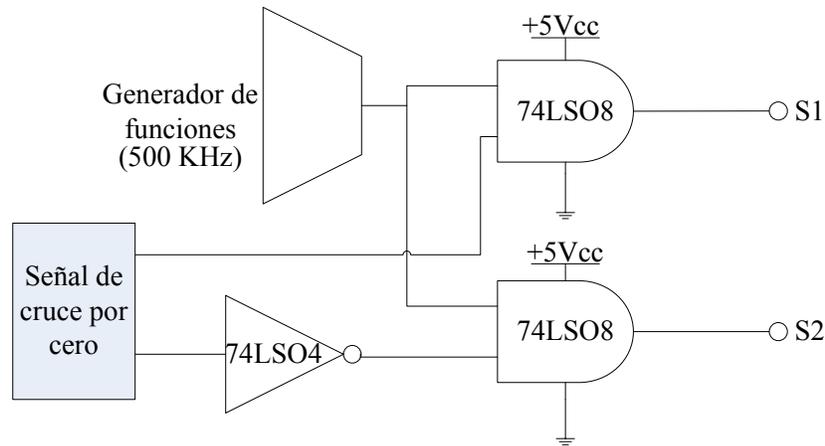


**Figura 28. Circuito de detección de cruce por cero.**

La señal proveniente de la red electrica se redujo a  $6.43 V_{RMS}$  a través de un transformador. La señal que entro al comparador fue rectificada a una media onda con la ayuda del diodo  $D_1$ . Esta señal se comparó con la señal de salida del comparador. La señal de salida tiene dos niveles lógicos cero (0) y uno (1) lógico. El circuito de detección de cruce por cero genera un uno cuando existe el cruce por cero del voltaje (menor a cero) y cero cuando el valor del voltaje es mayor a cero.

#### 4.4 Conmutación del interruptor de CA

Para evaluar el desempeño del interruptor de CA en el proceso de conmutación a frecuencias mayores a la frecuencia de la señal de la red eléctrica, se diseñó un circuito de conmutación de 500 Hz para el interruptor de CA. El circuito de conmutación del interruptor de CA básicamente es un circuito lógico que determina que dispositivo semiconductor del interruptor conducirá en función de la polaridad de la señal de la red eléctrica. En la Figura 29 se muestra el esquema del circuito diseñado para el proceso de conmutación del interruptor de CA.



**Figura 29. Circuito del conmutador lógico.**

La conmutación se logró usando una compuerta NOT (74SL04) y una compuerta AND (74LS08). La señal de salida obtenida en el comparador (LM339N) se ingresó a la compuerta NOT para obtener la negación de esa señal. De igual manera, la señal de salida del comparador fue ingresado a la compuerta AND. Ambas señales, la de negación y la directa del comparador, son comparados con una señal generada con un generador de funciones que suministra una señal lógica TTL a 500 Hz. De esta manera se obtuvieron dos señales de salida que conmutaban entre sí; haciendo que los transistores del interruptor de CA operen de manera excluyente, es decir cuando uno de los transistores se apaga, el otro se enciende.

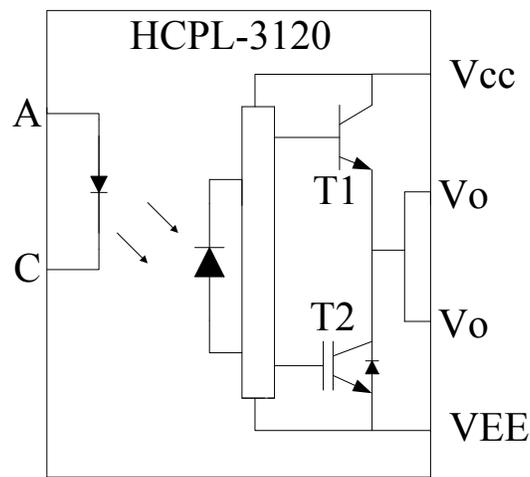
#### 4.5 Buffer

Con la finalidad de mantener los niveles de tensión adecuados para el circuito de control de interruptor de CA se utilizó un Circuito Integrado con la función de buffer. El funcionamiento del buffer está en función de dos señales de control, latch enable (LE) y output enable (OE). La salida de la señal del buffer se genera cuando llega una señal al pin de LE proveniente del circuito de conmutación con lo que a su salida se refleja la señal TTL proveniente del generador de funciones.

## 4.6 Circuito de disparo

Para activar los IGBTs del interruptor de CA fue necesario un circuito adicional que proporcionara las señales adecuadas para su conmutación, además de proveer el aislamiento eléctrico entre la etapa de control y de potencia. En este caso se usó un circuito con dos optoacopladores (**HCPL-3120**), uno para cada IGBT.

El driver de compuerta es prácticamente un arreglo de interruptores en configuración medio puente compuesto de un transistor de canal-N y uno de canal-P con una entrada común a ambos transistores. La configuración de medio puente se observa en la parte derecha del circuito del optoacoplador que muestra la Figura 30.



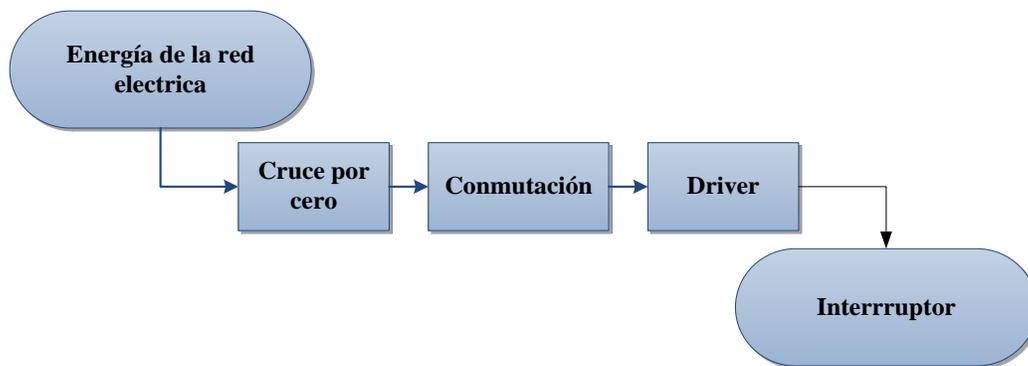
**Figura 30. Circuito de disparo para la compuerta del IGBT.**

Al momento que se aplica una señal lógica de '1', conduce el led del optoacoplador enviando una señal luminosa al fotodiodo que activa el medio puente de salida del optoacoplador. Cuando el LED enciende, el transistor T<sub>1</sub> conduce lo que ocasiona que en la terminal de salida V<sub>O</sub> se refleje el voltaje V<sub>CC</sub>. Por el contrario cuando el LED se encuentra apagado, el transistor T<sub>2</sub> conduce haciendo que en la terminal de salida V<sub>O</sub> se establezca el voltaje V<sub>EE</sub>. Es importante mencionar que los dos transistores nunca conducen simultáneamente.

