

Familia de tiristores

Familia de tiristores

Introducción y tipos de tiristores

Los **tiristores** son dispositivos de estado sólido de tres terminales que actúan como interruptores abiertos, los cuales son capaces de soportar una gran tensión nominal hasta que se activan; por este motivo, su principal utilidad es actuar como un control-interruptor no mecánico de tensión y corriente eléctrica, ya que puede cambiar rápidamente de un estado de corriente conductora (saturación) a uno de no conducción (corte). Asimismo, sus costos de mantenimiento son bajos y, si opera en las condiciones adecuadas, alcanza un extenso periodo de vida. Las herramientas basadas en tiristores son muy diversas, pues abarcan desde sistemas de alarma (aplicación de baja potencia) hasta aquellos de líneas de transmisión de energía eléctrica (aplicaciones de media y alta potencia).

Desde el punto de vista de su construcción, los tiristores se fabrican con cuatro capas semiconductoras tipos *p* y *n* alternadas para formar tres **uniones PN** (Alcalde, 2022). Aunque se han empleado diversos semiconductores para la construcción de estos dispositivos, como carburo de silicio (SiC) y nitruro de galio (GaN), el material predominante es el silicio.

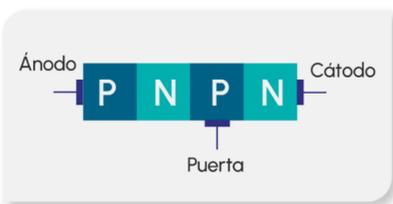


Figura 1. Esquema de la estructura de un tiristor típico de cuatro capas.

Fuente: Alcalde, P. (2022). *Electrónica de potencia-tiristores*. En *Electrónica* (3ª ed.). España: Ediciones Paraninfo.

Para activar un tiristor, es necesario aplicar una corriente de disparo en la terminal de **compuerta** (*gate*), lo que permite la circulación de la corriente entre las terminales de **ánodo** (*anode*) y **cátodo** (*cathode*); por ejemplo, en un sistema de iluminación de respaldo, la señal de disparo equivale al corte del suministro eléctrico. Al dispararse, se activa la luz de respaldo o emergencia, la cual está conectada en serie con las terminales de ánodo y cátodo.

Cuando el dispositivo ha sido accionado, la **corriente de activación** en la compuerta puede retirarse y el componente continuará en estado de encendido (**estado enganchado**). Esta característica hace que el tiristor sea diferente a otros dispositivos, como un diodo o un MOSFET de potencia: aunque se retire el voltaje en la compuerta, se mantiene encendido siempre y cuando circule una **corriente de mantenimiento** entre ánodo y cátodo. Este concepto se refiere a la corriente mínima que debe fluir a través del dispositivo para que se mantenga encendido.

Otra forma de encender el dispositivo es mediante la aplicación de un **voltaje de ruptura** muy grande entre ánodo y cátodo, cuyo valor es de cientos de voltios y depende de las características de fabricación del tiristor; en este caso, para pasar del estado de encendido al **de apagado**, se debe aplicar un voltaje negativo (impulso de corta duración) en la compuerta, o bien, disminuir la corriente de mantenimiento.

Los tiristores son dispositivos de potencia utilizados para controlar corrientes y voltajes muy altos; asimismo, existen diversos tipos, pero el más común es el **SCR**. Esta herramienta conduce en un solo sentido, mientras que otras opciones, como el **DIAC** o **TRIAC**, pueden hacerlo en ambas direcciones. Los tiristores se emplean como un interruptor que, a diferencia de las alternativas mecánicas, poseen una vida útil más larga, así como tiempos de encendido y apagado muy rápidos.

De igual manera, debido a su capacidad regenerativa y a su baja resistencia una vez activados, suelen emplearse como controladores de potencia y protectores de sobretensión. Entre las muchas aplicaciones que tienen, se pueden mencionar las siguientes:

- Control de motores.
- Control de intensidad de luz.
- Electrodomésticos.
- Controladores lógicos programables.
- Interruptores de falla a tierra.
- Herramientas eléctricas.
- Equipos de telecomunicaciones.
- Fuentes de alimentación.

