

Dispositivos de Potencia

66.25 Dispositivos Semiconductores - FIUBA
Dr. Ing. Ariel Lutenberg

Organización de la clase

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

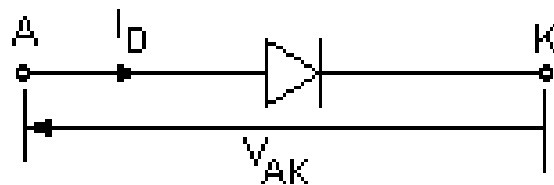
1.Introducción a la electrónica de potencia

- **Objetivos de la clase:**
 - **Entender las aplicaciones de la electrónica de potencia.**
 - **Conocer diferentes dispositivos de potencia y sus usos.**
- **Definición de “electrónica de potencia”:**
 - **Es la aplicación de dispositivos electrónicos al control y conversión de energía eléctrica.**
 - **Ejemplos: Control de motores, calefacción, sistemas de iluminación, fuentes de alimentación, etc.**

1.Introducción a la electrónica de potencia

- Dispositivos semiconductores de potencia:
 - Se pueden clasificar en cinco tipos:
 - 1.Diodos de potencia
 - 2.Tiristores
 - 3.TBJ de potencia (Transistores bipolares de juntura)
 - 4.MOSFET de potencia
 - 5.IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)

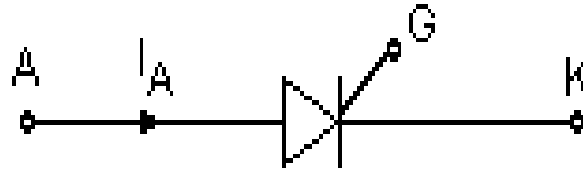
1. Diodos de potencia



- Sus terminales son ánodo y cátodo.
- Conduce sólo cuando $V_a > V_k$ (equivale a un cable).
- Si $V_k > V_a$ el diodo no conduce (equivale a un circuito abierto).

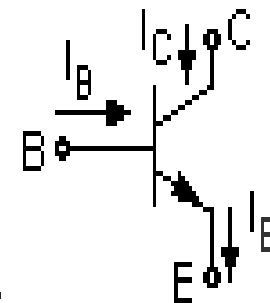
1.Introducción a la electrónica de potencia

2. Tiristores



- Sus terminales son: ánodo, cátodo y compuerta (gate).
- Sólo conduce cuando $V_a > V_k$, y se inyecta una corriente por el Gate (entonces A-K equivale a un cable).
- La única forma de “apagarlo” es forzando $V_a < V_k$.

3. TBJ (Transistor bipolar de juntura)

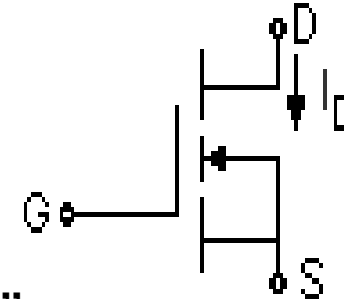


- Sus terminales son emisor, base y colector.
- Sólo conduce cuando $V_{BE} > 0.7V$
- Si además I_B es suficientemente grande, entonces C-E equivale a un cable.

1.Introducción a la electrónica de potencia

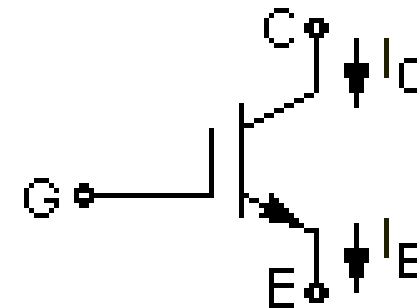
4. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

- Sus terminales son gate, source y drain.
- Es un dispositivo de conmutación rápida (más rápido que TBJ).
- Sólo conduce si $V_D > V_S$ y $V_G > V_S$ (n-MOSFET), entonces D-S es “un cable”.



5. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

- Sus terminales son gate, emisor y colector.
- Combina las mejores características del TBJ y del MOSFET.
- Sólo conduce si $V_C > V_E$ y $V_G > V_E$ (nIGBT), entonces C-E “es un cable”.



1.Introducción a la electrónica de potencia

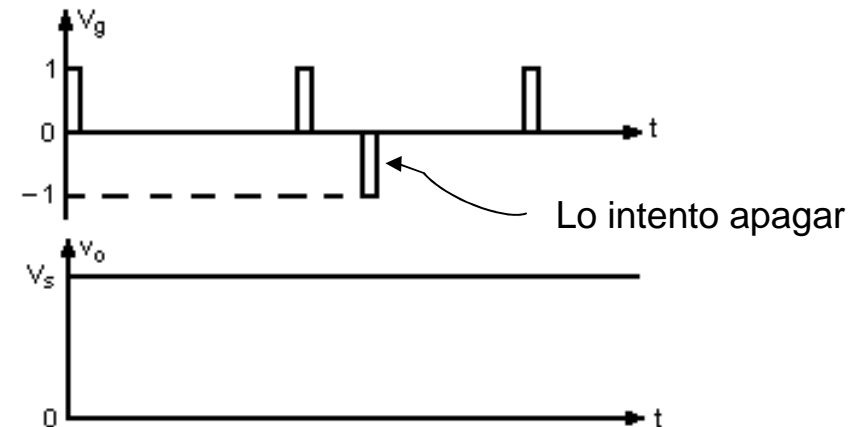
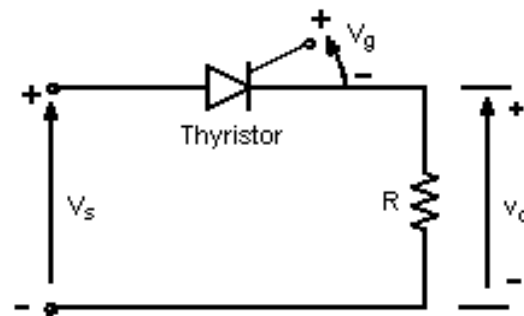
Características “típicas” de los dispositivos

Dispositivo		Max. Volt Inverso Max. Corr Directa	Switching time (μ s)	Resistencia equivalente
Diodos	Uso general	5000V/5000A	100	0,16m
	High Speed	3000V/1000A	2-5	1m
	Schottky	40V/50A	0,2	10m
Tiristores	Uso general	5000V/5000A	200	0,25m
	High Speed	1200V/1500A	20	0,50m
	Light triggered	6000V/1500A	200-400	0,50m
Transistor	TBJ	400V/250A	10	4m
	MOSFET	500V/9A	0,7	0,6m
	IGBT	1200V/400A	2,3	60m

¿Que dato falta en la tabla para poder hacer la comparación?

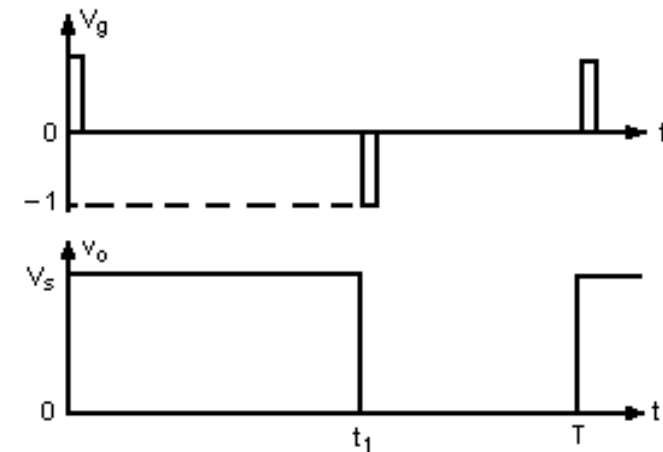
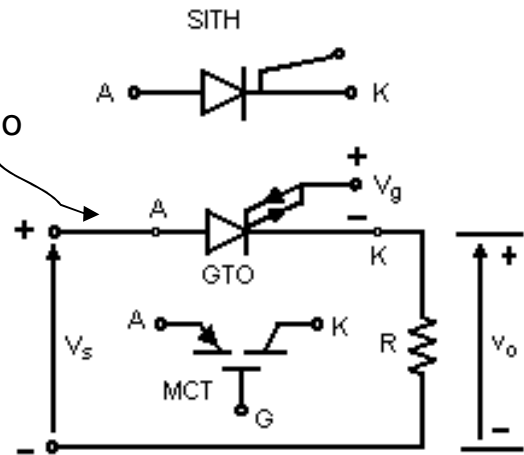
1.Introducción a la electrónica de potencia

Ejemplo de uso de los dispositivos:



(a) Thyristor switch

Dispositivos con control de apagado

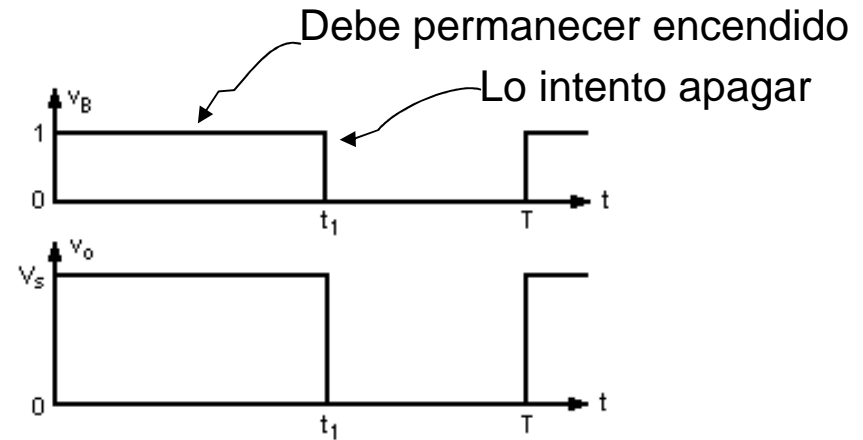
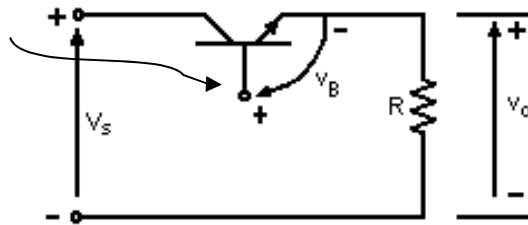


(b) GTO/MCT/SITH switch (For MCT, the polarity of V_g is reversed as shown)

1.Introducción a la electrónica de potencia

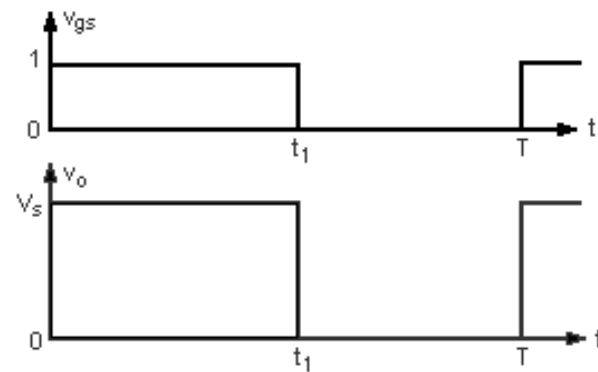
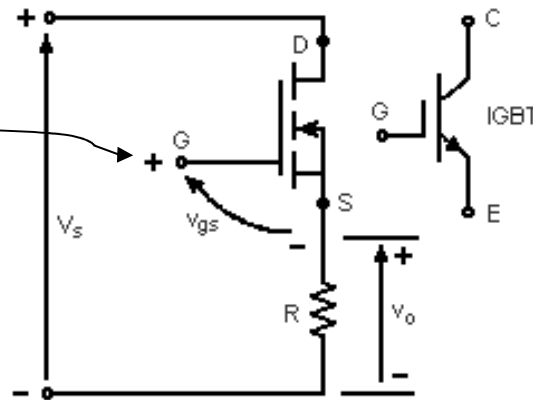
Ejemplo de uso de los dispositivos:

La corriente de base es significativa



(c) Transistor switch

La corriente de gate es despreciable



(d) MOSFET / IGBT switch

1.Introducción a la electrónica de potencia

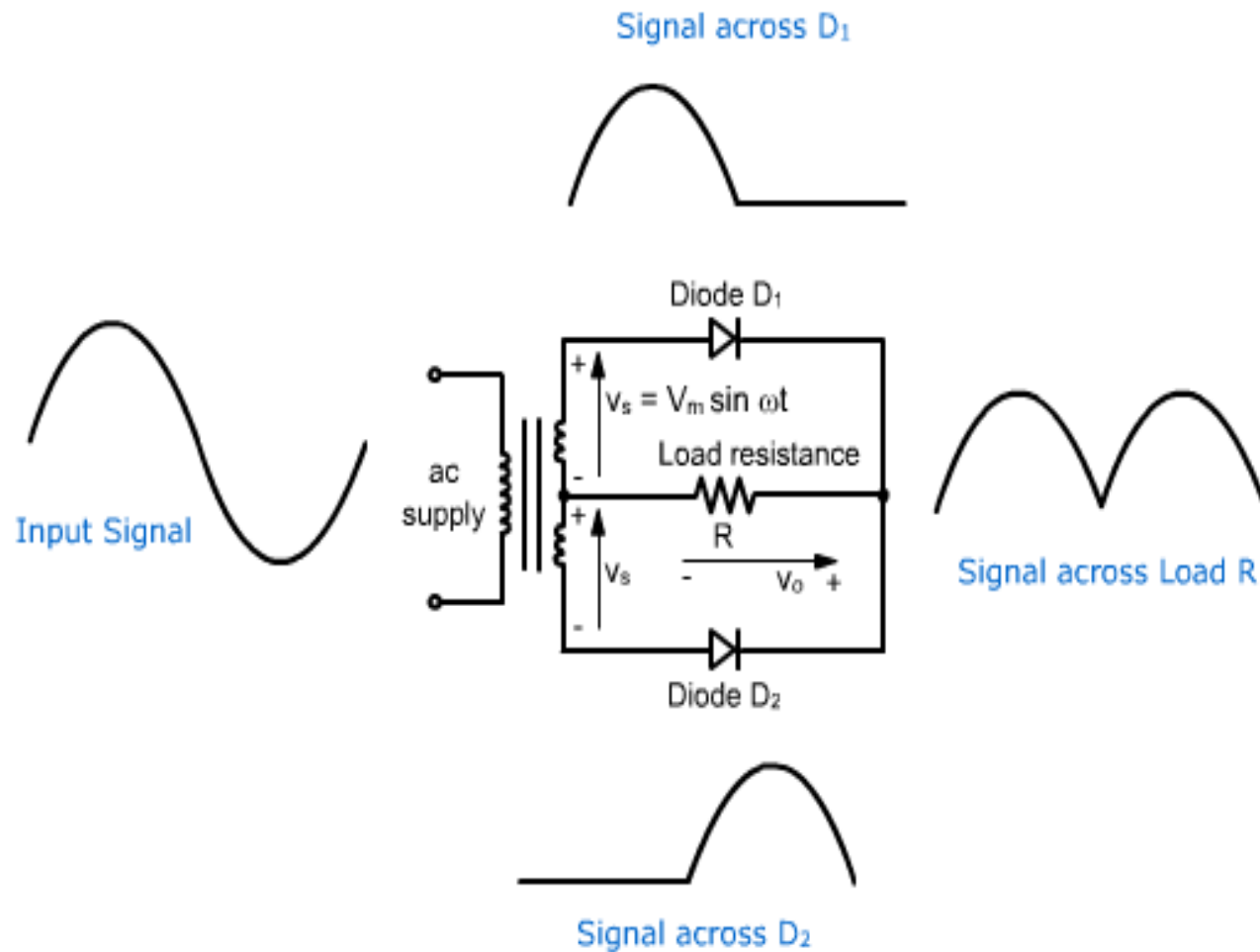
Clasificación de los circuitos electrónicos de potencia:

Los dispositivos permiten convertir potencia eléctrica de DC y AC:

- 1. Rectificadores con diodos**
- 2. Conversores AC-DC (rectificadores controlados)**
- 3. Conversores AC-AC (ac voltage controllers)**
- 4. Conversores DC-DC (dc choppers)**
- 5. Conversores DC-AC (inverters)**

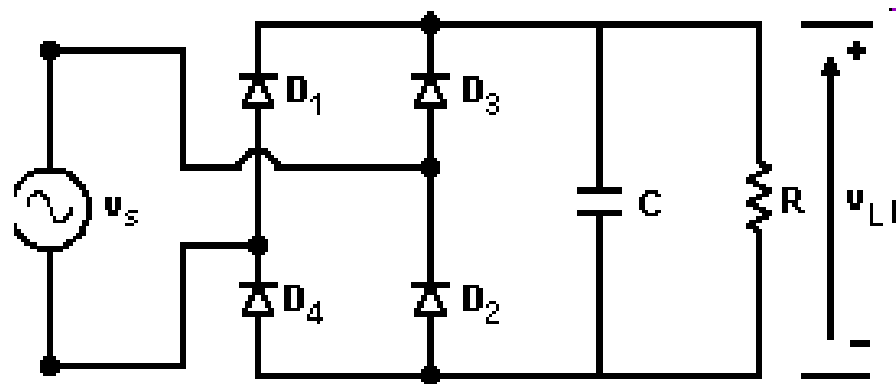
1.Introducción a la electrónica de potencia

1. Rectificadores con diodos – Ejemplo N°1:

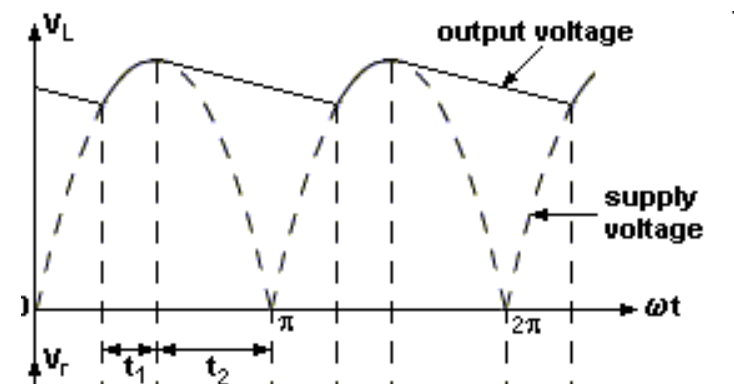
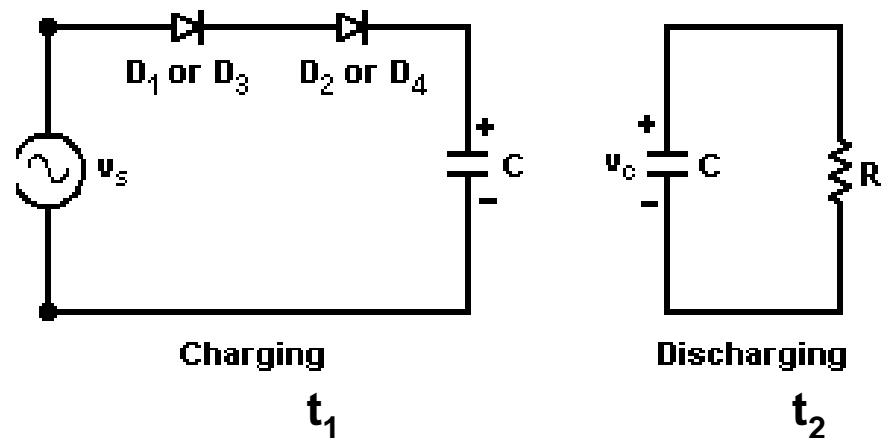


1.Introducción a la electrónica de potencia

1. Rectificadores con diodos – Ejemplo N°2:

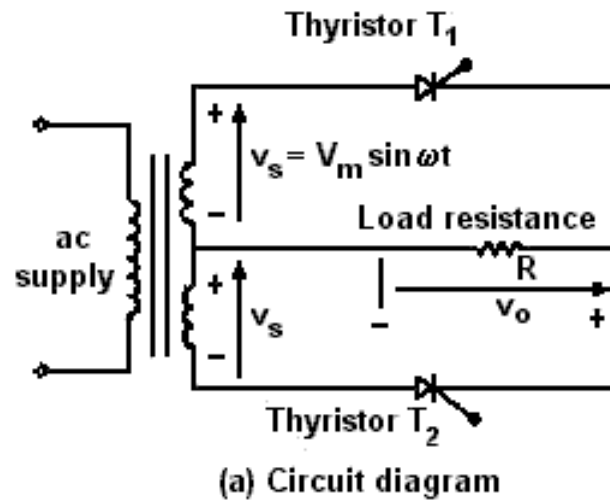


Funcionamiento:

