

Dispositivos de potencia

Contenido:

1. Introducción a la electrónica de potencia
2. Diodos de potencia
3. Tiristores
4. Transistores de potencia
5. IGBT
6. Modelo térmico y disipadores

Introducción a la electrónica de potencia

Definición de electrónica de potencia: Es la aplicación de dispositivos electrónicos al control y conversión de energía eléctrica.

- Ejemplos de control: accionamiento de motores, calefacción, sistemas de iluminación.
- Ejemplos de conversión: rectificadores, fuentes de alimentación, fuentes reguladas, fuentes conmutadas, onduladores.

Introducción a la electrónica de potencia

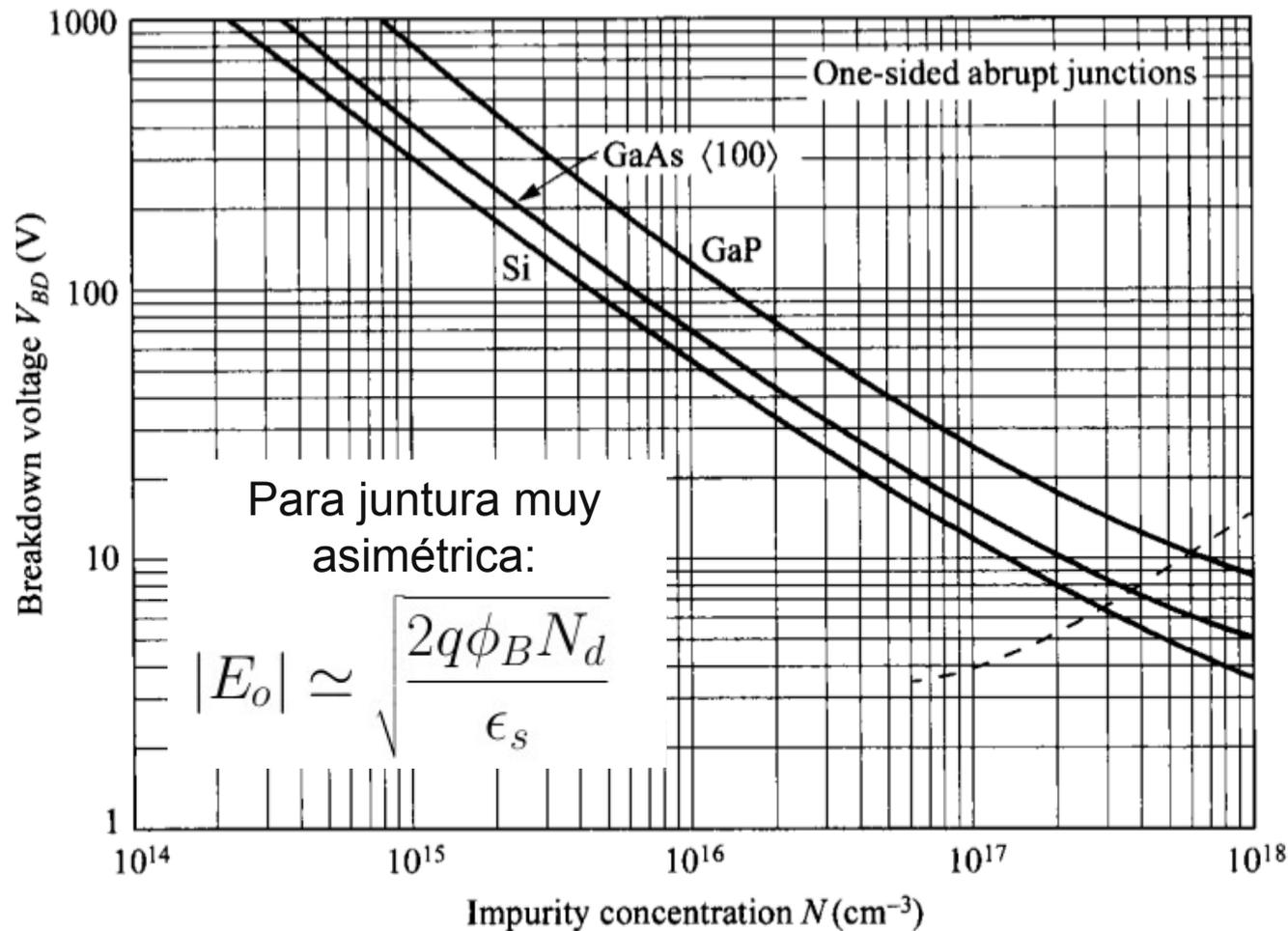
Efectos indeseados:

- Estos circuitos operan encendiendo y apagándose constantemente, lo que introduce ruido en:
 - La tensión de salida
 - La fuente de alimentación
 - En equipos electrónicos cercanos debido a EMI (interferencia electromagnética)
- Para reducir estos problemas se puede:
 - Usar filtros de entrada y de salida
 - Elegir el circuito más conveniente
 - Usar blindaje electromagnético

Diodos de potencia

Los diodos de potencia son junturas PN construidas para soportar 1) altas tensiones en inversa y 2) grandes corrientes en directa.

1) Para lograr tensiones de ruptura inversa elevadas se debe reducir el nivel de dopaje de uno de los lados:



Diodos de potencia

2) Al reducir los niveles de dopajes cerca de la junta metalúrgica aumenta la resistencia del material. Para mitigar esto se usan dos estrategias:

i) aumentar el área de la junta

ii) utilizar dopajes no uniformes en el cuerpo del dispositivo (mayor dopaje cerca de los contactos, menor cerca de la junta)

En resumen, los diodos de potencia son juntas PN con las siguientes características constructivas:

- Niveles de dopajes controlados para reducir la resistencia en directa y soportar altas tensiones en inversa.
- Gran área para soportar altas corrientes.
- Encapsulados especiales para favorecer la disipación térmica.

Diodos de potencia

Diodos de propósito general:

- Tiempo de recuperación $\sim 10 \mu\text{s}$
- 1A-6000A / 400V-3600V / $V_{\text{ON}} = 1.2\text{V}$
- Usados en aplicaciones de baja frecuencia (rectificadores de red)

Diodos Fast-recovery:

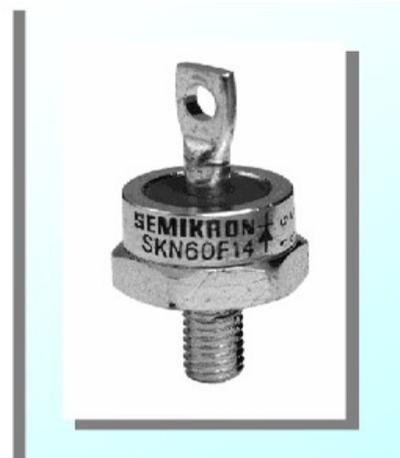
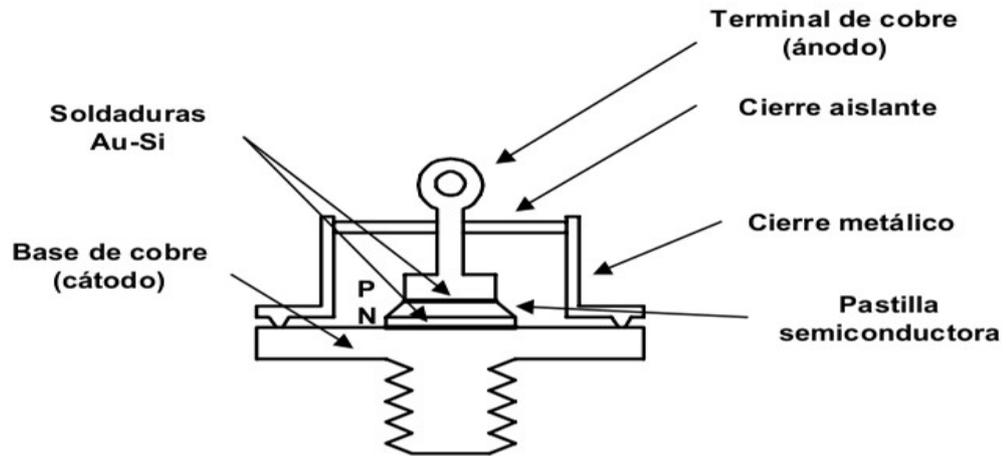
- Tiempo de recuperación ~ 0.1 a $10 \mu\text{s}$
- 30A-200A / 400V-1500V / $V_{\text{ON}} = 1.2\text{V}$
- Usados como convertidores DC-DC o DC-AC (inversores, UPS)

Diodos Schottky (metal-semiconductor):

- Tiempo de recuperación $\sim 5 \text{ ns}$
- 1A-120A / 15V-150V / $V_{\text{ON}} = 0.7\text{V}$
- Usados en alta frecuencia (fuentes conmutadas, cargadores de baterías)

Diodos de potencia

Encapsulado DO-5:

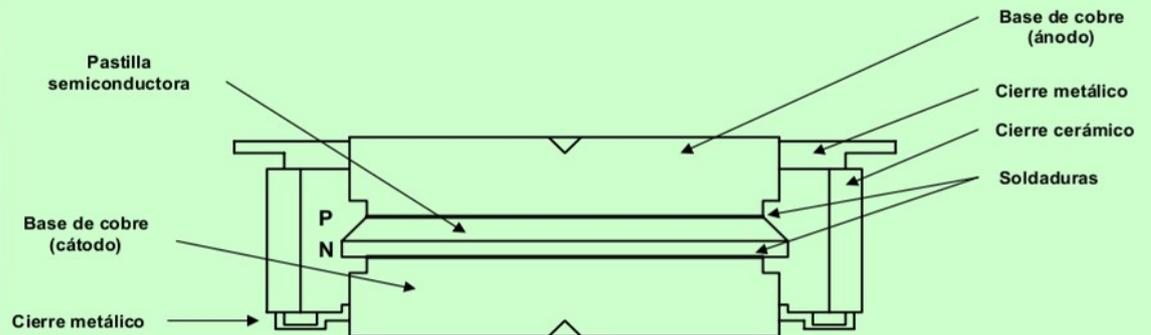


Función del encapsulado:

- Conexión eléctrica
- Disipación térmica
- Aislamiento eléctrico

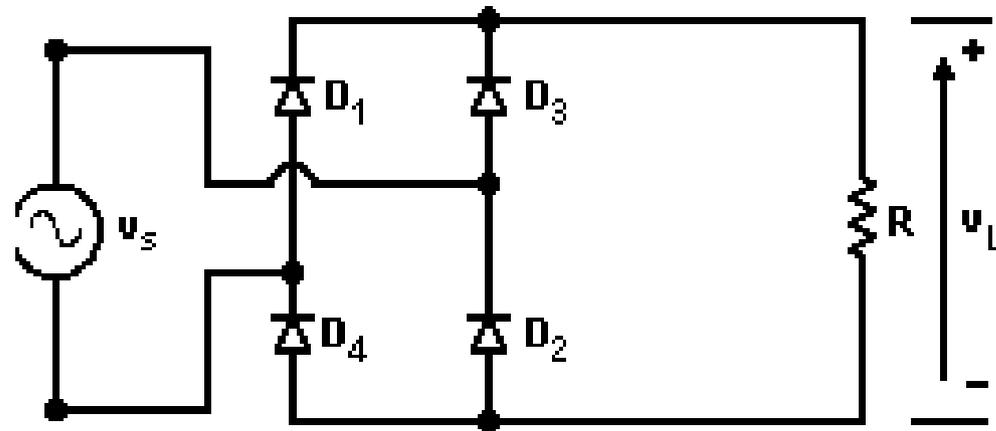
DO - 200AC

Grandes corrientes
(3500 - 5000 A)



