

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las
Villas**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Eléctrica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Material de estudio teórico-práctico sobre
inversores autónomos para la asignatura de
Electrónica de Potencia**

Autor: Jarvis Herrera Morffi

Tutores: Ing. Jorge Denis Raimundo Tagle

MsC. Leonardo Rodríguez Jiménez

Santa Clara

2016

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las
Villas**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Eléctrica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Material de estudio teórico-práctico sobre
inversores autónomos para la asignatura de
Electrónica de Potencia**

Autor: Jarvis Herrera Morffi

Tutores: Ing. Jorge Denis Raimundo Tagle

denisrt@uclv.cu

MsC. Leonardo Rodríguez Jiménez

leonardo@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“...El futuro de nuestro país deberá ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia...”

Fidel Castro

DEDICATORIA

A toda mi familia especialmente a mi madre y abuela

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Daisy, por traerme a este mundo, por cuidarme y permitirme el placer de vivir mi vida a plenitud.

A mi abuela María por su amor infinito y su plena confianza.

A mis tutores por su ayuda, sus consejos y por dedicarme tanto tiempo.

A mis amigos, Alberto, Carlos, Alfredo, Brayan, Sergio, Hoyt, Adrián y Luisy, por estar en las buenas y las malas, porque estos 5 años serán inolvidables y nos unirán toda la vida.

A mi compañero Yimy por su gran atención.

A mi grupo de Ingeniería Eléctrica, por compartir tantos momentos juntos.

A mis profesores, que gracias a su talento y profesionalidad me han convertido en quien soy.

A toda mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de todo este tiempo.

A los que de una forma u otra han participado en la realización de este trabajo.

A todos muchísimas gracias.

TAREA TÉCNICA

- ▶ Revisión y estudio de la bibliografía existente sobre el tema de los inversores autónomos.
- ▶ Elaborar un material de estudio donde queden actualizados los contenidos teóricos y prácticos sobre el tema de los inversores autónomos utilizando los textos básicos y materiales publicados en Internet.
- ▶ Organizar adecuadamente la estructura de la tesis basándose en un diseño metodológico estratégico según las orientaciones y normas aprobadas por el MES.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo se abordan los referentes teóricos de los inversores autónomos como son topologías, principio de funcionamiento, ventajas, etc. Además, se implementa el diseño de un inversor DC-AC Switch y se explica su principio de funcionamiento, para lo cual fue necesario separarlo en tres circuitos con vistas a mejorar su comprensión. Este inversor se utilizó para implementar una práctica de laboratorio real para la asignatura Electrónica de Potencia cuyas mediciones de voltaje, frecuencia y forma de onda en algunos puntos de cada circuito del inversor se muestran en la investigación.

Tabla de Contenidos

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN.....	v
Introducción	1
Capítulo 1. Generalidades acerca de los convertidores DC-AC.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Semiconductores de potencia.....	5
1.2.1 Diodo.....	8
1.2.2 Tiristor.....	9
1.2.3 GTO (Gate Turn-off Thyristor)	11
1.2.4 BJT (Bipolar Junction Transistor).....	12
1.2.5 MOSFET	14
1.2.6 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).....	16
1.3 Estudio de los convertidores CC/CA o inversores.....	17
1.4 Topologías de Inversores de potencia.....	17
1.4.1 Inversor push-pull	18

1.4.2 Inversor de medio puente	19
1.4.3 Inversor de puente completo	21
1.5 Configuraciones Trifásicas	24
1.6 Inversores Multinivel	27
1.7 Tipos de conducción en los inversores trifásicos.....	28
1.8 Campos de aplicación de los inversores.....	31
1.9 Conclusiones parciales del capítulo.....	31
Capítulo 2. Implementación de prácticas de laboratorios	32
2.1. Introducción.....	32
2.2 Desarrollo de las prácticas de laboratorio.....	32
2.3. Inversor DC-DC de alta frecuencia	33
2.4 Inversor DC-AC de baja frecuencia	35
2.4.1. Puente H	37
2.5 Componentes del circuito	39
2.5.1 Resistencia	39
2.5.2. Inductor.....	40
2.5.3 Capacitor Electrolítico	40
2.5.4 Condensador:	42
2.5.5 Diodo LED:.....	42
2.5.6. Diodo Zener	44
2.5.7. Timer SG3525	46
2.5.8 Timer 555	47
2.6 Circuito de supervisión	51
Conclusiones Generales.....	59
Recomendaciones	60
Referencias Bibliográficas.....	61

Anexo #1 Inversor DC/AC Switch (Diagrama circuital)	62
Anexo #2 Inversor DC/AC Switch	63

Introducción

A partir del año 1975, en la Carrera del Ingeniero Electricista, comienza a consolidarse la introducción de la Disciplina Electrónica de Potencia y Accionamiento. La electrónica de potencia o electrónica de las corrientes fuertes es una técnica relativamente nueva que se ha desarrollado a partir de la electrónica y la electrotécnica gracias al avance tecnológico que se ha alcanzado en la producción de dispositivos semiconductores y se define como la técnica de las modificaciones de la presentación de la energía eléctrica.

A diferencia de como ocurre en la electrónica de las corrientes débiles, en que se da prioridad a la ganancia y fidelidad, la característica más importante de la electrónica de potencia es el rendimiento. Esta última, se diferencia de la primera, en que en la electrónica de las corrientes débiles, lo más importante es que se ocupa de modular la caída de tensión en los elementos activos a fin de modificar o amplificar la señal de entrada, pero en la que nos ocupa los elementos activos han de trabajar en conmutación todo o nada a fin de minimizar las pérdidas de modo tal que cuando el semiconductor está bloqueado y sometido a una tensión alta es preciso que la corriente de fuga sea despreciable y cuando conduce, ha de ser despreciable su caída de tensión. Esto garantiza que el dispositivo presente características similares a un interruptor mecánico.

El desarrollo de las técnicas de conversión de energía utilizando semiconductores de potencia, el vertiginoso desarrollo de los circuitos integrados y la utilización de los microprocesadores aplicados a estas técnicas ha provocado la inclusión de estos temas en la asignatura de Electrónica de Potencia.

Actualmente, con el desarrollo de la ciencia y la técnica en el mundo y en nuestro país en particular, cada vez más, se utilizan en la industria sistemas de accionamientos eléctricos altamente automatizados, instalaciones convertidoras de energía, etc, en las cuales se usan componentes semiconductores de potencia dirigidos por dispositivos de alta integración, sistemas a microprocesadores, controladores programables, etc.

Entre las tareas del Ingeniero Electricista, está la explotación y mantenimiento de estas instalaciones, por lo que se hace imprescindible dotarlo de los conocimientos necesarios para enfrentar este trabajo.

Por otro lado, se tiene que, parte del contenido de la asignatura Electrónica de Potencia se encuentra en formato digital en la red de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, lo cual tiene ventajas debido a que todos los estudiantes pueden acceder al mismo. No obstante, esta información está incompleta y falta de actualización, fundamentalmente.

De ahí, que el problema científico de esta investigación sea: ¿Cómo proveer al estudiante de los conocimientos necesarios, a través de un material actualizado teórico y práctico, sobre el tema de los inversores autónomos para su formación en la asignatura Electrónica de Potencia?

Para resolver esta situación, se propone como objetivo general:

Elaborar un material de estudio, que incluya prácticas de laboratorio reales, sobre el tema Inversores Autónomos para la asignatura Electrónica de Potencia, con un rigor científico acorde a las exigencias del plan de estudio D.

Definiéndose como objetivos específicos los siguientes:

1. Revisar la bibliografía existente sobre el tema de los inversores autónomos que se imparte en la asignatura de Electrónica de Potencia.
2. Elaborar un material de estudio, en formato electrónico que incluya, de forma organizada y actualizada, los contenidos teóricos y prácticas sobre el tema de los inversores autónomos.
3. Incorporar en este material prácticas de laboratorio reales.

En consecuencia, se realizaron las siguientes tareas de investigación:

1. Revisar la bibliografía sobre el tema de los inversores autónomos que se imparte en la asignatura de Electrónica de Potencia.
2. Elaborar un material de estudio, en formato electrónico que incluya, de forma organizada y actualizada, los contenidos teóricos y prácticos sobre el tema de los inversores autónomos de los inversores
3. Incorporar en este material prácticas de laboratorios reales

Con este trabajo se pretende contribuir al desarrollo de la asignatura Electrónica de Potencia y ofrecer una respuesta a la constante demanda de prácticas de laboratorio referente a la misma. El uso del material elaborado permitirá a los estudiantes y profesores, disponer de la información, tanto teórica como práctica, de forma organizada y actualizada. Los resultados de investigación poseen una aplicación práctica y teórica de gran trascendencia para todos los estudiantes y profesores relacionados con estos temas.

El informe de la investigación se estructura en introducción, capitulario, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

Capítulo 1. Generalidades acerca de los convertidores DC-AC

1.1 Introducción

La distribución de la energía ha venido condicionada por los factores de costo de generación, costo de distribución, accesibilidad y rendimiento en la aplicación. Estos factores, junto con el desarrollo tecnológico de las máquinas eléctricas (transformadores y motores) y los componentes electrónicos (diodos, tiristores, transistores de potencia), han marcado las tendencias de empleo en el consumo doméstico e industrial. Así, se pasó de una fase electro-mecánica a otra, en la que actualmente las aplicaciones de generación y distribución siguen condicionadas a elementos electro-mecánicos, pero el consumo se ha diversificado en multitud de elementos con requisitos muy dispares (domótica, ordenadores personales, vehículos eléctricos, fuentes de alimentación, etc.)[1, 2].

Este último destino ha influido de forma considerable en el desarrollo y empleo de la conversión de energía eléctrica por medio de elementos electrónicos de potencia, actuando en conmutación, para poder obtener elevados rendimientos y perturbar lo mínimo posible la distribución de la red eléctrica.

La conversión de energía mediante los circuitos electrónicos de potencia se realiza adaptando la señal de entrada de un cierto tipo o nivel a las características que necesita la carga. Así, según la transformación entrada-salida, se tienen los siguientes convertidores[1, 2]:

- Rectificadores CA/CC: producen una salida continua a partir de una entrada alterna.
- Convertidores CC/CA: También conocidos como inversores, que a partir de una alimentación de corriente continua proporcionan una salida de corriente alterna de frecuencia regulable. A este grupo pertenece el circuito de electrónica de potencia bajo estudio en este trabajo de investigación.

- Convertidores CA/CA: Permiten modificar el valor eficaz de la señal entregada a la carga por una fuente de corriente alterna, variando la frecuencia (ciclo convertidor), o sin alterarla (regulador de alterna).
- Convertidores CC/CC: También denominados “chopper”, que permiten suministrar una señal continua de salida a la carga a partir de una alimentación de corriente continua de entrada.

Un diagrama típico en el que se muestra el flujo en las conversiones de energía se muestra en la figura 1.1.

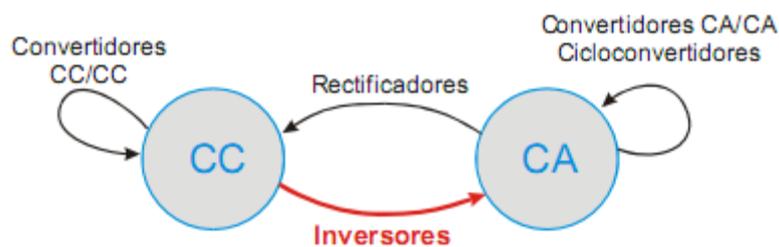


Figura 1.1. Conversiones de energía.

Todas estas técnicas de conversión requieren de la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia, que a su vez son controlados mediante señales generadas por circuitos integrados y componentes discretos, los cuales se han ido reemplazando por microprocesadores con el paso de los años[1].

1.2 Semiconductores de potencia

El desarrollo de los convertidores electrónicos de potencia está ligado al desarrollo de los dispositivos de estado sólido con que se construyen. A pesar de que la historia de la electrónica de potencia comenzó hacia el año 1900 con el desarrollo del rectificador de arco de mercurio, no fue hasta la década de los años cincuenta cuando comienza un desarrollo espectacular motivado por la invención del transistor de silicio en los laboratorios Bell de la mano de Bardeen, Brattain y Shockley, que recibieron el premio Nobel de física por ello. A partir de este hito fundamental se producen otros de gran importancia como el desarrollo del tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR) en 1956. A partir de esta década, la electrónica de potencia va a estar dominada casi exclusivamente por la electrónica de estado sólido.

A pesar de que hoy en día existe una gran variedad de tecnologías de conmutación de potencia para la fabricación de convertidores, todas ellas persiguen el mismo objetivo, que puede resumirse en las características que presenta un elemento ideal[3].

Como se ha visto al principio del tema, la idea básica de un convertidor de potencia es transformar el flujo de energía entre su entrada y salida. Para poder realizar dicha transformación, es necesario contar con interruptores controlados que tengan las siguientes características (elemento ideal)[3]:

$R(off) = \infty$. Presenta una resistencia infinita entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de bloqueo.

$R(on) = 0$. Presenta una resistencia nula entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de conducción.

$t_{off \rightarrow on} = 0$. El tiempo para la conmutación del estado de bloqueo al estado de conducción es nulo.

$t_{on \rightarrow off} = 0$. El tiempo para la conmutación del estado de conducción al estado de bloqueo es nulo.

$V_{off.m\acute{a}x} = \infty$. Soporta una tensión infinita entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de bloqueo.

$i_{on.m\acute{a}x} = \infty$. Soporta una intensidad de paso infinita cuando se encuentra en el estado de conducción.

$P_{control} = 0$. La potencia consumida por el circuito de control es nula.

Desde un punto de vista circuital, el elemento ideal se caracteriza por un interruptor controlado, tal como muestra la figura 1.2. Como puede observarse, presenta tres terminales: dos terminales de conexión y un tercero de control.

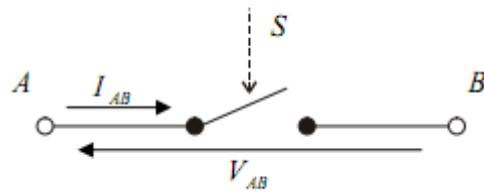


Figura 1.2. Esquema eléctrico de un elemento de conmutación ideal.

Eléctricamente, los dispositivos se caracterizan por una curva que relaciona la intensidad de conducción con la tensión entre terminales de conexión. Tal como se han definido los terminales en la figura anterior, las curvas v-i del elemento ideal para los dos estados de conducción son las que se muestran a continuación, donde se ha considerado como positiva la circulación de la intensidad en el sentido AB. Se considera positiva la tensión AB.

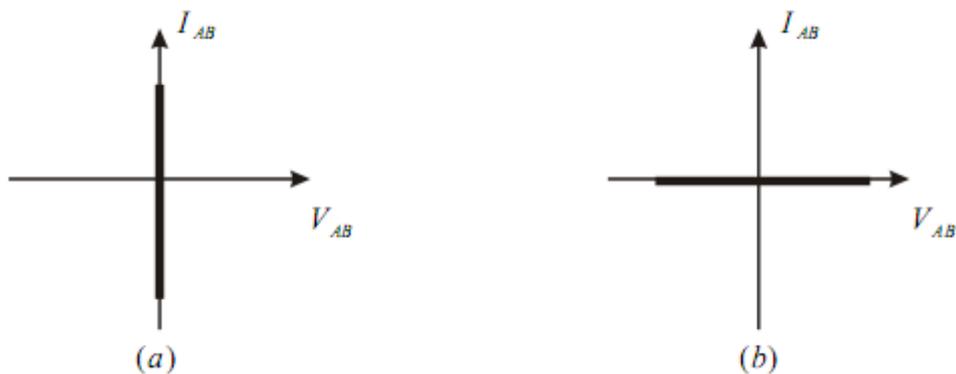


Figura 1.3. Curvas v-i de un elemento ideal. (a) Estado de conducción; (b) Estado de bloqueo.

El estado de conducción se caracteriza porque la tensión entre los puntos A y B es nula independientemente del valor de la intensidad en el sentido AB. Su representación puede observarse en la figura 1.3(a). En el estado de bloqueo la intensidad AB es nula también independientemente del valor de la tensión AB, tal como se muestra en la figura 1.3 (b).