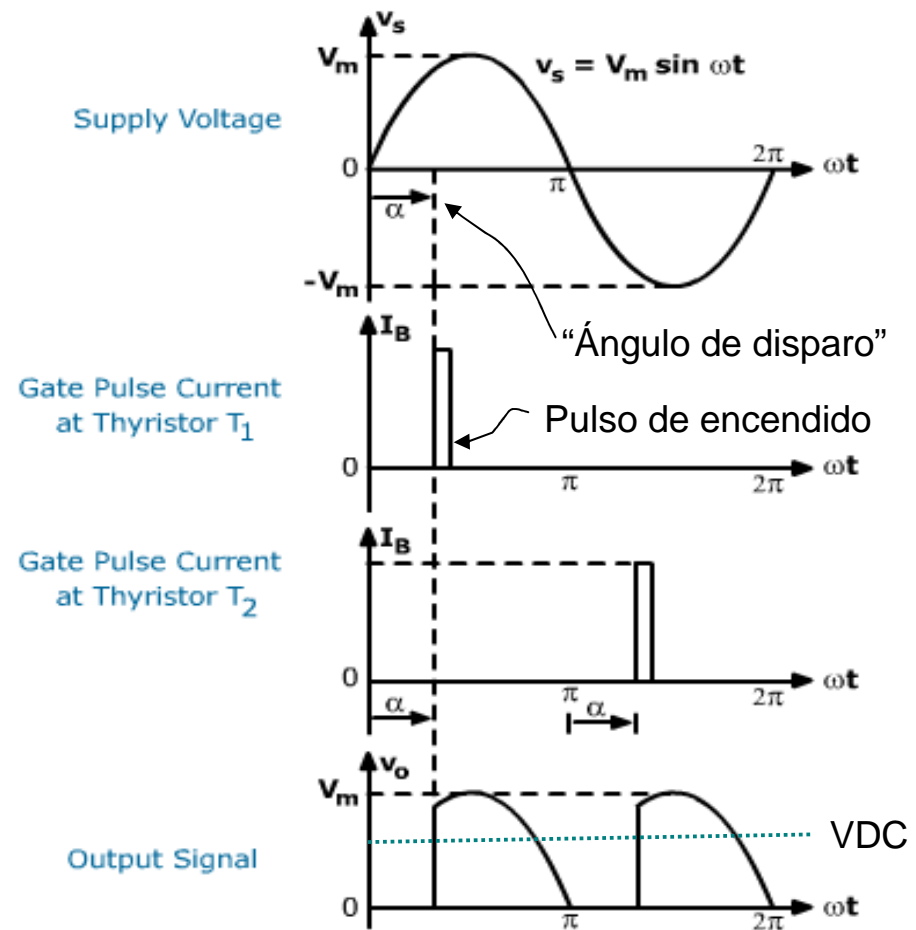


1.Introducción a la electrónica de potencia

2. Conversores AC-DC - Ejemplo:



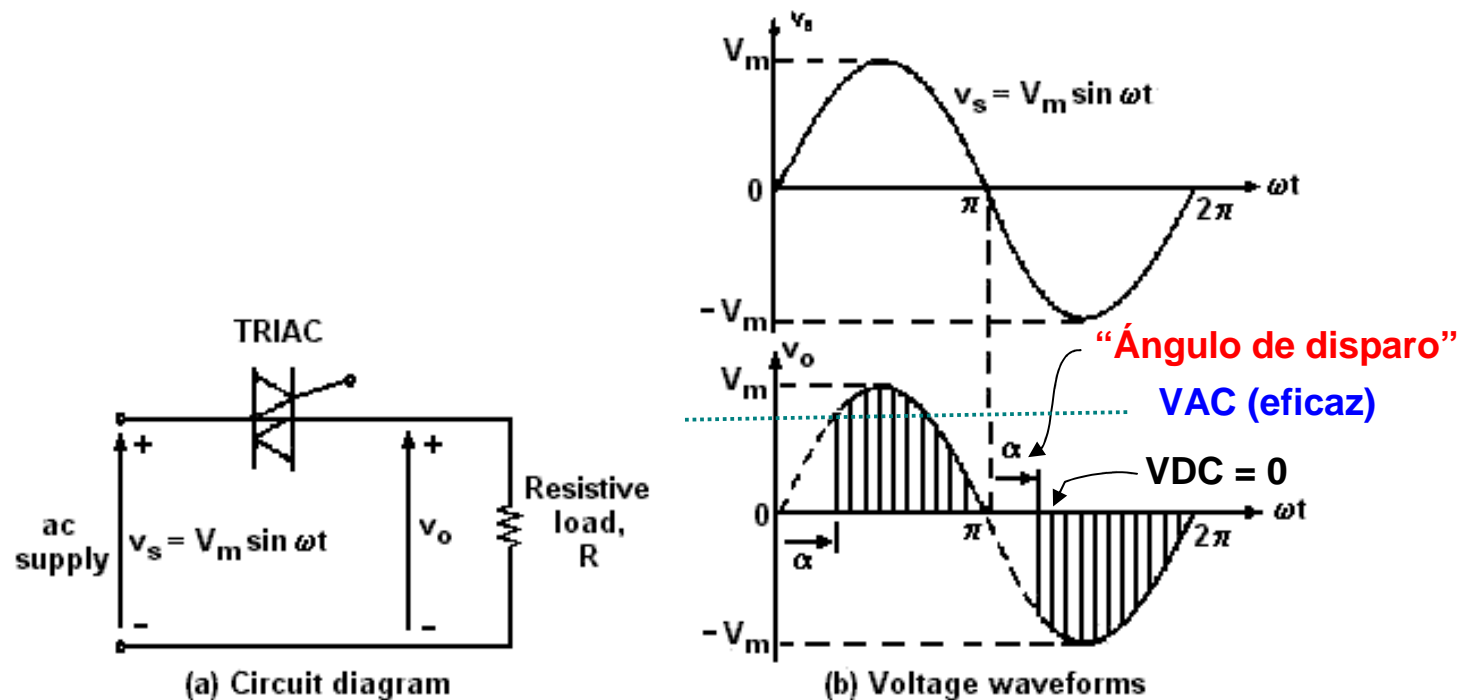
Cambiando el ángulo de disparo se modifica VDC



(b) Voltage waveforms

1.Introducción a la electrónica de potencia

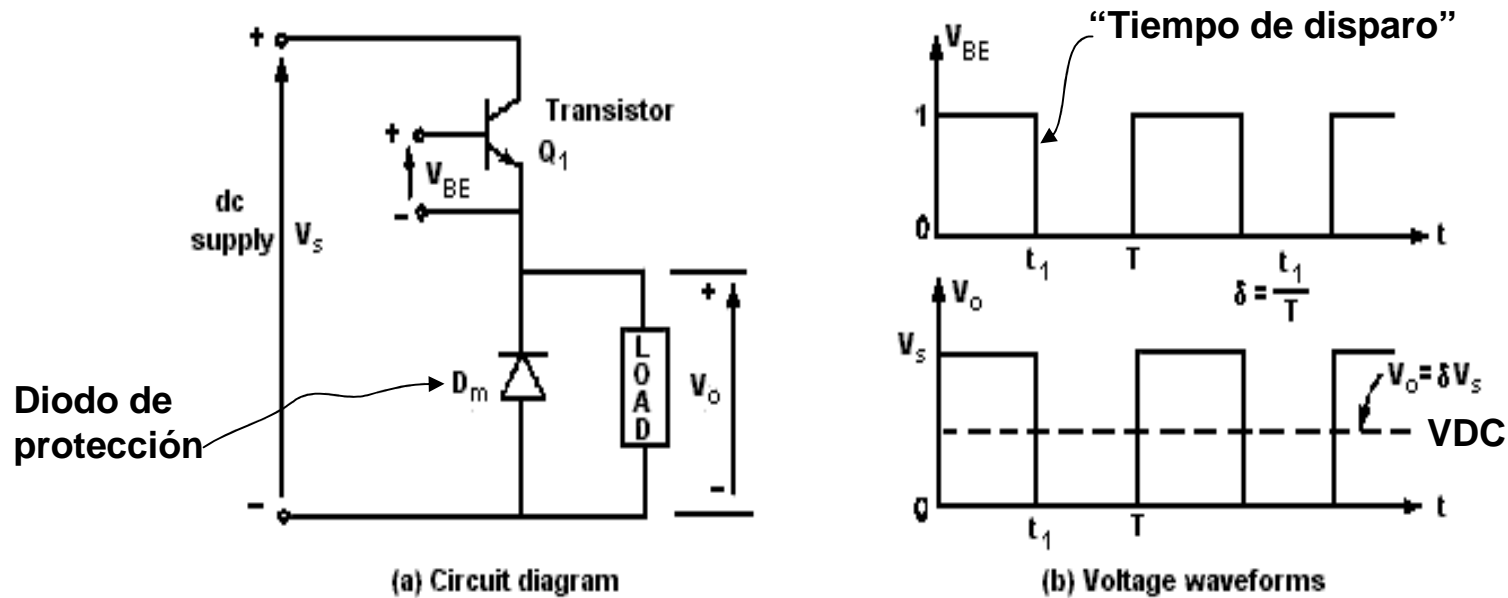
3. Conversores AC-AC - Ejemplo:



Cambiando el
ángulo de
disparo se
modifica VAC

1.Introducción a la electrónica de potencia

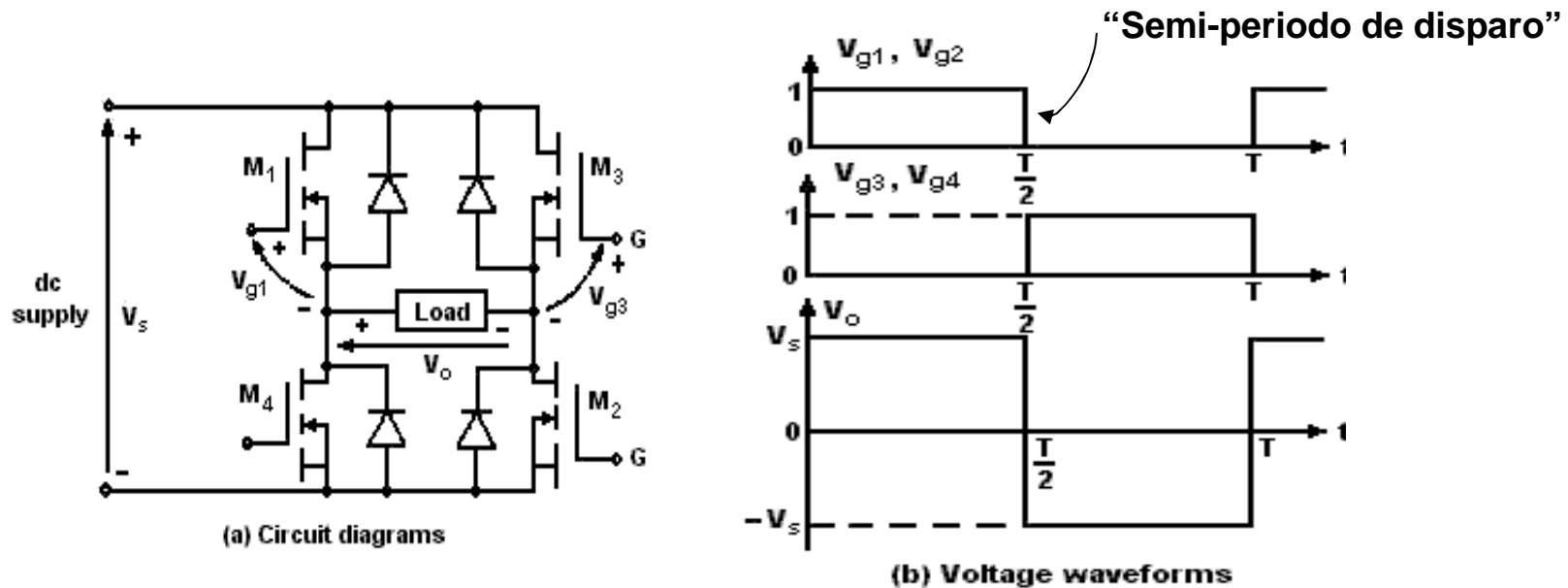
4. Conversores DC-DC - Ejemplo:



Cambiando el
duty cycle (t_1)
se modifica
VDC

1.Introducción a la electrónica de potencia

5. Conversores DC-AC - Ejemplo:



Cambiando el
disparo se
modifica VAC

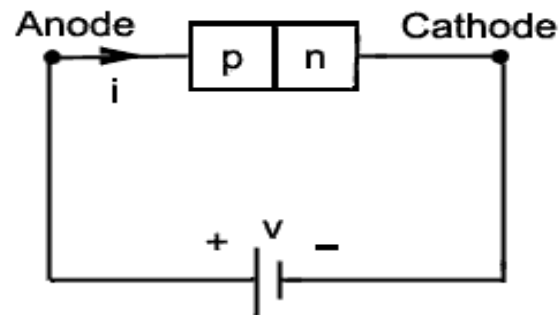
1.Introducción a la electrónica de potencia

Efectos indeseados:

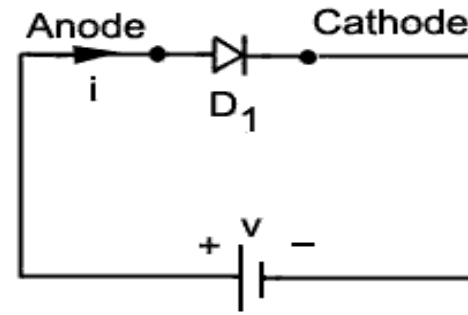
- **Éstos circuitos operan encendiendo y apagándose constantemente, lo que introduce ruido en:**
 - **La tensión de salida**
 - **La fuente de alimentación**
- **Esto genera problemas:**
 - **Inyecta ruido en la carga**
 - **Inyecta ruido en la fuente de alimentación**
 - **Produce interferencia en circuitos cercanos**
- **Para reducir estos problemas se puede:**
 - **Usar filtros de entrada y de salida**
 - **Elegir el circuito más conveniente**
 - **Usar blindaje electromagnético**

2.Diodos de potencia

Esquema del diodo:

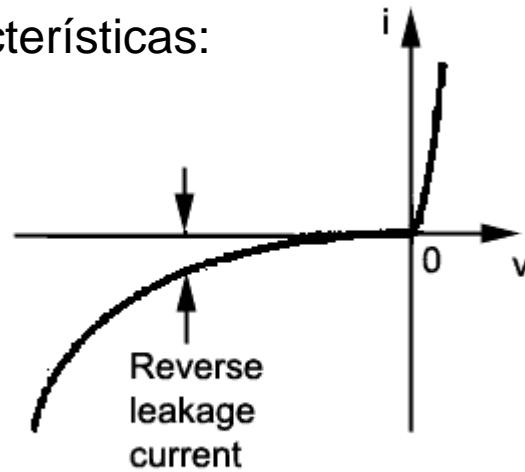


(a) pn-junction

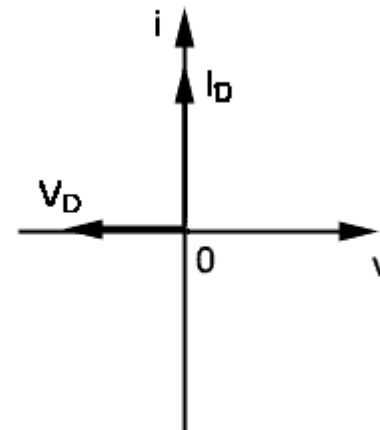


(b) Diode symbol

Curvas características:



(a) Practical



(b) Ideal

2.Diodos de potencia

Ecuación del diodo: $I_D = I_S \left(e^{V_D/nV_T} - 1 \right)$

Donde:

- I_D = corriente que circula por el diodo [A]
- V_D = tensión Va-Vd [V]
- I_S = corriente de saturación inversa (10^{-6} a 10^{-15} A)
- n = coeficiente de emisión (1 a 2)
- V_T = voltaje térmico:

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

q = carga del electrón ($1.6022 \cdot 10^{-19}$ C)

T = temperatura [K]

k = constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-3}$ J/K)

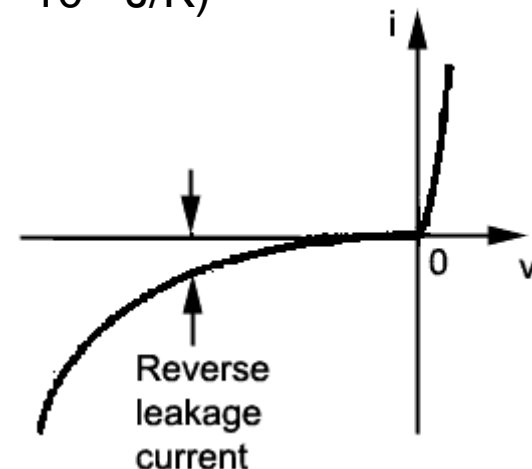
En directa ($V_D \gg V_T$):

$$I_D \approx I_S \left(e^{V_D/nV_T} \right)$$

En inversa ($V_D < 0$):

$$I_D = I_S \left(e^{V_D/nV_T} - 1 \right) \approx -I_S$$

En ruptura ($V_D < V_{BR}$)



2.Diodos de potencia

Diodos de propósito general:

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

Diodos Fast-recovery:

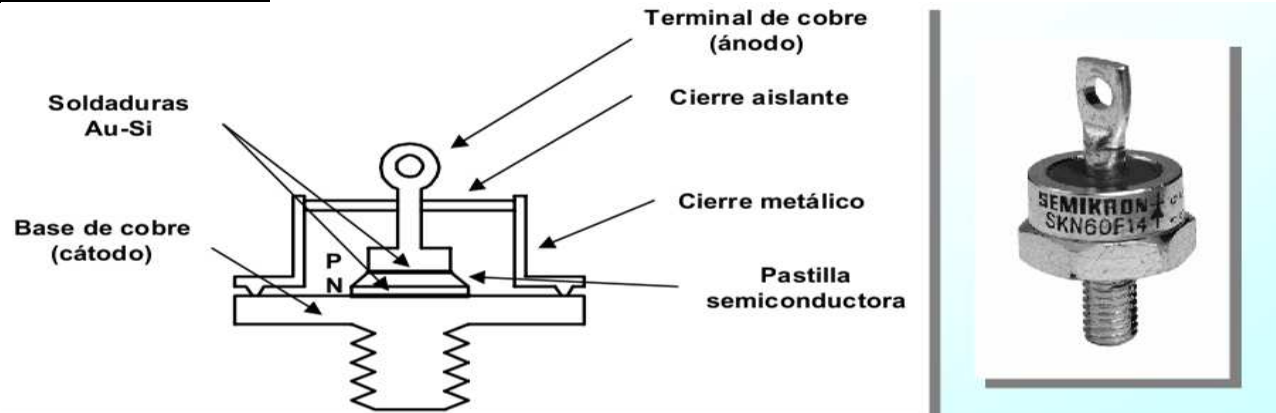
- Tiempo de recuperación ~ 0.1 a $10 \mu\text{s}$
- $30\text{A}-200\text{A} / 400\text{V}-1500\text{V} / V_F = 1.2\text{V}$
- Usados como conversores DC-DC o DC-AC (inversores, UPS)

Diodos Schottky (metal-semiconductor):

