

Interrupidores Electrónicos de Potencia

Dra. Victoria Serrano

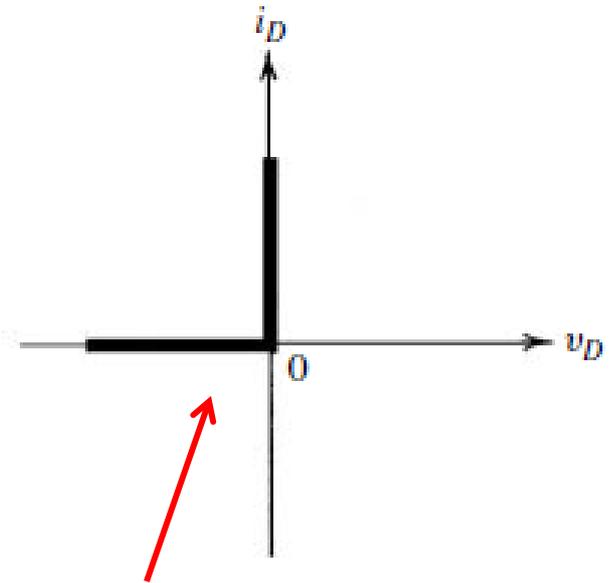
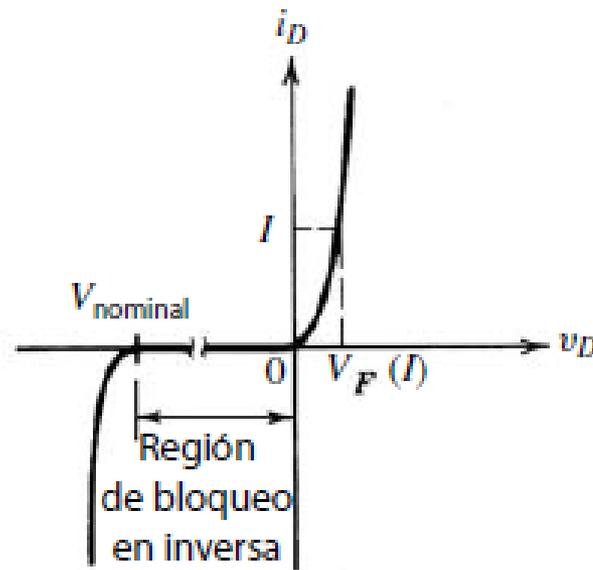
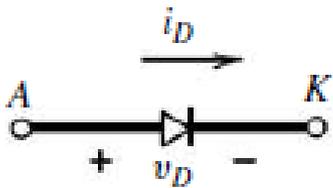
Clasificación

- Diodos: conexión/desconexión controlados por el circuito de potencia
- Tiristores: activados mediante una señal de control. Desactivados por:
 - Circuito de potencia (control por fase)
 - Circuito de control externo
- Interruptores controlables: se conectan/desconectan por señales de control

Interruptores Controlables

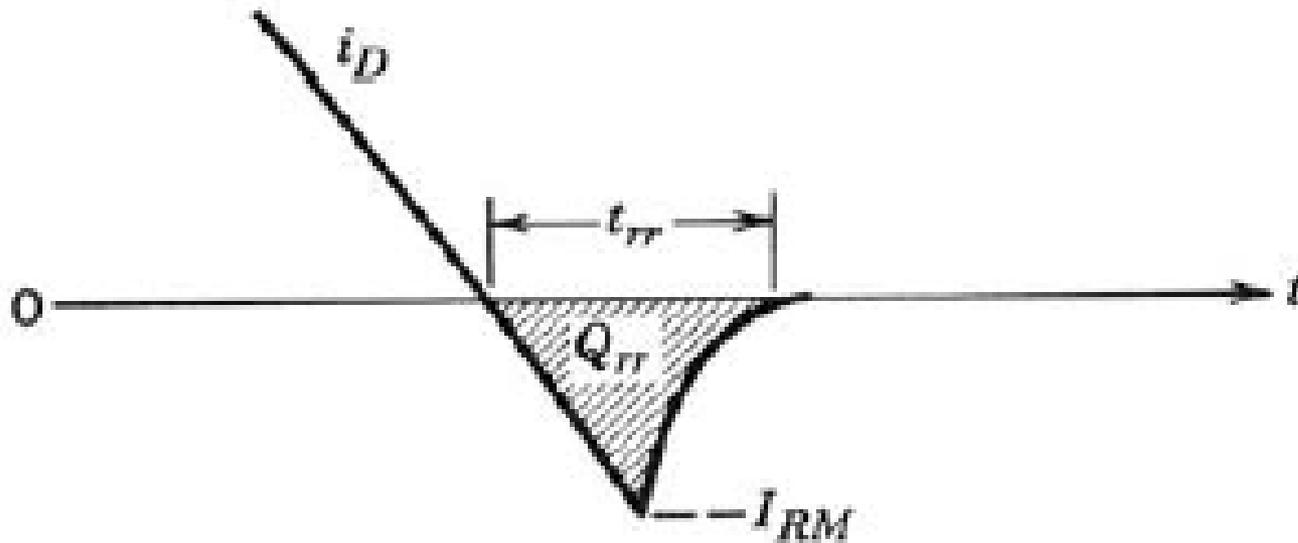
- Transistores de Unión Bipolar (BJT)
- Transistores de Efecto de Campo Óxido Metálico (MOSFET)
- Tiristores desactivables por puerta (GTO)
- Transistores bipolares de puerta aislada (IGBT)

