

TIRISTORES

Un tiristor es uno de los tipos más importantes de los dispositivos semiconductores de potencia. Los tiristores se utilizan en forma extensa en los circuitos electrónicos de potencia. Se operan como conmutadores biestables, pasando de un estado no conductor a un estado conductor. Para muchas aplicaciones se puede suponer que los tiristores son interruptores o conmutadores ideales, aunque los tiristores prácticos exhiben ciertas características y limitaciones. Un tiristor es un dispositivo semiconductor de cuatro capas de estructura pnpn con tres uniones pn tiene tres terminales: ánodo cátodo y compuerta. Los tiristores se fabrican por difusión. Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, las uniones J_1 y J_3 tienen polarización directa o positiva. La unión J_2 tiene polarización inversa, y solo fluiría una pequeña corriente de fuga del ánodo al cátodo. Se dice entonces que el tiristor está en condición de bloqueo directo o en estado desactivado llamándose a la corriente fuga corriente de estado inactivo I_D . Si el voltaje ánodo a cátodo V_{AK} se incrementa a un valor lo suficientemente grande la unión J_2 polarizada inversamente entrará en ruptura. Esto se conoce como ruptura por avalancha y el voltaje correspondiente se llama voltaje de ruptura directa V_{BO} . Dado que las uniones J_1 y J_3 ya tienen polarización directa, habrá un movimiento libre de portadores a través de las tres uniones que provocará una gran corriente directa del ánodo. Se dice entonces que el dispositivo está en estado de conducción o activado. La acción regenerativa o de enganche debido a la retroalimentación directa se puede demostrar mediante un modelo de tiristor de dos transistores. Un tiristor se puede considerar como dos transistores complementarios, un transistor PNP, Q_1 , y un transistor NPN, Q_2 , tal y como se demuestra en la figura 3.

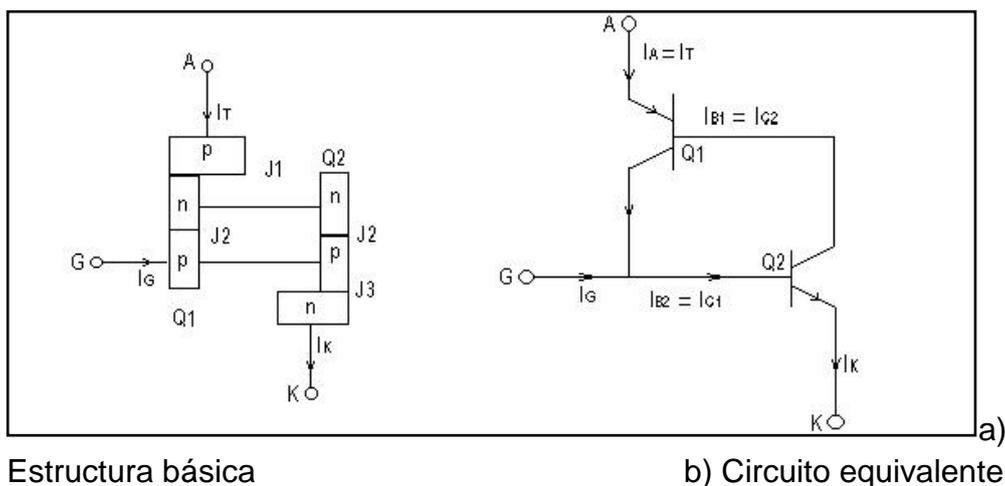
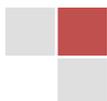


Fig. 3 Modelo de tiristor de dos terminales.



ACTIVACIÓN DEL TIRISTOR

TERMICA. Si la temperatura de un tiristor es alta habrá un aumento en el número de pares electrón-hueco, lo que aumentará las corrientes de fuga. Este aumento en las corrientes hará que a_1 y a_2 aumenten. Debido a la acción regenerativa ($a_1 + a_2$) puede tender a la unidad y el tiristor pudiera activarse. Este tipo de activación puede causar una fuga térmica que por lo general se evita.

LUZ. Si se permite que la luz llegue a las uniones de un tiristor, aumentaran los pares electrón-hueco pudiéndose activar el tiristor. La activación de tiristores por luz se logra permitiendo que esta llegue a los discos de silicio.

ALTO VOLTAJE. Si el voltaje directo ánodo a cátodo es mayor que el voltaje de ruptura directo V_{BO} , fluirá una corriente de fuga suficiente para iniciar una activación regenerativa. Este tipo de activación puede resultar destructiva por lo que se debe evitar.

dv/dt. Si la velocidad de elevación del voltaje ánodo-cátodo es alta, la corriente de carga de las uniones capacitivas puede ser suficiente para activar el tiristor. Un valor alto de corriente de carga puede dañar el tiristor por lo que el dispositivo debe protegerse contra dv/dt alto. Los fabricantes especifican el dv/dt máximo permisible de los tiristores.

CORRIENTE DE COMPUERTA. Si un tiristor está polarizado en directa, la inyección de una corriente de compuerta al aplicar un voltaje positivo de compuerta entre la compuerta y las terminales del cátodo activará al tiristor. Conforme aumenta la corriente de compuerta, se reduce el voltaje de bloqueo directo, tal y como aparece en la fig.4

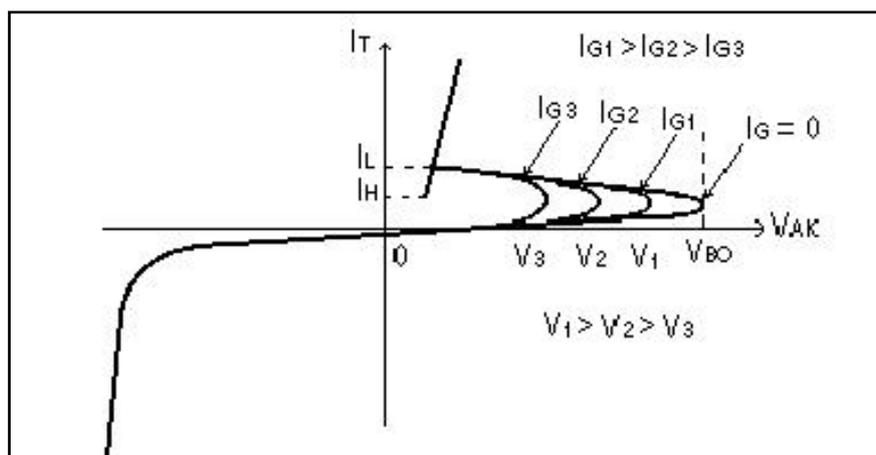
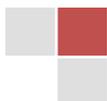


Fig.4 Efectos de la corriente de compuerta sobre el voltaje de bloqueo directo.