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

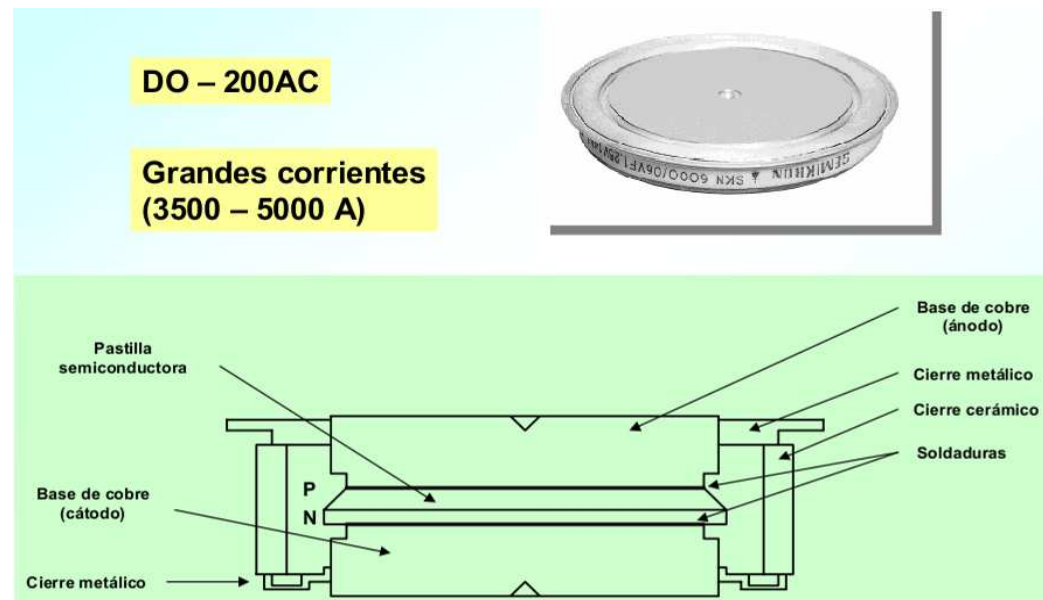
2. Diodos de potencia

Encapsulado DO-5:

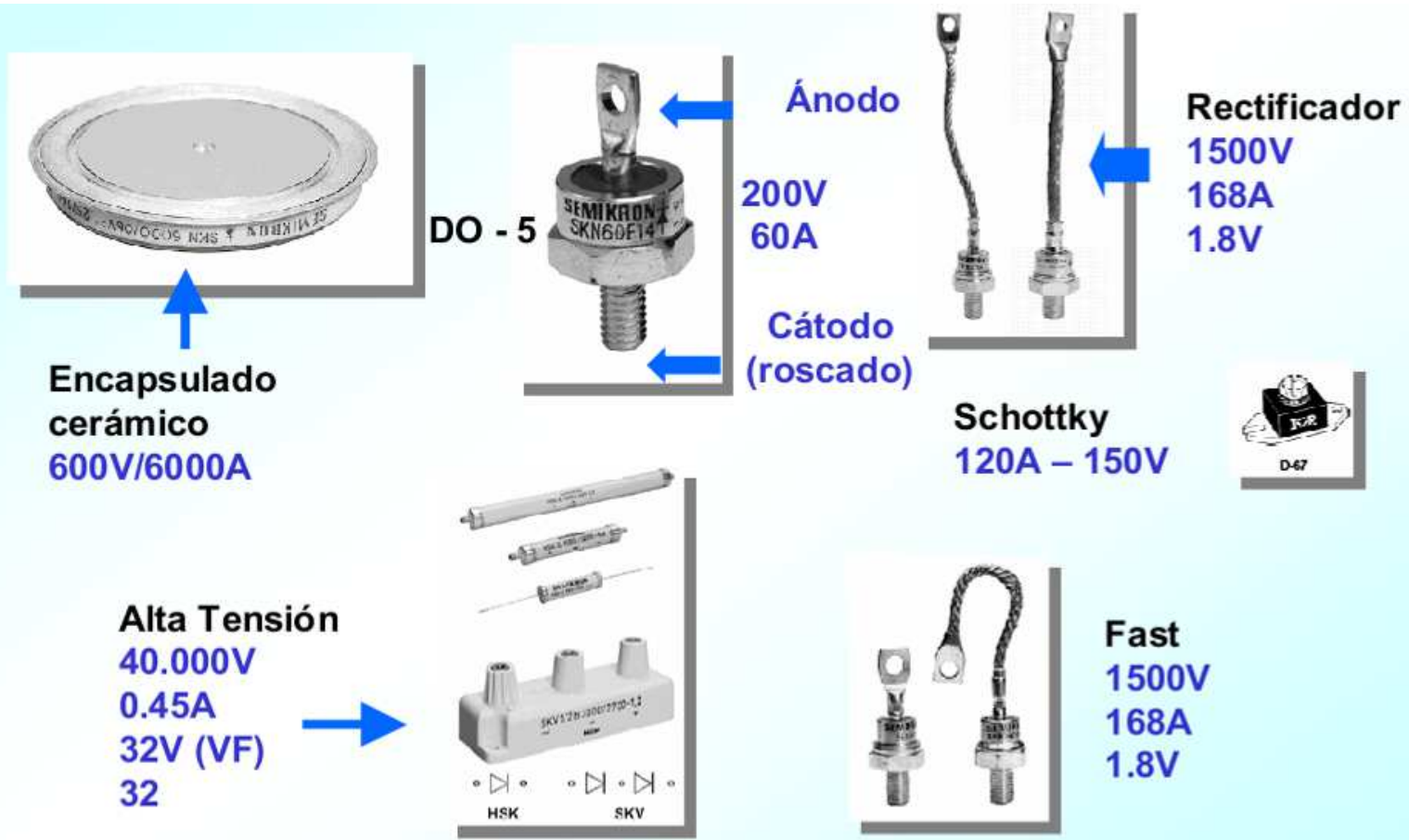


Función del encapsulado:

- Conexión eléctrica
- Disipación térmica
- Aislamiento eléctrico



2. Diodos de potencia

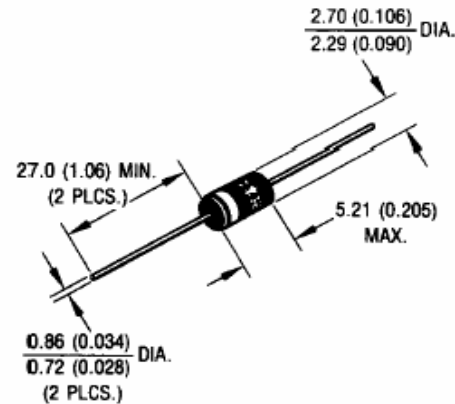


2.Diodos de potencia

Ejemplo de hoja de datos (1/3):

International
IOR Rectifier

SCHOTTKY RECTIFIER



11DQ09
11DQ10

1.1 Amp

Major Ratings and Characteristics

Characteristics	11DQ..	Units
$I_{F(AV)}$ Rectangular waveform	1.1	A
V_{RRM}	90 / 100	V
I_{FSM} @ $t_p = 5 \mu s$ sine	85	A
V_F @ 1 Apk, $T_J = 25^\circ C$	0.85	V
T_J range	-40 to 150	$^\circ C$

Description/Features

The 11DQ.. axial leaded Schottky rectifier has been optimized for very low forward voltage drop, with moderate leakage. Typical applications are in switching power supplies, converters, free-wheeling diodes, and reverse battery protection.

- Low profile, axial leaded outline
- High purity, high temperature epoxy encapsulation for enhanced mechanical strength and moisture resistance
- Very low forward voltage drop
- High frequency operation
- Guard ring for enhanced ruggedness and long term reliability

2.Diodos de potencia

Ejemplo de hoja de datos (continuación 2/3):

Voltage Ratings

Part number	11DQ09	11DQ10
V_R Max. DC Reverse Voltage (V)	90	100
V_{RWM} Max. Working Peak Reverse Voltage (V)		

Absolute Maximum Ratings

Parameters	11DQ..	Units	Conditions	
$I_{F(AV)}$ Max. Average Forward Current * See Fig. 4	1.1	A	50% duty cycle @ $T_C = 75^{\circ}\text{C}$, rectangular wave form	
I_{FSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current * See Fig. 6	85	A	5 μs Sine or 3 μs Rect. pulse	Following any rated load condition and with rated V_{RRM} applied
	14		10ms Sine or 6ms Rect. pulse	
E_{AS} Non-Repetitive Avalanche Energy	3.0	mJ	$T_J = 25^{\circ}\text{C}$, $I_{AS} = 0.5$ Amps, $L = 10$ mH	
I_{AR} Repetitive Avalanche Current	0.2	A	Current decaying linearly to zero in 1 μsec Frequency limited by T_J max. $V_A = 1.5 \times V_R$ typical	

2.Diodos de potencia

Ejemplo de hoja de datos (continuación 3/3):

Al aumentar la corriente I_D aumenta la potencia disipada y el diodo comienza a recalentarse:

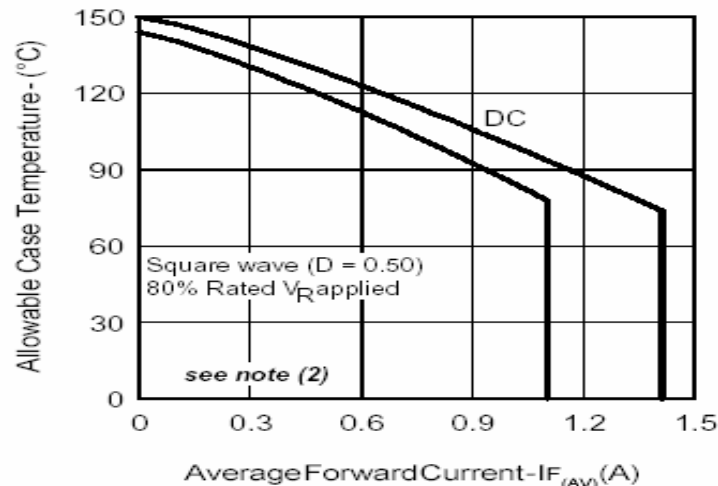


Fig. 4 - Max. Allowable Case Temperature Vs. Average Forward Current

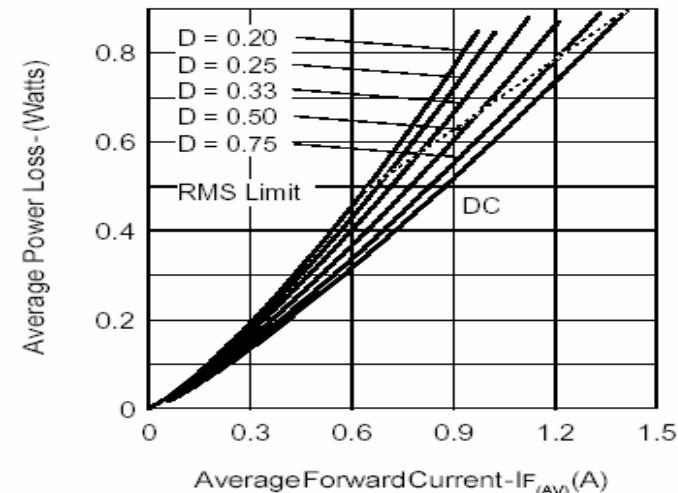


Fig. 5 - Forward Power Loss Characteristics

- Para el silicio debe garantizarse: $T_j < T_{jmax}$ (por ej. 125°C o 150°C)

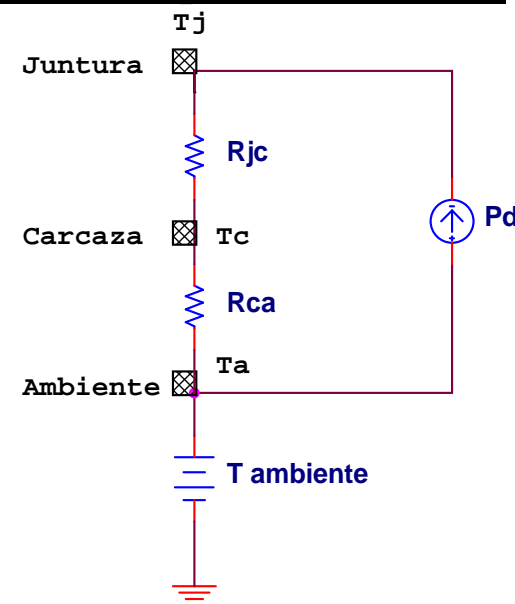
3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Cálculo de disipadores

Analogía térmico - eléctrica:

$$\text{Pot. Rt} = T_{\text{amb}} \rightarrow I.R = V$$

Modelo
térmico
equivalente
del diodo:



Regimenes máximos

- Para el silicio debe garantizarse: $T_j < T_{j\text{max}}$

Las características térmicas del diodo se definen según:

<u>Forma típica ($T_{j\text{max}}=125^{\circ}\text{C}$):</u> $P_{dja} @ T_a=25^{\circ}\text{C} = 25\text{W}$ $R_{jc} = 1,4^{\circ}\text{C/W}$	<u>Alternativa ($T_{j\text{max}}=125^{\circ}\text{C}$):</u> $P_{dja} @ T_a=25^{\circ}\text{C} = 25\text{W}$ $P_{dj c} @ T_c=25^{\circ}\text{C} = 70\text{W}$
<u>Frecuentemente ($T_{j\text{max}}=125^{\circ}\text{C}$) :</u> $P_{dj c} @ T_c=25^{\circ}\text{C} = 70\text{W}$ $\text{derate} = 0,25 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$	<u>Ocasionalmente ($T_{j\text{max}}=125^{\circ}\text{C}$) :</u> $R_{jc} = 1,4^{\circ}\text{C/W}$ $R_{ca} = 2,6^{\circ}\text{C/W}$

Estos cuatro casos son exactamente equivalentes (demostrarlo).

3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Cálculo de disipadores

Problema: Dado un diodo con máximos: $P_{dja} @ T_{amb} = 25\text{ °C} : 25\text{ W}$

$P_{dj c} @ T_{case} = 25\text{ °C} : 70\text{ W}$

y sabiendo que $P_d = 4\text{ W}$ y $T_a = 50\text{ °C}$, determine si debe usarse disipador.

Solución: A partir del modelo térmico:


$$P_{dja} \cdot (R_{jc} + R_{ca}) + T_a = T_{jmax}$$

$$P_{dj c} \cdot R_{jc} + T_{case} = T_{jmax}$$

Del enunciado:

$$R_{jc} = \frac{T_{jmax} - T_c}{P_{dj c}} = \frac{125\text{ °C} - 25\text{ °C}}{70\text{ W}} = 1,4\text{ °C/W}$$

$$R_{ca} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{dja}} - R_{jc} = \frac{125\text{ °C} - 25\text{ °C}}{25\text{ W}} - 1,4\text{ °C/W} = 2,6\text{ °C/W}$$

Entonces: $T_j = 50\text{ °C} + 4\text{ W} (1,4 + 2,6\text{ °C/W}) = 66\text{ °C} < 125\text{ °C}$  Si no se cumple hay que usar disipador

El disipador quedaría en paralelo con R_{ca} : $R_{ca} // R_d \sim R_d$, $R_d = \frac{T_j - T_a}{P_d} - R_{jc}$

3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Ejercicio

Un transistor 2N3055 se utiliza en una etapa de salida de potencia en un circuito de audio y disipa una potencia media de 30W. El circuito se encuentra en montado en el interior de un gabinete dónde el aire puede alcanzar una temperatura máxima de 50 °C. El fabricante indica las especificaciones de la figura.

- Indicar si es necesario o no colocar un disipador al transistor. Si el disipador es necesario calcular su resistencia térmica.
- Si por fallas en la ventilación la temperatura dentro del gabinete aumenta a 75°C, ¿Qué le ocurre al transistor?

MAXIMUM RATINGS

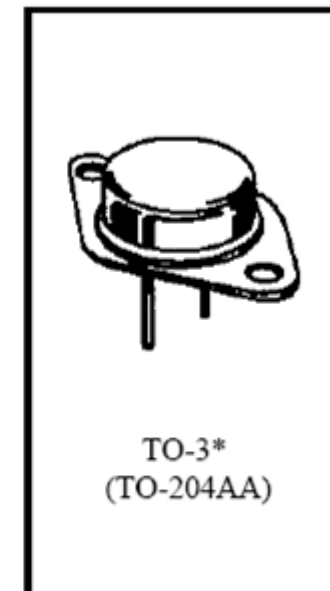
Ratings	Symbol	Value	Units
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	70	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	7.0	Vdc
Base Current	I_B	7.0	Adc
Collector Current	I_C	15	Adc
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ ⁽¹⁾	P_T	6.0	W
@ $T_C = 25^\circ\text{C}$ ⁽²⁾		117	W
Operating & Storage Temperature Range	T_{op}, T_{stg}	-65 to +200	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	Max.	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	1.5	°C/W

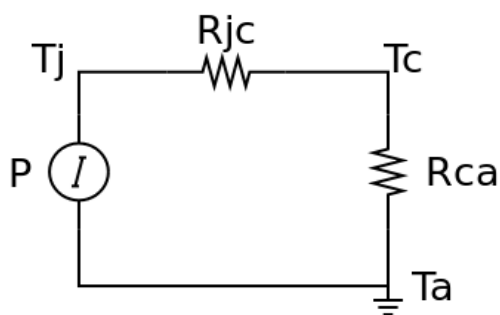
1) Derate linearly @ 34.2 mW/°C for $T_A > +25^\circ\text{C}$

2) Derate linearly @ 668 mW/°C for $T_C > +25^\circ\text{C}$



3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Ejercicio - Resolución



$$R_{ja} = R_{jc} + R_{ca}$$

T_j	Temperatura de Juntura [°C]
T_c	Temperatura de carcasa [°C]
T_a	Temperatura ambiente [°C]
R_{jc}	Resistencia térmica juntura-carcasa [°C/W]
R_{ca}	Resistencia térmica carcasa-ambiente [°C/W]
	Resistencia térmica juntura-ambiente [°C/W]

Datos del fabricante extraídos de los regímenes máximos absolutos:

Temperatura de juntura máxima: $T_j^{m\acute{a}x} = 200^{\circ}C$

Disipación de potencia máxima: $P_{m\acute{a}x} = 6\text{ W} @ T_a = 25^{\circ}C$

$P_{m\acute{a}x} = 117\text{ W} @ T_c = 25^{\circ}C$

Por lo tanto:

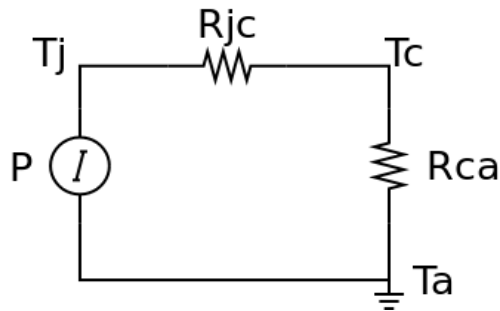
$$R_{jc} = \frac{T_j^{m\acute{a}x} - T_c}{P_{m\acute{a}x}^{@T_c}} = \frac{200 - 25}{117} \frac{^{\circ}C}{W} = 1.50 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{ja} = \frac{T_j^{m\acute{a}x} - T_a}{P_{m\acute{a}x}^{@T_a}} = \frac{200 - 25}{6} \frac{^{\circ}C}{W} = 29.17 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{ca} = R_{ja} - R_{jc} = (29.17 - 1.50) \frac{^{\circ}C}{W} = 27.67 \frac{^{\circ}C}{W}$$

3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

¿Puede el dispositivo, sin disipador externo, disipar 30W a $T_a = 50^\circ\text{C}$?



Verificación: Si $P = 30\text{ W}$, $T_a = 50^\circ\text{C}$ y $R_{ja} = 29.17 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$

Entonces:

$$\Rightarrow T_j = R_{ja}P + T_a = 29.17 \times 30^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C} = 925^\circ\text{C}$$

Resulta $T_j^{m\acute{a}x} \gg 200^\circ\text{C}$ ¿Qué hacemos?

