

El transistor IGBT y su aplicación en electrónica de potencia

El transistor IGBT y su aplicación en electrónica de potencia

Introducción al transistor IGBT y a su funcionamiento



El **transistor bipolar de puerta aislada IGBT** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, por sus siglas en inglés) es un dispositivo semiconductor que combina atributos de las familias MOS y bipolar, como la alta impedancia de entrada, mínima corriente de activación, mayor linealidad del MOS, baja resistencia en estado de encendido y alta transconductancia del bipolar. En pocas palabras, se trata de una combinación de los elementos de un transistor MOSFET y de un BJT.

En 2005, la revista *Power Electronics Magazine* publicó un artículo donde se menciona que Jayant Baliga es el creador de este transistor, cuyo desarrollo se dio entre 1979 y 1980, mientras trabajaba en General Electric (Baliga, 2022). Desde entonces, esta tecnología ha experimentado un rápido desarrollo y ha sido ampliamente adoptada en una amplia variedad de aplicaciones en electrónica de potencia.

Este transistor permite controlar adecuadamente altas corrientes eléctricas, por lo que se considera un dispositivo de potencia. Asimismo, consta de dos etapas internas: una **frontal**, donde se combina un transistor **MOS** (cuya compuerta se sitúa sobre un semiconductor, del que se separa por un óxido, así que se forma una especie de "sándwich") accionado por voltaje; la segunda es una **etapa trasera**, en la que hay un transistor de unión bipolar **BJT** (*Bipolar Junction Transistor*, por sus siglas en inglés) que permite la circulación de una corriente alta. En la figura 1, se presenta el **diagrama eléctrico** de un transistor IGBT (ambos símbolos aluden al mismo dispositivo):

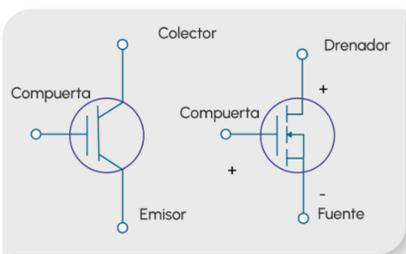


Figura 1. Símbolo eléctrico IGBT análogo.

Fuente: Baliga, B. (2022). *The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor* (2a ed.). Países Bajos: Elsevier.

Externamente, el dispositivo consta de tres terminales. En este sentido, algunos fabricantes prefieren asociarlo con el transistor BJT, por lo que denominan colector y emisor a las terminales conectadas a la carga; en cambio, otros prefieren llamarlas drenador y fuente para equiparar este dispositivo con un MOSFET. La terminal que no cambia de nombre es la compuerta. En el modelo equivalente de la figura 3, se utilizan los términos de colector, emisor y compuerta para nombrar a las terminales del IGBT, pues dichas etiquetas están más generalizadas; por su parte, en la tabla 1, se muestran las dos equivalencias.

IGBT	
Bipolar	MOSFET
Compuerta (<i>gate</i>)	Compuerta (<i>gate</i>)
Colector (<i>collector</i>)	Drenador (<i>drain</i>)
Emisor (<i>emitter</i>)	Fuente (<i>source</i>)

Estos transistores pueden encontrarse integrados en sistemas de potencia media, entre 10 kW y 1 MW, ya sea como fuentes de poder ininterrumpidas, controles de motores industriales, electrónica automotriz y tecnología del hogar; además, trabajan en el rango de **mediana potencia**, pasando de 5 kW por IGBT a arquitecturas modulares que operan a más de 200 kW.

En la figura 2, puedes observar un esquema de la estructura de un transistor IGBT simétrico, formado por **cuatro regiones** o capas semiconductoras **P-N-P-N** que, en conjunto, constituyen un transistor **MOSFET** y dos transistores bipolares, un **PNP** y otro **NPN**, con dos uniones **PN** J1 y J2.

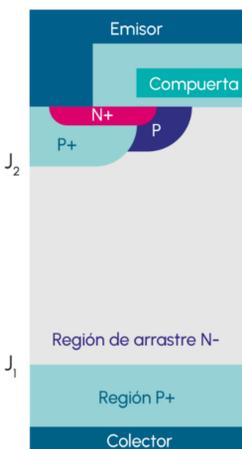


Figura 2. Estructura de un transistor IGBT simétrico.

Fuente: Baliga, B. (2022). *The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor*. Países Bajos: Elsevier.

Ahora, examina el circuito equivalente de la estructura de IGBT mostrado en la figura 3. El voltaje compuerta emisor (V_{GE}) es el **control** del dispositivo IGBT, así que modula la corriente del colector; con $V_{GE} > 0$, la corriente circula por el transistor **PNP**, habilita el **NPN** y permite el paso de corriente entre la terminal del colector y la del emisor. Si lo observas con un poco más de detalle, el potencial entre las terminales de emisor y de compuerta (**modo encendido**) habilita la **capa de inversión** en la capa P, es decir, debajo de la compuerta.

