

# CONVERSIÓN DE CORRIENTE DIRECTA A CORRIENTE ALTERNA

## 5.1 Inversor.

Un inversor es un dispositivo capaz de convertir la energía de corriente directa que puede estar almacenada en un banco de baterías a un tipo de energía alterna o de corriente alterna para poder utilizarla en los aparatos domésticos e industriales. Teniendo en cuenta el voltaje de salida necesario, ya sea de 120V o de 220V dependiendo si se trata de una instalación monofásica o bifásica, a una frecuencia de 60Hz.

El uso primordial de un inversor, es poder suministrar corriente alterna de buena calidad y con la menor distorsión armónica posible, para evitar daños en las cargas a las que estos están dispuestos a alimentar. Este dispositivo es empleado principalmente en sistemas de emergencia o de respaldo de energía. Para poder llevar a cabo la conversión de DC a AC es necesario contar con los siguientes bloques que nos ayuden a conjuntar la red eléctrica doméstica.

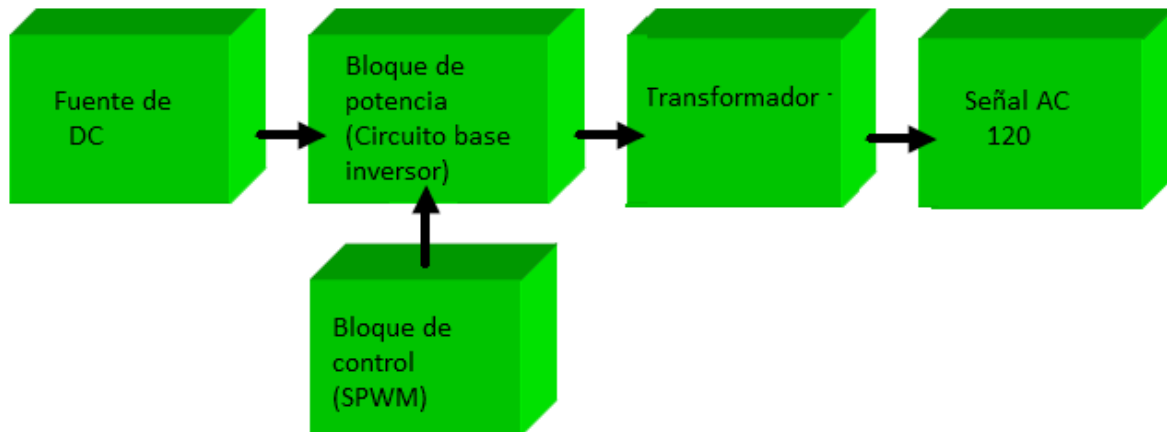


Figura 5.1. Diagrama a bloques de un inversor.

## 5.2 Fuente de DC.

La fuente de DC se conforma principalmente con un banco de baterías, el cual requiere la rectificación de la corriente alterna para poder recargarse en el momento en que su voltaje de salida se encuentre bajo. Esto se realiza por medio de un cargador de baterías el cual entra al momento de que el sistema se encienda. El banco de baterías se conforma por baterías conectadas en serie hasta alcanzar el voltaje deseado, teniendo en cuenta que estas pilas deben tener el mismo rendimiento, es decir el mismo valor en voltaje y en amperes/hora. Dependiendo del tipo y del tamaño de la carga, es posible determinar el tipo de baterías a utilizar.

## 5.3 Bloque de potencia.

En el bloque de potencia el sistema debe ser capaz de generar una onda alterna a partir de un voltaje continuo suministrado por la fuente de DC. Esto lo podemos lograr gracias a la implementación de cuatro transistores con su respectiva protección con diodos conectados en paralelo con cada transistor.

