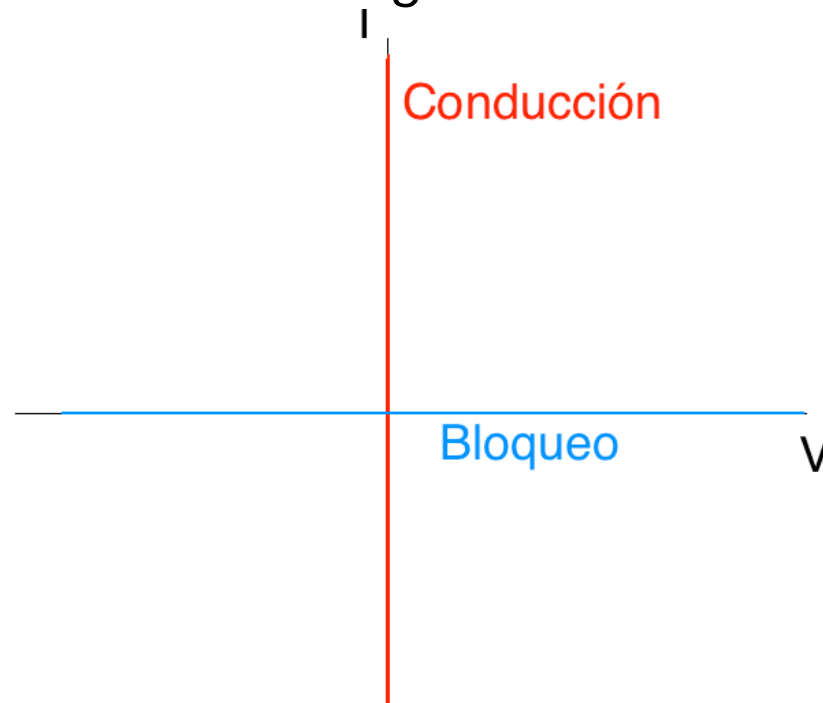


Dispositivos electrónicos de control de potencia.

I.- El conmutador ideal.

El conmutador ideal tiene la siguiente curva V/I característica:



Característica V/I del conmutador ideal en estado estacionario.

Línea azul: Conmutador ideal en el estado de bloqueo.

Línea roja: Conmutador ideal en el estado de conducción.

El conmutador ideal tiene las siguientes características:

- 1.- Es capaz de conducir corriente en las dos direcciones.
- 2.- Es capaz de bloquear la conducción en las dos direcciones.
- 3.- No hay límite a la cantidad de corriente que puede conducir en ambas direcciones.
- 4.- No hay límite a la cantidad de voltaje que puede bloquear en las dos direcciones.
- 5.- Su resistencia en conducción es cero, no hay caída de tensión en conducción.
- 6.- Su resistencia de bloqueo es infinita, no hay circulación de corriente de fuga en bloqueo.
- 7.- El interruptor ideal no disipa potencia.

- 8.- Los cambios de estado de conducción a bloqueo ("apagado") y de bloqueo a conducción ("encendido") son instantáneos.
- 9.- El conmutador ideal no disipa potencia durante los cambios de estado.
- 10.- El conmutador ideal es completamente controlado, esto es, los cambios de estado de encendido y apagado se ejecutan bajo el control de una señal de mando.
- 11.- La respuesta a la señal de cambio de estado es instantánea.
- 12.- La señal de mando es un cambio en el nivel del potencial aplicado al terminal de mando (dispositivo comandado por voltaje).
- 13.- El conmutador ideal no consume potencia de la señal de mando de cambio de estado.

A pesar de los esfuerzos por desarrollar aproximaciones al conmutador ideal a lo largo de la historia de la tecnología electrónica, por supuesto el conmutador ideal no existe, y posiblemente no llegue a existir nunca, porque por razones físicas fundamentales no será posible implementar las características 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 y 13.

En el estado actual de la tecnología, se ha abandonado el uso de germanio, Ge, y el mercado lo dominan los dispositivos de control de potencia implementados en silicio, Si, pero se están realizando avances importantes en dispositivos a base de Carburo de Silicio (Silicon Carbide), SiC, y de Nitruro de Galio (Gallium Nitride), GaN, que están empezando a penetrar en el mercado.

II.- Los conmutadores reales.

Clasificación de los dispositivos electrónicos de control de potencia.

Independientemente del material empleado en su construcción, los dispositivos electrónicos de control de potencia de estado sólido pueden ser:

A.-Por los portadores de la corriente:

1.-Dispositivos de conducción principal por portadores mayoritarios. Ejemplos: Diodos Schottky, Power MOSFETs.

2.-Dispositivos de conducción principal por portadores minoritarios. Diodos PN, Tiristores, Transistores Bipolares de Juntura.

B.-Por la dirección permitida para la circulación de corriente:

- 1.- Unidireccionales: La corriente circula en el dispositivo en una sola dirección.
- 2.- Bidireccionales: La corriente circula en el dispositivo en las dos direcciones.

C.-Por la capacidad de control externo:

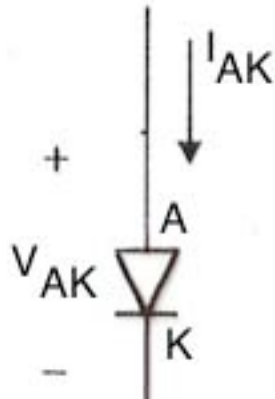
1. No controlados (conmutadores del primer tipo).
- 2.- Controlados en encendido, o semi-controlados (conmutadores del segundo tipo).
- 3.- Controlados en encendido y apagado, o completamente controlados (conmutadores del tercer tipo).

1.- Dispositivos electrónicos de control de potencia no controlados (conmutadores del primer tipo).

Tipos de diodos.

1.1.-Diodos rectificadores.

a.- De unión PN:



Símbolo circuital del diodo rectificador estándar.

Son dispositivos unidireccionales de dos terminales (ánodo, "A" y cátodo, "K") cuyo estado (encendido/apagado) depende

exclusivamente de las condiciones definidas en el circuito externo y la conducción principal es por portadores minoritarios.

Cuando el diodo está apagado (no conduce, esta en "estado de bloqueo"), se comporta como un dispositivo controlado por voltaje para el proceso de encendido: si el circuito externo polariza al ánodo con tensión positiva con respecto al cátodo, el diodo cambia del estado bloqueo al de conducción de corriente en la dirección AK ("conmutación de encendido"), el valor de la corriente AK en conducción está determinado básicamente por las condiciones del circuito externo.

Una vez en conducción el diodo se comporta como un dispositivo comandado por corriente, y solo pasa al estado de bloqueo (conmutación de apagado) cuando el circuito externo trata de hacer que circule corriente en sentido inverso, cátodo-ánodo.

Idealmente en el estado de conducción la caída de tensión A-K debe ser cero (impedancia de conducción igual a cero), y la corriente inversa, cuando el cátodo es positivo con respecto al ánodo debe ser cero (impedancia de bloqueo inverso infinita).

Idealmente los cambios de estado deben ser instantáneos cuando cambian las condiciones externas de polarización A-K.

Generalmente son dispositivos fabricados en Si.

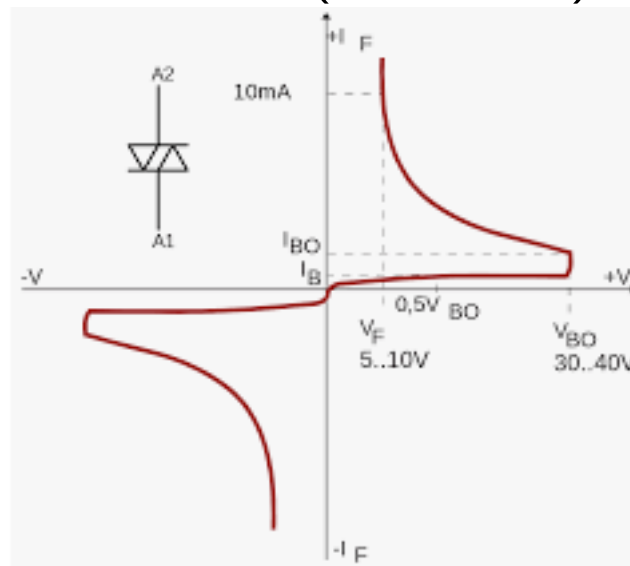
b.-De unión Schottky:

Son homólogos a los diodos de unión PN, salvo por el hecho de que son dispositivos de conducción principal por portadores mayoritarios

Los diodos de unión Schottky se fabrican en Si, SiC y GaN .
Salvo los diodos Schottky, los diodos especiales son todos de Si.

!2.-Diodos Zener.

1.3.-DIAC (Diodo AC).



Curva V/I genérica y símbolo circuital del DIAC.

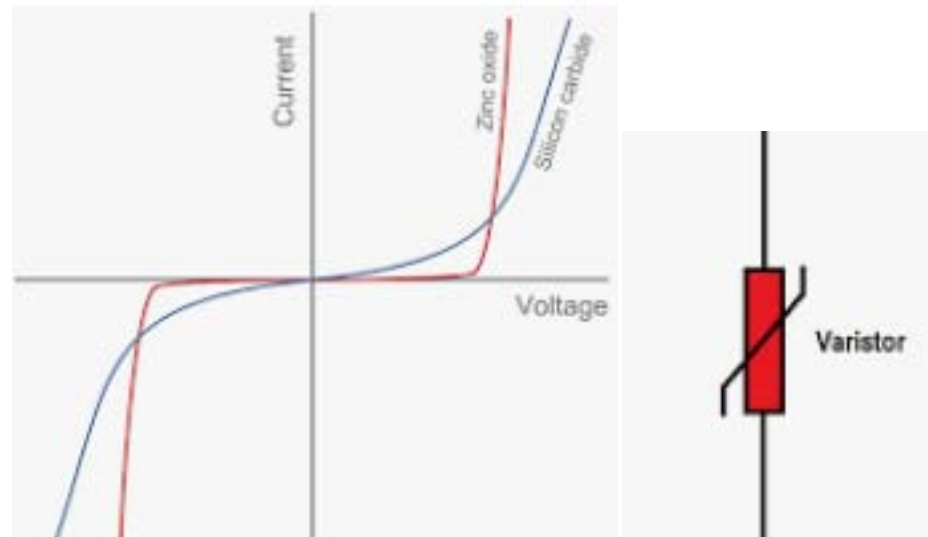
Son dispositivos bidireccionales de dos terminales, que entran en avalancha (conducción no controlada) cuando la tensión externa alcanza el voltaje de ruptura del dispositivo en cualquiera de las dos polaridades. Los voltajes de avalancha son simétricos.

En el estado de avalancha la caída en conducción colapsa y el dispositivo conduce mientras la corriente circulante supera un valor mínimo (corriente de sostenimiento).

Son componentes de baja potencia que fueron muy utilizados en circuitos de disparo para dispositivos semi-controlados en aplicaciones de potencia baja-media donde el costo era determinante, pero en la actualidad su campo de aplicación está muy reducido.

Todos los DIACs presentes en el mercado son dispositivos de Si.

1.4.-Varistor ("Variable resistor").



Curva V/I genérica y símbolo circuital del Varistor.

Son dispositivos bidireccionales de dos terminales, que entran en conducción cuando la tensión externa alcanza el voltaje de ruptura del dispositivo en cualquiera de las dos polaridades. Los voltajes de ruptura son simétricos.

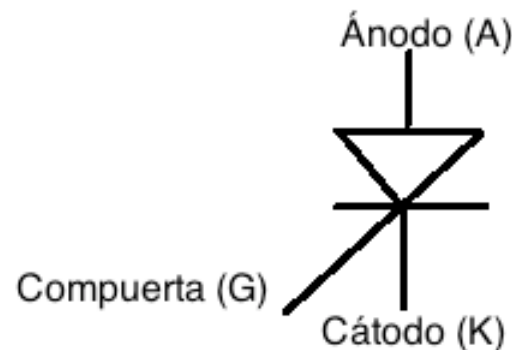
Su característica V/I es equivalente a la de dos diodos Zener conectados en serie en oposición (ánodo a ánodo o cátodo a cátodo).

Idealmente la tensión en conducción permanece constante en el valor de ruptura mientras se mantiene la corriente entre sus terminales.

No son aplicables en el control directo de potencia, pero su uso como dispositivo auxiliar de protección contra sobre-voltajes está muy extendido en circuitos electrónicos de potencia y en circuitos de comunicaciones.

2.- Dispositivos electrónicos de control de potencia controlados en encendido, o semi-controlados (conmutadores del segundo tipo).

2.-1.- SCR (Silicon Controlled Rectifiers, Rectificadores Controlados de Silicio) o Tiristores (Thyristors):



Símbolo circuital del SCR

Son dispositivos unidireccionales de tres terminales, dos de potencia (ánodo, A, cátodo, K) y uno de control (compuerta, G "Gate").

La condición necesaria para que circule corriente A-K es que la tensión externa A-K sea positiva; establecida esta condición, el SCR entra en conducción cuando se aplica un pulso de corriente de la magnitud requerida en el terminal de compuerta.

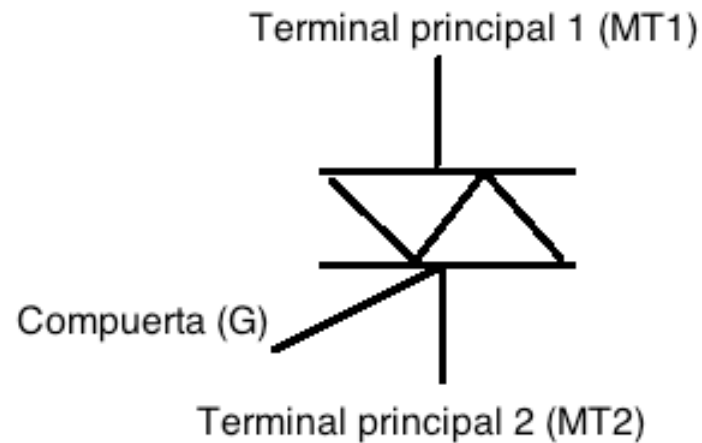
El paso del estado de conducción al de bloqueo (apagado) no es controlado, depende del estado del circuito externo y se produce cuando deja de circular corriente AK.

Idealmente en el estado de conducción la caída de tensión A-K debe ser cero (impedancia de conducción igual a cero), y la corriente inversa, cuando el cátodo es positivo con respecto al ánodo debe ser cero (impedancia de bloqueo inverso infinita).

Idealmente los cambios de estado deben ser instantáneos cuando se cumplen las respectivas condiciones de conmutación.

En la actualidad existen SCR de Si y de SiC.

2.-2.- TRIAC (TRIodo AC):



Símbolo circuital del TRIC

Dispositivos bidireccionales de tres terminales, dos principales de potencia (terminal principal 1, MT1, terminal principal 2, MT2,) y uno de control (compuerta, G "Gate").

Son el equivalente funcional a dos SCR conectados en anti-paralelo, implementados en un solo cristal semiconductor.