El MOSFET interno al IGBT, mostrado en el modelo equivalente de la figura 3, se enciende como un MOSFET canal *n* normal; entonces, mientras se encuentra en **estado on** (encendido), el potencial del colector resulta positivo. De esta manera, se inyectan huecos desde P+ pasando por N+ hasta N-, acción que acelera la inyección de electrones desde el emisor; como resultado, el incremento de portadores (electrones y huecos) disminuye la resistencia de la capa N que, normalmente, cuenta con una muy alta (efecto de modulación de la conductividad). Por otro lado, si $V_{GE} < 0$, entonces no fluye corriente entre el colector y el emisor, por lo que se considera que el IGBT está en **modo corte** o **apagado**. Si $V_{GE} > 0$, pero no alcanza el **voltaje de umbral** ($V_{GE,th}$), la corriente que circula entre colector y emisor resulta prácticamente despreciable.

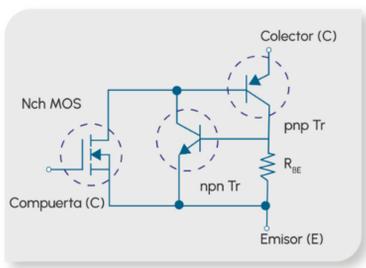


Figura 3. Modelo equivalente

Fuente: Toshiba. (2022). *Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device*. Recuperado de https://toshiba.semicon-storage.com/content/dam/toshiba-ss-v3/master/en/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/discrete-basic-chap3_en.pdf

Una forma simple de analizar el funcionamiento del dispositivo es que, al aplicar la señal de encendido en la terminal de compuerta del MOSFET, se activa el **modo de encendido**, así que la corriente fluye desde el emisor hasta la base del transistor **PNP**. Esta corriente disminuye la resistencia de encendido del MOSFET, lo que se denomina efecto de modulación de conductividad (Toshiba, 2022). El valor de la resistencia r_{on} se establece internamente por el fabricante, dependiendo del diseño y características del producto, para evitar que el transistor NPN esté encendido.

A partir de su estructura, el funcionamiento del IGBT es capaz de operar con altas corrientes entre las terminales de colector y emisor; a su vez, estos se conectan a la carga y, por ende, permiten su aplicación como dispositivo de conmutación y control de sistemas eléctricos de potencia.

El transistor IGBT como interruptor controlado

La principal función de un IGBT es la de conmutación, es decir, como interruptor que permite transitar entre los estados de encendido y apagado. El primero sucede cuando el voltaje de entrada V_{GE} es mayor que el umbral $V_{GE,th}$, ya que permite que la corriente fluya entre las terminales de colector y emisor. Los transistores BJT PNP y NPN, mostrados en el circuito equivalente de la figura 3, se combinan para formar cuatro capas alternas con disposición **P-N-P-N** dentro de la estructura del IGBT; dichas capas forman uniones al interior del dispositivo, las cuales permiten modular la corriente mediante el voltaje de entrada y la capacitancia. Los transistores BJT se colocan formando un **"par Darlington invertido"** dentro de la estructura IGBT; esta característica determina que uno es de alta ganancia y otro de alta corriente.

En la figura 4, se muestran dos modos de llamado de bloqueo, los cuales están relacionados con la conmutación del dispositivo, dependiendo de la polarización aplicada entre las terminales de compuerta y emisor. Estos modos son los siguientes:

- **Bloqueo directo.** Sucede cuando la compuerta está en cortocircuito con la terminal del emisor $V_{GE} = 0$ y se aplica un **voltaje positivo** V_{CE} entre el colector y el emisor; entonces, la unión queda polarizada directamente, lo que provoca que circule una pequeña corriente de fuga a través del IGBT. En esta condición, pese a la polarización directa y a la corriente de fuga, el dispositivo no está en modo de encendido; para ello V_{CE} debe alcanzar o superar el voltaje umbral o de encendido.
- **Bloqueo inverso.** Ocurre cuando la compuerta está en cortocircuito con la terminal del emisor $V_{GE} = 0$ y se aplica un **voltaje negativo** V_{CE} entre el colector y el emisor (polarización inversa); entonces, la corriente que pudiera circular (corriente de fuga) es extremadamente pequeña, por lo que resulta despreciable. En esta condición, el dispositivo se encuentra en modo de apagado; de hecho, si V_{CE} supera la tensión soportada, se pueden romper las uniones internas, provocando que el dispositivo pase a estado de corte y dañándolo.