TIPOS DE TIRISTORES

Los tiristores se fabrican casi exclusivamente por difusión.

La corriente del ánodo requiere de un tiempo finito para propagarse por toda el área de la unión, desde el punto cercano a la compuerta cuando inicia la señal de la compuerta para activar el tiristor.

Para controlar el di/dt , el tiempo de activación y el tiempo de desactivación, los fabricantes utilizan varias estructuras de compuerta.

Dependiendo de la construcción física y del comportamiento de activación y desactivación, en general los tiristores pueden clasificarse en nueve categorías:

1. Tiristores de control de fase o de conmutación rápida (SCR).
2. Tiristores de desactivación por compuerta (GTO).
3. Tiristores de trío bidireccional (TRIAC).
4. Tiristores de conducción inversa (RTC).
5. Tiristores de inducción estática (SITH).
6. Rectificadores controlados por silicio activados por luz (LASCR).
7. Tiristores controlados por FET (FET-CTH).
8. Tiristores controlados por MOS (MCT).
9. Tiristores bidireccionales controlados por fase (BCT)
10. Tiristores de apagado por MOS (MTO)
11. Tiristores de apagado (control) por emisor (ETO)
12. Tiristores conmutados por compuerta integrada (IGCT)
13. Transistor mono unión (UJT).
14. Transistor mono unión programable. (PUT)
15. Conmutador unilateral de silicio (SUS)
16. Interruptor bilateral del silicio (SBS)

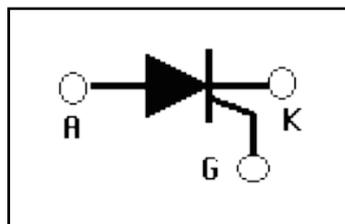


TIRISTORES DE CONTROL DE FASE O DE CONMUTACIÓN RÁPIDA (SCR)

El miembro más importante de la familia de los tiristores es el tiristor de tres terminales, conocido también como el rectificador controlado de silicio o SCR. Este dispositivo lo desarrolló la General Electric en 1958 y lo denominó SCR. El nombre de tiristor lo adoptó posteriormente la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). En la figura siguiente se muestra el símbolo de un tiristor de tres terminales o SCR.

Tal como su nombre lo sugiere, el SCR es un rectificador controlado o diodo. Su característica voltaje-corriente, con la compuerta de entrada en circuito abierto, es la misma que la del diodo PNP.

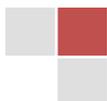
Lo que hace al SCR especialmente útil para el control de motores en sus aplicaciones es que el voltaje de ruptura o de encendido puede ajustarse por medio de una corriente que fluye hacia su compuerta de entrada. Cuanto mayor sea la corriente de la compuerta, tanto menor se vuelve V_{BO} . Si se escoge un SCR de tal manera que su voltaje de ruptura, sin señal de compuerta, sea mayor que el mayor voltaje en el circuito, entonces, solamente puede activarse mediante la aplicación de una corriente a la compuerta. Una vez activado, el dispositivo permanece así hasta que su corriente caiga por debajo de I_H . Además, una vez que se dispare el SCR, su corriente de compuerta puede retirarse, sin que afecte su estado activo. En este estado, la caída de voltaje directo a través del SCR es cerca de 1.2 a 1.5 veces mayor que la caída de voltaje a través de un diodo directo-oblicuo común.



Los tiristores de tres terminales o SCR son, sin lugar a dudas, los dispositivos de uso más común en los circuitos de control de potencia. Se utilizan ampliamente para cambiar o rectificar aplicaciones y actualmente se encuentran en clasificaciones que van desde unos pocos amperios hasta un máximo de 3,000 A.

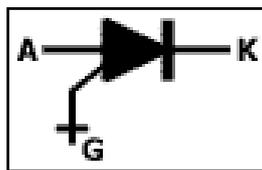
Un SCR.

1. Se activa cuando el voltaje V_D que lo alimenta excede V_{BO}
2. Tiene un voltaje de ruptura V_{BO} , cuyo nivel se controla por la cantidad de corriente i_G , presente en el SCR
3. Se desactiva cuando la corriente i_D que fluye por él cae por debajo de I_H
4. Detiene todo flujo de corriente en dirección inversa, hasta que se supere el voltaje máximo inverso.

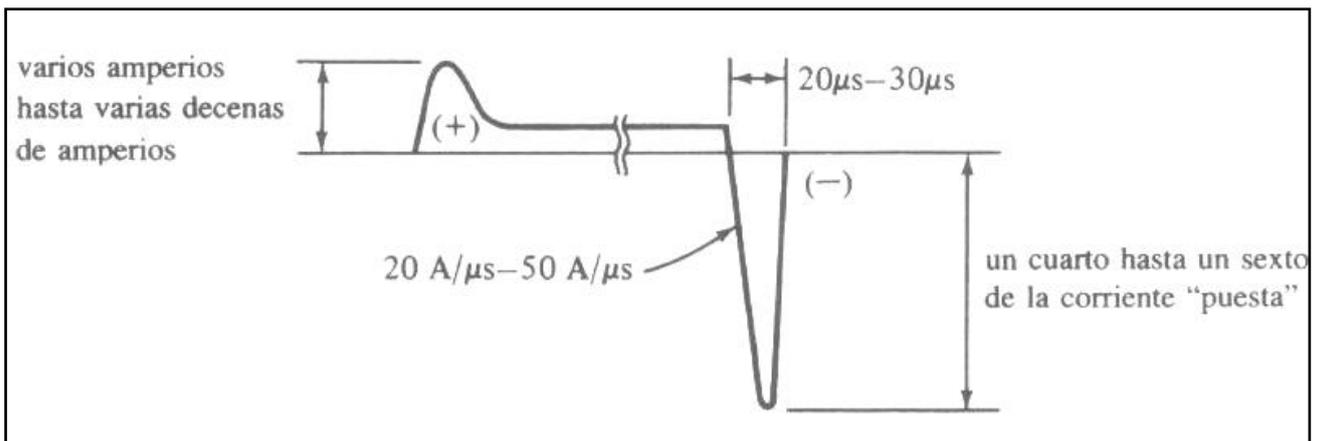


TIRISTORES DE DESACTIVACIÓN POR COMPUERTA (GTO)

Entre las mejoras más recientes que se le han hecho al tiristor está el apagado por compuerta (GTO). Un tiristor GTO es un SCR que puede apagarse por una pulsación suficientemente grande en su compuerta de entrada, aun si la corriente i_D excede I_H . Aunque los tiristores GTO se han venido usando desde 1960, solamente se volvieron prácticos para las aplicaciones de control de motores, al final de los años setenta. Estos dispositivos se han vuelto más y más comunes en las unidades de control de motores, puesto que ellos eliminaron la necesidad de componentes externos para apagar los SCR en circuitos de cc.