Las características descritas corresponden a un elemento ideal, inexistente en la práctica. Las soluciones comerciales existentes se aproximan en mayor o menor medida a estas características, sin llegar a cumplirlas de forma completa. En la figura 1.4, se comparan las intensidades máximas de conducción y las tensiones

máximas de bloqueo soportadas por los diferentes tipos de semiconductores utilizados habitualmente.

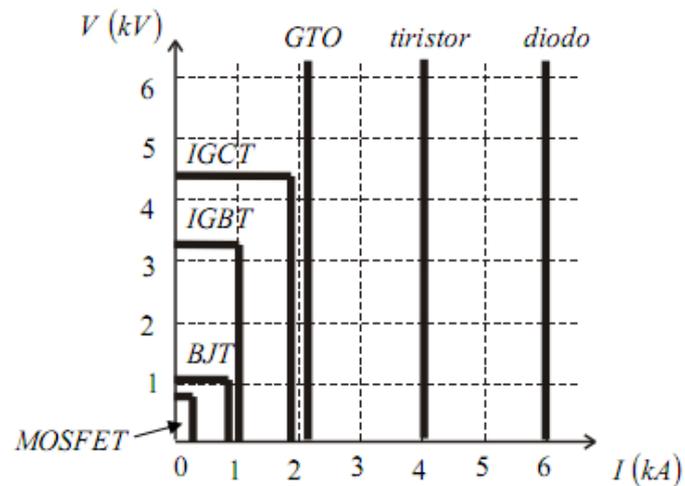


Figura 1.4. Curva comparativa de la capacidad v-i (en valores medios) de diferentes tecnologías de dispositivos.

A continuación, se describen los elementos comerciales más usuales, siguiendo un orden cronológico y presentando las ventajas y desventajas más relevantes.

1.2.1 Diodo

Un diodo es un semiconductor de unión pn de dos terminales denominados ánodo (A) y cátodo (K). Se trata sin duda alguna del elemento más utilizado en la construcción de convertidores electrónicos de potencia. Desde un punto de vista funcional, el diodo es un elemento no controlado, ya que su conmutación del estado de bloqueo al de conducción o viceversa depende únicamente del signo de la intensidad que lo recorre y su tensión en los bornes. Dado que no es posible realizar ningún control externo sobre su estado, no posee terminal de control, disponiendo únicamente de dos terminales correspondientes a los polos del interruptor equivalente[3-7].

En la figura 1.5 se muestra el símbolo correspondiente al diodo, así como su curva v-i.



Figura 1.5. Símbolo del diodo y característica v-i ideal.

Como se observa en la figura, un diodo ideal puede representarse mediante una resistencia nula en el estado de conducción, que se produce siempre que la intensidad I_{AK} es positiva en el sentido ánodo-cátodo. Por otro lado, cuando dicha intensidad es negativa el diodo pasa al estado de bloqueo y se comporta como una resistencia infinita.

Desde el punto de vista comercial, y considerando aplicaciones de media tensión (MT) y baja tensión (BT), es posible encontrar en el mercado diodos que soportan corrientes de conducción de 6 kA, así como tensiones inversas de 6 kV[3].

En la tabla 1.1 se resumen las características más sobresalientes de un diodo desde el punto de vista de utilización.

Tabla 1.1. Características funcionales básicas de un diodo.

Parámetro	Valor
Número de terminales	2
Control de la conmutación de bloqueo a conducción	Automático en función del signo de I_{AK}
Control de la conmutación de conducción a bloqueo	Automático en función del signo de I_{AK}

1.2.2 Tiristor

Los tiristores son dispositivos semiconductores fabricados mediante la unión de cuatro capas con una estructura pnpn que presenta, por tanto, tres uniones pn. Posee tres terminales: ánodo, cátodo y puerta.

Desde un punto de vista funcional, el tiristor se comporta como un diodo cuando se aplica una corriente de puerta por el terminal G. El proceso de activación requiere que se cumplan dos condiciones[3]:

1. Debe aplicarse una intensidad de control en el terminal de puerta (G). En los dispositivos comerciales dicha intensidad debe tener unas condiciones de amplitud y duración determinadas.
2. En el momento de aplicar la intensidad de control en el terminal de puerta (G), la intensidad ánodo-cátodo debe ser positiva.

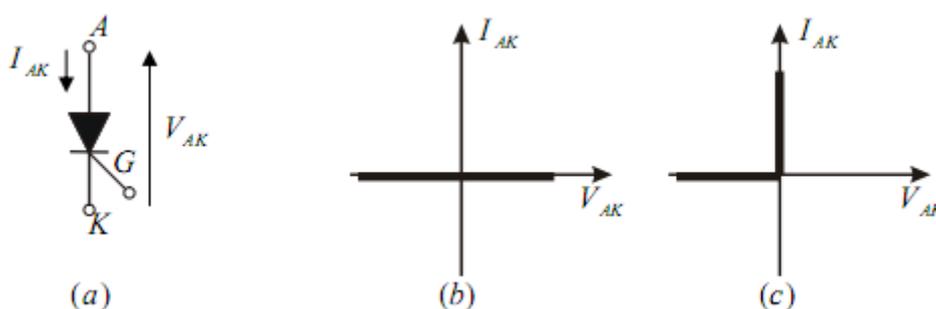


Figura 1.6. Símbolo y curvas v-i de un tiristor ideal. (b) Estado de bloqueo; (c) Estado de conducción.

Una vez que se ha activado y pasa a la condición de conducción, permanece en dicho estado hasta que la intensidad ánodo-cátodo se hace negativa. Este hecho hace que si la intensidad ánodo-cátodo es de tipo alterno, el tiristor conmutará automáticamente del estado de conducción al de bloqueo cada vez que dicha intensidad cambie de signo. Comparándolo con el modelo de elemento ideal, el tiristor presenta un gran avance con respecto al diodo, ya que permite un control externo de activación. Sin embargo, se desactiva automáticamente en las mismas condiciones en las que un diodo pasa al estado de bloqueo. Además, una vez que ha conmutado al estado de bloqueo, permanece en él hasta que se aplica de nuevo una intensidad de puerta. Desde el punto de vista comercial, y considerando aplicaciones de MT y BT, es posible encontrar en el mercado tiristores que soportan corrientes de conducción de 4 kA, así como tensiones inversas de 6 kV[3]. En la tabla 1.2 se resumen las características más sobresalientes de un tiristor desde el punto de vista de utilización.

Tabla 1.2. Características funcionales básicas de un tiristor.

Parámetro	Valor
Número de terminales	3
Control de la conmutación de bloqueo a conducción	Externo mediante una intensidad aplicada al terminal de puerta (G)
Control de la conmutación de conducción a bloqueo	Automático en función del signo de I_{AK}

En la práctica, existen formas de controlar externamente la conmutación de conducción a bloqueo, pero requieren de circuitos de control complejos, por lo que hoy en día está en desuso su utilización en circuitos que requieren control de activación y desactivación.

1.2.3 GTO (Gate Turn-off Thyristor)

Se trata de un dispositivo con un principio de operación y aspecto físico similar a los tiristores. Al igual que éstos, dispone de tres terminales. Dos de ellos utilizados como polos del interruptor y un tercero utilizado como terminal de control. La diferencia principal de estos dispositivos con respecto a los tiristores convencionales es su capacidad para ser controlado externamente en la conmutación del estado de conducción al de bloqueo, también utilizando una intensidad de puerta[3]. En la figura 1.7 se muestra su símbolo y curvas v-i.

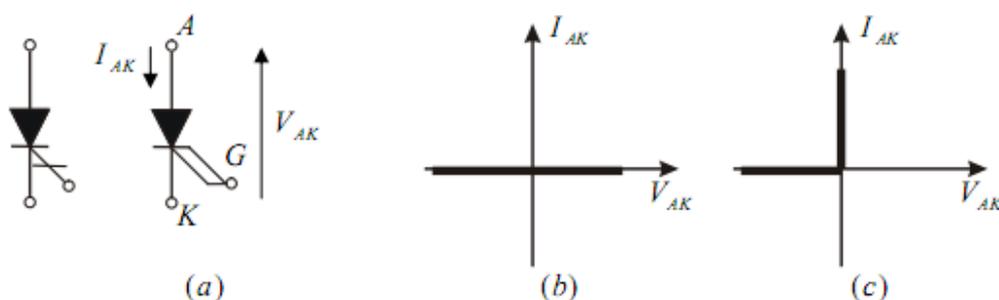


Figura 1.7. Símbolo y curvas v-i de un tiristor ideal. (b) Estado de bloqueo; (c) Estado de conducción.

Desde el punto de vista comercial, y considerando aplicaciones de MT y BT, es posible encontrar en el mercado tiristores que soportan corrientes de conducción

de 2 kA, así como tensiones inversas de 6 kV. En la tabla 1.3 se resumen las características más sobresalientes del GTO desde el punto de vista de utilización[3].

Tabla 1.3. Características funcionales básicas de un GTO.

Parámetros	Valor
Número de terminales	3
Control de la conmutación de bloqueo a conducción	Externo mediante una intensidad aplicada al terminal de puerta (G)
Control de la conmutación de conducción a bloqueo	Externo mediante una intensidad aplicada al terminal de puerta (G)

A partir del GTO se han desarrollado otros dispositivos como el IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor), que es un GTO en el que se ha mejorado el comportamiento de la conmutación. Puede entenderse como un GTO en el que se ha añadido un driver que facilita el proceso de conmutación. Al mismo tiempo, este dispositivo mejora también el parámetro dv/dt .

Otro dispositivo como el MTO (MOS Turn Off Thyristor) se desarrolló también como alternativa al GTO con la idea de conservar la capacidad de conmutación del tiristor, pero reduciendo las pérdidas de conmutación y mejorando el driver de control, que se realiza en tensión, no en intensidad. A pesar de que se trata de un dispositivo en desarrollo, presenta unas excelentes prestaciones[3].

1.2.4 BJT (Bipolar Junction Transistor)

El transistor bipolar se construye añadiendo una segunda región p o n a un diodo de unión pn. En función de que el resultado final sean tres capas npn o pnp, el transistor recibe los nombres de NPN o PNP, respectivamente, y guarda relación, como se verá más adelante, con el sentido de conducción del dispositivo. Desde un punto de vista constructivo, disponen de tres terminales denominados: colector, emisor y base. Los terminales colector y emisor actúan como polos del interruptor equivalente, mientras que el terminal de base actúa como terminal de control. Los transistores de potencia se caracterizan por conmutar de forma

controlada externamente del estado de bloqueo al de conducción y viceversa[3]. Los transistores, a diferencia de otros elementos como los tiristores, pueden funcionar en tres zonas distintas:

Corte: En esta zona el transistor se encuentra bloqueado, de forma que puede modelarse como un interruptor abierto.

Lineal: En esta zona el transistor se comporta como un elemento amplificador, de forma que la intensidad que circula del colector al emisor es aproximadamente proporcional a la intensidad de base.

Saturación: En esta zona el transistor se encuentra en conducción, de forma que puede modelarse como un interruptor cerrado.

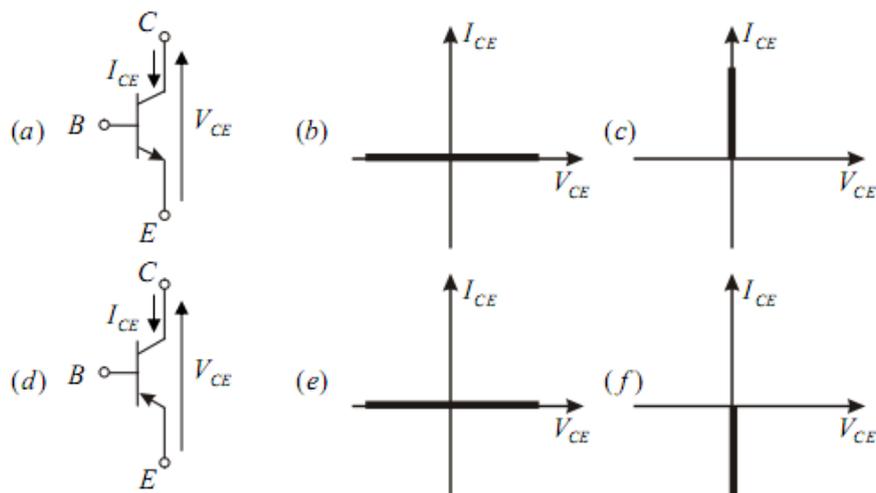


Figura 1.8. Símbolo y curvas v-i de un transistor BJT. (a) BJT npn; (b) BJT npn en estado de bloqueo; (c) BJT npn en estado de conducción; (d) BJT pnp; (e) BJT pnp en estado de bloqueo; (c) BJT pnp en estado de conducción.

En la figura 1.8a se muestra el símbolo de un transistor bipolar NPN. A pesar de que el dispositivo presenta tres zonas de funcionamiento posibles, desde el punto de vista de los convertidores de energía tiene aplicabilidad únicamente dos de ellas. En la figura 1.8b se muestra la característica v-i cuando el transistor se encuentra en corte, mientras que la figura 1.8c corresponde al estado de conducción. De forma similar, en la figura 1.8d se muestra el símbolo de un transistor bipolar PNP, que se diferencia del NPN en el sentido de conducción de la intensidad. Análogamente, las curvas 1.8e y f se corresponden, respectivamente, con el funcionamiento en los estados de bloqueo y conducción.

Comercialmente es posible encontrar dispositivos BJT con intensidad de conducción superiores a 1 kA y tensiones de bloqueo superiores a 1 kV[3].

En la tabla 1.4 se resumen las características más sobresalientes de un BJT desde el punto de vista de utilización.

Tabla 1.4. Características funcionales básicas de un BJT.

Parámetros	Valor
Número de terminales	3
Control de la conmutación de bloqueo a conducción	Externo mediante una intensidad aplicada al terminal de base (B)
Control de la conmutación de conducción a bloqueo	Externo mediante una intensidad aplicada al terminal de base (B)

1.2.5 MOSFET

El MOSFET es otro tipo de transistor. A diferencia del BJT, que es un dispositivo controlado mediante una intensidad que regula el paso de la intensidad de colector. Esta dependencia de la intensidad de base hace que el BJT tenga una ganancia que depende en gran medida de la temperatura de la unión. De forma alternativa, el MOSFET de potencia es un dispositivo controlado por tensión, que requiere únicamente una pequeña intensidad de entrada. Esta situación provoca una elevada velocidad de conmutación, con unos tiempos de conmutación del orden de los nanosegundos (nseg). Desde el punto de vista funcional y al igual que otros tipos de transistores, dispone de tres terminales denominados: drenador (D), surtidor (S) y puerta (G). El drenador y el surtidor son los polos del interruptor equivalente, mientras que la puerta sirve como elemento de control[3-7].

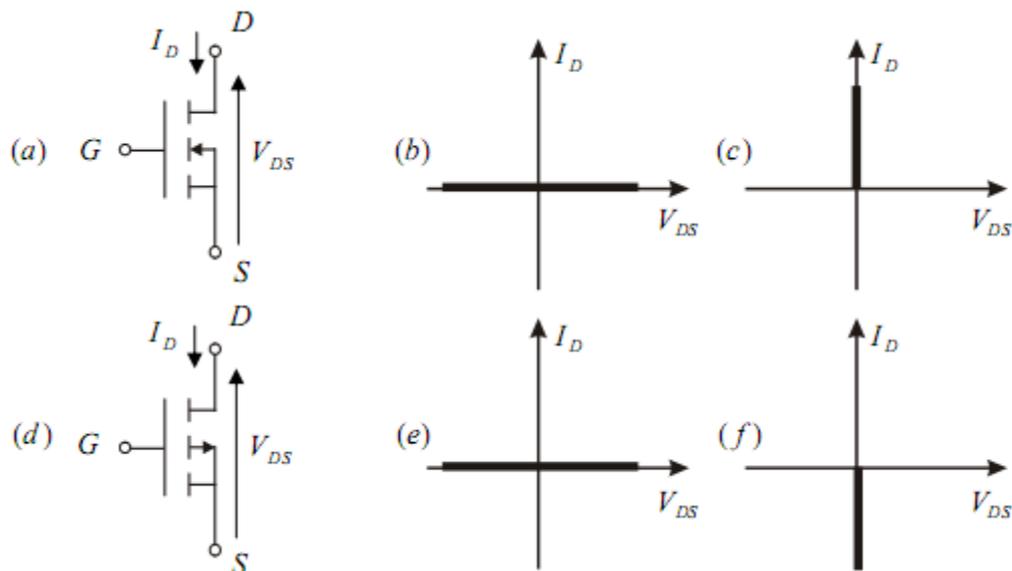


Figura 1.9. Símbolo y curvas v-i de un MOSFET. (a) MOSFET de canal n; (b) Estado de bloqueo del MOSFET de canal n; (c) Estado de conducción del MOSFET de canal n; (d) MOSFET de canal p; (e) Estado de bloqueo del MOSFET de canal p; (f) Estado de conducción del MOSFET de canal p.