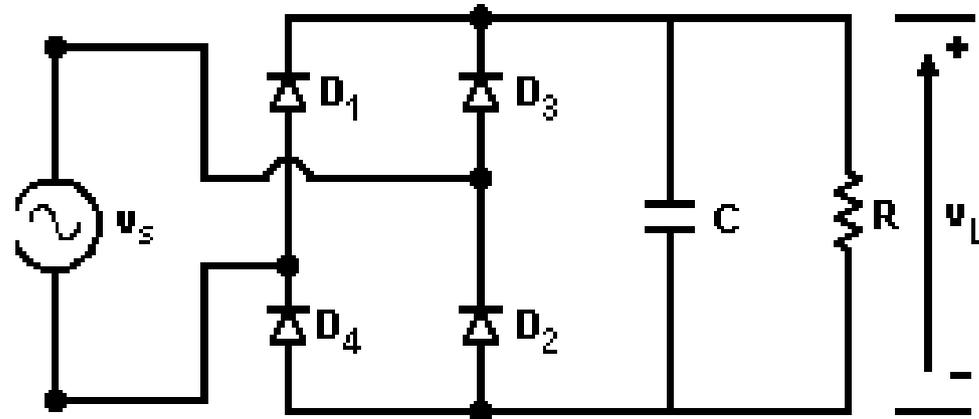
Ejemplo de aplicación de diodos

Rectificadores con diodos:

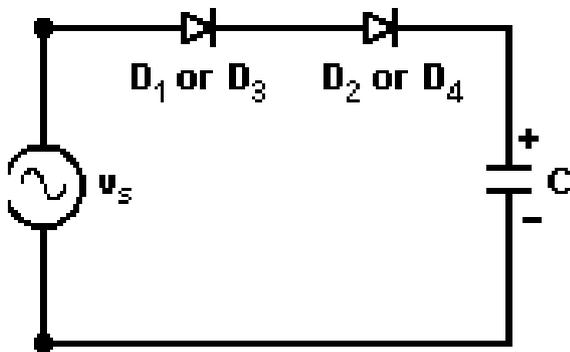


Ejemplo de aplicación de diodos

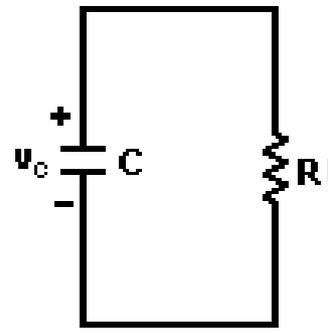
Rectificadores con diodos:



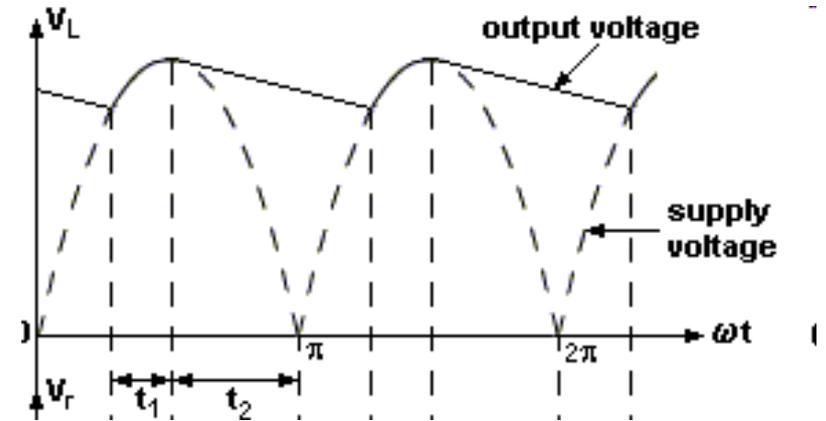
Funcionamiento:



Charging

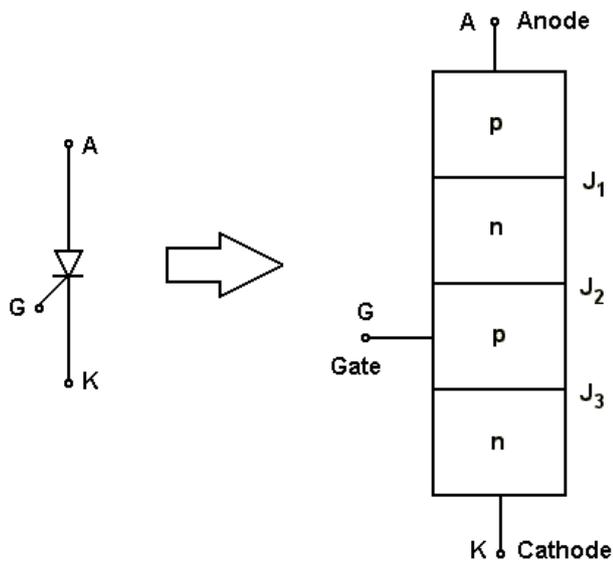


Discharging



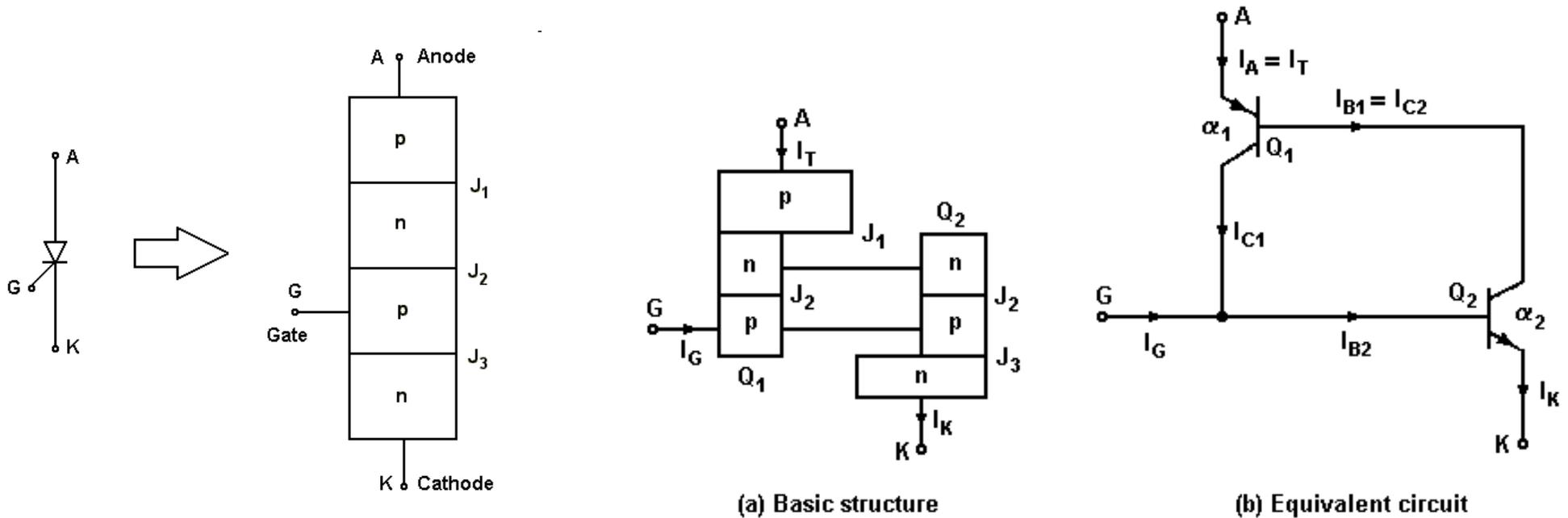
Tiristores

El tiristor o SCR (Silicon Controlled Rectifier) es uno de los principales dispositivos de potencia. Consiste en un sandwich PNP:



Tiristores

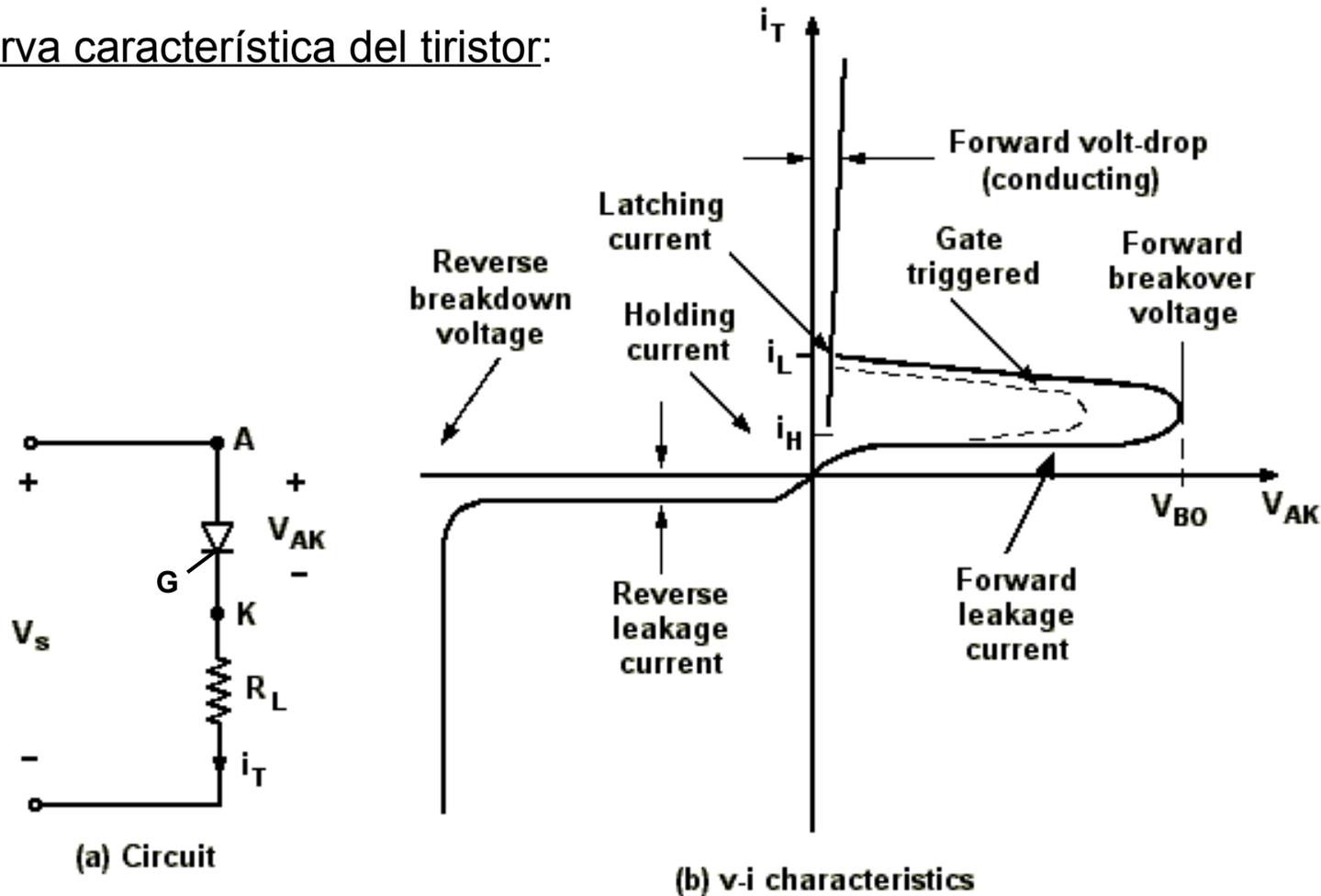
El tiristor o SCR (Silicon Controlled Rectifier) es uno de los principales dispositivos de potencia. Consiste en un sandwich PNPN:



El dispositivo presenta muy alta resistencia entre A y K. Cuando recibe una señal de disparo (pulso de corriente en I_G) se produce un efecto de realimentación positiva dentro de la estructura que la lleva al modo de conducción.