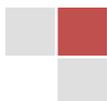
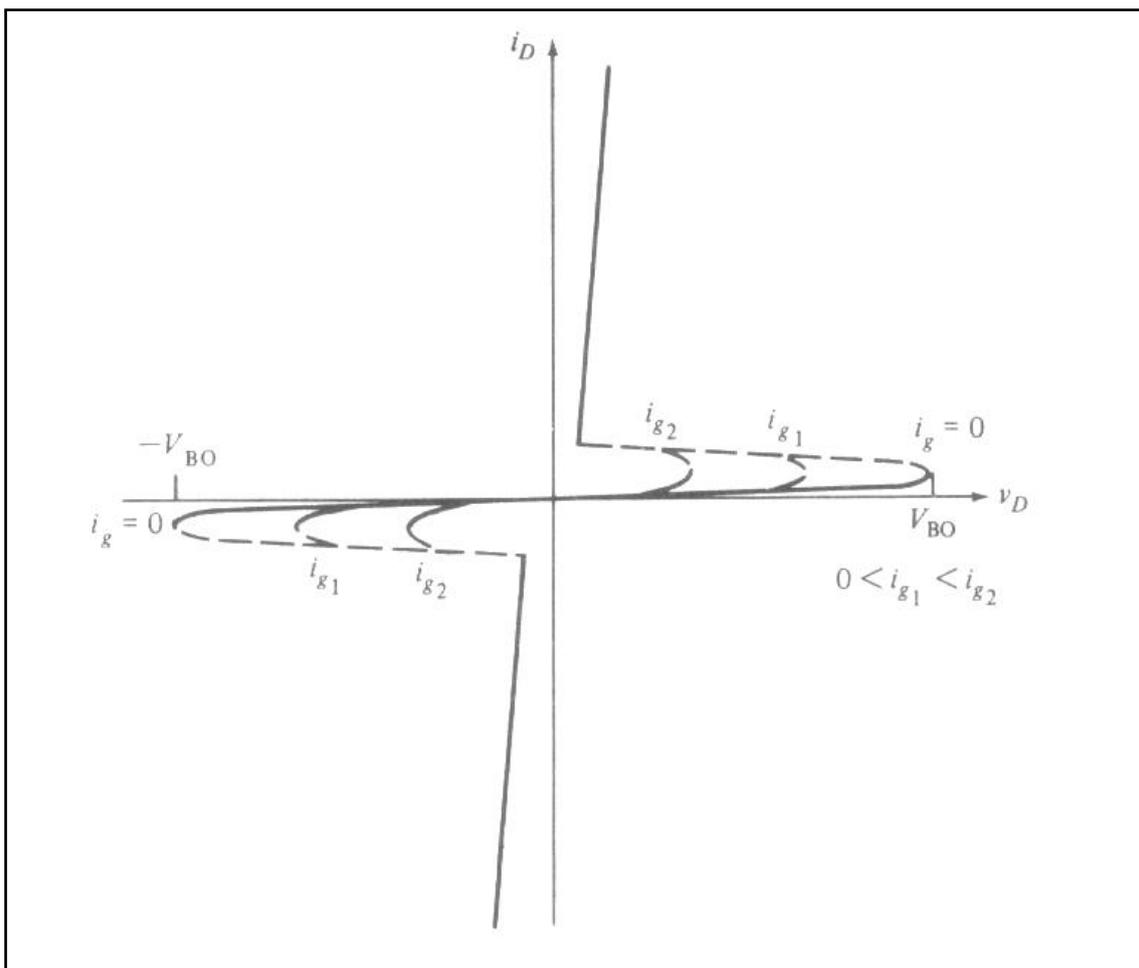
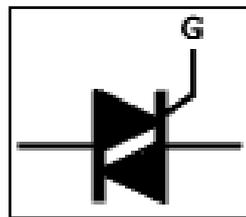


La típica forma de onda de la corriente de compuerta de un tiristor GTO de alta potencia se muestra a continuación. Un tiristor GTO requiere una mayor corriente de compuerta para encendido que un SCR común. Para grandes aparatos de alta potencia se necesitan corrientes de compuerta del orden de 10 A o más. Para apagarlos se necesita una gran pulsación de corriente negativa de entre 20 y 30m s de duración. La magnitud de la pulsación de corriente negativa debe ser de un cuarto a un sexto de la corriente que pasa por el aparato.



TIRISTORES DE TRIODO BIDIRECCIONAL (TRIAC)

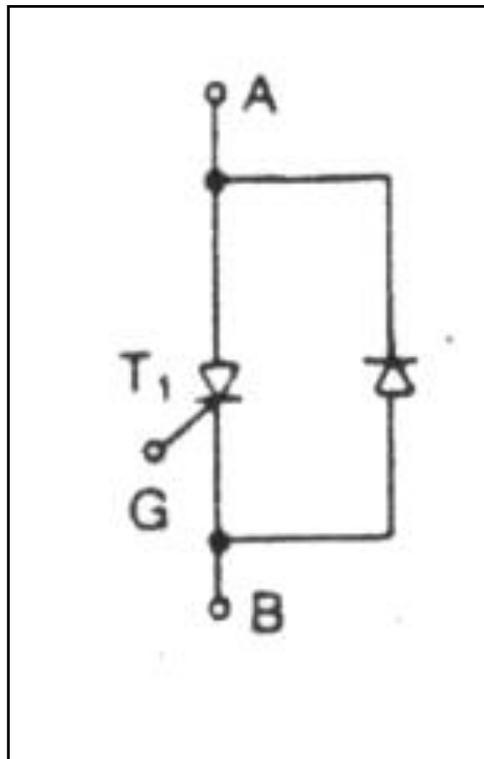
Es un dispositivo que se comporta como dos SCR conectados en contraposición, con una compuerta de paso común; puede ir en cualquier dirección desde el momento en que el voltaje de ruptura se sobrepasa. El símbolo del TRIAC se ilustra en la figura siguiente y su característica corriente-voltaje en la figura contigua. El voltaje de ruptura en un TRIAC disminuye si se aumenta la corriente de compuerta, en la misma forma que lo hace en un SCR, con la diferencia que un TRIAC responde tanto a los impulsos positivos como a los negativos de su compuerta. Una vez encendido, un TRIAC permanece así hasta que su corriente cae por debajo de I_H .