La señal que dispara la compuerta del IGBT se genera cuando  $T_1$  conduce, ya que esta acción provoca que el voltaje  $V_{cc}$  sea aplicado en la terminal  $V_o$  del optoacoplador, que para este trabajo se utilizó un voltaje de 15 VCD. Por el contrario, cuando el led está apagado  $T_2$  se activa ocasionando que la compuerta del IGBT sea referenciada a tierra, evitando que conduzca.

#### 4.7 Diagrama de bloques

A continuación se presenta un esquema de los procesos que fueron realizados para construir el interruptor bidireccional de CA monofásico con un arreglo de IGBTs.



**Figura 31. Diagrama de bloques del proceso llevado a cabo para el diseño y la construcción del interruptor bidireccional.**

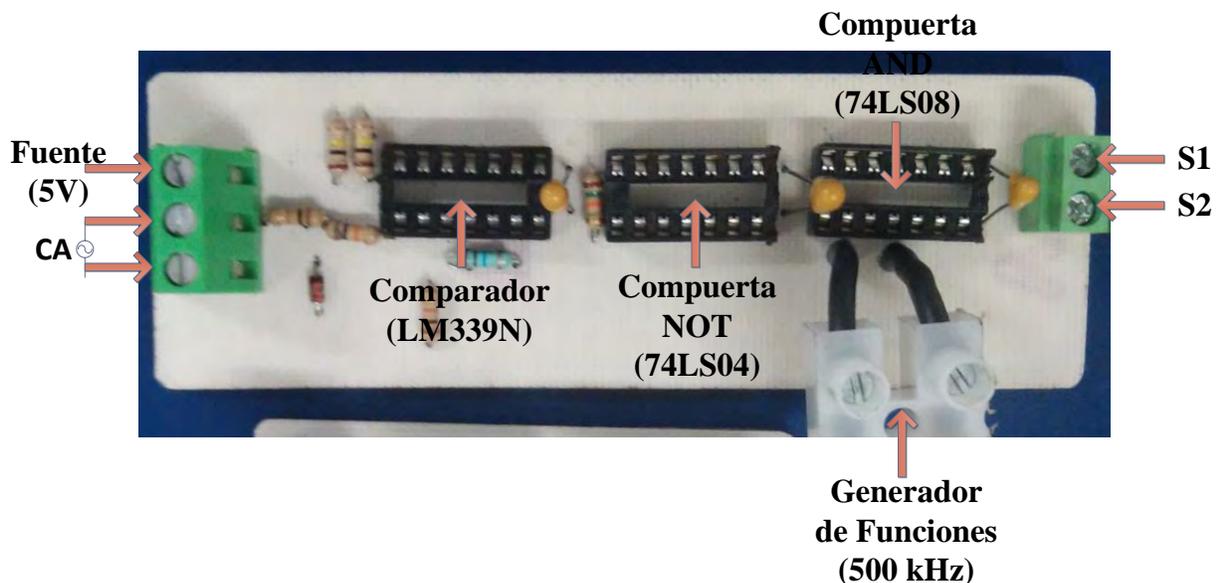
1. Energía de la red eléctrica- Se utilizó la energía proveniente de la red eléctrica (CFE) como fuente principal ya que el interruptor debe conmutar a los niveles de tensión de una conexión monofásica de CA de la red eléctrica.
2. Cruce por cero- Se realizó para sincronizar la generación de las señales de control correspondiente a los transistores del interruptor de CA.
3. Conmutación- El circuito de conmutación es básicamente un circuito lógico que determina que dispositivo semiconductor del interruptor conducirá en función de la polaridad de la señal de la red eléctrica.
4. Driver- Los optoacopladores (HCPL-3120) se usaron para activar los transistores y para aislar la etapa de control y de potencia.

5. Interruptor- El interruptor consiste del sistema de control y del sistema de potencia, eléctricamente aislados entre sí por los optoacopladores.

#### 4.8 Prototipo del interruptor de CA

En esta sección se presentan las imágenes del interruptor de CA, así como de los circuitos que se diseñaron para su control.

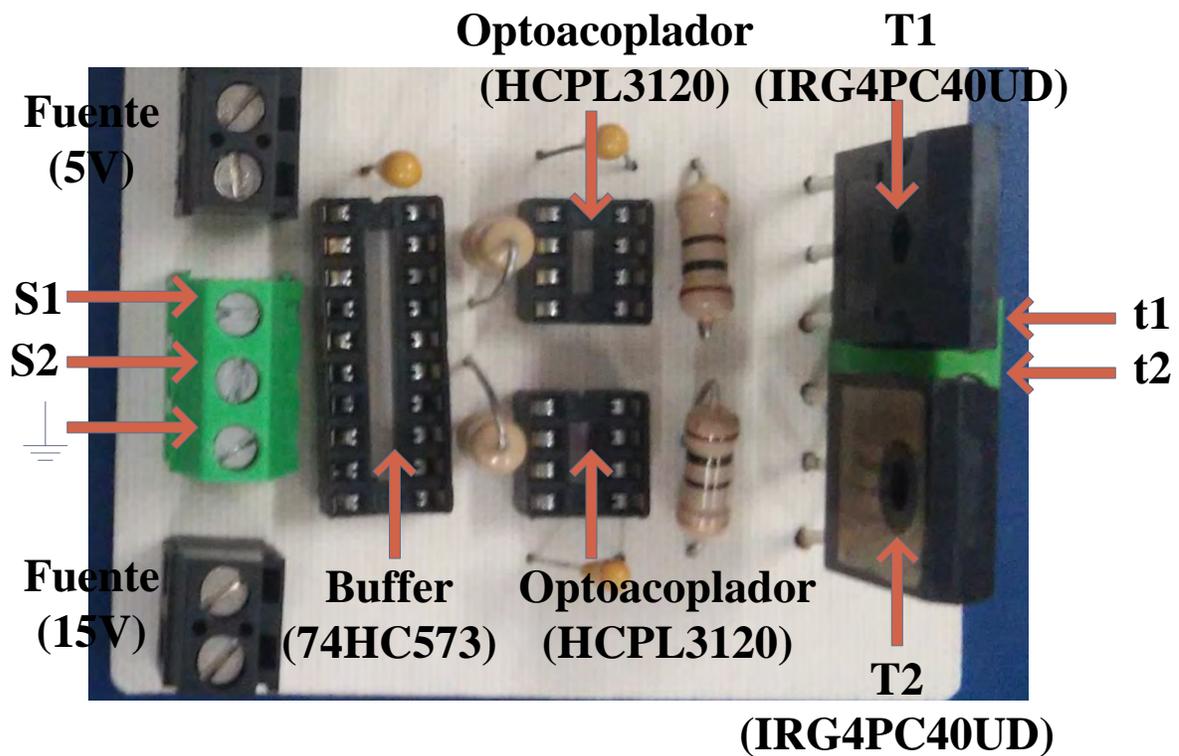
En la Figura 32 se muestra el circuito utilizado para detectar el cruce por cero así como la etapa de generación de los pulsos de disparo para los IGBTs en función del semiciclo de la señal de CA de la red eléctrica.