Tiristor SCR: principio y uso

De acuerdo con Alcalde (2022), el rectificador controlado de silicio (**SCR**, por las siglas en inglés de *Silicon Controlled Rectifier*) es uno de los dispositivos de potencia más empleados; de hecho, sus características y funcionamiento son la base para comprender las cualidades de otros tipos de tiristores, como los DIAC y los TRIAC. El rasgo principal de este tiristor es su estructura de fabricación, la cual está formada por cuatro capas semiconductoras configuradas a partir de dos transistores: uno PNP y otro NPN. El circuito equivalente de este tiristor se muestra en la siguiente figura:

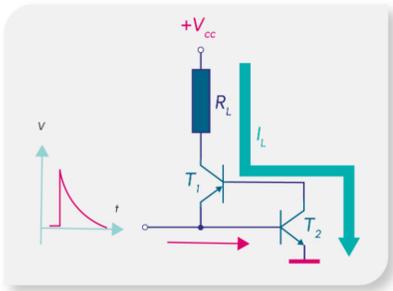


Figura 2. Circuito equivalente de un SCR.

Fuente: Alcalde, P. (2022). *Electrónica de potencia-tiristores*. En *Electrónica* (3ª ed.). España: Ediciones Paraninfo.

Para explicar el funcionamiento del SCR, se puede usar como referencia el circuito equivalente de la figura 2. Cabe aclarar que, externamente, la terminal de disparo es la de la compuerta; sin embargo, al mismo tiempo, está conectada internamente al transistor T1 de la figura 2. La **corriente de disparo** en la terminal común del emisor del transistor T1 y de la base del transistor T2 provoca que T2 se active, permitiendo la circulación de una corriente en el colector que, a su vez, activa a T1; después, la corriente circula por T1 hacia el emisor, aumentando la conducción en T2 y T1, en retroalimentación, hasta que ambos transistores se **saturan**. Al suceder esto, se puede retirar la señal de disparo sin afectar su estado de conducción, pues los componentes se retroalimentan y la corriente continúa circulando por la carga RL; por dicho motivo, a este estado se le conoce como **enganchado**. Para que siga de esa manera, es necesario que una **corriente de mantenimiento** continúe fluyendo.

Una alternativa para activar los transistores T1 y T2, de tal manera que pasen al estado enganchado, consiste en aplicar un voltaje Vcc muy grande, ya que esto fuerza a los transistores al estado de ruptura; así, basta con que uno de ellos comience a conducir para activar el segundo, para que se retroalimenten y, finalmente, queden enganchados. De igual forma, para pasar el dispositivo al estado de apagado, solo hay que disminuir la corriente circulante (entre ánodo y cátodo) a un valor por debajo de la corriente de mantenimiento; en la figura 3, se presenta el símbolo eléctrico del SCR, así como la identificación de sus terminales:



Figura 3. Símbolo eléctrico de un SCR.

Fuente: Alcalde, P. (2022). *Electrónica de potencia-tiristores*. En *Electrónica* (3ª ed.). España: Ediciones Paraninfo.

El **SCR** es un dispositivo que permite la **conducción eléctrica en un solo sentido**, así que el valor de la corriente de disparo, de la de mantenimiento, del voltaje nominal, entre otros aspectos, dependen de las características de fabricación del dispositivo; como se ha mencionado antes, esta información se encuentra en las hojas de especificaciones que cada fabricante publica para sus productos. Cabe recordar que los SCR pueden localizarse en convertidores de corriente alterna en corriente continua, controles de relevadores, cargadores de baterías, reguladores de potencia, circuitos de inversiones, entre muchas herramientas más.

Tiristor GTO: características y aplicaciones

El tiristor desactivado por compuerta (**GTO**, por las siglas en inglés de *Gate Turn-off Thyristor*) es un dispositivo semiconductor de estado sólido empleado como **interruptor controlable**, el cual puede **activarse** o **desactivarse** a voluntad mediante una señal de compuerta positiva (**encendido**) o negativa (**apagado**). Los GTO son una evolución de los SCR, ya que están diseñados para tener bajas pérdidas de conducción y la capacidad de operar con altas corrientes y voltajes; por esta razón, son muy útiles en aplicaciones de baja y media frecuencia, como convertidores de altos voltaje y potencia.