TIRISTORES DE CONDUCCIÓN INVERSA (RTC)

En muchos circuitos pulsadores e inversores, se conecta un diodo anti paralelo a través de un SCR, con la finalidad de permitir un flujo de corriente inversa debido a una carga inductiva, y para mejorar el requisito de desactivación de un circuito de conmutación. El diodo fija el voltaje de bloqueo inverso del SCR a 1 ó 2v por debajo de las condiciones de régimen permanente. Sin embargo, bajo condiciones transitorias, el voltaje inverso puede elevarse hasta 30v debido al voltaje inducido en la inductancia dispersa del circuito dentro del dispositivo.

Un RCT es un intercambio entre características del dispositivo y requisitos del circuito; puede considerarse como un tiristor con un diodo anti paralelo incorporado, tal y como se muestra en la figura siguiente. Un RCT se conoce también como tiristor asimétrico (ASCR). El voltaje de bloqueo directo varía de 400 a 2000v y la especificación de corriente llega hasta 500 A. El voltaje de bloqueo inverso es típicamente 30 a 40v. Dado que para un dispositivo determinado está preestablecida la relación entre la corriente directa a través de un tiristor y la corriente inversa del diodo, sus aplicaciones se limitarán a diseños de circuitos específicos.

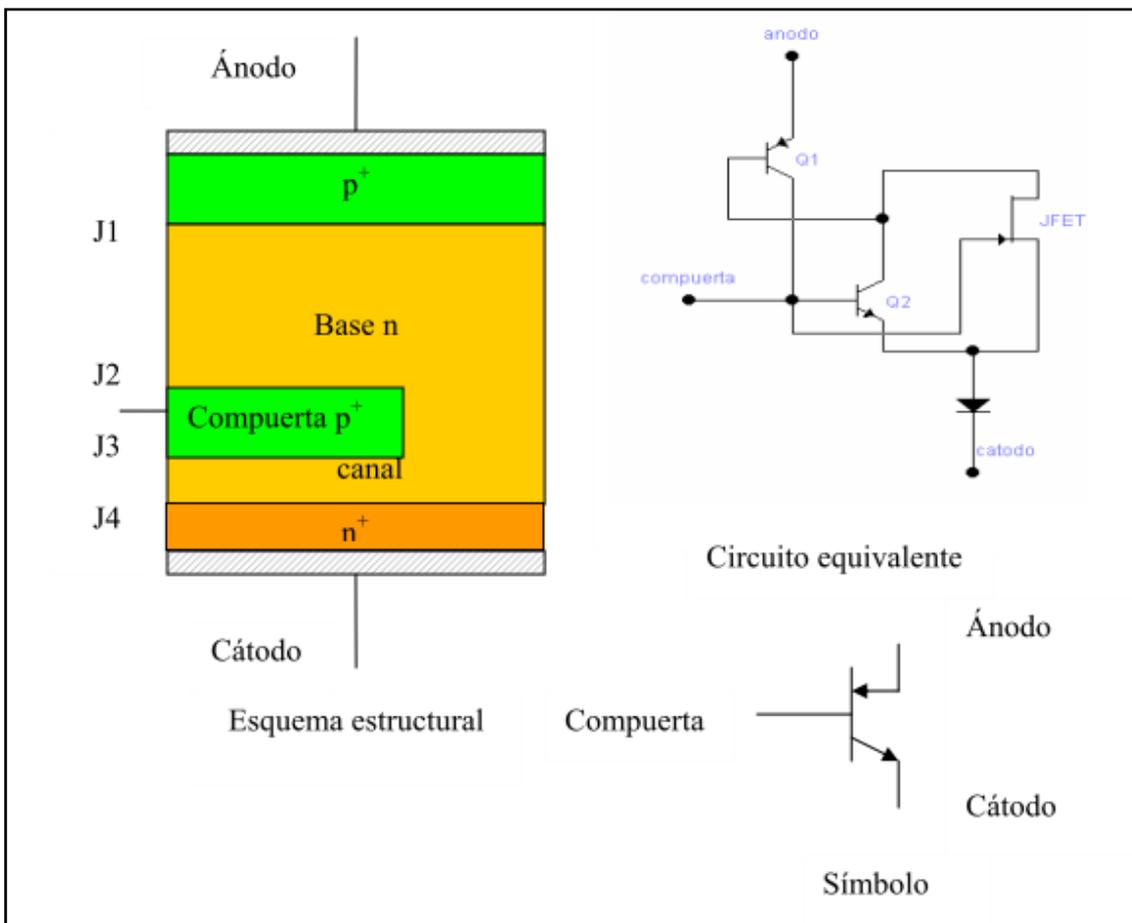


Tiristor de conducción inversa

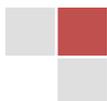


TIRISTORES DE INDUCCIÓN ESTÁTICA (SITH)

El SITH, llamado también diodo controlado-limado (FCD), fue introducido por Tezner en la década de 1960. Es un dispositivo de portadores minoritarios por lo cual tiene baja resistencia o baja caída de tensión en sus extremos cuando está activo o conduciendo la corriente. Tiene grandes velocidades de conmutación de 1 a 6 μ seg, con capacidades de dv/dt y di/dt elevadas. Se lo puede fabricar para soportar tensiones elevadas de hasta 2500 V con corrientes de hasta 500 A. Este dispositivo, tiene una alta sensibilidad al proceso de fabricación y pequeñas perturbaciones en su manufactura, producen grandes cambios en sus características. Con la llegada de la tecnología de carburo de silicio (SiC) se ha fabricado un SITH con una tensión de bloqueo directo de 300 V. En la siguiente figura, se representa un corte transversal de este dispositivo, su símbolo y su circuito eléctrico equivalente:



El funcionamiento de este dispositivo es el siguiente: Se enciende con un pulso de tensión positivo entre compuerta y cátodo. Esto inicia la conducción de



corriente en el diodo pin ($p + nn +$), que inyecta electrones del cátodo ($n +$) a la base “n”, entre la compuerta ($p +$) y el cátodo ($n +$), que se difunden por el canal, modulando su resistividad, haciéndolo mas conductor. Cuando estos electrones llegan a la juntura “J1”, el ánodo ($p +$), comienza a inyectar huecos en la base, proporcionando la corriente de base del transistor Q2. Al aumentar la corriente de base, Q2 pasa a la saturación, haciendo que la juntura “J2” se polarice directamente y provocando que el SITH, se active completamente, todo esta acción, en un periodo muy breve.