En la figura 1.9 se muestra su símbolo y curvas v-i. Al igual que el BJT, puede funcionar en tres zonas distintas: corte, saturación y lineal, aunque en su funcionamiento como interruptor de potencia se utilizan únicamente las regiones de corte y saturación.

En la tabla 1.5 se resumen las características más sobresalientes de un MOSFET desde el punto de vista de utilización.

Tabla 1.5. Características funcionales básicas de un MOSFET.

Parámetros	Valor
Número de terminales	3
Control de la conmutación de bloqueo a conducción	Externo mediante una tensión aplicada al terminal de puerta (G)
Control de la conmutación de conducción a bloqueo	Externo mediante una tensión aplicada al terminal de puerta (G)

1.2.6 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Se trata también de un dispositivo de tres terminales, con capacidad de control externo. El IGBT se desarrolló con la idea de aprovechar simultáneamente las ventajas de la baja resistencia de conducción de los BJT y la elevada velocidad de conmutación de los MOSFET. Se trata de un dispositivo controlado por tensión, con una elevada capacidad dV_{CE} / dt que le permite funcionar sin snubber. Los snubber son supresores o circuitos de ayuda a la conmutación en transistores. Estos constituyen una parte esencial en muchos de los circuitos electrónicos de potencia. Básicamente se les puede considerar como un conjunto de componentes (pasivos y/o activos) que se incorporan al circuito de potencia para reducir en el dispositivo semiconductor el estrés eléctrico durante las conmutaciones y asegurar un régimen de trabajo seguro.

Los IGBT, presentan además, un coeficiente de temperatura positivo que los hace adecuados para funcionar en paralelo, ya que al sufrir una sobrecarga aumentan su resistencia de conducción reduciendo su carga[4-7]. Su símbolo y las curvas v-i que representan los estados de bloqueo y conducción se representan en la figura 1.10. En este dispositivo, se utiliza la tensión entre puerta y emisor para controlar el estado de funcionamiento.

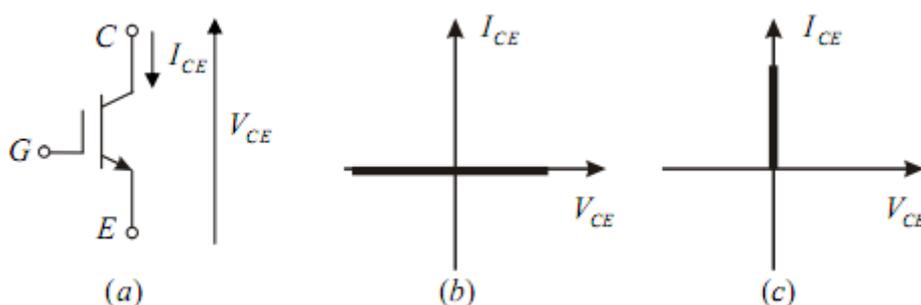


Figura 1.10. Símbolo y curvas v-i de un IGBT.

Si el dispositivo se encuentra bloqueado, la curva v-i sigue la ley descrita por la figura 1.10b. En este caso, la intensidad colector-emisor es nula, y por tanto el dispositivo se comporta como un circuito abierto. Cuando se aplica una tensión positiva entre puerta y emisor el dispositivo pasa al estado de conducción permitiendo el paso de corriente en el sentido colector emisor. Desde el punto de vista comercial, es posible encontrar en el mercado IGBT que soportan

intensidades de 1200 A y tensiones en estado de bloqueo de 3,3 kV. Actualmente existen IGBT que integran un driver de control capaz de desactivar el dispositivo si se produce una situación de sobrecarga o cortocircuito[3].

1.3 Estudio de los convertidores CC/CA o inversores

Para que un convertidor de energía funcione como inversor, debe transferir potencia desde un bus DC, hasta una carga AC[2]. A la implementación circuital de este equipo se le denomina inversor y en ciertas aplicaciones donde trabaja en régimen oscilatorio se lo llama ondulator.

Estos pueden ser monofásicos o trifásicos y a su vez autónomos o no autónomos, y todos trabajan en conmutación, es decir que los semiconductores operan en corte y saturación.

La denominación de autónomo implica que son inversores cuya tensión y frecuencia de salida son propios y no están regidas por otras fuentes externas de energía, es decir que dichos parámetros son generados acorde al diseño adoptado y son los que entregan a la carga. Todos los inversores autónomos alimentados con fuente de tensión DC necesitan de diodos de recuperación de energía reactiva. Se diferencian de los inversores no autónomos en que estos no tienen una tensión y frecuencia propia, debido a que no operan en forma independiente, sino que trabajan interconectados con una red de energía eléctrica (que de hecho es de tensión senoidal y normalmente trifásica), es decir, trabajan en paralelo para alimentar a las cargas conectadas a dicha red[2].

1.4 Topologías de Inversores de potencia

Los inversores no son más que convertidores estáticos de energía que convierten la corriente continua CC en corriente alterna CA, con la posibilidad de alimentar una carga en alterna, regulando la tensión, la frecuencia o bien ambas, como ya se había explicado con anterioridad. Más concretamente, los inversores transfieren potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna.

Desde el punto de vista práctico, son varias las aplicaciones típicas que pueden tener los inversores de potencia, como son:

-Accionamientos de motores de CA de velocidad ajustable.

- Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).
- Dispositivos de corriente alterna que funcionan a partir de una batería.
- Hornos de inducción.

En cuanto a configuración se refiere, suelen distinguirse tres configuraciones de inversores que corresponden a las tres maneras más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente suministrada por la fuente de CC con los medios disponibles. A continuación se explican cada una de ellas[1, 2].

1.4.1 Inversor push-pull

La topología “push-pull” se basa en el empleo de un transformador con toma intermedia como se observa en la figura 1.11 de manera que con únicamente dos interruptores se consigue aplicar a la carga tensiones desde el valor positivo de la fuente de CC hasta el mismo valor de polaridad contraria[8]. Debe tenerse en cuenta la relación de espiras entre cada uno de los primarios (considerando que está en medio puente) y el secundario del transformador.

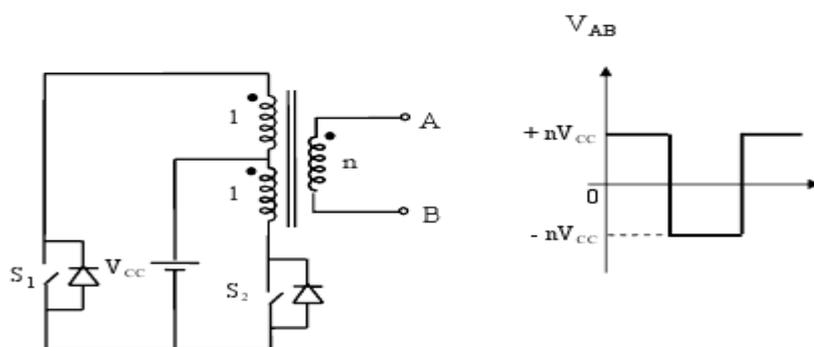


Figura 1.11. Inversor push-pull.

El principio de funcionamiento de la configuración push-pull (transformador con toma intermedia) se explica a continuación. Según se observa en la figura 1.11: la fuente de CD está representada por una batería de tensión V_s . El polo positivo está permanentemente conectado a la toma media de un transformador que se considera ideal (intensidad magnetizante nula, resistencia de los devanados nula, inductancia de dispersión nula). El polo negativo de la batería, que se toma de referencia de tensiones para el circuito asociado al primario, se conecta alternativamente a los extremos A y B del primario mediante los interruptores S_1 e S_2 .

Los interruptores están sometidos a una tensión $2V_{CC}$ cuando están en abierto. Los circuitos reales con transistores o tiristores someten por tanto a estos dispositivos a picos de tensión todavía mayores a $2V_{CC}$ debido a las inevitables oscilaciones que tienen lugar en las conmutaciones. Por dicha razón esta configuración no es adecuada para trabajar con tensiones de alimentación altas. El transformador de toma intermedia tiene un grado de utilización bajo en el primario y empeora bastante el rendimiento en los circuitos prácticos, por lo que no es aconsejable emplear esta configuración para potencias superiores a 10KVA. La tensión resultante en la salida es una onda cuadrada de amplitud V_{CC} independiente de la intensidad para cualquier tipo de carga, cuya frecuencia está determinada por la velocidad de cierre y apertura de los interruptores, y en los circuitos prácticos por la frecuencia de los impulsos de excitación de los semiconductores. La intensidad de batería en este circuito es perfectamente continua e igual a V_s/R [9].

A continuación, se pueden observar algunas de las ventajas e inconvenientes que presenta esta configuración[8, 10].

Tabla 1.6. Ventajas e inconveniente de una topología push-pull.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> -Solo se emplean dos interruptores de potencia. -Elementos de conmutación referidos a masa, por lo que su disparo resulta sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Los interruptores deben soportar el doble de la tensión del bus de continua. -Se generan sobretensiones debido a la inductancia de dispersión del transformador. -$P < 1KW$

1.4.2 Inversor de medio puente

La topología de Medio Puente[11] o Half Bridge se basa en generar una tensión intermedia a través de una batería y un par de condensadores como se muestra en la figura 1.12 o bien con una batería en medio puente. Esta topología aplicará a la carga una tensión máxima de la mitad del valor de tensión del bus de CD.[8]

Los interruptores (que representan algún dispositivo semiconductor de potencia) deben soportar la tensión total, es decir, la suma de ambas fuentes.

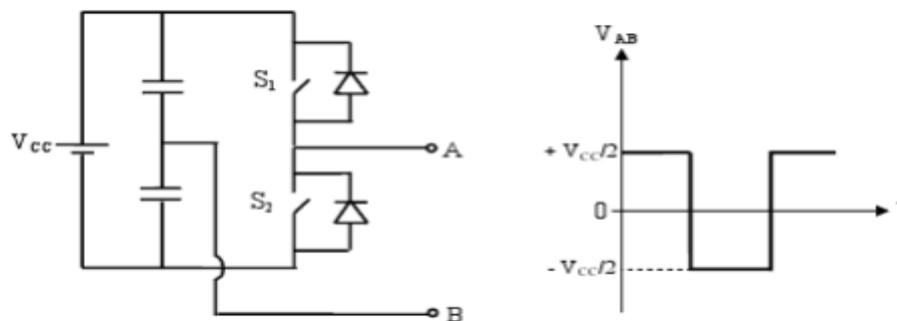


Figura 1.12. Inversor en medio puente

En esta topología los interruptores soportaran V_{CC} en lugar de $2V_{CC}$, pero solo aplican $V_{CC}/2$ al enrollado primario.

Durante los semiperíodos en que S_1 está excitado y saturado, la tensión en el extremo A de la carga es $+V_{CC}/2$ respecto de la toma media de la batería, salvo caídas de tensión despreciables en el semiconductor. Durante los semiperíodos en que se excita S_2 , la tensión en dicho extremo de la carga es $-V_{CC}/2$. La tensión resultante en la carga es una onda cuadrada de amplitud $V_{CC}/2$.

Esta configuración es más adecuada para tensiones altas de la fuente C.C. que la configuración de transformador con toma intermedia (push-pull), pero tiene el inconveniente de que la tensión en la carga es sólo la mitad de la que hay en la batería[9].

En la tabla 1.7 se pueden observar algunas de las ventajas e inconvenientes que presenta[8, 10].

Tabla 1.7. Ventajas e inconveniente de una topología medio puente.

Ventajas	Inconvenientes
-Solo se emplean dos interruptores de potencia.	-Los interruptores deben soportar el doble de la tensión aplicada a la carga. - S_1 no está referido a masa por lo que es necesario emplear algún tipo de circuito d disparo que permita aplicar una tensión flotante. -Mala utilización del bus de CD, ya que la tensión de salida máxima es la mitad de la tensión del bus de CD.

1.4.3 Inversor de puente completo

La topología “Puente completo” está formada por cuatro interruptores de potencia totalmente controlados, típicamente transistores MOSFET o IGBTs, tal y como se muestra en la siguiente figura 1.13[11].

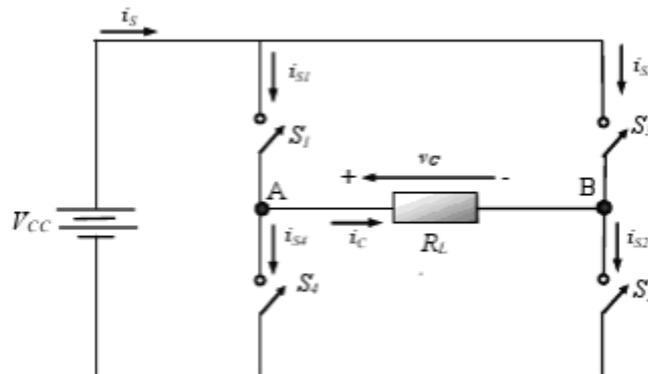


Figura 1.13. Inversor en puente completo.

Del análisis del inversor en puente completo se puede deducir el funcionamiento de los dos anteriores (“push-pull” y medio puente).

La tensión de salida V_c puede ser $+V_{cc}$, $-V_{cc}$, ó 0, según el estado de los interruptores[12]. La siguiente tabla muestra la tensión de salida obtenida al cerrar cada una de las parejas de interruptores.

Tabla 1.8. Tensión e salida según el estado de los interruptores.

Interruptores Cerrados	Tensión de Salida V_c
S_1 y S_2	$+V_{cc}$
S_3 y S_4	$-V_{cc}$
S_1 y S_3	0
S_2 y S_4	0

Como puede observarse, las parejas de interruptores S_1 , S_4 y S_2 , S_3 no deberían estar cerrados al mismo tiempo, con vistas a evitar un cortocircuito en la fuente de corriente continua.

De modo que, manteniendo excitados S_1 y S_2 , el extremo A de la carga queda conectado al polo positivo de la batería y el extremo B al polo negativo, quedando la carga sometida a la tensión V_{cc} de la batería. Bloqueando S_1 y S_2 y excitando S_3 y S_4 , la tensión en la carga se invierte. Haciendo esto de forma alternativa, la carga queda sometida a una tensión alterna cuadrada de amplitud igual a la tensión de la batería V_{cc} , lo cual supone una ventaja con respecto al inversor con batería de toma intermedia.

Puesto que los interruptores reales no se abren y se cierran instantáneamente, deberán tenerse en cuenta los tiempos de conmutación al diseñar el control de los interruptores.

El tiempo permitido para la conmutación se denomina tiempo muerto (“blanking time”)[1]. Para obtener una tensión de salida V_c igual a cero se pueden cerrar al mismo tiempo los interruptores S_1 y S_3 o bien S_2 y S_4 tal como se plasma en la tabla 1.8.

Otra forma de obtener una tensión nula a la salida sería eliminando las señales de control en los interruptores, es decir, manteniendo abiertos todos los interruptores[1]. Esta topología incorpora ventajas e inconvenientes de las dos topologías anteriores.

En la tabla mostrada a continuación se han recopilado algunas de las ventajas e inconvenientes que presenta esta topología[8, 10].

Tabla 1.9. Ventajas e inconvenientes de una topología Puente Completo.

Ventajas	Inconvenientes
<p>-La tensión aplicada en la carga es la tensión de la fuente salvo continua (salvo polaridad).</p> <p>-Se puede aplicar a la carga $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ y $0V$.</p> <p>-Mejor utilización del bus DC. Ya que la tensión máxima de salida es la tensión del bus de CD.</p> <p>-La tensión que deben soportar los interruptores es el valor de la fuente de continua.</p>	<p>-Se duplica el número de interruptores con respecto a topologías anteriores.</p> <p>-Dos de los interruptores no están referidos a masa, por lo que serán necesarios circuitos de disparo que permitan aplicar una tensión flotante.</p>

No cabe duda que el principal inconveniente es la complejidad, pero al trabajar con altas potencias, las ventajas cobran mayor importancia que los inconvenientes. Por tanto, esta es la topología empleada para altas potencias.