La condición necesaria de conducción ideal es que el dispositivo este conectado a una fuente de tensión, establecida esta condición el establecida esta condición, el TRIAC entra en conducción cuando se aplica un pulso de corriente de la magnitud requerida en el terminal de compuerta.

El paso del estado de conducción al de bloqueo (apagado) no es controlado, depende del estado del circuito externo y se produce cuando deja de circular corriente entre los dos terminales principales.

Los TRIACs están optimizados para operar como conmutadores AC a la frecuencia de línea en aplicaciones de potencia baja y media-baja.

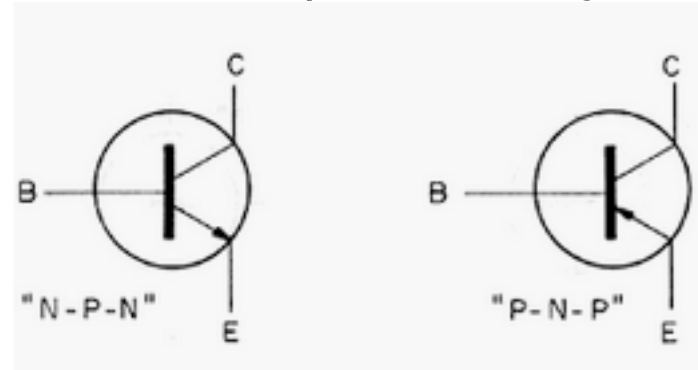
Los TRIACs presentes en el mercado son todos de Si.

3. Dispositivos electrónicos de control de potencia controlados en encendido y en apagado (completamente controlados o conmutadores del tercer tipo), normalmente apagados.

En reposo los dispositivos están en el estado de bloqueo.

Cuando se aplica tensión, el estado del dispositivo (encendido/apagado) depende de las condiciones definidas en el circuito externo y de las acciones de un terminal auxiliar de control.

3.1.- Transistores bipolares de juntura (BJT).



Símbolos circuitales del transistor bipolar de juntura NPN (izquierda) y PNP (derecha).

C: colector; B: base; E: emisor.

Son dispositivos unidireccionales de tres terminales, dos principales (colector, C, y emisor, E) y uno auxiliar de control (base, B), cuya corriente colector-emisor está definida por la corriente inyectada en el terminal de control, la base.

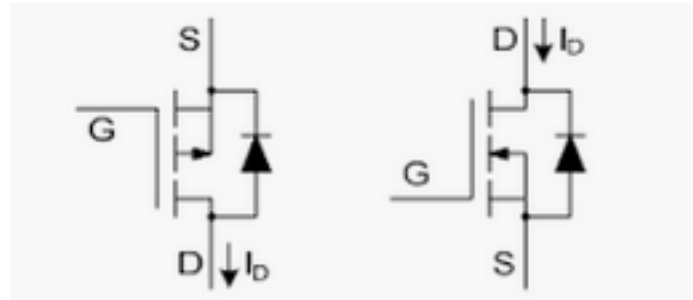
Por construcción pueden ser de tipo NPN o PNP, aunque los primeros son mas comunes.

La condición necesaria de conducción en un BJT-NPN es que la tensión C-E sea positiva; establecida esta condición el transistor conduce mientras se le inyecte corriente a través de la juntura B-E.

La condición necesaria de conducción en un BJT-PNP es que la tensión E-C sea positiva; establecida esta condición el transistor conduce mientras se extraiga corriente a través de la juntura E-B. En un transistor ideal la caída de tensión C-E debe ser cero en conducción, y la corriente C-E debe ser cero en bloqueo.

Los BJTs de Si fueron los primeros dispositivos de control de potencia completamente controlados en el mercado; en la actualidad han sido desplazados por los IGBTs, aunque se afirma que los BJTs de GaN podrían recuperar parte del mercado perdido.

3.2.- Transistores Metal-Oxido-Semiconductor de efecto de campo de potencia (Power-MOSFET):



Símbolos circuitales del transistor MOSFET de potencia (PowerMOSFET) tipo P (izquierda) y tipo N (derecha).

D: Drenador ("Drain"); G: Compuerta; S: Surtidor ("Source").

Son dispositivos bidireccionales de tres terminales, dos principales, (Drenador, D, "Drain", Surtidor, S, "Source") y uno auxiliar, Compuerta, G ("Gate"), aislada del cuerpo del dispositivo por una capa de dióxido de silicio (SiO_2).

La condición necesaria de conducción directa controlada en un PowerMOSFET tipo N es que la tensión D-S sea positiva; establecida esta condición el transistor conduce mientras se mantenga una tensión positiva entre los terminales G-S.

El dispositivo conduce en modo diodo (incontrolado) cuando la tensión S-D es positiva.

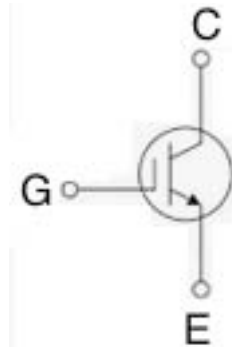
La condición necesaria de conducción directa controlada en un PowerMOSFET tipo P es que la tensión S-D sea positiva; establecida esta condición el transistor conduce mientras se mantenga una tensión negativa entre los terminales G-S.

El dispositivo conduce en modo diodo (incontrolado) cuando la tensión D-S es positiva.

En un MOSFET ideal la caída de tensión D-S en conducción debe ser cero, y la corriente D-S en bloqueo debe ser cero mientras D esté polarizado positivo respecto a S.

La mayoría en el mercado son PowerMOSFETs de Si, pero también se ofrecen de SiC y algunos de GaN.

3. 3.- Transistores bipolares de compuerta aislada, IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors).



Símbolo circuital del Insulated Gate Bipolar transistor (IGBT).

C: Colector; G: Compuerta; E: Emisor.

En su configuración básica son dispositivos unidireccionales de tres terminales, dos principales (colector, C, y emisor, E) y uno auxiliar (compuerta, G "Gate").

La condición necesaria de conducción directa controlada en un IGBT es que la tensión C-E sea positiva; establecida esta condición el IGBT conduce mientras se mantenga una tensión positiva entre los terminales G-E.

Operacionalmente se comportan como un híbrido tipo cascode entre un BJT y un MOSFET, y estructuralmente son un derivado de los MOSFETs de potencia.

En un transistor ideal la caída de tensión C-E debe ser cero en conducción, y la corriente C-E debe ser cero en bloqueo.

Como los IGBT intrínsecos son de conducción unidireccional (C-E), para facilitar su aplicación en convertidores tipo DC-DC o DC-AC, la mayor parte de los IGBTs están encapsulados con un diodo de libre conducción conectado en antiparalelo, lo que convierte al arreglo (IGBT-diodo) en un dispositivo bidireccional controlado en el sentido positivo (C-E), cuando la corriente circula a través del IGBT, y no controlado en el sentido E-C, cuando la corriente circula a través del diodo auxiliar.

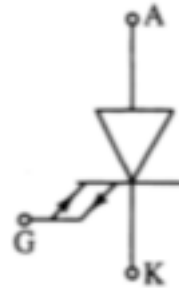
El mercado lo dominan los IGBTs de Si, pero se están introduciendo los de SiC.

En el estado actual de la tecnología los componentes electrónicos de control de potencia completamente controlados mas usados y de mayor volumen de ventas son los MOSFETs e IGBTs; las ventas pasaron de 8,7 billones U.S. \$ en 2004 a 12,9 billones U.S. \$ en 2016 y se espera alcancen unos 15,8 billones de U.S. \$ en 2021.



Volumen del mercado de MOSFETs e IGBTs en billones americanos (10^9) de dólares, medido hasta 2016 y estimado hasta 2021.

3.4.- Rectificadores controlados apagados por compuerta, GTOs (Gate Turn-Off).



Símbolo circuital del Tiristor Apagado por Compuerta GTO (Gate Turn-Off Thyristor).

A: Ánodo; G: Compuerta; K: Cátodo.

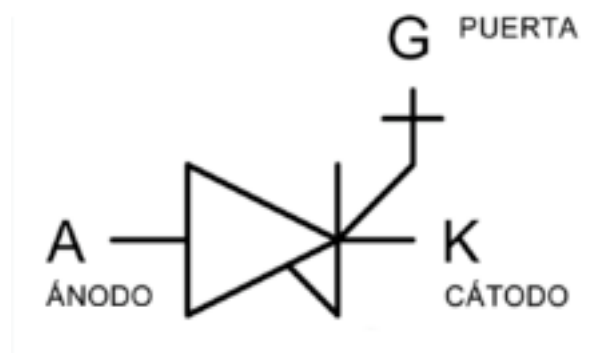
Son dispositivos unidireccionales del tipo tiristor, optimizados para que puedan ser apagados extrayendo corriente desde su terminal de compuerta.

En general son dispositivos de conmutación relativamente lenta, optimizados para operar a niveles de tensión y corriente muy elevados (kV y kA).

Las condiciones de operación de un tiristor GTO ideal son iguales a las de un tiristor ideal salvo el hecho de que aún cuando la tensión A-K es positiva pueden ser apagados extrayendo un pulso de corriente de amplitud suficiente por la Compuerta.

La mayoría de los GTOs son de Si, pero también están empezando a ofrecerse GTOs de SiC.

3.5.- Tiristor conmutado por compuerta integrada IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor)



Símbolo circuital del tiristor IGCT.

Los tiristores IGCT son dispositivos tipo tiristores GTO optimizados para operar a muy altas tensiones y corrientes, introducidos al mercado por la compañía ABB.

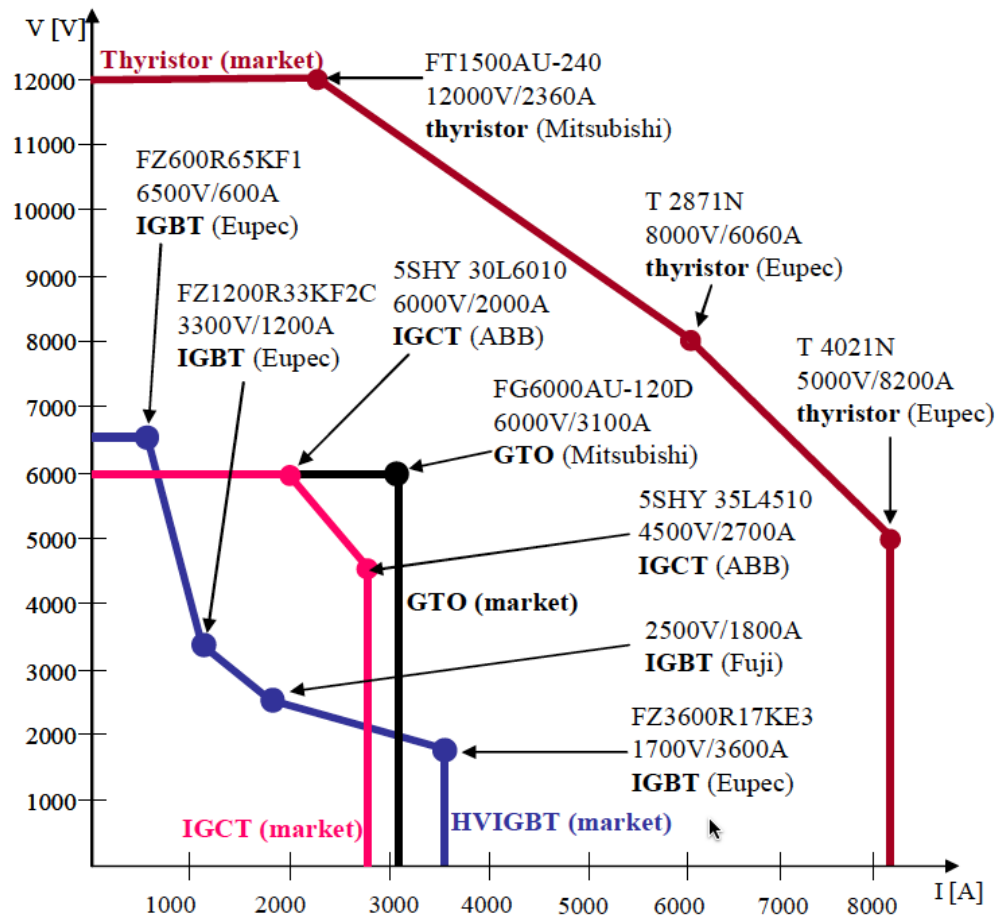
Se diferencian de los tiristores GTO convencionales porque en la estructura del semiconductor esta integrado un diodo de conducción inversa, y porque el dispositivo semiconductor esta montado directamente sobre un circuito impreso en el cual se hayan también los circuitos de manejo de compuerta tanto de encendido como de apagado, lo que permite optimizar la respuesta del dispositivo de control de potencia en conmutación.

Campo de aplicación de GTOs, IGCTs y IGBTs de alta potencia.

Los GTOs y los IGCTs son los dispositivos electrónicos de control de potencia de conmutación controlada mas poderosos existentes actualmente en el mercado.

Su nicho son las aplicaciones de muy alta potencia, usualmente también a muy alta tensión, donde solo ellos son capaces de desempeñarse, y donde su baja velocidad de conmutación debe ser aceptada porque no existen sustitutos válidos.

Se están desarrollando IGBTs de alta potencia, pero si bien se ha logrado demostrar muy altos voltajes de bloqueo ($> 6\text{kV}$) y muy altas corrientes en conducción ($> 3\text{kA}$), no ha sido posible combinar ambas capacidades y el orden de capacidades sigue siendo GTO, IGCT y IGBT.



El mercado de los dispositivos de control de potencia para aplicaciones de muy alta potencia.