La compuerta ($p +$) y la región del canal, toma la forma de un transistor de efecto de campo de juntura (JFET), proporcionando la corriente de base del transistor Q1 ($p + n p +$).

Debido al alto contenido de dopantes de la compuerta $p +$, no pasan electrones a la compuerta. Una parte de la corriente de huecos pasan por la compuerta $p +$ y por el canal directamente al cátodo. El resto de la corriente de huecos pasa por la compuerta $p +$ hacia el canal, como corriente de compuerta del JFET en modo bipolar (BMFET). La corta distancia entre cátodo y compuerta da como resultado una concentración uniforme y grande de portadores en esa región, haciendo que la caída de tensión sea despreciable.

El apagado del SITH, se logra aplicando a la compuerta un pulso negativo de voltaje.

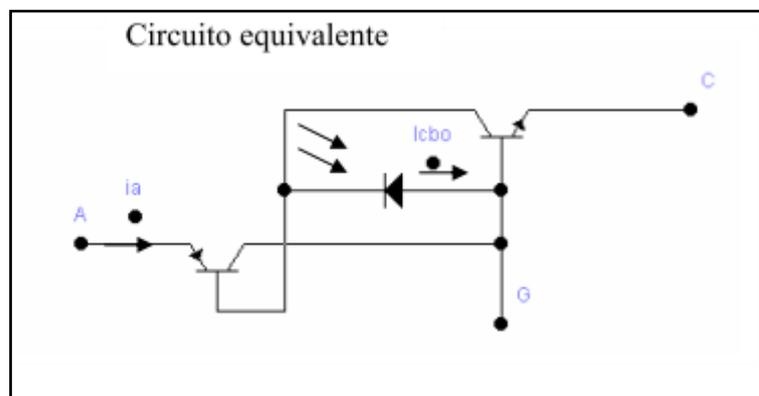
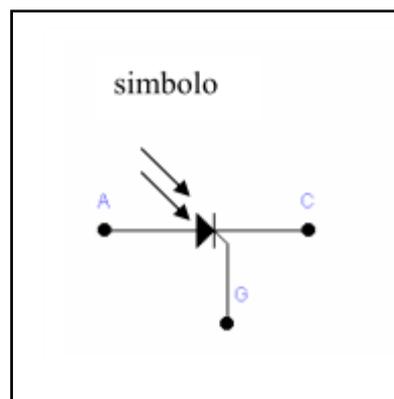
Esto provoca una capa de agotamiento en torno a la compuerta, creando una barrera de potencial en el canal, que lo hace mas angosto, eliminando el exceso de portadores. Si el voltaje, aplicado a la compuerta es suficientemente grande, el canal queda desprovisto de portadores de carga, anulando la corriente entre el ánodo y cátodo, desactivando al SITH.



RECTIFICADORES CONTROLADOS DE SILICIO ACTIVADOS POR LUZ (LASCR).

Este dispositivo se activa mediante radiación directa sobre el disco de silicio provocada con luz. Los pares electrón-hueco que se crean debido a la radiación producen la corriente de disparo bajo la influencia de un campo eléctrico. La estructura de compuerta se diseña a fin de proporcionar la suficiente sensibilidad para el disparo, a partir de fuentes luminosas prácticas (por ejemplo, LED y para cumplir con altas capacidades de di/dt y dv/dt).

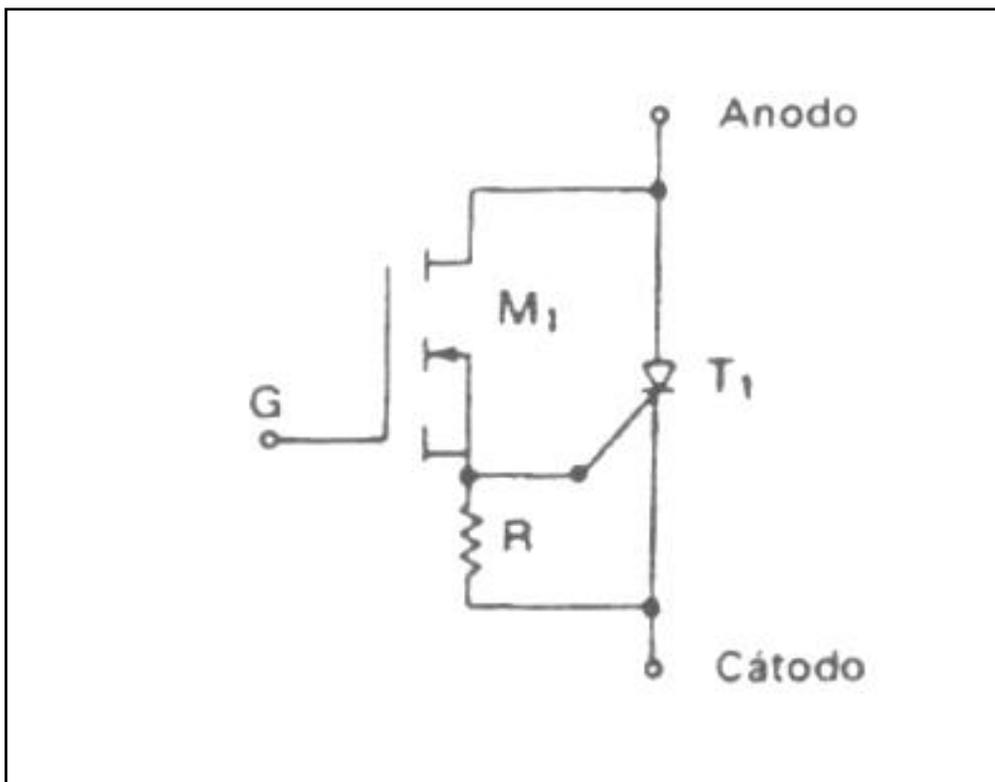
Los LASCR se utilizan en aplicaciones de alto voltaje y corriente [por ejemplo, transmisión de cd de alto voltaje (HVDC) y compensación de potencia reactiva estática o de volt-amperes reactivos (VAR)]. Un LASCR ofrece total aislamiento eléctrico entre la fuente de disparo luminoso y el dispositivo de conmutación de un convertidor de potencia, que flota a un potencial tan alto como unos cuantos cientos de kilovoltios. La especificación de voltaje de un LASCR puede llegar tan alto como 4 kv a 1500 A, con una potencia de disparo luminoso de menos de 100mw. El di/dt típico es 250 A/m s y el dv/dt puede ser tan alto como 2000v/m s.



