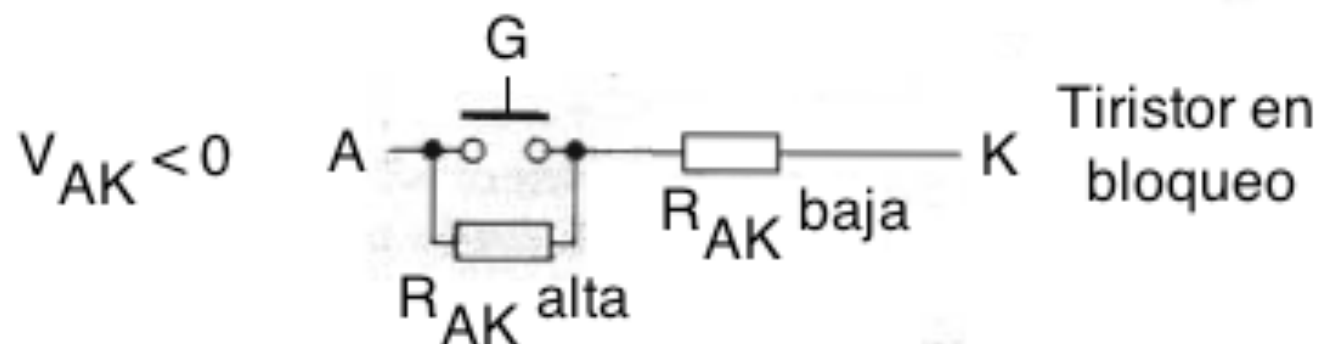
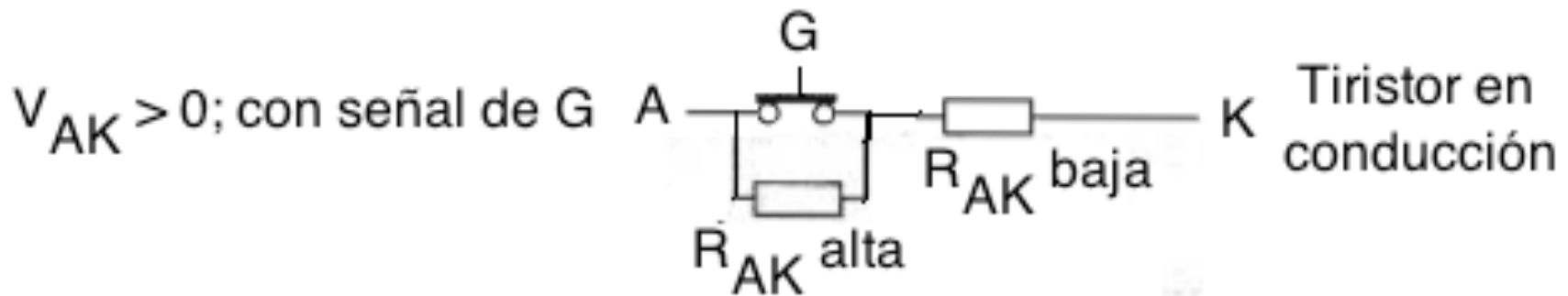
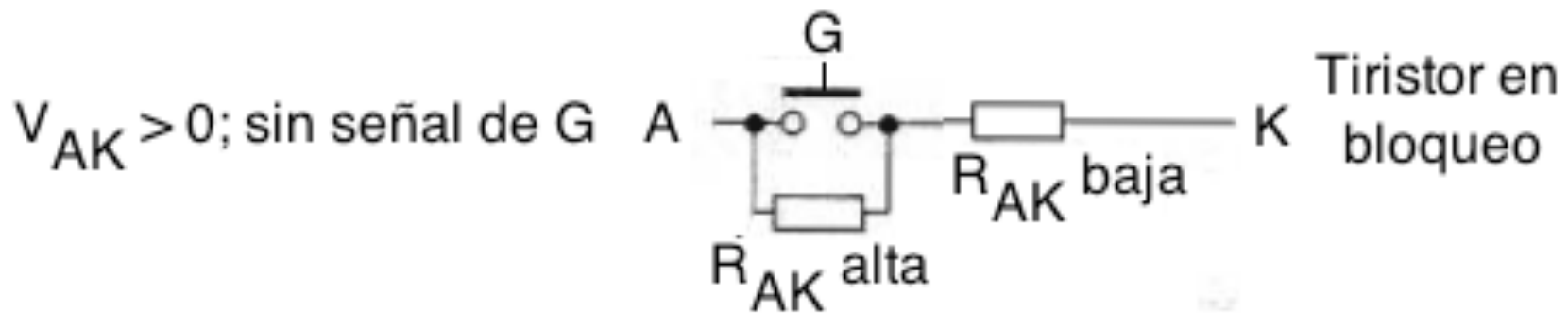


II.- Dispositivos Controlados en encendido (o "semicontrolados"): Tiristores o Rectificadores Controlados de Silicio (SCR, "Silicon Controlled Rectifier")

Los tiristores ("thyristors") o rectificadores controlados de silicio (SCR, "Silicon Controlled Rectifier") son dispositivos de tres terminales, ánodo, cátodo y compuerta, conformados por cuatro regiones semiconductoras, dos de tipo P y dos de tipo N.

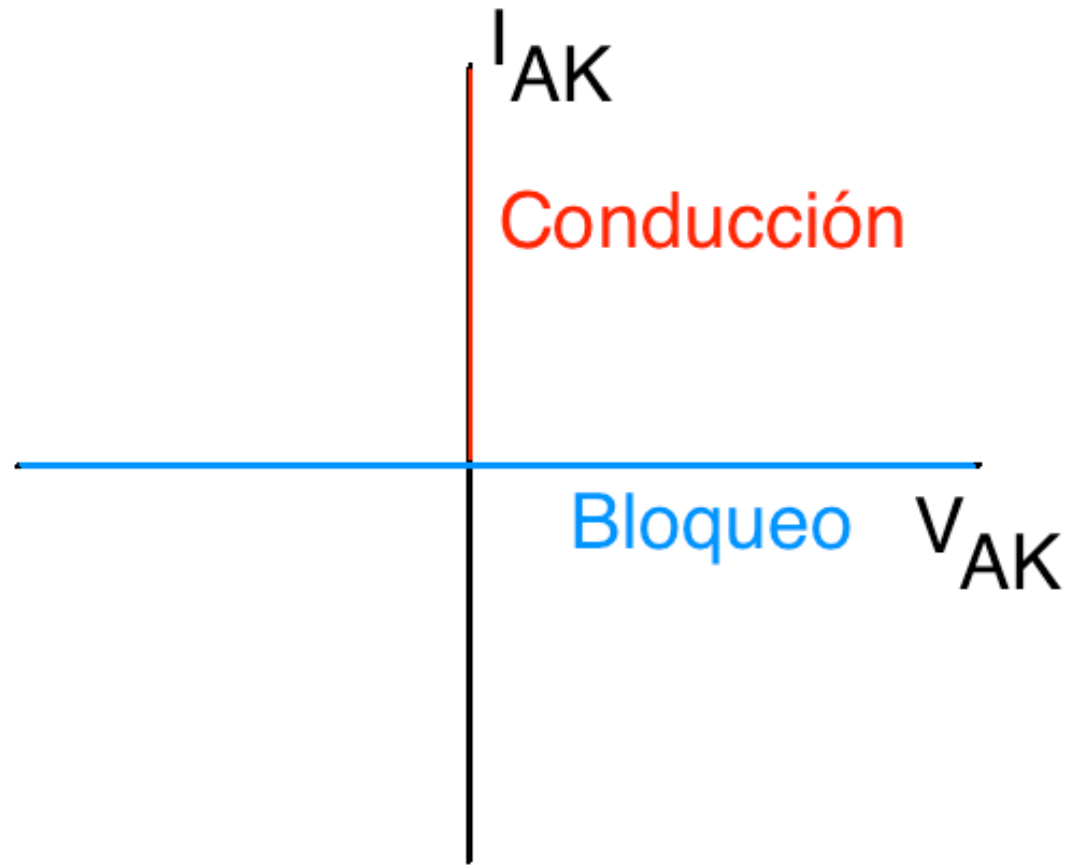
Los tiristores permiten la circulación unidireccional de corriente del terminal de ánodo al de cátodo cuando el terminal de ánodo es positivo respecto al cátodo, se ha aplicado un pulso de disparo en el terminal de compuerta y la corriente AK ha alcanzado el valor de la corriente de enganche.



Esquema de operación del tiristor.

Una vez que se inicia la conducción, el tiristor conducirá hasta que la corriente A_K se reduzca por debajo del valor de sostenimiento del dispositivo.

La gran mayoría de los tiristores disponibles en el mercado están fabricados en base a la tecnología del Si, pero ya se están ofreciendo en el mercado tiristores construidos en base a carburo de silicio (SiC).

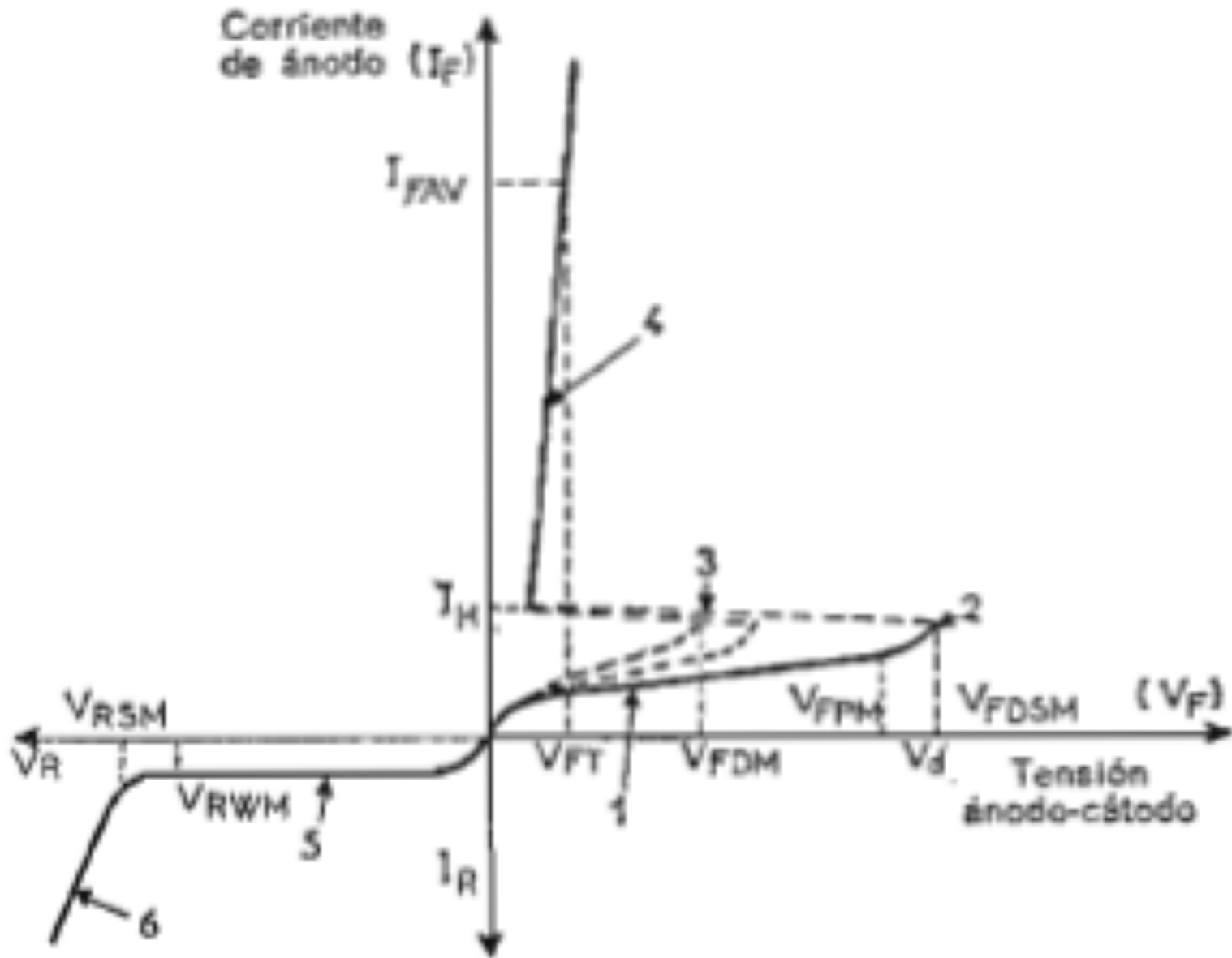


Características V/I de un tiristor ideal.

El tiristor ideal es capaz de bloquear cualquier tensión AK, sin que exista corriente de fuga, de conducir cualquier cantidad de corriente AK sin disipar energía (caída en conducción nula) y de cambiar instantáneamente de corte a conducción y de conducción a corte.

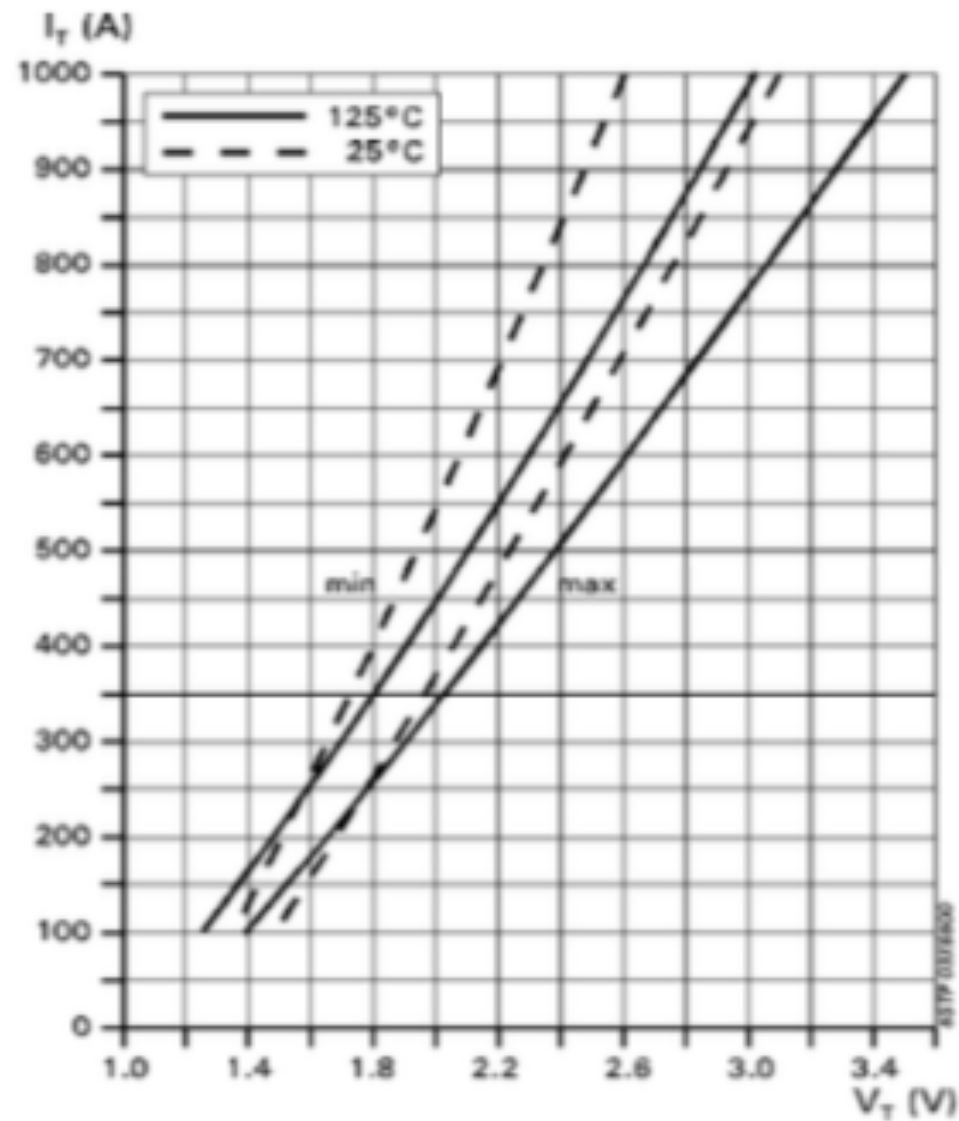
Por supuesto el tiristor ideal no existe y todo tiristor real tiene las siguientes limitaciones:

- 1.- Existe un valor de la tensión AK positiva, el voltaje de ruptura directa, V_{FDSM} , que fuerza al tiristor a entrar en conducción (2), aunque no se aplique el pulso de disparo por la compuerta.



Características VAK/IAK de un SCR típico.

- 2.- Existe un valor de la tensión AK negativa, el voltaje de ruptura inversa, V_{RSM} que fuerza al tiristor a entrar en avalancha inversa (6). Este proceso ocurre con una tensión igual o mayor a V_{RSM} , y es esencialmente destructivo debido al fuerte calentamiento que se genera, así que debe ser impedido bajo cualquier condición previsible de operación del equipo.
- 3.- Mientras el tiristor está en bloqueo, sometido a una tensión AK distinta de cero, circula una corriente AK de fuga "pequeña" (puede ser centenares de mA en tiristores de alta potencia), tanto en bloqueo directo (1), como en bloqueo inverso (5).
- 4.- Cuando el tiristor conduce corriente AK en directo (4), la tensión directa AK en conducción, V_{FT} , crece en función de la corriente I_{FAV} , y el dispositivo disipa potencia.

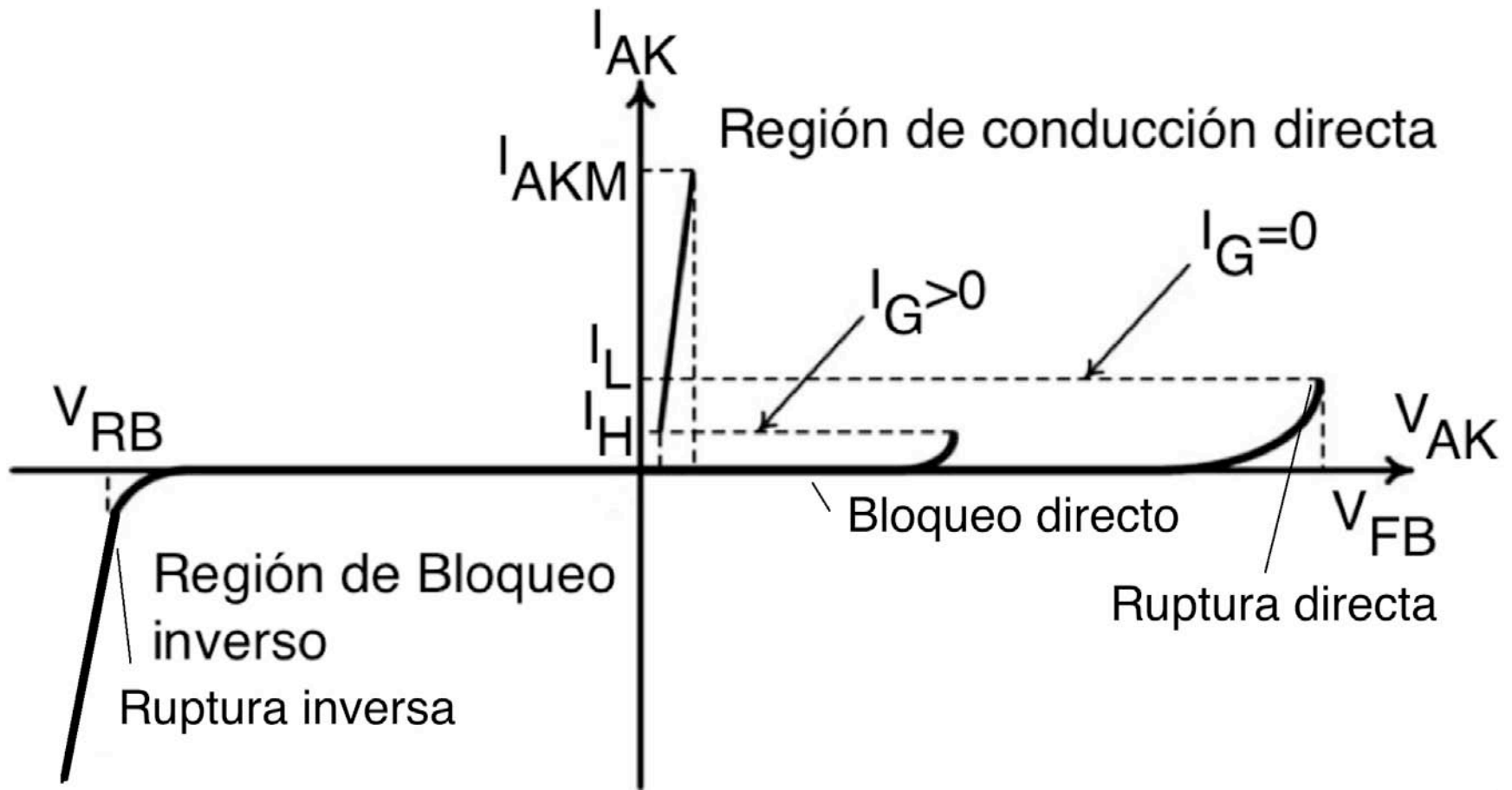


V_{AK} vs I_{AK} como función de la temperatura de juntura, tiristor 5STP 03D6500 6500V, 600A rms, cortesía ABB.

- 5.- Existe un valor máximo de la corriente AK, I_{AKM} , que el dispositivo puede conducir sin sufrir daños; operar a corrientes superiores a esta debe ser impedido bajo cualquier condición previsible de operación del equipo
- 6.- Los cambios de estado de corte a conducción y viceversa no son instantáneos.
- 7.- Para que el tiristor quede en estado de conducción es preciso que la corriente AK tenga un valor igual o mayor al de la “corriente de enganche”, I_L (“Latching current”), del dispositivo en el momento que se termine el pulso de encendido.
- 8.- El tiristor se apaga en el momento en que la corriente AK pasa por debajo del valor de su “corriente de sostenimiento”, I_H (“Holding current”).

9.- La velocidad de crecimiento de la corriente A-K debe ser menor al valor di_{AKMax}/dt del dispositivo, de lo contrario se pueden producir puntos calientes en el cristal que pueden destruirlo, así que debe ser impedido bajo cualquier condición previsible de operación del equipo

En muchos casos el análisis del circuito de potencia se realiza asumiendo unas características semi-ideales, en las cuales se desprecian las corrientes de fuga directa e inversa, y se asume que la relación V/I tanto en conducción directa como en ruptura inversa es lineal.