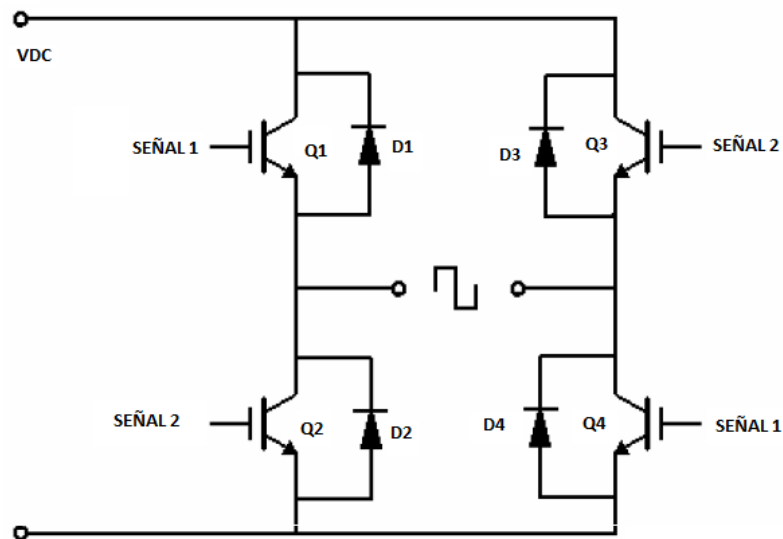


Figura 5.2. Circuito base del Inversor – puente completo.

Para este bloque es necesario contar con dispositivos de rápida conmutación que nos permitan generar una señal de corriente alterna a partir de una de corriente directa con las menores pérdidas posibles, los inversores de potencia son los que se recomiendan para esta aplicación, los cuales cuentan con una fuente de alimentación de corriente directa y a su vez estarán controlados por medio de un sistema de control que permitirá la conmutación de los mismos para lograr la conversión de directa a alterna.

Este circuito conmuta por parejas, Q1 y Q4 permiten generar el semiciclo positivo de la señal alterna de salida mientras que Q2 y Q3 activarán el semiciclo negativo de la señal alterna de salida.

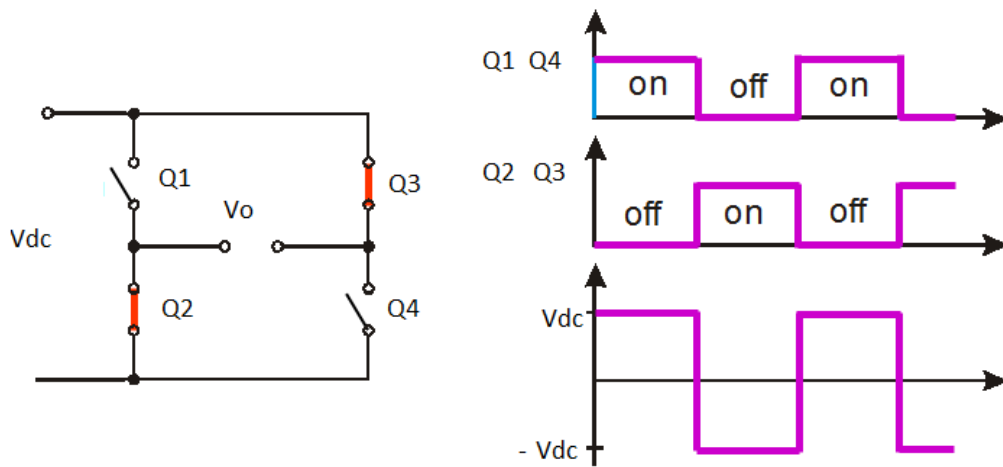


Figura 5.3. Señales de entrada Q1,Q4 y Q2,Q3.

Para una correcta operación será necesario que el bloque de control genere dos señales desfasadas 180° entre sí, señal 1 y señal 2 en la figura 5.3, las cuales harán conmutar los transistores de potencia a la velocidad requerida.

En el caso de cargas con componente inductiva es posible que se presenten problemas de conmutación de los transistores debido a la corriente reactiva que fluye por ellas. Además, si la inductancia es muy elevada, se presentarán transitorios que pueden deteriorar el funcionamiento de los semiconductores de potencia.