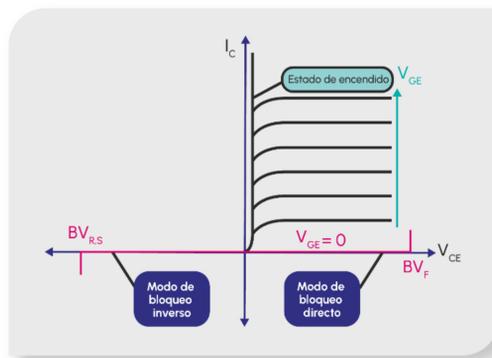


Figura 4. Curva IV de un IGBT simétrico.

Fuente: Baliga, B. (2022). *The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor* (2a ed.). Países Bajos: Elsevier.

Aplicaciones del transistor IGBT en electrónica de potencia y en energía renovable

Principalmente, los IGBT se emplean en aplicaciones de corriente alterna, sobre todo por su velocidad de conmutación y su capacidad de bloqueo directo e inverso, ya que el semiciclo positivo de la corriente alterna aplica una polarización directa entre colector y emisor para, después, generar una polarización inversa (en el semiciclo negativo).

Los transistores IGBT sirven como **interruptores controlados** en aplicaciones de media potencia, cuya regulación se da mediante el voltaje V_{GE} . Este uso abarca una amplia gama de aplicaciones, como las siguientes:

- Balastras y sistemas especializados de iluminación.
- Sistemas de climatización.
- Sistemas de refrigeración.
- Estufas de inducción.
- Sistemas de soldadura por arco.
- Control de motores eléctricos.
- Sistemas de respaldo de energía.
- Sistemas de tracción (automóviles y trenes eléctricos).

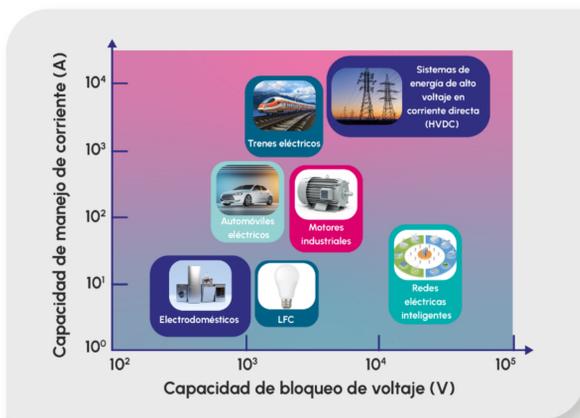


Figura 5. Aplicaciones de los IGBT.

Fuente: Baliga, B. (2022). *The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor*. Países Bajos: Elsevier.

Por otro lado, en el ámbito de las energías renovables, el papel que juega el IGBT es crucial, ya que es necesario transformar, almacenar y transmitir la energía producida por diversos tipos de sistemas de generación eléctrica, como sistemas fotovoltaicos, eólicos, geotérmicos, hidráulicos, etc. En este sentido, la aplicación del IGBT incluye lo siguiente:

- Inversores.
- Convertidores AC/DC.
- Convertidores DC/DC.
- Sistemas de alto voltaje en corriente directa (HVDC).
- Sistemas de distribución (redes eléctricas).

De manera comercial, los IGBT se pueden fabricar modularmente para aumentar la potencia de trabajo; en este caso, cada módulo de potencia consta de un grupo de IGBT soldados sobre un sustrato semiconductor de potencia, el cual se encapsula posteriormente para aislarlo. El módulo de potencia IGBT brinda aislamiento eléctrico y térmico, además de asegurarse de la conducción interna; asimismo, lleva a cabo funciones de conmutación y contiene otros elementos, como termistores, capacitores cerámicos y demás componentes que brindan confiabilidad.

Referencias bibliográficas

- Baliga, B. (2022). *The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor* (2a ed.). Países Bajos: Elsevier
- Toshiba. (2022). *Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device*. Recuperado de https://toshiba.semicon-storage.com/content/dam/toshiba-ss-v3/master/en/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/discrete-basic-chap3_en.pdf



La obra presentada es propiedad de ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN SUPERIOR A.C. (UNIVERSIDAD TECNILENIO), protegida por la Ley Federal de Derecho de Autor; la alteración o deformación de una obra, así como su reproducción, exhibición o ejecución pública sin el consentimiento de su autor y titular de los derechos correspondientes es constitutivo de un delito tipificado en la Ley Federal de Derechos de Autor, así como en las Leyes Internacionales de Derecho de Autor.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, fragmentos de eventos culturales, programas y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, es exclusivamente para fines educativos e informativos, y cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por UNIVERSIDAD TECNILENIO.

Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir, difundir, o en cualquier modo explotar cualquier parte de esta obra sin la autorización previa por escrito de UNIVERSIDAD TECNILENIO. Sin embargo, se permitirá el uso de imágenes, programas o material de autor educativo o cultural que sea de uso autorizado o educativo y no comercial limitado a una copia por página. No se podrá remover o alterar de la copia ninguna leyenda de Derechos de Autor o la que manifieste la autoría del material.