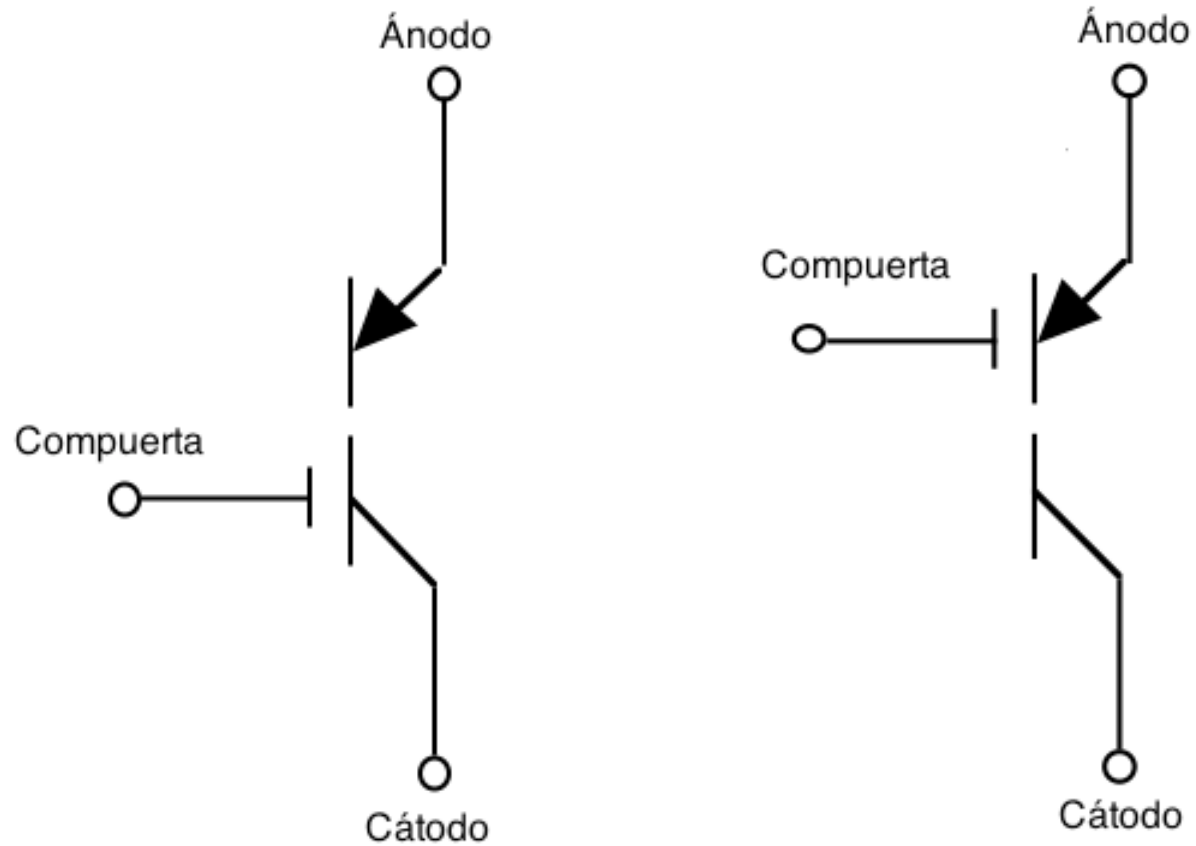
Nota: Los SCR son dispositivos controlados solo en encendido.

3.6.- Dispositivos emergentes tipo SCR-GTO-MOSFET

El desarrollo de un amplio mercado para aplicaciones con muy altos niveles de potencia (HVDC, FACTS, control de motores de muy alta potencia) y el éxito logrado con el desarrollo de dispositivos que incorporan en su estructura elementos funcionales de dispositivos tipo bipolar y de compuerta aislada ha llevado a que se propongan varios conmutadores completamente controlados de estructura híbrida, que combinan el mecanismo de conducción de la corriente principal de los SCR-GTO, que es el que permite la mayor densidad de corriente y muy altos voltajes de bloqueo, con esquemas de control de corriente del tipo compuerta aislada, que son los que requieren la menor energía de control.

Entre estos nuevos dispositivos, básicamente experimentales, se pueden mencionar los siguientes:

3.6.1.-Tiristores controlados por compuerta aislada (MCT: MOS Controlled Thyristor).

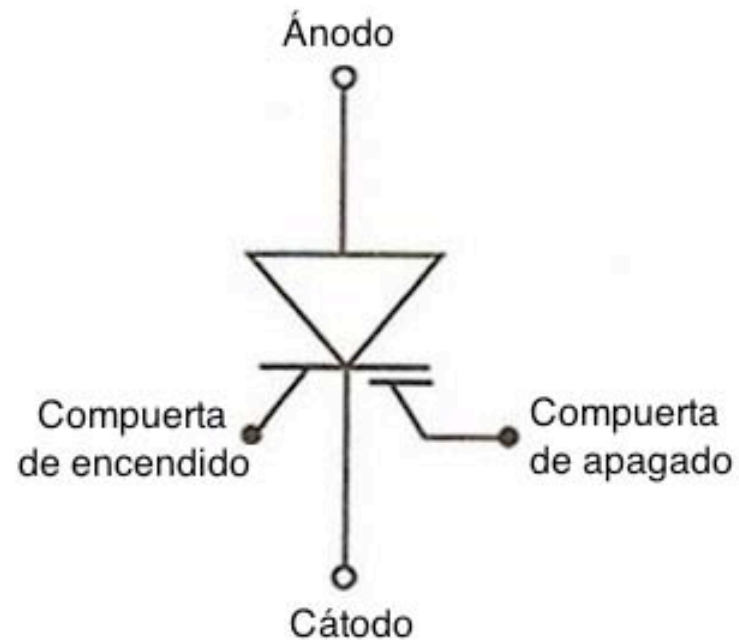


Símbolo circuital del N-MCT (izquierda) y del P-MCT (derecha)
(no estandarizados)

Los MTC son dispositivos monolíticos, en cuya estructura se define una configuración básica tipo PNPN basada en la de los SCRs, encargada de las funciones de bloqueo y conducción de la corriente de trabajo, y sendas estructuras tipo MOSFET canal N y MOSFET canal P, encargadas de las funciones de encendido y apagado por compuerta.

Se han propuesto versiones tipo P y tipo N de los MTC, pero estos dispositivos aún no han consolidado su presencia en el mercado.

3.6.2.- Tiristor apagado por MOSFET (MTO, MOS Turn-off Thyristor).



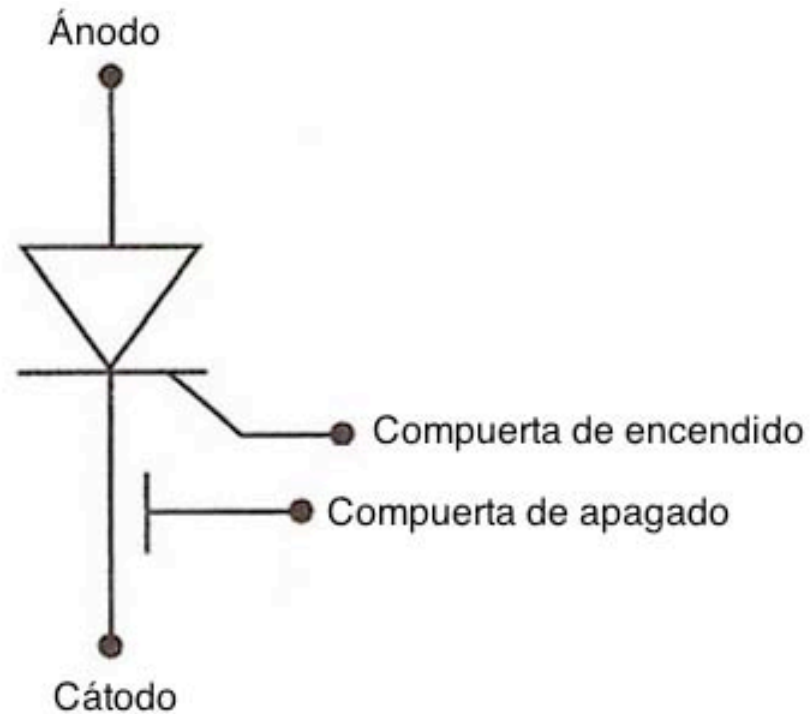
Símbolo circuital de MTO (no estandarizado).

Es un dispositivo híbrido no monolítico, formado por un GTO y un arreglo de MOSFETs individuales conectados en paralelo entre la compuerta y el cátodo del GTO.

El híbrido resultante se monta en un encapsulado tipo GTO con cuatro terminales, los tres del GTO y un cuarto, la "compuerta de apagado" para activar el arreglo de MOSFETs que se encarga de extraer el pulso de corriente negativa de compuerta, iniciando el proceso de apagado del GTO.

Es un dispositivo totalmente experimental, no disponible en el mercado.

3.6.3.-Tiristor apagado por Emisor (ETO, Emitter Turn-Off Thyristor).



Símbolo circuital del ETO (no estandarizado).

Es un dispositivo híbrido formado por un GTO y dos arreglos de MOSFETs individuales conectados en paralelo; uno conectado en serie con el cátodo del GTO y el otro conectado entre la compuerta del GTO y la salida del primer arreglo.

El dispositivo híbrido resultante tiene dos compuertas, la del GTO que sirve como compuerta de encendido normal, y la de los arreglos de MOSFETs conectados en paralelo que intervienen en el proceso de apagado.

Es un dispositivo totalmente experimental, no disponible en el mercado.

3.7.-Transistores de efecto de campo de Juntura (JFET: Junction Fiel Effect Transistor).

Son dispositivos de tres terminales, drenador (D), compuerta, G, y surtidor, S, implementados en Nitruro de Galio (GaN), de estructura similar a los JFETs de pequeña señal, pero optimizados para operar a valores significativos de corriente y voltaje.

Estos dispositivos se ofrecen en dos versiones:

3.7.1.- Los normalmente apagados, que trabajan en régimen de enriquecimiento (“enhancement”), en los cuales el estado en reposo del dispositivo es el de bloqueo, y se requiere una tensión positiva entre el terminal de compuerta y el de surtidor para que conduzcan cuando la tensión D-S es positiva.

3.7.2.-Los normalmente encendidos, que trabajan en régimen de estrangulación “depletion”, en los cuales su estado en reposo es el de conducción, y se requiere aplicar una tensión negativa entre la compuerta y el surtidor para que dejen de conducir cuando la tensión D-S es positiva.

3.8.-Static Induction Transistor (SIT).



Símbolo circuital de transistor de inducción estática (SIT, “Static Induction Transistor”).

D: Drenador (“Drain”); G: Compuerta (“Gate”); S: Surtidor (“Source”).

Dispositivo unidireccional derivado de la estructura JFET, es del tipo normalmente encendido (opera en el modo de estrangulación "depletion").

EL estado en reposo del SIT es conducción cuando la tensión D-S es positiva; para apagarlo es necesario aplicar tensión negativa entre los terminales de G-S.

El dispositivo carece de capacidad de bloque de tensión inversa, por lo que su uso requiere de la conexión cascode de otro dispositivo que tenga capacidad de bloqueo inverso.

No son dispositivos de propósitos generales; dada su velocidad de conmutación los SIT se dedican principalmente a aplicaciones de muy alta frecuencia en equipos transmisores AM/FM, VHF/UHF y en calentamiento inductivo.

3.9.- Static Induction Thyristor (SITh).



Símbolo circuital del Tiristor de Inducción Estática (SITh, Static Induction Thyristor).

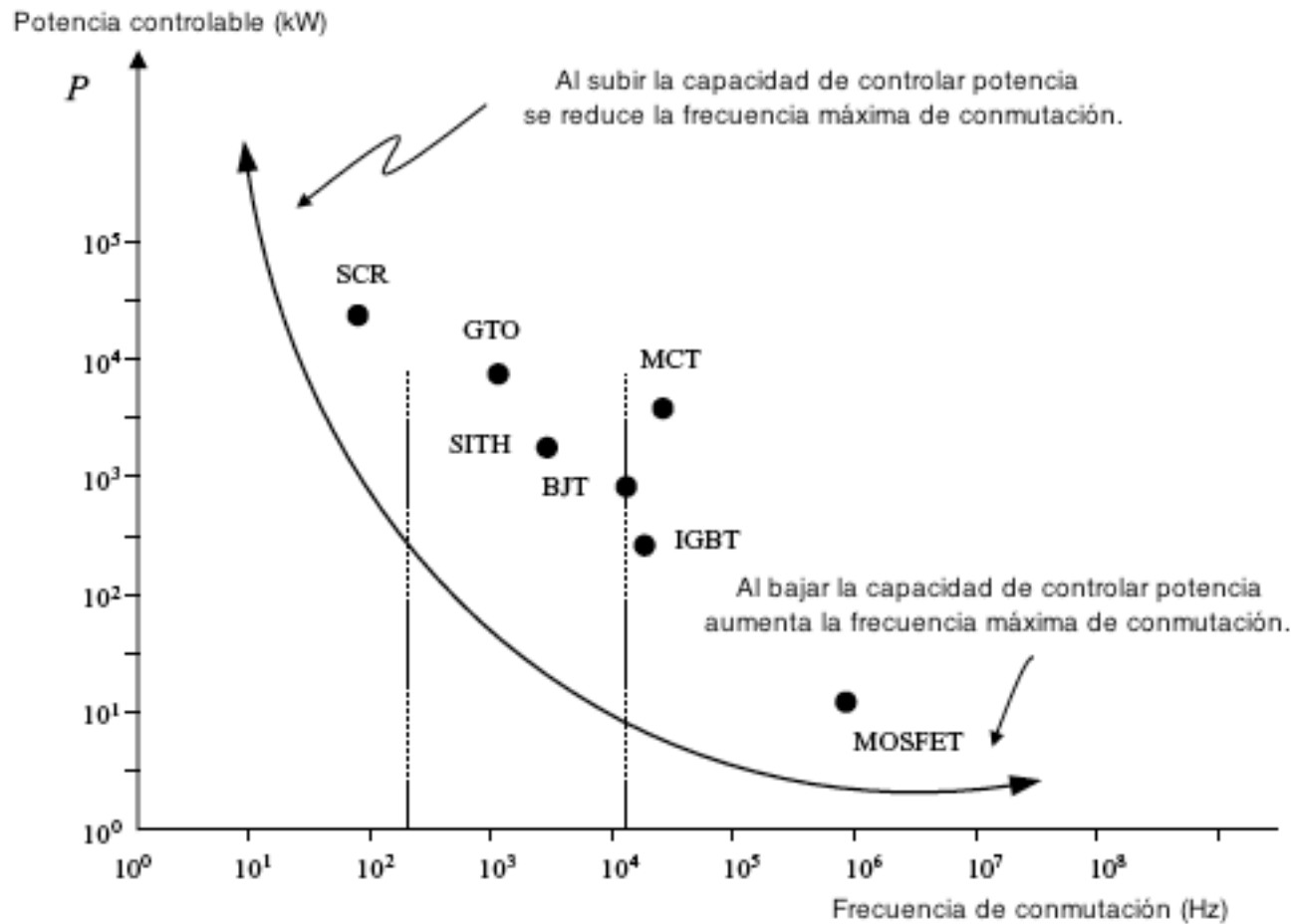
A: Ánodo; G: Compuerta; K: Cátodo.

Dispositivo unidireccional derivado de la estructura JFET, similar al SIT pero optimizado para emular el proceso de avalancha de encendido y apagado de los GTOs; es del tipo normalmente encendido (opera en el modo de estrangulación "depletion").