**Figura 32. Imagen descriptiva del circuito de conmutación construido.**

En el circuito que se muestra en la Figura 32 se muestra en la parte de la izquierda la etapa de detección de cruce por cero; el cual se realiza a través del comparador (LM339N). Posteriormente, se observan las compuertas NOT (74LS04) y AND (74LS08), que junto con el generador de funciones se encargan de generar la señal de conmutación a 500 Hz de los interruptores T1 y T2. La señal de conmutación a los interruptores se toma de las dos salidas S1 y S2 y éstas son habilitadas en función de la polaridad del semiciclo de la señal de CA de la red eléctrica.

Por su parte, en la Figura 33 se muestra el prototipo del interruptor de CA, en donde se observan los distintos dispositivos electrónicos que lo integran.



**Figura 33. Imagen descriptiva del interruptor bidireccional construido.**

Las señales provenientes del circuito de conmutación (S1 y S2) entran al buffer (74HC573) en donde el latch enable (LE) se activa si existe la respectiva señal de habilitación. Después de pasar por el buffer, las señales se encaminan hacia los optoacopladores (HCPL3120) los cuales proporcionan el aislamiento eléctrico entre la etapa de control y la etapa de potencia. Los optoacopladores trabajan de forma excluyente, por lo que nunca se encienden o se apagan juntos por consecuencia del circuito de conmutación. El apagado y el encendido de los interruptores T1 y T2 son controlados por la activación de los optoacopladores. Las salidas t1 y t2 son las terminales para la conexión de la carga.

## CAPITULO 5. Resultados

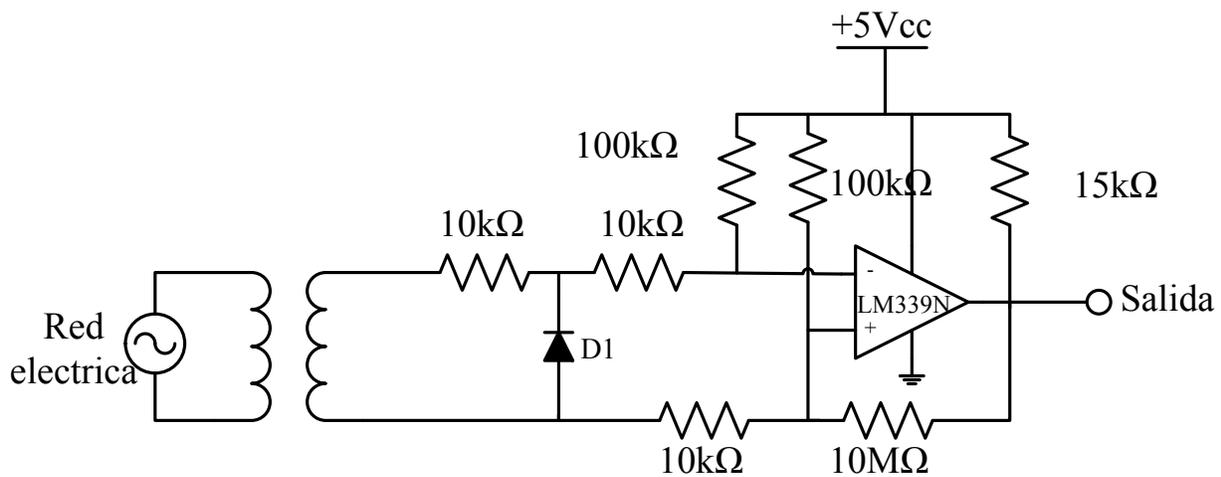
### 5.1 Introducción

Este capítulo consta de los resultados experimentales obtenidos a partir de las pruebas realizadas al interruptor de CA.

Las pruebas que se llevaron a cabo fueron para los circuitos de cruce por cero, circuito de conmutación, y el driver de los IGBTs para controlar una carga resistiva monofásica. Las gráficas de cada prueba realizada se obtuvieron con el uso de un osciloscopio.

### 5.2 Prueba de cruce por cero

La detección de cruce por cero fue necesario para poder encender y apagar el transistor. La Figura 34 muestra el circuito usado para la detección de cruce por cero.



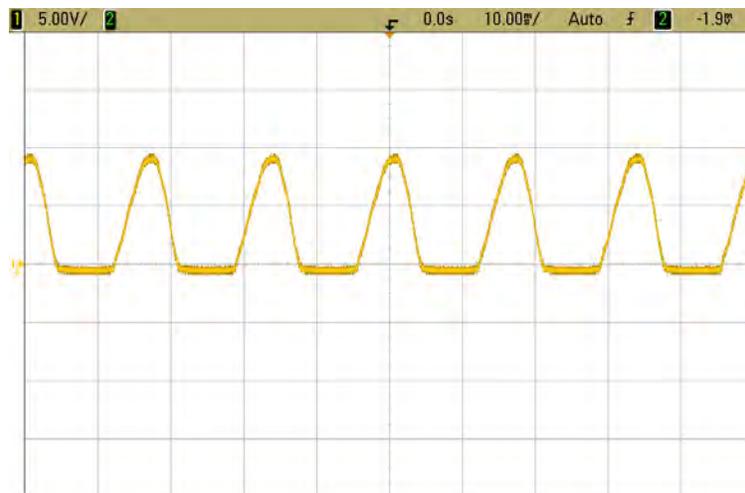
**Figura 34. Circuito de prueba de detección de cruce por cero.**

El transformador de entrada reduce la tensión de la red electrica a un valor de  $6.43 V_{RMS}$ , como se muestra en la Figura 35.