Diodos



Conveniente para analizar topología del convertidor, pero no debe usarse para requisitos del disipador de calor del dispositivo

Apagado del Diodo

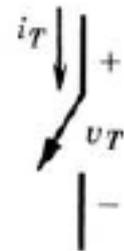


Tipos de Diodos

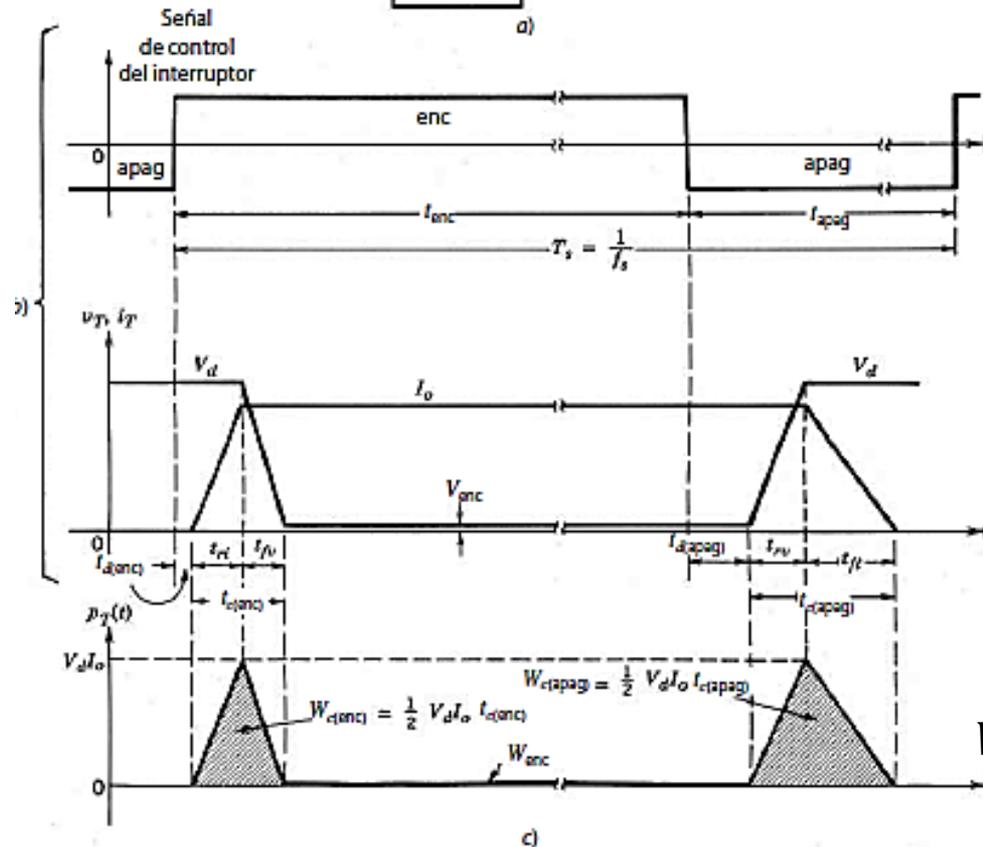
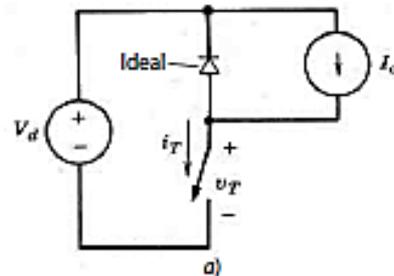
- Schottky
 - Uso en caída baja de tensión directa ($\sim 0.3V$).
 - Limitada capacidad de tensión de bloqueo: 50-100V
- De recuperación rápida
 - Uso en circuitos de alta frecuencia, en combinación con interruptores controlables que requieren corto tiempo de recuperación inversa.
 - trr milisegundos para niveles de cientos de V, I
- De frecuencia de línea
 - Voltaje de encendido lo más bajo posible \Rightarrow trr más grandes.
 - Magnitudes KV, KA
 - Se pueden conectar en serie y paralelo para satisfacer requisitos de corriente