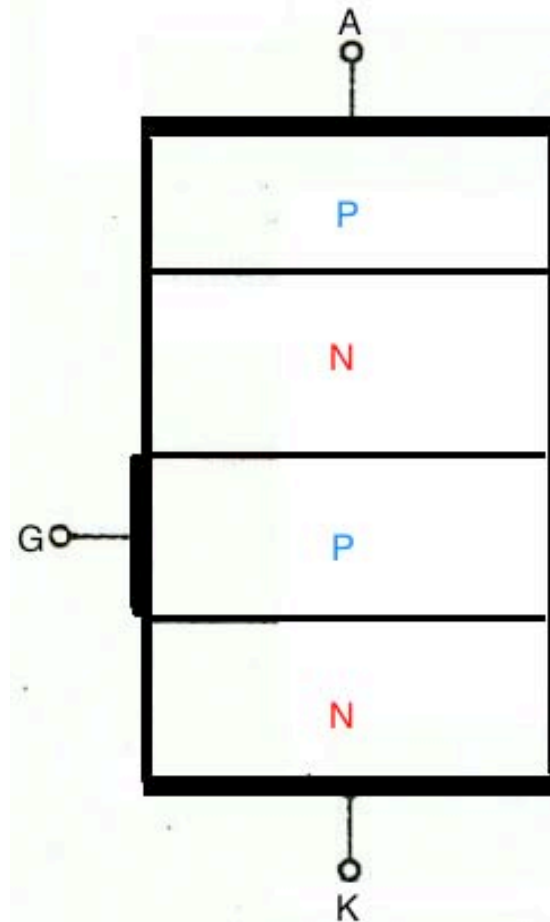


Características semi-idealizadas de un tiristor genérico.

Listado de la nomenclatura estandarizada.

Símbolo		
AV	Average	Promedio
D	Direct	Continua
F	Forward	Sentido directo
G	Gate	Compuerta
H	Hold	Mantenimiento
L	Latching	Enganche
M	Maximum	Máximo/a
N	Negative	Negativo
R (en primer lugar)	Reverse	Inversa
R (en segundo lugar)	Repetitive	Repetitivo
S	Surge	Avalancha
W	Working	Operativo

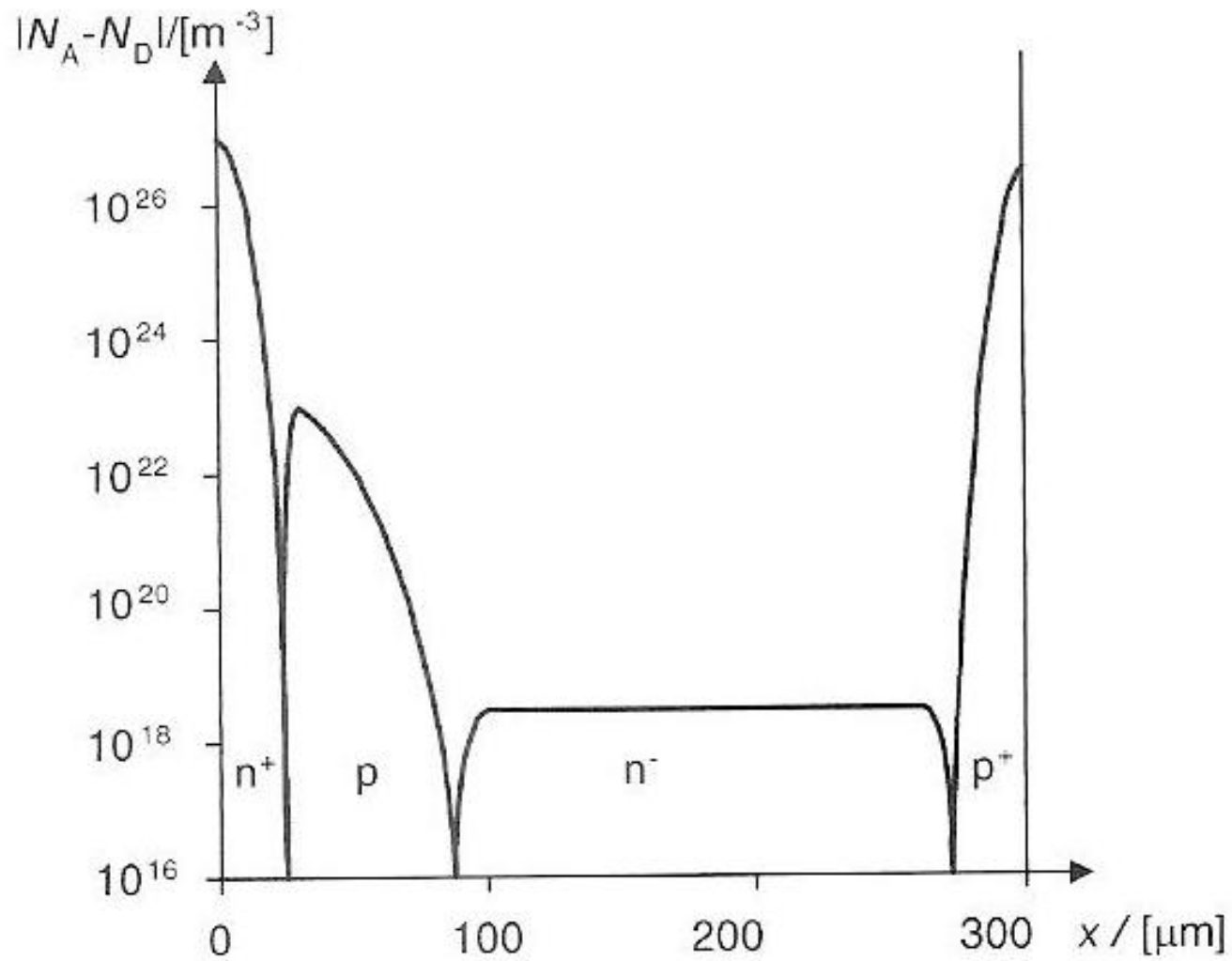
Estructuralmente el tiristor básico es un dispositivo semiconductor con cuatro capas de dopado, dos de tipo P y dos de tipo N.



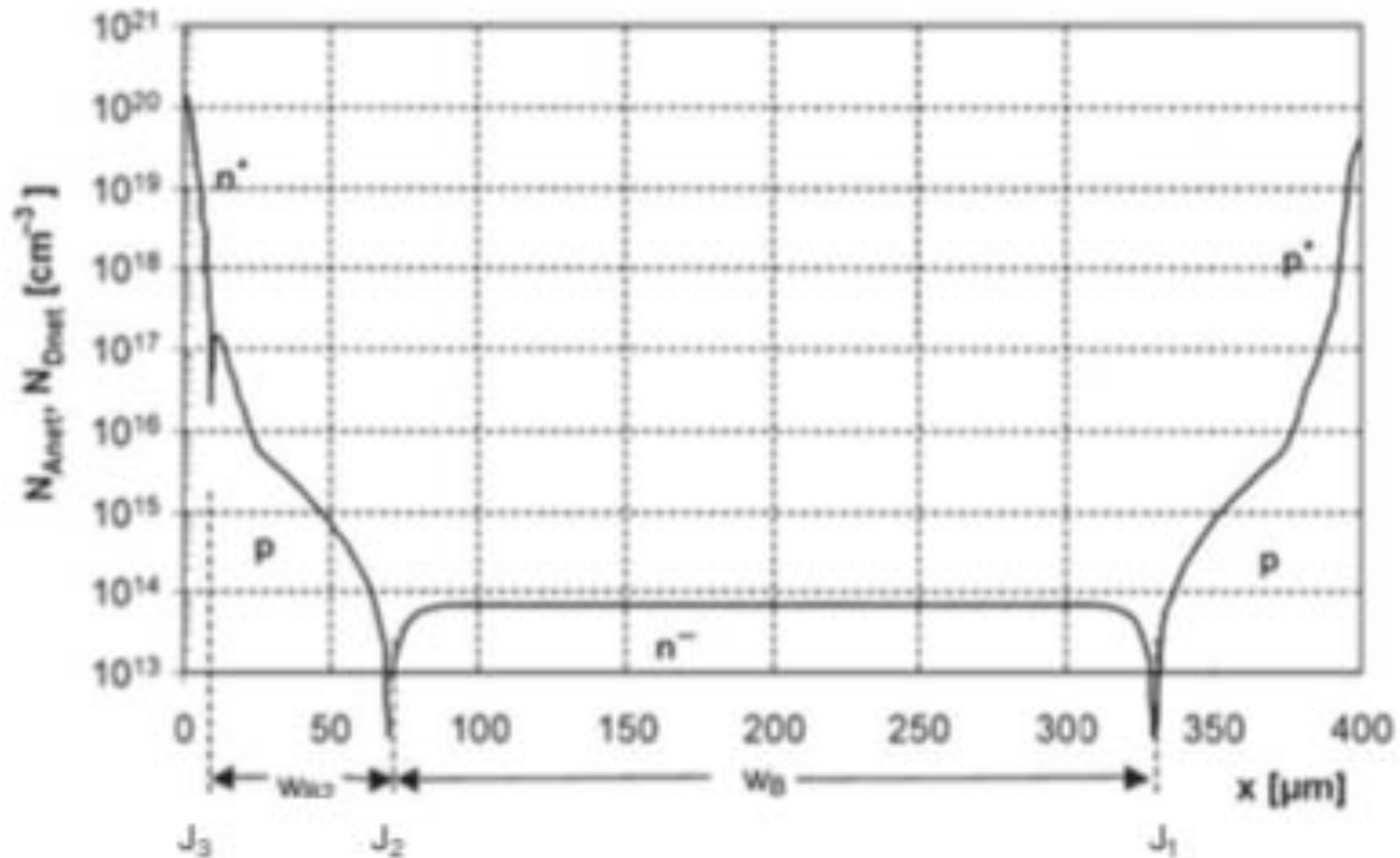
Estructura del tiristor básico.

El perfil del dopado cambia en función de las características que desea obtener el fabricante, especialmente en función del voltaje de bloqueo, pudiéndose diferenciar entre dos grandes grupos, los perfiles propios de tiristores de tensión de bloqueo media y los perfiles propios de tiristores de alta tensión de bloqueo.

Estos dos grupos se diferencian en la dimensión de la zona N- intermedia, que es mas grande en los de alta tensión, y tiene un dopado significativamente mas bajo, con una diferencia de entre cuatro y cinco órdenes de magnitud (de mas de 10^{18} a menos de 10^{14})



Perfil de dopado de un tiristor típico de propósito general, media tensión.

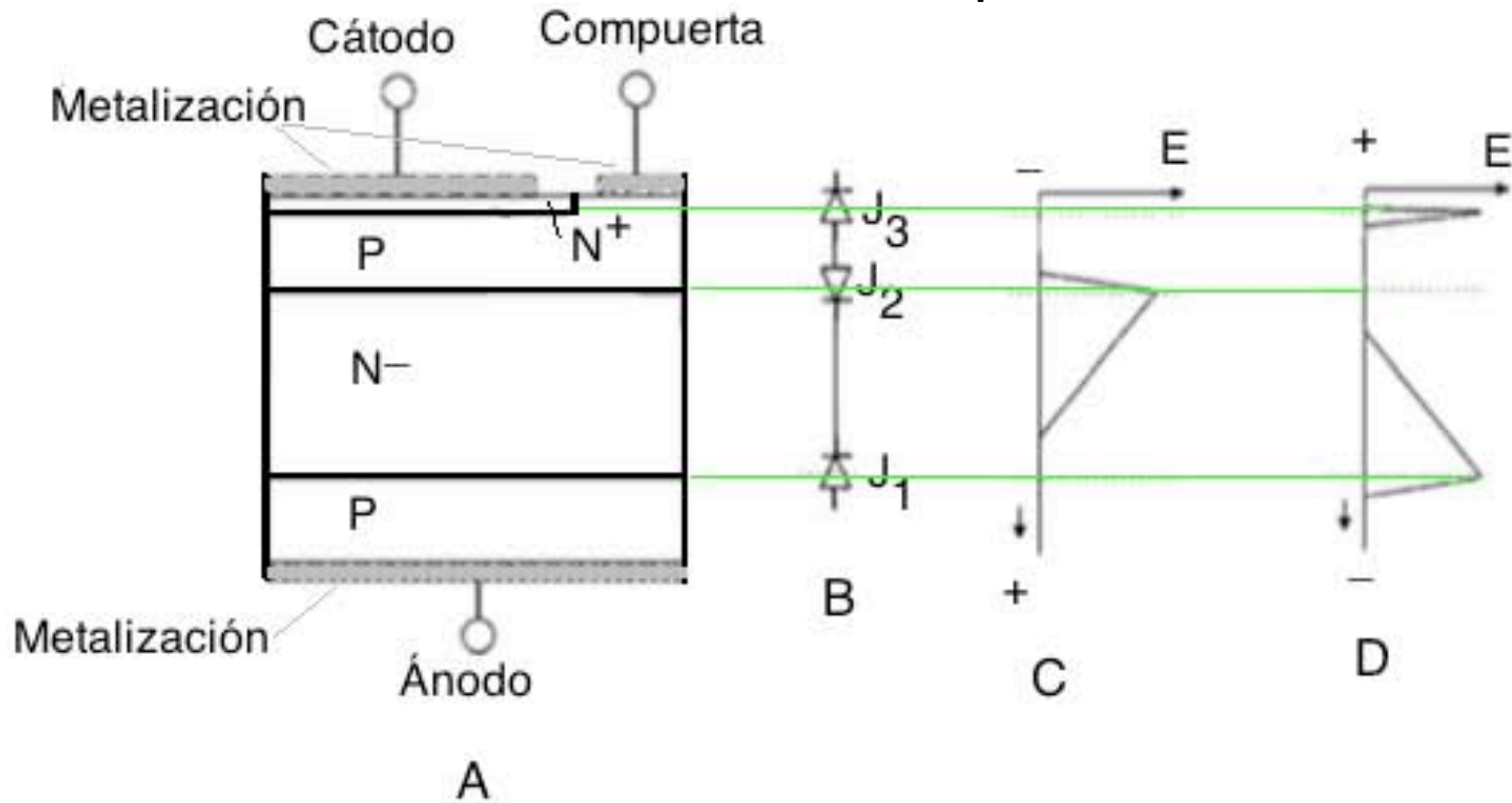


Perfil de dopado de un tiristor de alta tensión de bloqueo (1600V) mostrando el aumento de tamaño de la zona n^- en función de la tensión de bloqueo.

OPERACIÓN DEL TIRISTOR.

El funcionamiento de esta estructura de cuatro capas PNPN puede ser interpretado con dos circuitos equivalentes distintos, uno para el tiristor en condiciones de bloqueo, en base al modelo de los tres diodos o las tres junturas, y el otro para el tiristor en condiciones de entrar en conducción, con el modelo de los dos transistores.

1.- El tiristor en bloqueo



Tiristor en bloqueo:

Estructura (A), modelo equivalente de los tres diodos (B), perfil del campo en bloqueo directo (C), perfil del campo en bloqueo inverso (D).

En condiciones estacionarias de bloqueo las cuatro capas de dopado definen tres junturas tipo PN.

Cuando la tensión aplicada V_{AK} es negativa, el cátodo es positivo con respecto al ánodo, y el exceso de electrones en la región N_1 y de huecos en P_2 son atraídos respectivamente al cátodo y al ánodo.

Esto remueve los portadores libres de la región de las junturas J_1 y J_3 ; la juntura J_2 central queda polarizada en directo, pero las junturas J_1 y J_3 quedan polarizadas en inverso.

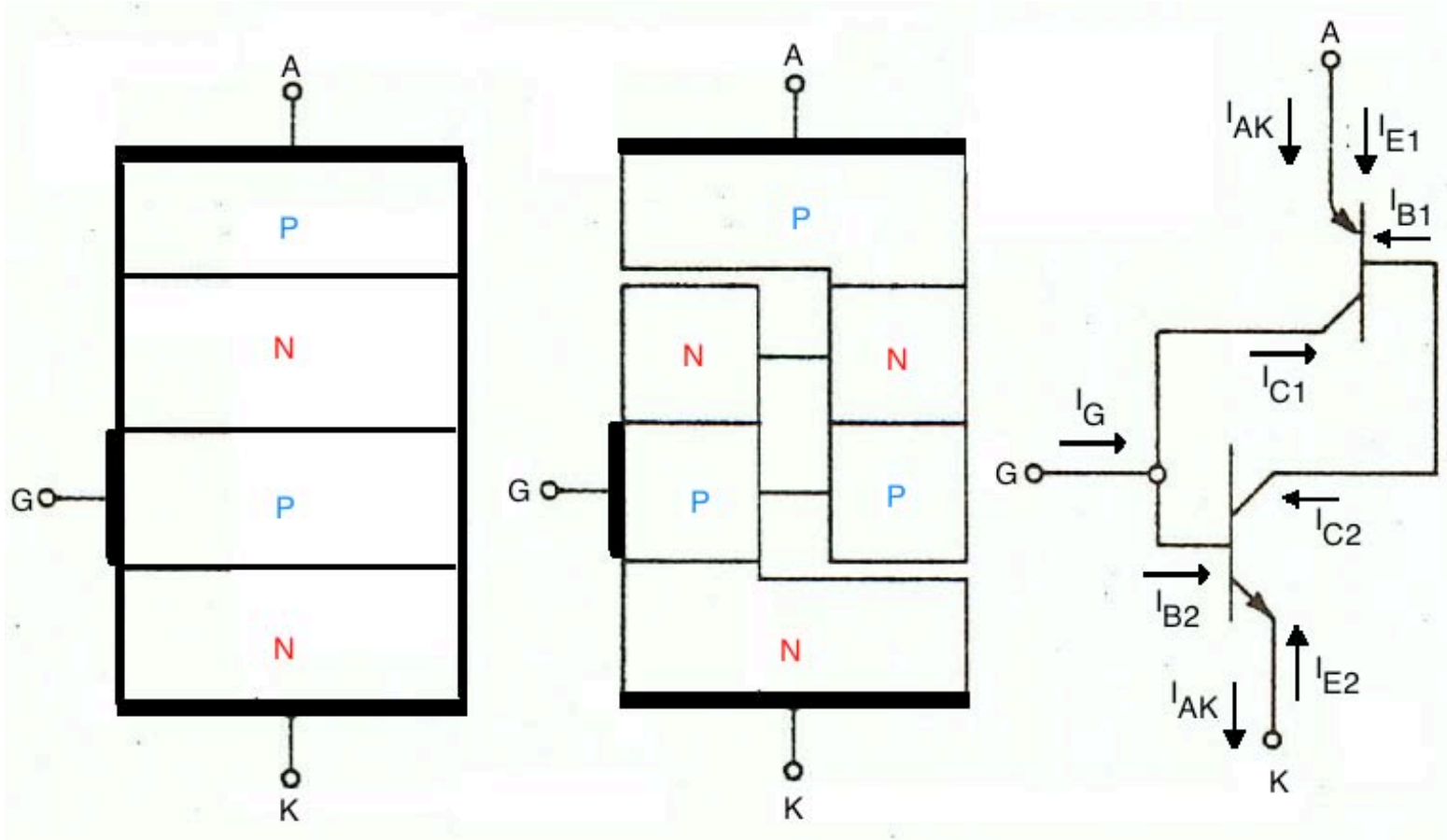
El tiristor está en estado de bloqueo inverso y solo circula la corriente de fuga de la juntura con menor tensión de bloqueo inversa entre J_1 y J_3 .

En la práctica el dispositivo se diseña para que la juntura J_3 acepte la mayor parte de la tensión de bloqueo para evitar sobre cargar la unión compuerta/cátodo.

Cuando la tensión aplicada V_{AK} es positiva, el cátodo se polariza negativo con respecto al ánodo; los huecos de P_1 y los electrones de N_2 son atraídos respectivamente al cátodo y al ánodo.

Esto polariza en directo las junturas J_1 y J_3 , pero J_2 queda polarizada en inverso. El tiristor está en estado de bloqueo directo y solo circula la corriente de fuga de la juntura J_2 .

II.- Cambio de estado a conducción.



Cambio a conducción: Estructura de cuatro capas PNPN (izquierda), corte imaginario (centro), modelo equivalente de dos transistores (derecha).

Para justificar la posibilidad de que el tiristor cambie de estado y pueda entrar en conducción, es preciso re-interpretar la estructura básica de las cuatro capas de dopado realizando un "corte mental" en la misma, y re-asignando las zonas dopadas en un nuevo modelo en el cual se definen dos transistores bipolares de juntura interconectados, uno tipo PNP y el otro tipo NPN.

La región N superior forma tanto la base del transistor PNP como el colector del NPN, luego estos dos elementos deben estar conectados en el modelo, lo mismo ocurre con la región P inferior, que forma la base del transistor NPN y el colector del PNP, elementos que también deben estar conectados en el modelo.

Aplicando las ecuaciones básicas de los dos transistores,
se tiene:

$$I = I_{E1}$$

$$I_{E1} + I_{B1} + I_{C1} = 0$$

$$I_{C1} = -\alpha_1 I_{E1} - I_{CO1} \text{ (pnp)}$$

$$I_{C2} = -\alpha_2 I_{E2} + I_{CO2} \text{ (npn)}$$

$$I_{B2} = -I_{C1}$$

$$I_{C2} = -I_{B1}$$

$$I_{E2} = -I$$

Operando:

$$I + \alpha_2 I_{E2} - I_{CO2} - \alpha_1 I_{E1} - I_{CO1} = 0$$

$$I - \alpha_2 I - I_{CO2} - \alpha_1 I - I_{CO1} = 0$$

$$I (1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{CO1} + I_{CO2}$$

$$I = \frac{I_{CO1} + I_{CO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{I_{fuga}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

$$Y, \text{ si } \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \Rightarrow I = \infty$$

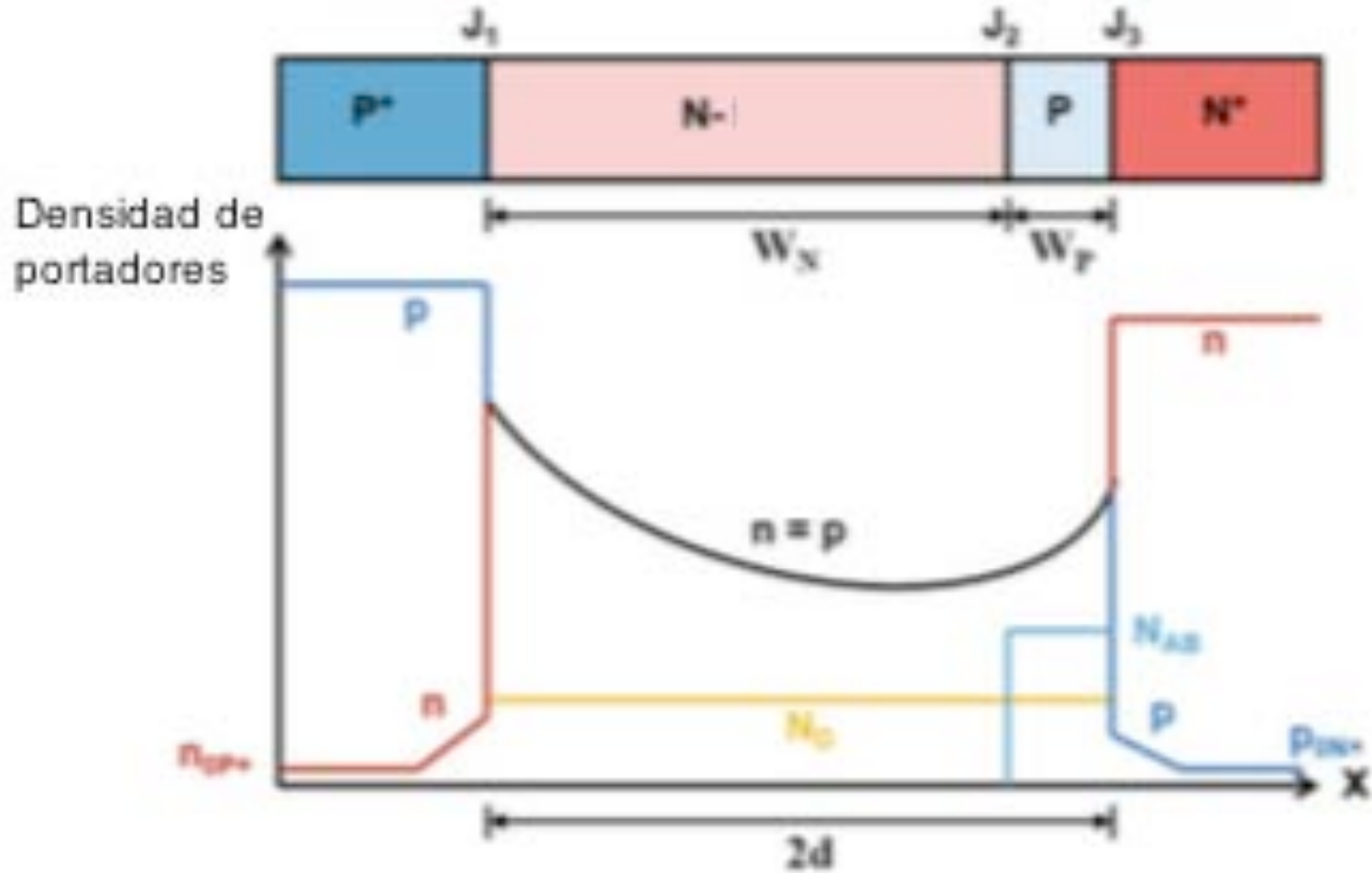
Por supuesto un componente electrónico no puede general una corriente infinita; el resultado de las ecuaciones simplemente indica que el tiristor ha perdido la capacidad de bloquear el paso de corriente.