Tiristores

Curva característica del tiristor:



V_{BO} (tensión de ruptura): mínima tensión de V_{AK} que dispara al tiristor.

I_L : Corriente de latch (enganche): es la mínima corriente de encendido del tiristor.

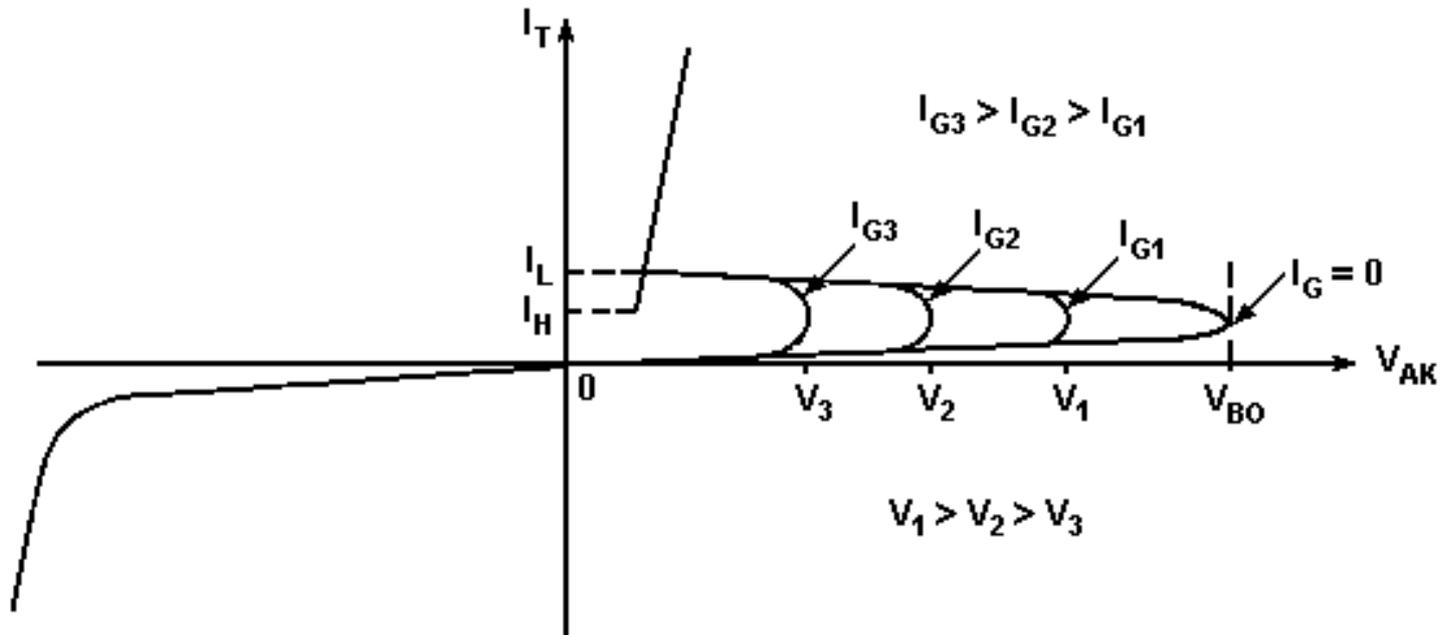
I_H : Corriente de hold (retención): mínima corriente que lo mantiene encendido.

I_R : Corriente reversa: corriente que circula para $V_k > V_a$.

Tiristores

Modos de encendido del tiristor:

- I_G : Con $I_G > 0$ y una tensión $V_{AK} < V_{BO}$ el tiristor se enciende (dispara controlado).
- **Térmico**: Temp. elevada puede dispararlo por corriente de fuga (no deseado).
- **Luz**: Si la luz incide sobre la juntura puede disparar al tiristor (no deseado).
- **Por tensión**: Si $V_{AK} > V_{BO}$ el tiristor se enciende (no deseado).
- **dv/dt**: Si V_{AK} varia rapidamente puede disparar al tiristor (no deseado).

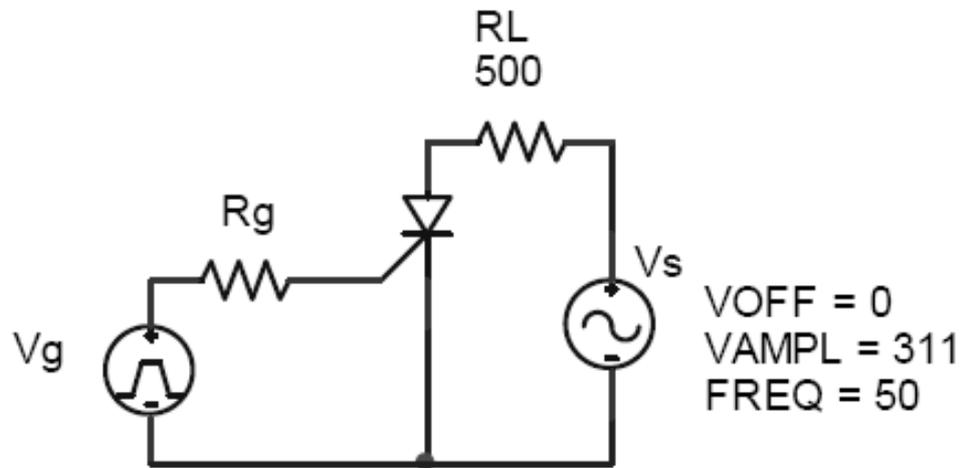


- Luego del encendido I_G debe ser cero para evitar pérdidas en la juntura.
- No se recomienda aplicar I_G con el tiristor en inversa.

Tiristores

Ejemplo de aplicación 1:

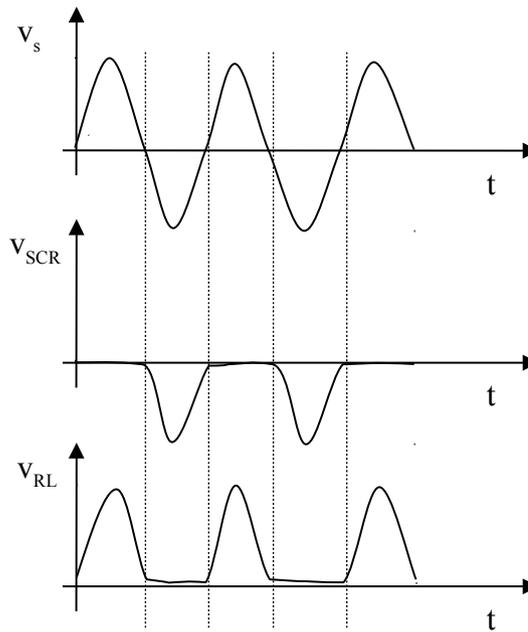
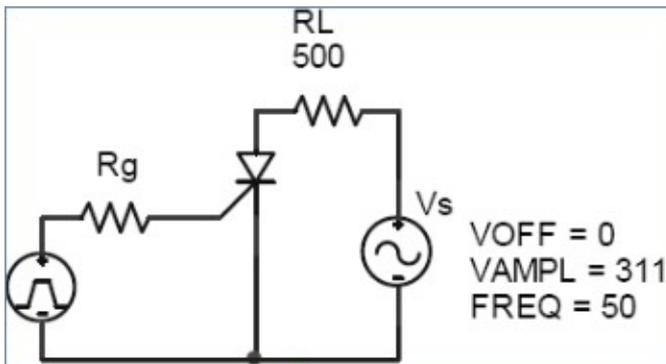
Un SCR se utiliza en el circuito de la figura, dibujar las formas de onda de tensión en el SCR y en la RL para diferentes ángulos de disparo del dispositivo. Indicar cuando la potencia disipada en la carga es máxima.



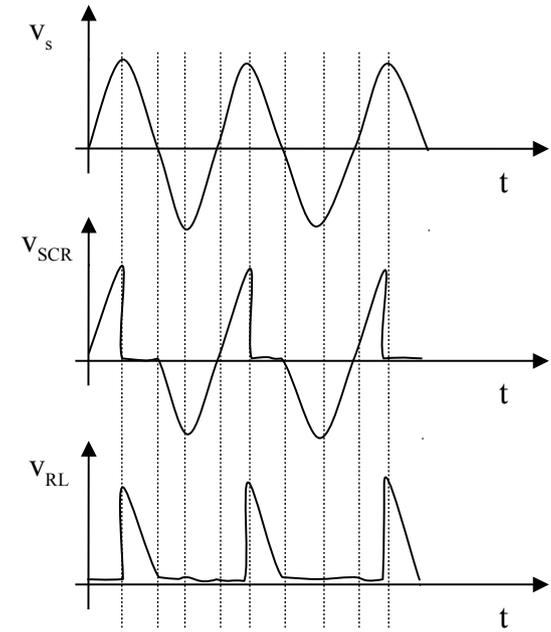
Tiristores

Ejemplo de aplicación 1:

Vemos la situación para distintos ángulos de disparos:



$T_d = 0$, $\alpha = 0^\circ$



$T_d > 0$, $\alpha > 0^\circ$

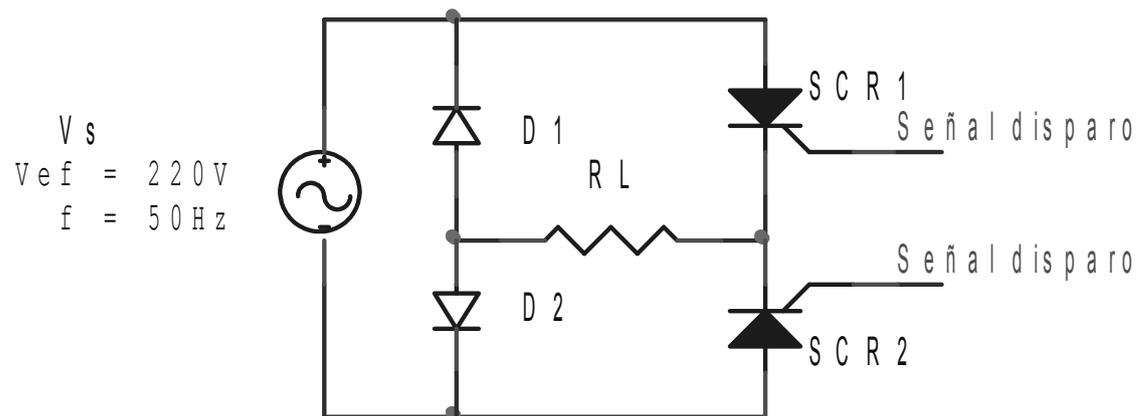
La potencia disipada en la carga es máxima cuando el disparo se produce en $T_d = 0$, $\alpha = 0^\circ$. Entonces, el SCR conduce durante un semiciclo completo de la señal, ya que en el semiciclo negativo el SCR se apaga. En rigor el SCR se apaga cuando la corriente que lo atraviesa es menor a I_H . Como simplificación en la mayoría de los casos puede asumirse que $I_H = 0$.