Características Deseadas en Interruptores Controlables

- Bloquea de forma arbitraria grandes tensiones directas e inversas con flujo de corriente cero.
- Conduce en forma arbitraria grandes corrientes con caída cero de tensión cuando está encendido
- Conmuta de encendido a apagado o viceversa en forma instantánea cuando se dispara
- Se requiere una cantidad de energía insignificante de la fuente de control para disparar el interruptor



Disipación de Energía

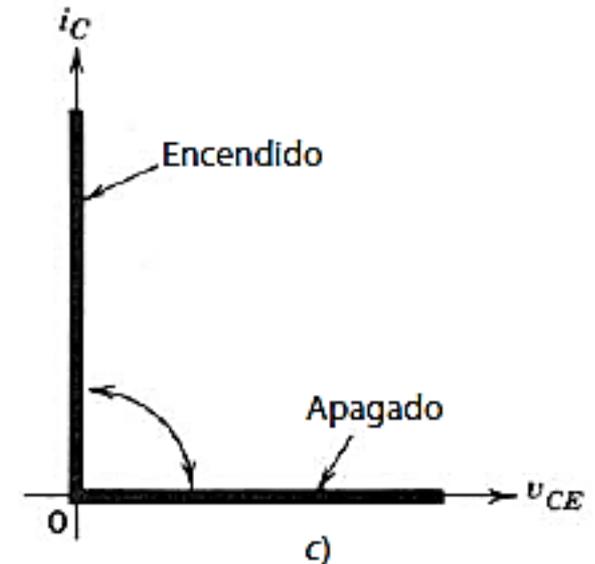
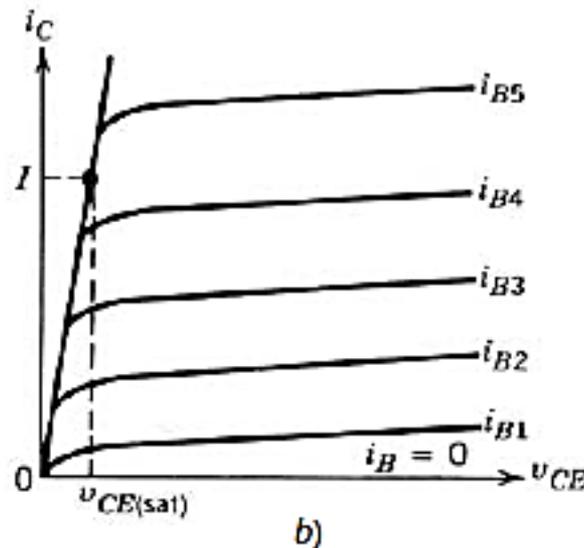
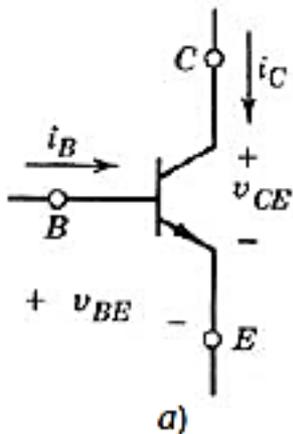


Energía Disipada en el Dispositivo

$$W_{C(enc)} = \frac{1}{2} V_d I_o t_{C(enc)}$$

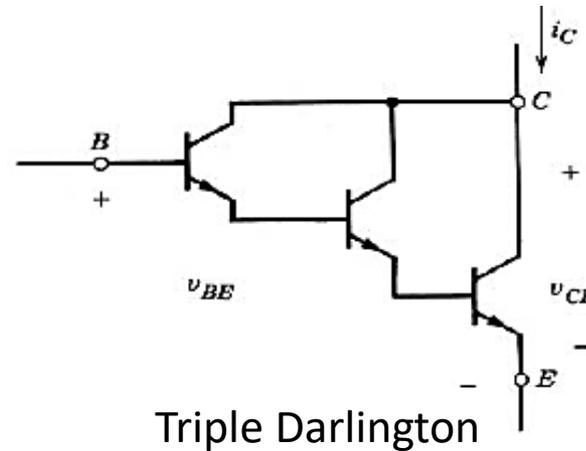
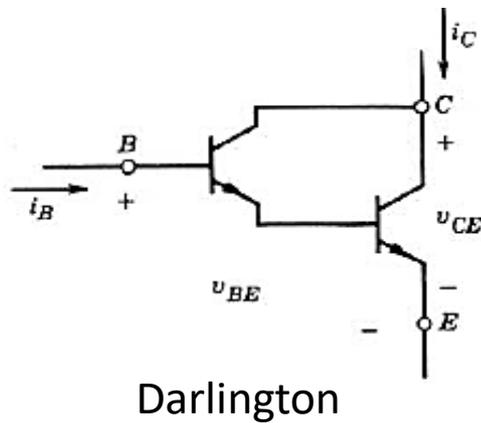
Transistor Bipolar de Potencia