Interpretando el proceso en función de los portadores presentes en la estructura, el paso de bloqueo a conducción (disparo) ocurre cuando, por cualquier medio, se inyecta una cantidad de portadores tipo n en la zona P inferior suficiente para que empiece a circular corriente entre ánodo y cátodo, lo que activa un efecto de multiplicación que acumula suficientes portadores libres en esa región para lograr que transitoriamente el dopado efectivo resulte tipo n.

Esto inhibe a J_2 , la juntura bloqueante, y permite la circulación de la corriente principal (corriente AK); si el valor de esta corriente es suficientemente alto (mayor o igual al valor de I_L del componente) la misma corriente AK mantiene suprimida la capacidad de bloqueo de la juntura J_2 , manteniendo el tiristor en conducción.

El proceso de avalancha de encendido trae como consecuencia que el factor de amplificación de la corriente de compuerta sea extremadamente alto, gracias a lo cual una corriente de compuerta del orden del centenar de mA es, en general, capaz de hacer entrar en conducción a los tiristores de mayor capacidad de corriente ($I_{AK} > 1000A$).

Una vez que el tiristor entra en conducción se inyectan electrones desde el terminal de cátodo (terminal emisor del transistor equivalente NPN) y huecos desde el terminal de ánodo (terminal emisor del transistor PNP equivalente); la densidad de portadores resultante es muy elevada lo que produce una caída de tensión muy pequeña, similar a la de un diodo de dimensiones equivalentes.



Distribución de los portadores en el tiristor durante el proceso de conducción directa.

Parámetros de los que depende α :

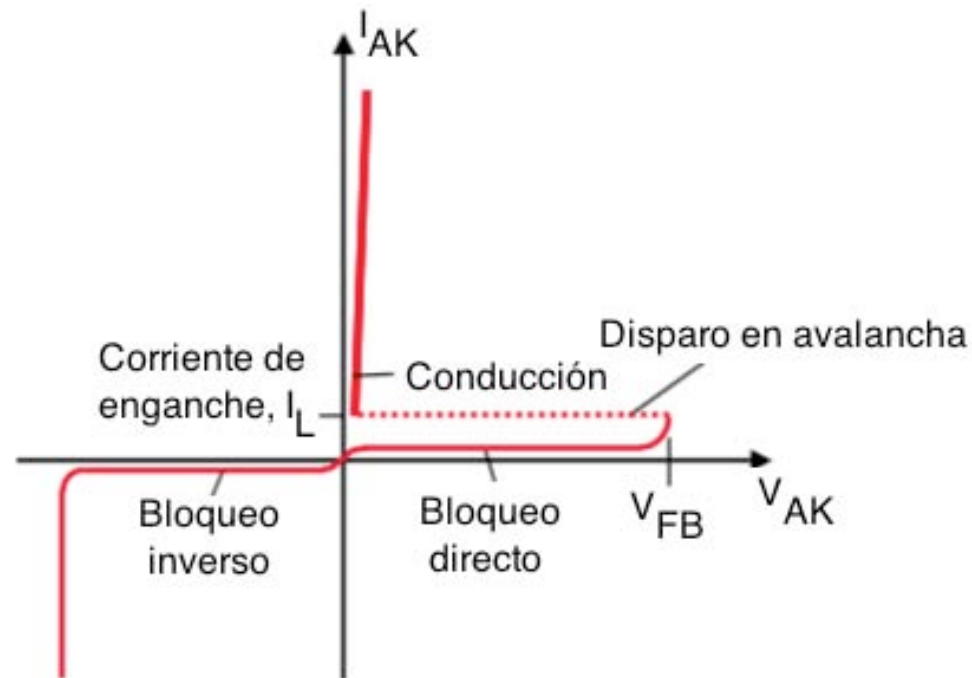
- 1.- Geometría del dispositivo (fijo por diseño).
- 2.- Nivel de dopado (fijo por diseño).
- 3.- Corriente circulante I_{AK} .

Parámetros de los que depende I_{AK} :

- 1.- Tensión ánodo-cátodo.
- 2.- Temperatura del dispositivo.
- 3.- Velocidad de variación del voltaje ánodo-cátodo (dV_{ak}/dt).
- 4.- Inyección de corriente por terminales auxiliares.

FORMAS DE PRODUCIR LA CONMUTACIÓN DE ENCENDIDO (EL “DISPARO”) DEL TIRISTOR.

1.- Sobre tensión: Aplicar una tensión ánodo-cátodo superior a la tensión de ruptura del dispositivo, V_{FB} , incrementa la intensidad del campo eléctrico hasta que se produce la avalancha de portadores y se inicia el proceso de avalancha de encendido.

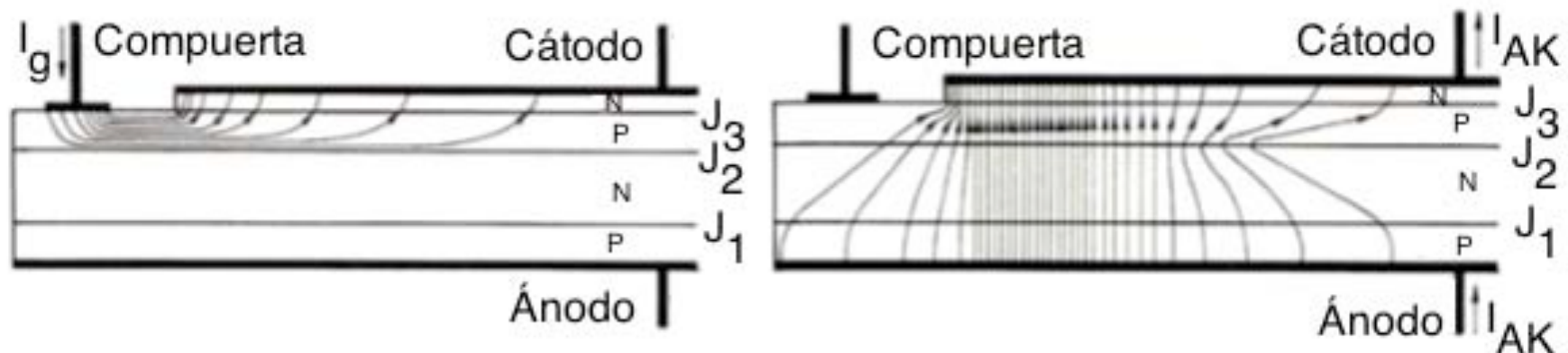


2.- Sobre calentamiento: Aplicar una temperatura superior a la temperatura de operación del dispositivo, T_{jM} , aumenta la agitación térmica hasta un nivel en el que se acumulan suficientes electrones libres en la zona de bloqueo para iniciar el proceso de avalancha de encendido.

3.- Exceso de dV_{AK}/dt : Los cambios en la tensión en la zona de bloqueo requieren que se movilice una cantidad de portadores para equilibrar el perfil de tensión en el condensador equivalente, lo que es equivalente a una corriente AK. Aplicar una tensión ánodo-cátodo cuya velocidad de variación sea superior al valor de dV_{AK}/dt crítico del dispositivo permite la acumulación en la zona de bloqueo de un número de electrones libres suficiente para iniciar el proceso de avalancha de encendido.

4.- Inyectar corriente a través del terminal auxiliar de compuerta para iniciar el proceso de avalancha de encendido de forma intencional.

La cantidad de portadores inyectados debe ser suficiente para revertir la condición de bloqueo y debe mantenerse por lo menos hasta que la corriente AK alcance o supere el valor de I_L .



Circulación de la corriente en el tiristor durante el proceso de encendido por inyección de corriente por compuerta:

- 1.-Inyección del pulso de corriente de compuerta (izquierda).
- 2.-Establecimiento de la corriente principal AK (derecha).

EFFECTO COMBINADO DE LAS CUATRO FORMAS DE DISPARO.

En general las tres primeras formas de disparo son indeseadas, ya que hacen perder el control sobre el estado del tiristor.

La cuarta forma está en principio bajo el control del usuario, y es la forma que se considera como el medio normal de lograr el disparo controlado; sin embargo, si el pulso de corriente es producido por causas accidentales, por ejemplo por la inyección de ruido eléctrico en los terminales de compuerta-cátodo, esta forma de disparo también será accidental.

Dado que el proceso de encendido directo está acompañado de una caída drástica de la tensión AK, un disparo accidental en si mismo no causa daño al tiristor, pero la operación del dispositivo fuera de secuencia puede producir fallas catastróficas en el equipo del cual forma parte el tiristor disparado por accidente.

Es función primordial del diseñador tomar todas las medidas necesarias para evitar todo disparo accidental bajo cualquier condición previsible de operación del equipo.

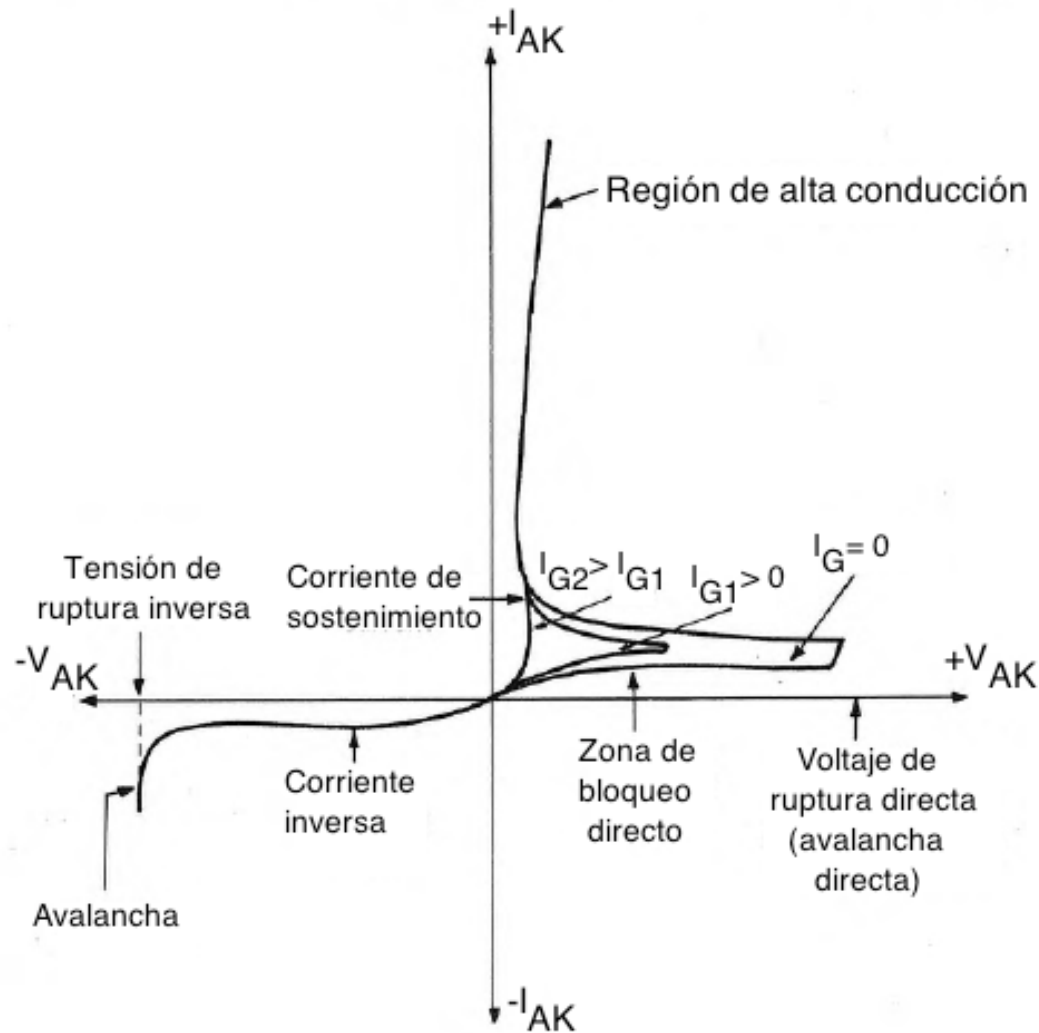
Para prevenir los disparos accidentales debe tomarse en cuenta que las cuatro formas de disparo actúan en forma concurrente, y se refuerzan en un efecto combinado, lo que puede producir un disparo accidental “multi-causal”.

Por ejemplo, un aumento en la temperatura de juntura reduce el valor de tensión AK que produce el disparo directo, reduce la cantidad de corriente de compuerta necesaria para producir el disparo amplificando el efecto del ruido inducido por compuerta, y también reduce el valor del dV_{AK}/dt crítico de disparo, amplificando el efecto producido por los cambios externos en la tensión AK.

Por su parte, cuando el ruido eléctrico inducido en el circuito de compuerta inyecta un nivel de corriente de compuerta insuficiente para producir el disparo, esta acción baja tanto la tensión de bloqueo directa que causa la entrada en conducción como el valor de dV_{AK}/dt crítico de disparo, amplificando los posibles efectos de los cambios en la tensión AK producidos en el circuito externo.

El efecto de la inyección de corriente de compuerta se combina en relación inversa con la tensión directa aplicada entre los terminales de ánodo y cátodo: a mayor nivel de inyección de corriente de compuerta, menor es la tensión AK en la cual el dispositivo entra en conducción.

En general, dado que se desea que el disparo controlado sea función exclusiva de la aplicación de pulsos de compuerta, los circuitos de disparo se diseñan para inyectar el nivel de corriente de compuerta capaz de producir el disparo con la mínima tensión directa AK que permita la conducción directa.



Característica I_{AK}/V_{AK} completa de un tiristor típico mostrando el efecto de pulsos de corriente de compuerta crecientes en la tensión de disparo directo.

CONDICIÓN DE DISPARO POR dV_{AK}/dt .

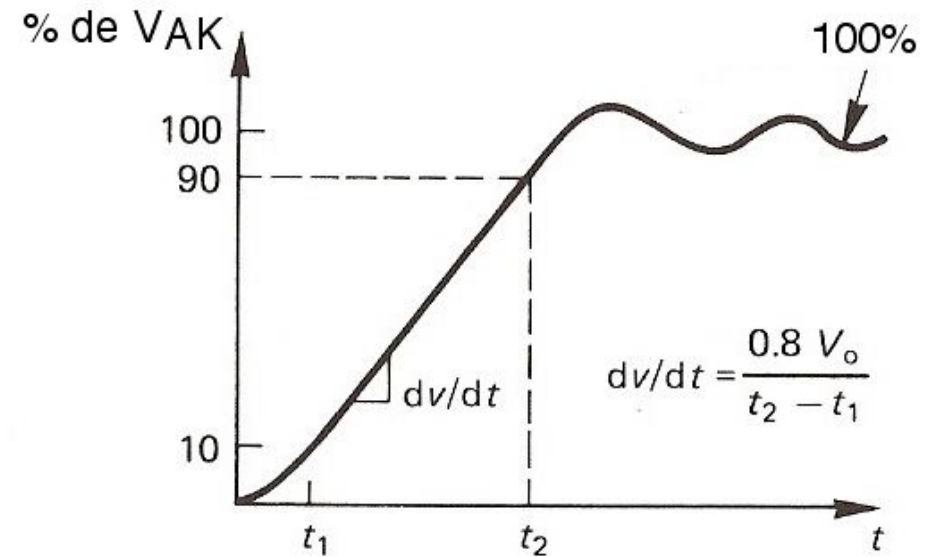
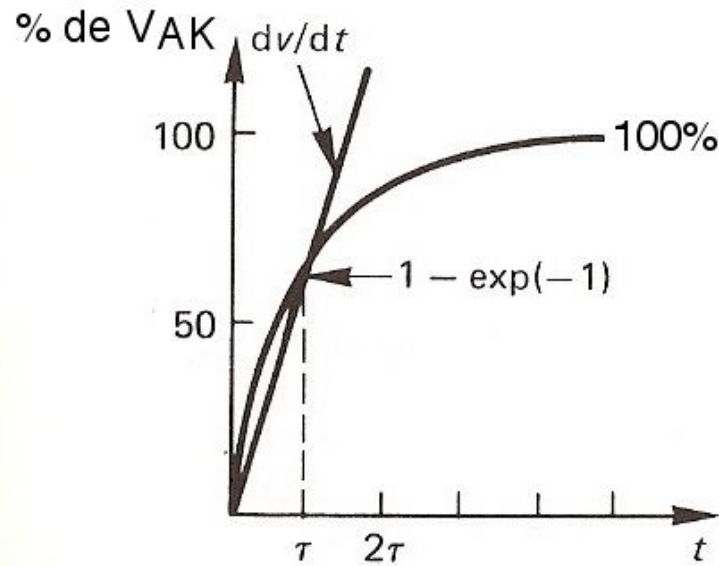
Al crecer la tensión ánodo-cátodo durante el bloqueo el movimiento de las cargas en la zona de carga espacial de la juntura J_2 que bloquea produce una corriente de desplazamiento que puede ser suficiente para producir el disparo del tiristor si la corriente supera el valor crítico, o corriente de ruptura, I_{BO} . El valor crítico, dV_{AKM}/dt es:

$$\frac{dV_{AKM}}{dt} = \frac{I_{BO}}{C_{J2}}$$

donde C_{J2} es la capacitancia de la juntura.

Por lo tanto, el valor del dV_{AK}/dt reaplicado debe ser limitado para que cumpla con la condición:

$$\frac{dV_{AK}}{dt} < \frac{I_{BO}}{C_{J2}}$$

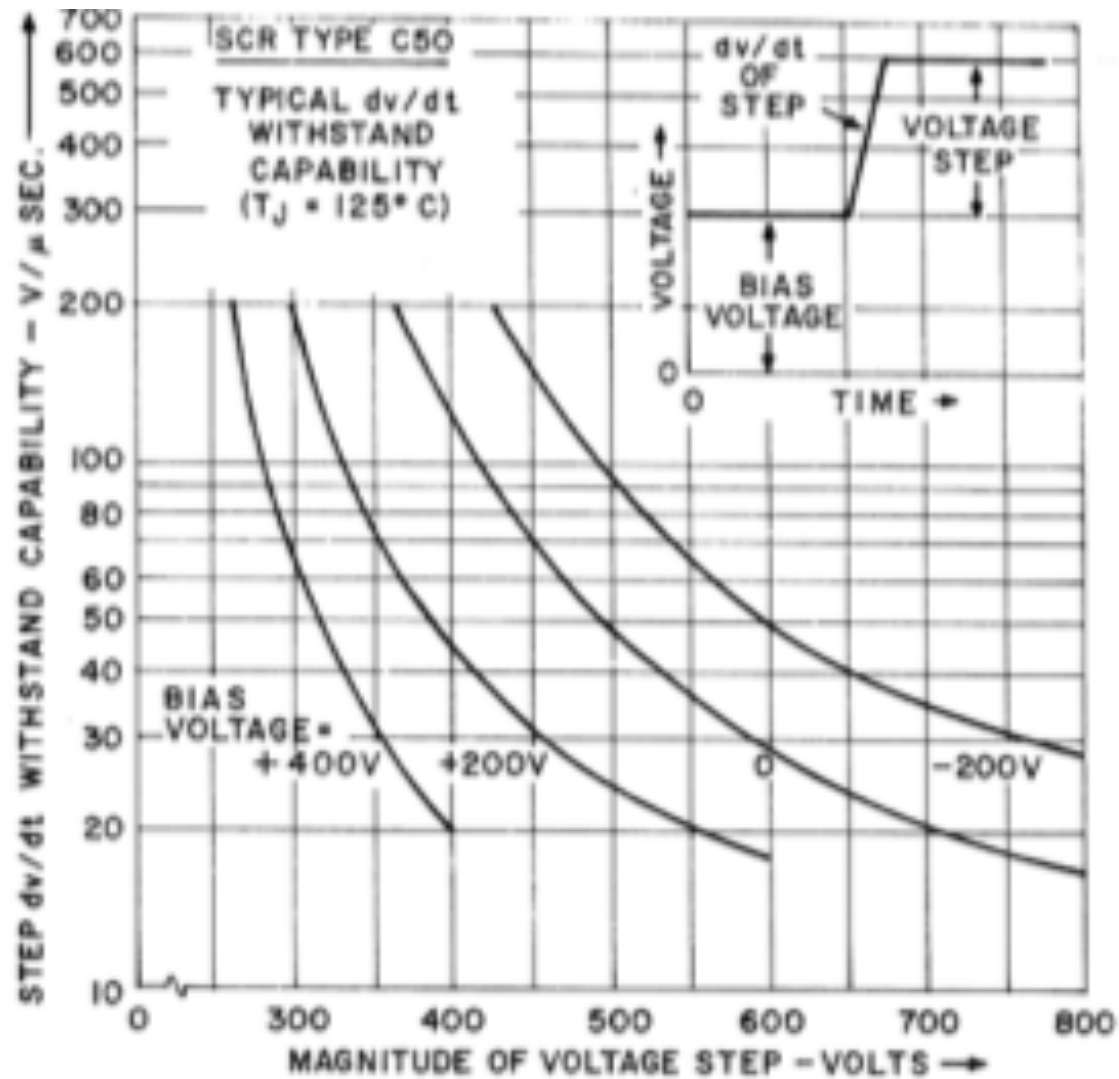


Definición del dV_{AKM}/dt en un tiristor

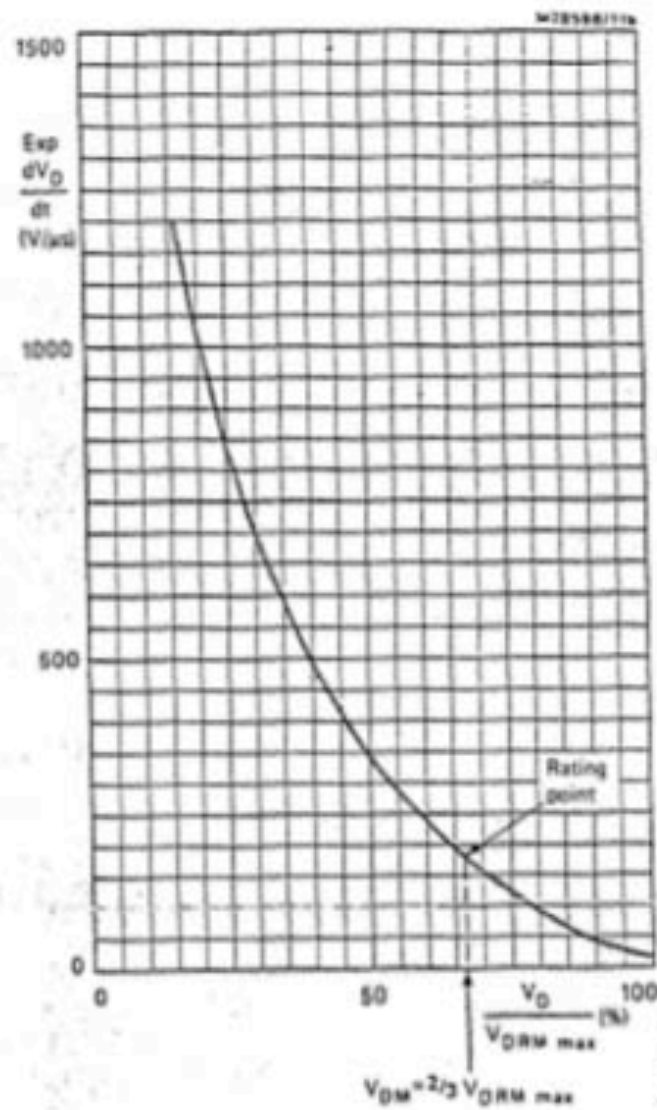
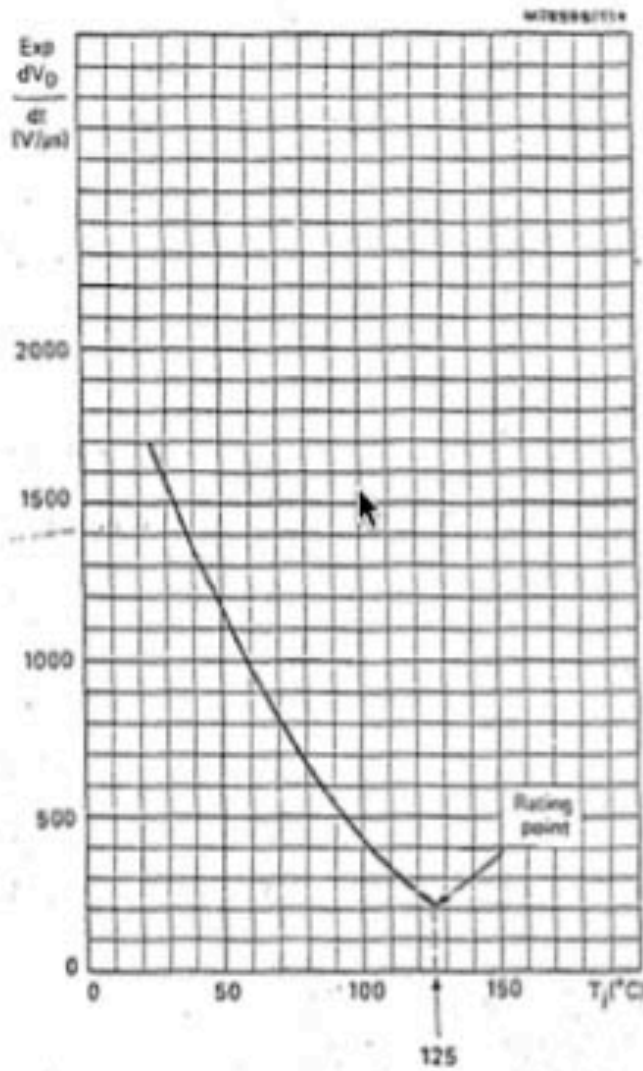
Izquierda: definición exponencial.

Derecha: definición lineal.

El fabricante debe presentar la información del dV/dt reaplicado máximo del tiristor en la hoja de características, especificando cual de las dos definiciones emplea para caracterizar sus dispositivos.



Curvas de dV/dt máximo vs. amplitud del escalón de voltaje reaplicado. Tiristor tipo C60, cortesía General Electric.



Variaciones típicas del V_{AK}/dt crítico frente a la temperatura de juntura (izquierda) y la tensión AK (derecha). Cortesía Philips.

DISPARO CONTROLADO POR COMPUERTA.

ESPECIFICACIONES DE COMPUERTA.

(a voltaje ánodo-cátodo y temperatura de juntura nominales)

V_{GT} = Voltaje compuerta-cátodo que produce el disparo de todos los dispositivos.

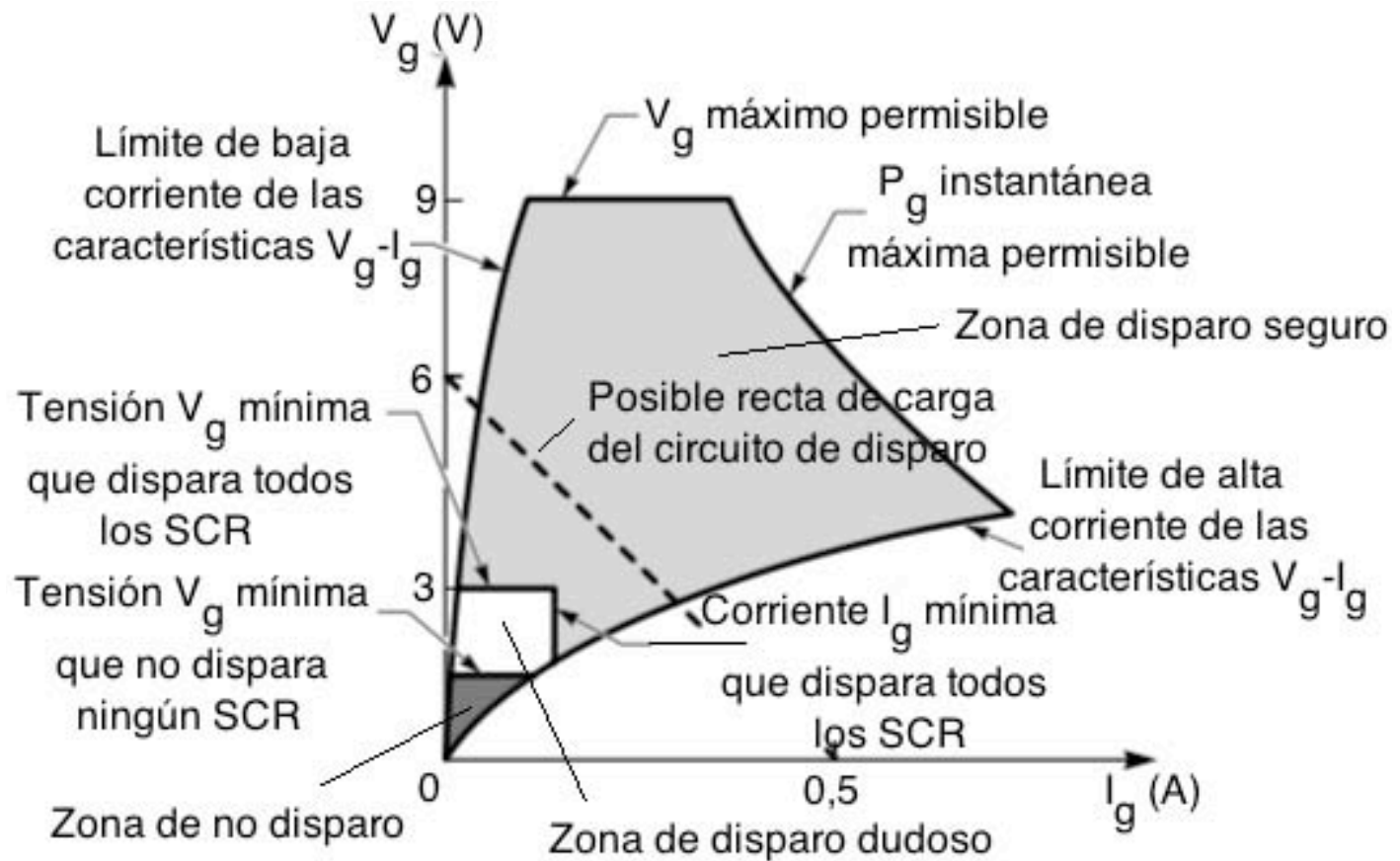
I_{GT} = Corriente compuerta-cátodo que produce el disparo de todos los dispositivos.

V_{GD} = Voltaje compuerta-cátodo que no produce el disparo en todos los dispositivos.

V_{RGM} = Voltaje compuerta-cátodo inverso máximo.

P_{GAV} = Máxima potencia promedio disipable en la compuerta.

P_{GM} = Máxima potencia pico disipable en la compuerta.



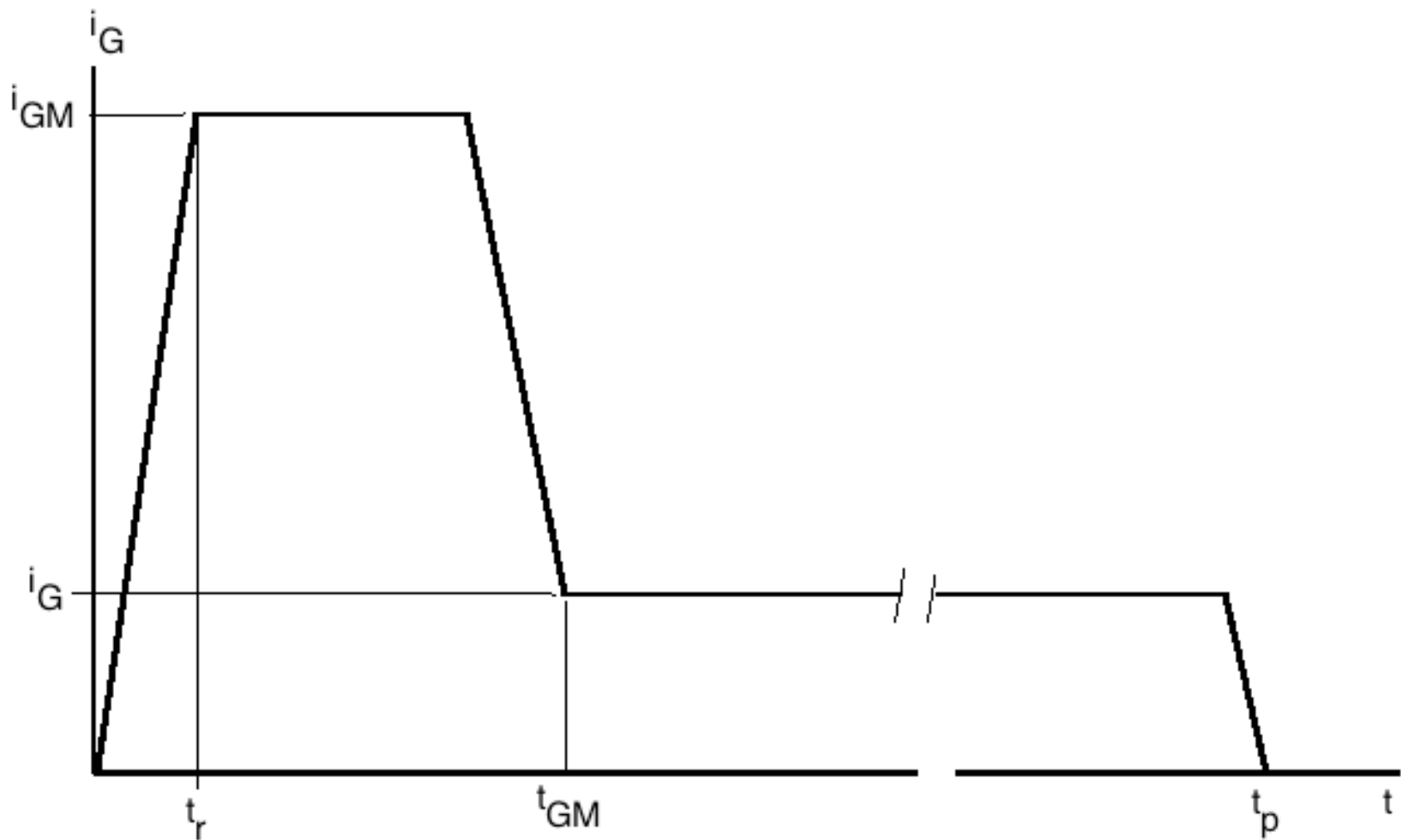
Presentación gráfica de las características de disparo por compuerta de un tiristor típico.

Configuración de los pulsos de disparo:

1.- Pulso único: El tiristor puede ser disparado con un pulso único que cumpla con las especificaciones de voltaje, corriente y potencia del dispositivo, y que tenga una duración por lo menos igual al tiempo que la corriente ánodo-cátodo tarde en alcanzar el valor de conducción segura (I_L).

En la práctica, dado que el tiempo necesario para que la corriente alcance el valor de conducción segura depende del circuito externo y puede ser variable, es conveniente que la duración del pulso único sea mayor a su valor mínimo; idealmente el pulso debería mantenerse durante todo el tiempo de conducción programado para el tiristor.

Adicionalmente, para acelerar el encendido del tiristor, es conveniente que el valor inicial del pulso sea lo más elevado posible; para cumplir con la limitación de potencia promedio es conveniente emplear un pulso de amplitud variable con un sobre pico inicial.



Forma ideal del pulso de corriente de encendido en la modalidad de pulso único, con un pico inicial para maximizar la velocidad de encendido del tiristor.

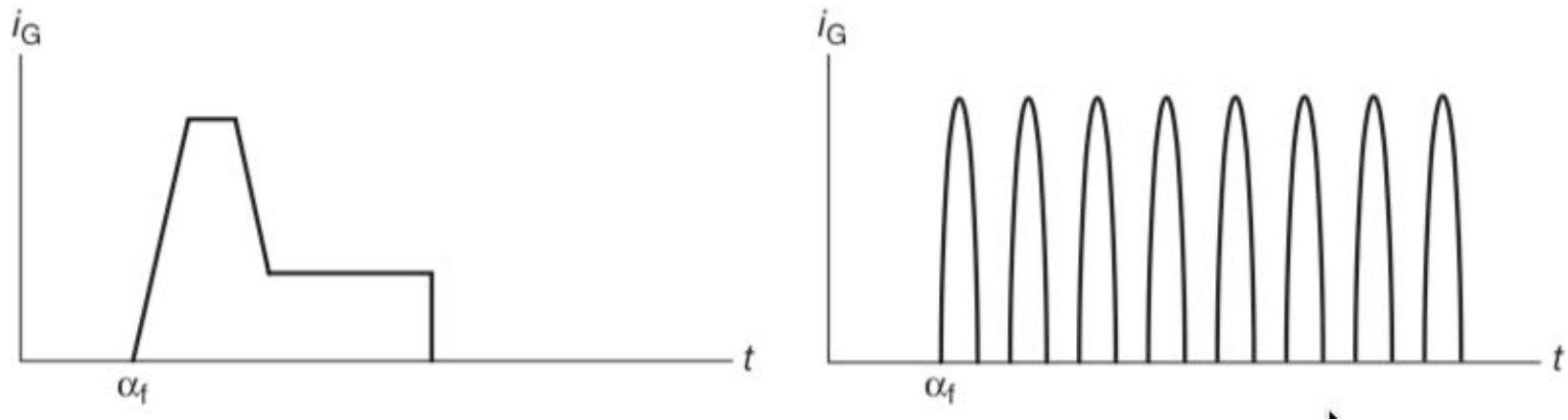
El pulso de encendido único idealmente debe cumplir con las siguientes condiciones genéricas:

- a.- El tiempo de subida, t_r , debe ser menor de $1\mu s$.
- b.- El valor máximo de la corriente inyectada, i_{GM} , debe ser como mínimo entre 8 y 10 veces el valor de la corriente mínima que enciende a todos los dispositivos de ese tipo, i_{Gm} .
- c.- El valor estable de la corriente inyectada debe ser como mínimo entre 2 y 4 veces el valor de la corriente mínima que enciende a todos los dispositivos de ese tipo, i_{Gm} .

- d.- En general la duración del sobre-pico de encendido debe ser mayor que el tiempo de encendido, t_{on} , especificado para los dispositivos del tipo considerado.
- e.- Si es una aplicación donde la constante de tiempo de subida de la corriente de carga es muy lenta, el sobre-pico debe mantenerse hasta que la corriente AK alcance el valor de la corriente de enganche del dispositivo, I_L .
- f.- El pulso de encendido debe durar por lo menos $100\mu s$, pero de ser posible debe estar aplicado durante todo el intervalo de conducción.

2.- Tren de pulsos: La señal de disparo es un tren de pulsos.

La amplitud de cada pulso, su duración y el ciclo de trabajo se seleccionan para operar a la mayor distancia posible de la zona de disparo inseguro, cumpliendo con las restricciones de potencia promedio y potencia pico.



Comparación pulso de disparo único (izquierda) con tren de pulsos de disparo (derecha).

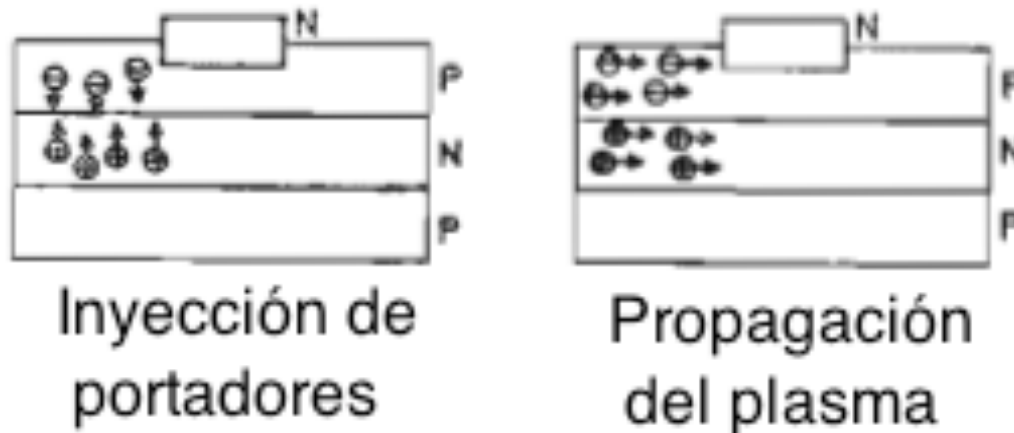
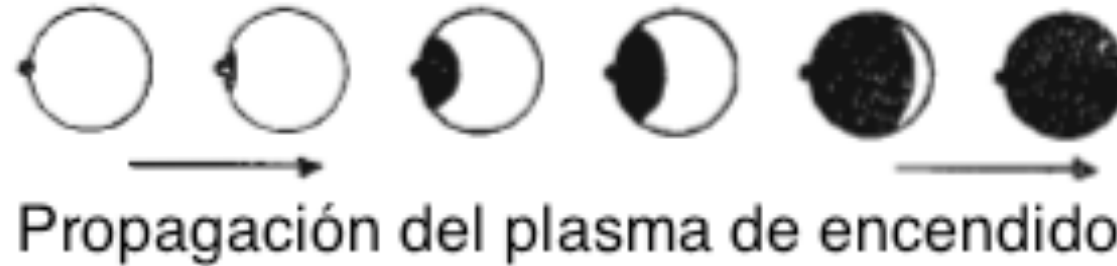
La amplitud instantánea de cada pulso debe inyectar la máxima cantidad de portadores compatible con las limitaciones de potencia de compuerta, optimizando la velocidad de encendido del tiristor.

La frecuencia del tren de pulsos no es crítica, por lo que se define en función del sistema de aislamiento empleado, y usualmente se fija en el rango de 1 a 10 kHz.

El tren de pulsos se debe aplicar preferentemente con un acople que ofrezca aislamiento galvánico entre el generador de pulsos de disparo y el tiristor, y se debe mantener durante todo el período de conducción esperado del tiristor, para evitar apagados accidentales, lo que es difícil de lograr con un pulso de disparo único.

MÁXIMA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE LA CORRIENTE PERMISIBLE EN EL ENCENDIDO.

La velocidad de difusión de los electrones inyectados en la compuerta para producir el disparo del tiristor es finita, lo que implica que transcurre un cierto tiempo entre el momento en el cual entra en conducción la zona inmediatamente en contacto con la metalización de compuerta y el momento en el que todo el dispositivo está en conducción.