La principal diferencia entre un GTO y un SCR radica en la forma como pasan del estado de encendido al **de apagado**: en el segundo, es necesario un circuito de conmutación que corte el flujo de corriente hacia la carga, o bien, que disminuya la corriente por debajo de la de mantenimiento; por su parte, en el primero, basta con aplicar un potencial negativo en la **terminal de compuerta** para que el dispositivo pase al estado de apagado. Esta característica es particularmente útil en el diseño y fabricación de circuitos de conversión de DC a DC y de DC a AC, pues la velocidad de conmutación controlada por la compuerta del GTO garantiza el funcionamiento del dispositivo a altas frecuencias.

El GTO es un dispositivo semiconductor que opera como interruptor de tres terminales: **ánodo** (A), **cátodo** (K) y **compuerta** (G); en la figura 4, se puede apreciar su símbolo eléctrico. En el caso de la compuerta, tiene flechas para indicar que el flujo de corriente es bidireccional a través de su terminal, es decir, tiene capacidad de apagado por compuerta.

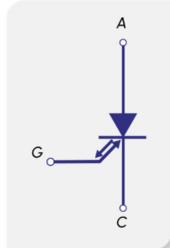


Figura 4. Símbolo eléctrico de un GTO.

Fuente: Kularatna, N. (2018). *Power Semiconductors*. En *DC Power Supplies: Power Management and Surge Protection for Power Electronic Systems*. Estados Unidos: CRC Press.

Como sucede con un tiristor, el GTO se mantiene en estado de encendido, aunque el potencial en la compuerta se retire, siempre y cuando la corriente del ánodo esté por encima del nivel de **corriente de mantenimiento**.

Debido a sus características de conmutación, a que no requiere de un circuito para pasar al estado de apagado y a su funcionamiento sin mantenimiento, el GTO ha ganado popularidad sobre el tiristor clásico en muchas aplicaciones; por ejemplo, en inversores, fuentes de alimentación, variadores de frecuencia o de DC y en sistemas de corriente continua de alto voltaje (HVDC), puede utilizarse como interruptor de encendido-apagado, o bien, como detector de cruce por cero en sistemas de baja y media potencia.

Tiristor IGCT y ETO: innovaciones

La necesidad de desarrollar dispositivos con altas velocidades de conmutación y bajo consumo en estado de encendido, con el objetivo de incorporarlos a sistemas de potencia, todavía representa un tema de investigación para fabricantes e investigadores dedicados al desarrollo y estudio de materiales y dispositivos semiconductores. Esto ha favorecido la evolución de los tiristores para mejorar su capacidad de conducir corriente en ambas direcciones, de lidiar con corrientes y voltajes altos, de admitir velocidades de conmutación elevadas, así como de implementarse en circuitos simples y eficientes, fiables y robustos (Kurachi et al., 2019).

De esta manera, surge el **tiristor de puerta conmutada integrada (IGCT)**, por las siglas en inglés de *Integrated Gate-Commutated Thyristor*) como un perfeccionamiento del tiristor GTO, ya que se trata de un interruptor de encendido controlado por compuerta, el cual tiene una menor pérdida de conducción y soporta mayores voltajes; asimismo, el dispositivo consta de tres terminales: **ánodo** (A), **cátodo** (K) y **compuerta** (G). El símbolo eléctrico se muestra en la figura 5, donde se observa la implementación de un diodo para asegurar la conducción cuando se emplean cargas reactivas (Cao et al. 2022):

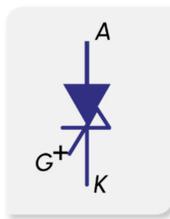


Figura 5. Símbolo del IGCT.

Fuente: Song, X., Cairoli, P., Du, Y., y Antoniazzi, A. (2021). *A Review of Thyristor Based DC Solid-State Circuit Breakers*. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2.

El IGCT es un dispositivo que se utiliza en la conmutación de energía para aplicaciones de alta potencia, como variadores de voltaje medio, variadores marinos, cogeneración, convertidores de energía eólica, restauradores de voltaje dinámico, sistemas de almacenamiento de energía en baterías, disyuntores de estado sólido, impulsores de línea DC, compensadores de potencia, etcétera.