Para minimizar estos inconvenientes se opta por conectar diodos en antiparalelo con los transistores, D1 a D4 en la figura 5.2, los cuales redireccionan la corriente reactiva hacia la batería,

o fuente CC, permitiendo mantener una corriente constante sobre ella, y previniendo a la vez el calentamiento de los transistores.

#### 5.4 Control.

Es el encargado de generar las dos señales que gobiernan la activación y desactivación de los transistores de potencia, función que puede ser cumplida por un circuito oscilador de onda cuadrada.

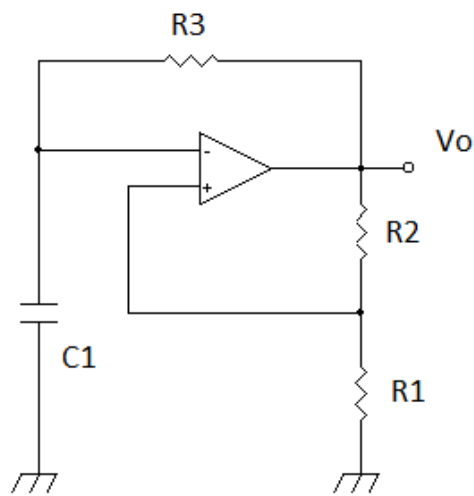


Figura 5.4. Generador de onda cuadrada astable.

Buscando proporcionar voltajes de salida que disminuyan el contenido armónico, se han desarrollado diferentes estrategias de conmutación en inversores monofásicos: modulación uniforme de ancho de pulso (UPWM), modulación trapezoidal, modulación senoidal de ancho de pulso (SPWM). Sin embargo, la técnica más utilizada es SPWM.

### 5.4.1 Conmutación SPWM

En la técnica de conmutación SPWM la amplitud de la señal de salida se controla a través del índice de modulación

$$M = \frac{A_m}{A_p}$$

Donde  $A_m$  y  $A_p$  representan las amplitudes de las señales moduladora y portadora respectivamente. Ahora, la frecuencia de salida  $f_{ose}$  define por medio de la frecuencia la señal moduladora. De esta manera, las características del voltaje por fase se regulan modificando los parámetros  $(M, f_o)$ . La estructura general del inversor monofásico se muestra en la Figura 5.2, donde se debe determinar el patrón de conmutación para los elementos  $(Q1, Q2, Q3, Q4)$ , con el objeto de producir un voltaje senoidal  $V_o$  a la salida del puente inversor a partir de un voltaje de alimentación  $V_{dc}$  constante.

En el esquema SPWM, el patrón de conmutación se genera al comparar una señal triangular  $V_{tri}$ (portadora) con una señal senoidal (moduladora)  $V_{control}$  (señal 1) y su negativo  $-V_{control}$  (señal 2), tal y como se muestra en la Figura 5.5. El orden de encendido apagado se presenta:

$Q1 \rightarrow V_{control} > V_{tri}$

$Q4 \rightarrow V_{control} < V_{tri}$

$Q2 \rightarrow -V_{control} < V_{tri}$

$Q3 \rightarrow -V_{control} > V_{tri}$

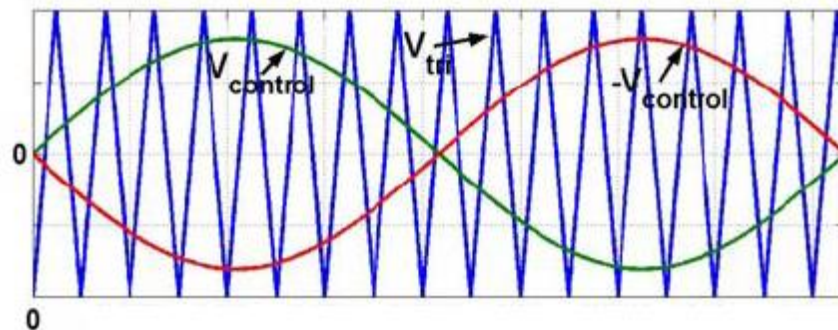


Figura 5.5. Señal moduladora y señales portadoras.