Tiristores

Ejemplo de aplicación 2:

Dado el circuito de la figura, graficar la forma de onda en cada uno de los dispositivos y en la carga RL en las siguientes condiciones:

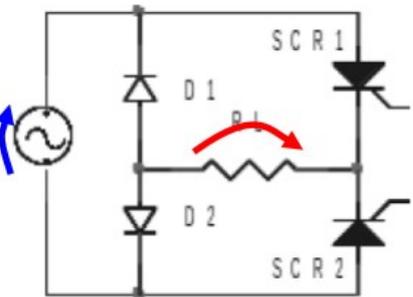
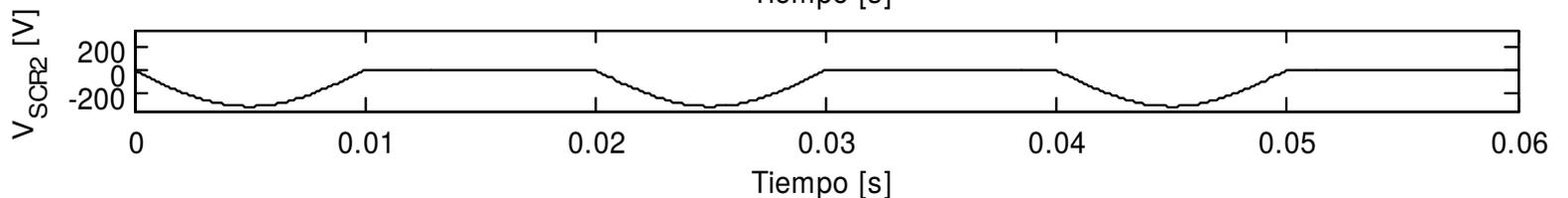
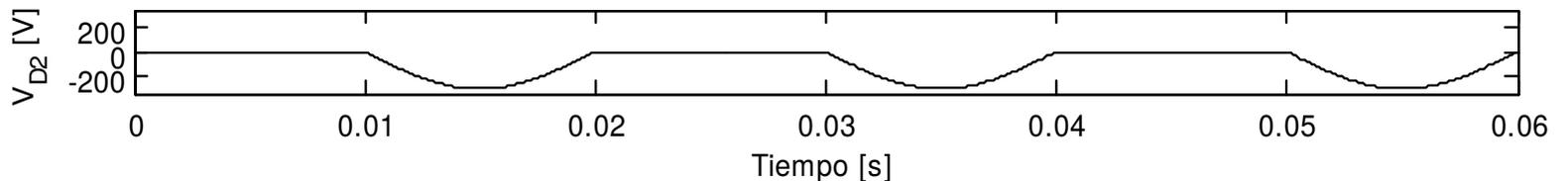
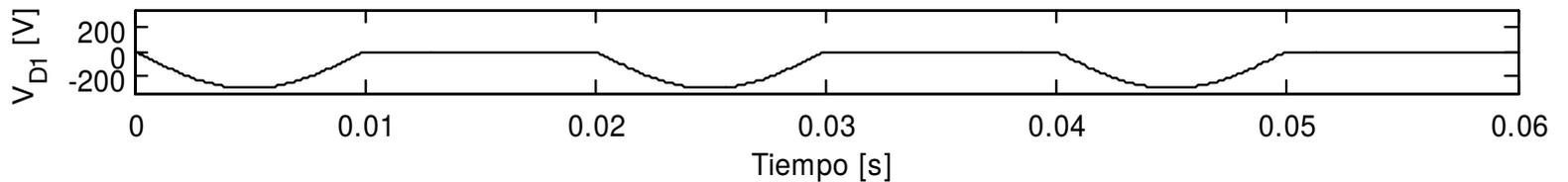
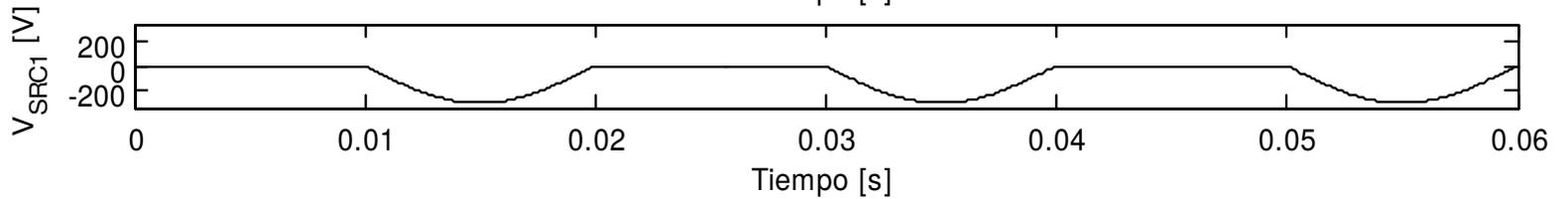
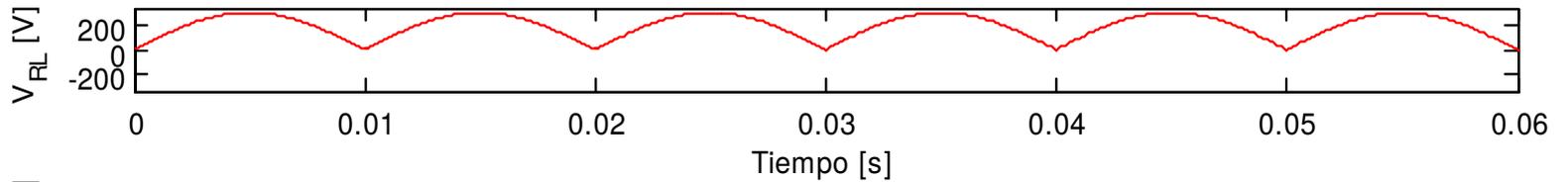
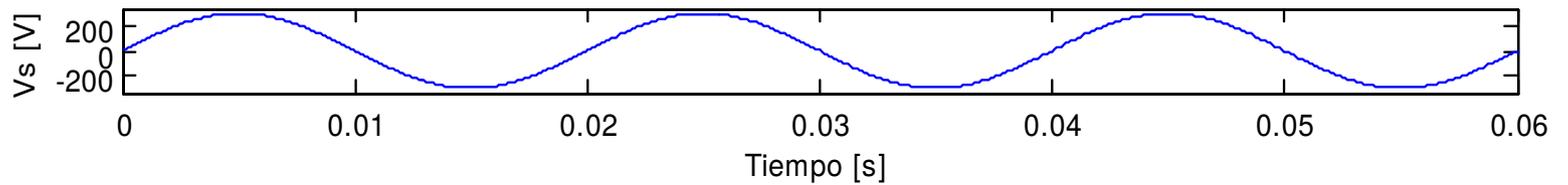
- Cada uno de los SCR se dispara con $\alpha=0^\circ$ (Cruce de V_s con cero).
- Cada uno de los SCR se dispara con $\alpha=90^\circ$ (V_s máximo).
- Los SCR no conducen en ningún momento.



Tiristores

Ejemplo de aplicación 2:

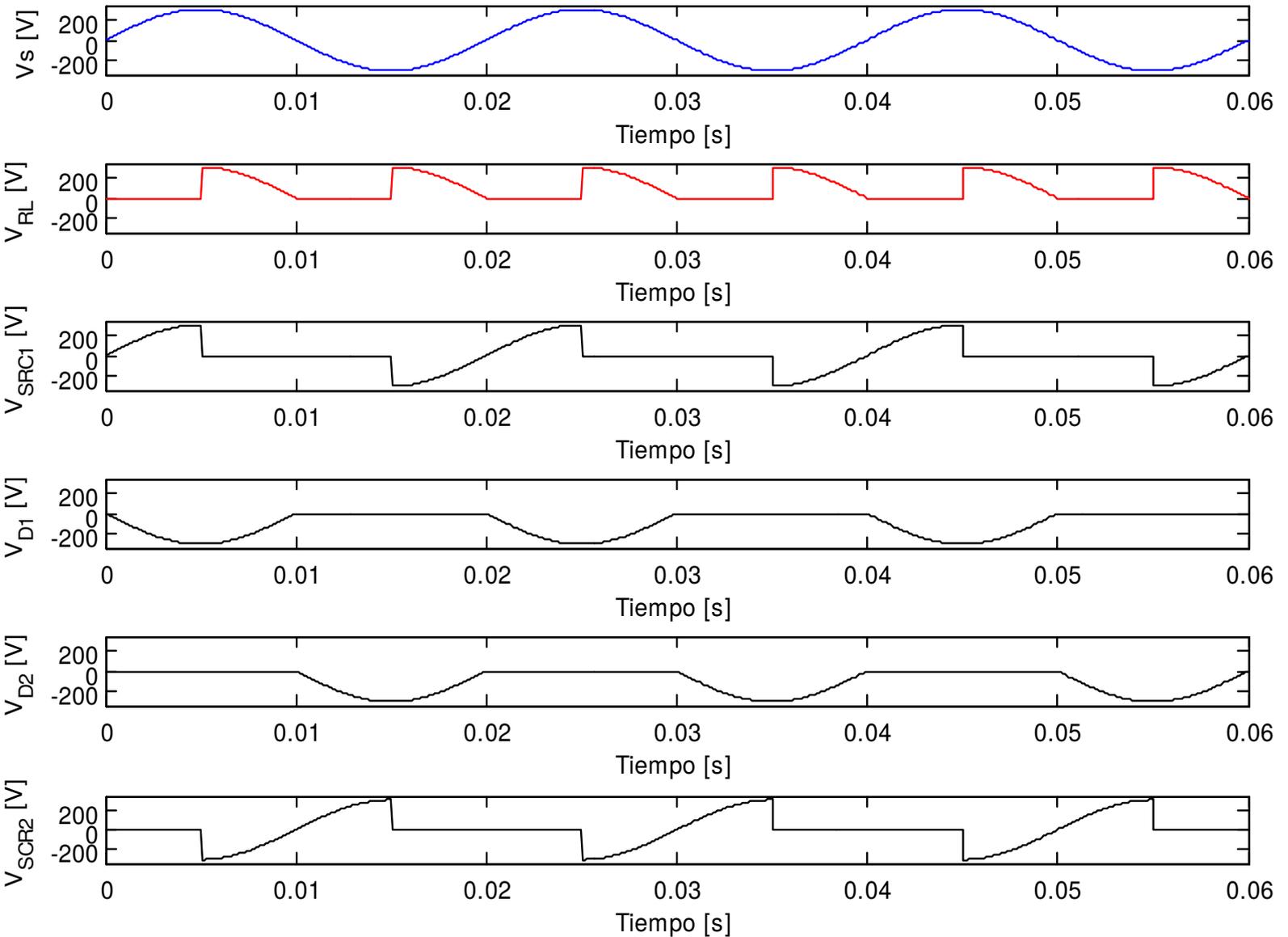
a. Cada uno de los SCR conduce durante $\frac{1}{2}$ ciclo de la señal V_s .