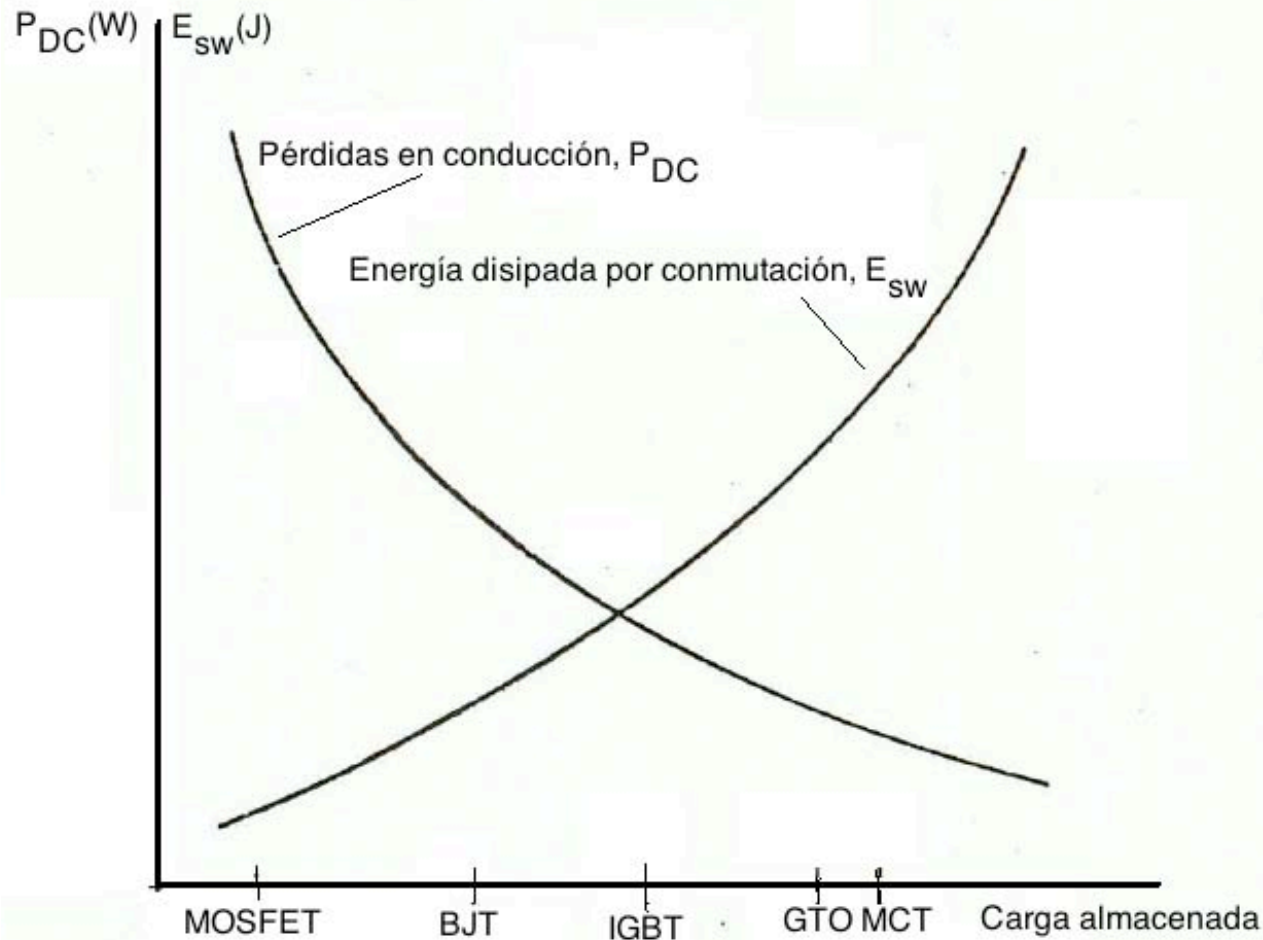
En reposo el SITH conduce cuando su tensión A-K es positiva; para apagarlo es necesario aplicar un pulso de tensión negativa ente G-K; el apagado se produce por un proceso de avalancha de apagado similar al del GTO.

Los SITH son dispositivos de conducción solo por portadores mayoritarios y tienen coeficiente de temperatura positivo por lo que pueden conectarse directamente en paralelo y su velocidad de conmutación es elevada, aunque su caída en conducción es mayor que en los GTOs; son dispositivos normalmente encendidos que requieren operar en configuración cascode porque no tienen capacidad de bloqueo inverso.

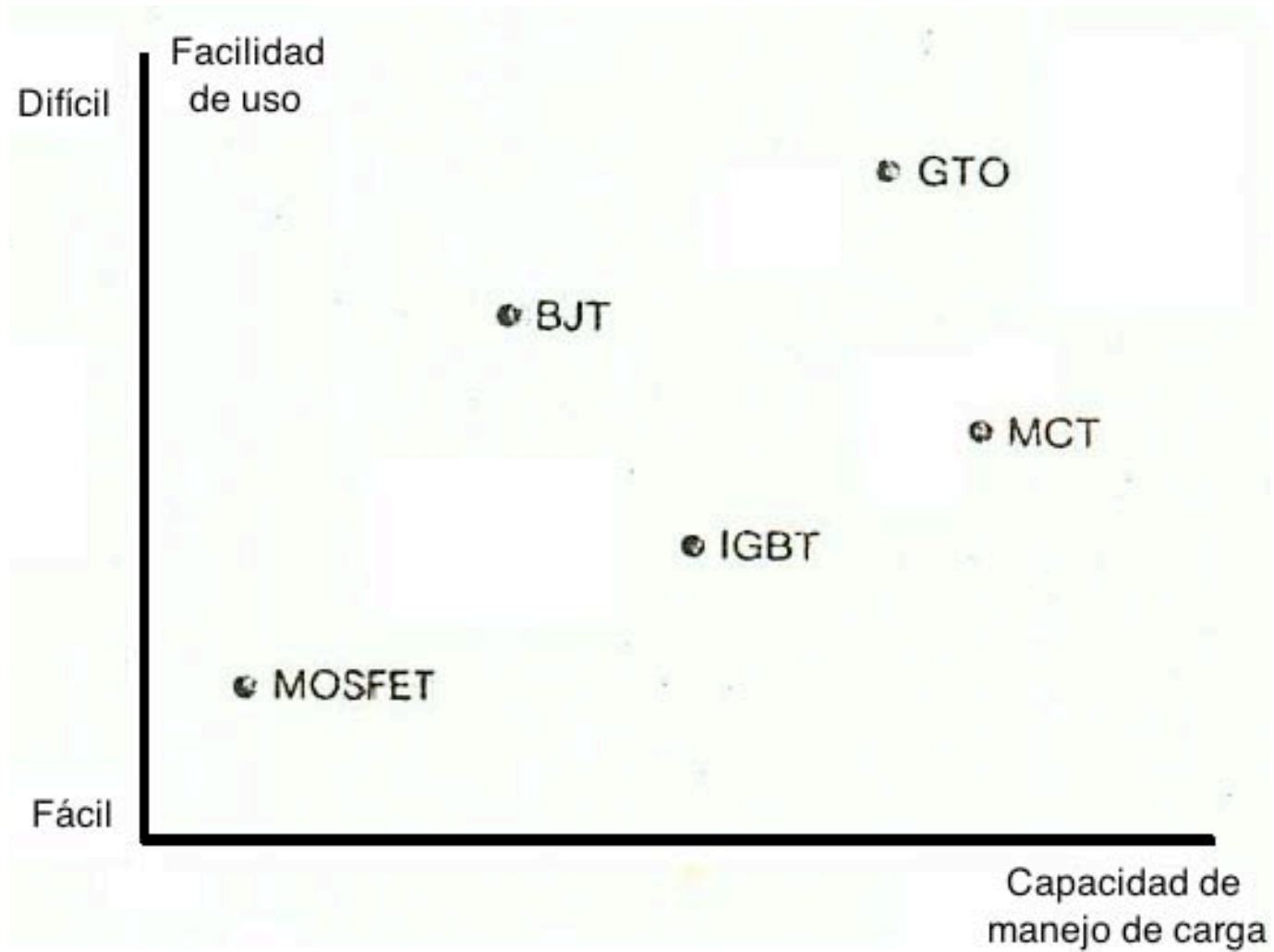
Los SITH, al ser dispositivos normalmente encendidos no son adecuados para propósitos generales, y se emplean en aplicaciones de calentamiento inductivo o en control de potencia reactiva en sistemas de transmisión de energía eléctrica.



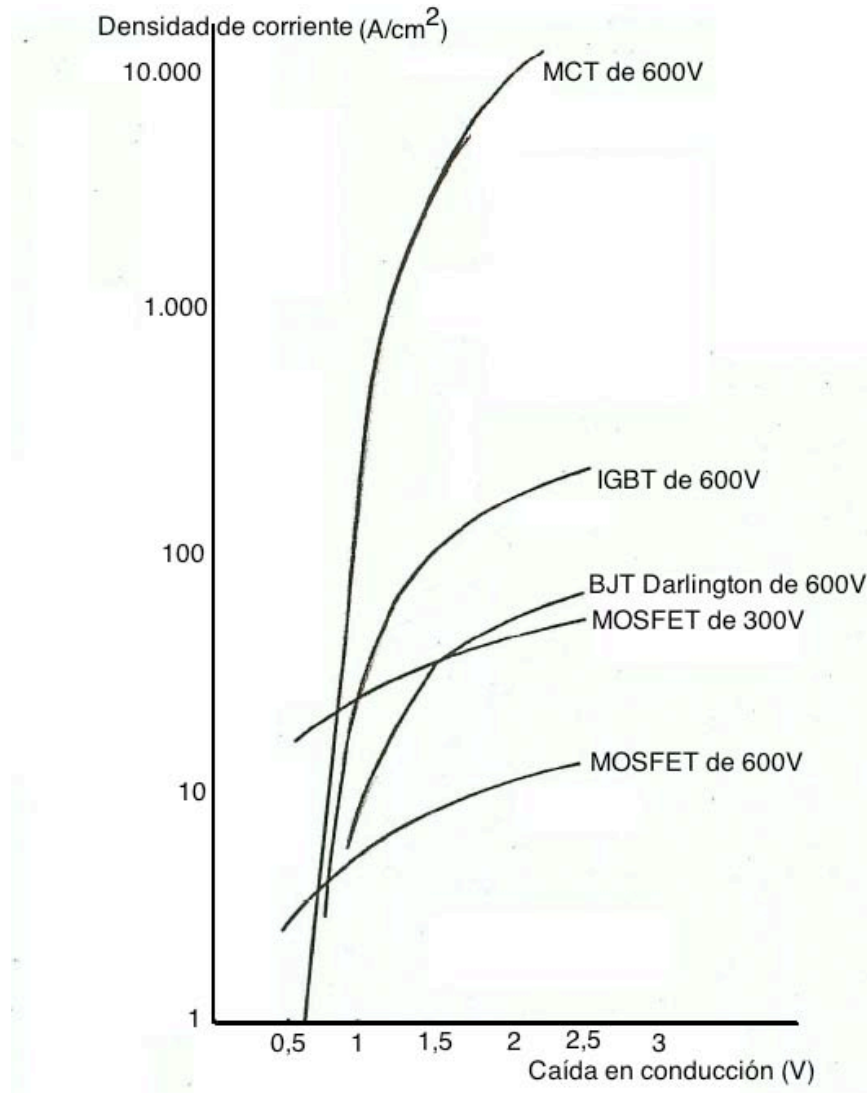
Tendencia general en la relación potencia/frecuencia de conmutación de los principales dispositivos de control de potencia.



Tendencia general en la relación potencia en conducción y energía disipada en la conmutación en relación con la carga almacenada de conmutación de los principales dispositivos de control de potencia.



Tendencia general en la relación facilidad de manejo vs. capacidad de manejo de carga.

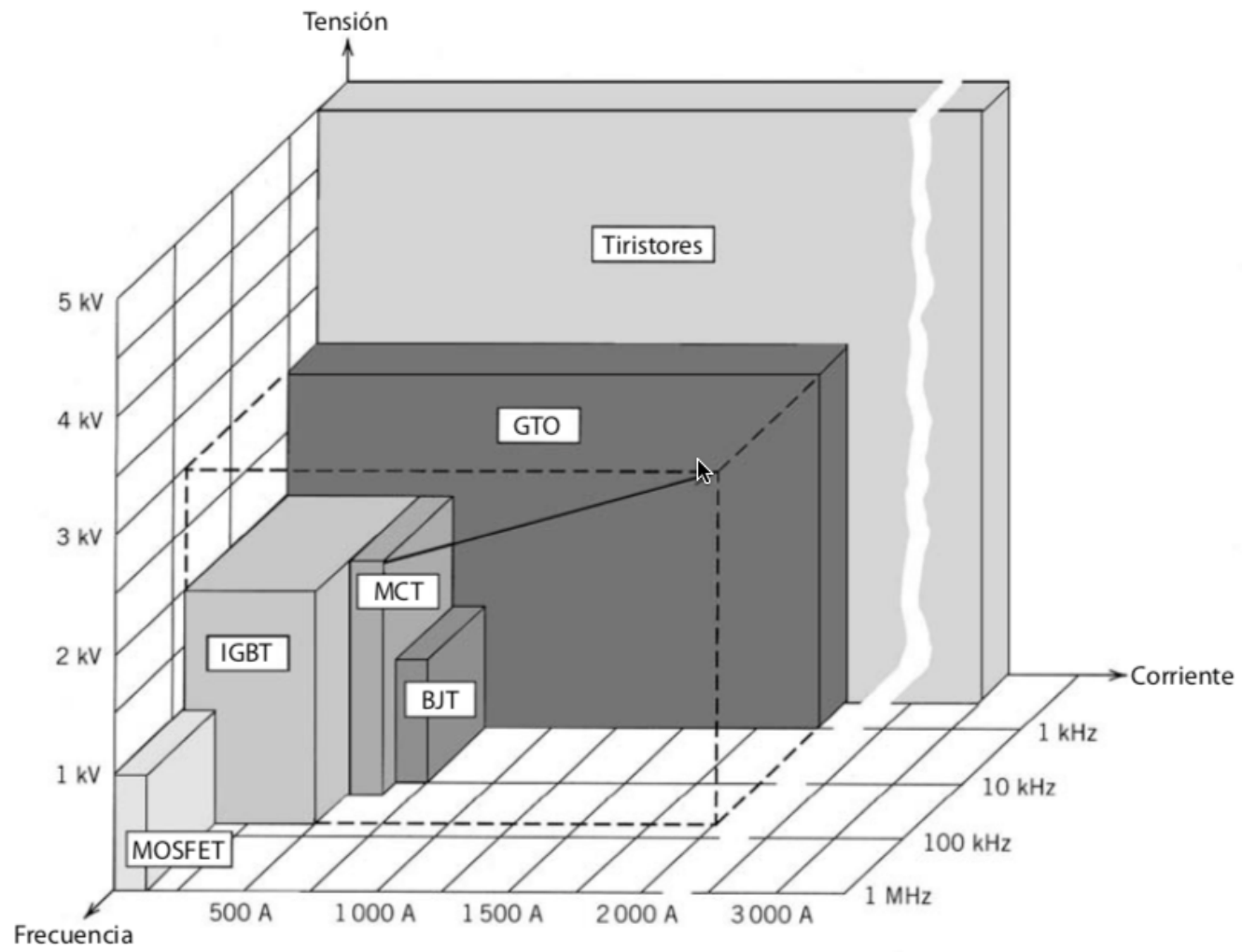


Comparación densidad de corriente vs. caída en conducción.