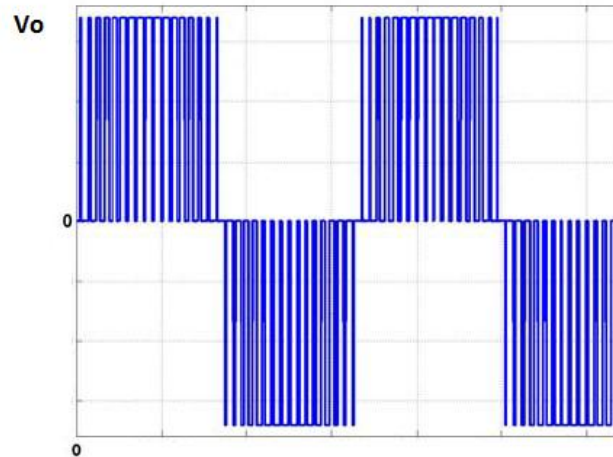


Figura 5.6. Voltaje de salida bajo una carga resistiva.

Se recomienda utilizar un microcontrolador, el cual provee una mayor flexibilidad a la hora de aplicar técnicas de control como la modulación por ancho de pulsos, y facilita la variación de la frecuencia en el rango deseado.

El bloque de control puede realizar funciones extras de monitorización y evaluación de señales.

- ✚ Verificar si existe alimentación al sistema para que se esté llevando a cabo la rectificación de la señal de AC.
- ✚ Verificar que el voltaje que está llegando a esta fase sea el adecuado para generar la salida necesaria.

El control además de monitorizar será capaz de mandar señales de alarma en caso de que exista falla en algunos de los bloques y podrá desconectarlo del sistema para evitar dañar otras fases.

### 5.5 Transformador.

Finalmente, el transformador de salida permite regenerar la señal para la carga, es decir mandar una señal senoidal con mínimo de armónicos y mantener el voltaje lo más posible estable para evitar variaciones a la salida y posibles daños a las cargas conectadas.

También nos sirve para proteger el sistema, puesto que en caso de corto circuito en la carga, éste no repercute ya que se encuentra aislada.

## 5.6 Dispositivos utilizados.

Dentro de las características de los inversores, se encuentra la protección que éstos deben tener al manejar un alto nivel de tensión. Está dada cierta protección por un diodo de protección o de recuperación que evita el daño del dispositivo. En algunos casos el diodo puede ponerse físicamente en el circuito, pero en la actualidad los dispositivos inversores de potencia ya lo traen integrados en su estructura interna, como es el caso de los MOSFETs e IGBTs.

## 5.7 MOSFET.

Un MOSFET es un dispositivo de potencia controlado por voltaje, el cual requiere sólo una pequeña corriente de entrada. Dentro de sus características encontramos que el tiempo de conmutación para estos dispositivos es del orden de nanosegundos por lo que su velocidad de conmutación es muy rápida. Está formado por tres terminales, el gate, drain y source.

Tiene una versión NPN y otra PNP. El NPN es llamado MOSFET de canal N y el PNP es llamado MOSFET de canal P, en el MOSFET de canal N la parte "N" está conectado a la fuente (source) y al drenaje (drain) además que el sustrato es de tipo P y difusiones de tipo N mientras que en el MOSFET de canal P la parte "P" está conectado a la fuente (source) y al drenaje (drain) y el sustrato es de tipo N y difusiones de tipo P.

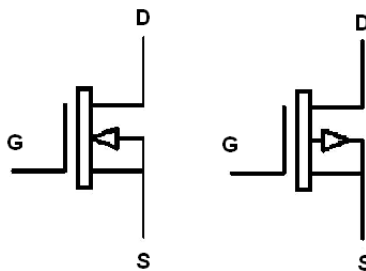


Figura 5.7. (a) MOSFET canal N, (b) MOSFET canal P.