- Dispositivos controlados por corriente
- Corriente en la base de manera continua para mantenerlos activos



Transistor Bipolar de Potencia

- Ganancia de corriente CC, h_{FE} , $\sim 5-10$ en transistores de alta potencia. Para ganar una mayor potencia:



Desventajas:
 V_{CE} más altos,
velocidades de conmutación más lentas

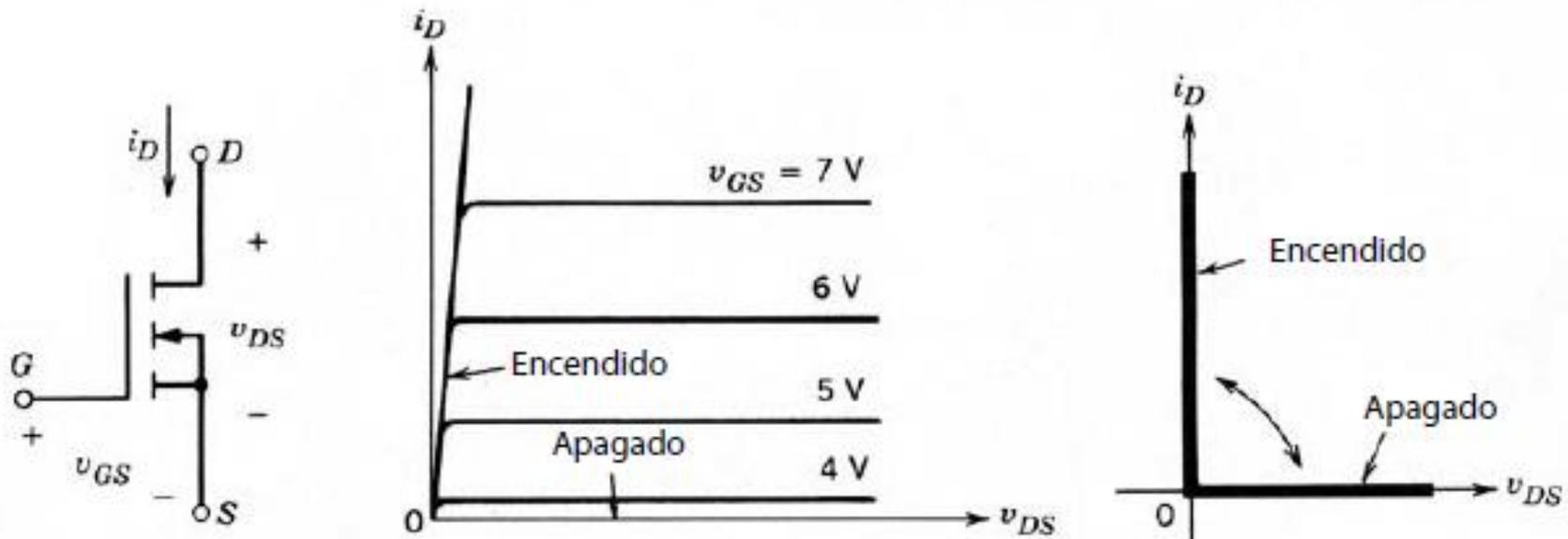
- Voltaje del estado activo $V_{CE} \sim 1 - 2 V \therefore$ Pérdida de energía en conducción pequeña

Transistor Bipolar de Potencia (BJT & MD)

- Tiempo de almacenamiento significativo durante la transición de desconexión.
- Tiempos de conmutación: $100 \times n \text{seg} - \mu\text{seg}$
- Tensiones hasta 1400 V
- Corrientes 100s Amperios
- BJT modernos pueden conectarse en paralelo (cuidando conexión). Por ejemplo: si se requieren 4 transistores para compartir igualitariamente la corriente, utilizar 5 para tolerar un leve desequilibrio en la corriente.

MOSFET de Potencia

- Dispositivo controlado por tensión
- Dispositivo completo encendido (interruptor cerrado) cuando $V_{GS} < V_{GS(th)}$