3.Modelo térmico y cálculo de 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



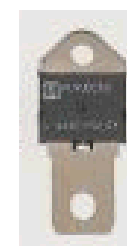
TO-5



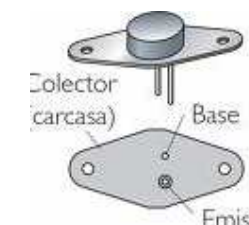
TO-220



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

3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Incidencia de la posición

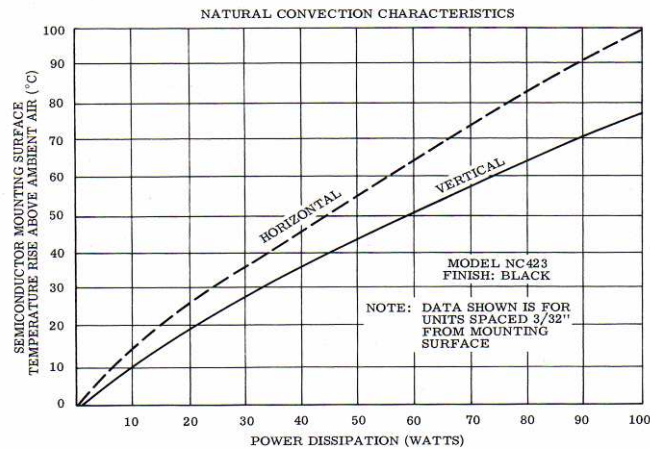
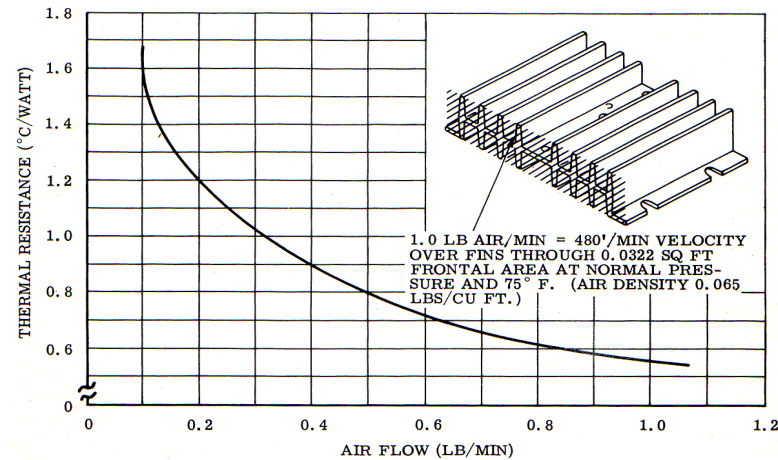


Figure 12-8. Wakefield Engineering — Delta T Model 423 Thermal Characteristics.

Ventilación forzada



Diferentes tipos de aislantes

Tabla IV — Comparación de las arandelas aislantes usadas para aislar eléctricamente la cápsula TO-3

Material	Espesor (mm)	θ_{C-S} (°C/W)	Capacitancia (pF)
Mica	0,05	0,4	90
Aluminio Anodizado	0,4	0,35	110
Oxido de berilio	1,59	0,25	15

Mantenimiento de disipadores

- Limpieza
- Pulido
- Lubricado
- Ajuste

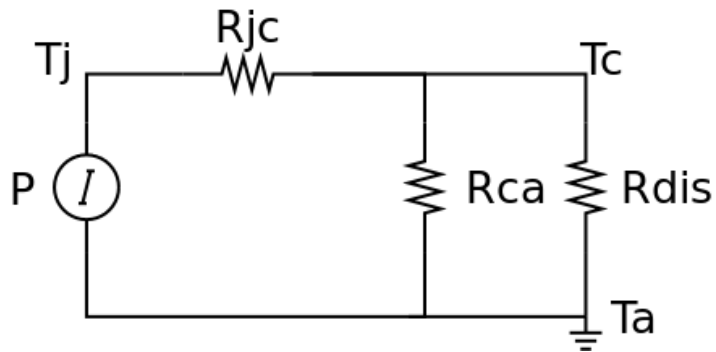
3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Ejercicio (resolución - continuación)

Un transistor 2N3055 se utiliza en una etapa de salida de potencia en un circuito de audio y disipa una potencia media de 30W. El circuito se encuentra en montado en el interior de un gabinete dónde el aire puede alcanzar una temperatura máxima de 50 °C. El fabricante indica las especificaciones de la figura.

- Indicar si es necesario o no colocar un disipador al transistor. **Si el disipador es necesario calcular su resistencia térmica.**
- Si por fallas en la ventilación la temperatura dentro del gabinete aumenta a 75°C, ¿Qué le ocurre al transistor?

Dispositivo con disipador externo:



$$\begin{aligned} P &= 30 \text{ W} \\ T_a &= 50^\circ \text{C} \\ R_{jc} &= 1.50 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}} \\ R_{ja} &= 27.67 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}} \end{aligned}$$

Si tomamos: $T_j = 200^\circ \text{C}$

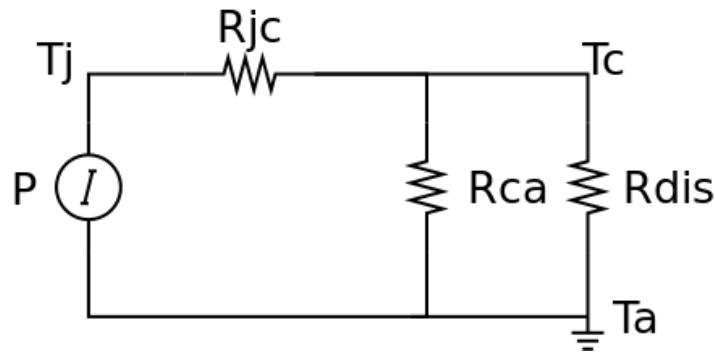
$$T_c^{\text{máx}} = T_j^{\text{máx}} - P \times R_{jc}$$

$$\begin{aligned} T_c^{\text{máx}} &= 200^\circ \text{C} - 30 \times 1.5^\circ \text{C} \\ &= 155^\circ \text{C} \quad \text{¡Quema!} \end{aligned}$$

¿Y cuanto debe valer R_{dis} ?

3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Dispositivo con disipador externo:



$$P = 30 \text{ W}$$

$$T_a = 50^\circ \text{C}$$

$$T_c = 155^\circ \text{C}$$

$$R_{jc} = 1.50 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{ja} = 27.67 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}}$$

Despejando: $T_c - T_a = P(R_{ca} \parallel R_{dis})$

$$R_{ca} \parallel R_{dis} = \frac{T_c - T_a}{P} = \frac{155 - 50}{30} \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}} = 3.5 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}}$$

$$\frac{1}{R_{dis}} = \frac{1}{3.5 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}}} - \frac{1}{R_{ca}} \Rightarrow R_{dis} = 4 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}}$$

$$\text{Verificando: } T_j = T_a + P \times (R_{ca} \parallel R_{dis} + R_{jc}) = 50^\circ \text{C} + 30 \text{ W} (4 \parallel 27.67 + 1.5) \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}} = 199.8^\circ \text{C}$$

$$\text{¿Qué ocurre si } T_a = 75^\circ \text{C? } T_j = T_a + P \times R_{total} = 75^\circ \text{C} + 30 \text{ W } 5 \frac{^\circ \text{C}}{\text{W}} = 225^\circ \text{C} > 200^\circ \text{C!!}$$

3. Modelo térmico y cálculo de disipadores

Dispositivo con disipador externo:

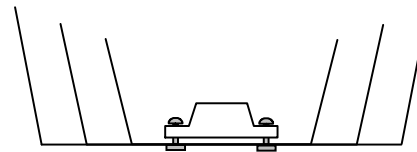
Conviene tener un factor de seguridad en la elección del disipador.

En general se elige un disipador con R 30% menor a la calculada.

Si el cálculo da un disipador de $R = 4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, conviene colocar un disipador de $R = 0.7 \times 4 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 2.8 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

A simple modo de referencia, si queremos utilizar un disipador de aluminio se necesita una superficie de aletas aproximadamente de 156 cm^2 de acuerdo a la siguiente fórmula empírica:

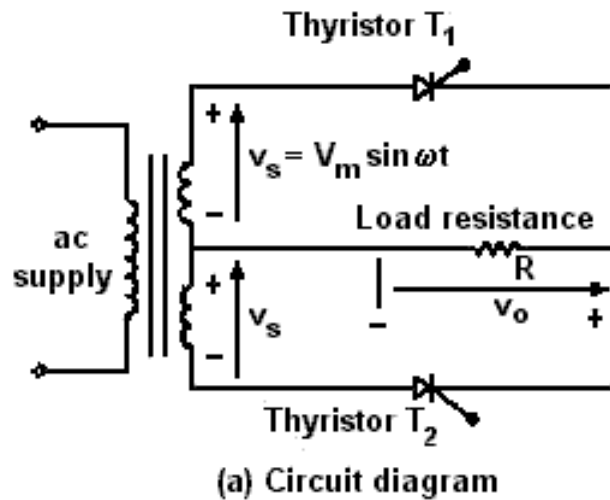
$$R_{dis} = \frac{50}{\sqrt{A}} \frac{\text{cm}^\circ \text{C}}{\text{W}} \Rightarrow A = \left(\frac{50}{4} \text{ cm} \right)^2 \approx 156 \text{ cm}^2$$



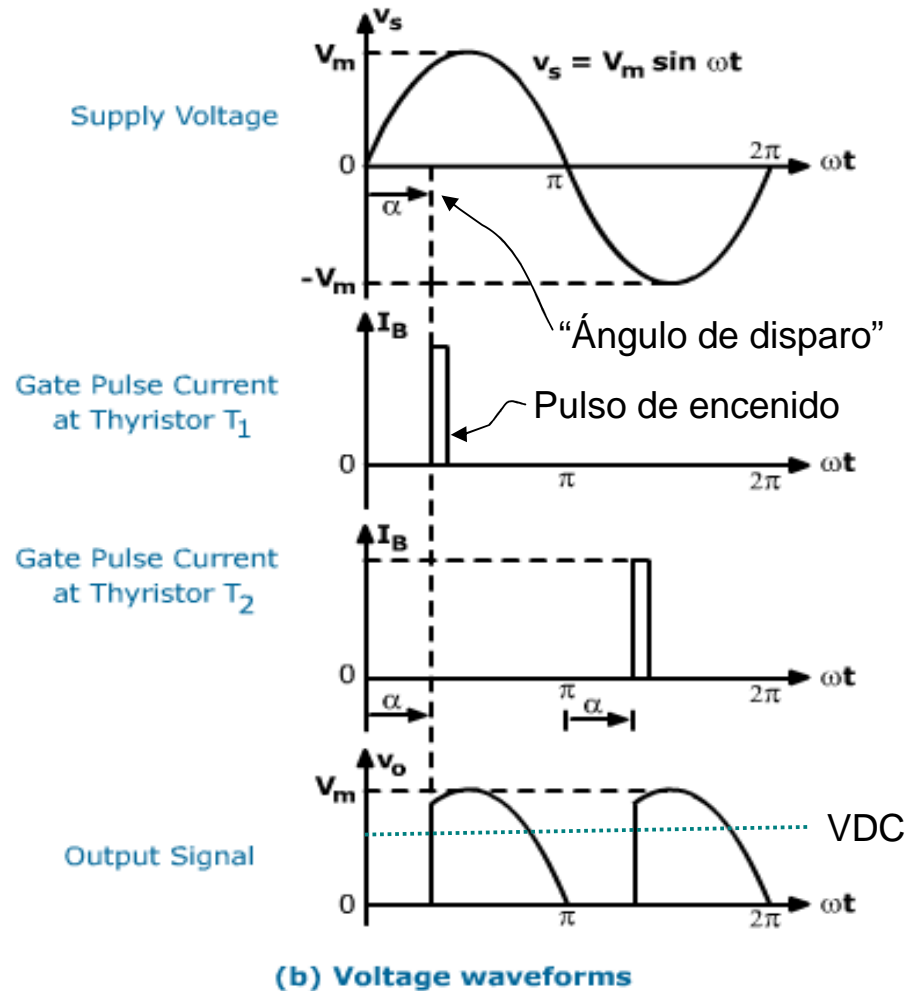
Para obtener $2.8 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ el disipador tendría una superficie de aletas DOS veces mayor (318 cm^2).

4. Tiristores

¿Para qué sirve un tiristor?



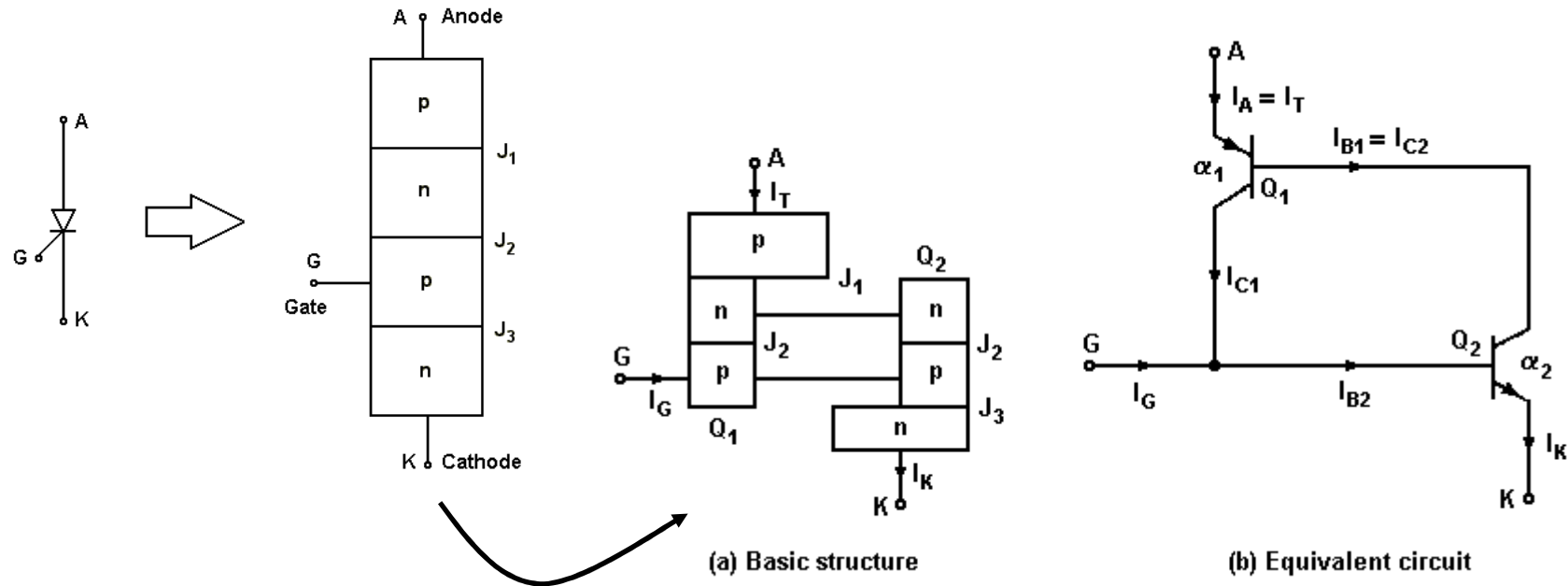
Cambiando el ángulo de disparo se modifica VDC



El tiristor es un dispositivo "unipolar" con un terminal de disparo pero sin corte.

4. Tiristores

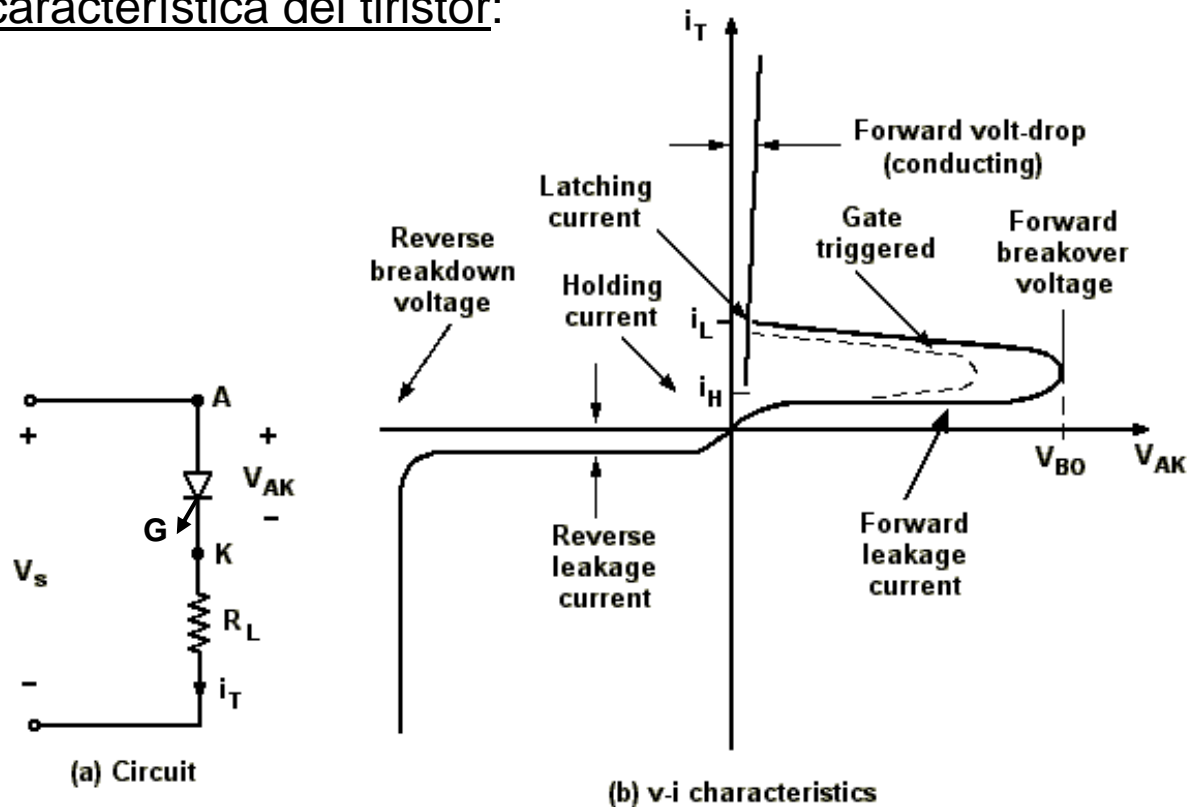
- El tiristor es uno de los principales dispositivos de potencia.
- Es un sandwich PNPN que puede modelarse como dos transistores:



- Si $I_G = 0$, entonces es un circuito abierto.
- Si $I_G = 0$ y $V_{GK} > V_{BO}$, el tiristor se dispara, se produce una realimentación positiva (~reacción en cadena) y se transforma en un cable (es peligroso).
- Si $I_G > 0$ y $V_{GK} < V_{BO}$, el tiristor se dispara en forma segura.

4.Tiristores

Curva característica del tiristor:



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

i_L (corriente de latch): es la mínima corriente de encendido del tiristor.

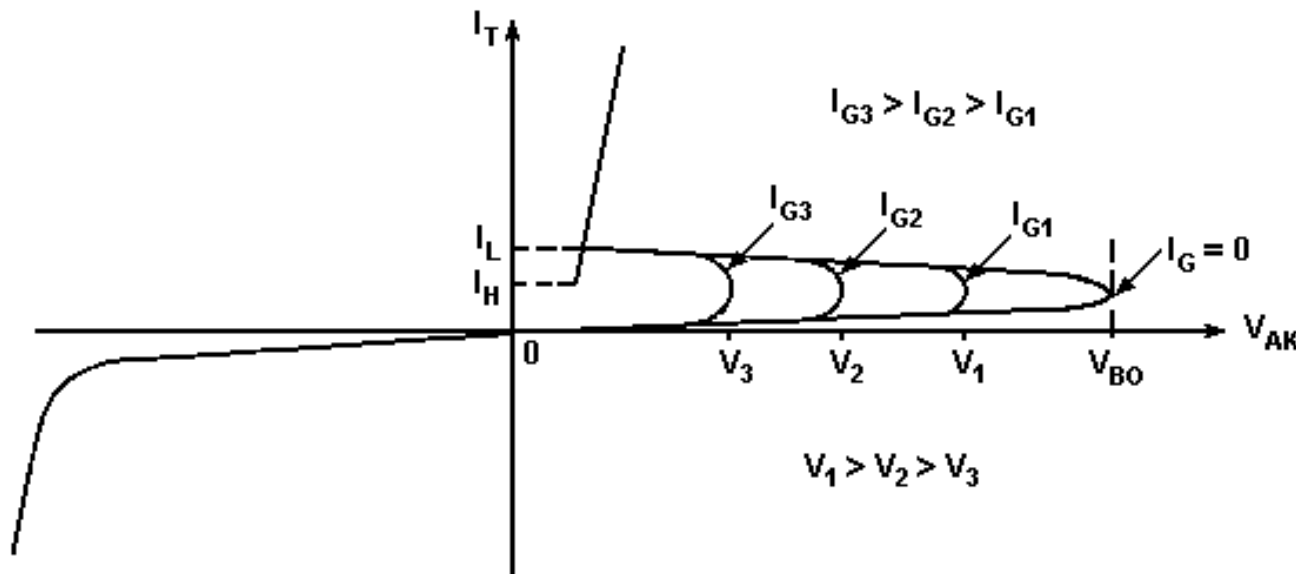
i_H (corriente de retención): mínima corriente que lo mantiene encendido.

i_R (corriente reversa): corriente que circula para $V_K > V_A$.