Por otro lado, el **tiristor desactivado por emisor (ETO)**, por las siglas en inglés de *Emitter Turn-Off Thyristor*) es un dispositivo semiconductor híbrido que surge como evolución de los transistores metal-óxido-semiconductor de efecto de campo de potencia (**MOSFET** de potencia). En su diseño, el ETO consta de dos **MOSFET** conectados en serie con un tiristor desactivado por compuerta (**GTO**); según Chen et al. (2022), este dispositivo consta de tres terminales: **ánodo** (A), **cátodo** (K) y **compuerta** (G), como se muestra en la figura 6:

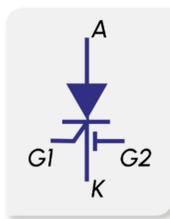


Figura 6. Símbolo del ETO.

Fuente: Song, X., Cairoli, P., Du, Y., y Antoniazzi, A. (2021). *A Review of Thyristor Based DC Solid-State Circuit Breakers*. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2.

El dispositivo pasa al **estado de encendido** cuando se aplica un voltaje positivo al ánodo con respecto al cátodo, mientras la compuerta está polarizada positivamente, lo que permite que fluya la corriente entre el ánodo y cátodo; para transitar al **estado de apagado**, se debe aplicar un voltaje negativo a la compuerta, cortando así con el flujo de corriente entre el ánodo.

Algunas características de estos tiristores son las siguientes:

- Tienen una alta velocidad de conmutación.
- Tienen una capacidad de apagado controlado por la terminal de compuerta.
- Pueden manejar corrientes y voltajes altos, con baja pérdida de conducción, en estado de encendido.

Debido a las características que poseen, se emplean en convertidores AC/DC, convertidores DC/DC, inversores, sistemas de transmisión de energía de corriente directa de alto voltaje y sistemas de transmisión de AC flexibles.

Aplicaciones industriales y energía renovable

El uso y aplicación de los tiristores es muy variada; en general, se utilizan por su capacidad para funcionar como un **interruptor controlable**. La elección del tiristor más adecuado depende de los requerimientos de velocidad de conmutación y de la potencia energética necesitada; además, debe considerarse el costo asociado. Bai et al. (2023) comentan que las aplicaciones industriales de los tiristores incluyen el control de motores, de corriente y voltaje, de relevadores, así como variadores de frecuencia y convertidores AD/DC - DC/DC.

Un tema de particular interés son los sistemas de energía renovable, como los de energía fotovoltaica, hidroeléctrica y eólica. Las capacidades de manejo de alto voltaje y corriente de los tiristores los vuelven particularmente adecuados para estas aplicaciones, pues contribuyen a mejorar la eficiencia de los procesos de conversión de energía, en cuanto maximizan la producción de estas fuentes renovables.

La industria de los semiconductores proyecta una evolución y mejora sistemática en los tiristores para desarrollar dispositivos con velocidades de conmutación aún mayores, así como menores pérdidas en estado de encendido y un manejo de potencia más conveniente; esto posibilita la ampliación de las aplicaciones para que sean una pieza clave de la electrónica de potencia.

Referencias bibliográficas

- Alcalde, P. (2022). *Electrónica de potencia-tiristores*. En *Electrónica* (3ª ed.). España: Paraninfo.
- Bai, H., Liu, C., Majstorovic, D., y Gao, F. (2023). *Power electronic devices. In Real-Time Simulation Technology for Modern Power Electronics*. Reino Unido: Academic Press.
- Cao, Q., Gammon, P., Renz, A., Zhang, L., Baker, G., Antoniou, M., y Lophitis, N. (2022). The optimisation of a 15 kV 4H-silicon carbide integrated gate commutated thyristor. *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Europe, WIPDA Europe 2022*. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9936508>
- Chen, R., Hu, H., Yi, B., y Chen, X. B. (2020). A novel 3.3-kV integrated ETO (IETO) with single-gate controlling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67(5).
- Kularatna, N. (2018). *Power Semiconductors*. En *DC Power Supplies: Power Management and Surge Protection for Power Electronic Systems*. Estados Unidos: CRC.
- Kurachi, K., Taguchi, K., y Majumdar, G. (2019). GCT Technologies and their applications. *ICPE 2019 - ECCE Asia - 10th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8797357>
- Song, X., Cairoli, P., Du, Y., y Antoniazzi, A. (2021). *A Review of Thyristor Based DC Solid-State Circuit Breakers*. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2.

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, usted podrá bajar material a su computadora personal para uso exclusivamente personal 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.