MOSFET de Potencia

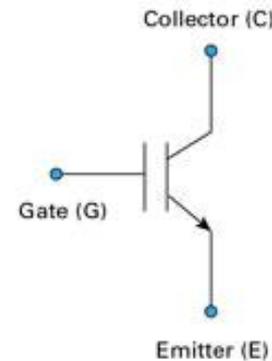
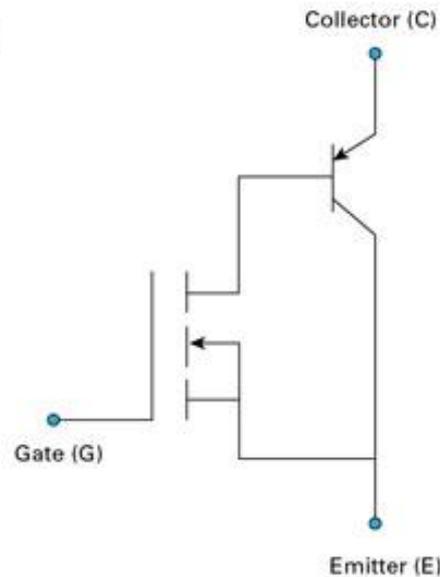
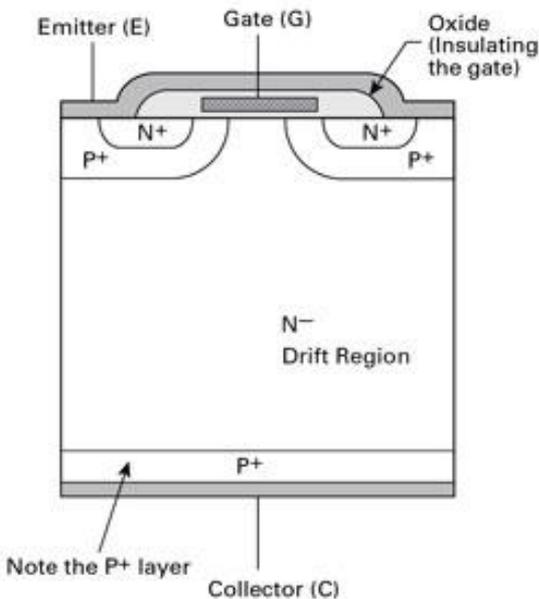
- Requieren aplicación continua de tensión compuerta-fuente para estar activos
- No hay flujo de corriente de compuerta, excepto en transiciones de encendido a apagado o viceversa
- Tiempos de conmutación muy cortos: decenas-cientos nseg
- Resistencia de estado activo $r_{DS(enc)}$ aumenta rápidamente conforme al voltaje nominal de bloqueo del dispositivo.

MOSFET de Potencia

- Desde el punto de vista de pérdida de energía total, MOSFET de 300-400 V compiten con BJT's sólo si la frecuencia de conmutación sobrepasa 30-100kHz
- Están disponibles en voltajes nominales de más de 1000 V con corrientes nominales pequeñas y hasta 100 A con voltajes nominales pequeños.
- Máximo voltaje compuerta-fuente $\pm 20V$
- Se pueden conectar fácilmente en paralelo debido a que su r_{DS} tiene un coeficiente de temperatura positivo

Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBT)

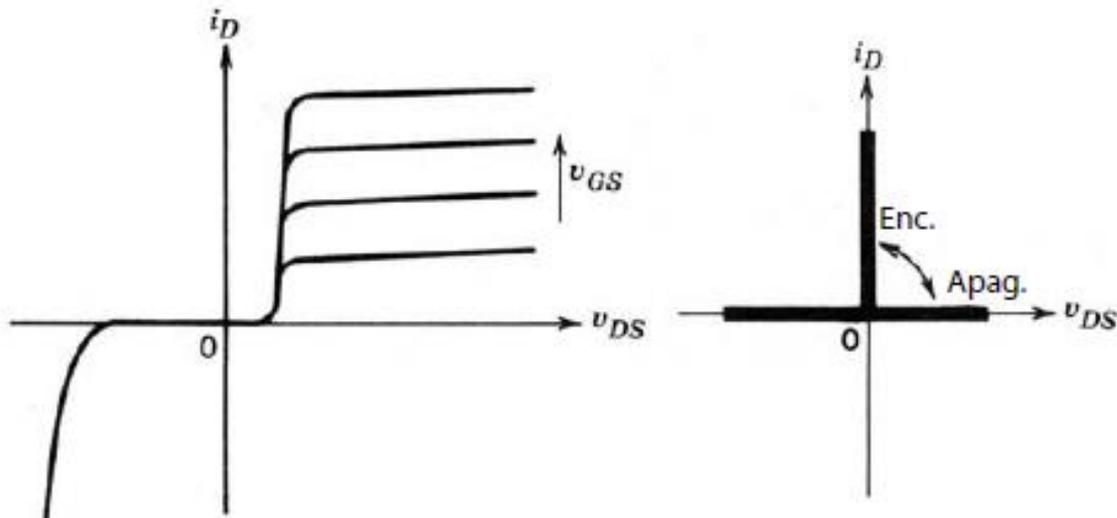
IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor



Presentan ventajas combinadas del:

- MOSFET
- BJT
- GTO

Características del IGBT



- Del MOSFET: compuerta de alta impedancia que conmuta el dispositivo con pequeña energía.
- Del BJT: voltaje de estado activo pequeño
- Del GTO: se pueden diseñar para bloquear tensiones negativas