Como se ha visto, en todos los inversores, si la carga es resistiva pura, la forma de onda de corriente es la misma que la de tensión, con la escala correspondiente. Sin embargo, cuando la carga dispone de componentes reactivas, la intensidad estará desfasada positiva o negativamente frente a la tensión. En los intervalos en los que la corriente y tensión no coincidan en signo, los interruptores se cortarían necesitando la incorporación de diodos en antiparalelo, para posibilitar un conmutador bidireccional en corriente[9].

1.5 Configuraciones Trifásicas

Los inversores trifásicos se utilizan en aplicaciones de mayor potencia, pudiendo estar formados por tres inversores monofásicos independientes conectados a la misma fuente, lo cual se muestra en la figura 1.14. La única exigencia será el desfase de 120° de las señales de disparo de cada inversor con respecto a los demás, para conseguir una tensión equilibrada a la salida[2].

Las tres señales alternas que se obtienen de manera independiente en cada inversor, pueden ser conectadas al primario de un transformador trifásico dejando la conexión de sus secundarios en configuración delta o estrella en función de la carga. Este montaje requiere tres transformadores monofásicos, doce transistores y doce diodos.

Si las tensiones de salida de los inversores monofásicos no están perfectamente equilibradas en magnitud y fase, la salida del sistema estará descompensada.

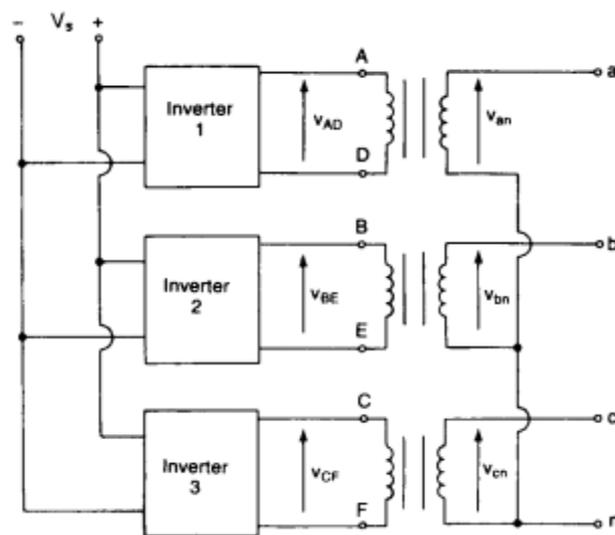


Figura 1.14. Inversor trifásico formado por tres inversores monofásicos.

Los inversores trifásicos se emplean en la alimentación de cargas trifásicas. De este modo, aplicaciones como fuentes ininterrumpidas de tensión alterna trifásica, accionamientos de motores de corriente alterna trifásicos y conexión de fuentes que producen energía en continua con las cargas trifásicas, usan este tipo de inversores[1]. Se puede obtener otra configuración de inversor, en la que se reduzcan el número de semiconductores a utilizar. En la figura 1.15 se muestra el inversor trifásico empleado con mayor frecuencia.

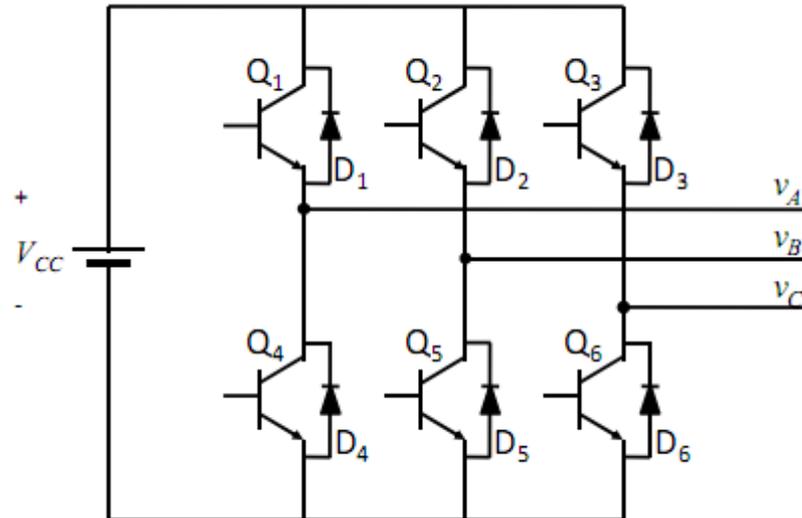


Figura 1.15. Inversor trifásico de dos niveles.

Este convertidor se conoce como inversor trifásico en dos niveles puesto que cada uno de sus terminales del lado AC puede alcanzar los dos extremos de tensión V_{cc} y $-V_{cc}$.

Los lados de continua de los convertidores en medio puente están conectados en paralelo con una fuente de continua común, mientras que el lado de alterna de cada uno de los convertidores está relacionado con una fase de un sistema trifásico.

En electrónica de potencia los componentes electrónicos suelen funcionar en conmutación para evitar el calentamiento excesivo del silicio, por lo que siempre se encontrarán en estado de conducción o de bloqueo.

De esta forma, la carga conectada a la salida del inversor recibe una tensión en forma de pulsos. Controlando los instantes de entrada en conducción y apertura de los interruptores es posible reproducir en la carga una forma de onda determinada, como por ejemplo una tensión senoidal.

En el inversor trifásico propuesto hay seis células de conmutación (seis interruptores de potencia: Q1 a Q6), y seis diodos de libre circulación (D1 a D6), colocados en antiparalelo con los interruptores y que se encargan de garantizar la continuidad de la corriente en la carga además de permitir la reversibilidad de la potencia al permitir inyectar corriente desde la carga a la batería de continua[1]. Cada una de las ramas del inversor está formada por dos

interruptores en paralelo con los diodos de libre circulación, estando la salida de cada fase en el punto medio de la rama.

Las señales de control de los interruptores de cada rama deben ser complementarias para evitar que se cortocircuite la fuente V_{CC} . Por otro lado, como ya se ha mencionado al hablar de sistemas monofásicos, es necesario tener en cuenta que los interruptores necesitan un tiempo denominado tiempo muerto, tanto para realizar la apertura como para el cierre, por lo que, antes de cerrar un interruptor para permitir el paso de corriente, es necesario esperar este tiempo muerto para que el interruptor complementario haya tenido tiempo suficiente para abrirse y no se produzca un cortocircuito en la fuente[1].

En la figura 1.16 se muestran las diferentes combinaciones posibles, donde puede apreciarse que en el primer estado y en el último las tensiones son nulas, por lo que estos estados se conocen como estados de libre circulación.

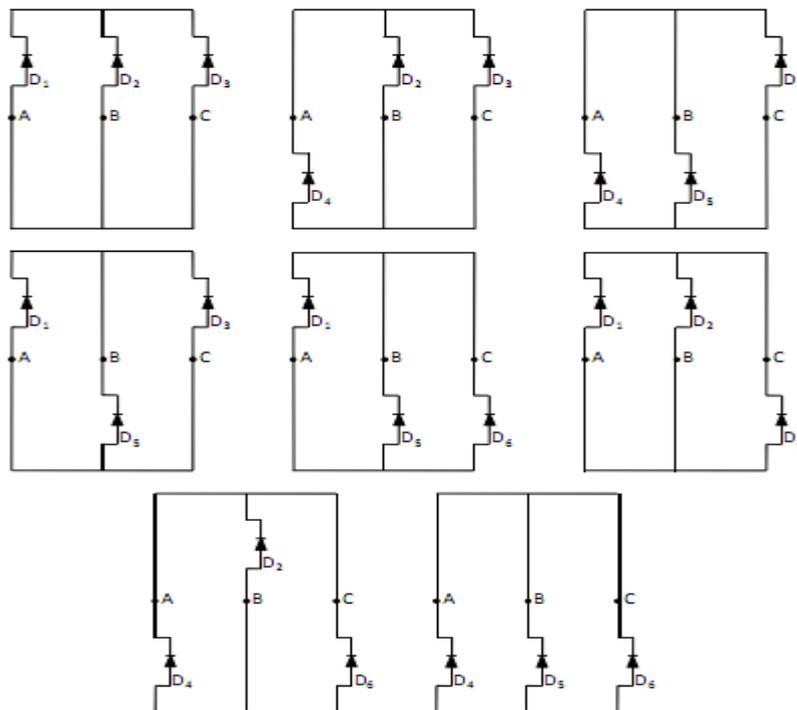


Figura 1.16. Configuraciones del inversor en función del estado de los interruptores.

El funcionamiento de este inversor trifásico se caracteriza por dos modos distintos en función del intervalo de conducción de cada interruptor.

1.6 Inversores Multinivel

Los inversores multinivel son una clase de inversores en que una fuente de CD tiene varias posiciones entre el terminal positivo y negativo. Las dos principales ventajas de este tipo de inversores son la mayor capacidad de voltaje y la reducción de armónicos presentados en la onda de salida, debido a los múltiples niveles de CD. La mayor capacidad de voltaje es debido al hecho de que se usan diodos para limitar el voltaje sobre los IGBTs al voltaje diferencial entre dos posiciones en el nodo de CD. La figura 1.17 muestra la topología de un inversor de tres niveles.

La salida de cada fase se puede conectar al nodo positivo de CD, la conexión central de la fuente de CD o el nodo negativo de CD. Esto significa tres niveles de voltaje diferentes para la tensión de cada fase, que explica el nombre del circuito. El voltaje línea-línea resultante tiene cinco diferentes niveles en un inversor trifásico[13].

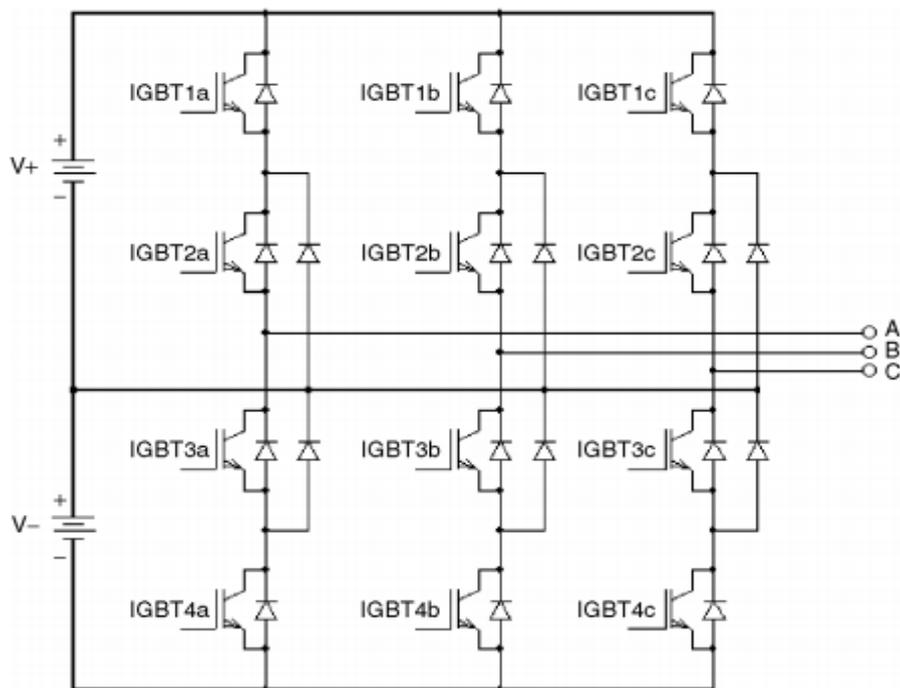
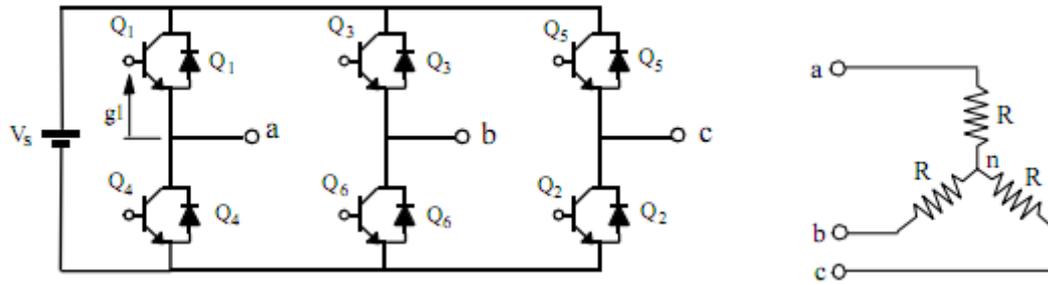


Figura 1.17. Inversor multinivel.

1.7 Tipos de conducción en los inversores trifásicos

A partir de la figura 1.18 se explicará el funcionamiento de los tipos de conducción que se pueden presentar en los inversores trifásicos, considerando una carga conectada en estrella.



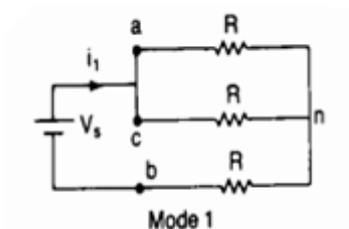
(a)

(b)

Figura 1.18 a) Inversor trifásico; b) Carga en estrella

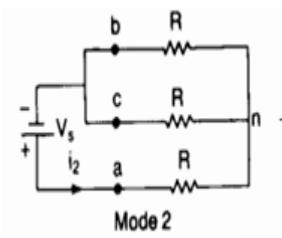
A - 180° grados de conducción

Cada interruptor conduce 180° , de forma que siempre existirán tres transistores conduciendo simultáneamente. Las terminales a, b, c, estarán o conectados al borne positivo de la batería de entrada o al terminal negativo de la misma. De la secuencia de disparo (123, 234, 345, 456, 561,...) se obtendrán 6 intervalos de funcionamiento distintos, agrupados en 3 modos:



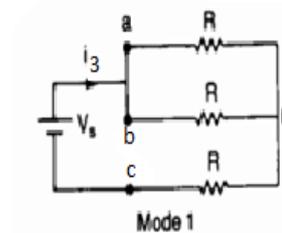
$$0 \leq \omega t \leq \pi/3 \Rightarrow R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3 \cdot R}{2}, i_1 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2 \cdot V_s}{3 \cdot R}$$

$$v_{an} = v_{cn} = i_1 \cdot \frac{R}{2} = \frac{V_s}{3}, v_{bn} = -i_1 \cdot R = \frac{-2 \cdot V_s}{3}$$



$$\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3 \Rightarrow R_{eq} = \frac{3 \cdot R}{2}, i_2 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2 \cdot V_s}{3 \cdot R}$$

$$v_{bc} = v_{ca} = -i_2 \cdot \frac{R}{2} = \frac{-V_s}{3}, v_{ab} = i_2 \cdot R = \frac{2 \cdot V_s}{3}$$



$$2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi \Rightarrow R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3 \cdot R}{2}, i_3 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2 \cdot V_s}{3 \cdot R}$$

$$v_{ca} = v_{bc} = i_3 \cdot \frac{R}{2} = \frac{V_s}{3}, v_{ab} = -i_3 \cdot R = \frac{-2 \cdot V_s}{3}$$

Para caracterizar la calidad de la señal alterna obtenida podemos expresar la tensión entre dos fases como:

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \quad (1.1)$$

Las demás tensiones se obtienen desfasando V_{ab} 120° y 240°

$$V_{bc} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin\left(n\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (1.2)$$

$$V_{ca} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin\left(n\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)\right) \quad (1.3)$$

La tensión rms entre dos fases se puede expresar como:

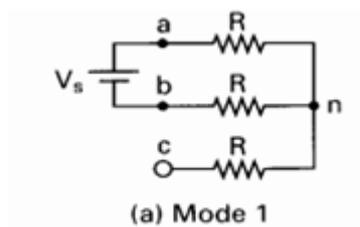
$$V_L = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} V_S^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_s = 0.8165 V_s \quad (1.4)$$

Dada la conexión de la carga en estrella el valor rms de la tensión de una fase a neutro (V_p) será $V_L/\sqrt{3} = 0.47V_s$.

B - 120° grados de conducción

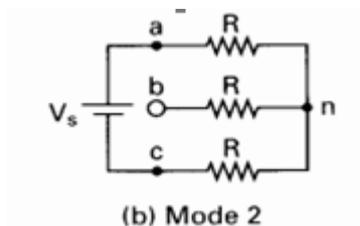
Cada interruptor conduce 120° , de forma que siempre existirán dos transistores conduciendo simultáneamente. De la secuencia de disparo (12, 23, 34, 45, 56, 61, ...) se obtendrán 3 intervalos de funcionamiento distintos, en un semiciclo de la tensión de salida:

A continuación, se muestran los intervalos de funcionamiento para cada caso.