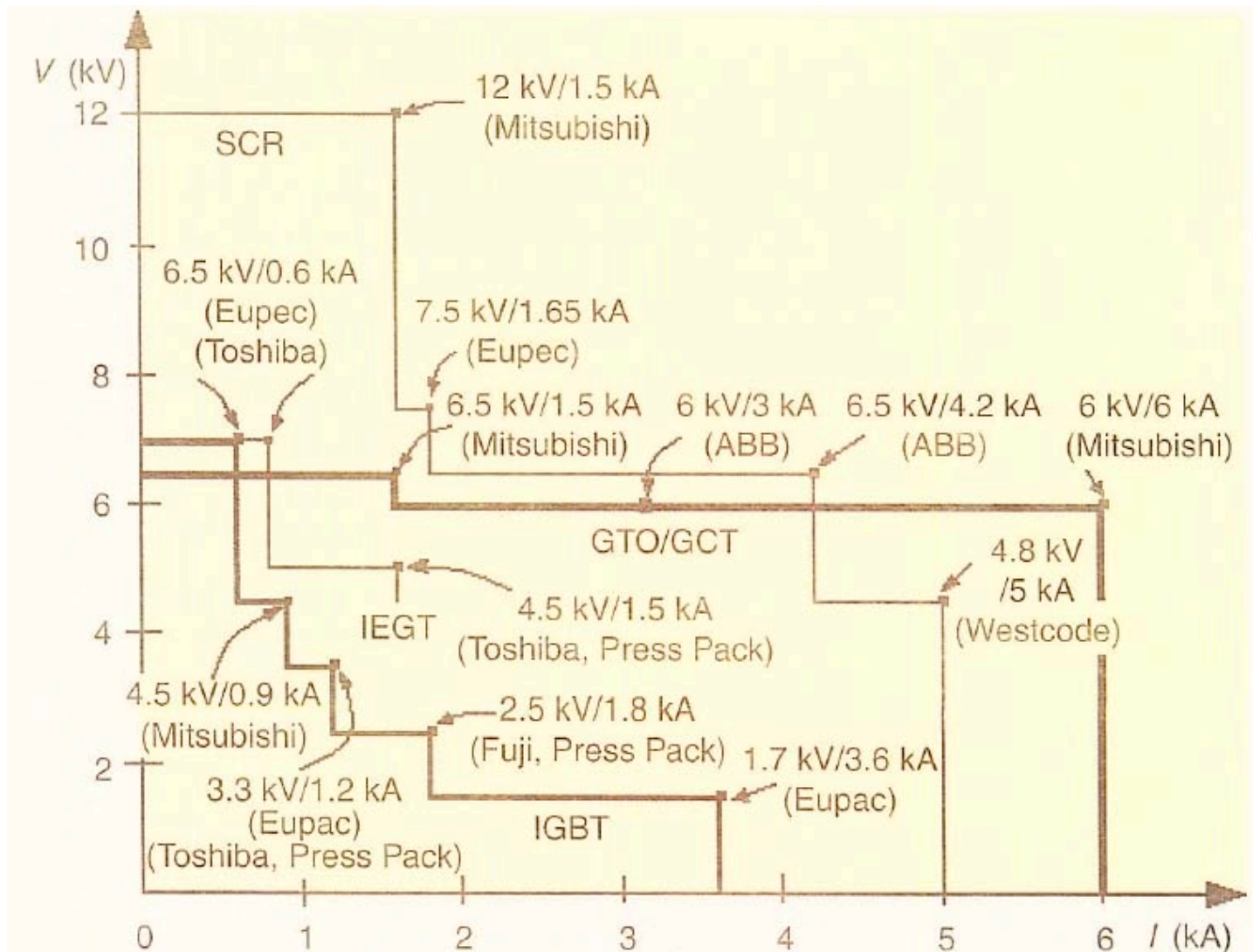
Como puede observarse en las tendencias generales mostradas en las láminas anteriores, en el estado actual de la tecnología el IGBT ocupa una posición intermedia entre los componentes de muy alta capacidad (GTO, MTC) y los de capacidad baja-media (BJT-MOSFET) por lo que tiende a mantener su posición como el tipo de dispositivo preferido para la mayor parte de las aplicaciones que requieren conmutadores completamente controlados.

Tabla resumen de las características principales de los dispositivos electrónicos de control de potencia con penetración en el mercado

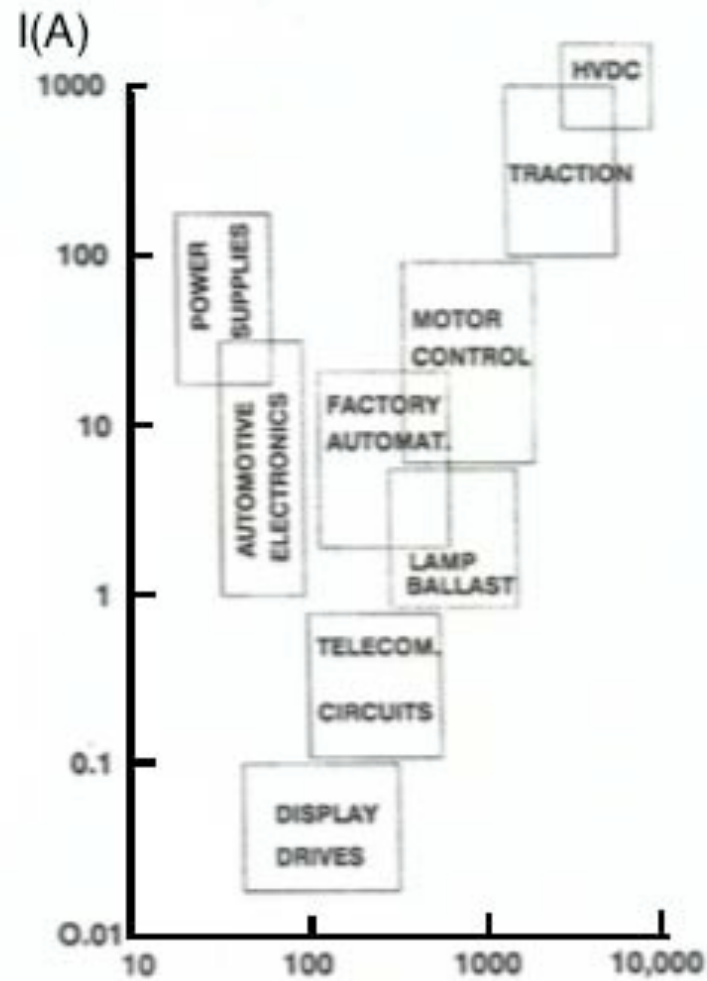
Dispositivo	Capacidad de control	Dirección del flujo de corriente	Capacidad de bloqueo de tensión
Diodo	No	directa	Inversa
Tiristor	Encendido por corriente	directa	directa e inversa
Tiristor asimétrico	Encendido por corriente	directa	Directa
TRIAC	Encendido por corriente	directa e inversa	directa e inversa
GTO	Encendido y apagado por corriente	directa	directa e inversa
BJT	Encendido y apagado por corriente	directa	directa e inversa
MOSFET	Encendido y apagado por corriente	directa e inversa	directa
IGBT	Encendido y apagado por voltaje	directa	directa e inversa
MCT	Encendido y apagado por voltaje	directa	directa e inversa



Nicho de aplicación de los principales tipos de dispositivos electrónicos de control de potencia en el mercado actual.



Componentes de mayor potencia en el mercado.



Niveles de corriente y tensión que caracteriza a las distintas áreas donde se aplican los sistemas electrónicos de potencia.

Formalización de la información sobre los componentes: Características normalizadas.

Todos los dispositivos electrónicos de control de potencia tienen limitaciones en sus capacidades operativas, y el primer objetivo de todo diseñador es conocer estas limitaciones para poder seleccionar el dispositivo mas adecuado para cada aplicación de entre los que están disponibles en el mercado.

Para poder cumplir este objetivo es necesario que exista un sistema de presentación de la información que caracteriza a los diversos componentes de manera precisa, con una notación que sea conocida por todos los que participan en el mercado, tanto productores como usuarios de los dispositivos.

En general cualquiera de las características de un dispositivo semiconductor fabricado en serie mostrará una distribución de tipo gaussiano alrededor de su valor nominal



Curva gaussiana de la distribución típica de las características de los dispositivos electrónicos.

De hecho, es normal que cada lote de componentes (fabricados simultáneamente) del mismo tipo nominal presente una distribución gaussiana particular, con valores promedio, máximo y mínimo distintos a los presentados por otros lotes del "mismo componente".

En base a esto, los fabricantes ofrecen “familias” de dispositivos que tienen características similares en casi todos los parámetros y que usualmente solo difieren en la tensión de bloqueo.

Todos los miembros de la “familia” se fabrican en el mismo proceso, los valores de la tensión de bloqueo resultan distribuidos gaussianamente y el fabricante mide automáticamente la tensión de bloqueo en cada dispositivo y lo asigna a la categoría correspondiente dentro de la familia.

Además, dependiendo de como se especifiquen los datos, un mismo tipo de componentes puede ser descrito por valores distintos en la misma característica si, por ejemplo, en sistemas distintos se los clasifica por su valor promedio, su valor mínimo o su valor máximo.

Sistema de especificaciones.

Es el conjunto de criterios en base a los cuales se definen las especificaciones de los dispositivos y se interpreta el significado y alcance de las mismas.

Idealmente el fabricante del componente debería usar el sistema de máximos absolutos, definido en la publicación IEC 134 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission).

"Valores límites de condiciones ambientales y de operación, aplicables a cualquier dispositivo de un tipo específico, tal como se define en la hoja de datos. No deben ser excedidos bajo las peores condiciones probables".

Trabajando con dispositivos especificados bajo el sistema de máximos absolutos, el diseño debe hacerse de forma que inicialmente y durante toda la vida del equipo no se debe sobrepasar ninguno de los valores máximos absolutos en ningún dispositivo bajo las peores condiciones posible en lo referente a tensión de alimentación, carga, condiciones ambientales, otros componentes del equipo, ajustes del control del equipo.

En el sistema de máximos absolutos el valor que se publica para cualquier parámetro es el mínimo de los valores máximos de dicho parámetro (el extremo izquierdo de la distribución gaussiana) lo que asegura que efectivamente todos los componentes de un tipo dado cumplen con ese límite (y usualmente lo superan, ofreciendo un margen adicional).

Los valores máximos son los que todos los componentes de ese tipo de dispositivos pueden soportar.

Esto significa que si se supera cualquiera de ellos algunos dispositivos de ese tipo sufrirán daño, aunque otros fallen.

Si se usan componentes caracterizados bajo otro sistema menos exigente (por ejemplo, valores promedio), o no se conoce el sistema usado por el fabricante, los valores dados deben ser objeto de duda, y los márgenes de seguridad considerados en el diseño deben ser mas amplios.

Normativa IEC referente a los dispositivos electrónicos de control de potencia: IEC 60747 “ Discrete Semiconductor Devices”.

Las secciones de interés para este tema son:

IEC 60747-1: General (definición de símbolos y términos).

IEC 60747-2: Diodos

IEC 60747-6: Tiristores.

IEC 60747-8: Transistores de efecto de campo.

IEC 60747-9: IGBT.

IEC 60747-15: Dispositivos semiconductores de potencia aislados.

Normativas relacionadas:

IEC 60191-2: Estandarización mecánica de semiconductores. Parte 2: Dimensiones.

MIL-STD-750E: métodos de prueba para dispositivos semiconductores.

Los datos presentados en catálogos y hojas de características se agrupan en las siguientes categorías:

- 1.- Valores Máximos Absolutos (“Absolute Maximum Ratings”): Son los valores máximos que pueden soportar los dispositivos sin sufrir daños.
- 2.- Datos térmicos (“Thermal data”): Temperaturas límite operativas y resistencia térmica.
- 3.- Características eléctricas (“Electrical characteristics”): Valores que presenta una determinada magnitud (caídas de tensión en conducción, corrientes de fuga, señales de control, etc.) en las condiciones indicadas en la prueba correspondiente. Se suelen indicar valores mínimos, típicos y máximos.

4.- Características de conmutación (“Switching characteristics):
tiempos de conmutación, carga acumulada, etc.

Para uniformizar el manejo de información , las normas establecen una nomenclatura estándar, basada en el las iniciales de los nombres de los elementos nombrados en idioma inglés:

1.- En los componentes:

C: Colector.

E: Emisor (“Emitter”).

G: Compuerta (“Gate”).

D: Drenador (“Drain”).

S: Surtidor (“Source”).

K: Cátodo (“Cathode”).

A: Ánodo (“Anode”).

2.- Sobre las tensiones y corrientes:

F: Directo (“Forward”), usado en vez de AK.

R: (Inverso (“Reverse”), usado en vez de KA.

T: Temperatura.

T: Tiempo.

AV: Valor medio (“Average value”), puede ser en minúsculas.

RMS: Valor eficaz (“Root Mean Square”), puede ser en minúsculas.

W: Trabajo (“Work”).

S: No repetitivo (“Surge” o “Single”).

M: Valor máximo.

V: Voltaje externo a ser especificado.

X: resistencia y voltaje externos a ser especificados.

S: Cortocircuito (“Short circuit”).

R: Resistencia.

Hay grupos de letras que se agregan a los arriba definidos para especificar condiciones referentes a las tensiones:

BR: Indica valor de ruptura (“Brealdown”).

sat. Indica valor de saturación.

Th: Indica valor de umbral (“Threshold”).

Clamp: Indica valor limitado por un elemento externo.

Las tensiones de alimentación se indican con dos letras , por ejemplo:

V_{GG} : Tensión de alimentación al circuito G-E.

En las corrientes el subíndice indica el terminal por el cual la corriente entra, por ejemplo:

I_G : corriente entrando por la compuerta.

Parámetros térmicos:

j: Juntura .

c: carcasa.

s: Disipador de calor (antes hs: “Heat sink”).

r: Punto de referencia

a: Ambiente, temperatura de referencia.

R_{th} : Resistencia térmica (“Thermal resistance”), se agregan dos subíndices para señalar el elemento considerado. Ejemplo $R_{th\ j-a}$: Resistencia térmica juntura-ambiente.

Z_{th} : Impedancia térmica (“Thermal impedance”), se agregan dos subíndices para señalar el elemento considerado. Ejemplo $Z_{th\ c-hs}$: Impedancia térmica carcasa-disipador.

Parámetros de conmutación:

t_d : Tiempo de espera ("delay time").

t_r : tiempo de subida ("rise time")

t_s : tiempo de almacenamiento ("storage time").

t_f : tiempo de bajada o de caída ("fall time").

Q_{rr} : Carga eléctrica recuperada ("recovered charge").