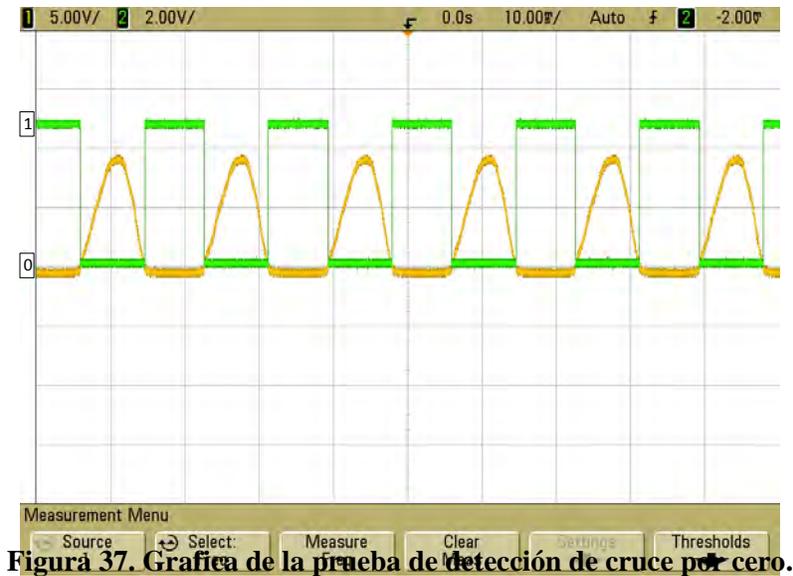
**Figura 35. Reducción de la tensión eléctrica.**

Una vez que el voltaje de la red eléctrica se ha reducido, esta es aplicada a un rectificador media onda conformado por el diodo D1, cuyo voltaje de salida se muestra en la Figura 36.



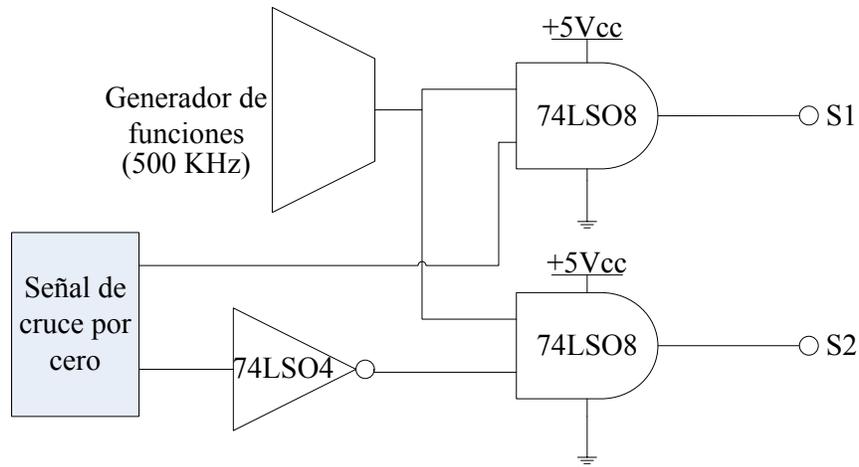
**Figura 36. Onda rectificada por el diodo D1.**

La señal de media onda rectificada es entonces aplicada al comparador LM339, cuya función es proporcionar una señal lógica en función del valor del voltaje rectificado aplicado, como se muestra en la Figura 37. De esta forma, el circuito de comparación genera un valor de uno (1) lógico (trazo verde) cuando el voltaje de entrada es mayor a cero volts. Por el contrario, el circuito genera un cero lógico (trazo amarillo), cuando el voltaje de entrada es menor a 0 V. De esta forma podemos interpretar cuando la señal de entrada ha realizado el cruce por cero y a que semiciclo de la señal de voltaje de alterna corresponde.



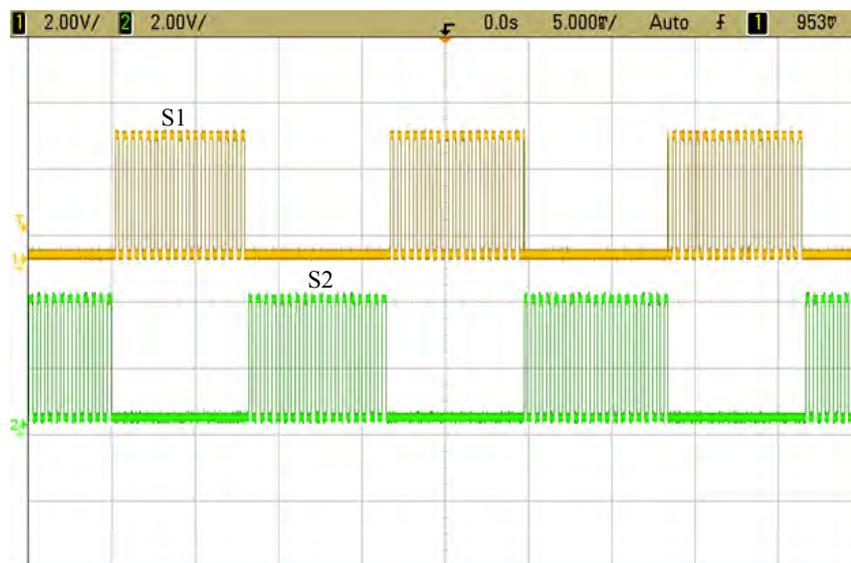
### 5.3 Circuito de generación de señales de disparo

La Figura 38 muestra el circuito implementado para la generación de las señales de disparo hacia los IGBTs del interruptor de CA. Este circuito utiliza la señal lógica generada por el circuito de detección de cruce por cero para seleccionar el IGBT que le corresponde conducir de acuerdo con la polaridad del semiciclo del voltaje de línea que corresponde. Esta función es realizada por las compuertas lógicas 74LS08 que determinan hacia que interruptor habilitar la señal de 500 Hz que es suministrada por el generador de funciones. Cabe mencionar que la señal proveniente del generador de funciones es una señal cuadrada de 500 Hz con niveles de voltaje TTL y ciclo de trabajo del 50%.