Características del IGBT

- Tiempo de conexión/desconexión en el orden de $1 \mu\text{s}$
- Módulos en rangos de hasta 1700 V y 1200 A
- Previstos para rangos de tensión de hasta 2 a 3 kV

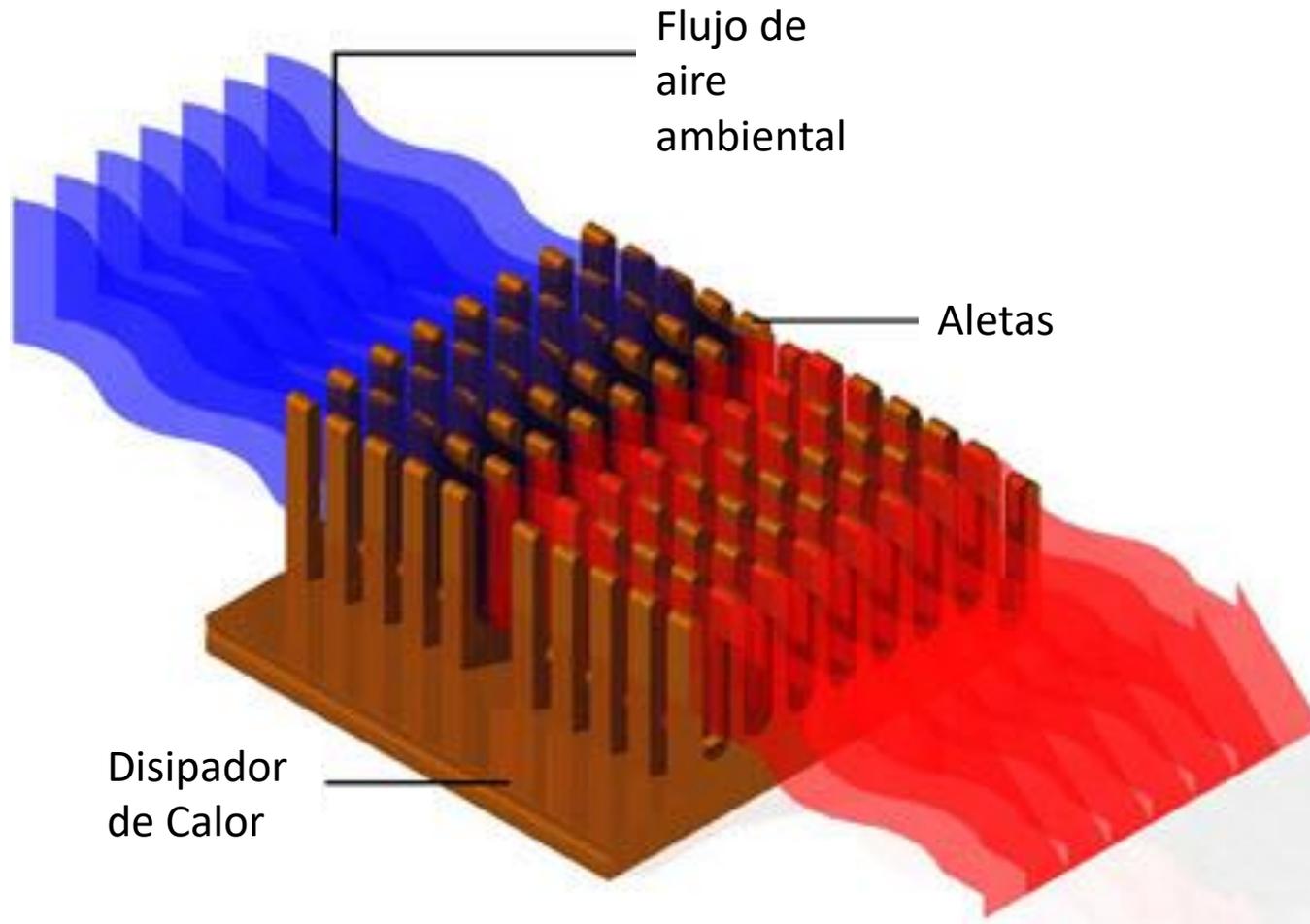
Diferencias en Requerimientos de Conducción de la Compuerta (MOSFET vs IGBT)

- IGBTs normalmente tienen una tensión de umbral (V_{Th}) compuerta-emisor mayor que los MOSFETs
- A elevadas temperaturas se requiere un voltaje compuerta-emisor mayor para asegurarse que el dispositivo permanece en saturación a una dada corriente en el colector
- $\therefore V_{GE}$ debe ser al menos 14 V (preferiblemente 15 V). En MOSFETs similares $V_{GS} = 10V$ es suficiente para asegurar saturación
- Como la capacitancia compuerta-emisor del IGBT es más pequeña comparado con los MOSFETs, el resistor de compuerta es preferiblemente mayor comparada a la del MOSFET (dos veces mayor o más). Esto limita $\frac{dv}{dt}$ encendido

Trabajo en Clases

- Buscar en digikey.com o mouser.com 5 distintos BJTs y MOSFETs de potencia y 5 IGBTs con características distintas.