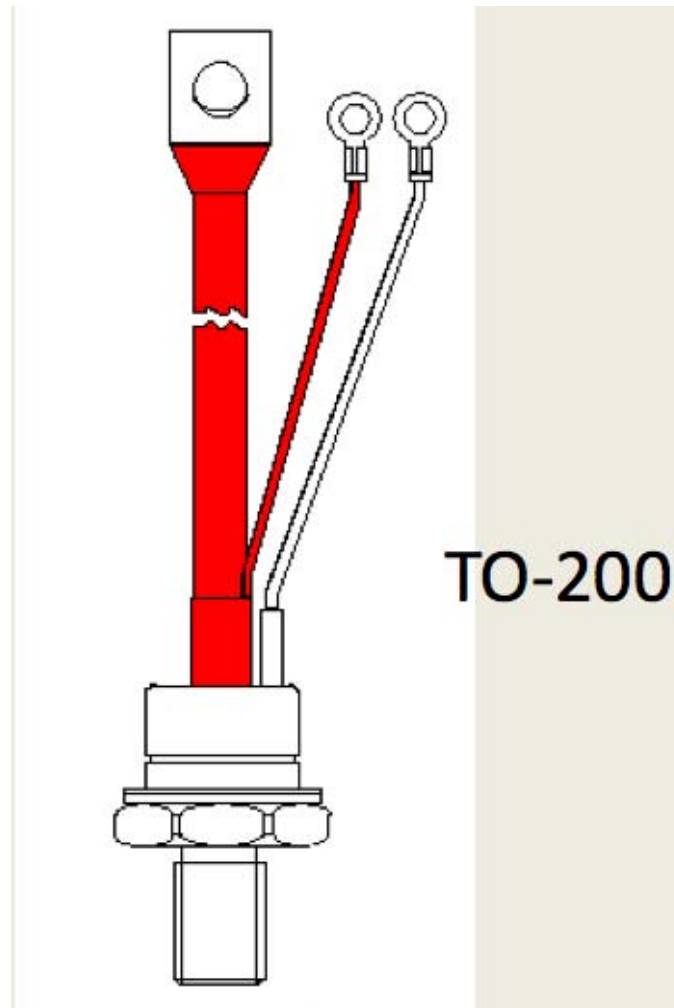
Como comentario final es preciso recordar que el principal objetivo del diseñador de sistemas electrónicos de potencia en relación con las hojas de datos de los componentes electrónicos de control de potencia es comprender el alcance de las limitaciones indicadas en las mismas y diseñar el circuito de manera que no se exceda ninguna de ellas.

Encapsulados específicos para dispositivos electrónicos de control de potencia.

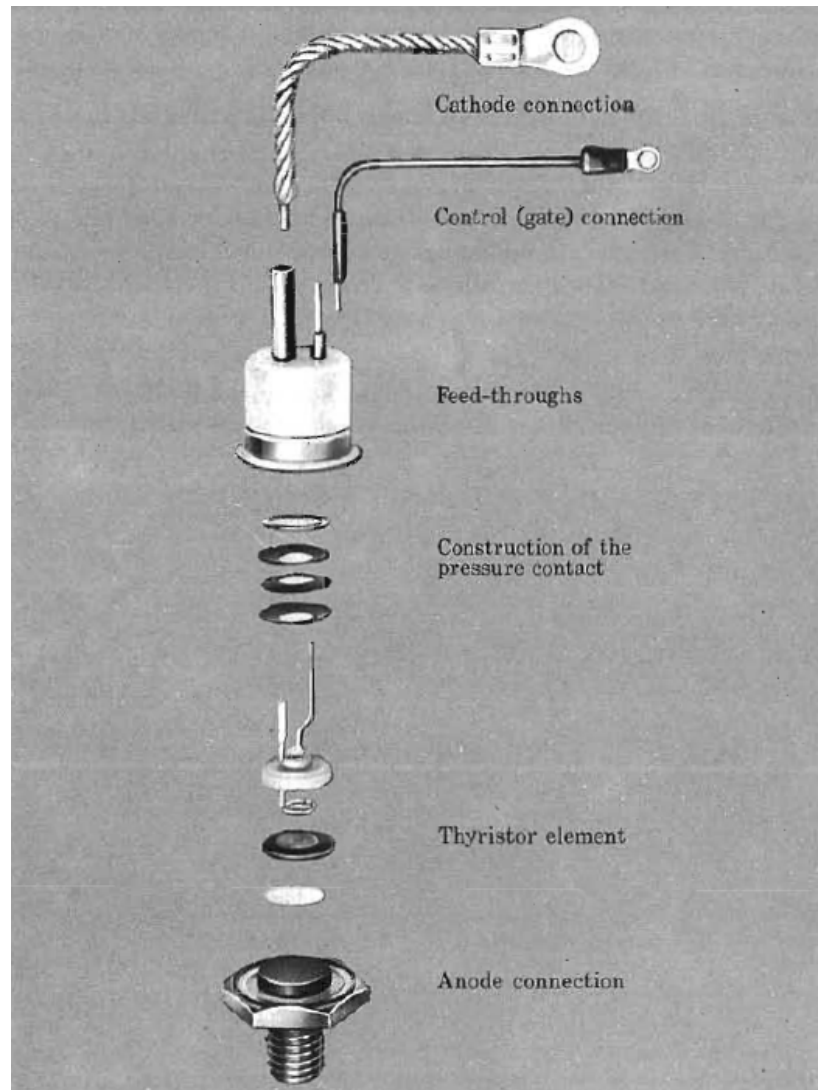
I.- Tipo perno: el “chip” del dispositivo semiconductor se monta en contacto eléctrico sobre una base metálica con forma de perno, que se atornilla a presión al disipador para asegurar el contacto térmico y el eléctrico entre el disipador, que forma parte del circuito de potencia, y uno de los dos terminales principales de potencia del dispositivo.

La parte superior del chip se conecta al cable que forma el otro terminal principal de potencia y se cubre con un casquete de cerámica hermético, del cual sale el otro terminal de potencia y los de control que correspondan.

Permite disipación de calor por un solo lado, es aplicable a dispositivos individuales de potencia media.



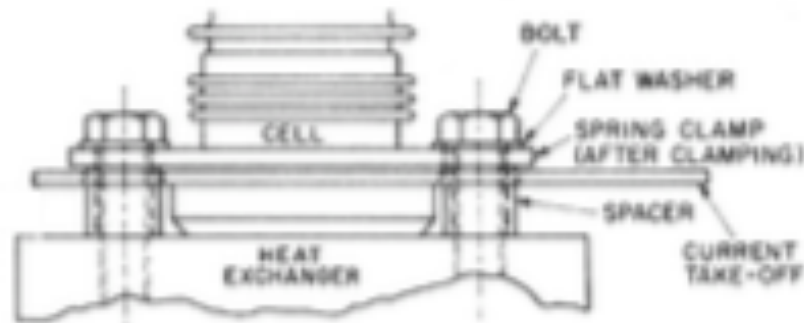
Encapsulado tipo perno. El cable rojo delgado es una conexión auxiliar para el común del circuito de disparo.



Despiece de un encapsulado tipo perno.

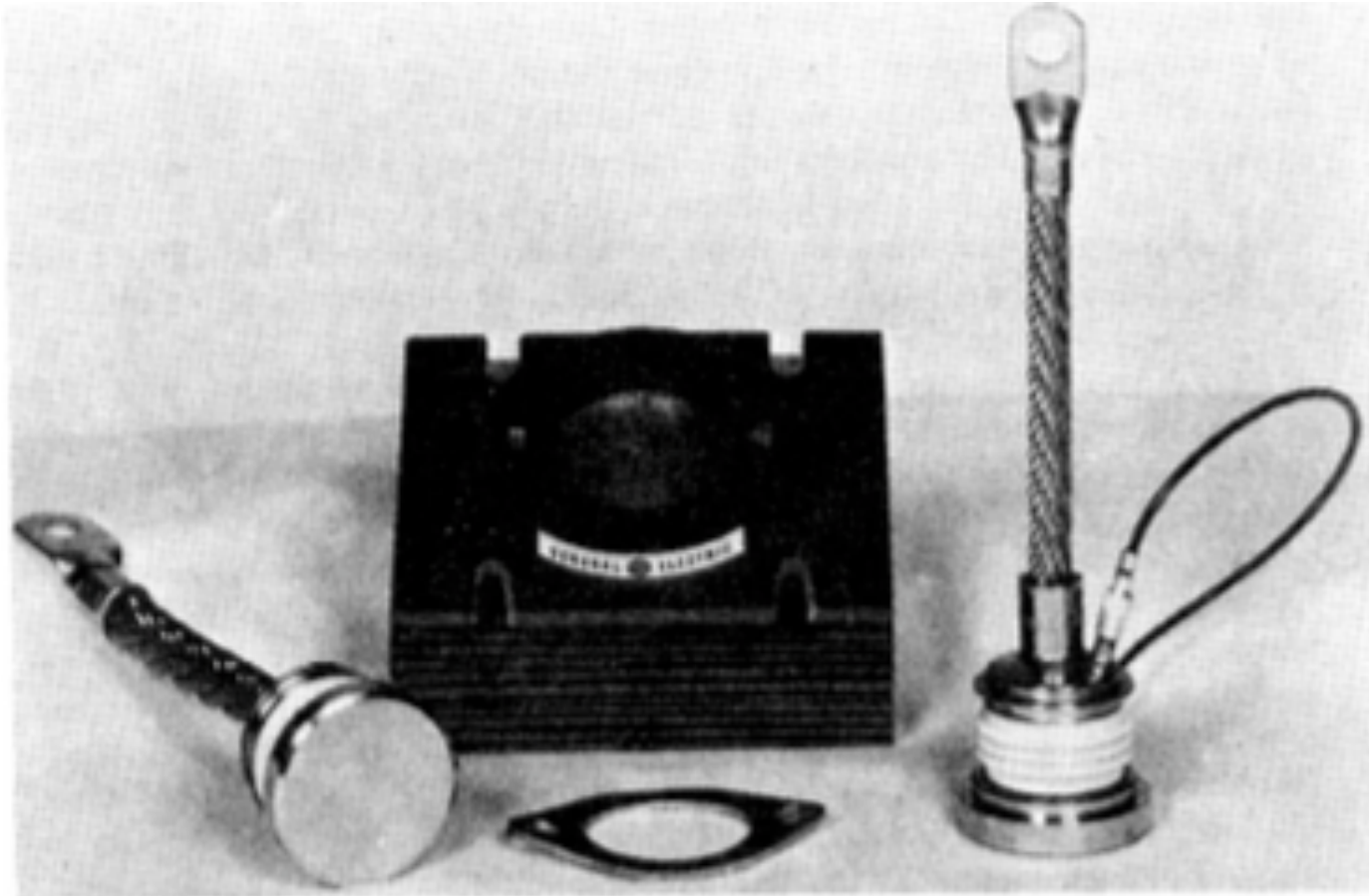
II.-Tipo Base plana.

Es similar al anterior, pero eliminando el perno. La base de la cápsula es totalmente plana y la cápsula se sujeta contra el disipador de calor mediante un sistema de abrazadera y tornillos auxiliares, lo que evita aplicar torsión directamente sobre el encapsulado.



Detalle del montaje en el disipador de calor de un dispositivo encapsulado en base plana (Cortesía General Electric).

El despiece de este tipo de cápsula es similar al del tipo perno.



Encapsulado de base plana. Cortesía General Electric.
(en el centro un disipador de calor y la abrazadera de montaje).

Cuando se usan los encapsulados tipo perno o tipo placa en diodos o tiristores, es posible montar la pastilla semiconductor de dos maneras distintas, según se apoye sobre la base metálica de la cápsula el ánodo o el cátodo del dispositivo.

Algunos fabricantes aprovechan esta posibilidad y ofrecen dos versiones de sus dispositivos, una cuyo código literal termina en "N" por "Normal", que es la versión en la que el ánodo se apoya sobre la placa metálica de la cápsula y otra cuyo código literal termina en "R" por "invertido" ("Reverse") en la cual es el cátodo el que se apoya en la placa metálica.

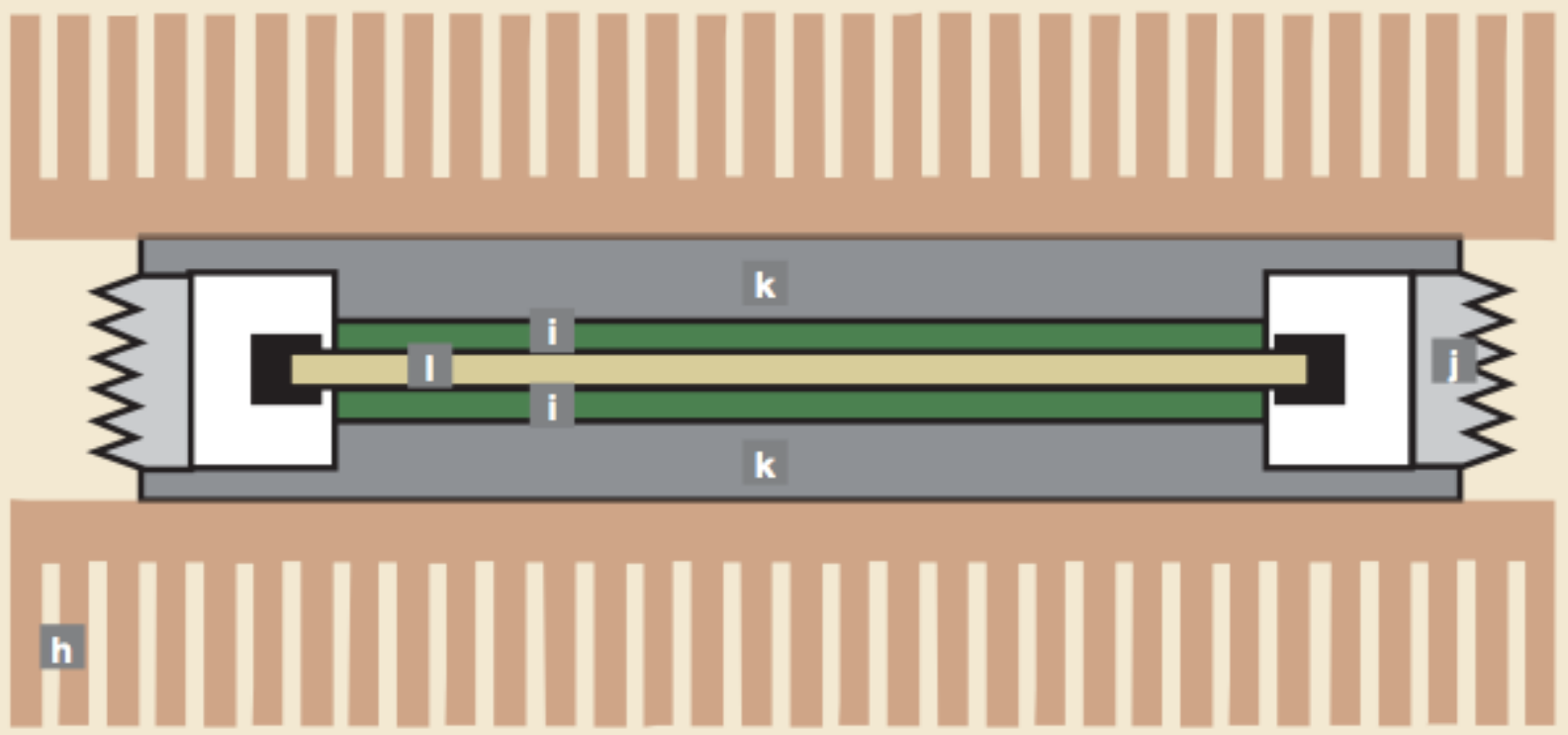
Esto simplifica el ensamblaje de algunos circuitos de potencia, ya que permite que varios dispositivos compartan el mismo disipador de calor.