Tiristores

Ejemplo de aplicación 2:

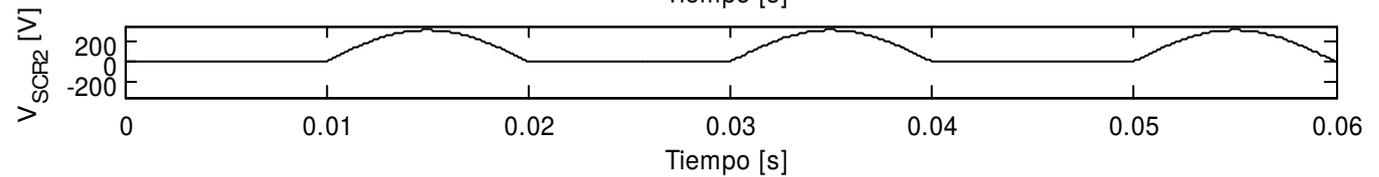
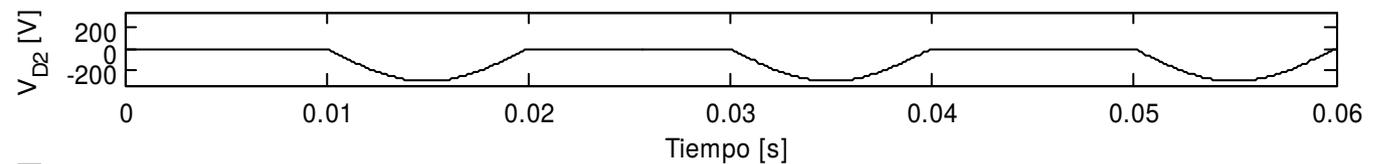
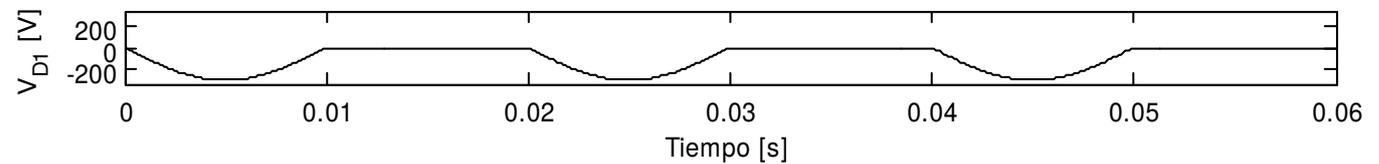
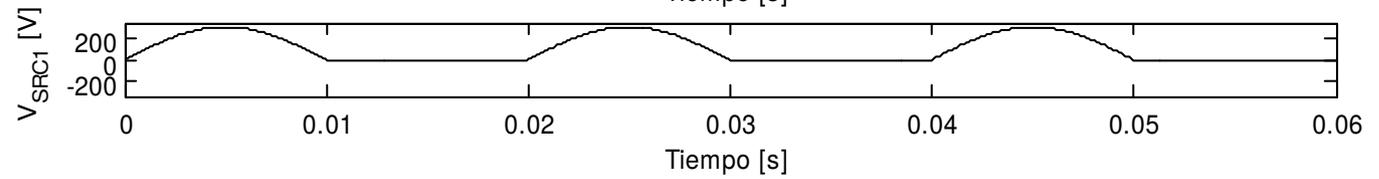
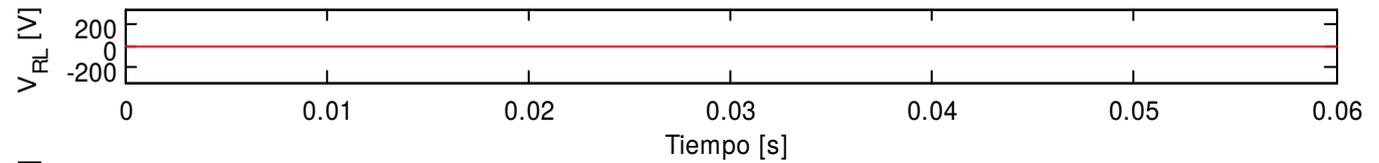
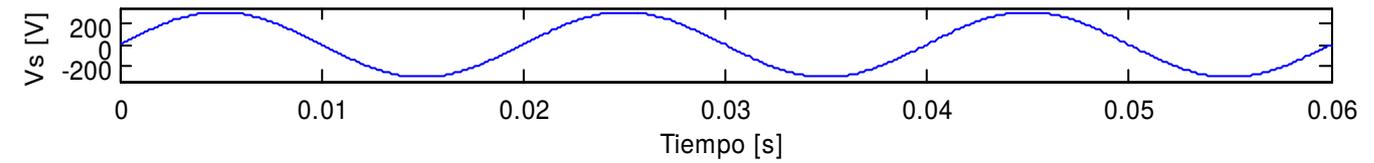
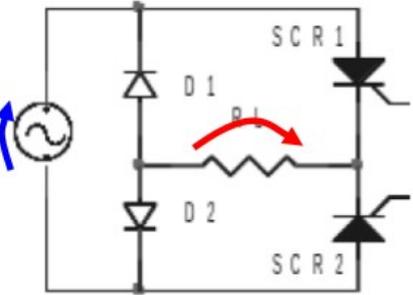
b. Cada uno de los SCR conduce durante $\frac{1}{4}$ ciclo de la señal V_s .



Tiristores

Ejemplo de aplicación 2:

c. Los SCR no conducen en ningún momento.



Transistores de potencia

Características generales

Se diseñan y fabrican para:

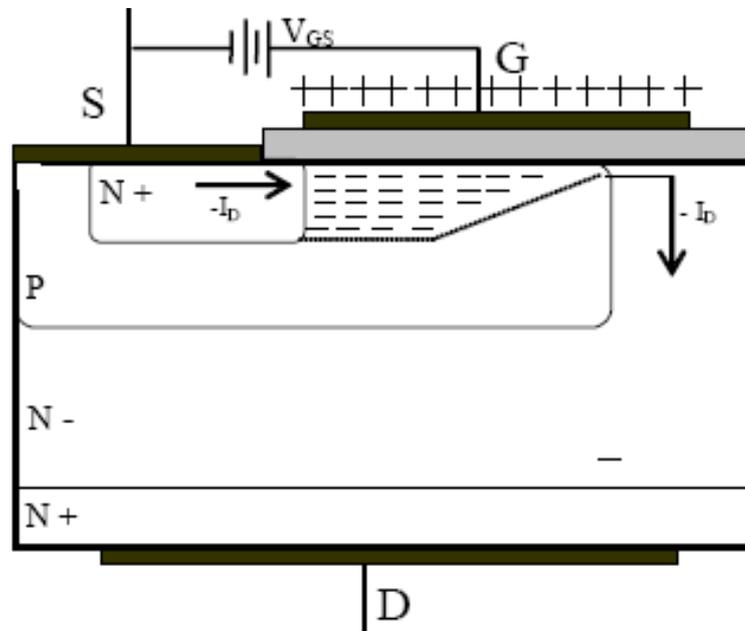
- Soportar corrientes y/o tensiones elevadas
- Favorecer la disipación de calor
- Poseer resistencia de encendido baja
- Poseer resistencia de apagado muy alta
- Conmutar rápidamente

Por estos motivos poseen características diferentes a los transistores de pequeña señal...

MOSFET de potencia

Características:

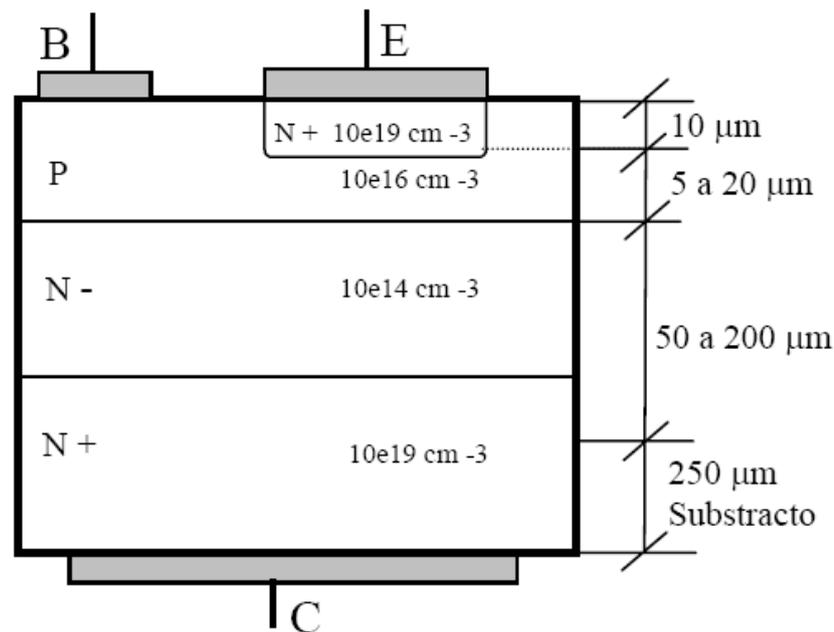
- Contactos de gran superficie y en caras opuestas para reducir las resistencias parásitas.
- Región de drain con dopaje gradual para aumentar la tensión de operación (dispositivo no simétrico).
- Debido a la gran área del Gate presenta una gran capacidad de entrada



TBJ de potencia

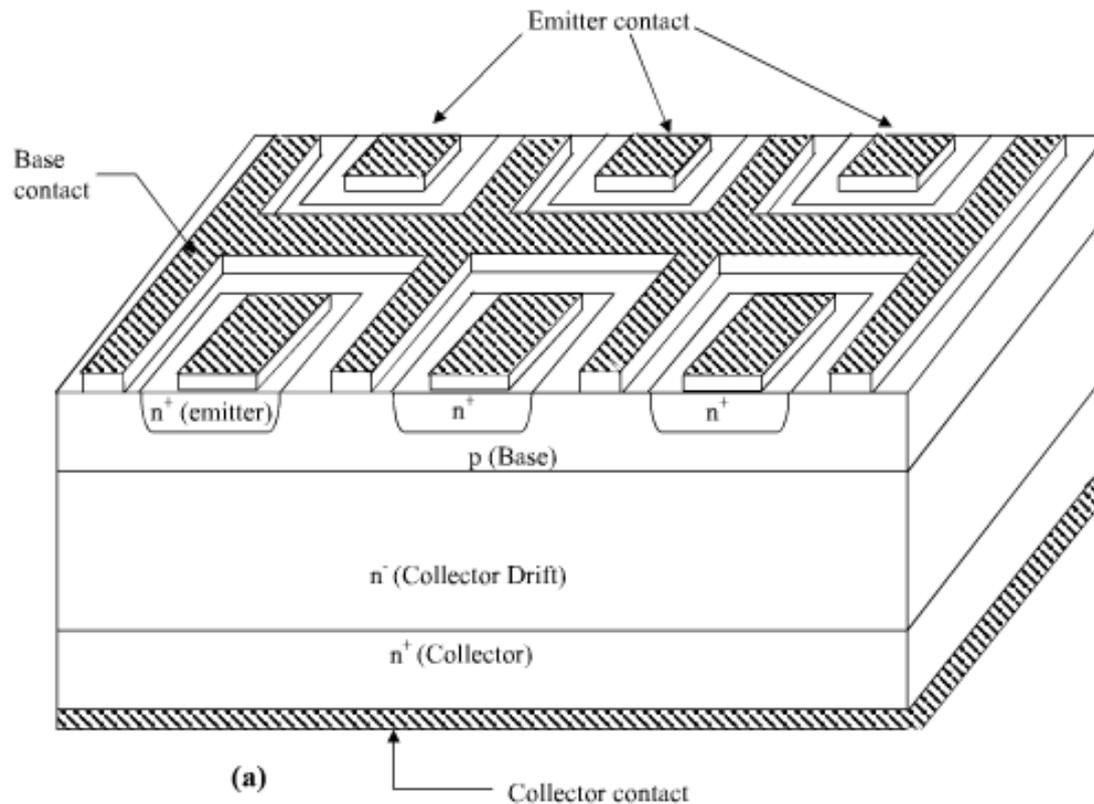
Características:

- Contactos de gran superficie y en caras opuestas para reducir las resistencias parásitas.
- Región de colector con dopaje gradual para aumentar la tensión de operación.
- Debido a la gran área de la base las ganancias de corriente son considerablemente menores que la de los dispositivos de pequeña señal



Transistores de potencia

Diseño de transistores de potencia:



Para evitar la aparición de puntos calientes (hot-spots) se usan diseños interdigitados (finger interleaving), donde se busca disminuir la densidad de corriente.