4. Tiristores

Modos de encendido del tiristor

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



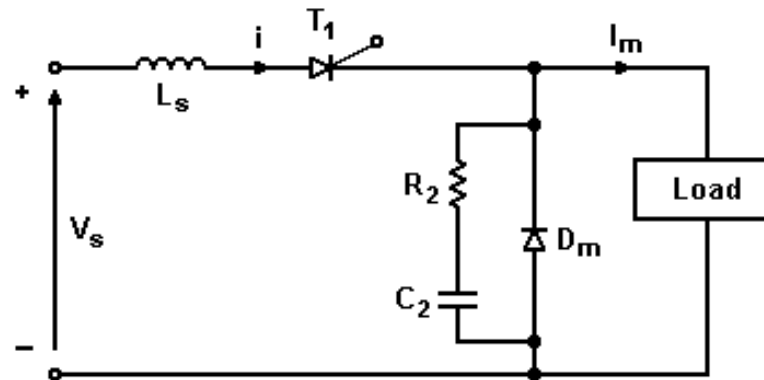
- Luego del encendido I_G debe ser cero para evitar perdidas en la juntura.
- No debe aplicarse I_G con el tiristor en inversa, porque podría dispararse.

4. Tiristores

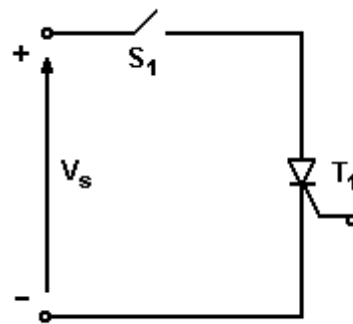
Circuitos de protección

di/dt: si I_T crece muy rápido no se distribuye uniformemente y se crean hot-spots

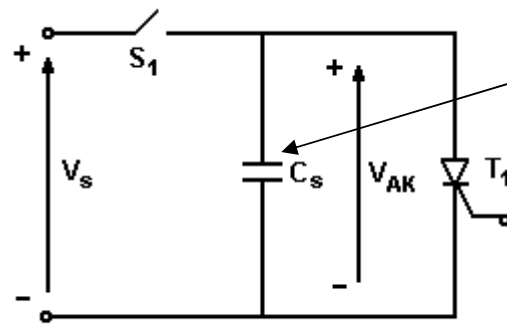
- El inductor L_s ayuda a proteger al sistema



dV/dt: si V_{AK} crece muy rápido se genera un peligroso sobrepico en I_T



(a)



(b)

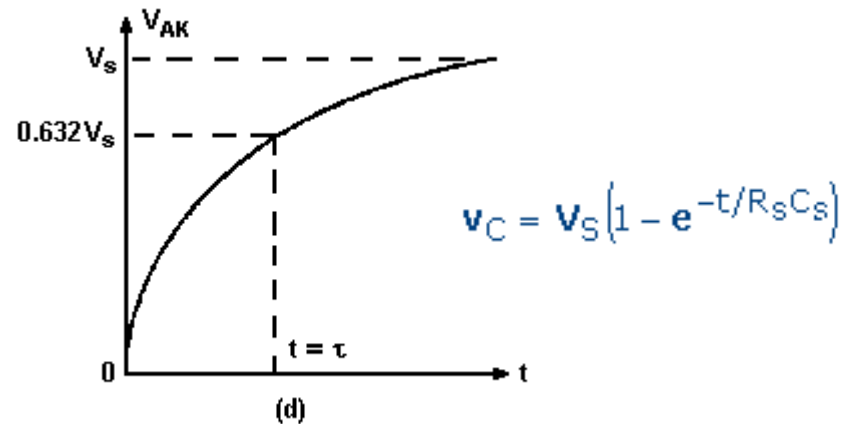
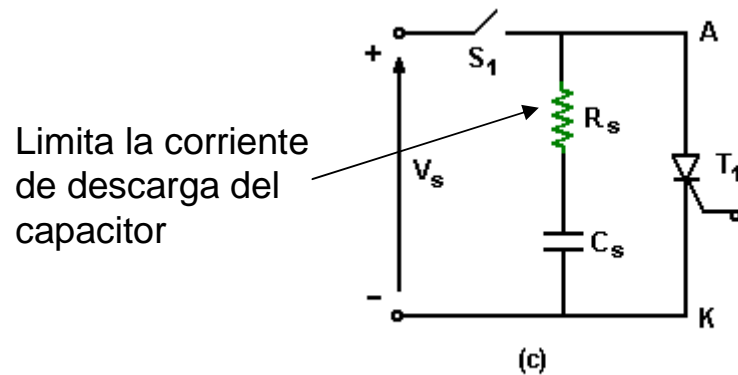
Al cargarse el capacitor
limita dV/dt

pero al descargarse
nada limita la corriente

4. Tiristores

Circuitos de protección

dV/dt: si V_{AK} crece muy rápido se genera un peligroso sobrepico en I_T



Este circuito es muy habitual y se conoce como “Snubber Circuit”

4.Tiristores

Clasificación de los tiristores:

1. Silicon control rectifier (SCRs)
2. Fast Switching Thyristors (SCRs)
3. Gate Turn-off Thyristors (GTOs)
4. Triode of Alternating Current (TRIACs)
5. Reverse Conducting Thyristors (RCTs)
6. Static Induction Thyristors (SITHs)
7. Light Activated Silicon Controlled Rectifiers (LASCRs)
8. FET Controlled Thyristors (FET-CTHs)
9. MOS Controlled Thyristors (MCTs)

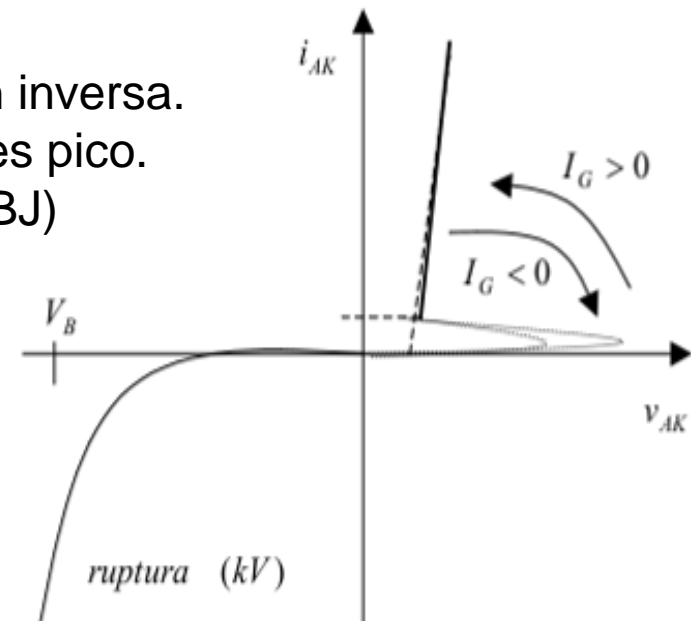
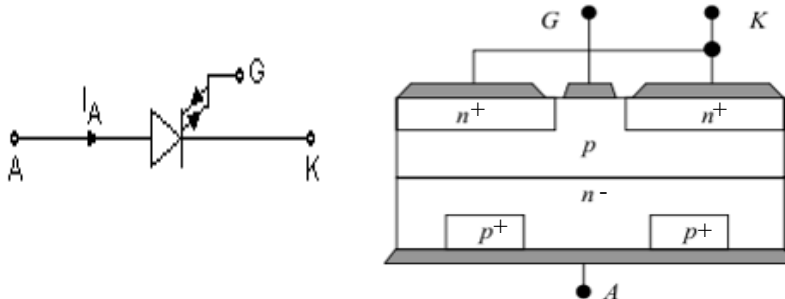
Thyristor (1,2)		
SITH (6)		
GTO (3)		
MCT (9)		
TRIAC (4)		
LASCR (7)		

Type		Voltage/current rating	Upper frequency (Hz)	Switching time (μs)
Forced-turned-off thyristors	Reverse blocking	5000 V/5000 A	1k	200
	High speed	1200 V/1500 A	10k	20
	Reverse blocking	2500 V/400 A	5k	40
	Reverse conducting	2500 V/1000 A	5k	40
	GATT	1200 V/400 A	20k	8
	Light triggered	6000 V/1500 A	400	200-400
TRIACs		1200 V/300 A	400	200-400
Self-turned-off thyristors	GTO	4500 V/3000 A	10k	15
	SITH	4000 V/2200 A	20k	6.5
MCTs	Single	600 V/60 A	20k	2.2

4. Tiristores

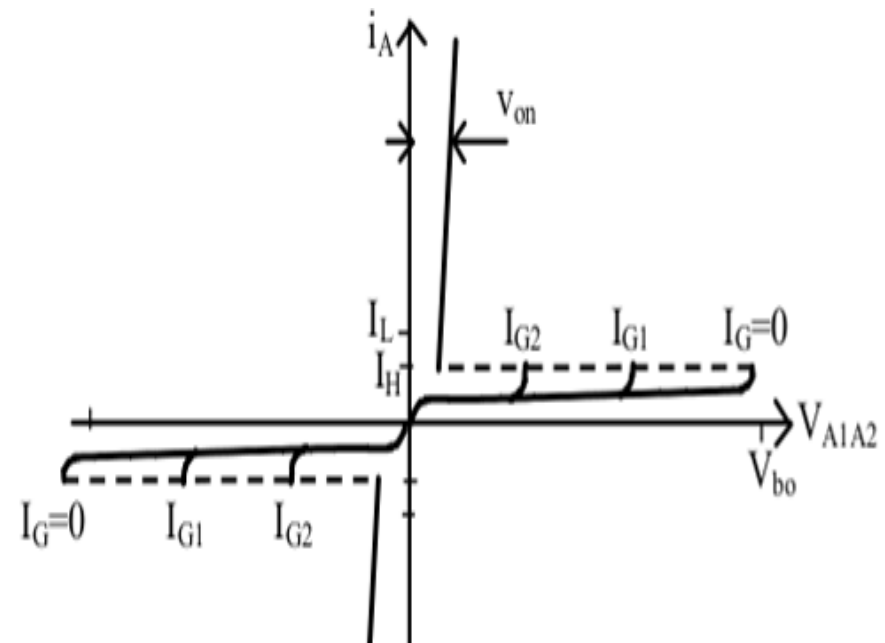
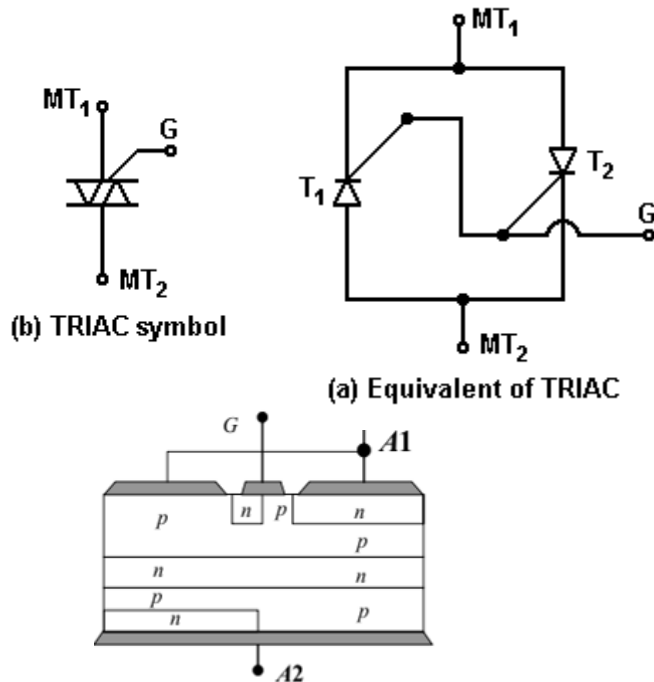
3. Gate Turn-Off thyristors (GTO):

- Puede apagarse mediante una señal negativa en el gate.
- Puede no bloquear la tensión inversa (fugas).
- Tiene varias ventajas sobre un SCR:
 - Requiere menos componentes circuitales.
 - Alta velocidad de apagado.
- Tiene varias ventajas sobre los transistores:
 - Mayor capacidad de bloqueo de tensión inversa.
 - Mejor capacidad de manejo de corrientes pico.
 - Menor corriente de activación (que el TBJ)
 - Una señal de activación mas corta



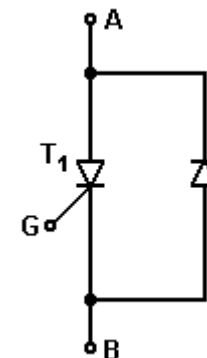
4. Tiristores

4. Triode of Alternating Current (TRIACs):



5. Reverse Conducting Thyristor (RCT)

- Tiene un diodo integrado en inversa
- Se usa en inversers DC-AC y choppers DC-DC.



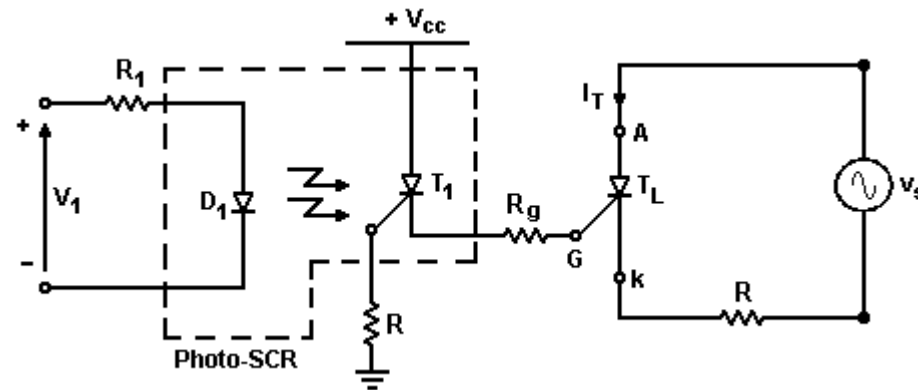
4. Tiristores

6. Static Inductor Thyristor (SITH):

- Se apaga mediante un voltaje negativo en el gate.
- Tiene alta velocidad de conmutación y soporta grandes di/dt y dv/dt .

7. Light Activated Silicon Controlled Thyristor (LASCRs)

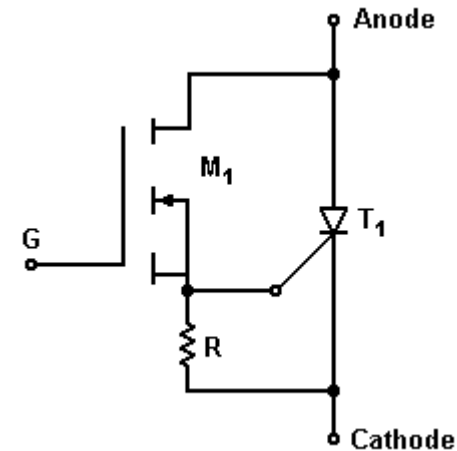
- Se usa en aplicaciones de alto voltaje y corriente (líneas de HVDC)
- Brinda completa aislación entre el gate y la salida.
- El LASCRs no se puede apagar desde el Gate.



4. Tiristores

8. FET Controlled Thyristor (FET-CTHs)

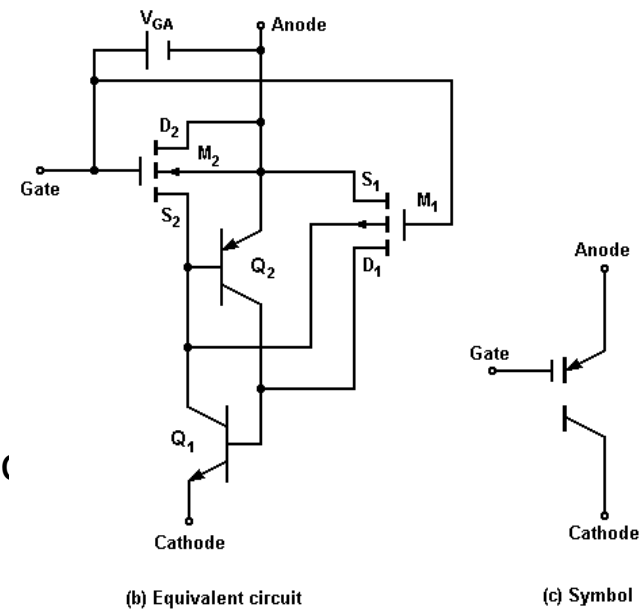
- Consiste de un FET en paralelo con un tiristor.
- No se puede apagar desde el Gate.



9. MOS Controlled Thyristor (MCTs):

Combinan características de SCR y de MOS:

1. Baja caída de tensión ánodo-cátodo.
2. Rápido encendido y apagado.
3. Bajo consumo para switcheo
4. Baja capacidad de bloqueo de V_{AK} inversa
5. Alta impedancia de gate.



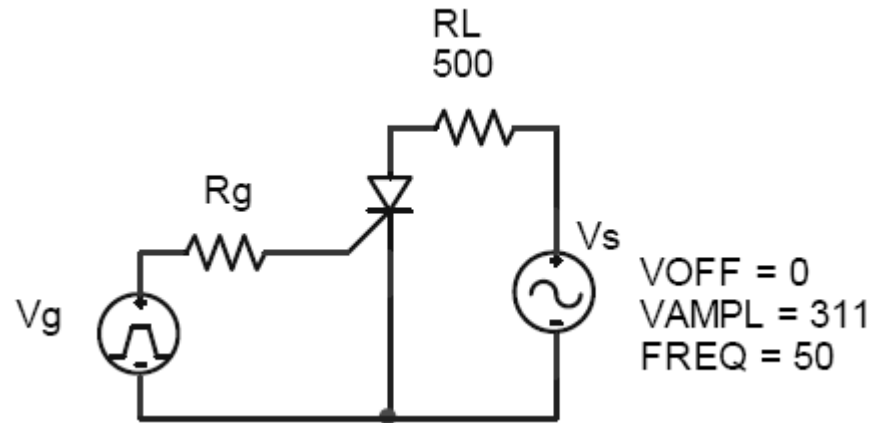
Se usa en aplicaciones de baja velocidad.