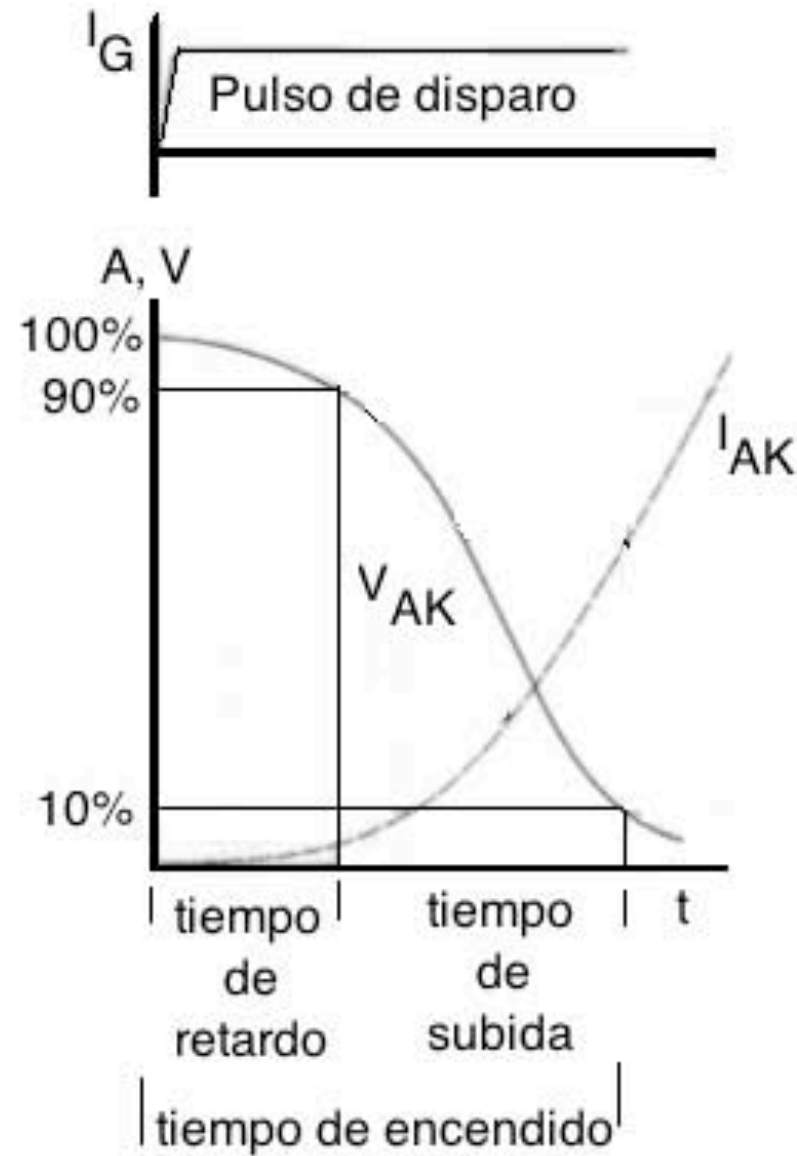
Proceso de encendido por inyección del pulso de compuerta.

Arriba: Propagación de izquierda a derecha del plasma en conducción.

Abajo, izquierda: Inyección inicial de portadores en el área de compuerta.

Abajo, derecha: Propagación del plasma desde el punto de inyección.

Durante el tiempo de encendido el área efectiva de conducción es menor que el área total de conducción, y, por lo tanto, la capacidad de conducción de corriente no cambia instantáneamente de cero a su valor nominal máximo, sino que va creciendo al crecer el área afectada por la difusión de los portadores.



Proceso de encendido del tiristor.

El fabricante del dispositivo especifica la velocidad con la que crece la capacidad de conducir corriente durante el encendido, especificando la máxima velocidad de crecimiento de la corriente AK permisible en el encendido (di_M/dt).

Si al encenderse el tiristor la corriente en el circuito externo puede crecer con una velocidad que supere el valor crítico di_M/dt , se producirán puntos calientes en el cristal semiconductor que pueden producir la falla catastrófica del dispositivo.

El peor caso desde el punto de vista de la velocidad de crecimiento de la corriente es cuando el encendido se produce en forma accidental, por exceso de dv/dt o por sobre tensión directa, o una combinación de ambos, sin que se aplique el pulso de corriente de disparo a la compuerta.

En estas condiciones, aunque el disparo en si no necesariamente dañe al dispositivo, dado que el encendido puede afectar solo a una fracción del dispositivo, la corriente queda inicialmente muy localizada, y es factible que ese punto se sobre caliente y falle por exceso de di/dt .

Es por lo tanto necesario determinar el di/dt prospectivo del circuito, considerando el peor caso (encendido instantáneo con un conmutador ideal), donde solo interviene la constante de tiempo del circuito externo, y comparar el valor obtenido, di_C/dt con el di_M/dt del tiristor que se esté considerando.

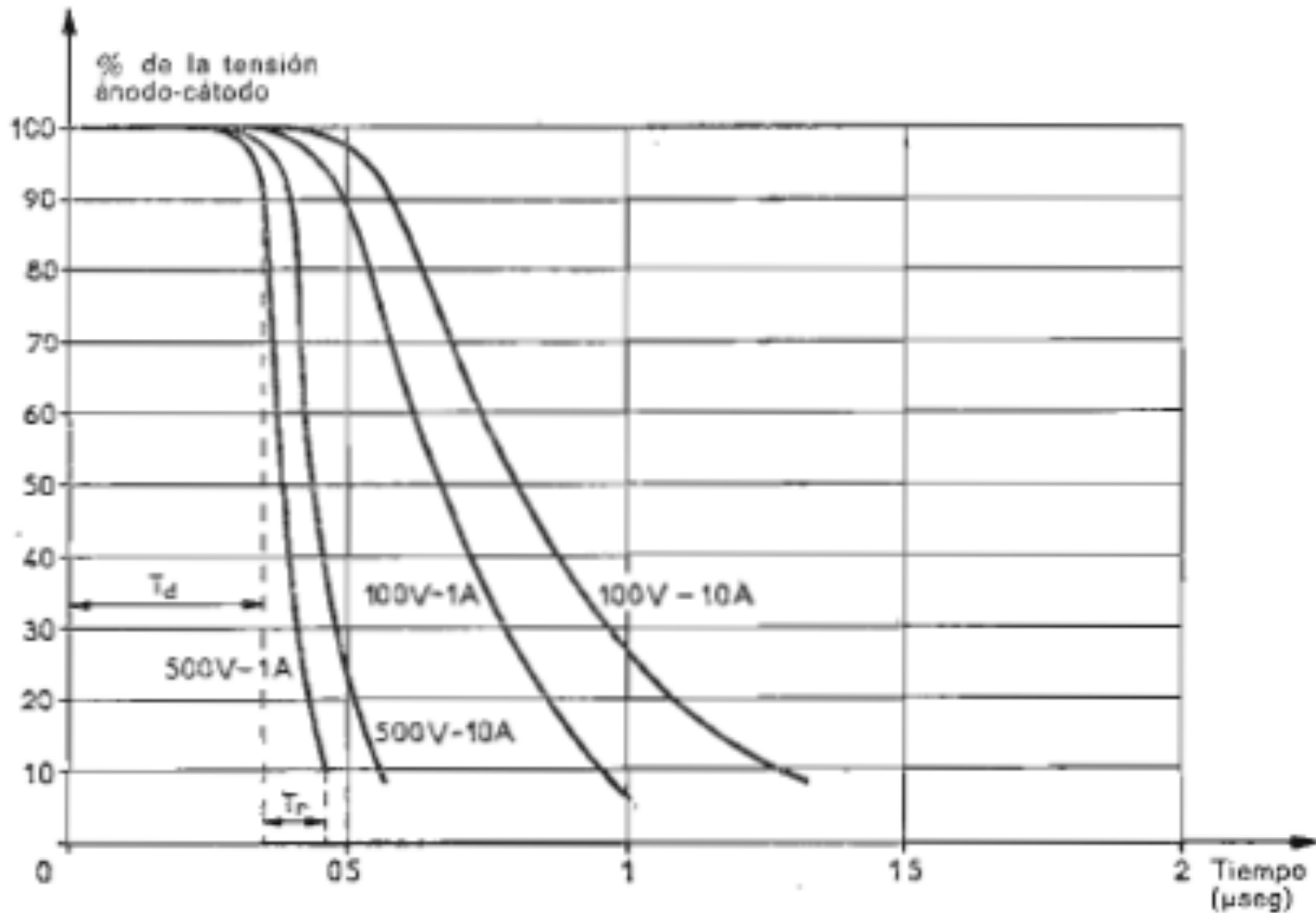
Si $di_C/dt < di_M/dt$, la selección del tiristores es adecuada desde este punto de vista.

Si $di_C/dt \geq di_M/dt$ la falla es posible, lo que requiere aplicar una de dos soluciones:

a.-Buscar un tiristor con mayor di_M/dt .

b.-Incluir en el circuito una inductancia de protección de encendido ("snubber") en serie con el tiristor que reduzca el di_C/dt aplicado a un valor menor que el di_M/dt del tiristor, considerando el correspondiente margen de seguridad.

La velocidad de propagación de la corriente de encendido es también directamente influenciada por la tensión ánodo-cátodo durante el encendido que aumenta directamente la velocidad de encendido, e inversamente con el valor de la corriente final que debe ser alcanzada.



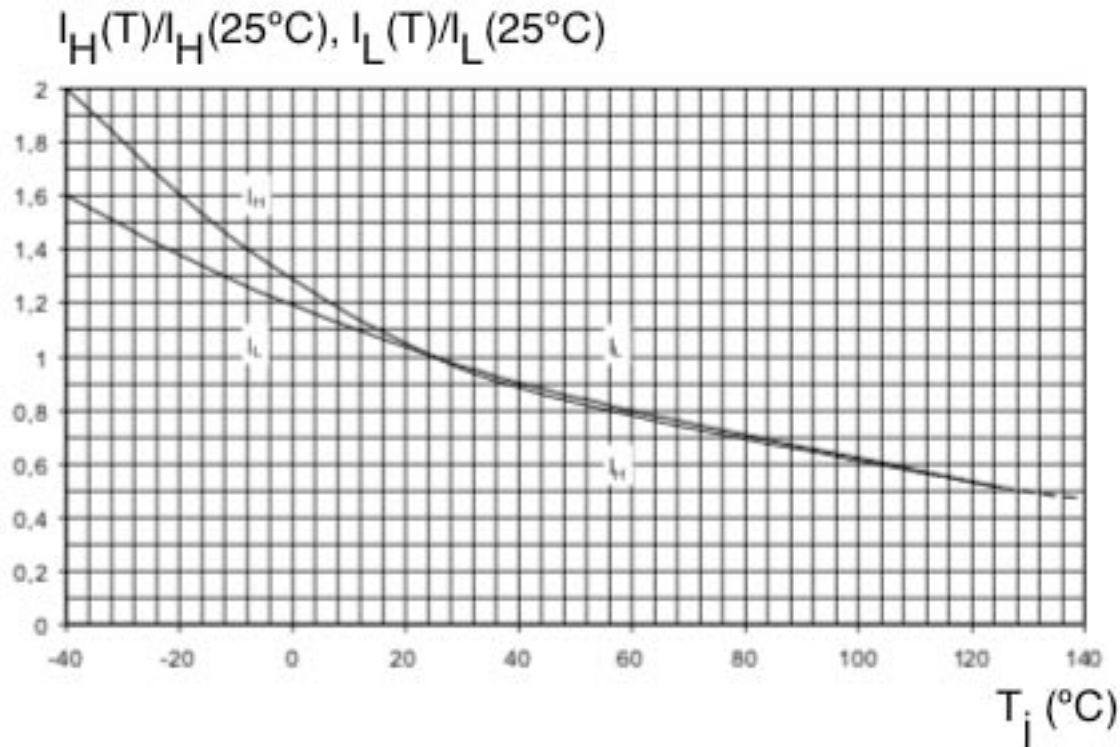
Tiempo de estabilización en conducción de un tiristor tipo C10 en función de la tensión AK y de la corriente prospectiva final AK.

CONDICIÓN NECESARIA DE CONDUCCIÓN SOSTENIDA.

Sea cual sea la forma en la que se ha producido el disparo, el tiristor permanecerá en estado de conducción directa sostenida si, y solo si, la corriente ánodo-cátodo alcanza un valor mayor o igual al de la corriente de enganche del dispositivo ($I_{AK} > I_L$) mientras se mantiene la condición que está produciendo el proceso de encendido.

La corriente de enganche I_L es el mínimo valor de la corriente A-K que asegura que se mantenga la condición de avalancha hasta que todo el área efectiva del tiristor entre en conducción aunque se suspenda el pulso de corriente de encendido.

Si $I_{AK} < I_L$ cuando desaparece el pulso de corriente de encendido, el proceso de disparo aborta y el tiristor regresa al estado de bloqueo.



Variación típica de I_H e I_L con la temperatura de junta.

Tanto I_H como I_L varían inversamente con la temperatura de junta.

CONDICIÓN SUFICIENTE DE APAGADO.

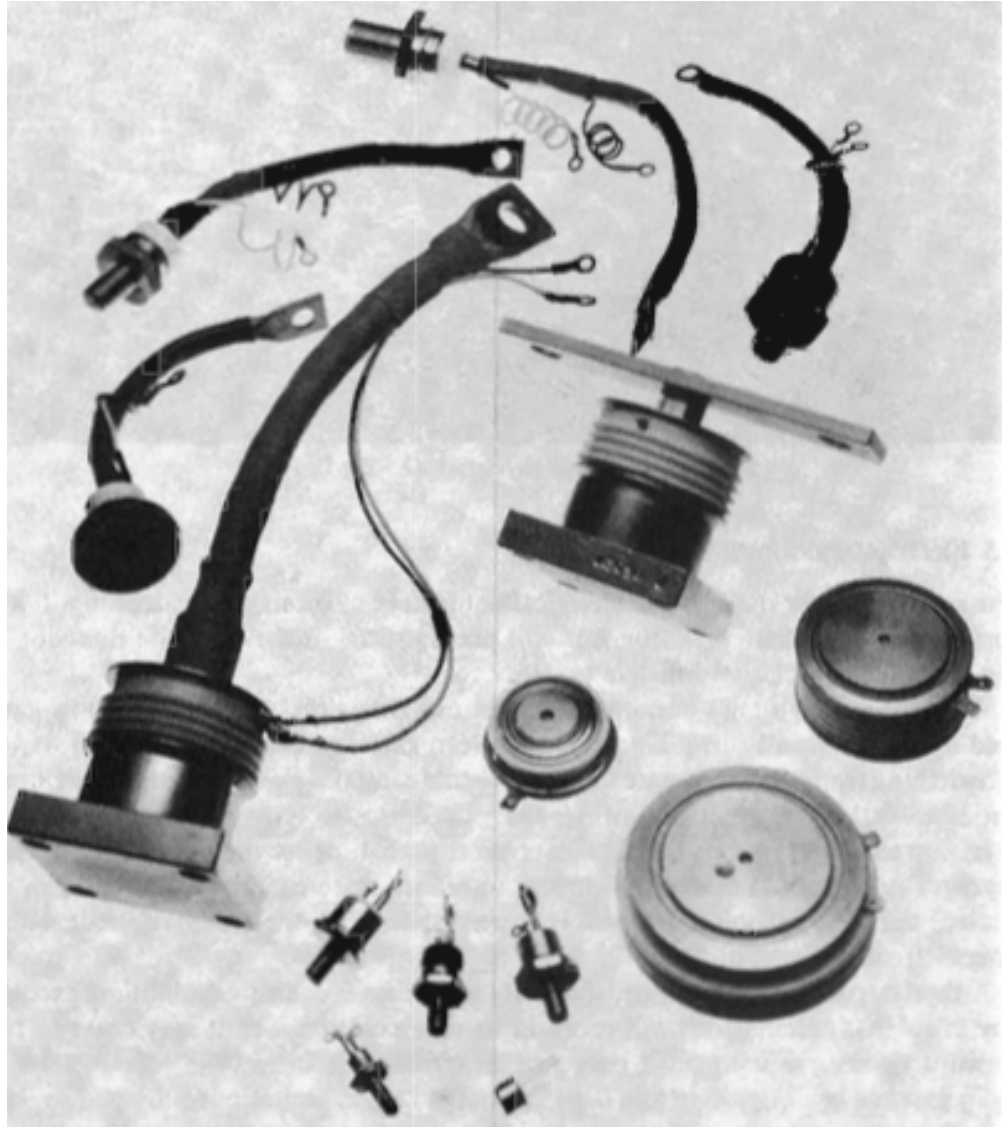
Como el diodo, el tiristor en conducción está controlado por la corriente que circula entre los terminales de ánodo y cátodo.

El tiristor pasa del estado de conducción directa al de bloqueo (se “apaga”) si y solo si la corriente ánodo-cátodo (I_{AK}) alcanza un valor menor o igual al de la corriente de sostenimiento (I_H) especificada durante un tiempo mayor o igual al tiempo de apagado del tiristor (t_{QQ}).

$$I_{AK} < I_H \mid t > t_{QQ}$$

En todos los tiristores, salvo los del sub-grupo GTO, la condición de apagado depende totalmente de condiciones externas al tiristor, ya que no es posible romper la condición de avalancha extrayendo corriente por el terminal de compuerta sin producir daños en el dispositivo.

IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL TIRISTOR.

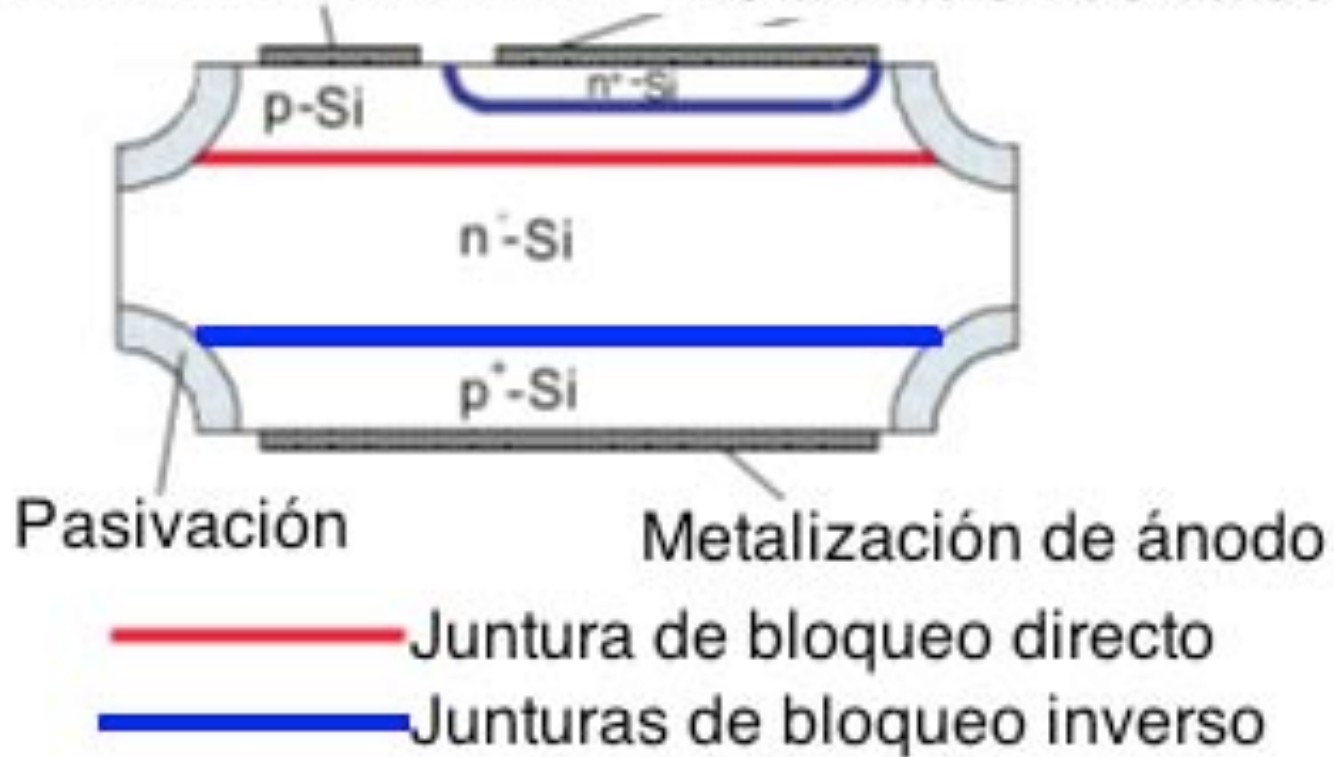


Colección de tiristores como muestra del amplio rango de potencias disponible.

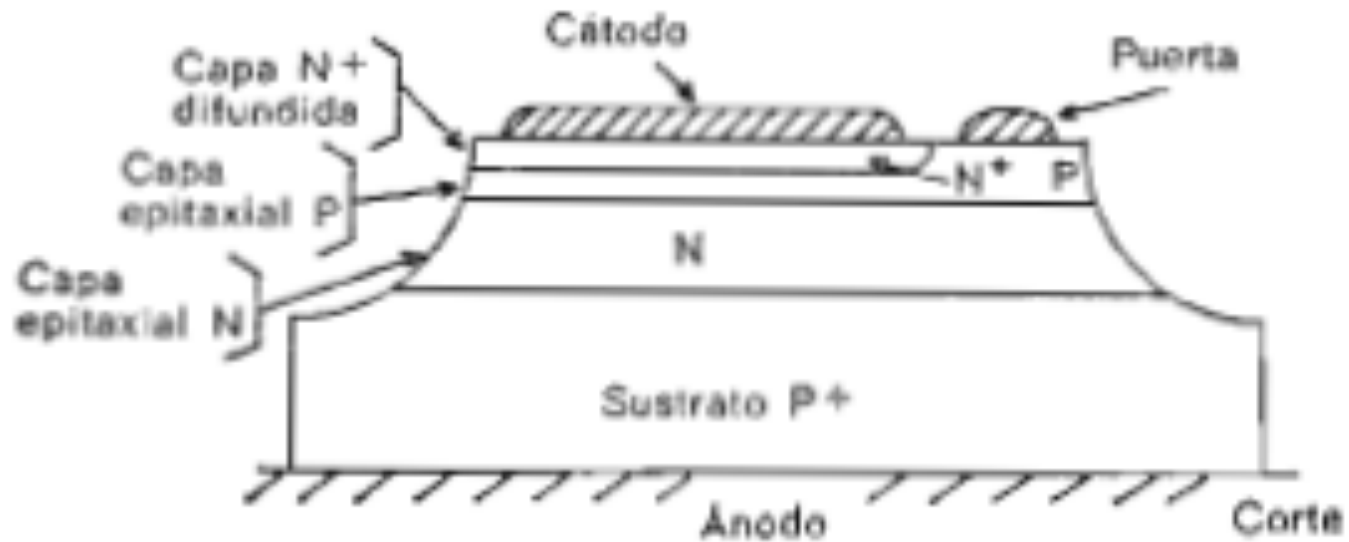
Los tiristores son posiblemente los componentes electrónicos de control de potencia que cubren la mas amplia gama de potencias desde una fracción de amperio hasta varios miles de amperios y, en algunos casos hasta mas de 10.000 A

En general los tiristores de potencia media-alta se fabrican como componentes individuales cada uno en una oblea ("chip") circular, cuyo diámetro básicamente determina la capacidad de corriente. En todo caso, es imposible implementar un contacto eléctrico en el borde de la oblea, por lo que la configuración práctica de un tiristor difiere de la configuración ideal, ya que es necesario que la región P de contacto de compuerta forme una isla en la región N de cátodo para asentar la metalización del contacto de compuerta.

Metalización de compuerta Metalización de cátodo



Corte de la estructura de un tiristor de alta potencia, del tipo encapsulado en carcasa tipo "hockey puk".