**Figura 38. Circuito de generación de señales de disparo.**

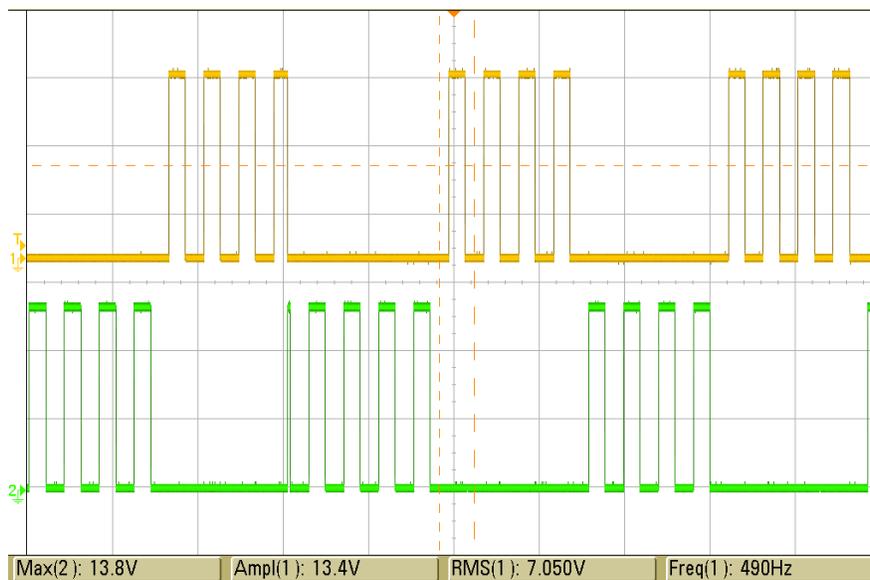
Debido a la naturaleza de las compuertas AND, se da una salida (S1 o S2) solamente cuando existen un par de unos lógicos. Esto es, solamente cuando existe el cruce por cero y cuando se encuentra la señal del generador de funciones. En la Figura 39 se observa las ondas de las salidas S1 y S2, las cuales son generadas por el circuito de la Figura 38. Se puede observar que las señales S1 y S2 son excluyentes con la finalidad de que cada uno de los IGBTs conduzca en el semiciclo correspondiente del voltaje de CA de la red eléctrica.



**Figura 39. Señales de disparo hacia los IGBTs.**

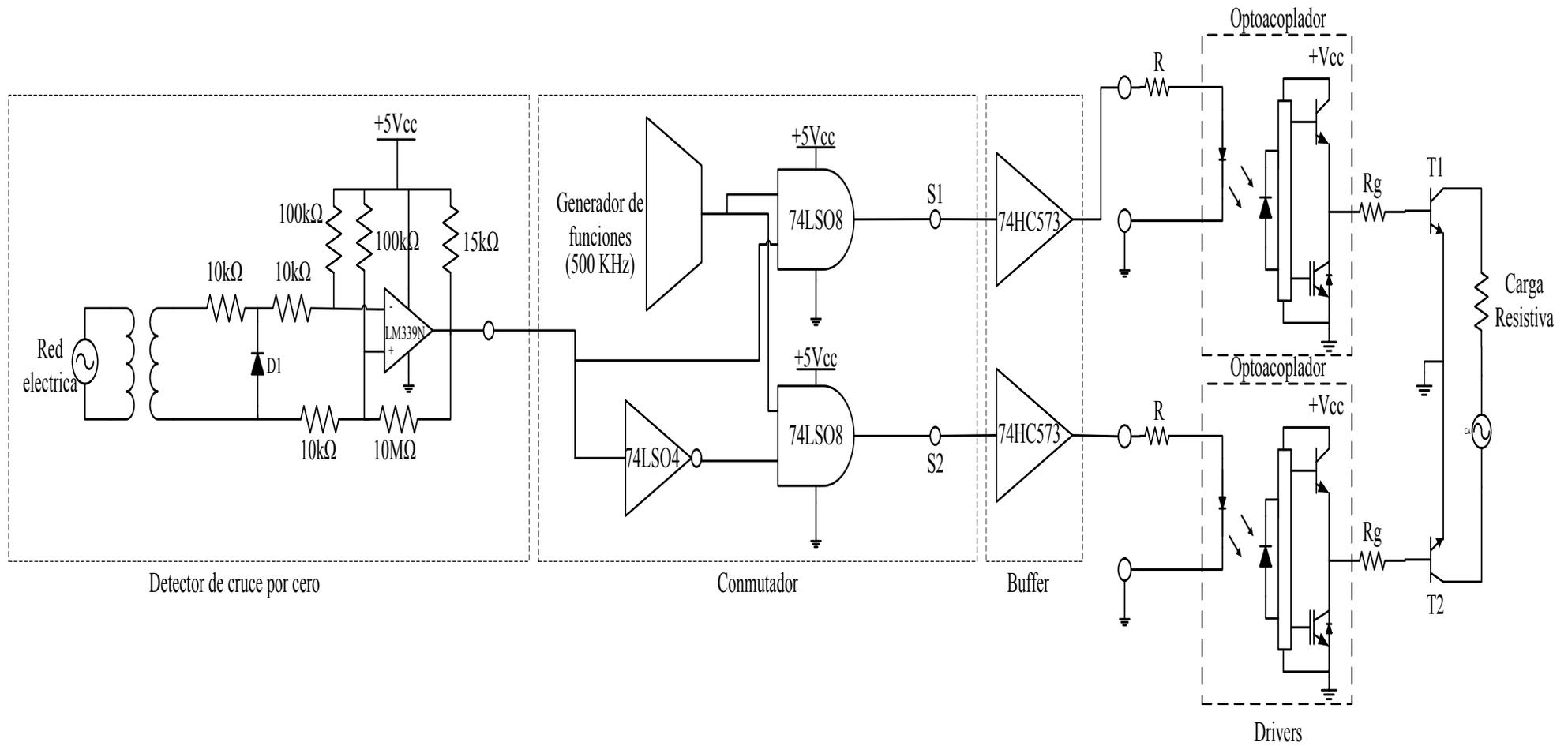
## 5.4 Circuito de disparo de los IGBTs

Una vez obtenidas las señales de disparo para cada interruptor (señales S1 y S2), se requiere de acondicionarlas para ser aplicadas a las compuertas de los IGBTs. Este acondicionamiento es realizado por los optoacopladores cuya función consiste en cambiar los niveles de las señales lógicas TTL, a niveles entre 0 y 15 V para la correcta conmutación de los IGBTs. Además, los optoacopladores proporcionan el aislamiento eléctrico entre la etapa de control y la etapa de potencia. La Figura 40 muestra las señales de los optoacopladores hacia los IGBTs para su conmutación.