### 5.7.1 Funcionamiento.

Tanto en el MOSFET de canal N o el de canal P, cuando no se aplica tensión en la compuerta no hay flujo de corriente entre en drenaje (drain) y la fuente (source).

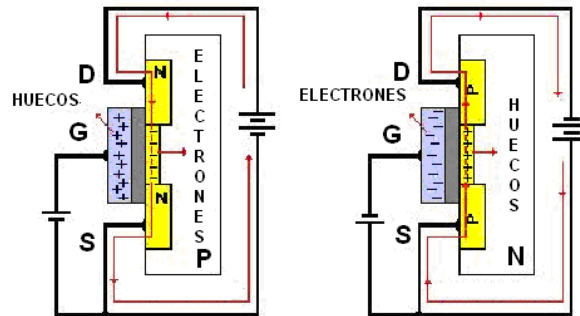


Figura 5.8. (a) MOSFET canal N, (b) MOSFET canal P.

Para que circule corriente en un MOSFET de canal N se debe aplicar una tensión positiva en la compuerta. Así los electrones del canal N de la fuente (source) y el drenaje (drain) son atraídos a la compuerta (gate) y pasan por el canal P entre ellos.

El movimiento de estos electrones crea las condiciones para que aparezca un puente para los electrones entre el drenaje y la fuente. La amplitud o anchura de este puente (y la cantidad de corriente) depende o es controlada por la tensión aplicada a la compuerta. En el caso del MOSFET de canal P, se da una situación similar. Cuando se aplica una tensión negativa en la compuerta, los huecos (ausencia de electrones) del canal P del drenaje y de la fuente son atraídos hacia la compuerta y pasan a través del canal N que hay entre ellos, creando un puente entre drenaje y fuente. La amplitud o anchura del puente (y la cantidad de corriente) depende de la tensión aplicada a la compuerta. Debido a la delgada capa de óxido que hay entre la compuerta y el semiconductor, no hay corriente por la compuerta. La corriente que circula entre drenaje y fuente es controlada por la tensión aplicada a la compuerta.

En cuanto al comportamiento del dispositivo se puede aproximar a una resistencia entre las terminales de drain y source representada por  $R_{DS}$  a la que se le conoce como resistencia de conducción, cuyo valor disminuye con el voltaje  $V_{GS}$ . A esto se le conoce como la región óhmica de operación. En la figura 5.9 observamos la resistencia  $R_{DS}$  que puede considerarse como la



resistencia equivalente serie de todas las resistencias por las que atraviesa la corriente  $I_D$ , por lo que es importante reducir lo más posible su valor para evitar pérdidas en el  $V_{DS}$ .

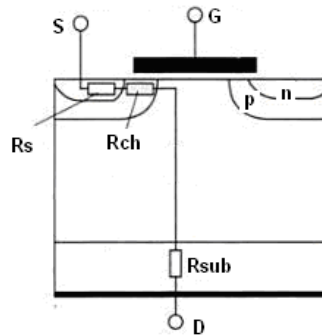


Figura 5.9. Resistencia  $R_{DS}$

Para evitar que suceda esto, es necesario contar con un transistor con dopados no muy altos, lo que permite limitar la concentración de portadores, de conductividad y de la resistencia  $R_{DS}$ .

Los MOSFET son dispositivos que requieren de poca energía en el gate para poder funcionar, así como de contar con una velocidad de conmutación grande así como su impedancia de entrada.

Existen tres zonas de trabajo para estos dispositivos:

- ✚ Zona de corte. La tensión en la terminal de control  $V_{GS}$  no alcanza la tensión del umbral necesario para la conducción, en esta zona el dispositivo se comporta como un circuito abierto.
- ✚ Zona activa. Donde la característica es prácticamente horizontal y en donde la coincidencia de tensión corriente genera una potencia considerable.
- ✚ Zona óhmica. En donde el comportamiento entre drain y source es igual al de una resistencia de bajo valor considerada como  $R_{DS}$ .