4.Tiristores

Ejercicio

Un SCR se utiliza en el circuito de la figura,

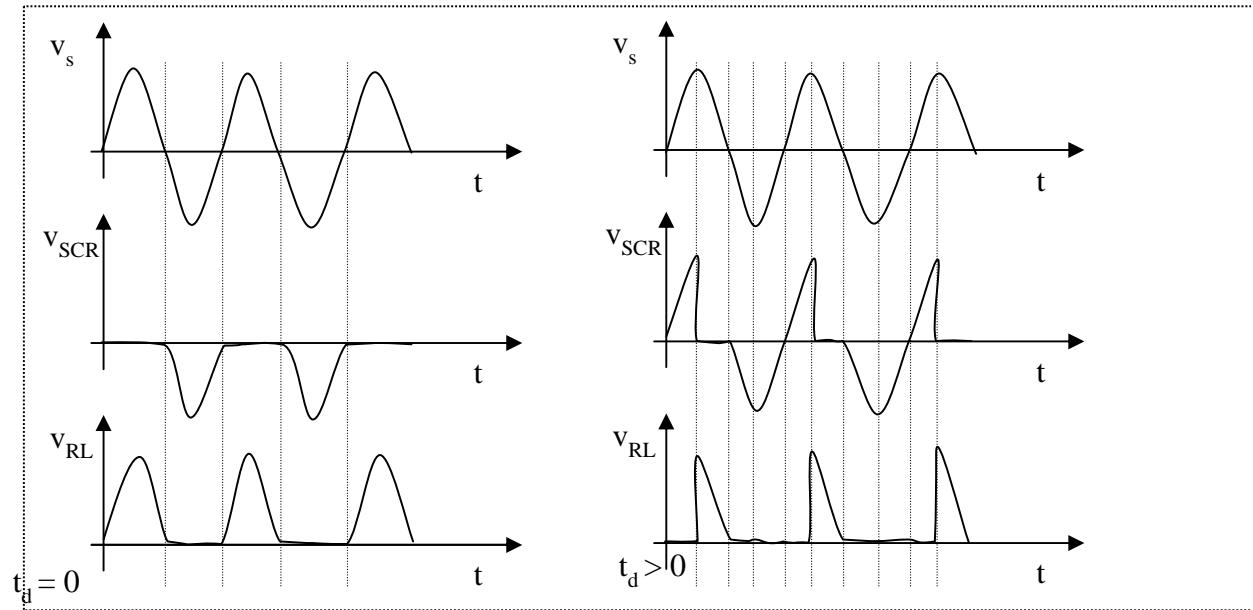
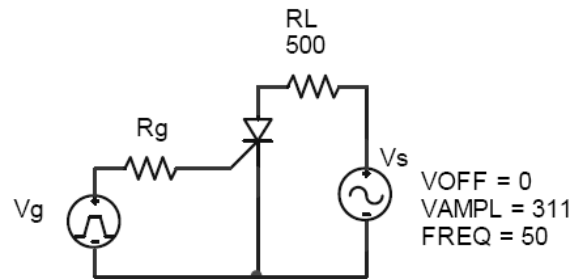
- Dibujar las formas de onda de tensión en el SCR y en la RL para diferentes ángulos de disparo del dispositivo. Indicar cuando la potencia disipada en la carga es máxima.
- La caída de tensión en el SCR cuando conduce es aproximadamente 1 Volt. Las resistencias térmicas del SCR son $R_{jc} = 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ y $R_{ca} = 62 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Las temperaturas máximas son $T_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_j = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Para el caso de máxima potencia disipada en la carga, determinar si el SCR necesita montarse sobre un disipador.



4. Tiristores

Ejercicio (resolución)

Vemos la situación para distintos ángulos de disparos:



La potencia disipada en la carga es máxima cuando el disparo se produce en $t_d = 0$. Entonces, el SCR conduce durante un semiciclo completo de la señal, ya que en el semiciclo negativo el SCR se apaga.

4.Tiristores

Ejercicio

Un SCR se utiliza en el circuito de la figura,

- b) La caída de tensión en el SCR cuando conduce es aproximadamente 1 Volt. Las resistencias térmicas del SCR son $R_{jc} = 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ y $R_{ca} = 62 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Las temperaturas máximas son $T_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_j = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Para el caso de máxima potencia disipada en la carga, determinar si el SCR necesita montarse sobre un disipador.

En el semiciclo en el cual no circula corriente (el SCR no conduce), el SCR no disipa potencia. En el semiciclo en el cual circula corriente, la caída en el SCR es de 1 Volt, aproximadamente en forma continua. Durante ese intervalo de tiempo la corriente pico que circula es:

$$\hat{I} = \frac{311V - 1V}{500\Omega} = 0.62A$$

Luego, se tiene entonces que la I_{ef} que circula por el SCR es: $I_{ef} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.62A}{\sqrt{2}} = 0.22A$

Por otro lado, la tensión eficaz en el SCR es: $V_{ef} = \frac{1V}{2} = 0.5V$

Entonces la potencia disipada del SCR durante el ciclo completo es:

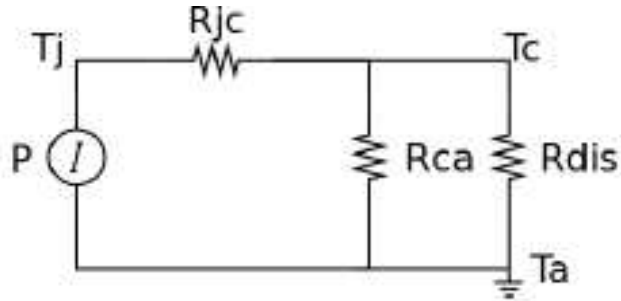
$$P_{SCR} = 0.5V \cdot 0.22A = 0.11W$$

¿Se necesita disipador?

4. Tiristores

Ejercicio

El modelo equivalente térmico del SCR es el siguiente:



Sin disipador tenemos:
$$P_{MAX} = \frac{T_j - T_a}{R_{ja}} = \frac{150^\circ C - 50^\circ C}{63.5^\circ C / W} = 1.57 W$$

Así resulta: $P_{MAX} > P_{disipada} = 0.11 W \rightarrow$ No se necesita disipador.

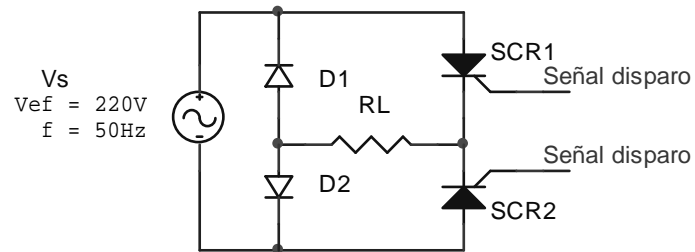
Verificación:
$$T_j = T_a + P \cdot R_{ja} = 50^\circ C + 0.31 W \cdot 62^\circ C / W = 69^\circ C < T_{j_{MAX}}$$

4. Tiristores

Ejercicio

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:

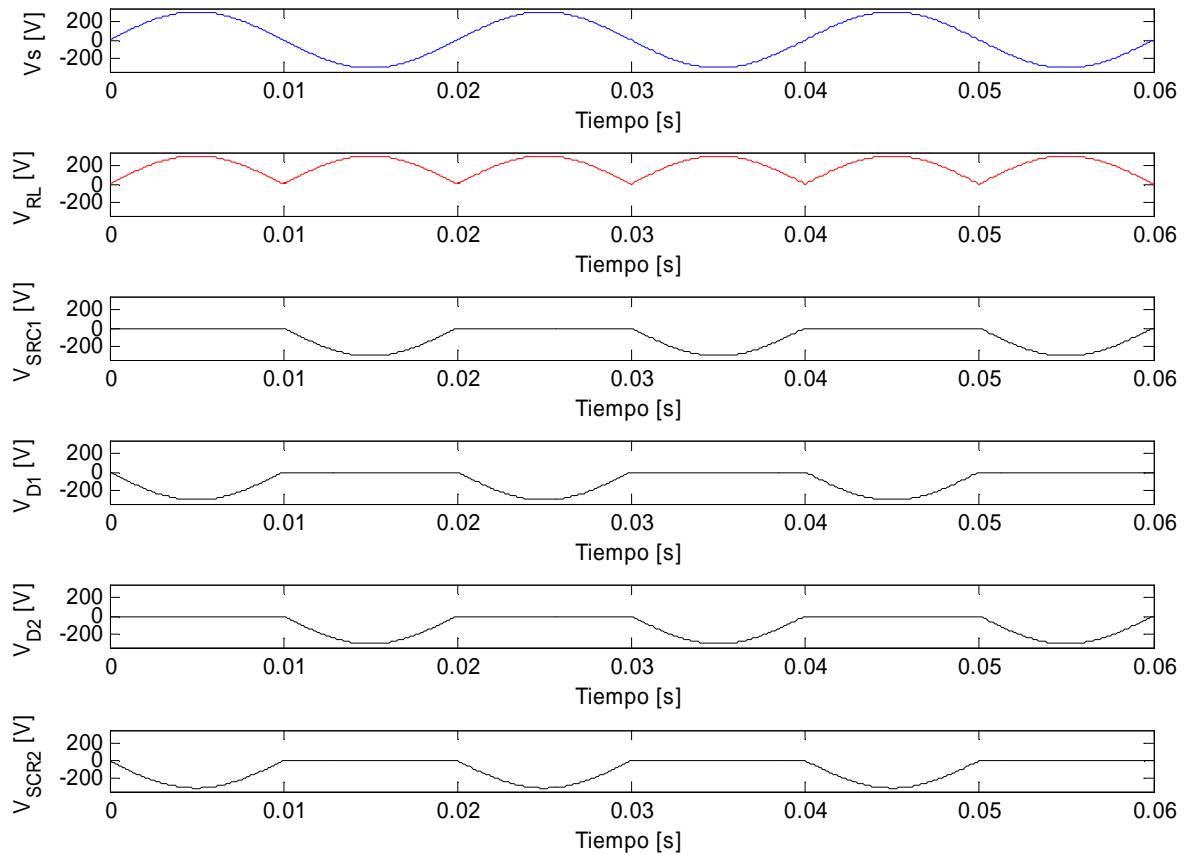
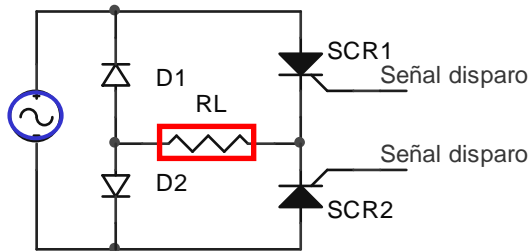
- a. Cada uno de los SCR conduce durante $\frac{1}{2}$ ciclo de la señal Vs.
- b. Cada uno de los SCR conduce durante $\frac{1}{4}$ ciclo de la señal Vs.
- c. Los SCR no conducen en ningún momento.



4. Tiristores

Ejercicio (resolución)

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

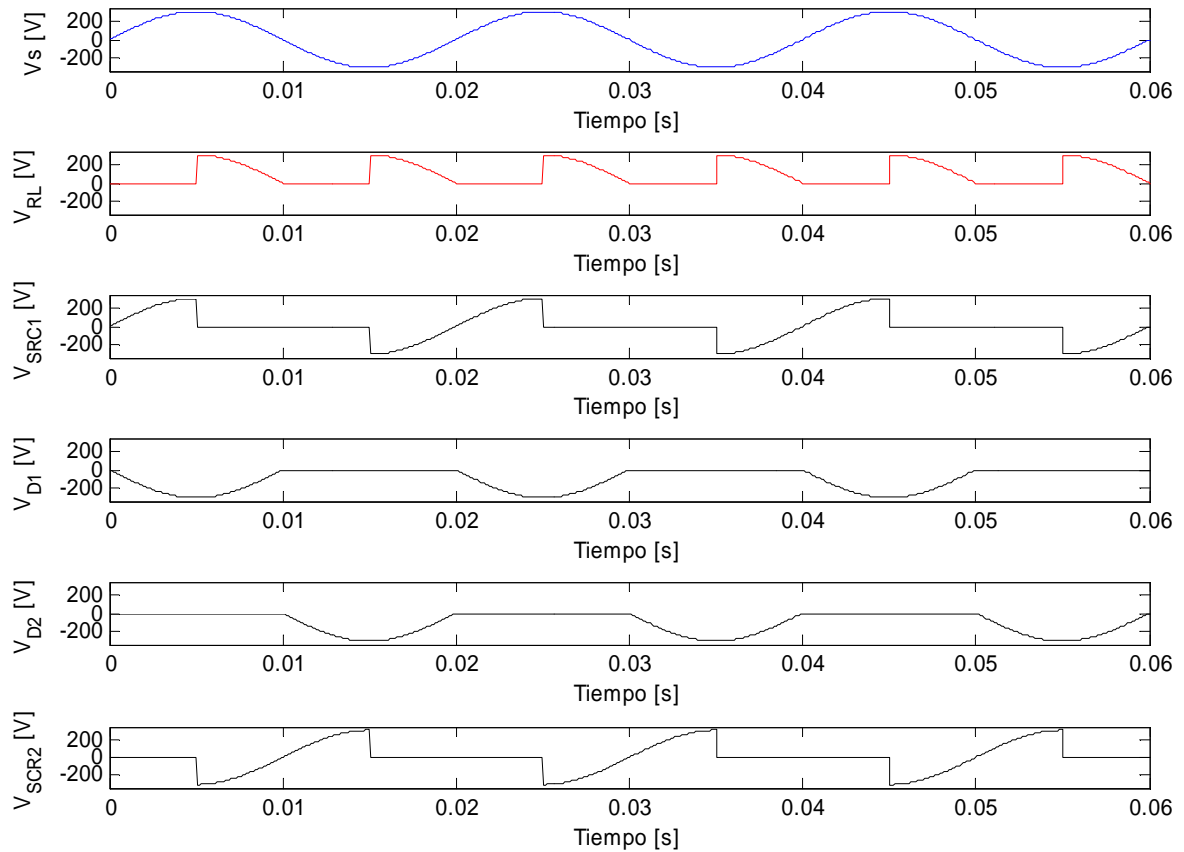
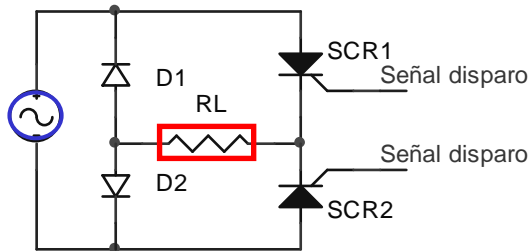


¿Y qué pasa si los SCR conducen durante $\frac{1}{4}$ ciclo de la señal V_s ?

4. Tiristores

Ejercicio (resolución)

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

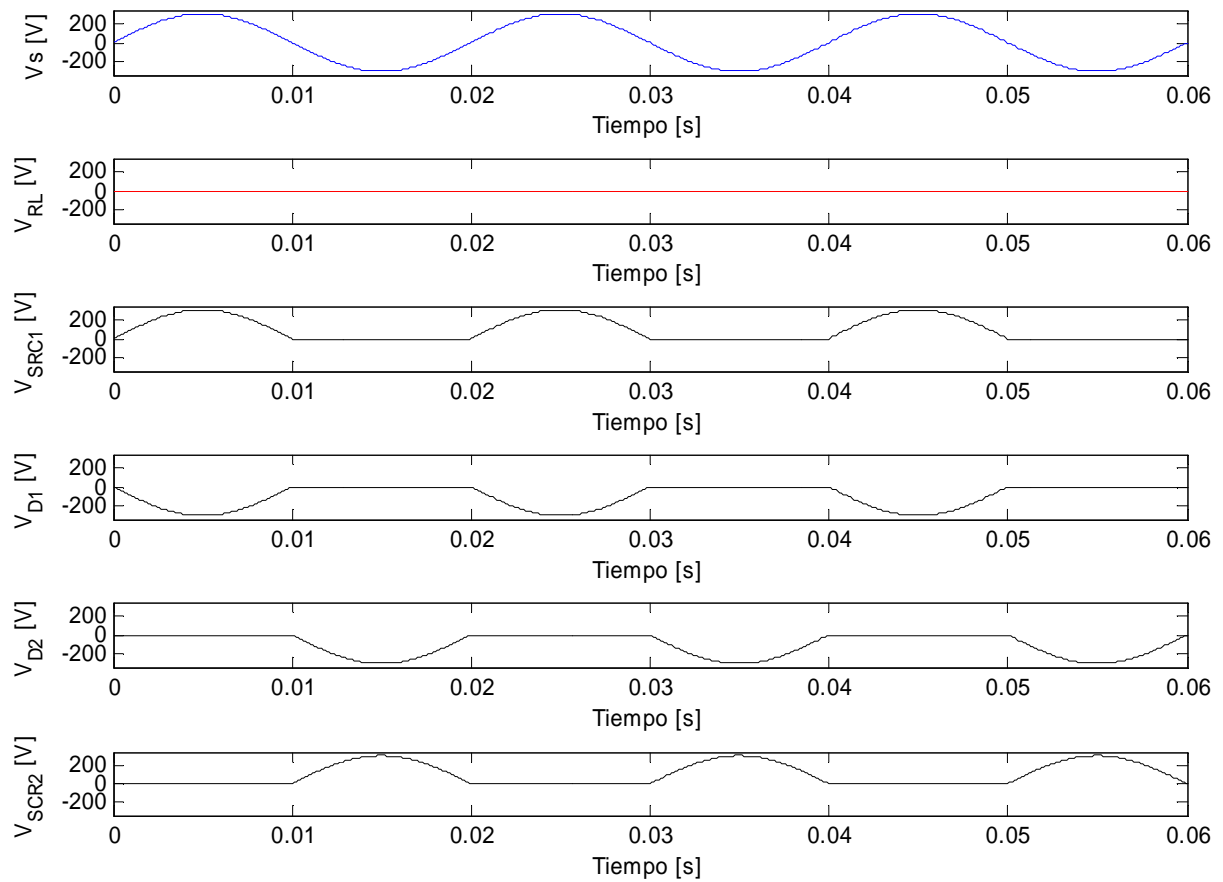
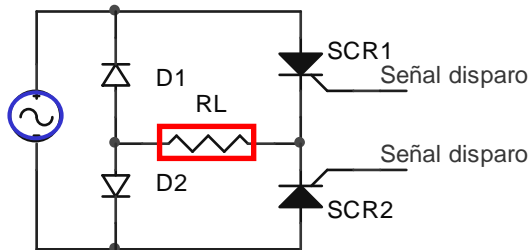


¿Y qué pasa si los SCR no conducen en ningún momento?

4. Tiristores

Ejercicio (resolución)

c. Los SCR no conducen en ningún momento.



5. Transistores de potencia

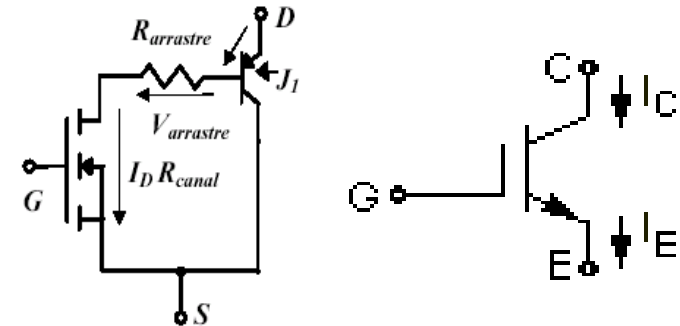
Características

Son transistores que deben soportar grandes corrientes, tensiones y potencias.

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 (saturación)	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

El IGBT ofrece entrada MOS y corriente de TBJ:

- Se activa por tensión (no por corriente).
- Tiempos de conmutación bajos.
- Soporta mayor disipación (como los bipolares).

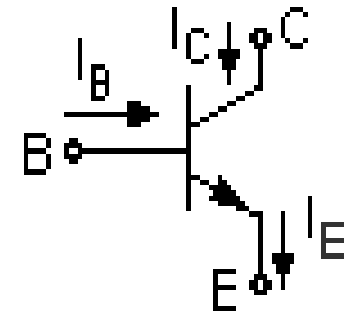


5. Transistores de potencia

-Características

Nos interesa que el transistor se parezca a un elemento ideal:

- Manejo de alta potencia.
- Bajo tiempos $t_{on} \leftrightarrow t_{off}$.
- Alta densidad de corriente.
- Que apagado soporte alta tensión V_{CE} o V_{DS} .
- Que soporte grandes di/dt y dv/dt .