En todo caso estos dispositivos además están marcados en la carcasa con el código de parte y el símbolo de diodo o tiristor apuntando en la dirección en la que está montada la pastilla semiconductor.

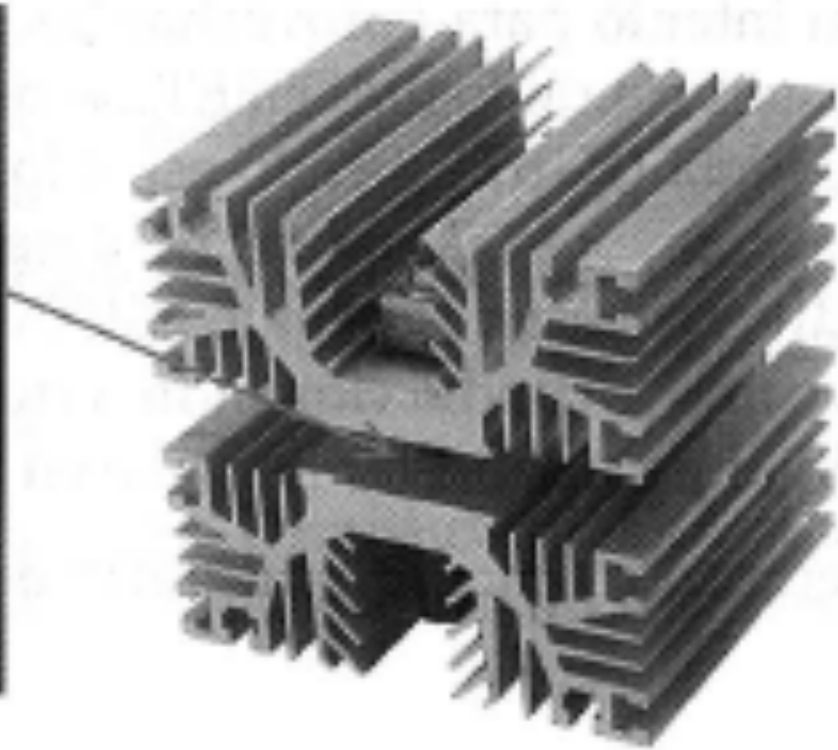
III.- Tipo "hockey puck": El dispositivo se monta dentro de un cilindro de cerámica mucho más ancho que alto, que se cierra herméticamente en sus extremos con dos placas metálicas que hacen contacto con las dos caras del dispositivo de potencia, asegurando contacto térmico y eléctrico con los dos terminales principales del dispositivo.

De ser el caso, el terminal de control se conecta mediante dos cables auxiliares que salen por uno de los extremos del encapsulado.

- h** Disipador de calor
- i** Caja (cerámica)
- l** Semiconductor
- i** Compensación CTE (Mo)
- k** Cobre



Corte esquemático de un diodo en encapsulado tipo "hockey puck"



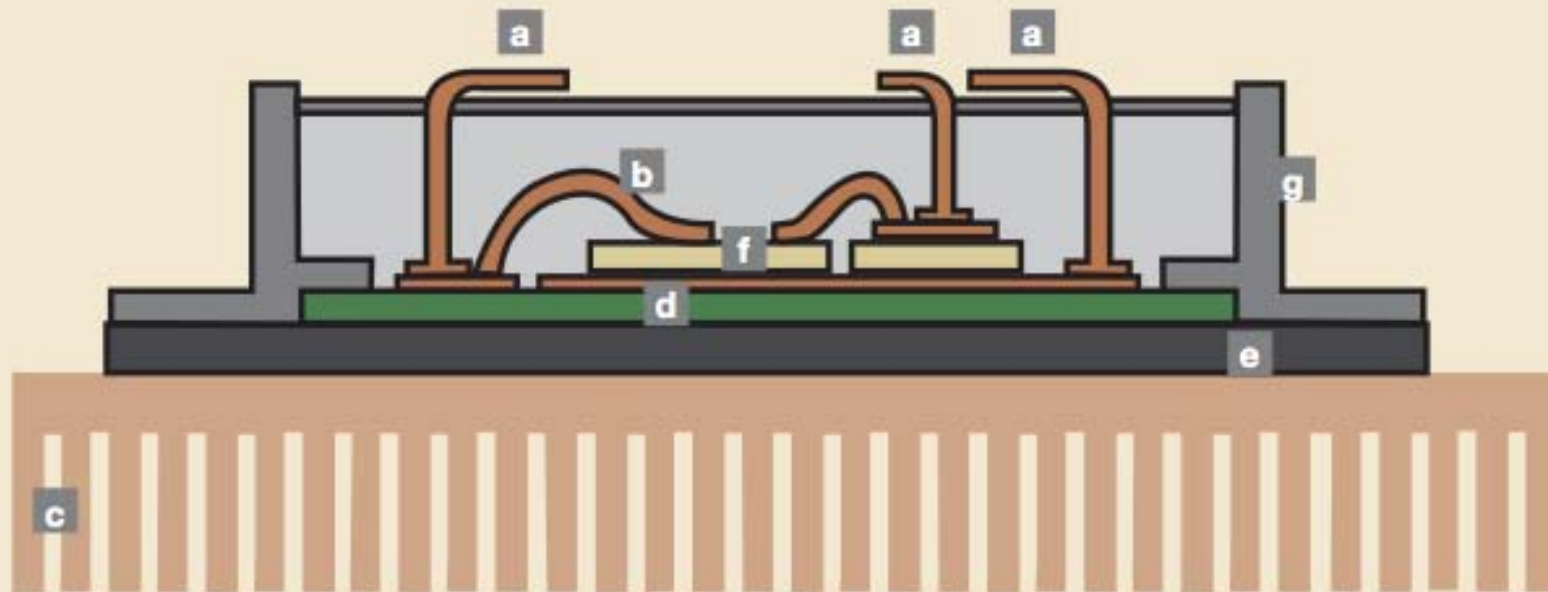
Tiristor en encapsulado tipo "hockey puk" (izquierda) y montado en su disipador de calor (derecha).

Es posible (y usualmente necesario) operar con enfriamiento por los dos lados, por lo que este encapsulado se emplea en los dispositivos de alta y muy alta potencia. El contacto eléctrico carcasa-dispositivo se asegura por la presión externa de montaje (valor típico 1,2 kN/cm²)

IV.- Encapsulado tipo "modulo": Cada dispositivo se monta sobre una capa de metal que permite hacer contacto eléctrico con el terminal principal inferior del dispositivo.

Cada placa de metal se monta sobre una cerámica que ofrece alta conductividad térmica pero que aísla eléctricamente, y la cerámica se monta sobre una placa de metal que asegura el contacto térmico con el disipador de calor. Esta placa no está en contacto eléctrico con los dispositivos contenidos en el módulo.

- a** Conexiones de Energía y de control
- b** Hilo de conexión
- c** Disipador de calor
- d** Cerámica (normalmente AlN)
- e** Placa base (norm. AISIC)
- f** Semiconductor
- g** Caja

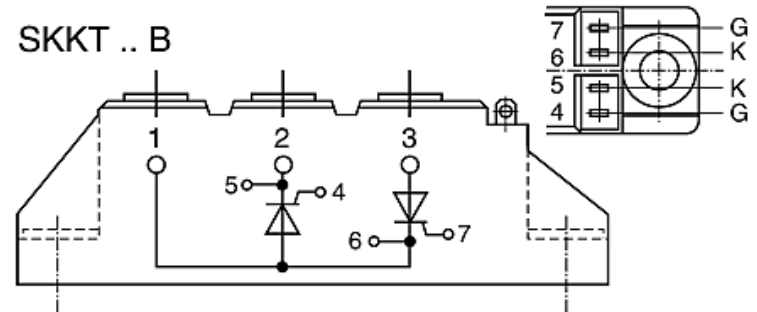
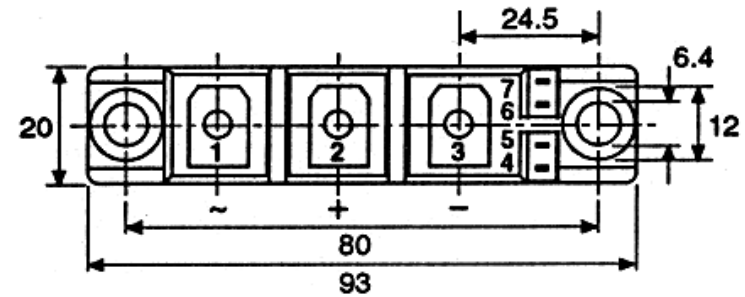
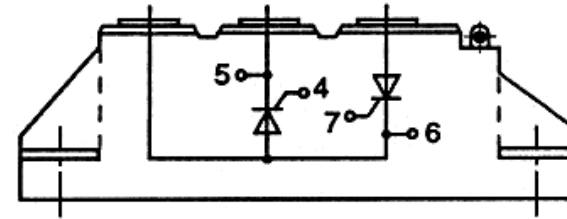


Corte esquemático de un encapsulado tipo "módulo de potencia", en una aplicación que contiene dos dispositivos semiconductores (rectángulos amarillos).

La parte superior del módulo se cierra con un casquete de plástico, sobre el que se montan todos los terminales de contacto, tanto de potencia como de control.

El encapsulado tipo módulo puede contener varios dispositivos individuales pre conectados en una configuración circuital convertidora de potencia incluyendo dispositivos de baja, media y alta potencia, lo que permite usar un solo módulo con, por ejemplo los 6 IGBTs y los 6 diodos anti-paralelos que forman un puente inversor trifásico, o un IGBT, su diodo antiparalelo y la circuitería del controlador de diseño del dispositivo.

La tendencia actual es que los módulos reemplacen a los encapsulados tipo perno o de cara plana, e incluso a encapsulados tipo hockey puk para dispositivos de la gama baja de las altas potencias.



Encapsulado tipo "modulo" para dos tiristores
 Izquierda: vista del módulo
 Derecha: Dimensiones y esquema de conexión interna

MDS 30-100A



MDS 30-60A



MDS 30-60A



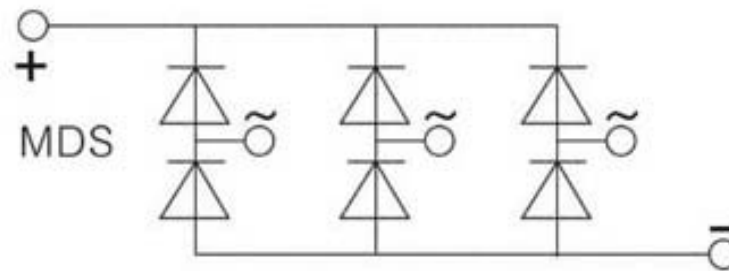
MDS 150-200A



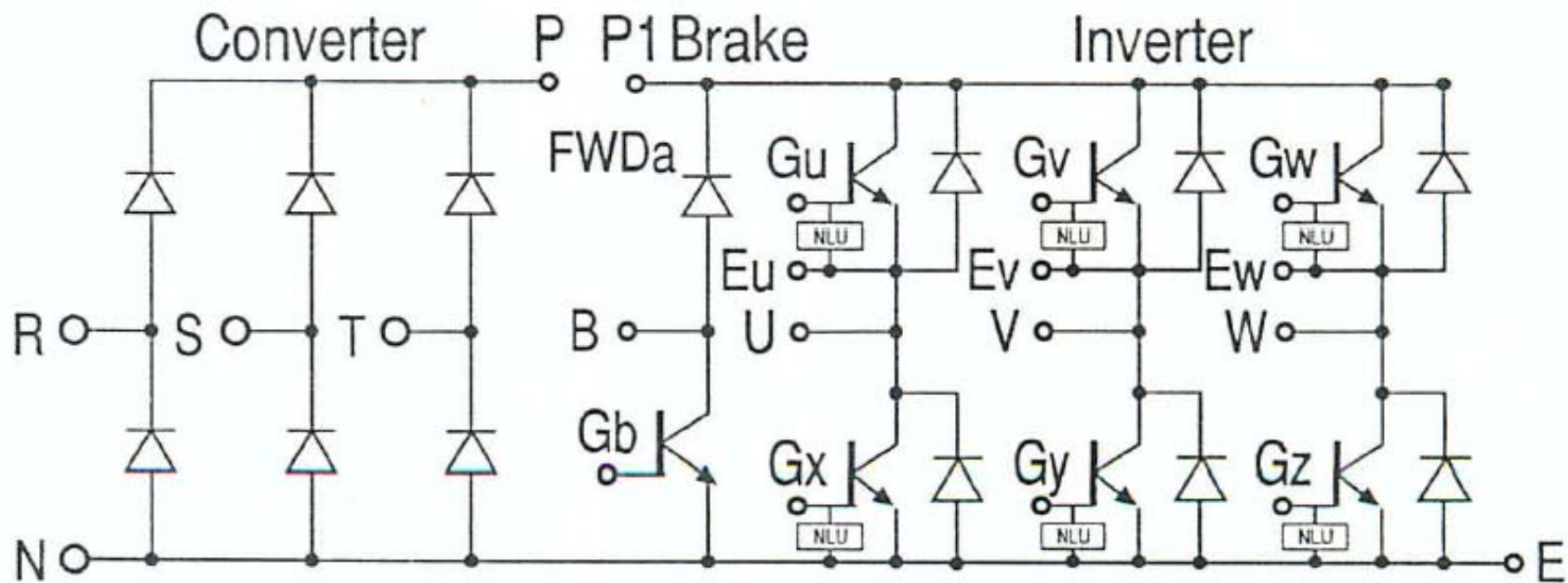
MDS 150-200A



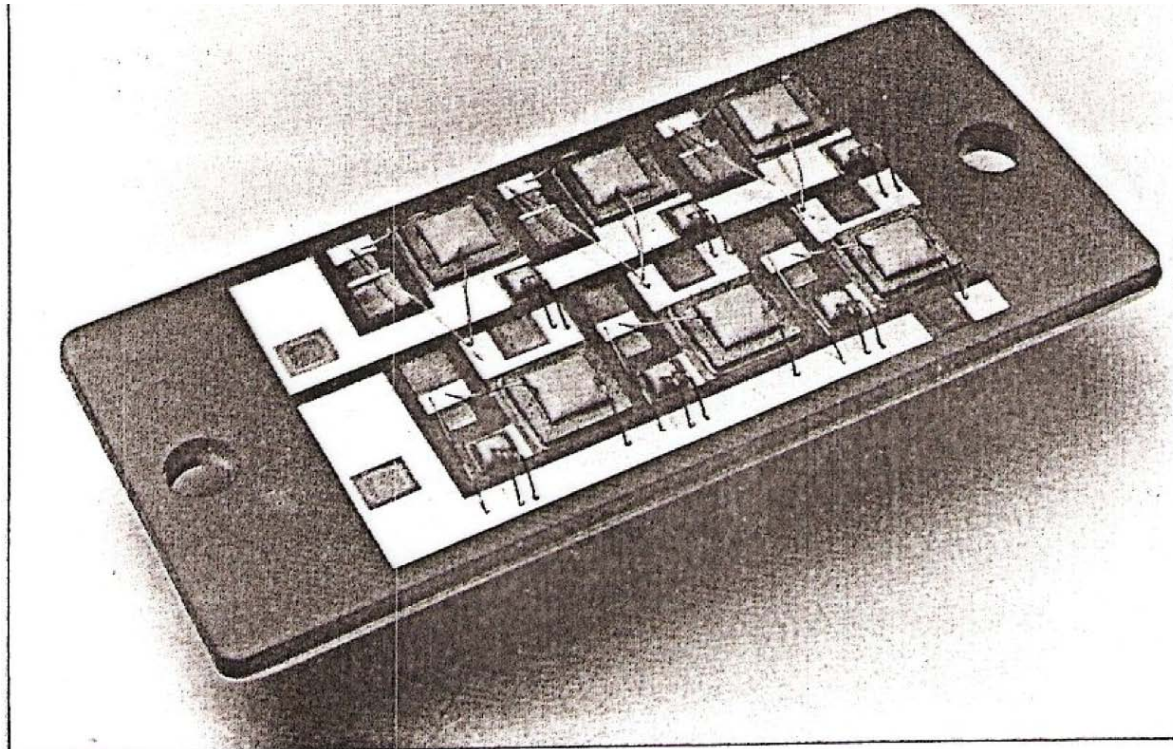
MDS 10-30A



Módulos con 6 diodos conectados en configuración "puente trifásico", y el esquema de conexión.