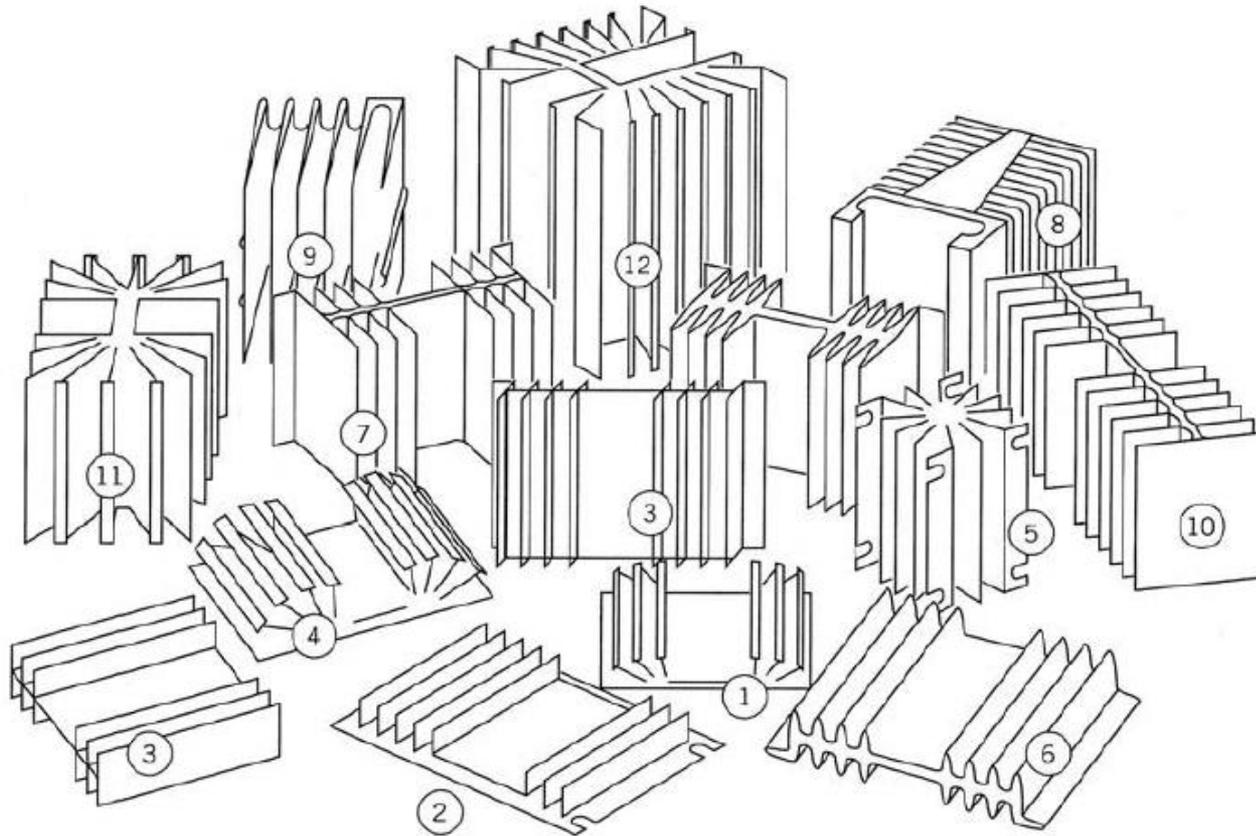
Disipadores de Calor



Distintos Materiales para Disipadores de Calor

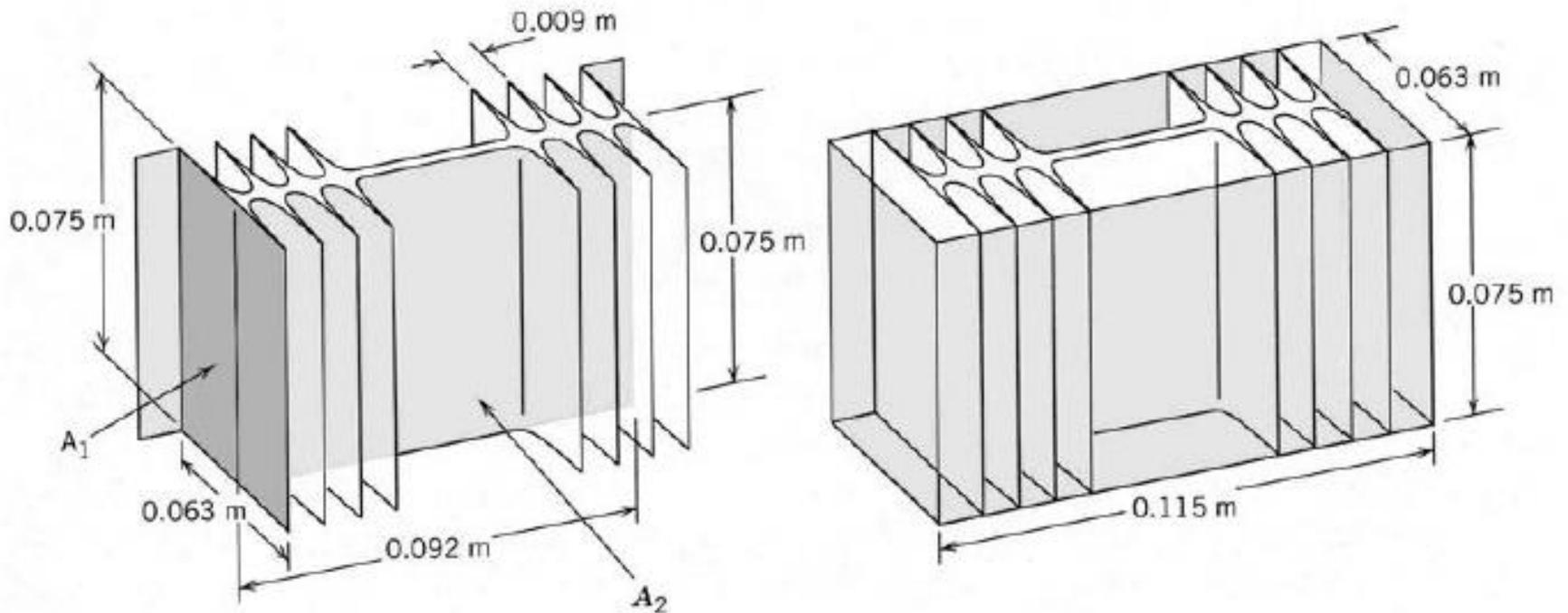
Material	Conductividad Térmica Típica	Característica
Aluminio	200 W/mK	Liviano
Cobre	400 W/mK	Más pesado