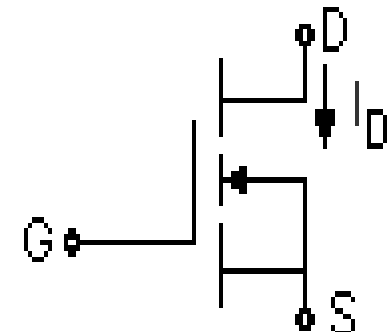


TBJ – NPN

Principios básicos de funcionamiento

- En un TBJ se controla I_C con I_B : $I_C = \beta \cdot I_B$
- En un MOS se controla I_D con V_{GS} : $I_D = k \cdot (V_{GS} - V_T)^2$

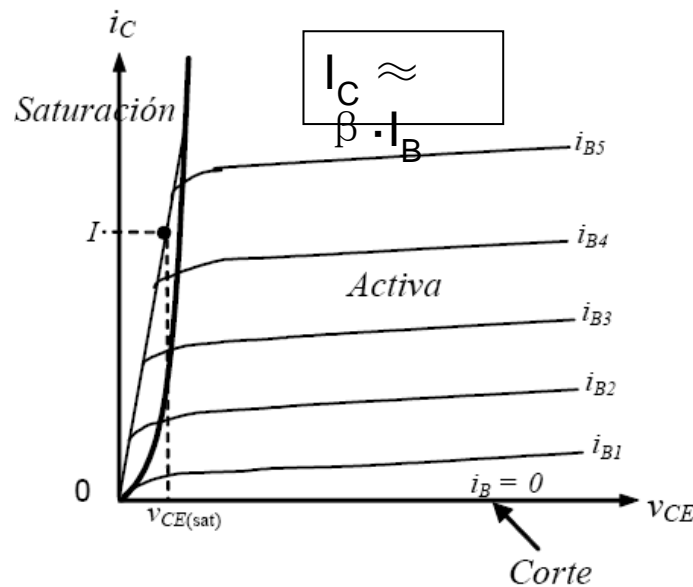
En ambos casos, con una potencia pequeña (I_B o V_{GS}) se controla una mucho mayor (I_C o I_D).



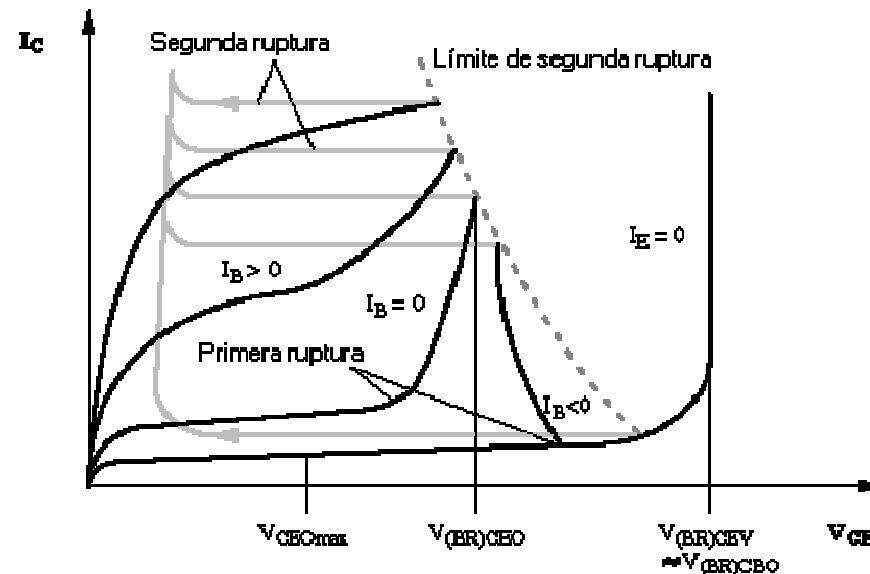
MOS - N

5. Transistores de potencia

Curvas de transferencia y avalanchas del TBJ (las del MOS son similares):



Funcionamiento normal



Funcionamiento extremo

- **Avalancha primaria:** Superada la máxima V_{CB} con emisor abierto (V_{CBO}), o la máxima V_{CE} con base abierta (V_{CEO}), la unión C-B polarizada en inversa entra en un proceso de ruptura similar al de un diodo y conduce corriente.
- **Avalancha secundaria:** Puede darse una avalancha con tensiones por debajo de los límites anteriores debido a la aparición de puntos calientes (focalización de la intensidad de base). Esta avalancha es destructiva. Debe evitarse.

5. Transistores de potencia

Tiempo de conmutación y disipación

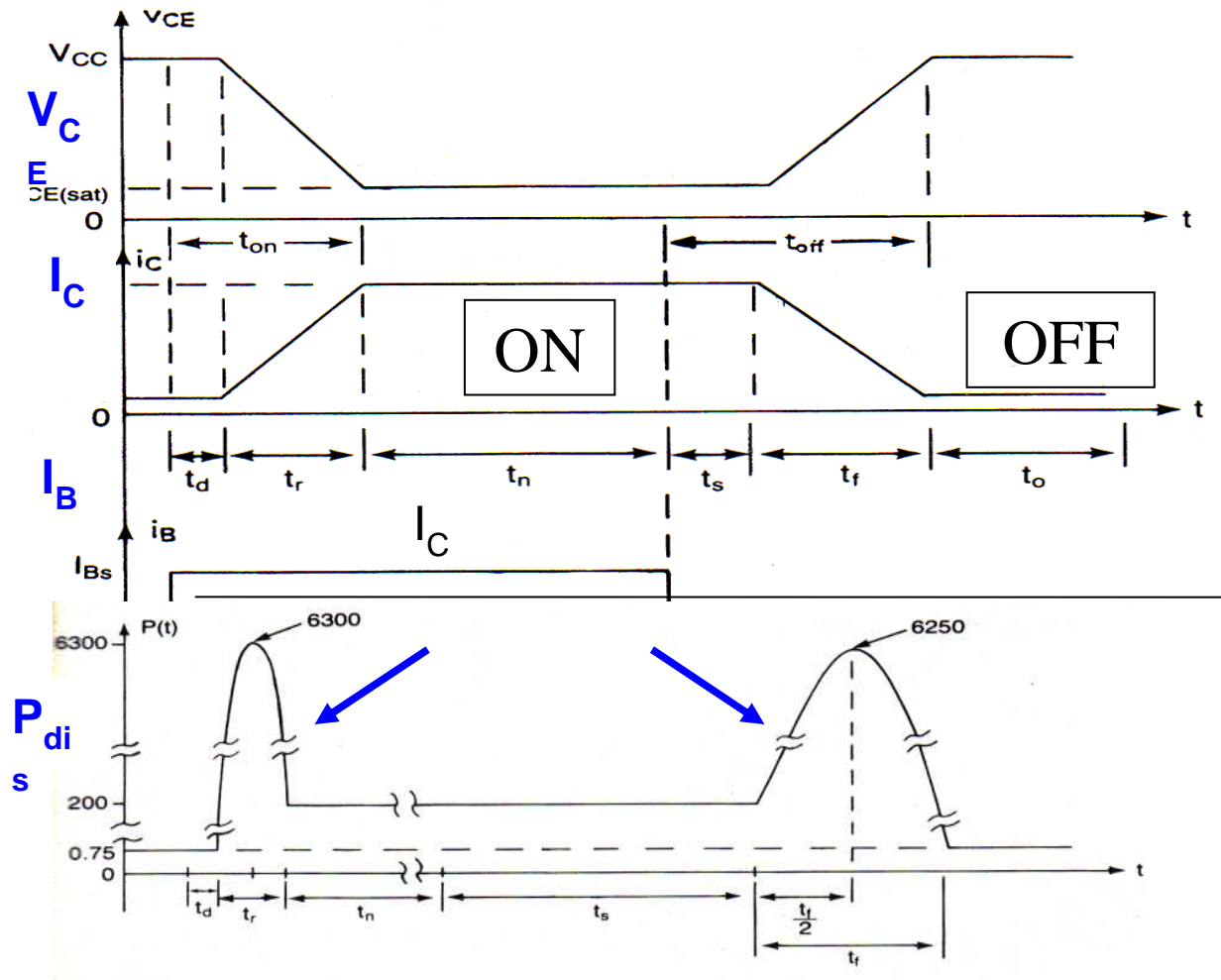
- Con el transistor en saturación o en corte las pérdidas son despreciables.
- Durante la conmutación se produce un pico de potencia disipada:

Esto es así porque:

$$Pot_{dis} = V_{CE} \cdot I_C$$

$$Pot_{dis-ON} = 0V \cdot I_C$$

$$Pot_{dis-OFF} = V_{CE} \cdot 0A$$



5. Transistores de potencia

Ejemplos de dispositivos dañados:

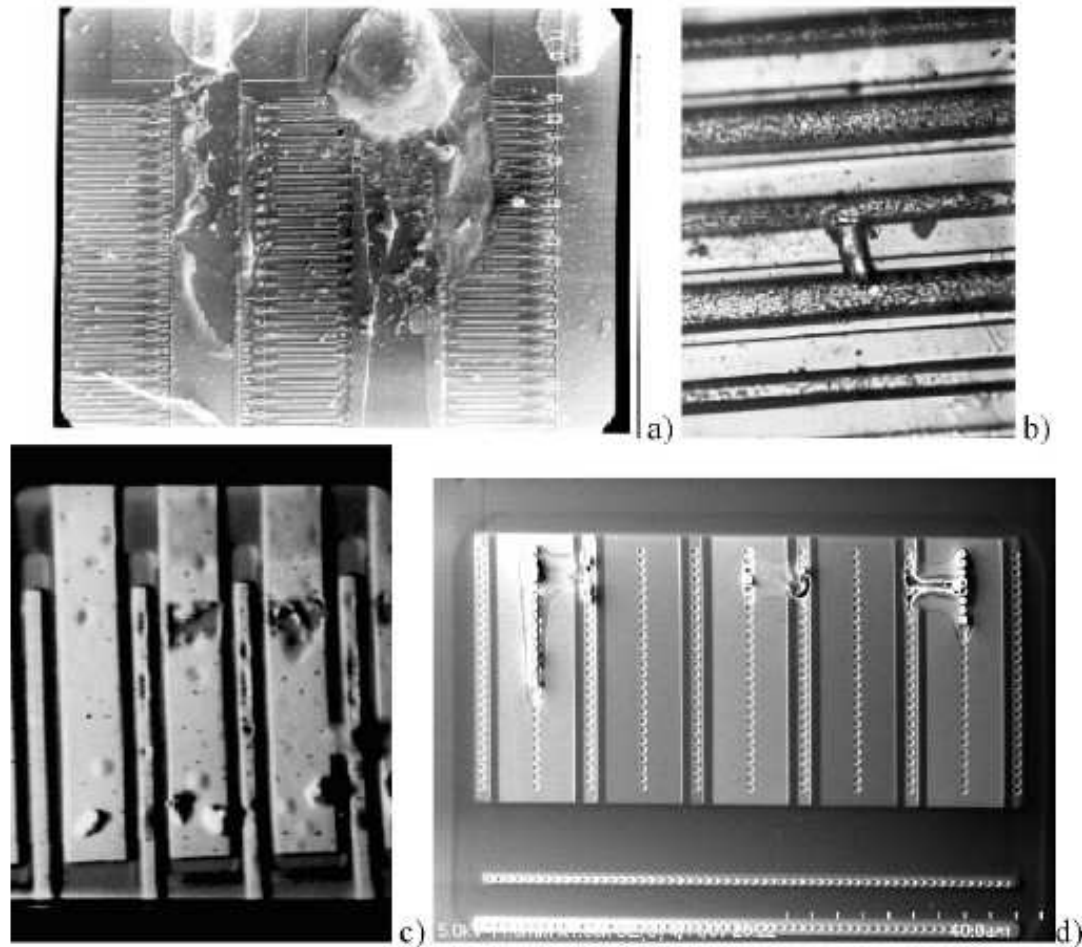
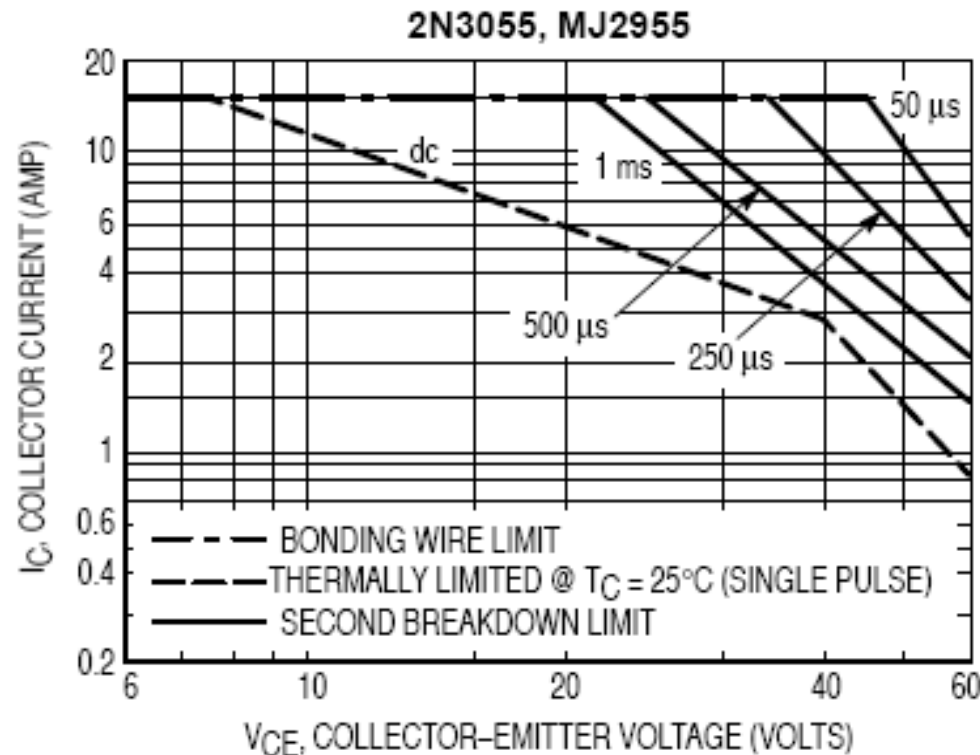


Fig. 1.1 Microphotographs of failed structures: Silicon bipolar transistor (a), SiMOSFET (b), GaAs MESFET (c), snapback NMOS at ESD pulse (d)

5. Transistores de potencia

Zona de operación segura (SOA – Safety Operation Area):

- La zona de funcionamiento está limitada por la disipación de energía:

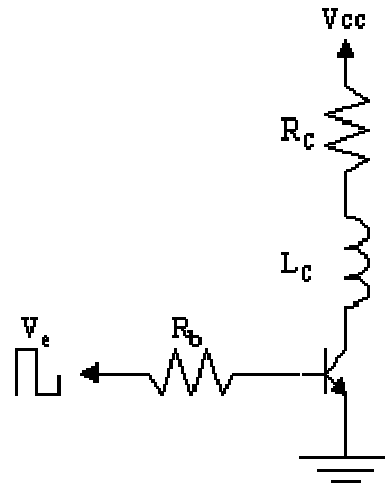


- El transistor puede estar en la zona límite de la avalancha secundaria durante cortos intervalos de tiempo sin que se destruya.
- Para corrientes grandes se funden las conexiones metálicas

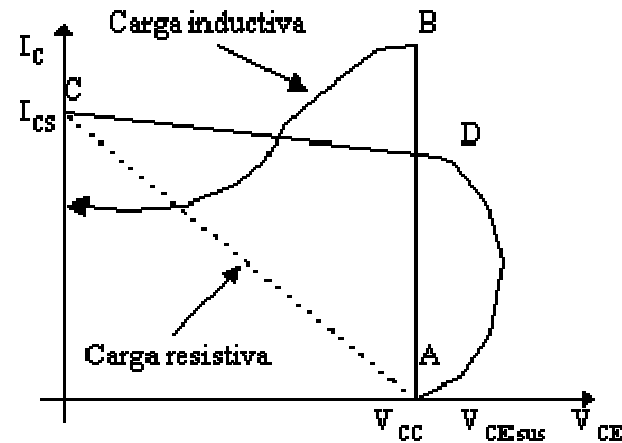
5. Transistores de potencia

Efecto asociado a cargas inductivas:

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



Circuito con carga inductiva



Característica de transferencia para el transistor en conmutación con carga inductiva.

Para carga resistiva el transistor pasa de corte a saturación por la recta A-C-A

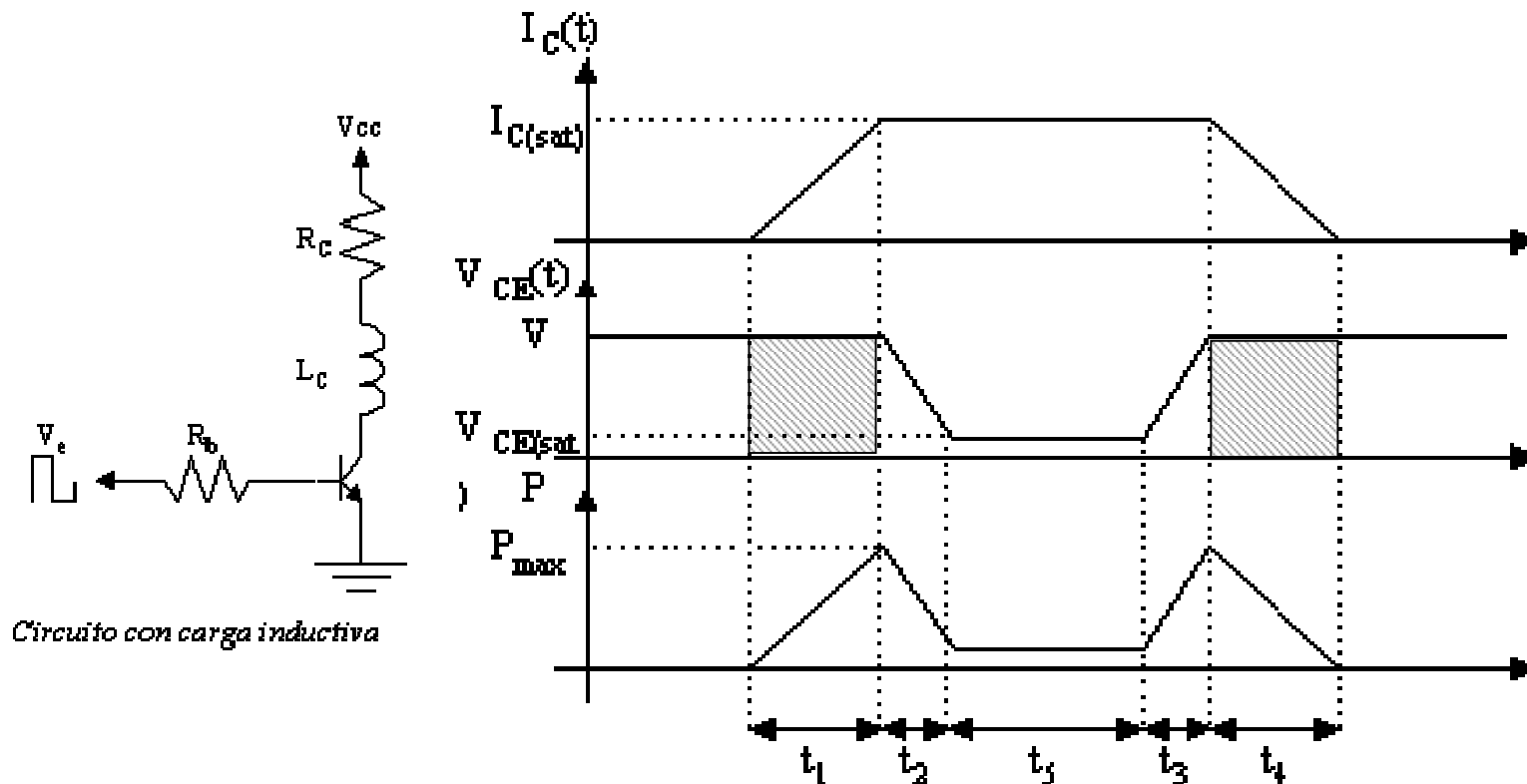
Para carga inductiva el transistor pasa a saturación recorriendo A-B-C-D-A:

- Hay una profunda incursión en avalancha secundaria, con valor $V_{CE} \gg V_{CC}$