Transistores de potencia

Principios básicos de funcionamiento:

En un TBJ, I_C se controla con I_B .

En un MOS, I_D se controla con V_{GS} .

Los objetivos son: aislar la malla de control de la malla de salida, y con una potencia pequeña se controlar otra mucho mayor.

Características de un dispositivo ideal:

- Alta densidad de corriente (en conducción).
- Bloqueo de alta tensión V_{CE} o V_{DS} (en apagado)
- Bajo tiempos de conmutación $t_{on} \leftrightarrow t_{off}$.
- Que soporte grandes di/dt y dv/dt .

Velocidad de conmutación:

En el TBJ las capacidades son mayores que en el MOSFET, entonces el TBJ es mas lento que el MOSFET.

Resistencia de paso o de encendido:

En el TBJ la corriente circula a través del área del Emisor. En el MOSFET la circulación de la corriente es en superficie. Entonces el TBJ tiene menor resistencia de paso (maneja corrientes mayores) que el MOSFET.

Transistores de potencia

Comparación aproximada de características:

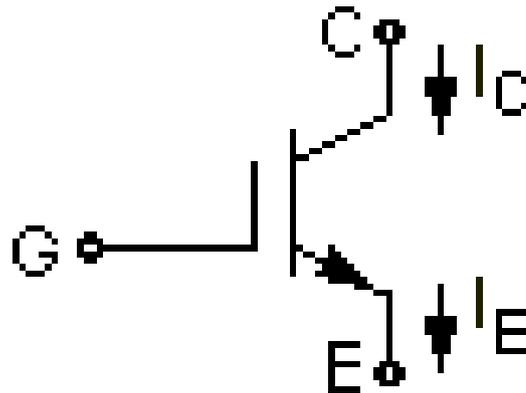
Parámetros	MOS	Bipolar
Impedancia de entrada	Alta ($10^{10} \Omega$)	Media ($10^4 \Omega$)
Ganancia en corriente	Alta (10^7)	Media (10 a 100)
Resistencia ON (conducción)	Media / alta	Baja
Resistencia OFF (corte)	Alta	Alta
Voltaje CE/DS máx. aplicable	Alto (1000 V)	Alto (1200 V)
Máxima temperatura	Alta (200°C)	Media (150°C)
Frecuencia de trabajo	Alta (100-500 Khz)	Baja (10-80 Khz)
Costo	Alto	Medio

IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor:

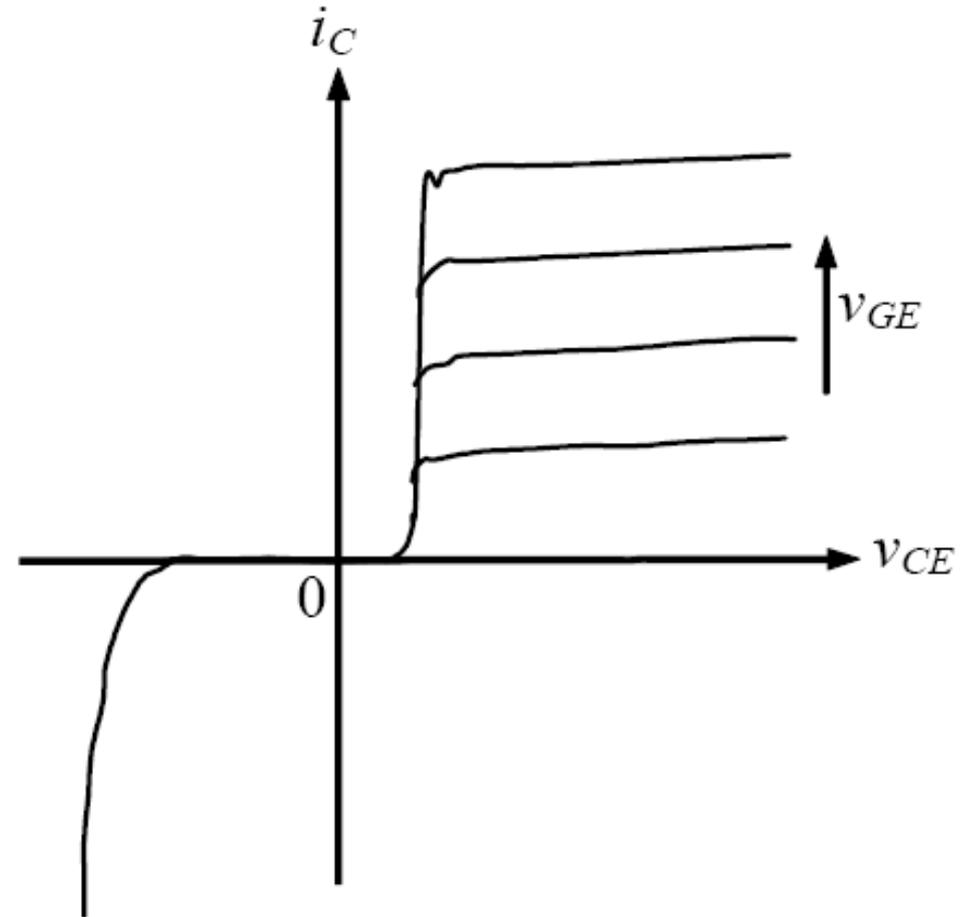
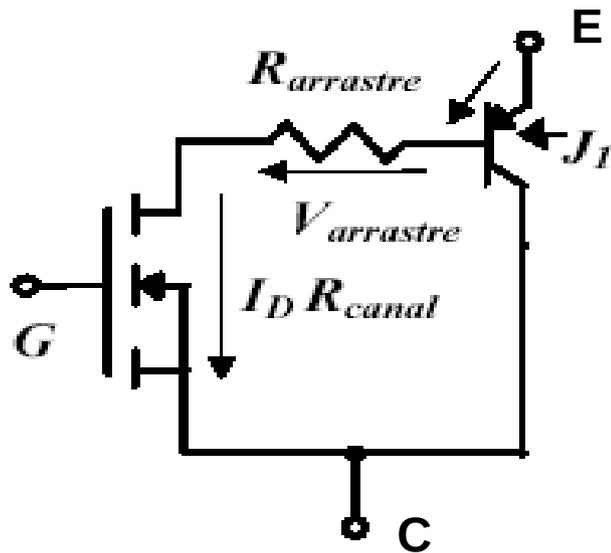
Ofrece una entrada MOS y una corriente de TBJ:

- Se controla por tensión.
- Posee tiempos de conmutación bajos.
- Posee baja resistencia de encendido.
- Son costosos



IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



El IGBT presenta las características de entrada del MOSFET y las de salida del TBJ.

IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

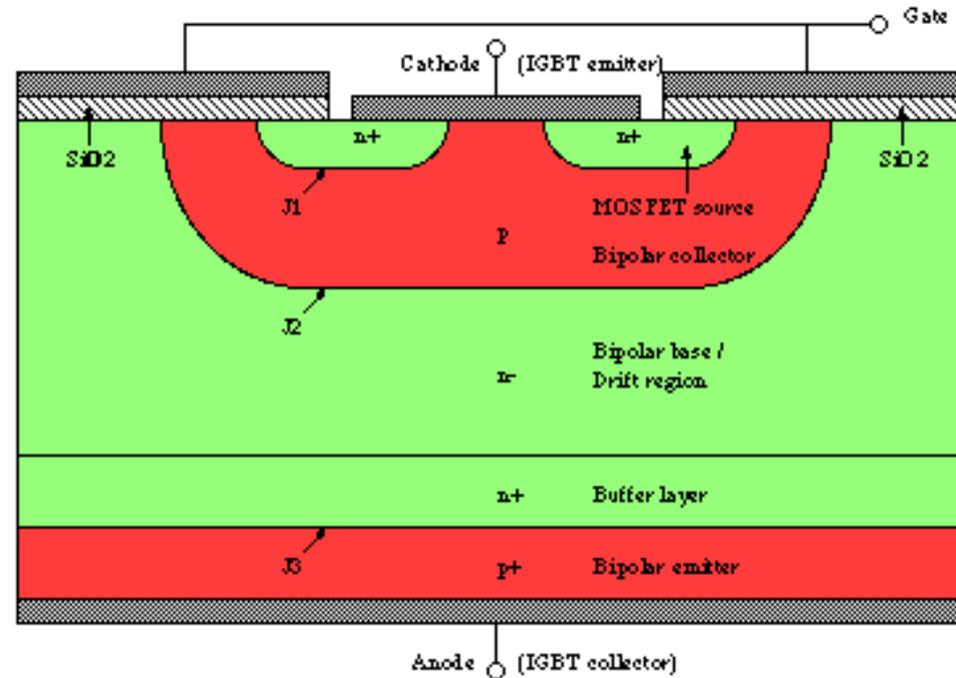


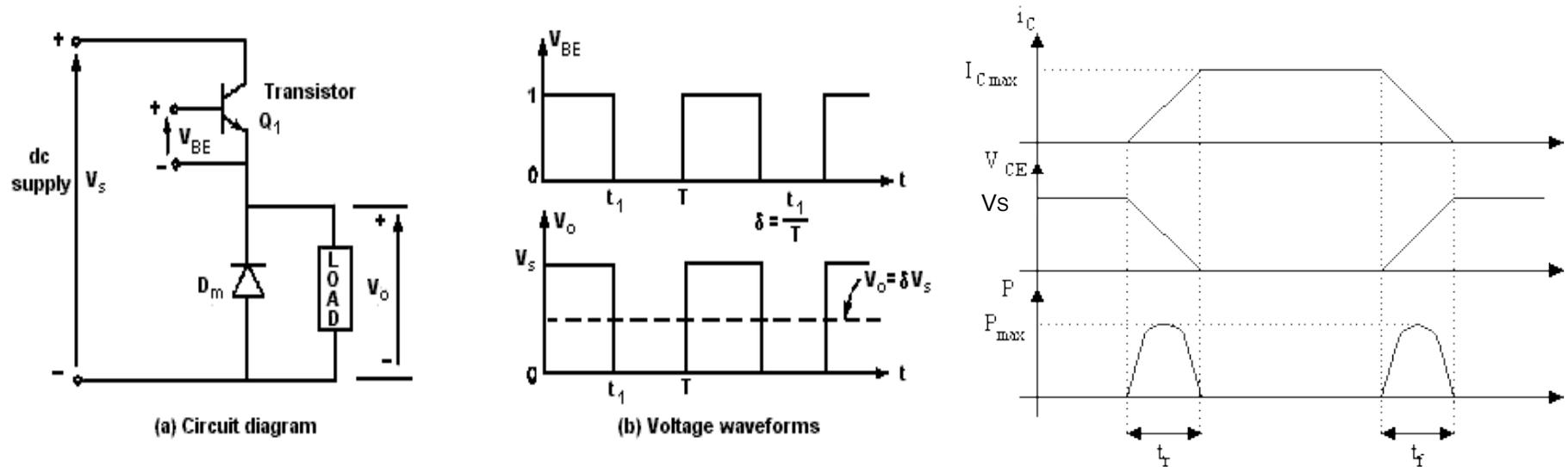
Fig.1: A typical IGBT structure

- La estructura MOS permite controlar la circulación de carga entre la regiones n+ y la región n-
- La región n- se comporta como la base de un transistor PNP
- La corriente que circula entre el emisor y colector del PNP es controlada por la tensión de gate

Transistores de potencia

Tiempo de conmutación y disipación

- Con el transistor en saturación o en corte las pérdidas son despreciables.
- Durante la conmutación se produce un pico de potencia disipada:

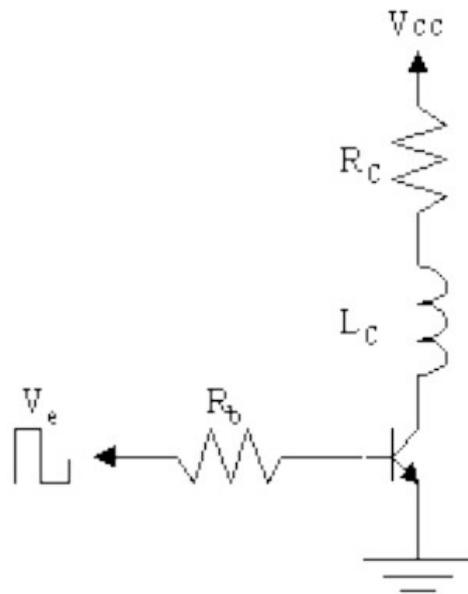


- Las pérdidas aumentan de forma proporcional con la frecuencia de trabajo.