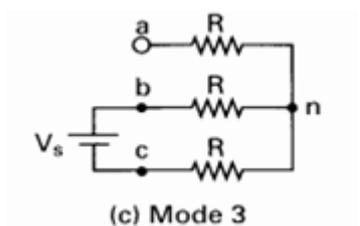
$$0 \leq \omega t \leq \pi/3$$

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



$$\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$$

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



$$2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$$

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

Las tensiones de fase a neutro pueden ser expresadas en serie de Fourier como:

$$V_{an} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \operatorname{sen}\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \quad (1.5)$$

$$V_{bn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \operatorname{sen}\left(n\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (1.6)$$

$$V_{cn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \operatorname{sen}\left(n\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)\right) \quad (1.7)$$

Siendo las tensiones entre fases $\sqrt{3}$ veces la de fase a neutro con un adelanto de 30° .

La tensión de línea presenta un adelanto de fase de 30° , por tanto, hay un retardo de $\pi/6$ entre el corte de Q1 y la conducción de Q4. De esta forma, se evita que la fuente de continua se cortocircuite al pasar de un modo de operación a otro. La expresión para determinar el valor de la tensión de línea es

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_{an} \quad (1.8)$$

Durante cada modo de operación uno de los tres terminales está abierto y los otros dos conectados a la fuente de continua. La tensión del terminal abierto dependerá de las características de la carga y es impredecible[9].

1.8 Campos de aplicación de los inversores

En general los sistemas de potencia se utilizan para accionar cualquier dispositivo que necesite una entrada de energía eléctrica distinta a la que suministra la fuente de alimentación primaria.

Dentro de las aplicaciones más frecuentes de los convertidores CC/CA, que han sido objeto de estudio en esta investigación, se encuentran:

- Accionadores de motores de corriente alterna en todo tipo de aplicaciones industriales.
- Convertidores corrientes continua en alterna para fuentes no convencionales, tales como la fotovoltaica o eólica.
- Calentamiento por inducción.
- Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI)[9, 14].

1.9 Conclusiones parciales del capítulo

Dentro de los dispositivos semiconductores de potencia los más utilizados en el diseño de inversores son: MOSFET, diodos y transistores BJT.

En el capítulo se analizaron las distintas configuraciones de los inversores destacándose, entre otras cosas: características fundamentales, principio de operación, ventajas y desventajas de los mismos.

Capítulo 2. Implementación de prácticas de laboratorios

2.1. Introducción

Las asignaturas relacionadas con la enseñanza de la electrónica suelen tener una parte de teoría y problemas y otra parte de prácticas obligatorias de laboratorio. Las prácticas son una parte importante de la docencia, y deben servir para que los alumnos aprendan destrezas y problemáticas que sólo aparecen en los laboratorios, pero también, deben servir como refuerzo de los contenidos enseñados en las clases de aula (tanto teóricas como de problemas)[15].

Los laboratorios han sido utilizados como un mecanismo de enseñanza-aprendizaje, un puente entre la teoría y la práctica real, la cual permite una mejor apropiación del conocimiento ya que estimula la interacción con un entorno real, que permite corroborar las teorías y modelos aprendidos durante el recorrer de los cursos. Dentro de los objetivos de la formación profesional en el campo de la ingeniería debe estar el permitir a los estudiantes desde las primeras etapas, experimentar la ciencia de tal manera que les de la capacidad de una activa construcción de ideas y de explicaciones que conlleve al aumento de las oportunidades para desarrollar, aprovechar y generar nuevas tecnologías.

En las últimas décadas se han realizado investigaciones sobre las prácticas de laboratorio, que permiten renovar los trabajos prácticos tradicionales; generando un amplio consenso en torno a la orientación del trabajo experimental como una actividad investigativa que juega un papel primordial en la familiarización de los estudiantes con la metodología científica [16].

2.2 Desarrollo de las prácticas de laboratorio

La práctica de laboratorio consiste en el montaje de un inversor DC/AC Switch. Este presenta una elevada eficiencia, bajo costo y portabilidad y ha desplazado a sus predecesores basados en osciladores a 60Hz y transformadores con núcleo de hierro lo que los hacían grandes, pesados y poco eficientes.

Además, este nuevo inversor en su modelo más discreto es capaz de entregar una potencia de hasta 300W con una eficiencia envidiable.

El mismo basa su funcionamiento en tres circuitos fundamentales:

- 1- Inversor DC-DC de alta frecuencia (40KHz).
- 2- Inversor DC-AC de baja frecuencia (60Hz).
- 3- Circuito de supervisión.

A continuación se explica el funcionamiento de los tres circuitos.

2.3. Inversor DC-DC de alta frecuencia

Esta parte del circuito está formada por un inversor tipo Push-Pull utilizando como componentes principales, MOSFET IRFZ44 o similares, gobernados por un modulador de ancho de pulso (PWM SG3525) que opera a una frecuencia de 40KHz. Además, cuenta con un transformador de ferrita, una cuarteta de diodos rectificadores de alta velocidad de conmutación y su respectivo capacitor de filtrado.

El propósito de este circuito es elevar el voltaje de entrada proveniente de una batería de 12V de CD a 150V de CD. En la figura 2.1 se muestra el circuito correspondiente al inversor DC-DC de alta frecuencia.

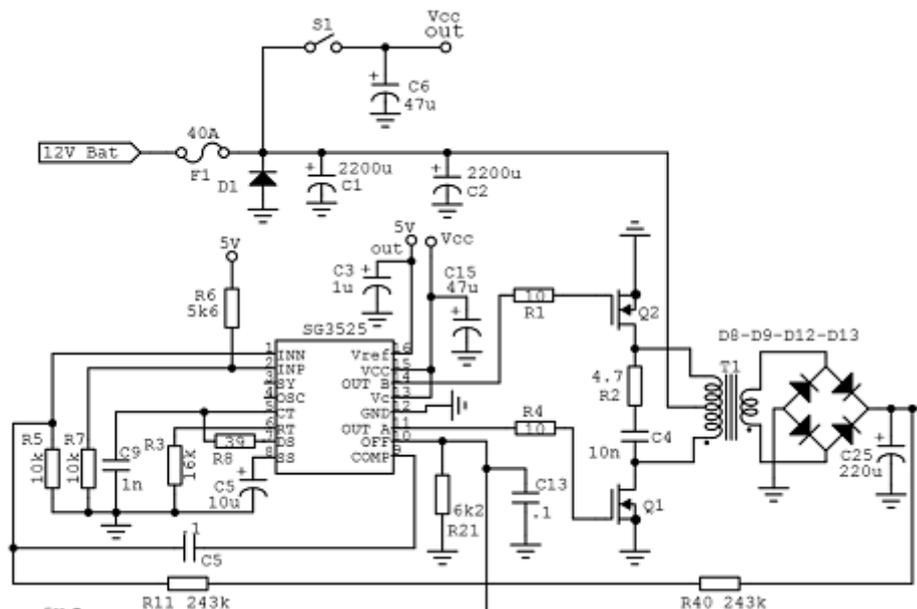


Figura 2.1 Inversor DC-DC de alta frecuencia.

Funcionamiento:

El pin 1 del IC SG 3525 es la entrada inversora del operacional que trabaja con el PWM de la pastilla, ahí se recoge una muestra del voltaje de salida (150V) a través de la resistencia R40, R11 y R5. Ese valor de voltaje es comparado con el valor de voltaje fijado en el pin2 que es la entrada no inversora del operacional del PWM. En este pin se fija un voltaje a través de la resistencia R6 y R7, el cual proviene del voltaje de referencia ($V_{ref} = 5V$) del integrado presente en el pin 16. Si el V_{ref} del pin1 es inferior al detectado en el pin2, este aumenta su ancho de pulso para corregir esa pérdida de tensión y cuando ocurre lo contrario, el integrado estrecha su ancho de pulso para contrarrestar esa subida de voltaje. Variando los dos divisores que forman R6-R10 y R5-R11-R40 se puede regular el voltaje de salida del inversor.

El pin5 y pin6 se utilizan para conectar el capacitor C9 y la resistencia R3 que son los que fijan la frecuencia de trabajo del oscilador del integrado, que no va a ser la misma que su frecuencia de salida debido a que tiene un flip-flop interno que divide por dos esa frecuencia. Si se mide en el pin4 (no es necesario su utilización) se obtiene un valor del doble de frecuencia que lo que se tiene a su salida.

En el pin8 se coloca un capacitor C5 que es para lograr que el integrado no vaya de cero a su máximo valor en un instante, sino, que va a ir aumentando para la lograr un arranque lento.

El pin15 es para el voltaje de alimentación del integrado (V_{cc}), que viene a través del interruptor S1. A través de ese interruptor se puede echar a andar el oscilador del SG3525 y como tal el inversor.

El pin 14 y el pin11 son las salidas de la señal PWM a la frecuencia de 40Khz idénticas pero desfasadas 180° debido a que es para el trabajo de un push-pull. Son acoplados Q1 y Q2 de la etapa de potencia del push-pull a través de las resistencias R4 y R1.

El pin 13 alimenta los colectores de los drivers internos del IC SG 3525 que va conectado a V_{cc} .

El pin12 es la tierra y el pin10 es el apagado (shutdown) que es donde trabajan todas las protecciones del inversor. Al colocar un voltaje aquí superior a 2,5V automáticamente el oscilador del IC SG3525 se bloquea y pone a cero las dos salidas.

El capacitor de compensación va de la entrada inversora del operacional de muestreo al pin9 que es la salida como tal del operacional.

El push-pull, los transistores Q1-Q2 y el transformador T1 alimentan a la salida la cuarteta de diodos rectificadores y el capacitor de rectificación, donde el voltaje fijado va a ser de 150V a la salida del push-pull.

2.4 Inversor DC-AC de baja frecuencia

Este inversor se basa en un diseño de puente H o puente completo (full bridge) el cual utiliza cuatro MOSFET tipo IRF640, un doble flip-flop CD4013 y un IC NE556 que no es más que dos temporizadores LM555 en un solo encapsulado. Uno de los temporizadores del IC 556 actúa como astable generando una frecuencia de 120Hz. Esta señal tiene como característica fundamental que el tiempo en que está a nivel lógico 1 es más alto que el que está en 0.

El segundo temporizador está configurado como monoestable el cual es disparado a través del pin 8 (trigger) por los pulsos negativos de la señal generada por el primer temporizador, poniendo a 1 su salida durante el tiempo que demore en cargarse el capacitor C10. Si se observa detenidamente esta parte del circuito (figura 2.2), se puede apreciar que dicho capacitor se encuentra colocado en un divisor resistivo que toma como muestra la salida de 150V DC del inversor de alta frecuencia, por lo que, de existir una demanda desde la carga que ocasione una pequeña caída de esta tensión, el capacitor demorará un poco más en cargarse y esto trae consigo que el pulso de salida del monoestable esté mayor tiempo a nivel 1 y viceversa. Si la carga colocada es menor, el voltaje de salida del inversor de alta frecuencia tiende a subir, el capacitor se cargará más rápidamente y el pulso de salida del monoestable tardará menos en nivel 1.

Este comportamiento del circuito hace que el mismo funcione como un modulador de ancho de pulso, regulando el tiempo en que conducen los

transistores del puente y manteniendo relativamente constante el voltaje a su salida independientemente del nivel de demanda de la carga.

Luego, esta señal es aplicada a las entradas de los dos flip-flop que conforman la CD4013 antes desfasada 180° por los transistores Q3 y Q4. Los flip-flop están configurados para trabajar como divisores por dos, es decir, a sus salidas se tiene una señal idéntica pero desfasada 180° una de la otra y con una frecuencia que sería la mitad de la señal original que se encuentra en sus entradas, en este caso 60Hz.

Posteriormente, esta señal es aplicada a la etapa de potencia formada por el puente H, donde su funcionamiento se basa en una premisa fundamental: NUNCA! los dos transistores que conforman un ramal del puente pueden conducir al mismo tiempo, esto formaría un cortocircuito fatal. Más adelante se explicara el principio de funcionamiento del Puente H.

Para ello cada banda del puente cuenta con un transistor que desfasa 180° la señal que se le aplica al canal (Q5 y Q11), permitiendo que solo uno de los transistores del mismo conduzca. Entonces, la corriente entregada a la carga parte de un transistor de un canal conectado a los 150 V DC, pasa por la carga y va a masa a través de otro transistor con surtidor a GND que está en el otro canal, sería entonces: de Q6 a Q8 en un semiciclo y de Q10 a Q9 en el otro semiciclo, en forma de X.

En la carga se obtiene entonces, una tensión aproximada de 150V CD / 1.41, es decir, unos 106V AC a 60Hz. Nótese que este voltaje puede variar por el ancho de pulso entregado por el monoestable. En este caso se tiene a la salida 120V AC. La figura 2.2 muestra el Inversor DC-AC de baja frecuencia.

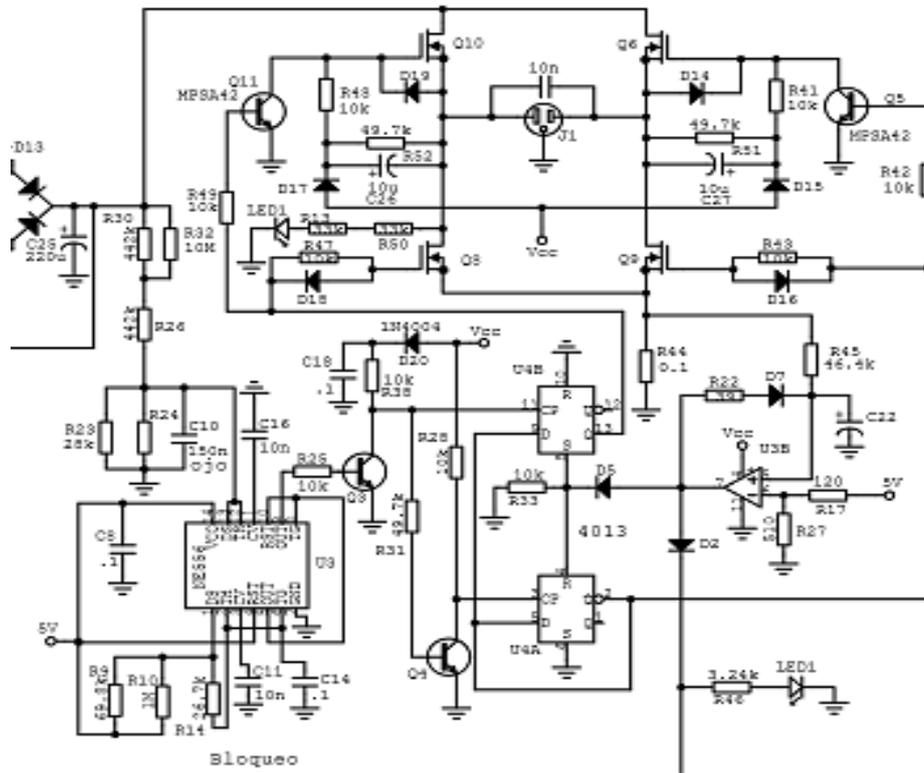


Figura 2.2 Inversor DC-AC de baja frecuencia

2.4.1. Puente H

La figura 2.3 representa la configuración del Puente H.

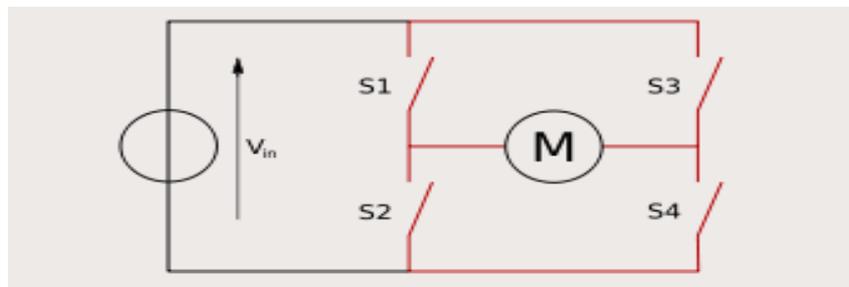


Figura 2.3 Representación del puente H con interruptores.