## 5.8 IGBT.

El IGBT es un dispositivo híbrido que utiliza la tecnología de un transistor TBJ con la de un dispositivo MOSFET, el cual es utilizado como un conmutador para alta tensión en donde el flujo

de la corriente a través del dispositivo es controlada por una fuente de voltaje de alta impedancia normalmente de valores bajos lo que permite proveer una corriente elevada con una pérdida de energía en la parte del control baja.

Este dispositivo tiene una compuerta de tipo MOSFET lo que permite que tenga una impedancia alta a la entrada. Soporta una tensión de salida de hasta 2000V y corrientes de 400 A entre el colector y el emisor. Consta de tres terminales, GATE o puerta, Colector y Emisor, el IGBT puede representarse tanto como un t<sub>bj</sub> como en la figura a, o como en la figura b un MOSFET.

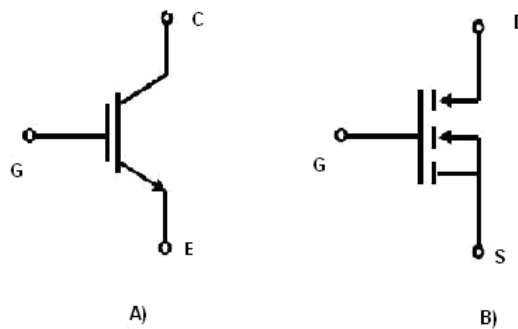


Figura 5.10 Representación del IGBT.

### 5.8.1 Principio de funcionamiento y estructura.

La estructura del IGBT es similar a la del MOSFET, pero con la inclusión de una capa P+ que forma el colector del IGBT.

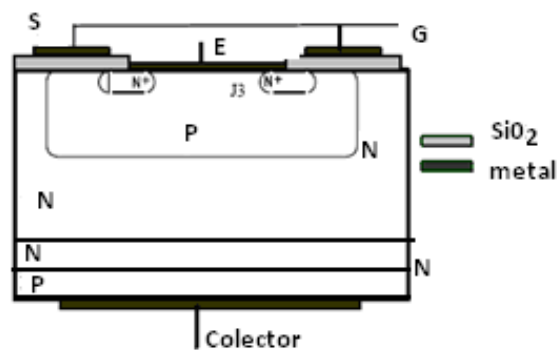


Figura 5.11 Estructura del IGBT.

Gracias a la estructura interna puede soportar tensiones elevadas, con un control sencillo de tensión de puerta. La velocidad a la que pueden trabajar no es tan elevada como la de los MOSFETs, pero permite trabajar en rangos de frecuencias medias, controlando potencias bastante elevadas. En términos simplificados se puede analizar el IGBT como un MOSFET en el cual la región N- tiene su conductividad modulada por la inyección de portadores minoritarios (agujeros), a partir de la región P+, una vez que la Juntura 1 está directamente polarizada. Esta mayor conductividad produce una menor caída de tensión en comparación con un MOSFET similar.

El control del componente es análogo al del MOSFET, o sea, por la aplicación de una polarización entre puerta y emisor. También para el IGBT, el accionamiento o disparo se hace por tensión. La máxima tensión que puede soportar se determina por la unión Juntura 2 (polarización directa) y por Juntura 1 (polarización inversa). Como Juntura 1 divide 2 regiones muy dopadas. El IGBT no soporta tensiones elevadas cuando es polarizado inversamente. Los IGBT presentan un tiristor parásito. La construcción del dispositivo debe ser tal que evite el disparo de este tiristor, especialmente debido a las capacidades asociadas a la región P. Los componentes modernos no presentan problemas relativos a este elemento indeseado.