**Figura 40. Señales de los optoacopladores aplicadas a las compuertas de los IGBTs T1 y T2.**

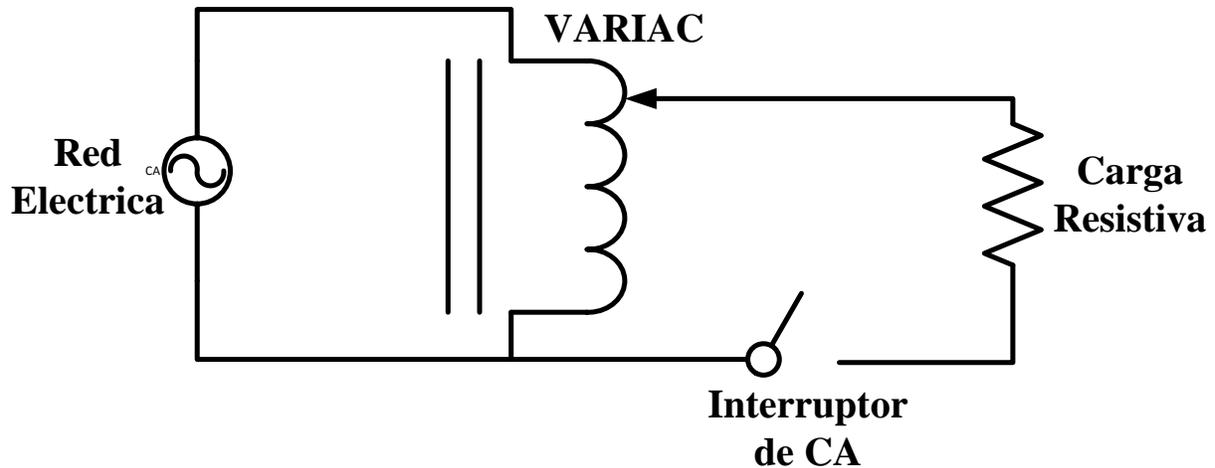
La Figura 41 muestra el diagrama completo del circuito de generación de las señales de disparo hacia los IGBTs del interruptor de CA. En el diagrama se visualizan los diferentes circuitos descritos anteriormente



**Figura 41. . Circuito del interruptor bidireccional monofásico de corriente alterna.**

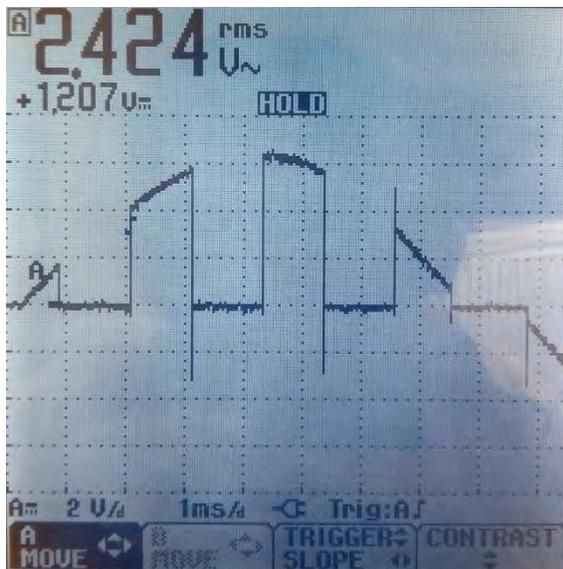
## 5.5 Prueba del interruptor bidireccional

La evaluación del funcionamiento del interruptor de CA se realizó utilizando una carga resistiva y utilizando una fuente de voltaje variable de CA monofásica (VARIAC). La Figura 41 muestra el diagrama del banco de pruebas del interruptor de CA.

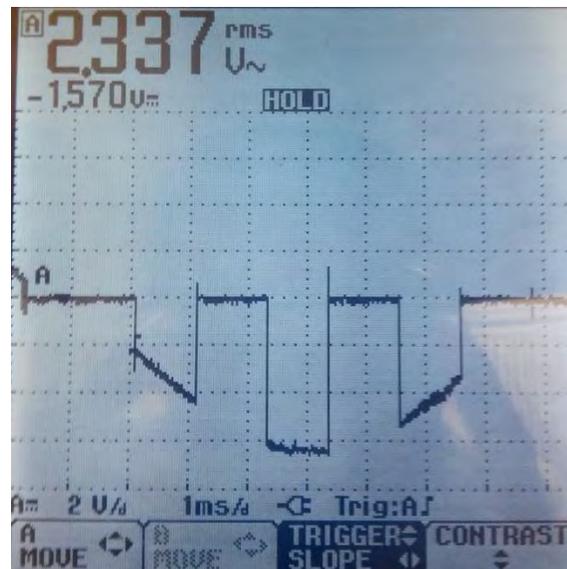


**Figura 42. Banco de pruebas del interruptor de CA.**

En la Figura 43 se muestra la operación del interruptor de CA con diferentes niveles de tensión aplicados. La figura 41(a) muestra la conmutación del interruptor de CA durante el semiciclo positivo de la señal de CA. En esta figura se aprecia la conmutación subcíclica del interruptor de CA que es realizada a la frecuencia de 500 Hz. Por otra parte, en la figura 41(b) se muestra la conmutación del interruptor de CA durante el semiciclo negativo. De igual forma, se aprecia la conmutación subcíclica del interruptor de CA.