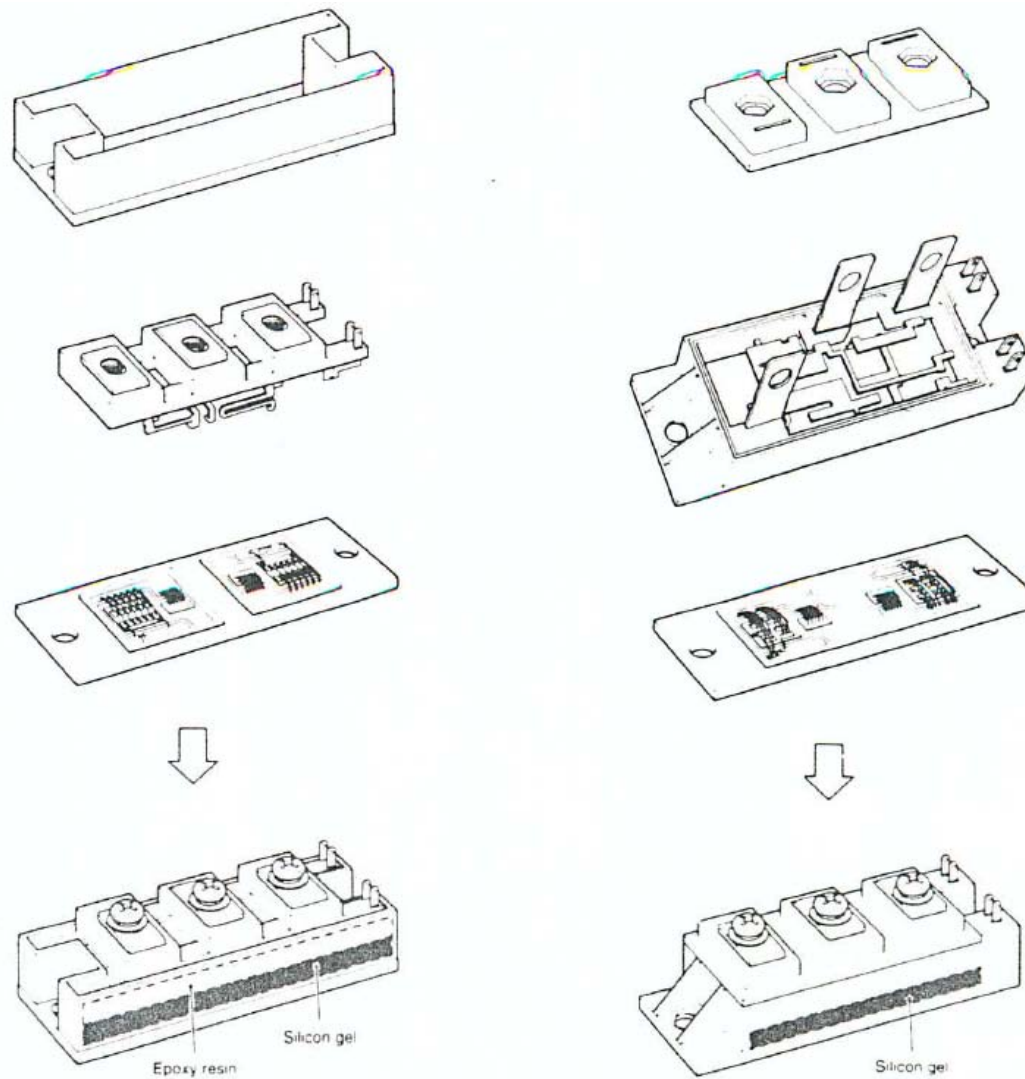


Módulo que integra todos los componentes de potencia para implementar un actuador para motores de inducción, incluyendo un rectificador trifásico no controlado, un inversor trifásico y una etapa de descarga.



- Alumina, Aluminium nitride
- Cu, Pd Ag, Au thick film
- Insulated metal substrate
- Thermal management

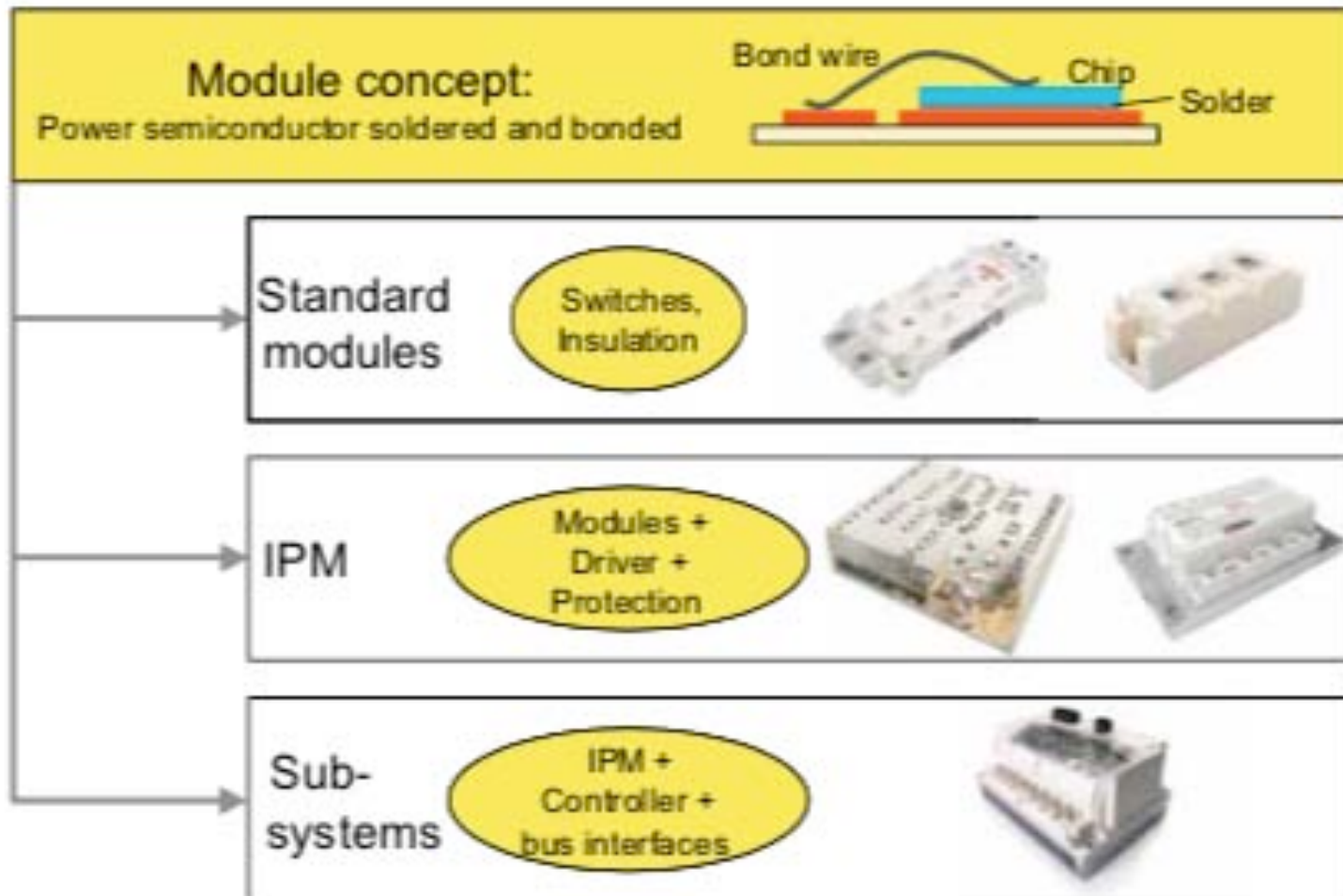
Módulo con un rectificador trifásico no controlado (6 diodos) y un Puente inversor trifásico (6 diodos y 6 IGBTs) montado sobre el sustrato cerámico capaz de proporcionar aislamiento eléctrico con buena conductividad térmica



Etapas de ensamblaje de módulos de potencia.

Es el tipo de encapsulado más moderno, y tiende a ser empleado cada vez en mayor número de aplicaciones.

En un desarrollo cada vez mas común, se están ofreciendo módulos híbridos, que contienen tanto dispositivos electrónicos de control de potencia como componentes de propósitos generales, que cumplen funciones auxiliares, por ejemplo, los circuitos de disparo para los componentes de potencia.

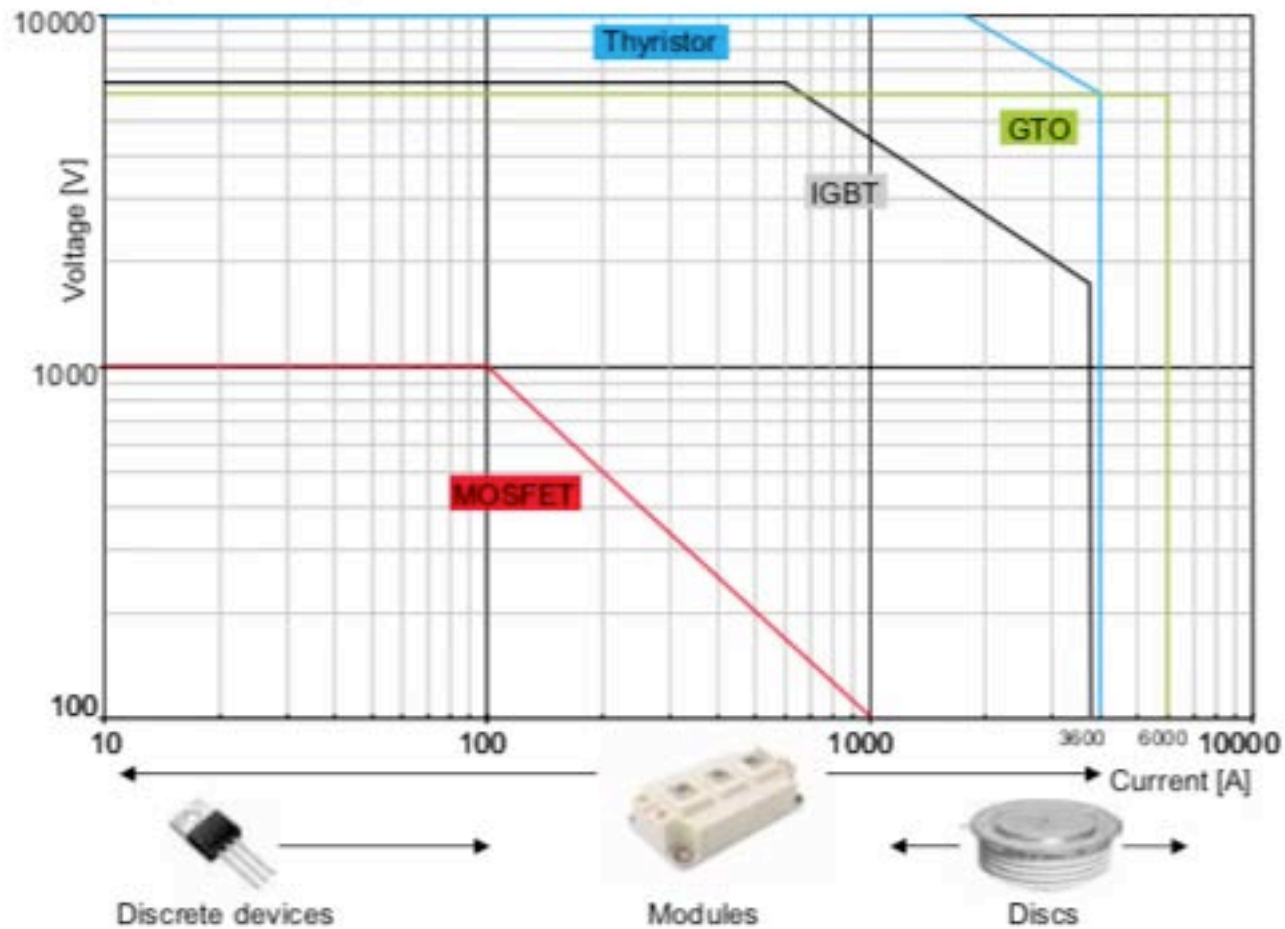


Niveles de integración en los módulos:

Arriba: Básico, solo componentes de potencia.

Medio: intermedio: Componentes de potencia, disparo y protección.

Abajo: Inteligente: Incluye conectividad con controles de alto nivel (IoIT). Cortesía de SEMIKRON.



Segmentación del mercado por tipo de componente y por tipo de encapsulado (Cortesía de SEMIKRON).

Sea cual sea el tipo de encapsulado, ningún componente electrónico de control de potencia puede operar con niveles de corriente y tensión significativos si no están montados sobre el correspondiente disipador de calor, y no se cumple en dicho montaje con las especificaciones mecánicas establecidas por el fabricante, quien debe indicar:

Tormin: Par de apretado mínimo necesario para asegurar el contactor térmico eléctrico requerido (el contacto eléctrico no aplica para los módulos).

Tormax: Par de apretado máximo que no se debe superar para evitar daños al encapsulado.

El apretado debe hacerse con precisión empleando un torquímetro (o "llave de par").