El puente H o puente en H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avanzar y retroceder. Los puentes H ya vienen implementados en algunos circuitos integrados, pero también se pueden construir a partir de componentes discretos. Un puente H se construye con 4 interruptores (mecánicos o mediante transistores). Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados (S2 y S3 abiertos) se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (cerrando S2

y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor. Un puente H se usa para invertir el giro de un motor, pero también se puede usar para frenarlo de manera brusca, al hacer un corto entre los bornes del motor, o incluso puede usarse para permitir que el motor frene bajo su propia inercia, cuando se desconecta el motor de la fuente que lo alimenta. Básicamente se puede hacer esto tomando en cuenta las Sn:

Tabla 2.1. Funcionamiento del motor al accionar los interruptores

S1	S2	S3	S4	Resultado
1	0	0	1	Avanza
0	1	1	0	Retrocede
0	0	0	0	Se detiene bajo inercia propia
1	0	1	0	Frenado brusco

La forma más común de hacer un puente H es utilizando interruptores de estado sólido (son llamados transistores), puesto que sus tiempos de vida y frecuencias de conmutación son mucho más altas. En convertidores de potencia es impensable usar interruptores mecánicos dado sus especificaciones. Además, los interruptores se acompañan de diodos que permitan a las corrientes circular en sentido inverso al previsto cada vez que se conmute la tensión puesto que el motor está compuesto por bobinados que durante varios períodos de tiempo se opondrán a que la corriente varíe [17].

2.5 Componentes del circuito

2.5.1 Resistencia



Figura 2.4. Resistencia

Una resistencia, o también llamado resistor, es un elemento que causa oposición al paso de la corriente, causando que en sus terminales aparezca una diferencia de tensión (un voltaje). La máxima cantidad de corriente que puede pasar por una resistencia, depende del tamaño de su cuerpo. Los valores de potencia comunes de las resistencias son: 1/4, 1/2, 1 Watt, aunque hay de valores mayores. El bombillo / foco que todos tenemos en nuestros hogares se comporta como una resistencia, pues limita el paso de la corriente y disipa calor, pero a diferencia del foco o bombillo, la resistencia no emite luz. Las resistencias se representan con la letra R y el valor de éstas se mide en Ohms (Ω).

Las resistencias o resistores se fabrican principalmente de carbón y se presentan en una amplia variedad de valores. Hay resistencias con valores de Ohms (Ω), Kiloohms ($K\Omega$) y Megohms ($M\Omega$). Estas dos últimas unidades se utilizan para representar resistencias muy grandes. A continuación, se pueden ver algunas equivalencias entre ellas:

- 1 Kiloohm ($K\Omega$) = 1,000 Ohms (Ω)
- 1 Megohm ($M\Omega$) = 1,000,000 Ohms (Ω)
- 1 Megohm ($M\Omega$) = 1,000 Kiloohms ($K\Omega$)

Para poder saber el valor de las resistencias sin tener que medirlas, existe un código de colores de las resistencias que permite obtener con facilidad su valor con sólo verlas. Por otra parte, para obtener la resistencia de cualquier elemento de un material específico, es necesario conocer algunos datos propios de éste, como son: su longitud, área transversal, resistencia específica o resistividad del material con que está fabricada [18].

2.5.2. Inductor

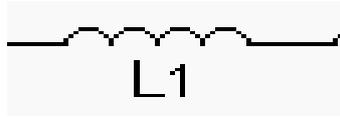


Figura 2.5. Inductor.

Un inductor, bobina o reactor es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético. El inductor está constituido normalmente por una bobina de conductor, típicamente alambre o hilo de cobre esmaltado. Existen inductores con núcleo de aire o con núcleo hecho de material ferroso (por ejemplo, acero magnético), para incrementar su capacidad de magnetismo.

Los inductores también pueden estar contruidos en circuitos integrados, usando el mismo proceso utilizado para realizar microprocesadores. En estos casos se usa, comúnmente, el aluminio como material conductor. Sin embargo, es raro que se construyan inductores dentro de los circuitos integrados; es mucho más práctico usar un circuito llamado "girador" que, mediante un amplificador operacional, hace que un condensador se comporte como si fuese un inductor.

También pueden fabricarse pequeños inductores, que se usan para frecuencias muy altas, con un conductor pasando a través de un cilindro de ferrita o granulado. La bobina o inductor es un elemento que reacciona contra los cambios en la corriente a través de él, generando un voltaje que se opone al voltaje aplicado y es proporcional al cambio de la corriente[19].

2.5.3 Capacitor Electrolítico



Figura 2.6. Capacitor Electrolítico

A diferencia de los capacitores comunes, los capacitores electrolíticos se han desarrollado para lograr grandes capacidades en dimensiones físicas reducidas.

Este capacitor se logra con un dieléctrico especial. La capacidad de un capacitor tiene la siguiente fórmula:

$$C = EA / d$$

Donde:

A = superficie

d = separación de placas

E = constante dieléctrica

Si el valor de la constante dieléctrica (E) aumenta, también aumenta la capacitancia del capacitor. Este dieléctrico es un electrolito constituido por óxido de aluminio impregnado en un papel absorbente. Cuando se fabrica el capacitor electrolítico, se arrollan dos láminas de aluminio, separadas por un papel absorbente impregnado con el electrolito. Después se hace circular una corriente entre las placas, con el propósito de provocar una reacción química que creará una capa de óxido de aluminio que será el dieléctrico (aislante). Físicamente consta de un tubo de aluminio cerrado, dentro del cual se haya el capacitor. Está provisto de una válvula de seguridad que se abre en caso de que que el electrolito (de allí viene el nombre) entre en ebullición, evitando el riesgo de explosión. El capacitor electrolítico es un elemento polarizado, por lo que sus terminales no pueden ser invertidos. Generalmente el signo de polaridad viene indicado en el cuerpo del capacitor.

El inconveniente que tienen estos capacitores es que el voltaje permitido entre sus terminales no es muy alto. Si fuera necesario cambiar este capacitor, se debe buscar uno de la misma capacidad y con un voltaje igual o mayor al del capacitor dañado. No se recomienda utilizar un capacitor de voltaje (dato de fábrica) muy superior al dañado pues, un capacitor que recibe un voltaje mucho menor que para el que fue diseñado, siente que no estuvo polarizado en corriente continua y la capa de óxido de aluminio disminuye hasta que el elemento falla[20].

2.5.4 Condensador:



Figura 2.7. Condensador

En condensador eléctrico es un dispositivo formado por dos placas metálicas separadas por un aislante llamado dieléctrico (material aislante) que evita el paso de la corriente. El condensador eléctrico o capacitor eléctrico almacena energía en la forma de un campo eléctrico (es evidente cuando el capacitor funciona con corriente directa) y se llama capacitancia o capacidad a la cantidad de cargas eléctricas que es capaz de almacenar. La capacidad depende de las características físicas del condensador de manera que:

- Si el área de las placas que están frente a frente es grande la capacidad aumenta
- Si la separación entre placas aumenta, disminuye la capacidad
- El tipo de material dieléctrico que se aplica entre las placas también afecta la capacidad
- Si se aumenta la tensión aplicada, se aumenta la carga almacenada[21].

2.5.5 Diodo LED:

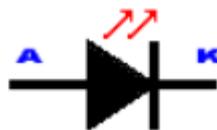


Figura 2.8. LED

Si alguna vez se ha observado, unas pequeñas luces de diferentes colores que se encienden y apagan en algún circuito electrónico, estos constituyen diodos

LED en funcionamiento. El LED es un tipo especial de diodo, que trabaja como un diodo común, pero que, al ser atravesado por la corriente eléctrica, emite luz. Existen diodos LED de varios colores que dependen del material con el cual fueron construidos. Los hay de color rojo, verde, amarillo, ámbar, infrarrojo, entre otros.

Eléctricamente el diodo LED se comporta igual que un diodo de silicio o germanio. Si se pasa una corriente a través del diodo semiconductor, se inyectan electrones y huecos en las regiones P y N, respectivamente. Dependiendo de la magnitud de la corriente, hay una recombinación de los portadores de carga (electrones y huecos). A este tipo de recombinación, y de aquí la emisión de luz, se le llama recombinación radiante.

Tabla 2.2 Color de los materiales dependiendo de la longitud de onda de emisión

Material	Longitud de onda de emisión en Angstroms(A°)	Color
GaAs:Zn	9100	Infrarrojo
GaAsP.4	6500	Rojo
GaAsP.5	6100	Ambar
GaAsP.85:N	5900	Amarillo
Ga:P	5600	Verde

La relación entre las recombinaciones radiantes y el total de recombinaciones depende del material semiconductor utilizado (GaAs, GaAsP, y GaP). Dependiendo del material de que está hecho el LED, será la emisión de la longitud de onda y por ende el color. Debe de escogerse bien la corriente que atraviesa el LED para obtener una buena intensidad luminosa y evitar que este se pueda dañar.

El LED tiene un voltaje de operación que va de 1.5V a 2.2V aproximadamente y la gama de corrientes que debe circular por él está entre los 10 y 20 miliamperes (mA) en los diodos de color rojo; y entre los 20 y 40 miliamperes (mA) para los

otros LEDs. Los diodos LED tienen enormes ventajas sobre las lámparas indicadoras comunes, tales como: su bajo consumo de energía, su mantenimiento casi nulo y una vida aproximada de 100,000 horas.

El diodo LED debe ser protegido. Una pequeña cantidad de corriente en sentido inverso no lo dañará, pero si hay picos inesperados puede dañarse. Una forma de protegerlo es colocar en paralelo con el diodo LED pero apuntando en sentido opuesto un diodo de silicio común. Este diodo, se utiliza ampliamente en aplicaciones visuales, como indicadoras de cierta situación específica de funcionamiento.

Ejemplos:

- Se utilizan para desplegar contadores.
- Para indicar la polaridad de una fuente de alimentación de corriente continua.
- Para indicar la actividad de una fuente de alimentación de corriente alterna.
- En dispositivos de alarma, etc.

La desventaja fundamental del diodo LED es que, su potencia de iluminación es tan baja, que su luz es invisible bajo una fuente de luz brillante y que su ángulo de visibilidad está entre los 30° y 60°. Este último problema se corrige con cubiertas difusoras de luz. Con los últimos adelantos, en los diodos LED de alta luminosidad, este problema prácticamente ha quedado en el pasado[22].

2.5.6. Diodo Zener



Figura 2.9. Diodo Zener

El diodo zener es un tipo especial de diodo, que siempre se utiliza polarizado inversamente. Recordar que los diodos comunes, como el diodo rectificador (en donde se aprovechan sus características de polarización directa y polarización inversa), conducen siempre en el sentido de la flecha. En este caso la corriente circula en contra de la flecha que representa el diodo.

- Si el diodo zener se polariza en sentido directo se comporta como un diodo rectificador común.
- Si el diodo zener funciona polarizado inversamente mantiene entre sus terminales un voltaje constante.

Analizando la curva del diodo zener se ve que conforme se va aumentando negativamente el voltaje aplicado al diodo, la corriente que pasa por él aumenta muy poco.

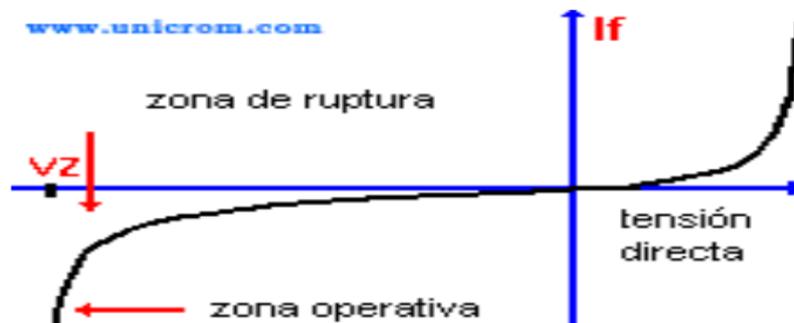


Figura 2.10. Comportamiento del Diodo Zener de acuerdo a una gráfica de tensión vs corriente

Luego, una vez que se llega a un determinado voltaje, llamado voltaje o tensión de Zener (V_z), el aumento del voltaje (siempre negativamente) es muy pequeño, pudiendo considerarse constante.

Para este voltaje, la corriente que atraviesa el diodo zener, puede variar en un gran rango de valores. A esta región se le denomina zona operativa. Esta es la característica del diodo zener que se aprovecha para que funcione como regulador de voltaje, pues el voltaje se mantiene prácticamente constante para una gran variación de corriente.

Un regulador con diodo zener ideal mantiene un voltaje predeterminado fijo a su salida, sin importar las variaciones de voltaje en la fuente de alimentación y/o las variaciones de corriente en la carga.

En las fuentes de voltaje ideales (algunas utilizan, entre otros elementos el diodo zener), el voltaje de salida no varía conforme varía la carga. Pero las fuentes no son ideales y lo normal es que el voltaje de salida disminuya conforme la carga va aumentando, o sea conforme la demanda de corriente de la carga aumente[23].

2.5.7. Timer SG3525

El circuito SG3525A / 3527^a, como se muestra en la figura 2.11, es un modulador de ancho de pulso de circuitos integrados que está diseñado para ofrecer un mejor rendimiento y disminución del recuento de partes externas cuando se utiliza en el diseño de todo tipo de fuentes de alimentación conmutadas. El +5,1 V de referencia en el chip se recorta a $\pm 1\%$ y la entrada común del amplificador de error incluye la eliminación de la tensión de referencia. Una entrada de sincronización para el oscilador permite que múltiples unidades puedan estar acoplados a una sola unidad para ser sincronizada con un reloj externo. Una sola resistencia entre el pin CT (figura 2.11) y los terminales de descarga proporcionan una amplia gama de tiempo muerto.

Estos dispositivos también disponen de propiedades en los circuitos de arranque suave con solamente un condensador de temporización externo requerido. A los controles de terminal apagado, la circuitería de arranque suave y las etapas de salida, así como de reciclaje de arranque suave con funciones de apagado y comandos.

También estos equipos están controlados por un bajo voltaje de bloqueo que mantiene las salidas desactivadas y el condensador de arranque suave se descargada para tensiones de entrada inferiores a las normales. Este circuito de bloqueo incluye aproximadamente 500 mV de histéresis en operación libre.

Otra característica de estos circuitos PWM es un pestillo después de la comparación. Una vez que se ha terminado por cualquier razón un pulso PWM, las salidas permanecerán apagados durante la duración del período. El pestillo se restablece con cada pulso de reloj. Las etapas de salida son diseños tótem

capaces de generar un hundimiento de más de 200 mA. La salida de la etapa SG3525A es baja para un estado. El SG3527 auto utiliza un cero lógico que se traduce en un alto nivel de salida [24].