### 5.8.2 La característica I-V del funcionamiento de un IGBT.

El IGBT tiene una alta impedancia de entrada como el MOSFET, y bajas pérdidas de conducción en estado activo como el bipolar, pero no presenta problema alguno de ruptura secundaria como los TBJ.

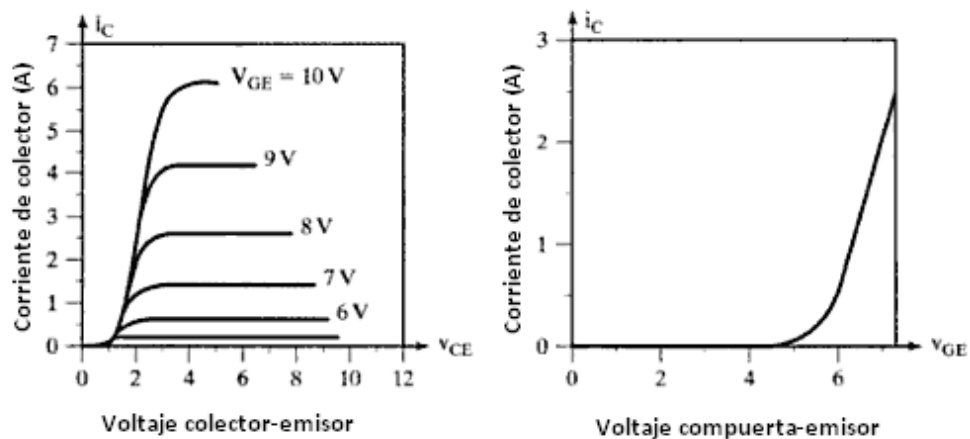


Figura 5.12. Característica I-V de un IGBT.

El IGBT es inherentemente más rápido que el TBJ. Sin embargo, la velocidad de conmutación del IGBT es inferior a la de los MOSFETs. Las limitaciones del IGBT son:

Corriente máxima directa.

Tensión máxima entre drain y source que depende de la tensión de ruptura del transistor PNP.

Temperatura de la unión máxima 150°C

En la siguiente figura podemos observar un módulo de IGBT:



Figura 5.13Módulo IGBT.

### 5.9 Comparación entre los MOSFET IGBT.

A continuación se presenta una breve tabla de comparación de tensiones, corrientes, y frecuencias que pueden soportar los distintos transistores descritos.

	TBJ	MOSFET	IGBT
Voltaje	1000-1200V	500-1000V	1600-2000V
Corriente	700-1000 <sup>a</sup>	20-100A	400-500A
Frecuencia	25kHz	Hasta 300-400kHz	Hasta 75kHz
Potencia	Medias	Baja < 10kW	Medias - Altas

Tabla 5.1. Comparación de tensión entre transistores.

Los valores mencionados no son exactos, dada la gran disparidad que se puede encontrar en el mercado. En general, el producto tensión-corriente es una constante (estamos limitados en potencia), es decir, se puede encontrar un MOSFET de muy alta tensión pero con corriente reducida. Lo mismo ocurre con las frecuencias de trabajo. Existen bipolares de poca potencia que trabajan “tranquilamente” a 50kHz, aunque no es lo más usual.

#### 5.10 Inversores trifásicos.

En la industria es muy normal que los equipos que se utilicen sean alimentados por una fuente trifásica, así que los sistemas inversores no sólo se utilizan para alimentar a cargas monofásicas, por tanto también es posible considerarlos para cargas trifásicas, por medio de los monofásicos separados y cada uno produce una salida a la frecuencia fundamental por  $120^\circ$  con respecto a la anterior, lo que requiere de un transformador de 3 fases. Para este tipo de circuito se cuenta con tres patas que corresponden una por cada fase. Para este caso, un factor importante a considerar son los armónicos producidos a la salida, puesto que cada una de las patas produce armónicos impares.

Dentro de los inversores más usados por su respuesta y rápida conmutación son los igbt, triac, tiristores o módulos de los mismos.