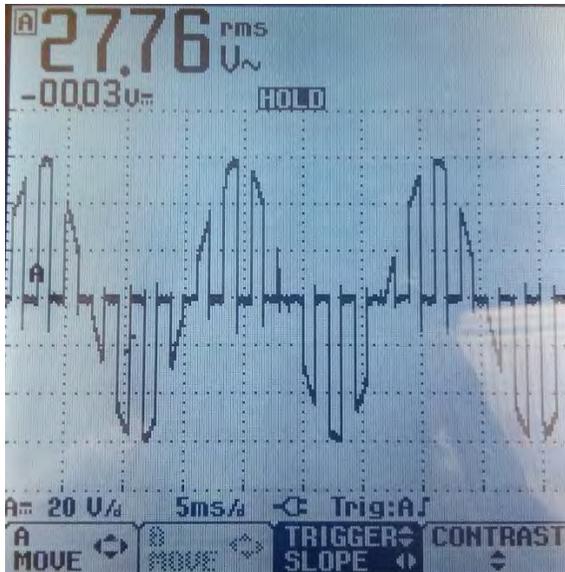
(a)



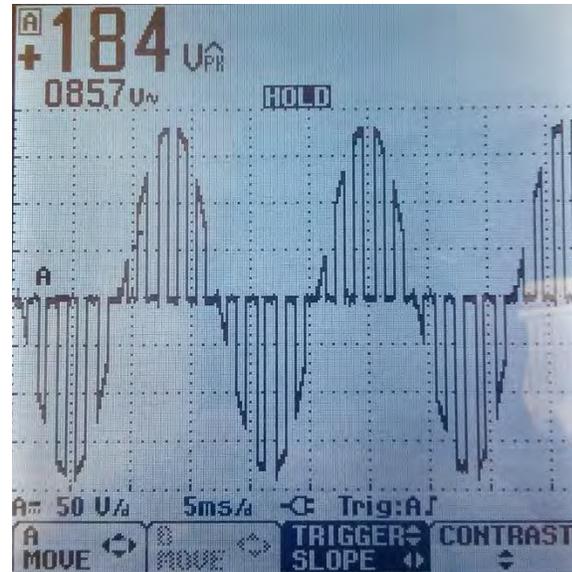
(b)

**Figura 43. Conmutación subcíclica del interruptor de CA. (a) Conmutación subcíclica durante el semiciclo positivo. (b) Conmutación subcíclica durante el semiciclo negativo.**

La Figura 44 por su parte muestra la conmutación subcíclica del interruptor de CA durante un periodo de la red eléctrica. En la Figura 44(a) el voltaje aplicado al interruptor de CA fue de 60 Vpico. Por su parte en la Figura 44(b) el voltaje aplicado al interruptor de CA fue de 184 Vpico que corresponde al voltaje que se obtiene de una conexión monofásica ( $127 V_{RMS}$ ).



(a)



(b)

**Figura 44. Conmutación del interruptor de CA. (a) Voltaje de entrada: 60Vpico. (b) Voltaje de entrada: 184 Vpico.**

Los resultados obtenidos en estas pruebas demuestran la correcta operación del interruptor de CA para diferentes niveles de voltaje de CA con carga resistiva. Estos resultados confirman la conmutación subcíclica adecuada del interruptor de CA, que en este trabajo de tesis fue de 500 Hz.

## **CAPITULO 6. Conclusiones**

El proyecto desarrollado consistió en el diseño y construcción de un interruptor bidireccional de CA a partir de semiconductores de potencia. Los IGBTs (Integrated-Gate Bipolar Transistor) usados cuentan con diodos en antiparalelo integrados.

En este trabajo se ha presentado una descripción de los diferentes tipos de semiconductores de potencia, sus características y sus cuadrantes de operación. De igual forma, se describieron las diferentes configuraciones que pueden ser creadas usando dispositivos semiconductores de potencia (diodos y transistores) para formar un interruptor bidireccional, cada uno con sus ventajas y desventajas.

Se diseñó un interruptor bidireccional de CA que opera en los cuatro cuadrantes del plano formado por la corriente y voltaje aplicados. Este interruptor es capaz de conducir corrientes positivos al igual que negativos y es capaz de bloquear voltajes positivos y negativos.

La configuración usada fue la de emisor-común ya que esta solamente necesita de un circuito de control haciendo más compacto y menos costoso la construcción del interruptor bidireccional.

Las pruebas realizadas al interruptor bidireccional de CA demuestran el adecuado funcionamiento del proceso de conmutación. El encendido y el apagado de los transistores se realizaron a una frecuencia de 500 Hz. El interruptor de CA demostró un funcionamiento correcto a niveles de voltaje de CA de una conexión monofásica y con una carga resistiva.

Futuras aplicaciones se podrían dar usando el interruptor bidireccional. Esto podría ser en cualquier sistema que requiera la transferencia de energía de la fuente hacia la carga y vice-versa. Se puede aplicar en convertidores de potencia, control de motores, entre otros sistemas.

Algunas mejoras que se pueden hacer al interruptor bidireccional podrían ser en mejorar la estrategia de conmutación y la integración de un filtro para eliminar los ruidos.

## Referencias

- [1] B. H. Kwon, B. D. (2006). Novel commutation technique of AC-AC converters. 6.
- [2] Burany, N. (s.f.). Safe control of four-quadrant switches. 5.
- [3] Dispositivos semiconductores para la electronica de potencia. (s.f.). Madrid.
- [4] Galvez, S. J. (1 de Noviembre de 2007). *Interruptor de potencia bidireccional, inteligente y modular*. Obtenido de Interruptor de potencia bidireccional, inteligente y modular.: <http://www.google.com/patents/WO2007122281A1?cl=es>
- [5] J. L. Galvez, X. J.-P. (s.f.). Intelligent bidirectional power switch module for matrix converter applications.
- [6] L. Zhang, C. W. (2006). Analysis and comparison of control techniques for AC-AC matrix converters. 11.
- [7] N. Idir, J. J. (2007). Active gate voltage control of bidirectional switches used in AC-AC converters. 6.
- [8] Rashid, M. H. (2004). *Electronica de Potencia*. Mexico: Pearson Educacion.
- [9] Ruiz, J. A. (2007). Convertidor CA-CA basado en DSP. 99.
- [10] Sanchez, A. P. (2008). *Desarrollo de un circuito de pruebas para la caracterizacion del interruptor bidireccional*. Cuernavaca, Morelos.
- [11] Song Zeng, B. Z. (2007). Four-step Switching Strategy for Bidirectional Switches in Single-phase AC/AC Buck Converter. *Industrial Electronics and Applications*, 4.
- [12] *Switch realization*. (s.f.). Obtenido de <http://ecee.colorado.edu/copec/book/slides/Ch4slide.pdf>
- [13] Teoria basica de interruptores y energia solar. (s.f.).
- [14] *The Bi-directional switch commutation*. (s.f.). Obtenido de [http://www.die.ing.unibo.it/dottorato\\_it/Matteini/Matteini\\_PhD\\_part3.pdf](http://www.die.ing.unibo.it/dottorato_it/Matteini/Matteini_PhD_part3.pdf)
- [15] Valencia, U. d. (s.f.). Reguladores e interruptores estaticos de alterna.
- [16] Vives, A. R. (2010). Ingenieria Tecnica Industrial: Especialidad Electronica Industrial. 51.