PIN CONNECTIONS AND ORDERING NUMBERS (top view)

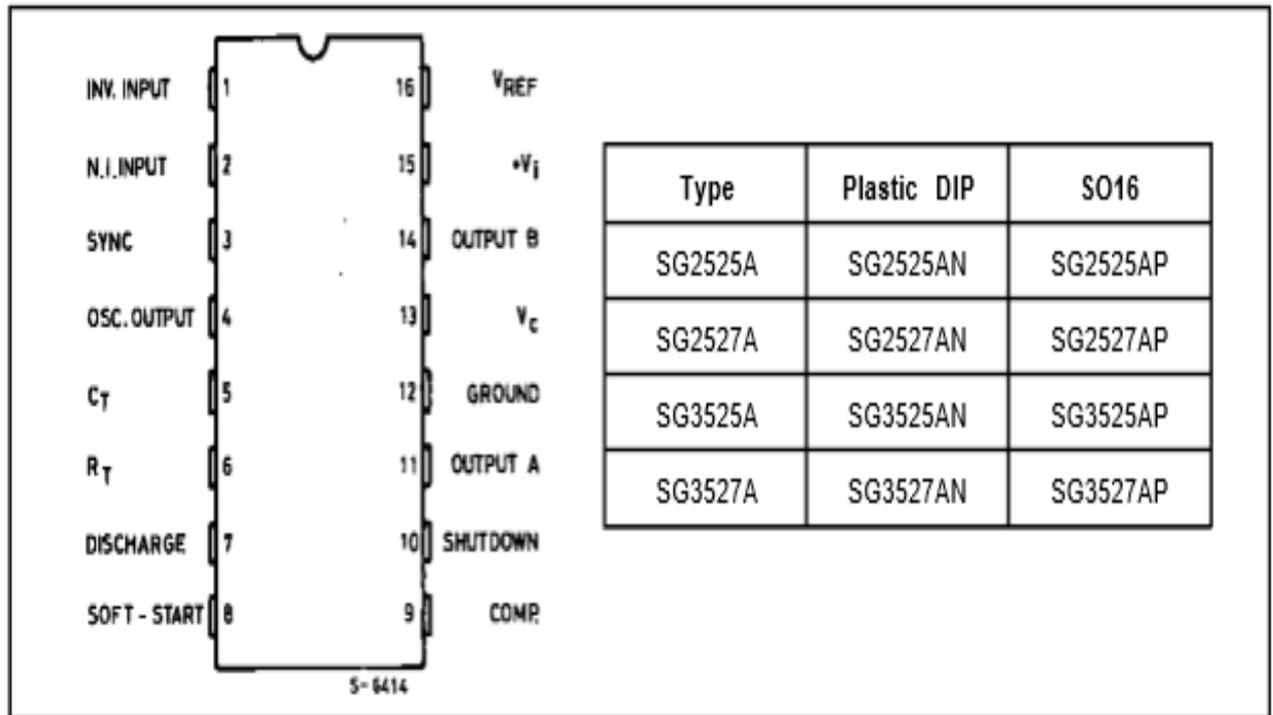


Figura 2.11. Pines del Timer SG3525

2.5.8 Timer 555

El temporizador IC 555 es un circuito integrado (chip) que se utiliza en la generación de temporizadores, pulsos y oscilaciones. El IC 555 puede ser utilizado para proporcionar retardos de tiempo, como un oscilador, y como un circuito integrado flip flop. Sus derivados proporcionan hasta cuatro circuitos de sincronización en un solo paquete. Fue introducido en 1971 por Signetics, y el IC 555 sigue siendo de uso generalizado debido a su facilidad de uso, precio bajo y la estabilidad. Muchas empresas los fabrican en versión de transistores bipolares y también en CMOS de baja potencia. A partir de 2003, se estimaba que mil millones de unidades se fabricaban cada año. Este circuito suele ser utilizado para trabajos sencillos como trabajos escolares, debido a su bajo costo y facilidad de trabajar con él[25]. A continuación, se muestra en la figura 2.12 su representación real y el modelo circuital del mismo.

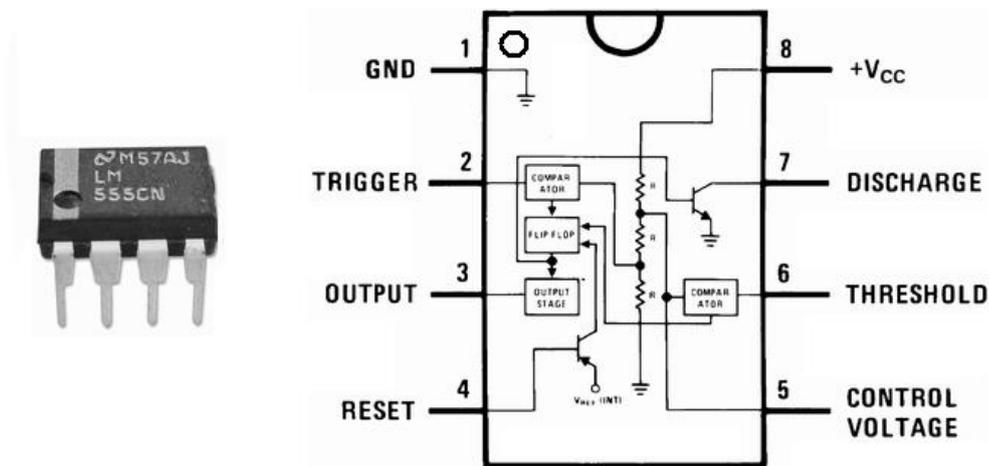


Figura 2.12. Pines del Timer 555

Este IC se alimenta de una fuente externa conectada entre sus terminales 8 y 1 (+Vcc y GND respectivamente); el voltaje de la fuente va desde los 5V hasta 15V de corriente continua, a su vez, la misma fuente se conecta a un circuito pasivo RC, que proporciona por medio de la descarga de su capacitor una señal de voltaje que está en función del tiempo, esta señal de tensión es de $1/3V_{cc}$ y se compara contra el voltaje aplicado externamente sobre el terminal 2 (TRIGGER) que es la entrada de un comparador.

El terminal 6 (THRESHOLD) se ofrece como la entrada de otro comparador, en la cual se compara a $2/3$ de V_{cc} contra la amplitud de señal externa que le sirve de disparo.

El terminal 5 (CONTROL VOLTAGE) se dispone para producir modulación por anchura de pulsos.

La descarga del condensador exterior se hace por medio del terminal 7 (DISCHARGE), donde se descarga cuando el transistor (NPN) T1, se encuentra en saturación. No obstante, se puede descargar prematuramente el capacitor por medio de la polarización del transistor (PNP) T2.

Se dispone de la base de T2 en el terminal 4 (RESET) del IC 555, si no se desea descargar antes de que se termine el periodo. En este caso, este terminal debe conectarse directamente a V_{cc} , logrando mantener cortado al transistor T2; de

otro modo se puede poner a cero la salida involuntariamente, aun cuando no se desee.

La salida está prevista en el terminal 3 del microcircuito y es además la salida de un amplificador de corriente (buffer). Este hecho le da más versatilidad al circuito de tiempo 555, ya que la corriente máxima que se puede obtener cuando el terminal 3 se conecta directamente al nivel de tierra es de 200 mA. La salida del comparador "A" y la salida del comparador "B" están conectadas al Reset y Set respectivamente. La salida del FF-SR actúa como señal de entrada para el amplificador de corriente (Buffer). Mientras que en el terminal 6 el nivel de tensión sea más pequeño que el nivel de voltaje contra el que se compara la entrada Reset del FF-SR no se activará, por otra parte, mientras que el nivel de tensión presente en el terminal 2 sea más grande que el nivel de tensión contra el que se compara la entrada Set del FF-SR no se activará.

En General:

- GND (normalmente el 1): es el polo negativo de la alimentación, generalmente tierra (masa).
- Disparo (normalmente el 2): Es donde se establece el inicio del tiempo de retardo si el 555 es configurado como monoestable. Este proceso de disparo ocurre cuando esta patilla tiene menos de $1/3$ del voltaje de alimentación. Este pulso debe ser de corta duración, pues si se mantiene bajo por mucho tiempo la salida se quedará en alto hasta que la entrada de disparo pase a alto otra vez.
- Salida (normalmente el 3): A través de él se observa el resultado de la operación del temporizador, ya sea que esté conectado como monoestable, estable u otro. Cuando la salida es alta, el voltaje será el voltaje de alimentación (V_{cc}) menos 1.7 V. Esta salida se puede obligar a estar en casi 0V con la ayuda de la patilla de reinicio.
- Reinicio (normalmente el 4): Si se pone a un nivel por debajo de 0.7V, pone la patilla de salida a nivel bajo. Si por algún motivo esta patilla no se utiliza hay que conectarla a alimentación para evitar que el temporizador se reinicie.

- Control de voltaje (normalmente el 5): Cuando el temporizador se utiliza en el modo de controlador de voltaje, el voltaje en esta patilla puede variar casi desde V_{cc} (en la práctica como $V_{cc} - 1.7 \text{ V}$) hasta casi 0 V (aproximadamente 2 V menos). Así es posible modificar los tiempos. Puede también configurarse para generar pulsos en rampa.
- Umbral (normalmente el 6): Es una entrada a un comparador interno que se utiliza para poner la salida a nivel bajo.
- Descarga (normalmente el 7): Utilizado para descargar con efectividad el condensador externo manejado por el temporizador para su funcionamiento.
- Voltaje de alimentación (V_{CC}) (normalmente el 8): Es la patilla donde se conecta el voltaje de alimentación que va de 4.5 V hasta 16 V .

Timer 555 funcionando como circuito astable básico.

Si se usa en este modo el IC 555, su principal característica es una forma de onda rectangular a la salida, en la cual el ancho de la onda puede ser manejado con los valores de ciertos elementos en el diseño. Para esto se deben aplicar las siguientes expresiones:

$$T_A = 0.693 * (R_1 + R_2) * C_1 \quad T_B = 0.693 * (R_2 * C_1) \quad (2.1)$$

Donde:

T_A : tiempo del nivel alto de la señal.

T_B : tiempo del nivel bajo de la señal.

Estos tiempos dependen de los valores de R_1 y R_2 . Cabe recordar que, el periodo es $T = 1/f$. La frecuencia con que la señal de salida oscila está dada por la expresión siguiente[25]:

$$f = 1 / (0.693 * C_1 * (R_1 + 2 * R_2)) \quad (2.2)$$

En la figura 2.13 se muestra la forma de onda obtenida a la salida de IC 555 operando como circuito astable.



Figura 2.13 Forma de onda del Timer 555 en modo astable

2.6 Circuito de supervisión

Como su nombre lo indica este circuito es el encargado de supervisar el correcto desempeño del inversor y de bloquear el funcionamiento del mismo en los siguientes casos.

- 1- Sobrecarga: Se ha conectado una carga excesiva al inversor lo que traería consigo la avería del mismo o se ha averiado uno de los transistores que forman el puente H.
- 2- Nivel bajo en el voltaje de la batería.
- 3- Nivel alto del voltaje de la batería: Se ha colocado un banco de baterías que supera los 12V DC.
- 4- Nivel elevado de la temperatura en el inversor.

Para estas funciones el circuito dispone de las cuatro operacionales que conforman la LM324, tal como se muestra en la figura 2.14, todas trabajando como comparadores e independizando sus salidas a través de diodos.

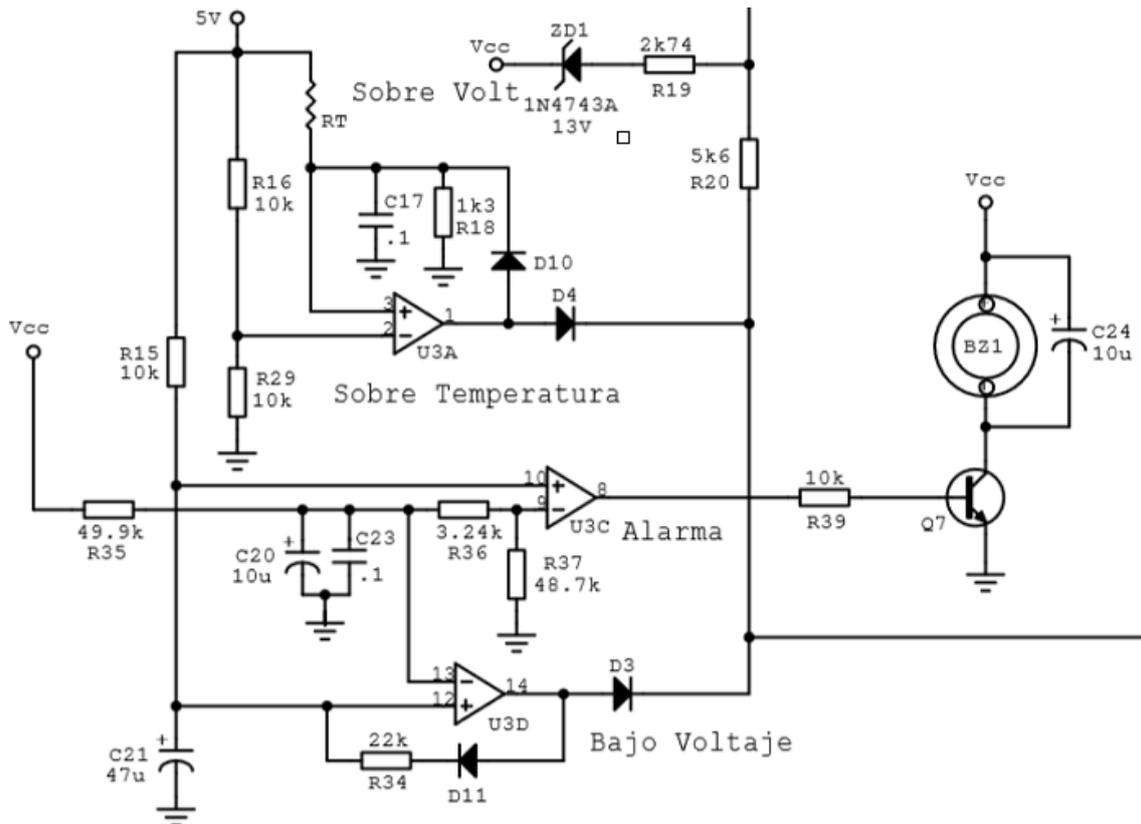


Figura 2.14. Circuito de Supervisión.

Todas las protecciones van a atacar el mismo punto, el pin 10 (shutdown) del IC SG3525 (figura 2.1) que es el generador de pulsos PWM de la primera etapa donde se generan los 150V DC. Al aparecer en este pin10 del IC SG 3525 un voltaje superior a los 2.5V el PWM se bloquea inmediatamente y sus salidas pasan a 0 bloqueando el funcionamiento del inversor de alta frecuencia.

2.6 Resultados de las mediciones en el inversor DC/AC Switch

En la figura 2.15 se representa la medición del voltaje de entrada del IC SG 3525 que tiene un valor de 12 V.



Figura 2.15. Voltaje de entrada

En la figura 2.16 se muestra el voltaje de salida en la cuarteta de diodos que tiene un valor de 150V, pero se observan 161,5 V debido a que no hay carga conectada.



Figura 2.16 Voltaje de Salida en el puente de diodos

A continuación se muestra la medición en el pin16 de la IC SG 3525 que representan los 5V de referencia.

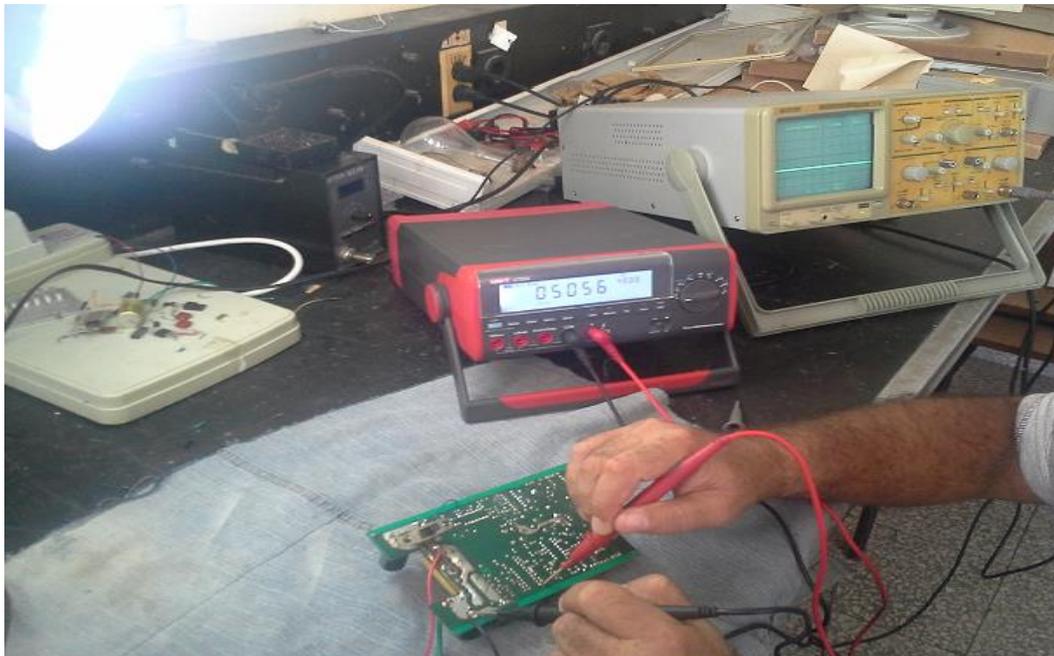


Figura 2.17. Voltaje el pin16 del inversor (referencia)

En la figura 2.18 se muestra el voltaje en el punto medio entre Q6 y Q9 que es de 81.21V debido a que no existe carga ya que como debieran haber 150V en la salida al existir carga, entonces en ese punto existirían 75V(la mitad del voltaje de salida).