TIRISTORES CONTROLADOS POR FET (FET-CTH).

Un dispositivo FET-CTH combina un MOSFET y un tiristor en paralelo, tal y como se muestra en la figura siguiente. Si a la compuerta del MOSFET se le aplica un voltaje suficiente, típicamente 3v, se genera internamente una corriente de disparo para el tiristor. Tiene una alta velocidad de conmutación, un di/dt alto y un dv/dt alto.

Este dispositivo se puede activar como los tiristores convencionales, pero no se puede desactivar mediante control de compuerta. Esto serviría en aplicaciones en las que un disparo óptico debe utilizarse con el fin de proporcionar un aislamiento eléctrico entre la señal de entrada o de control y el dispositivo de conmutación del convertidor de potencia.



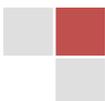
TIRISTORES CONTROLADOS POR MOS (MCT).

Un tiristor controlado por MOS (MCT) combina las características de un tiristor regenerativo de cuatro capas y una estructura de compuerta MOS. El circuito equivalente se muestra en la figura siguiente (b) y el símbolo correspondiente en la (a). La estructura NPNP se puede representar por un transistor NPN Q_1 y con un transistor Q_2 . La estructura de compuerta MOS se puede representar por un MOSFET de canal p M_1 y un MOSFET de canal n M_2 .

Debido a que se trata de una estructura NPNP, en vez de la estructura PNPN de un SCR normal, el ánodo sirve como la terminal de referencia con respecto a la cual se aplican todas las señales de compuerta. Supongamos que el MCT está en estado de bloqueo directo y se aplica un voltaje negativo V_{GA} . Un canal, p (o una capa de inversión) se forma en el material dopado n, haciendo que los huecos fluyan lateralmente del emisor p E_2 de Q_2 (fuente S_1 del MOSFET M_1 del canal p) a través del canal p hacia la base p B_1 de Q_1 (que es drenaje D_1 del MOSFET M_1 , del canal p). Este flujo de huecos forma la corriente de base correspondiente al transistor npn Q_1 . A continuación el emisor n+ E_1 de Q_1 , inyecta electrones, que son recogidos en la base n B_2 (y en el colector n C_1) que hace que el emisor p E_2 inyecte huecos en la base n B_2 , de tal forma que se active el transistor PNP Q_2 y engancha al MCT. En breve, un V_{GA} de compuerta negativa activa al MOSFET M_1 canal p, proporcionando así la corriente de base del transistor Q_2 .

Supongamos que el MCT está en estado de conducción, y se aplica un voltaje positivo V_{GA} . Se forma entonces un canal n en el material contaminado p, haciendo que fluyan lateralmente electrones de la base n B_2 de Q_2 (fuente S_2 del MOSFET M_2 del canal n) a través del canal n del emisor n+ fuertemente contaminado de Q_1 (drenaje D_2 del MOSFET M_2 del canal n+). Este flujo de electrones desvía la corriente de base del transistor PNP Q_2 de tal forma que su unión base-emisor se desactiva, y ya no habrá huecos disponibles para recolección por la base p B_1 de Q_1 (y el colector p C_2 de Q_2). La eliminación de esta corriente de huecos en la base p B_1 , hace que se desactive el transistor NPN Q_1 , y el MCT regresa a su estado de bloqueo. En breve, un pulso positivo de compuerta V_{GA} , desvía la corriente que excita la base de Q_1 , desactivando por lo tanto el MCT.

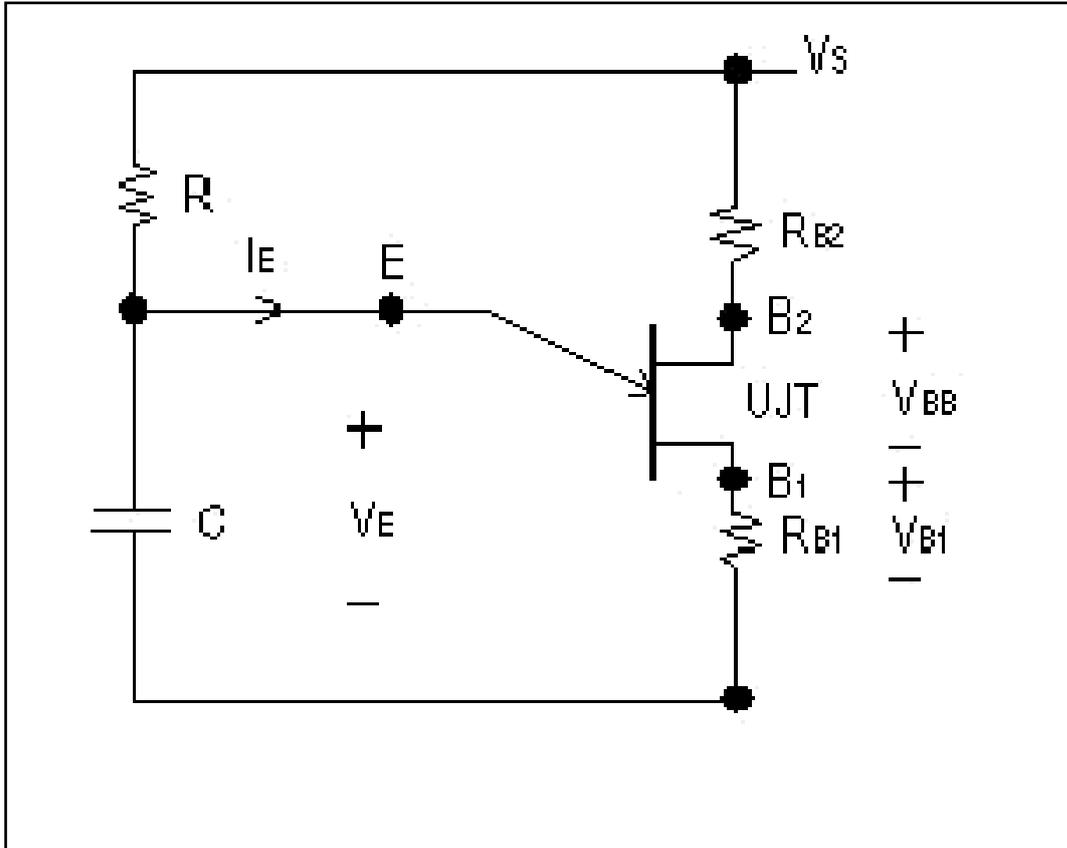
El MCT se puede operar como dispositivo controlado por compuerta, si su corriente es menor que la corriente controlable pico. Intentar desactivar el MCT a corrientes mayores que su corriente controlable pico de especificación, puede provocar la destrucción del dispositivo. Para valores más altos de corriente, el MCT debe ser conmutado como un SCR estándar. Los anchos de pulso de la compuerta no son críticos para dispositivos de corrientes pequeñas. Para corrientes mayores, el ancho del pulso de desactivación debe ser mayor. Además, durante la desactivación, la compuerta utiliza una corriente pico. En muchas aplicaciones, incluyendo inversores y pulsadores, se requiere, de un



TRANSISTOR MONOUNION (UJT).