Transistores de potencia

Efecto asociado a cargas inductivas:

- Las cargas inductivas generan las condiciones de trabajo más desfavorables:



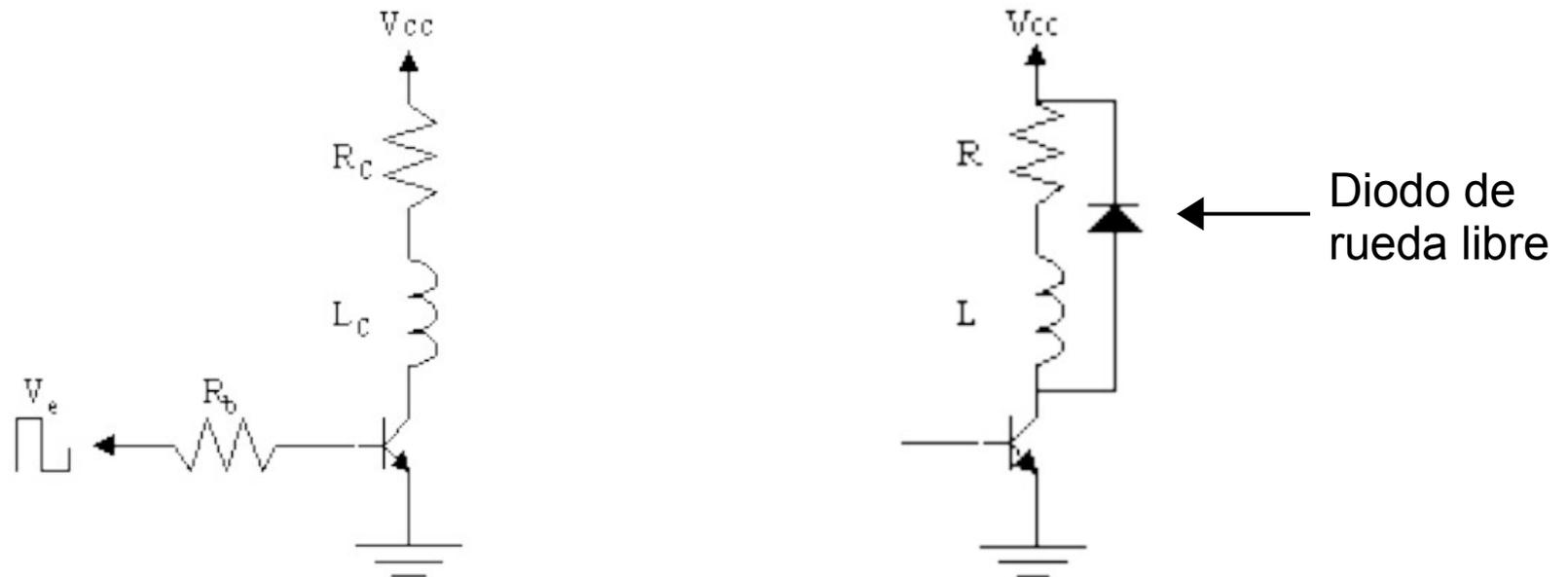
Para carga inductiva hay una profunda incursión en avalancha secundaria, con valor $V_{CE} \gg V_{CC}$ debido a que al intentar interrumpir la corriente por el inductor se produce un pico de tensión en el colector del TBJ.

$$V_L = L \cdot di/dt$$

Transistores de potencia

Efecto asociado a cargas inductivas:

- Las cargas inductivas generan las condiciones de trabajo más desfavorables:

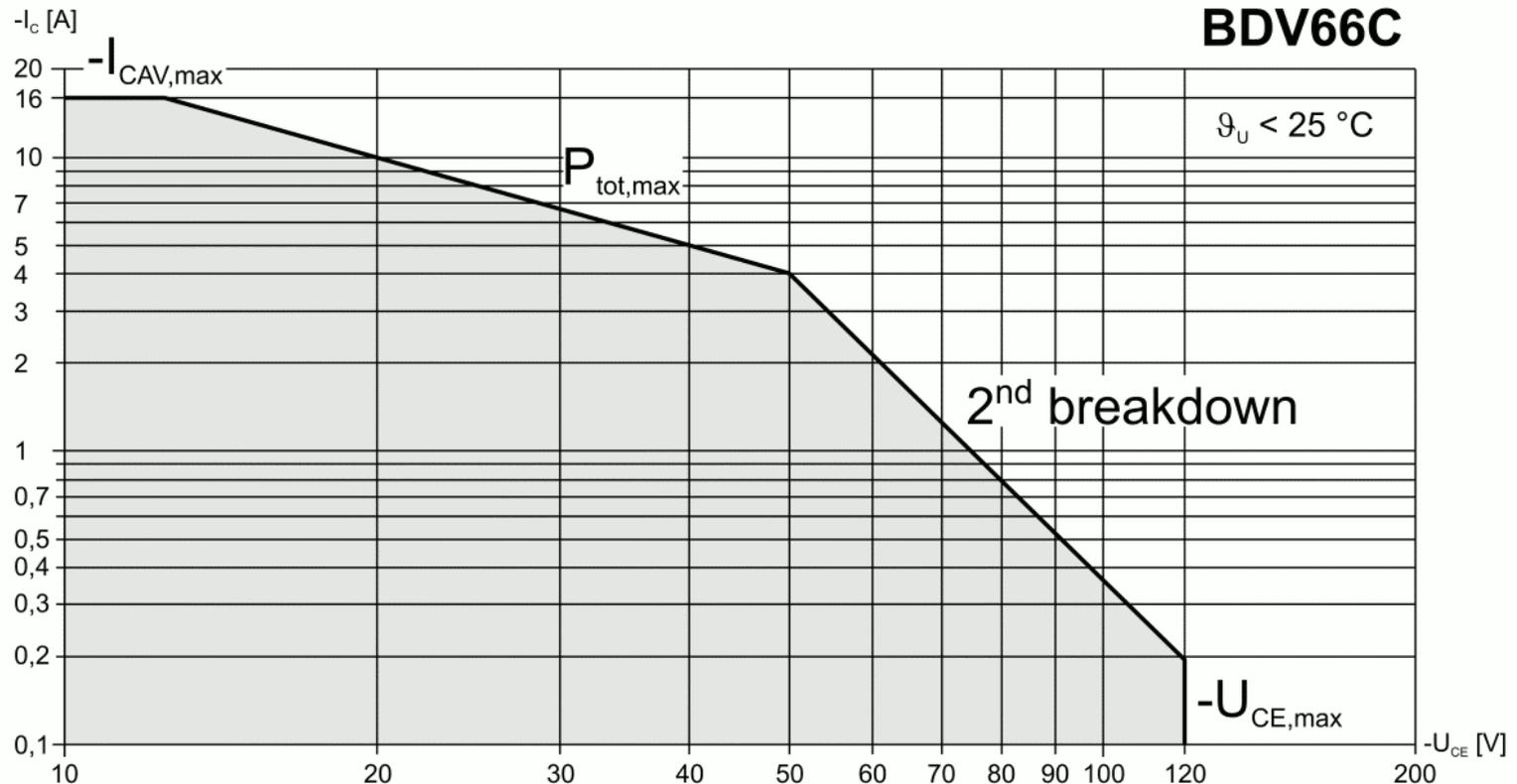


Para carga inductiva hay una profunda incursión en avalancha secundaria, con valor $V_{CE} \gg V_{CC}$ debido a que al intentar interrumpir la corriente por el inductor se produce un pico de tensión en el colector del TBJ.

$$V_L = L \cdot di/dt$$

Transistores de potencia

Zona de operación segura (SOA – Safe Operating Area):

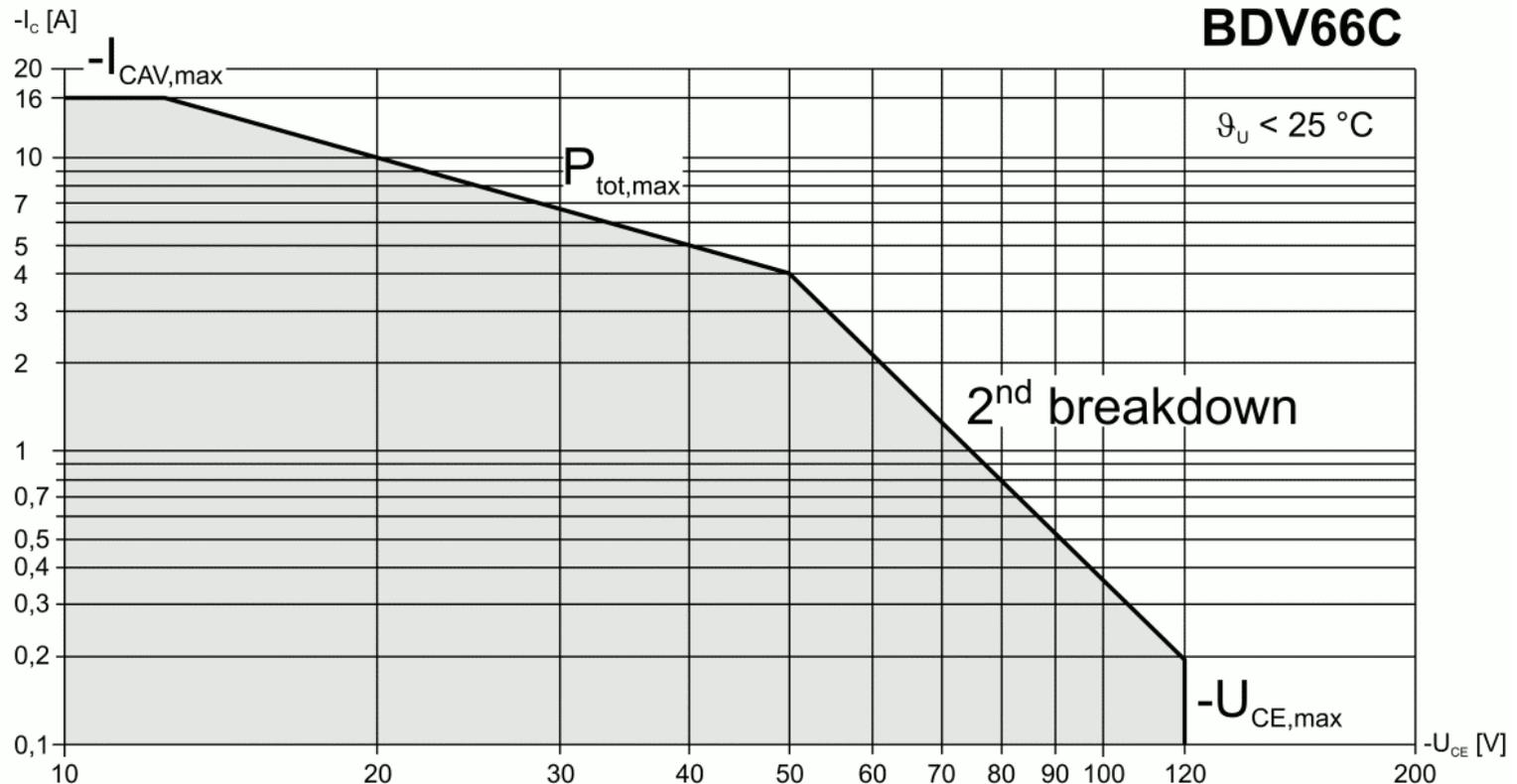


- IC_MAX es la limitación en corriente máxima se debe a la capacidad de los contactos del dispositivo de soportar dicha corriente.