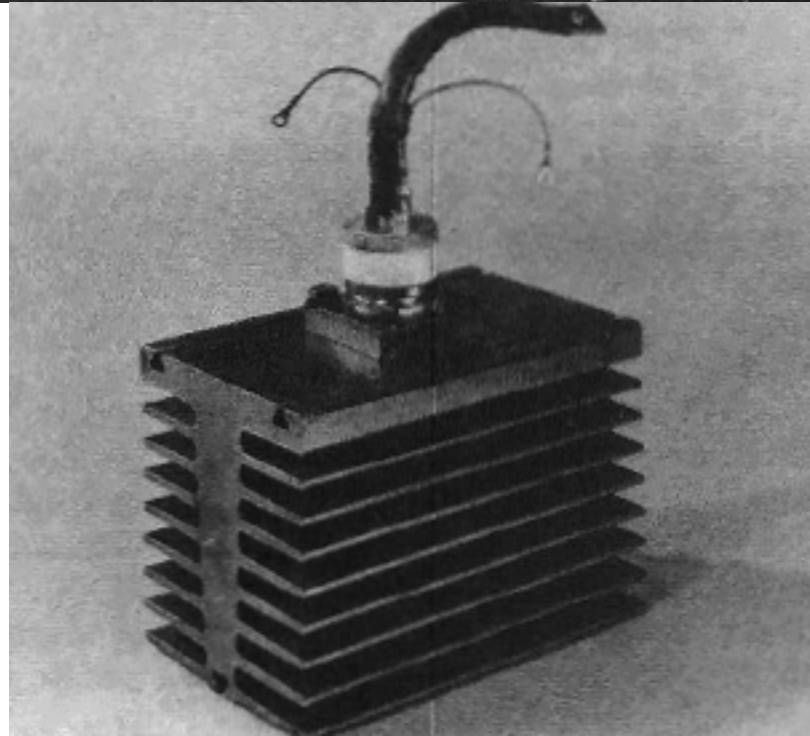
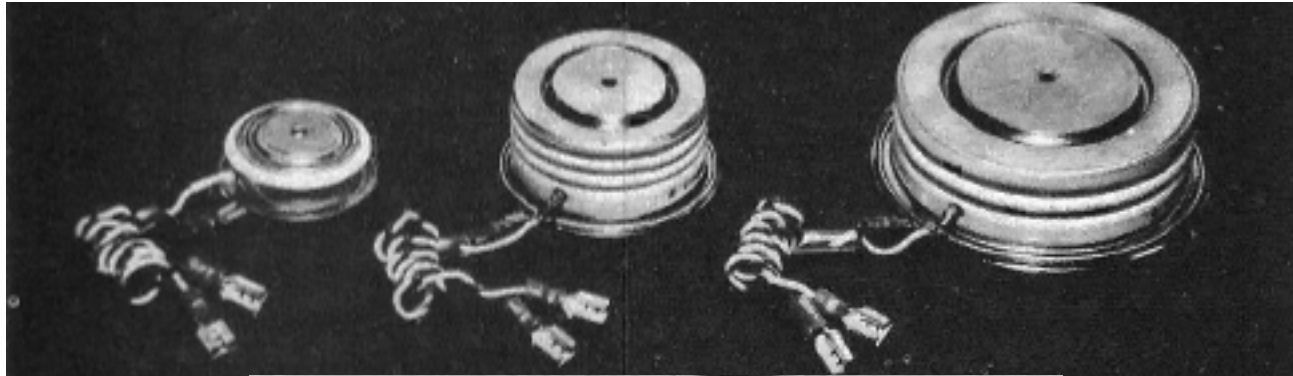


Corte de la estructura de un tiristor de potencia media, del tipo encapsulado en carcasa tipo "perno".

Aunque los tiristores funcionalmente son dispositivos de tres terminales (ánodo, A, cátodo, K y compuerta, G), la mayoría de los tiristores de alta potencia tienen cuatro terminales de conexión, dos de potencia (ánodo y cátodo) y dos para la señal de disparo de compuerta, que son el terminal de compuerta propiamente dicho y un terminal auxiliar de retorno de la corriente de disparo, conectado directamente al cátodo.

Esto tiene por objeto evitar que las variaciones de voltaje inducidas por los cambios de la corriente AK sobre la impedancia parásita del encapsulado aparezcan en el circuito de compuerta, donde el ruido podría producir disparos espurios.

Usualmente el aislante del cable conexión a compuerta es blanco y el cable auxiliar es blanco y rojo.

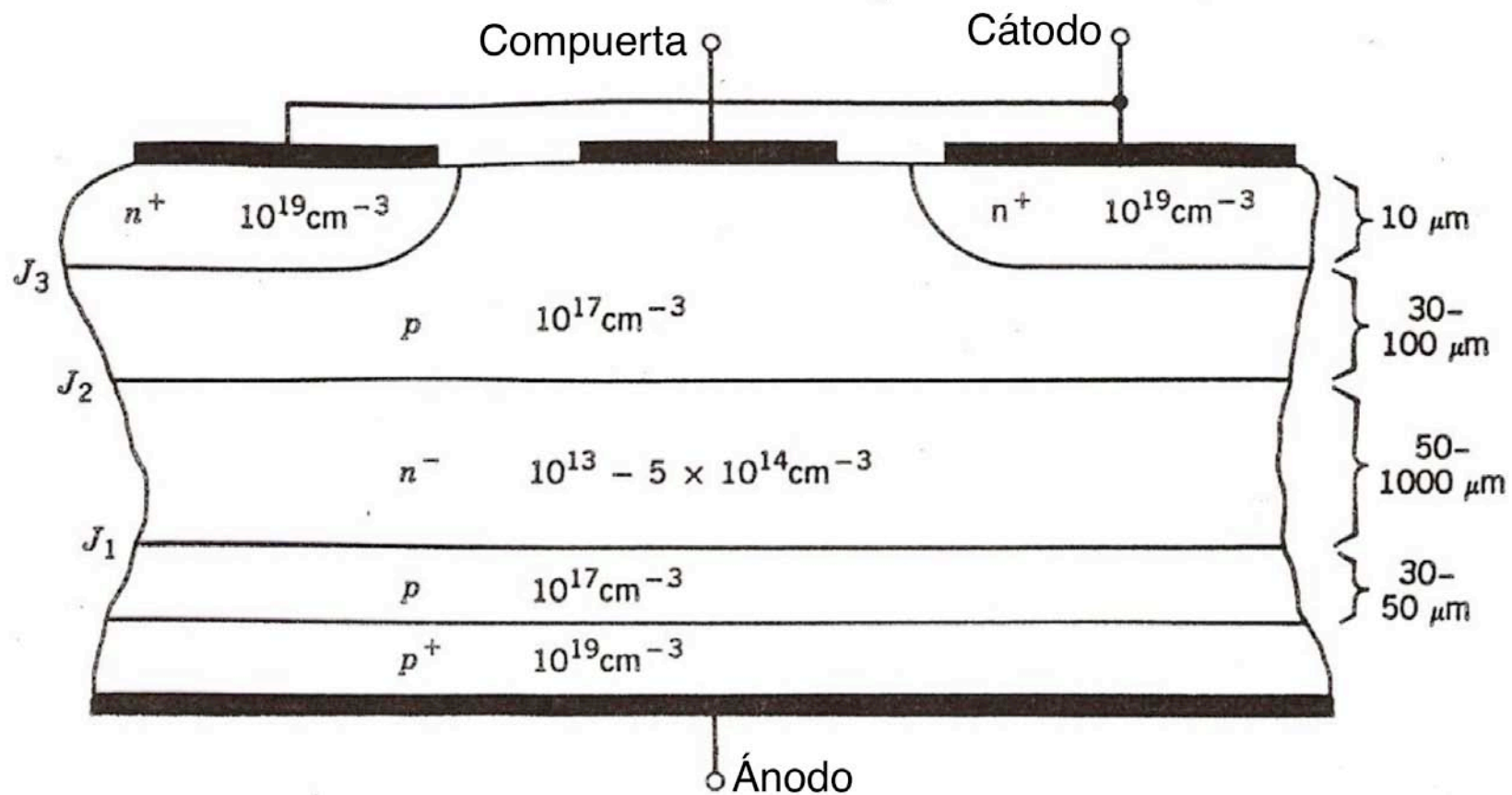


Tiristores de potencia mostrando los dos cables de conexión del circuito de disparo por compuerta.

La estructura efectiva del tiristor en muchos casos realmente es de cinco capas, ya que la necesidad de tener la capacidad de conducir corrientes AK elevadas (centenares e incluso miles de amperios) obliga a usar dispositivos grandes, que requieren un espesor del cristal también relativamente grande por razones mecánicas.

La quinta zona de dopado es una zona P⁺ muy altamente dopada, para lograr la máxima conductividad posible para minimizar la caída en conducción.

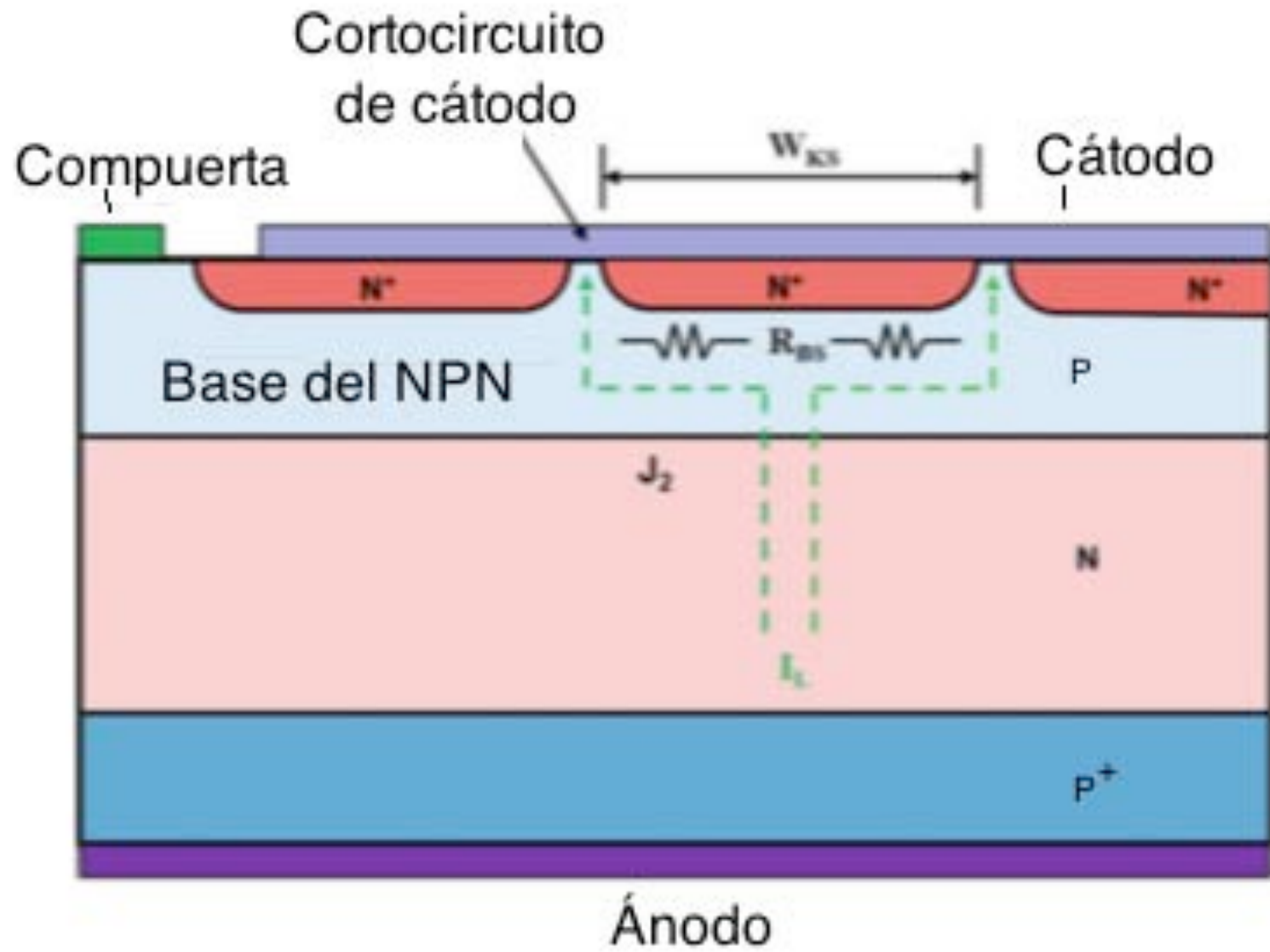
Esta zona como tal no interviene directamente en el funcionamiento del tiristor, solo cumple funciones de apoyo mecánico, pero aumenta la caída en conducción y las pérdidas asociadas.



Corte de un tiristor de propósitos generales mostrando los espesores típicos de las distintas regiones activas. El espesor de la zona P⁺ es el necesario para darle rigidez al cristal y depende de los espesores de las otras regiones.

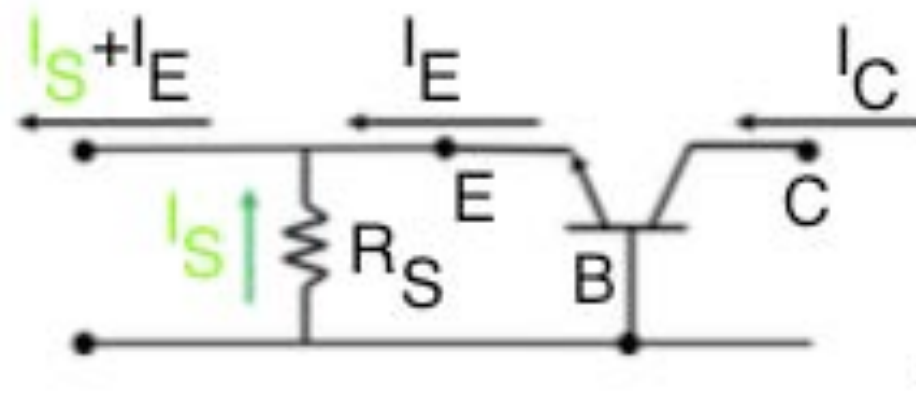
Lograr simultáneamente la capacidad de bloquear tensiones elevadas y la de conducir altas corrientes también requiere llegar a soluciones de compromiso, ya que elevar la tensión de bloqueo, especialmente cuando se debe operar a altas temperaturas de juntura (esto es, con una inyección de portadores libres por agitación térmica) requiere reducir la ganancia del transistor NPN equivalente, mientras que operar a alta corriente requiere precisamente lo contrario, aumentar la ganancia de corriente de dicho transistor.

El compromiso se logra con la técnica de los “cortocircuitos de cátodo” (“cathode shorts”).

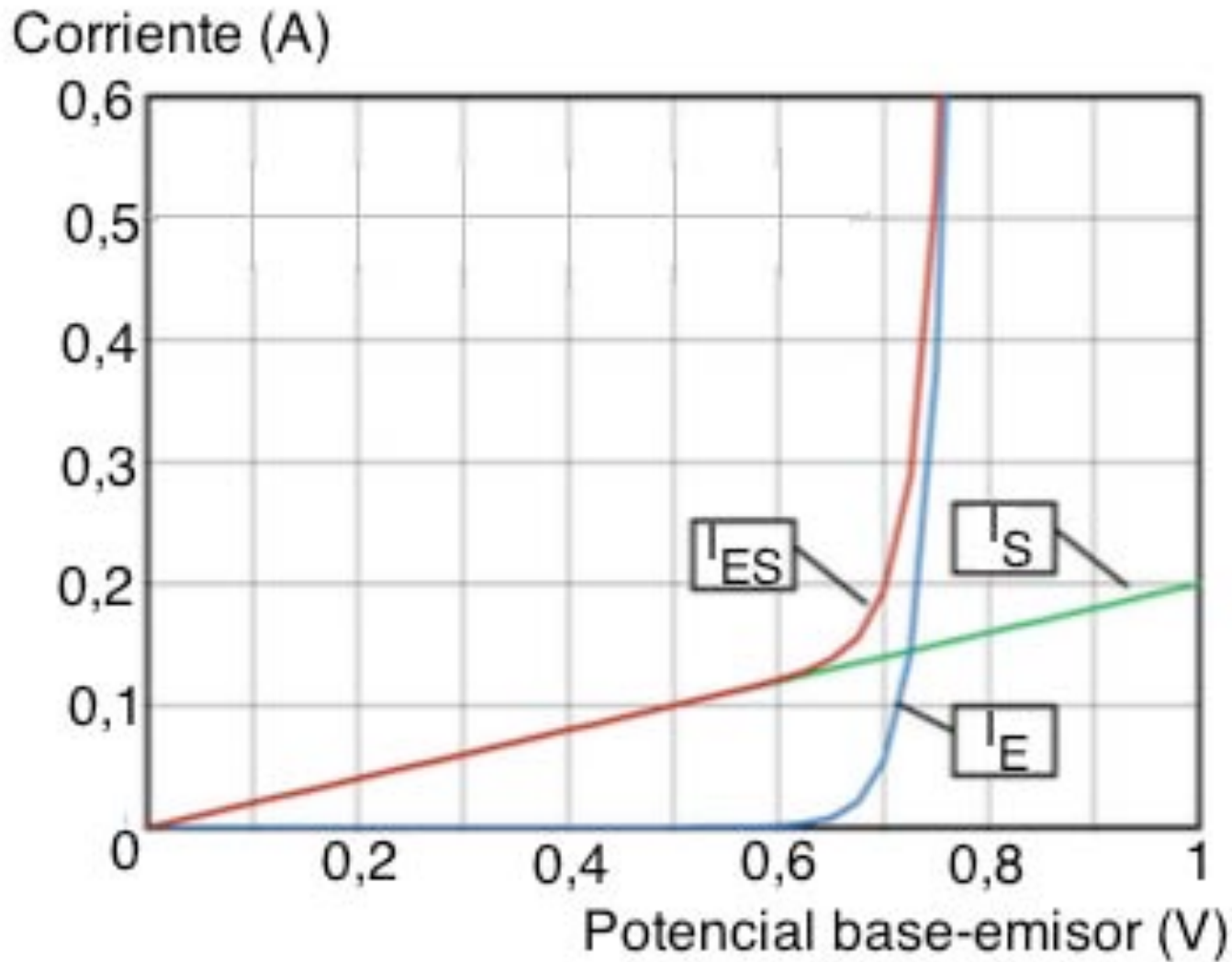


Estructura de un tiristor con cortocircuitos de cátodo.

Los cortos conectan directamente zonas de la región de la base equivalente directamente al contacto de salida; cuando el dispositivo está en bloqueo directo esto abre caminos para que la corriente de fuga salga de la zona de base sin activar al transistor NPN; una vez que el tiristor entra en conducción, la inyección de portadores por la corriente principal es suficiente para mantener saturado el transistor NPN equivalente aunque una parte de esa corriente circule por los cortos.

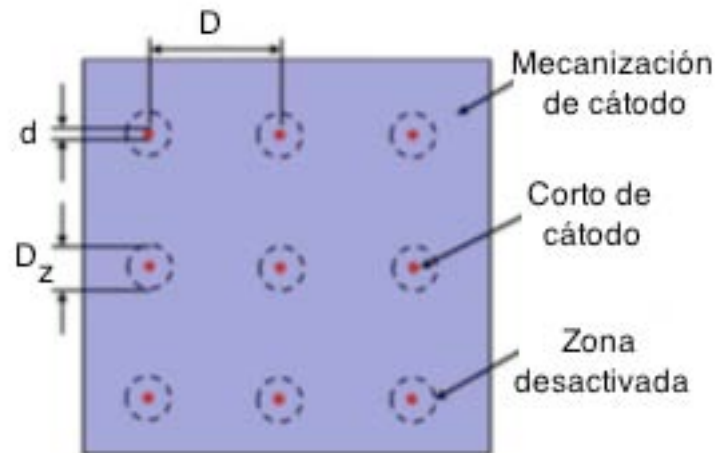


Circuito equivalente de los cortocircuitos de cátodo.



Corriente en el arreglo transistor NPN-cortocircuito de cátodo.

Cada cortocircuito de cátodo crea una “zona desactivada” a su alrededor que no puede intervenir en el proceso de encendido, lo que requiere que los cortos se distribuyan en forma equi-espaciada para evitar que toda un área conexas del tiristor quede fuera del proceso de encendido.



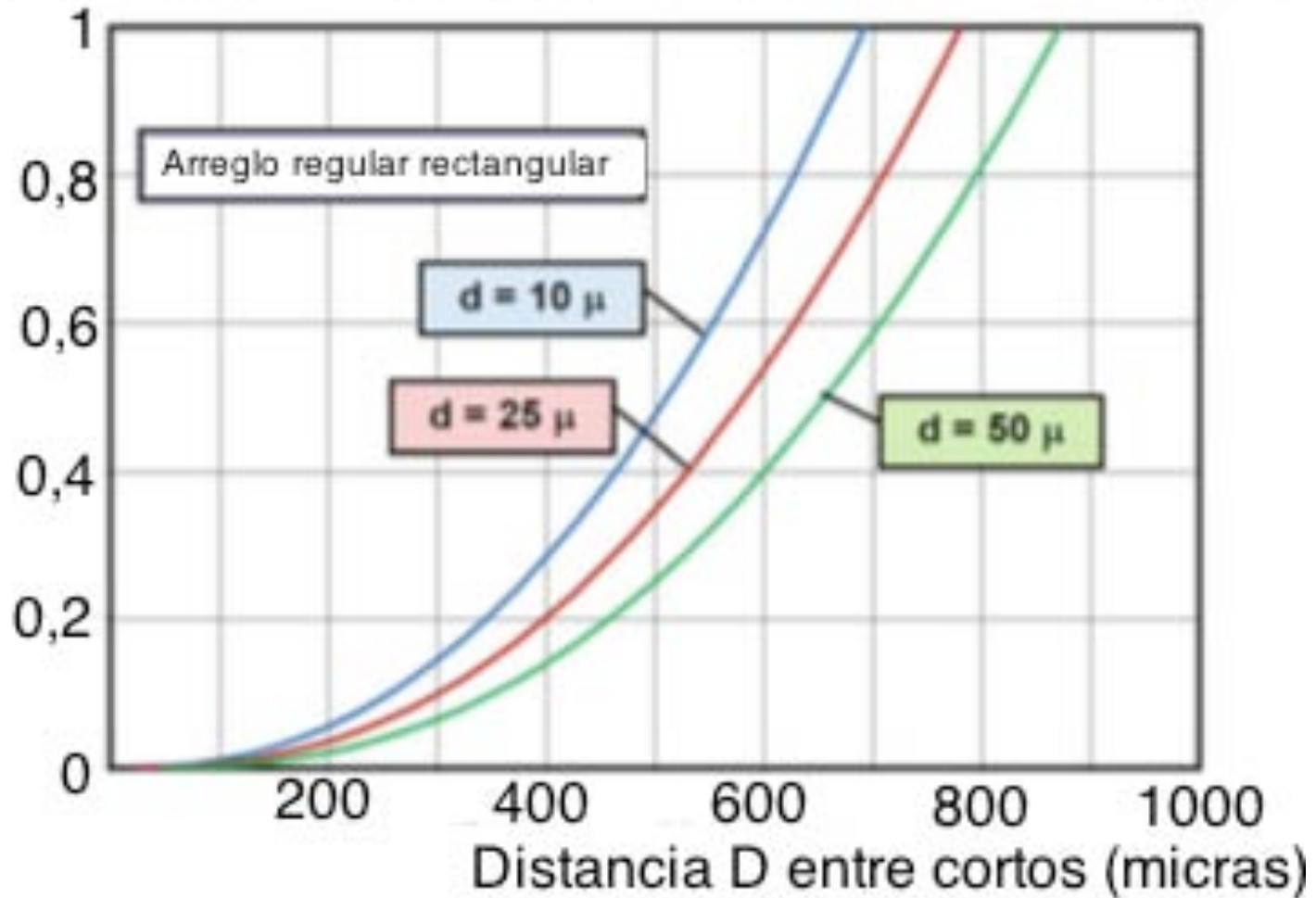
Distribución de los cortos de cátodo en el cátodo.