El transistor mono unión (UJT) se utiliza generalmente para generar señales de disparo en los SCR. En la fig.5 se muestra un circuito básico de disparo UJT. Un UJT tiene tres terminales, conocidas como emisor E, base1 B1 y base2 B2. Entre B1 y B2 la mono unión tiene las características de una resistencia ordinaria (la resistencia entre bases R_{BB} teniendo valores en el rango de 4.7 y 9.1 K). Cuando se aplica el voltaje de alimentación V_s en cd, se carga el capacitor C a través de la resistencia R, dado que el circuito emisor del UJT está en estado abierto. La constante de tiempo del circuito de carga es $T_1=RC$. Cuando el voltaje del emisor V_E , el mismo que el voltaje del capacitor llega a un valor pico V_p , se activa el UJT y el capacitor se descarga a través de R_{B1} a una velocidad determinada por la constante de tiempo $T_2=R_{B1}C$. T_2 es mucho menor que T_1 . Cuando el voltaje del emisor V_E se reduce al punto del valle V_v , el emisor deja de conducir, se desactiva el UJT y se repite el ciclo de carga.

El voltaje de disparo V_{B1} debe diseñarse lo suficientemente grande como para activar el SCR. El periodo de oscilación, T , es totalmente independiente del voltaje de alimentación V_s y está dado por: $T = 1/f = RC \ln 1/1-n$

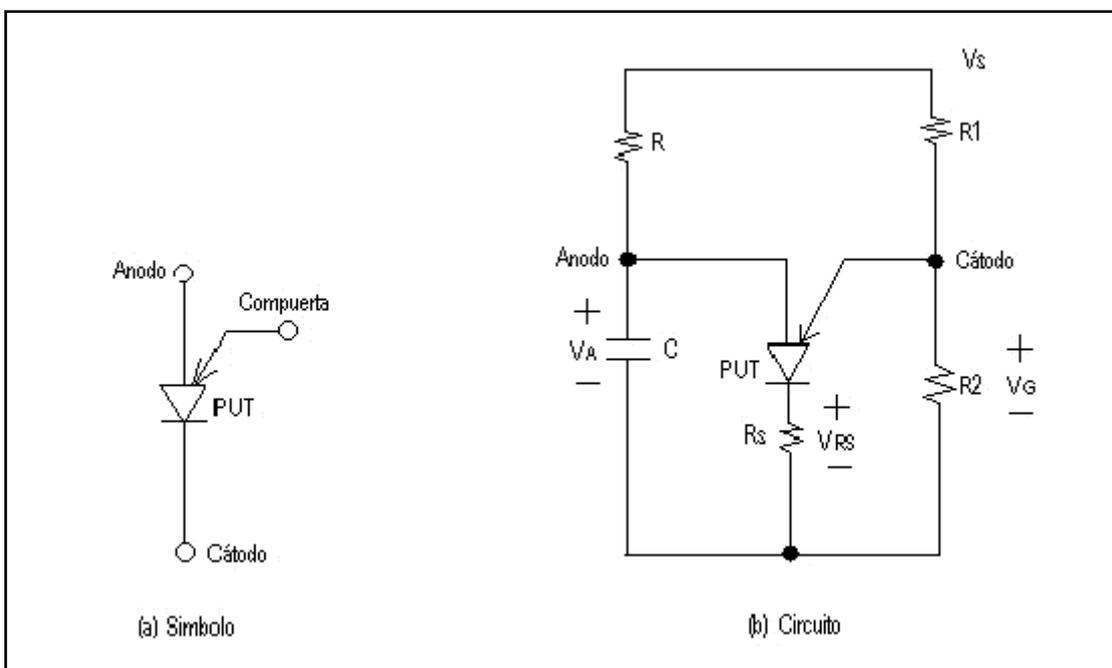


TRANSISTOR MONOUNION PROGRAMABLE. (PUT)

El transistor mono unión programable (PUT) es un pequeño tiristor que aparece en la fig.7. Un PUT se puede utilizar como un oscilador de relajación, tal y como se muestra en la fig.7b. El voltaje de compuerta V_G se mantiene desde la alimentación mediante el divisor resistivo del voltaje R_1 y R_2 , y determina el voltaje de punto de pico V_p . En el caso del UJT, V_p está fijo para un dispositivo por el voltaje de alimentación de cd, pero en un PUT puede variar al modificar el valor del divisor resistivo R_1 y R_2 . Si el voltaje del ánodo V_A es menor que el voltaje de compuerta V_G , el dispositivo se conservará en su estado inactivo, pero si el voltaje de ánodo excede al de compuerta en una caída de voltaje de diodo V_D , se alcanzará el punto de pico y el dispositivo se activará. La corriente de pico I_p y la corriente del punto de valle I_v dependen de la impedancia equivalente en la compuerta $R_G = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ y del voltaje de alimentación en cd V_s . N general R_k está limitado a un valor por debajo de 100 Ohms.