- P_TOT es la limitación por potencia máxima disipada dentro de la región activa del dispositivo.

Transistores de potencia

Zona de operación segura (SOA – Safe Operating Area):



- **Avalancha primaria:** Se produce mientras el dispositivo no conduce corriente cuando se supera un valor máximo de V_{CB} o V_{CE} . La unión C-B polarizada en inversa entra en un proceso de ruptura similar al de un diodo.
- **Avalancha secundaria:** Puede darse una avalancha con tensiones por debajo de los límites anteriores debido a la aparición de puntos calientes (hot spots). Este fenómeno es destructivo.

Modelo térmico

Cálculo de disipadores

Analogía térmico - eléctrica:

$$Pot_{disipada} \cdot R_{Term} = T_2 - T_1 \rightarrow I \cdot R = \Delta V$$

Regímenes máximos

- Usualmente debe garantizarse: $T_j < T_{jmax} = 125^\circ C$
- Las características térmicas suelen presentarse en las hojas de datos de aluna de las siguientes formas:

Forma típica ($T_j=125^\circ C$):

$$\frac{Pd_{ja} @ T_a=25^\circ C}{R_{jc}} = 25W$$

$$= 1,4 \text{ } ^\circ C/W$$

Alternativa ($T_j=125^\circ C$):

$$\frac{Pd_{ja} @ T_a=25^\circ C}{Pd_{jc} @ T_c=25^\circ C} = 25W$$

$$= 70W$$

Frecuentemente ($T_j=125^\circ C$):

$$\frac{Pd_{jc} @ T_c=25^\circ C}{derate} = 70W$$

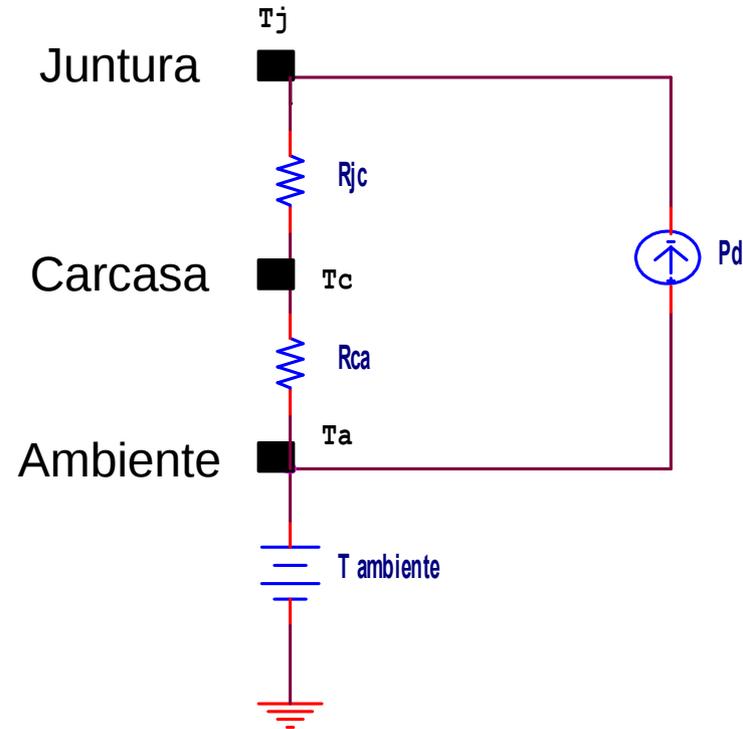
$$= 0,25 \text{ } W/^\circ C$$

Ocasionalmente ($T_j=125^\circ C$):

$$\frac{R_{jc}}{R_{ca}} = 1,4 \text{ } ^\circ C/W$$

$$= 2,6 \text{ } ^\circ C/W$$

Modelo térmico
equivalente:



Estos cuatro casos son exactamente equivalentes (demostrarlo).

Encapsulados y disipadores

RESISTENCIA TERMICA UNION -CONTENEDOR Y UNION-AMBIENTE		
Tipo contenedor	Rjc (°C/W)	Rja (°C/W) sin aleta
TO.5-TO.39	de 10 a 60	de 175a 220
TO.202	de 12 a 15	de 80a 90
TO. 1 26-SOT.32	de 3 a 15	de 80a 100
TO.220	de 1,5a 4,2	de 60a 70
TO.66 plástico	de 1,5a 4,2	de 60a 70
TO.3 plástico	de 1 a 2	de 35 a 45
TO.66	de 4 a 5	de 75a 85
SOT.9	de 4 a 5	de 75a 85
TO.59	de 1,5a 3	de 70a 90
TO.60	de 1,5a 3	de 70a 90
TO.3	de 0,8a 3	de 30a 40
TO.117	de 15 a 35	de 70a 90
SOT.48	de 1,8a 6	de 40a 70



TO-92



TO-5



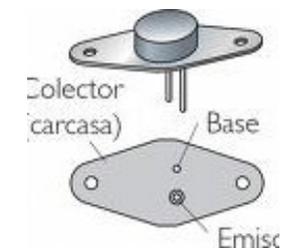
TO-220



TO-247



TO-218



TO-3

RESISTENCIA TERMICA CONTENEDOR -DISIPADOR				
Tipo de contenedor	Contacto directo sin mica	Contacto directo y silicona	Contacto con mica	Contacto con mica silicona
TO.5	1	0,7	--	--
TO.39	1	0,7	2	1,5
TO.126	1,4	1	1,4	1,3
TO.220	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.202	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.152	0,8	0,5	1,2	0,9
TO.90	0,5	0,3	1	0,7
TO.3P.	0,4	0,2	2,1	1,5
TO.59	1,2	0,7	--	--
TO.117	2	1,7	--	--
SOT.48	1,8	1,5	--	--
DIA.4L	1,1	0,7	--	--
TO.66	1,1	0,65	--	--

Mayor disipador → menor resistencia



TO-220



TO-3

Disipadores

Incidencia de la posición

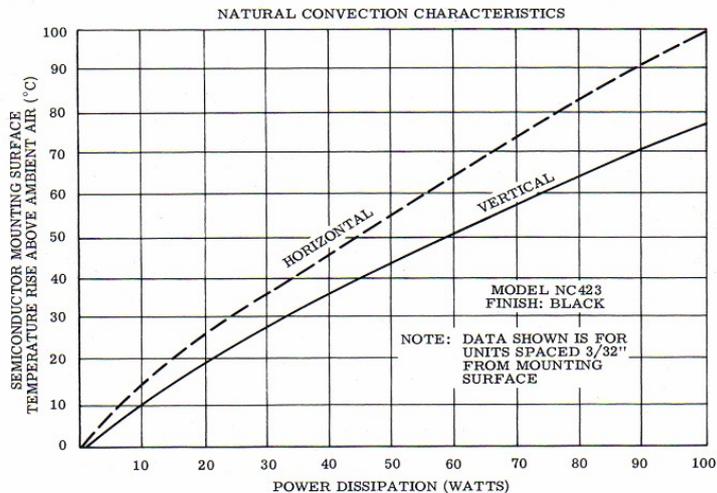
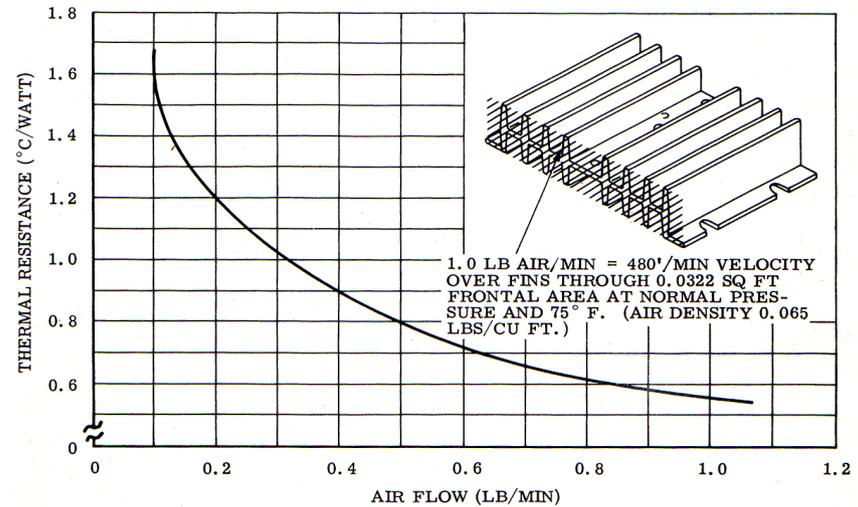


Figure 12-8. Wakefield Engineering — Delta T Model 423 Thermal Characteristics.

Ventilación forzada



Mantenimiento de disipadores:

- Limpieza
- Pulido
- Lubricado
- Ajuste

Conclusiones

Prestaciones generales:

DISPOSITIVO	TENSIÓN	CORRIENTE	FRECUENCIA
DIODOS	<10kV	<5000A	<10MHz
TIRISTORES	<6000V	<5000A	<500Hz
GTOs	<6000V	<3000A	<500Hz
TRIACs	<1000V	<25A	<500Hz
MOSFETs	<1000V	<100A	<1MHz
BJTs	<1200V	<700A	<25kHz
IGBTs	<2000V	<500A	<75kHz

DISPOSITIVO	POTENCIA	FRECUENCIA
TIRISTORES	Alta	Baja
GTOs	Alta	Baja
TRIACs	Baja	Baja
MOSFETs	Baja	Alta
BJTs	Media	Media
IGBTs	Media-Alta	Media

Bibliografía

“Power Electronics: Converters, Applications and Design”, Mohan, Undeland y Robbins, John Wiley & Sons, 2ª Ed, Nueva York, 1995.

“Eletrónica de Potência”, J. A. Pomilio, Universidade Estadual de Campinas, SP - Brasil.

“Electrónica de Potencia”, D. W. Hart, Valparaíso University, Valparaíso Indiana. Prentice Hall.

www.redeya.com

www.eng.uwi.tt/depts/elec/staff/rdefour/courses/index33d.html