D: Distancia entre dos cortos.

d: diámetro del corto.

D_z: diámetro de la zona desactivada.

Tensión base-metalización cátodo NPN máxima (V)



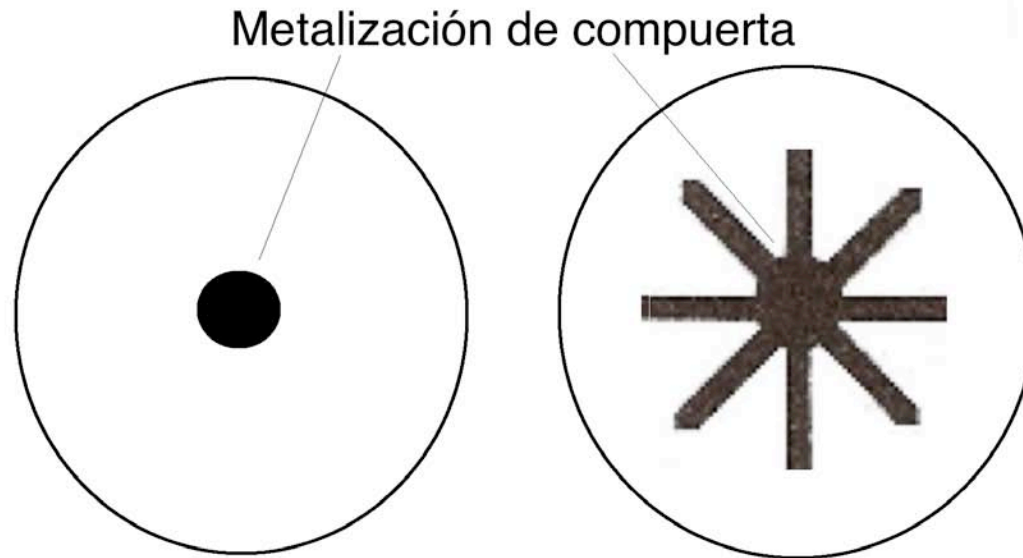
Efecto del tamaño de los cortocircuitos de cátodo sobre la máxima tensión compuerta-cátodo alcanzable.

La necesidad de compartir el área de una de las caras del tiristor entre la metalización de compuerta y la de cátodo introduce una situación de compromiso en el diseño del dispositivo, ya que la metalización de compuerta reduce el área disponible para la corriente principal, al reducir el área del cátodo, por lo que desde el punto de vista de la capacidad de conducir corriente, el área de compuerta idealmente debería ser lo más pequeña posible, pero esto reduciría tanto el área del dispositivo que es afectada directamente por el pulso de encendido, como la intensidad del pulso de corriente de compuerta, lo que reduce el di_{AK}/dt posible y hace al tiristor mas lento en el encendido.

Dado que los portadores tienen una velocidad limitada, esto hace que inicialmente solo entre en conducción la zona mas cercana al contacto de compuerta, lo que limita el valor del di_{AK}/dt inicial que puede soportar el dispositivo.

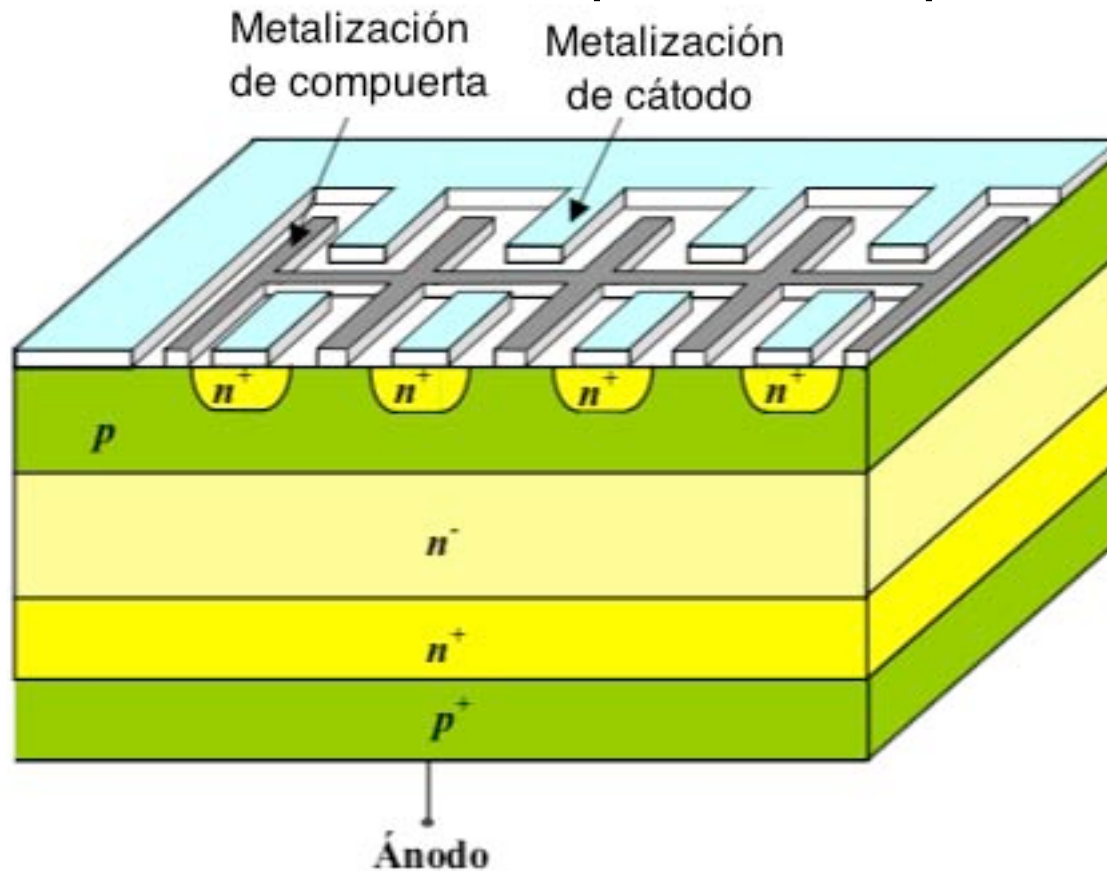
Si se desea optimizar la velocidad de encendido y el di/dt inicial, es preciso optimizar la inyección de corriente de compuerta de forma que los electrones se inyecten directamente en la mayor parte de la zona activa del tiristor, lo que obliga a adoptar formas mas complicadas, tipo estrella en el área de compuerta.

Por supuesto, al aumentar el área inicial de distribución de los electrones, se hace necesario aumentar el valor pico inicial de la corriente de compuerta.

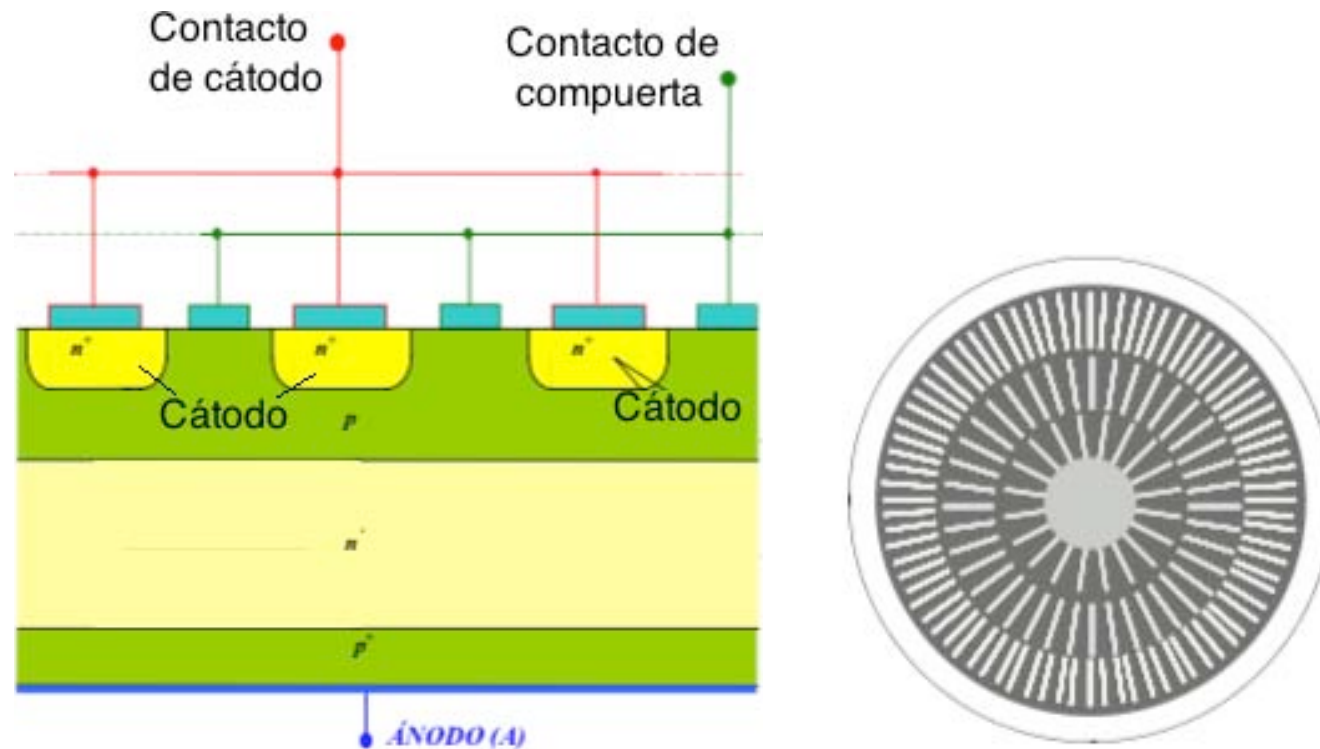


Tiristor de "propósito general", optimizado para maximizar corriente I_{AK} y operar a baja velocidad (frecuencia de línea), con compuerta tipo "punto" (izquierda) para máxima capacidad de corriente, o tipo "estrella", que ocupa mas área y reduce la capacidad de corriente I_{AK} (derecha) pero aumenta el di_{AK}/dt .

Para los tiristores de muy alta potencia se debe recurrir a una estructura interdigitada, en la cual las metalizaciones de cátodo y compuerta se distribuyen sobre toda la superficie disponible.



Tiristor con estructura inter-digitada.

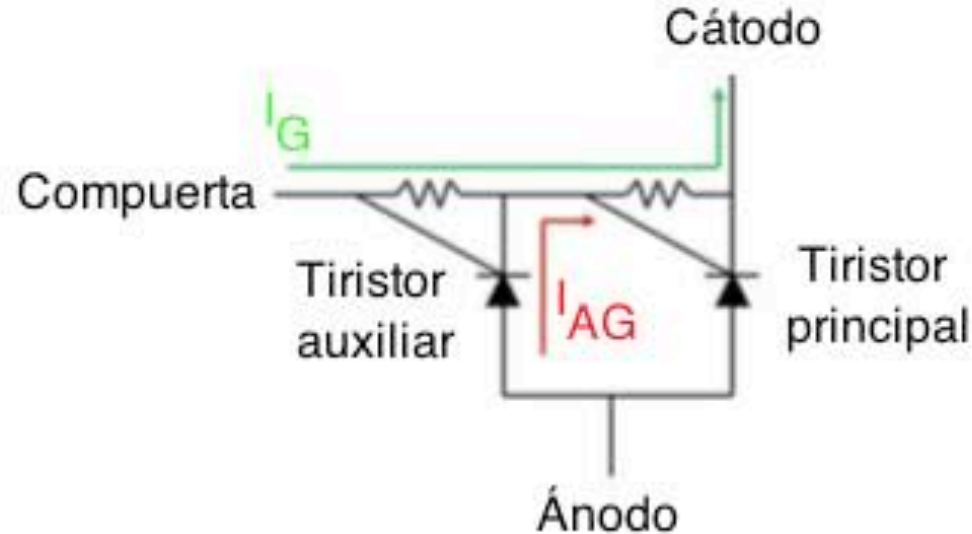


Tiristor con estructura inter-digitada, corte vertical, (derecha), y vista superior mostrando el arreglo radial de la estructura inter-digitada (derecha).

Adicionalmente, como en todo componente electrónico, si se desea aumentar la corriente principal requiere aumentar el área de conducción.

En el caso de los tiristores, el aumento del área de conducción requiere un aumento adicional de la corriente de compuerta si se quiere mantener la velocidad de encendido, tendencia que obliga a usar circuitos externos de manejo de compuerta con capacidad para generar pulsos de corriente relativamente altos.

Esta tendencia llevó a la creación de los tiristores con "compuerta amplificadora", en los cuales el pulso externo de compuerta se aplica a un tiristor auxiliar, de baja capacidad de corriente, el cual se encarga de encender al tiristor "principal" con su corriente I_{AK} .

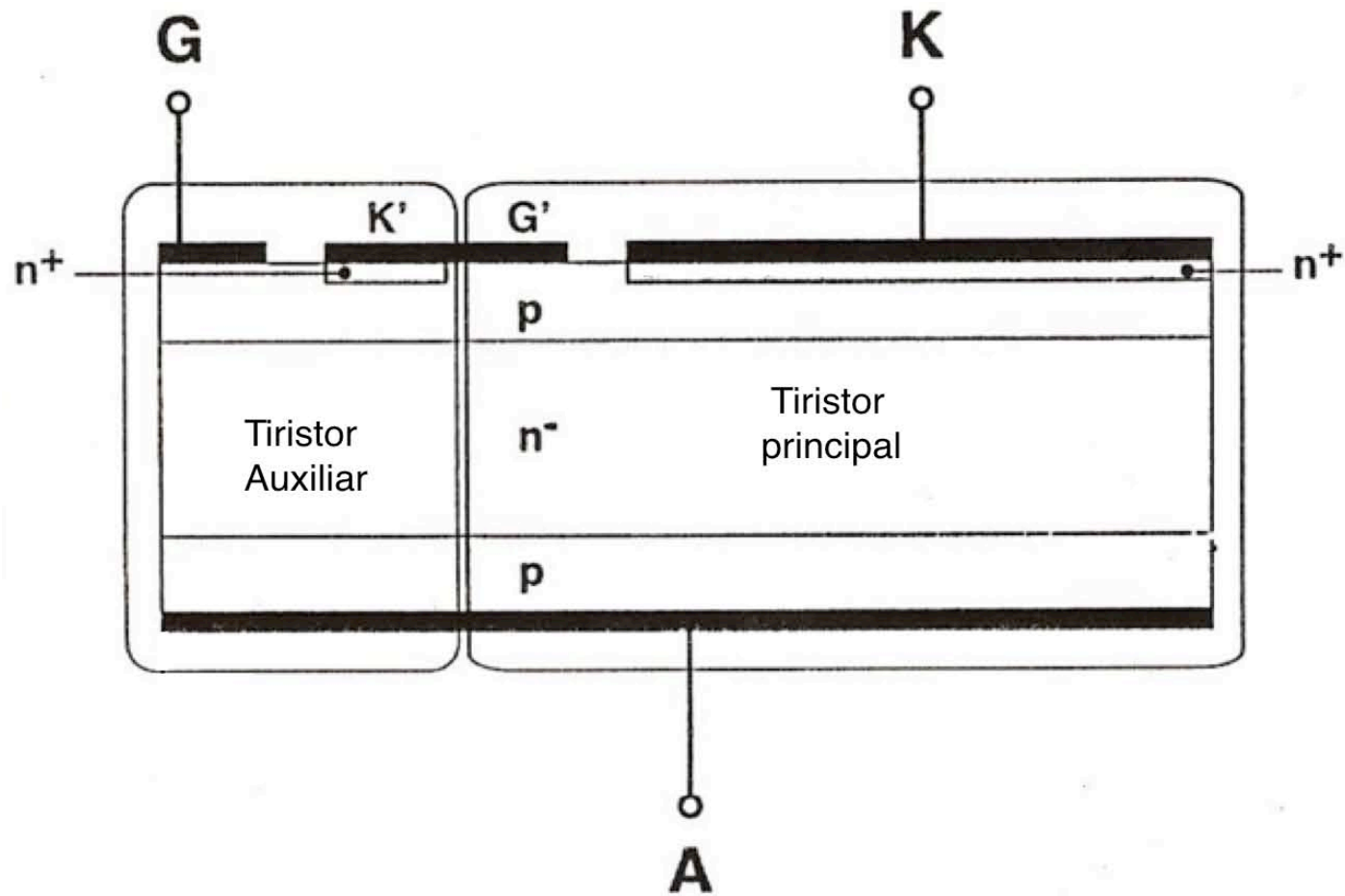


Operación de la compuerta amplificadora:

El pulso de corriente externa, I_G , enciende el tiristor auxiliar y la corriente de ánodo de esta, I_{AG} se suma a la corriente del pulso de disparo para encender el tiristor principal.

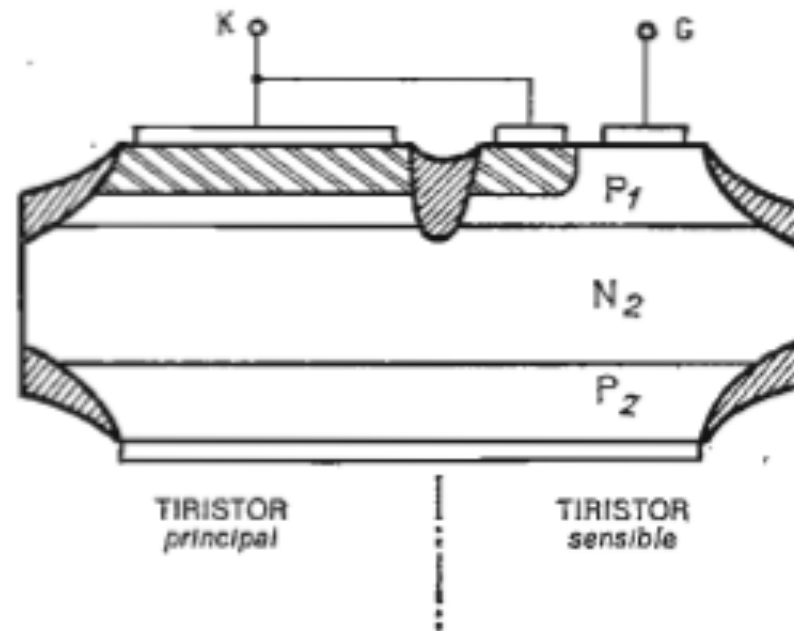
Esta estructura que se puede implementarse de dos maneras:

- 1.- Montando dos tiristores fabricados en cristales individuales en el mismo encapsulado e interconectándolos con alambres conductores.

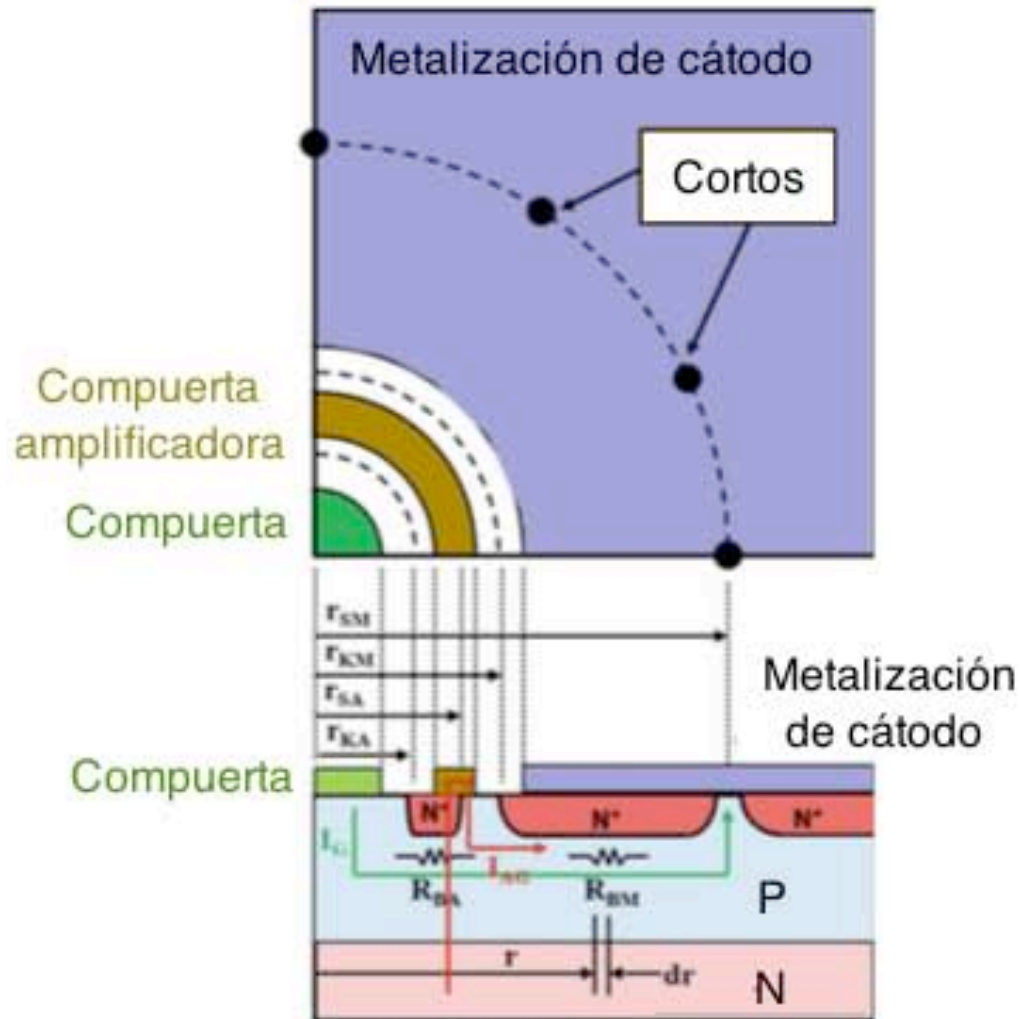


Tiristor híbrido tipo "compuerta amplificadora"
 una configuración implementada con dos tiristores individuales.

2.- Construyendo una estructura semiconductor funcionalmente equivalente a la de dos tiristores individuales en un solo cristal semiconductor.



Tiristor tipo "compuerta amplificadora" implementado en un solo cristal.



Tiristor de compuerta amplificadora integrado en el mismo cristal con el tiristor principal.