5. Transistores de potencia

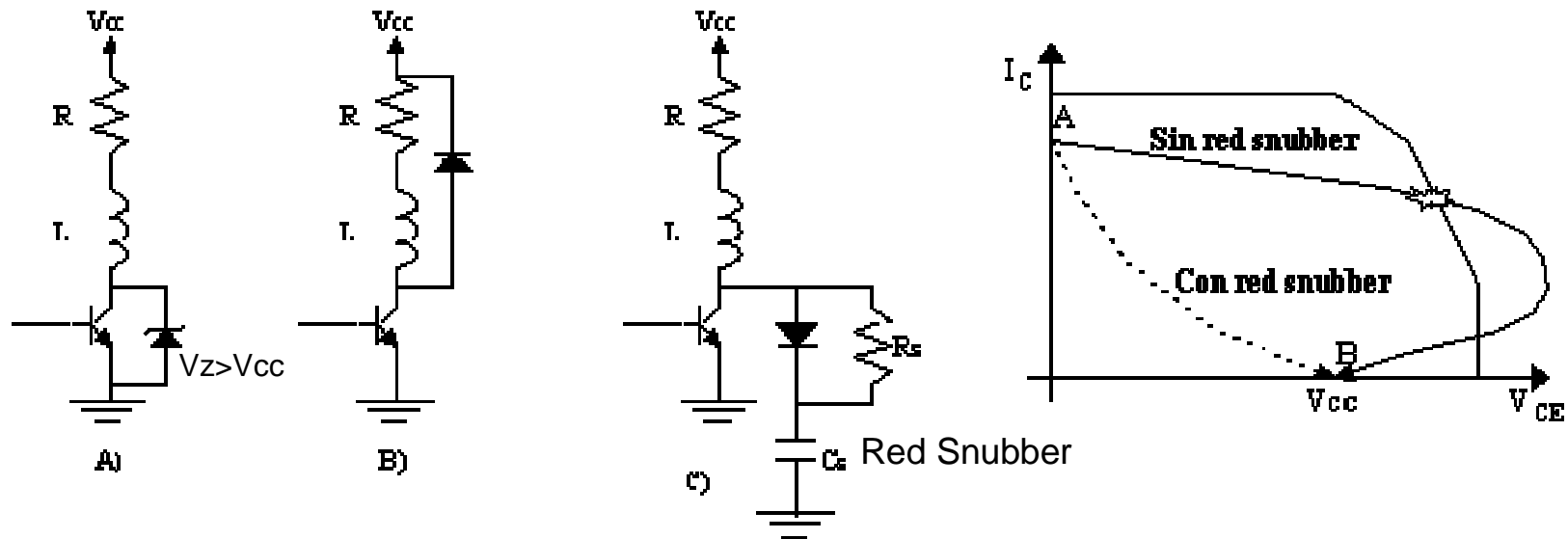
Efecto asociado a cargas inductivas:

- Para cargas inductivas también hay un aumento en la disipación de potencia del transistor:



5. Transistores de potencia

Circuitos de protección para cargas inductivas:

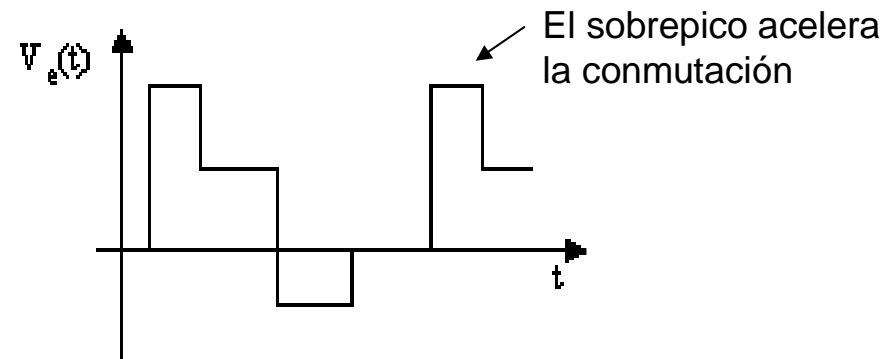


- En A) y B) se limita la V_{CE} durante el paso de saturación a corte, proporcionando un camino para la circulación de corriente del inductor.
- En C) al cortarse el transistor la corriente pasa por el diodo y por C_s , el cual tiende a cargarse a V_{CC} . En saturación C_s se descarga a través de R_s .

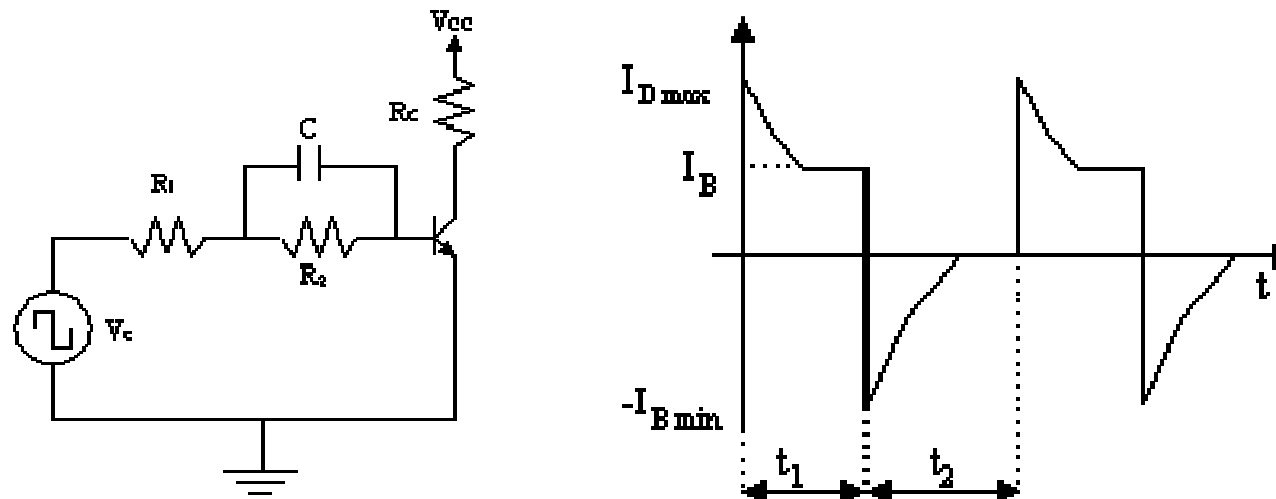
5. Transistores de potencia

Circuitos de encendido del transistor:

El tiempo de conmutación puede reducirse usando una señal adecuada:



- Para esto puede emplearse el siguiente circuito:

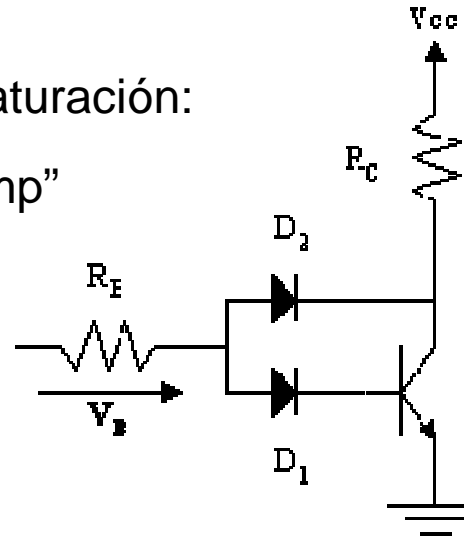


5. Transistores de potencia

Circuitos de encendido del transistor:

Otra opción es el popular circuito anti-saturación:

“Enclavador Baker” = “Baker Clamp”



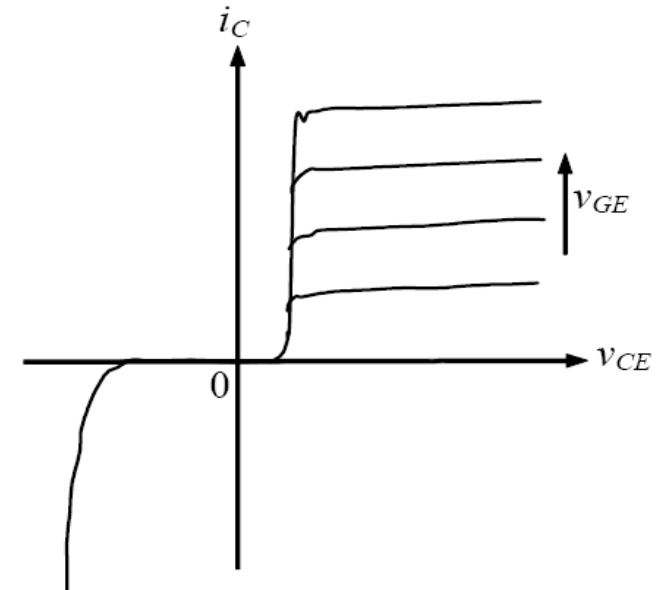
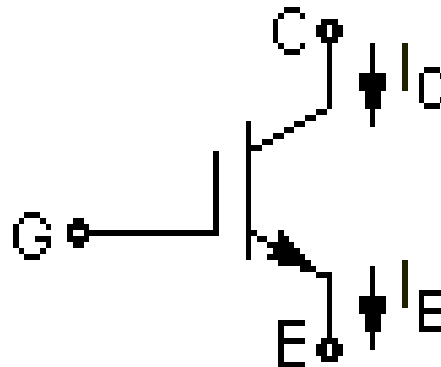
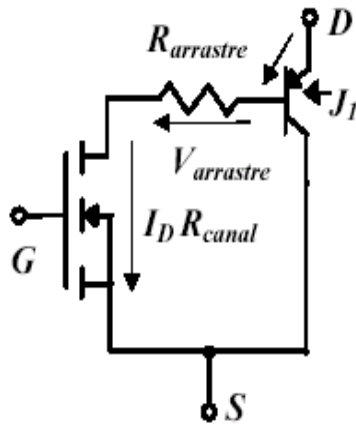
- El objetivo es evitar que durante la conducción la juntura B-C esté en directa ($V_B > V_C$) para así lograr minimizar el tiempo de apagado del transistor.
- Cuando la tensión de control aumenta, D_1 conduce una corriente I_B que enciende el transistor. Entonces D_2 está en inversa (no conduce).
- Si la tensión de control sigue aumentando, entonces V_C disminuye hasta que D_2 está en directa y conduce. Entonces D_1 pierde corriente, el transistor “conduce menos” y V_C aumenta, por lo que D_2 deja de conducir.

Este circuito usa una realimentación negativa para impedir que V_C sea muy baja y así logra aumentar la velocidad de apagado del transistor.

5. Transistores de potencia

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT):

Es una mezcla entre MOSFET y TBJ:



- El IGBT presenta alta impedancia de entrada como los MOSFET, y bajas pérdidas de conducción como el TBJ, pero sin ruptura secundaria como el TBJ.
- El IGBT es mas rápido que el TBJ, pero mas lento que el MOSFET

5. Transistores de potencia

Comparación de distintos tipos de transistores

BJT	MOSFET	IGBT
1000-1200V	500-1000V	1600-2000V
700-1000A	20-100A	400-500A
25kHz	Hasta 300-400kHz	Hasta 75kHz
P medias	P bajas, <10kW	P medias - altas

- Los valores no son exactos dada la gran disparidad del mercado.
- En general el producto tensión-corriente es una constante (limitación de potencia): hay MOSFET de muy alta tensión pero con corriente reducida.
- Lo mismo ocurre con las frecuencias de trabajo: existen bipolares de poca potencia que trabajan a 50kHz, aunque no es lo usual.

6.Conclusiones

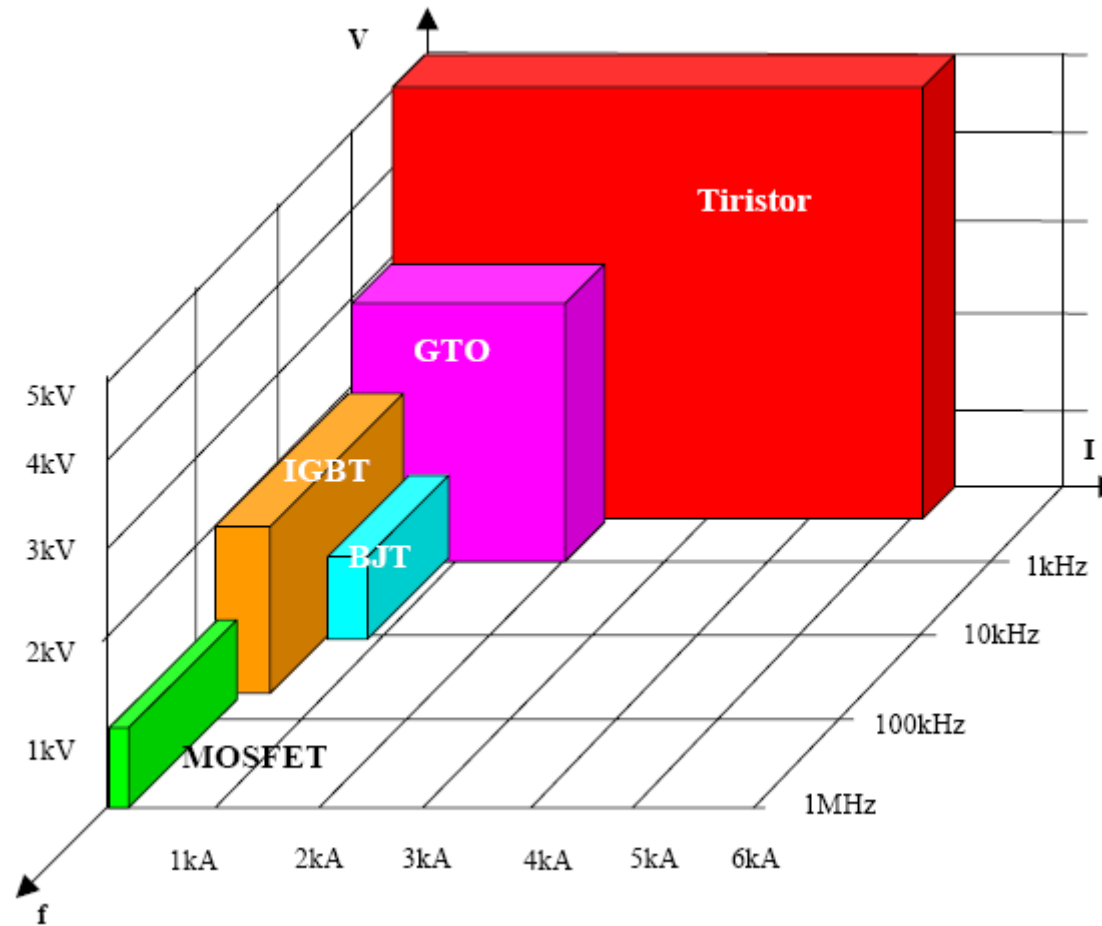
Prestaciones generales:

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

6.Conclusiones

Prestaciones generales:



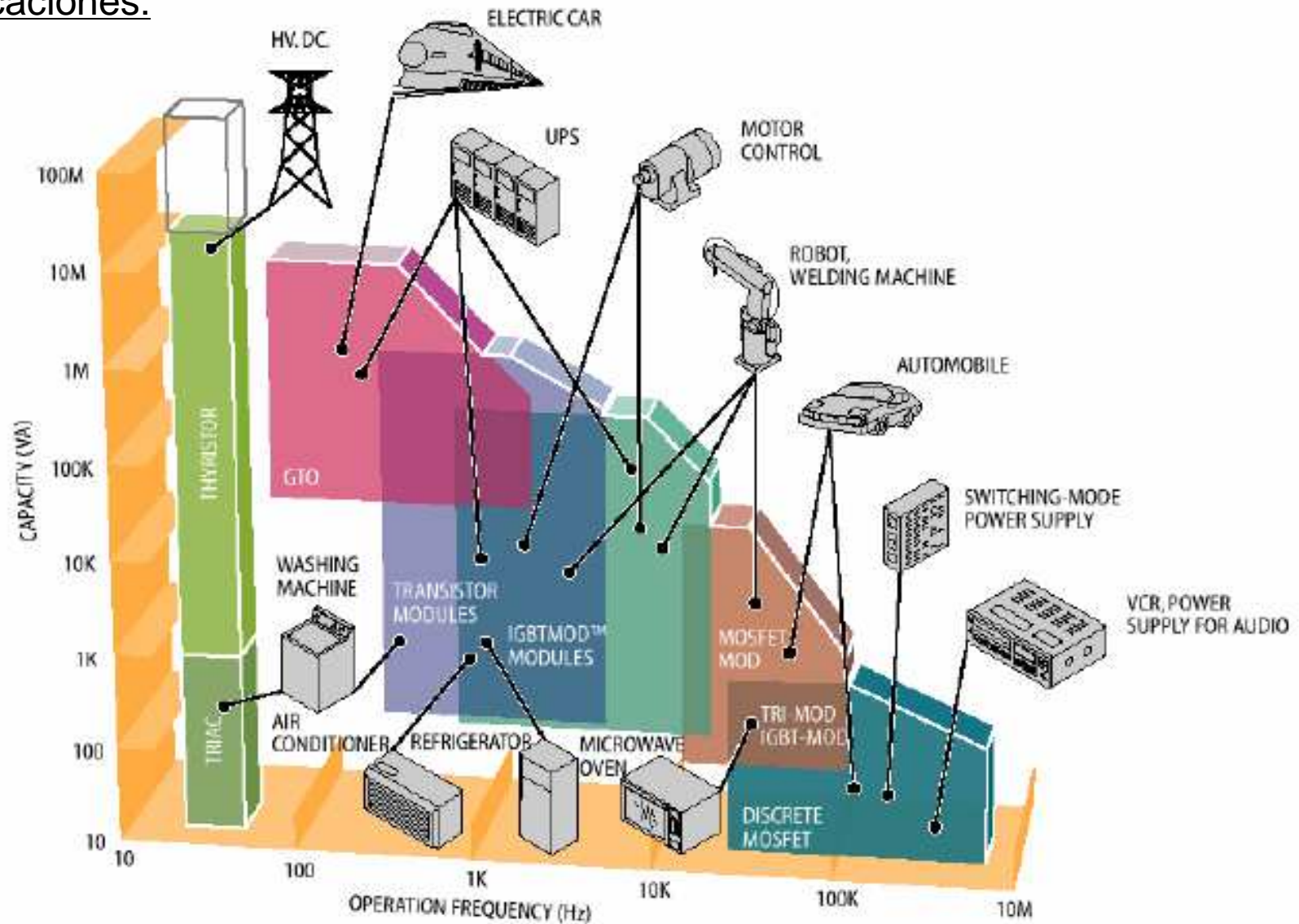
6.Conclusiones

Prestaciones generales:

	<i>Dispositivos</i>					
	DIODO	SCR	GTO	BJT	MOSFET	IGBT
Características de disparo	-----	En corriente	En corriente	En corriente	En tensión	En tensión
Potencia del circuito de mando	-----	Media - Alta	Alta	Media - Alta	Muy baja	Muy Baja
Complejidad del circuito de mando	-----	Baja	Alta	Alta	Muy Baja	Muy Baja
Densidad de corriente	Media p/ Alta	Alta	Media - Alta	Media	Alta - Baja	Alta
Máxima tensión inversa	Media	Alta	Alta	Baja - Media	Media - Baja	Media - Alta
Perdidas en conmutación (circuitos convencionales)	Baja p/ media	Alta	Alta	Media - Alta	Muy Baja	Media - Alta

6.Conclusiones

Aplicaciones:



Bibliografía

- <http://materias.fi.uba.ar/6625>
- <http://www.redeya.com>
- <http://www.eng.uwi.tt/depts/elec/staff/rdefour/courses/index33d.html>
- **“Power Electronics: Converters, Applications and Design”, Mohan, Undeland y Robbins, John Wiley & Sons, 2ª Ed, Nueva York, 1995.**
- **“Eletrônica de Potência”, J. A. Pomilio, Universidade Estadual de Campinas, SP - Brasil.**
- **“Electrónica de Potencia”, D. W. Hart, Valparaíso University, Valparaíso Indiana. Prentice Hall.**