R y C controlan la frecuencia junto con R_1 y R_2 . El periodo de oscilación T está dado en forma aproximada por:

$$T = 1/f = RC \ln(V_s/V_s - V_p) = RC \ln(1 + R_2/R_1)$$



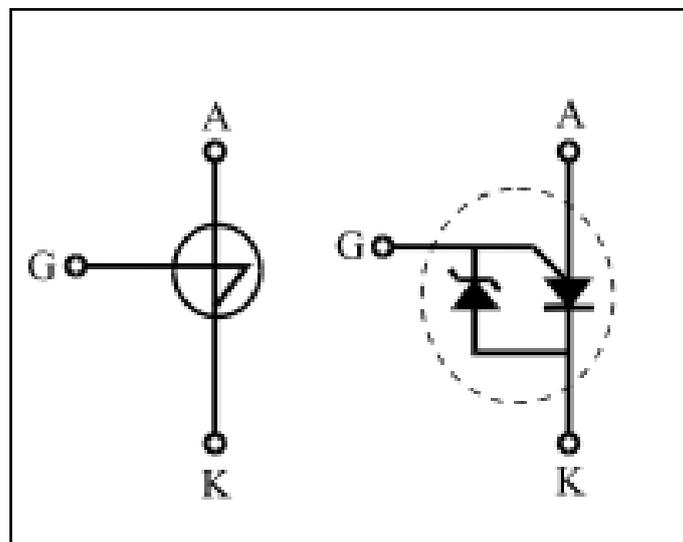
CONMUTADOR UNILATERAL DE SILICIO (SUS)

SUS (Silicon Unilateral Switch): combinación de un tiristor con puerta anódica y un diodo Zener entre puerta y cátodo.

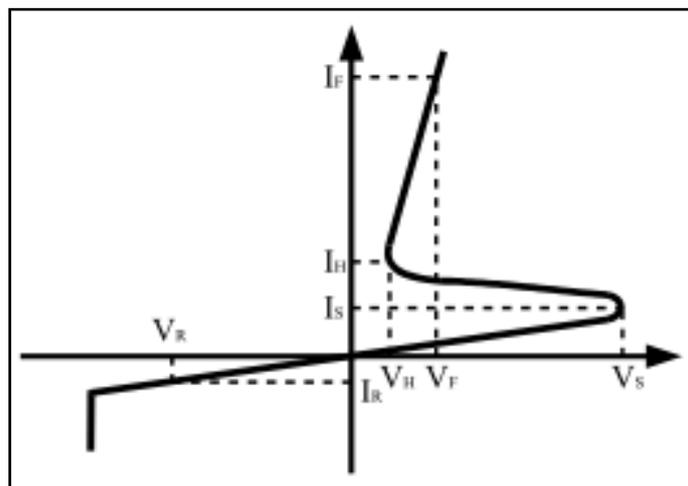
En la figura 2 se representa el símbolo, circuito equivalente y la curva característica.

Se usa para el disparo de tiristores. Su principal parámetro es $V_S \approx 6$ y 10 V.

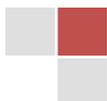
Se dispara a una tensión fija, V_{zener} , y su corriente I_S está muy cercana a I_H . Sincronización mediante impulsos en puerta del SUS.



Símbolo, circuito equivalente

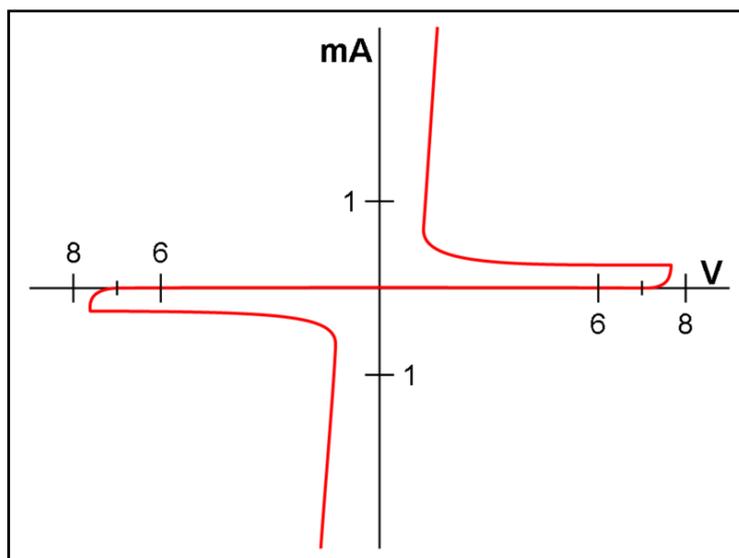
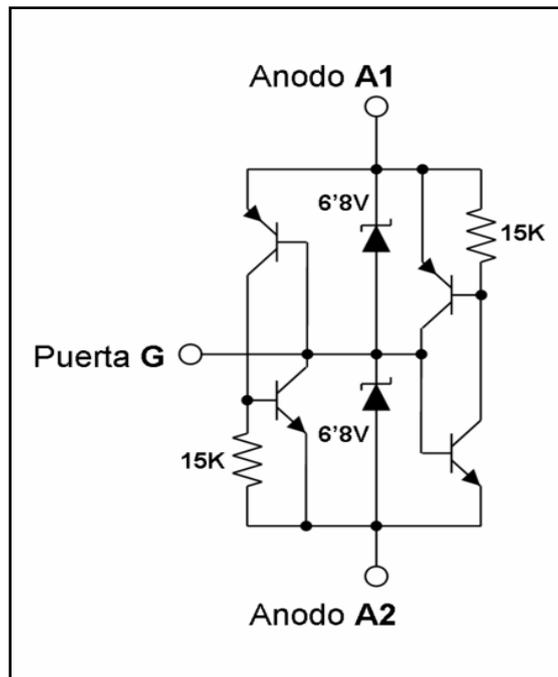


Curva característica de un SUS

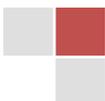


INTERRUPTOR BILATERAL DEL SILICIO (SBS)

Se llama SBS (Silicon Bilateral Switch) a una clase de tiristor bidireccional. Está formado por dos SUS conectados en anti paralelo. A diferencia de otros tiristores, el SBS, desde un punto de vista tecnológico, no es una versión mejorada del diodo npnp, sino que es un circuito integrado que incorpora diodos Zener conectados a la puerta, transistores y resistencias. Esto le da la ventaja de poder aparear estrechamente los componentes, consiguiendo una asimetría en la tensión de disparo inferior a medio voltio. Aunque funciona como un dispositivo de dos puertas, se ha incorporado un electrodo de puerta para una mayor flexibilidad en el uso del dispositivo.



Característica V-I de un SBS. La puerta está desconectada.



COMPARACIÓN DE POTENCIA Y VELOCIDAD DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS

La figura de abajo enseña una comparación de las velocidades relativas y las capacidades de manejo de potencia de los tiristores SCR y GTO y los transistores de potencia. Los SCR sirven, sin duda, para operar con mayor potencia que cualquiera de los otros dispositivos. Los tiristores GTO pueden operar a una potencia casi tan alta que la de los SCR, pero mucho más rápido que éstos. Finalmente, los transistores de potencia pueden manejar menos potencia que cualquier tipo de tiristor, pero pueden accionar diez veces más rápido que éstos o aun más.