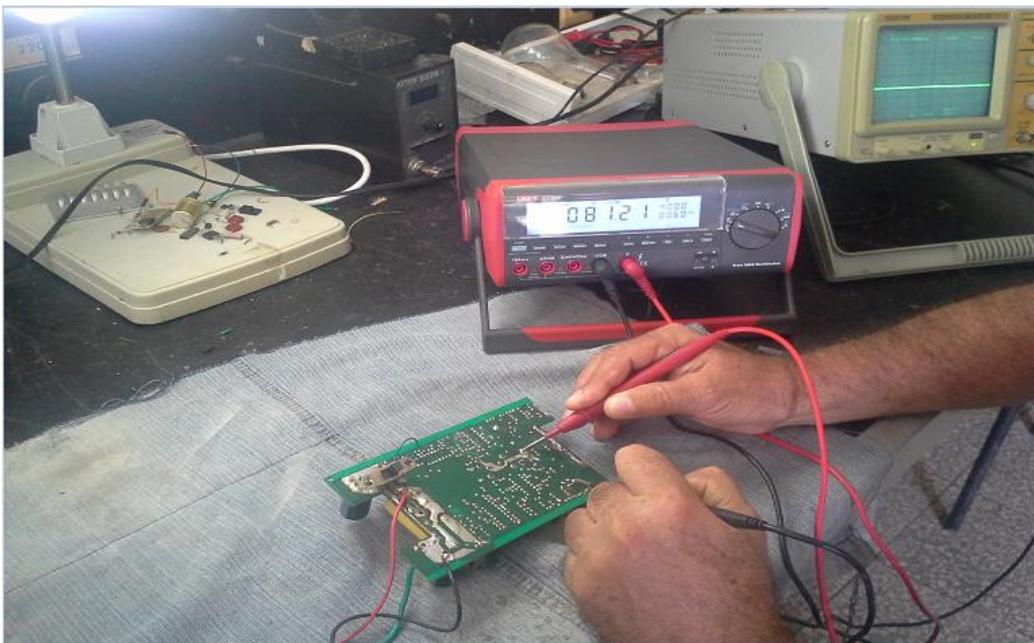


Figura 2.18. Voltaje en el punto medio entre Q6 y Q9

En la figura 2.19 se muestra el voltaje de salida del Inversor DC-AC de baja frecuencia que es de 121,74V debido a que no existe carga, si existiera carga seria de 120V.

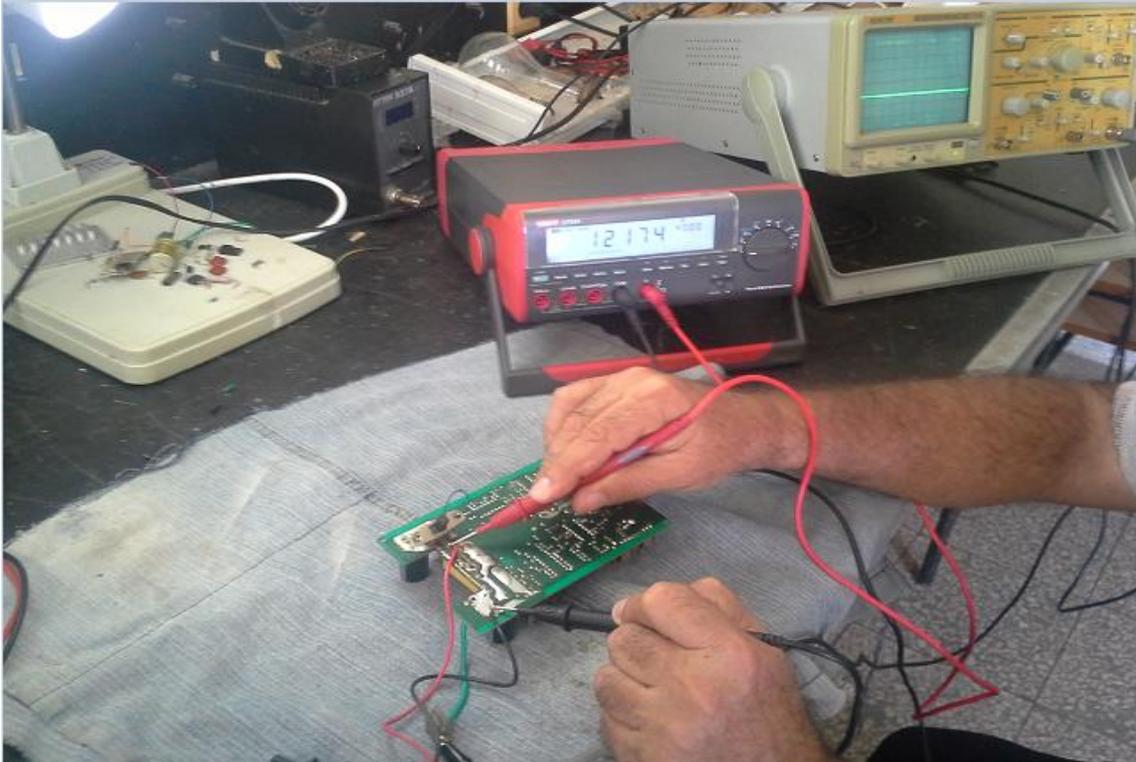
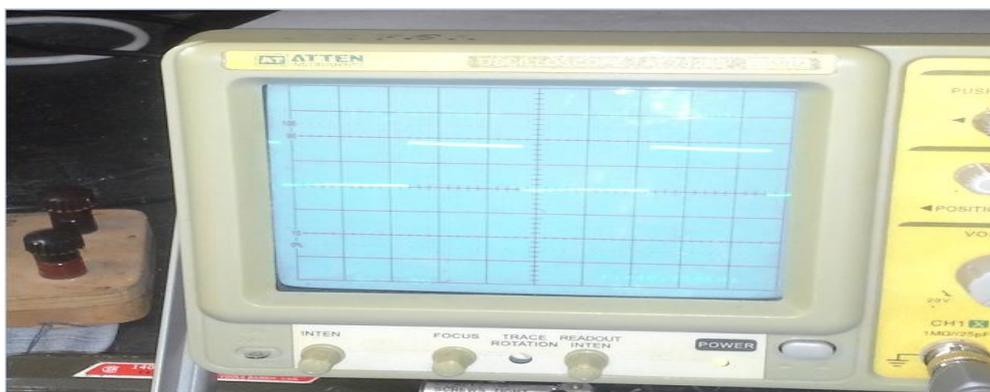


Figura 2.19. Voltaje de Salida del inversor DC/AC de baja frecuencia
A continuación se muestra la forma de onda de los pines 11 y 14 de la IC SG3525 con un valor de 40kHz.



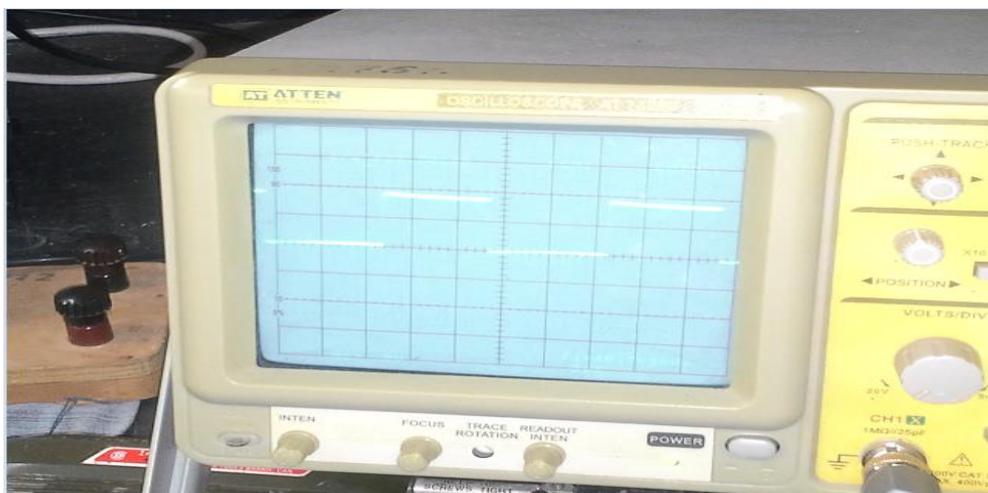
(a)



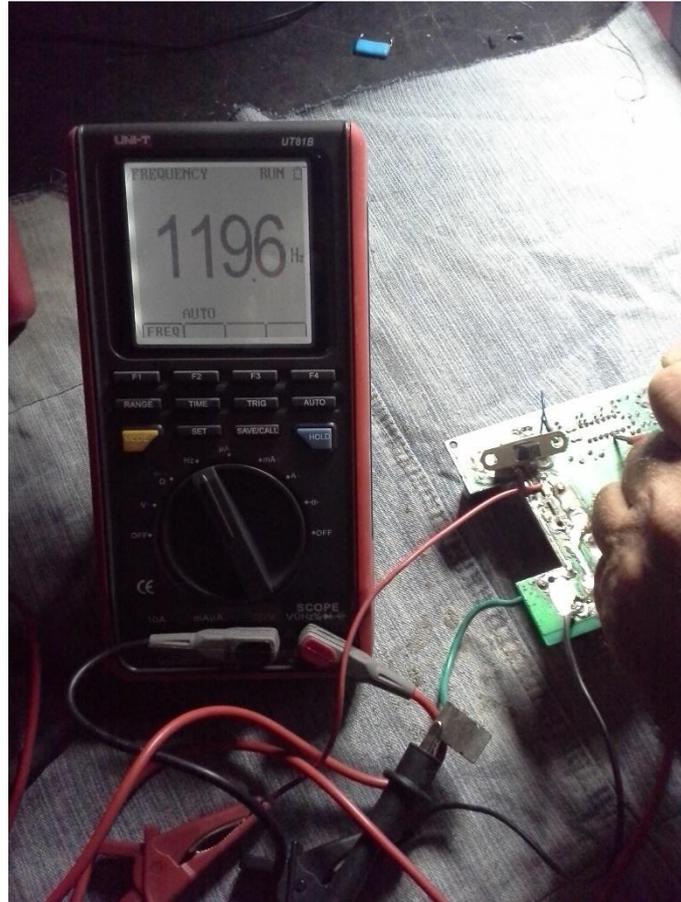
(b)

Figura 2.20 (a) Forma de onda de los pines 11 y 14 del SG 3525. (b) Valor de la frecuencia en los pines 11 y 14 del SG 3525.

En la figura 2.21 se muestra la forma de onda en el pin 9 del 556 con un valor de 120Hz.



(a)



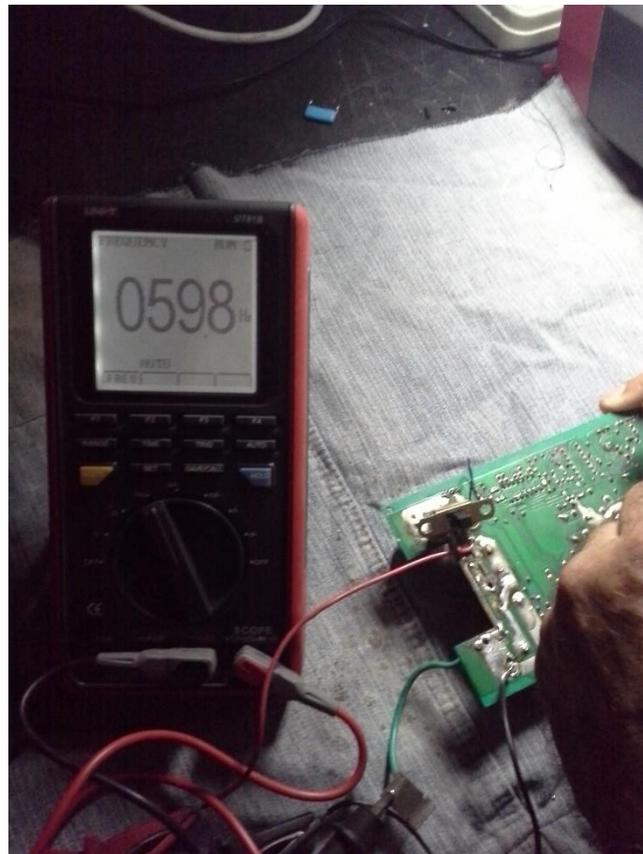
(b)

Figura 2.21 (a) Forma de onda en el pin9 del Timer 556. (b) Valor de frecuencia en el pin9 del Timer 556.

A continuación se muestra la forma de onda de las salidas del flip-flop U4A y U4B con un valor de 60Hz debido a que cada uno divide a la mitad de los 120Hz.



(a)



(b)

Figura 2.22 (a) Forma de onda de las salidas del flip flop U4A (Q-) y U4B (Q).
(b) Valor de voltaje de las salidas del flip flop U4A (Q-) y U4B (Q).

Conclusiones Generales

En el trabajo se aborda el tema de los Inversores Autónomos particularizando en los aspectos esenciales de cada uno de ellos, como son: topología, principio de funcionamiento, ventajas y desventajas.

Solo fue posible implementar una práctica de laboratorio debido a la complejidad del tema y la ausencia de componentes reales.

Los resultados de la práctica de laboratorio implementada se corresponden con las nuevas técnicas de conmutación DC-AC.

Recomendaciones

Proponer a las disciplina de Electrónica de Potencia y Accionamiento el empleo de material elaborado, como medio de enseñanza, para la impartición del tema en la docencia.

Incrementar el número de prácticas de laboratorio reales e incluir prácticas de laboratorio simuladas.

Referencias Bibliográficas

- [1] B. B. García, "Diseño y Validación del Control Digital de un Inversor de Potencia en Ejes de Referencia Síncronos Conectado a Red ", Universidad Carlos III de Madrid 2011.
- [2] D. E. Álvaro, "Diseño de un Inversor Monofásico Autónomo de Baja Frecuencia Ajustable mediante Bus DC," DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID 2009.
- [3] C. d. Autores, "REGULACIÓN, CONTROL Y PROTECCIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS," U. d. Cantabria, Ed., ed, 2010.
- [4] D. Hart, *Electrónica de potencia*: Prentice-Hall, 2001.
- [5] M. Rashid, *Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones.* : Prentice-Hall, 1995.
- [6] J. A. Gualda, S. Martínez, and P. M. Martínez, *Electrónica industrial: Técnicas de potencia*: Marcombo, 1992.
- [7] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, *Power electronics. Converters, Applications, and Design*, 1995.
- [8] R. Martín Delgado, "Diseño e implementación experimental de un inversor monofásico operando en modo isla," Carlos III de Madrid, 2012.
- [9] C. d. autores, " Inversores u Onduladores Autónomos " 2002.
- [10] C. d. Autores, "Convertidores CC/AC Apuntes asignatura Electrónica Industrial," 2012.
- [11] J. A. Villarejo, "Inversores modulados."
- [12] C. A. Rodríguez, "Diseño e implementación de prácticas para el laboratorio de electrónica industrial: inversor monofásico," Javeriana, 2004.
- [13] H. V. Gallón, "Fundamentos de Electrónica Industrial ".
- [14] C. d. Autores, "Introducción a los Sistemas de Potencia. I.T.T. (S.E.)," Valencia, 2002.
- [15] C. J. J. Fernández, A. L. Ojeda, and C. L. d. Mora, "METODOLOGIA DE DISEÑO ELECTRÓNICO DENTRO DE PRÁCTICAS OBLIGATORIAS DE LABORATORIO," 2010.
- [16] G. U. Quiroga, J. A. N. Navia, and J. I. G. Sepúlveda, "DEL AULA A LA REALIDAD. LA IMPORTANCIA DE LOS LABORATORIOS EN LA FORMACIÓN DEL INGENIERO.," 2013.
- [17] E(ver|mbdedd). (2012, 20 de abril). *Puente H*. Available: Puente H _ E(ver_ mbedded)
- [18] E. Unicrom. (2016, 20 de abril). *Resistor / Resistencia*.
- [19] J. Gómez Campomanes, "Circuitos Eléctricos.," 2016.
- [20] E. Unicrom. (2016, 20 de abril). *Capacitor electrolítico*.
- [21] E. Unicrom. (2016, 20 de abril). *Condensador*.
- [22] E. Unicrom. (2016, 2016). *Diodo LED*.
- [23] E. Unicrom. (2016, 20 de abril). *Diodo Zener*.
- [24] S.-T. Microelectronics, "REGULATING PULSE WIDTH MODULATORS," 2012.
- [25] Fairchild, "LM555 Single Timer," 2013.

Anexo #2 Inversor DC/AC Switch