# ANEXOS

## ANEXO A. Hoja de datos de los IGBTs.

International  
**IR** Rectifier

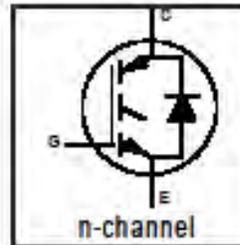
PD 9.1467D

# IRG4PC40UD

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE UltraFast CoPack IGBT

### Features

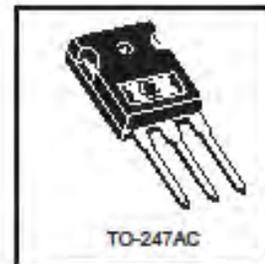
- UltraFast: Optimized for high operating frequencies 8-40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- Generation 4 IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than Generation 3
- IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
- Industry standard TO-247AC package



$V_{CES} = 600V$   
 $V_{CE(on)} \text{ typ.} = 1.72V$   
 @  $V_{GE} = 15V, I_C = 20A$

### Benefits

- Generation 4 IGBT's offer highest efficiencies available
- IGBT's optimized for specific application conditions
- HEXFRED diodes optimized for performance with IGBT's. Minimized recovery characteristics require less/no snubbing
- Designed to be a "drop-in" replacement for equivalent industry-standard Generation 3 IR IGBT's



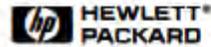
### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$V_{CES}$	Collector-to-Emitter Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	40	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	20	
$I_{CM}$	Pulsed Collector Current $\Phi$	160	
$I_{LM}$	Clamped Inductive Load Current $\Phi$	160	
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	15	
$I_{FM}$	Diode Maximum Forward Current	160	
$V_{GE}$	Gate-to-Emitter Voltage	$\pm 20$	V
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	160	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	65	
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
$T_{SOL}$	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 Screw.	10 lbf-in (1.1 N-m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - IGBT	—	—	0.77	°C/W
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - Diode	—	—	1.7	
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, flat, greased surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	—	40	
Wt	Weight	—	6 (0.21)	—	g (oz)

4/17/97



## 2.0 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler

### Technical Data

#### HCPL-3120

#### Features

- 2.0 A Minimum Peak Output Current
- 15 kV/μs Minimum Common Mode Rejection (CMR) at  $V_{CM} = 1500$  V
- 0.5 V Maximum Low Level Output Voltage ( $V_{OL}$ ) Eliminates Need for Negative Gate Drive
- $I_{CC} = 5$  mA Maximum Supply Current
- Under Voltage Lock-Out Protection (UVLO) with Hysteresis
- Wide Operating  $V_{CC}$  Range: 15 to 30 Volts
- 500 ns Maximum Switching Speeds
- Industrial Temperature Range: -40°C to 100°C
- Safety Approval  
UL Recognized - 2500 V rms for 1 minute per UL1577  
CSA Approval  
VDE 0884 Approved with  $V_{IORM} = 630$  V peak (Option 060 only)

#### Applications

- Isolated IGBT/MOSFET Gate Drive
- AC and Brushless DC Motor Drives

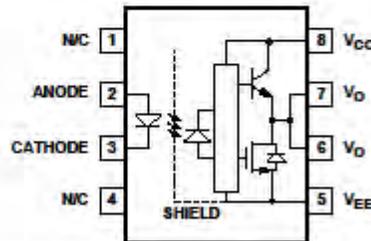
- Industrial Inverters
- Switch Mode Power Supplies (SMPS)

#### Description

The HCPL-3120 consists of a GaAsP LED optically coupled to an integrated circuit with a power output stage. This optocoupler is ideally suited for driving power IGBTs and MOSFETs used in

motor control inverter applications. The high operating voltage range of the output stage provides the drive voltages required by gate controlled devices. The voltage and current supplied by this optocoupler makes it ideally suited for directly driving IGBTs with ratings up to 1200 V/100 A. For IGBTs with higher ratings, the HCPL-3120 can be used to drive a discrete power stage which drives the IGBT gate.

#### Functional Diagram



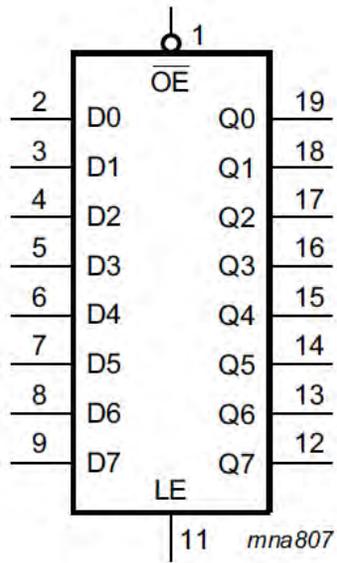
#### TRUTH TABLE

LED	$V_{CC} - V_{EE}$ "POSITIVE GOING" (I.e., TURN-ON)	$V_{CC} - V_{EE}$ "NEGATIVE GOING" (I.e., TURN-OFF)	$V_O$
OFF	0 - 30 V	0 - 30 V	LOW
ON	0 - 11 V	0 - 9.5 V	LOW
ON	11 - 13.5 V	9.5 - 12 V	TRANSITION
ON	13.5 - 30 V	12 - 30 V	HIGH

A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pins 5 and 8.

**CAUTION:** It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

### ANEXO C. Símbolo lógico del buffer.



### ANEXO D. Diagrama lógico del buffer.