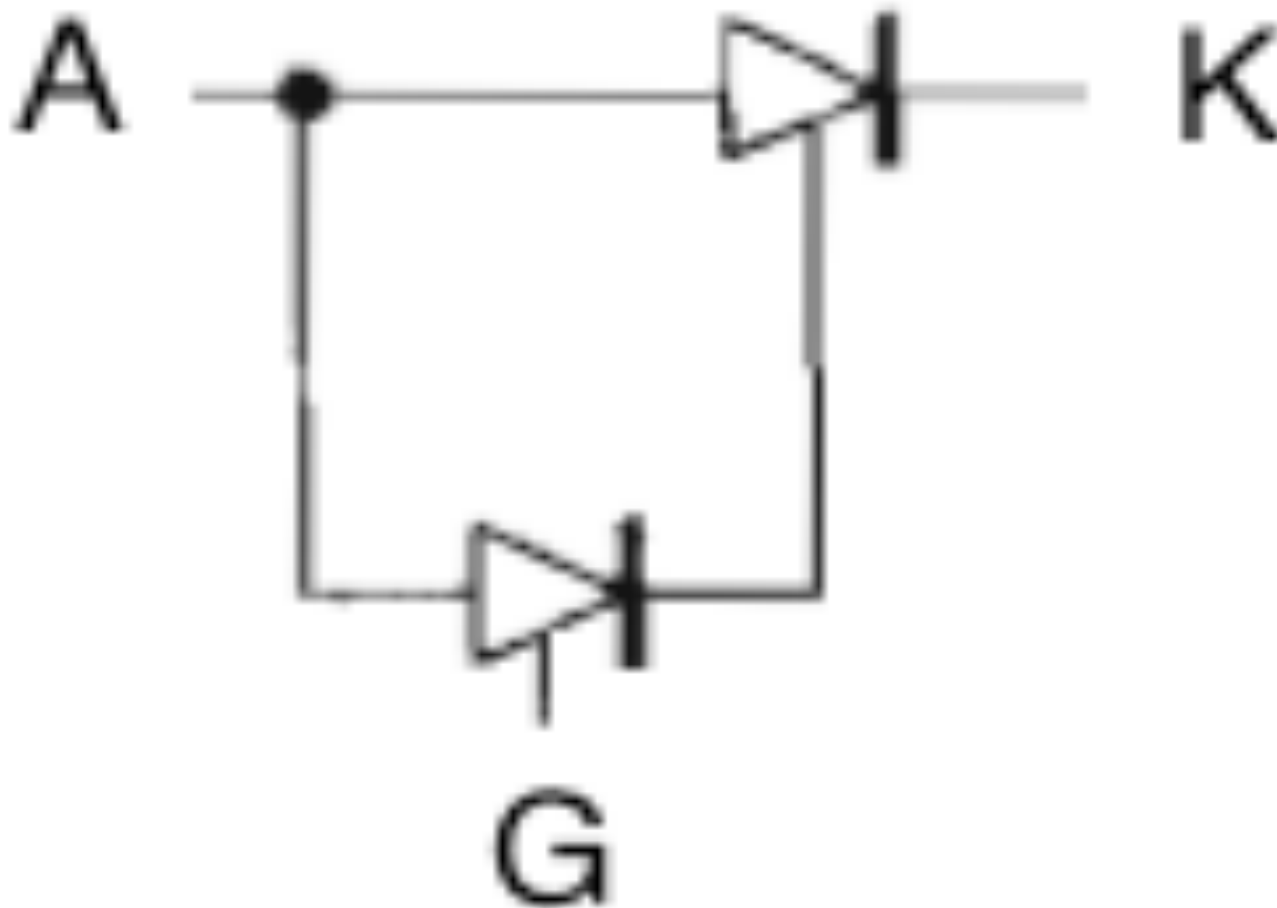
Tiristor auxiliar



Tiristor principal

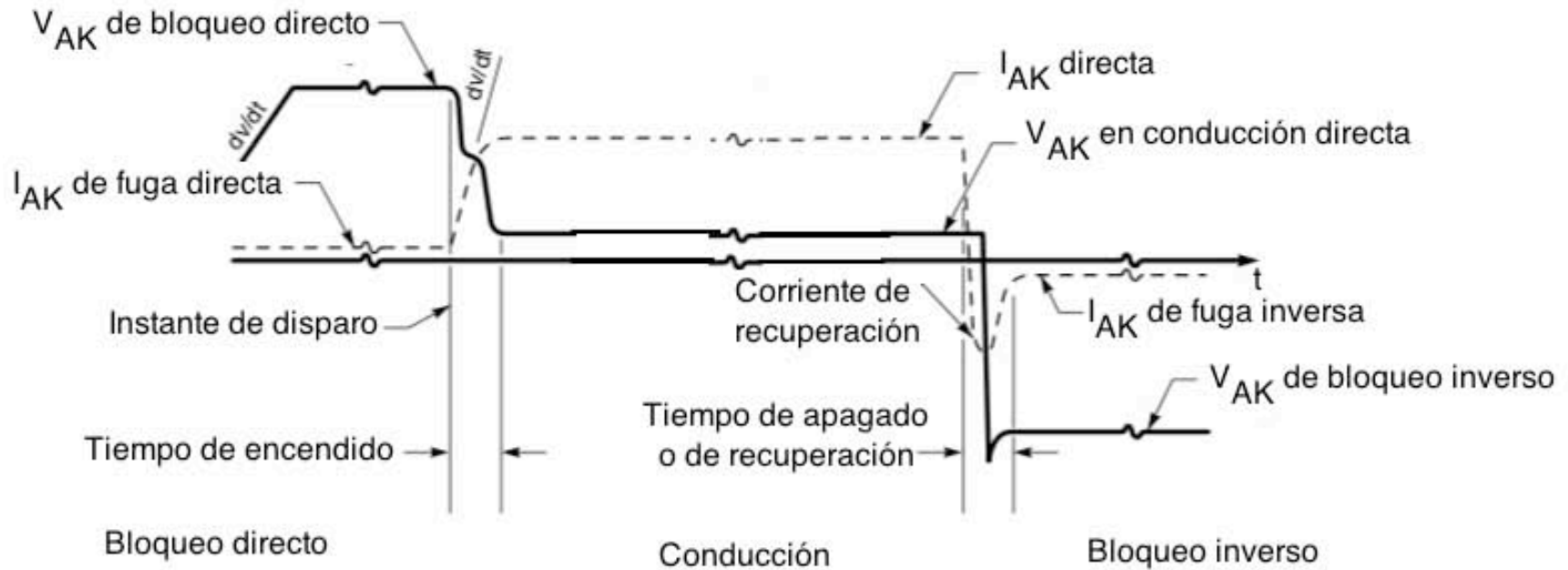
Compuerta

Arreglo interdigitado en espiral del tiristor auxiliar para maximizar el área inicial de conducción del tiristor principal.



Modelo equivalente funcional del tiristor con compuerta amplificadora.

CICLO DE OPERACIÓN DEL TIRISTOR.



Formas de onda de corriente y tensión AK durante el ciclo de operación del tiristor.

El ciclo de operación del tiristor esta formado por 5 intervalos:

1.-Bloqueo directo:

La tensión AK, definida por el circuito externo, es positiva, pero el tiristor no conduce porque no ha recibido el pulso de disparo por compuerta.

Entre ánodo y cátodo circula la corriente de fuga directa, I_{IF} , definida principalmente por la tensión externa AK y las características del tiristor, y se está disipando en el dispositivo la potencia de bloqueo directa, $P_{FB}(t)$.

$$P_{FB}(t) = V_{AK}(t)I_{IF}(t)$$

Esta potencia es usualmente muy pequeña y suele ser despreciada en los cálculos de disipación.

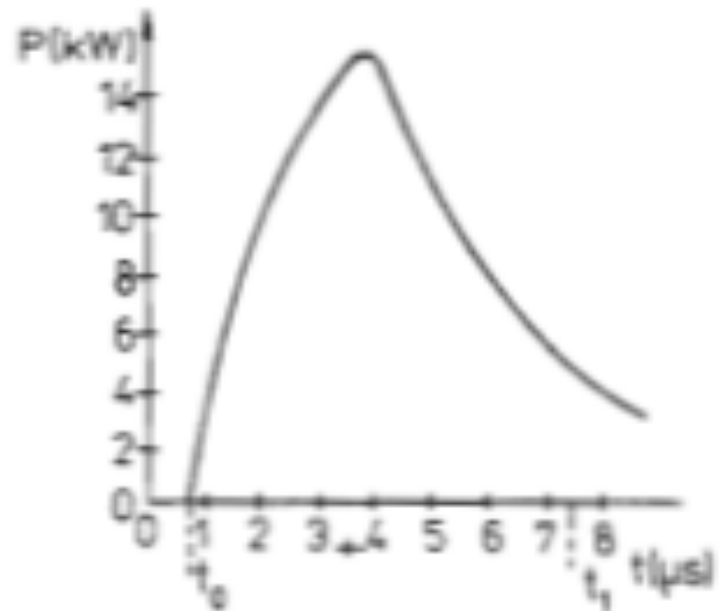
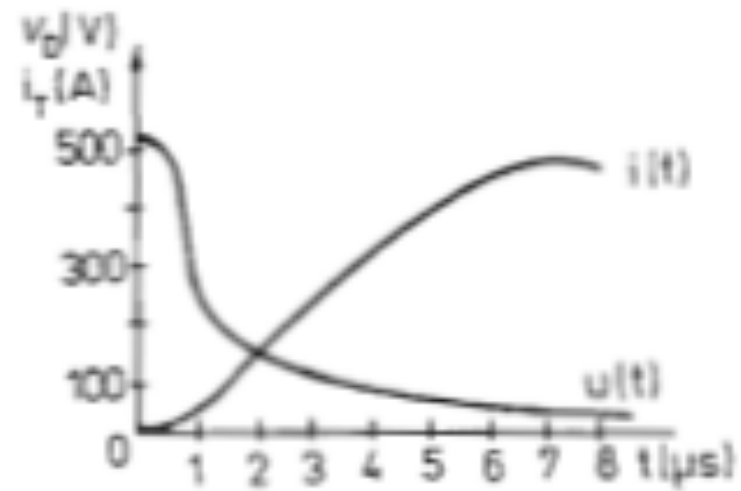
2.- Transición de encendido:

En $t=0$ se aplica el pulso de corriente de compuerta que inicia el proceso de encendido, la corriente AK crece con un $di_{AK}(t)/dt$ que está básicamente definido por el circuito externo, mientras que la tensión V_{AK} cae con una pendiente definida básicamente por las características del tiristor.

La potencia disipada durante el encendido es:

$$P_{ton}(t) = V_{AK}(t)I_{IF}(t)$$

Esta potencia alcanza un valor pico que puede ser significativamente alto y luego decae. Si la frecuencia de conmutación es baja (frecuencia de línea) esta potencia puede ser despreciada en los cálculos de disipación, salvo en aplicaciones de alta potencia.



Evolución de la corriente AK, la tensión AK y la potencia disipada durante una transición de encendido, con tiristores de potencia media.

3.- Conducción en directo:

La corriente A_K es positiva y está definida por el circuito externo.

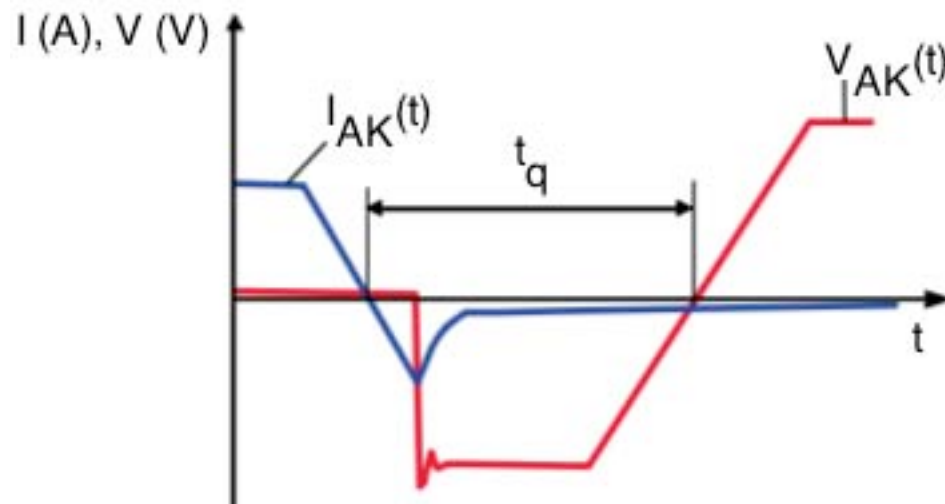
La caída en conducción, V_F , es positiva y está definida principalmente por las características del tiristor.

$$P_{on}(t) = V_{AK}(t)I_{IF}(t) = V_F(t)I_{IF}(t)$$

En aplicaciones de baja frecuencia de conmutación este es el componente principal que debe ser considerado en los cálculos de disipación.

4.- Transición de apagado:

Se inicia cuando la corriente I_{AK} , definida por el circuito externo se reduce por debajo del valor de la corriente de sostenimiento del dispositivo, I_H ($I_H > 0$), aunque en muchos casos si la corriente I_{AK} en conducción tiene un valor elevado se asume que el comienzo del apagado ocurre cuando $I_{AK} = 0$.



Transición de apagado mostrando el tiempo crítico t_q que debe transcurrir antes de que se reaplique una tensión positiva.

En el momento en que la corriente A_K cruza por cero existe en el el tiristor un exceso de portadores que debe ser eliminado antes de que el dispositivo deje de conducir y entre en el estado de bloqueo.

Mientras no se completa el proceso de eliminación del exceso de portadores el tiristor no entra en el estado de bloqueo.

El tiempo de apagado, intervalo que transcurre desde que la corriente cruza por cero hasta que el tiristor entra en bloqueo es el tiempo de apagado del dispositivo, t_q .

El tiempo de apagado varia entre cerca de $1000\mu s$ para un tiristor lento de alta potencia y propósitos generales hasta unos $10\mu s$ para uno "rápido"

Parte de los portadores en exceso se eliminan por recombinación, pero el resto salen del dispositivo como un pulso de corriente negativa, cuya pendiente de crecimiento está definida por el di_{AK}/dt de caída de la corriente inmediatamente antes del comienzo del apagado.

El proceso de recombinación se puede maximizar incluyendo núcleos de recombinación, usualmente átomos dopantes de oro esto aumenta la velocidad de apagado, pero aumenta las pérdidas en conducción.

El pulso de corriente inversa crece hasta un valor pico y luego decae al valor de la corriente de fuga inversa, I_{IR} en un tiempo t_q , definido por las características del dispositivo.

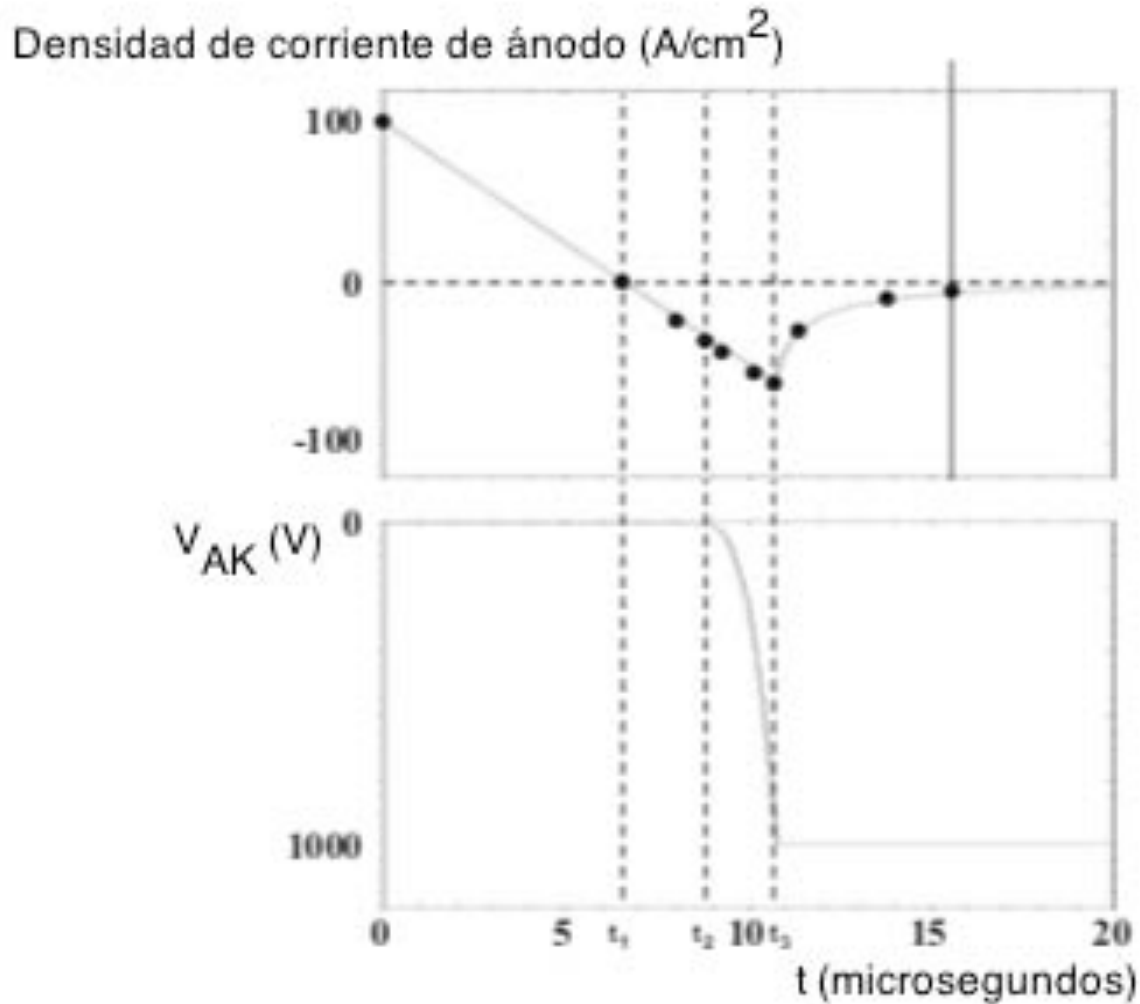
El pulso de corriente inversa interacciona con las inductancias del circuito, incluyendo las parásitas del propio dispositivo, y dado que puede tener un di/dt elevado, puede producir sobre tensiones significativas.

El dispositivo no está en condiciones de bloquear tensiones directas hasta que no ha transcurrido el tiempo t_q y no se ha completado el proceso de eliminación del exceso de portadores en el cristal semiconductor.

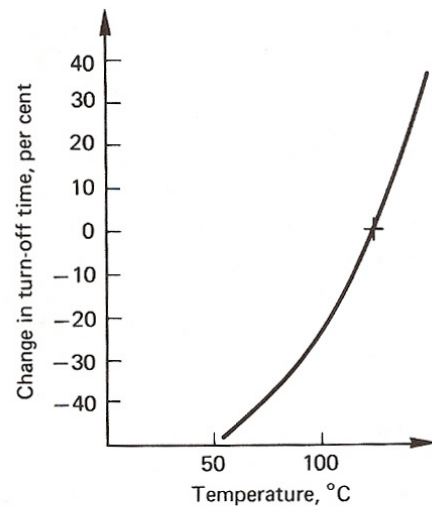
Si se aplica una tensión AK directa durante este tiempo el proceso de apagado aborta y el tiristor vuelve a entrar en conducción.

En aplicaciones a frecuencia de línea este comportamiento no causa problemas, porque el tiempo de recuperación inversa, t_q , es comparativamente corto, del orden de algunos centenares de μs como máximo, frente a un tiempo de semiciclo inverso del orden de los 8,33 ms a 60Hz.

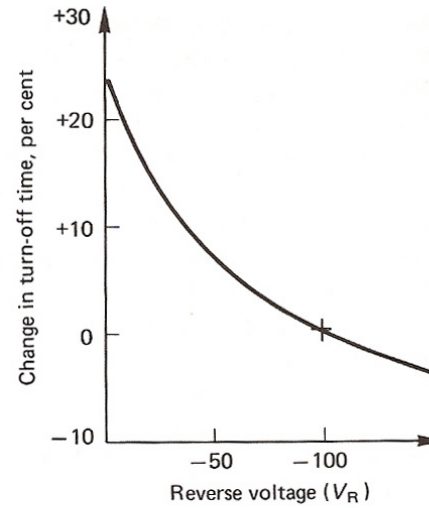
El tiempo de recuperación inversa, t_q , es el factor que limita la frecuencia máxima de operación cuando los tiristores son empleados en circuitos de apagado forzado para aplicaciones DC/DC o DC/AC.



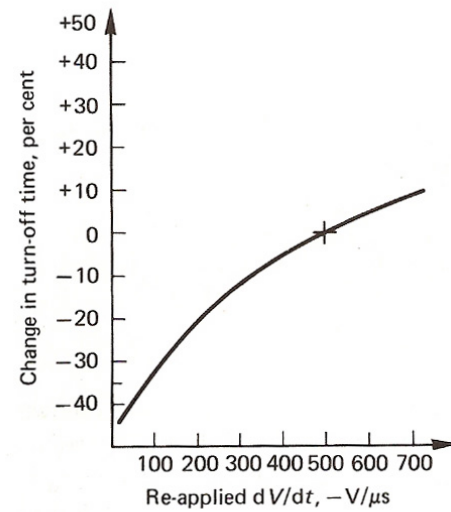
Transición de apagado forzado de un tiristor de alta tensión (1.000V de bloqueo inverso). Tiempo de bloqueo inverso, t_q , del orden de los 10 μs .



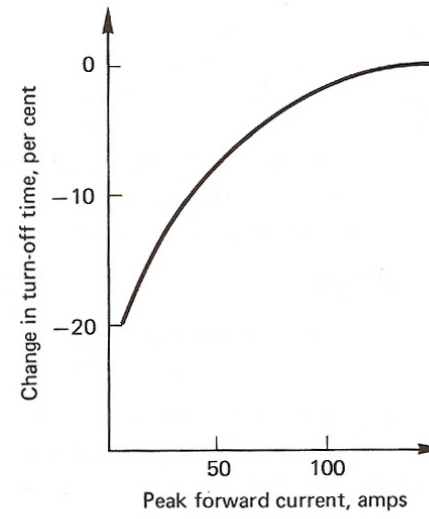
(a)



(b)



(c)



(d)

Variación de las características de apagado frente a: temperatura (a), tensión inversa (b), dV/dt reaplicado (c) y corriente directa pico (d).

Durante la transición de apagado se produce otro pico de disipación de potencia similar al producido durante la transición de encendido:

$$P_{toff}(t) = V_{AK}(t)I_{IF}(t)$$

Si la frecuencia de conmutación es baja (frecuencia de línea) esta potencia puede ser despreciada en los cálculos de disipación, salvo en aplicaciones de alta potencia.

5.-Bloqueo inverso:

La tensión AK, definida por el circuito externo, es negativa.

Entre cátodo y ánodo circula la corriente de fuga inversa, I_{IR} , definida principalmente por las características del tiristor, y se está disipando en el dispositivo la potencia de bloqueo directa, $P_{FB}(t)$:

$$P_{RB}(t) = V_{AK}(t)I_{IR}(t)$$

Esta potencia es usualmente muy pequeña y suele ser despreciada en los cálculos de disipación.