Selección de Disipadores de Calor

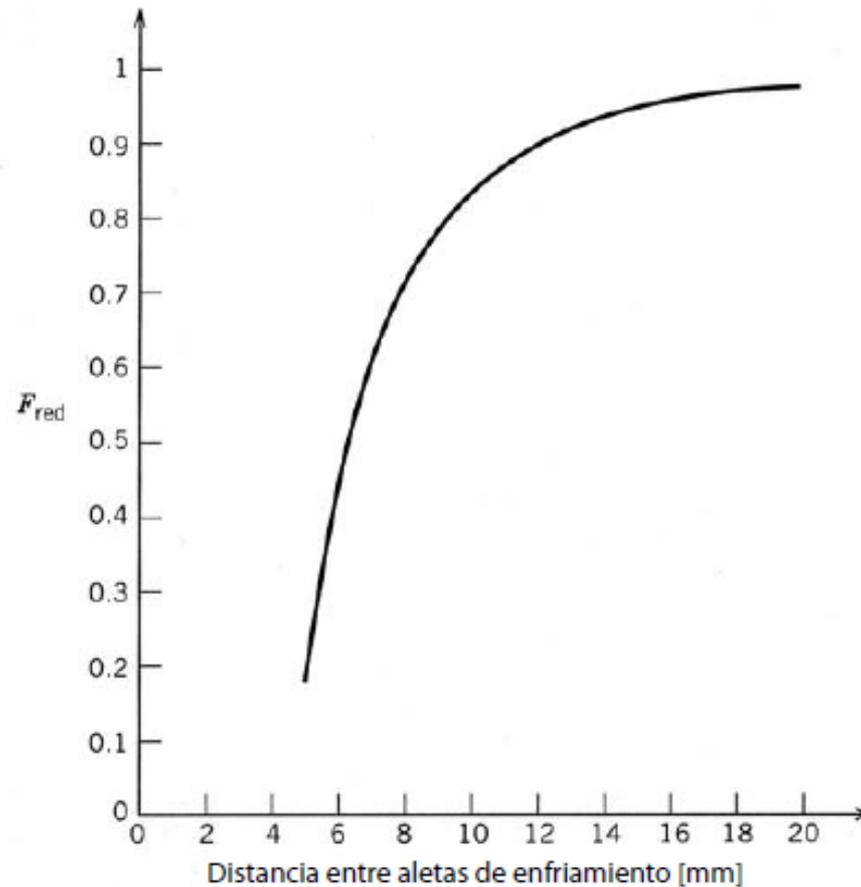


N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R_{da}	3.2	2.3	2.2	0	2.1	1.7	1.3	1.3	1.25	1.2	0.8	0.65
Vol (cm^3)	76	99	181	0	198	298	435	675	608	634	695	1311

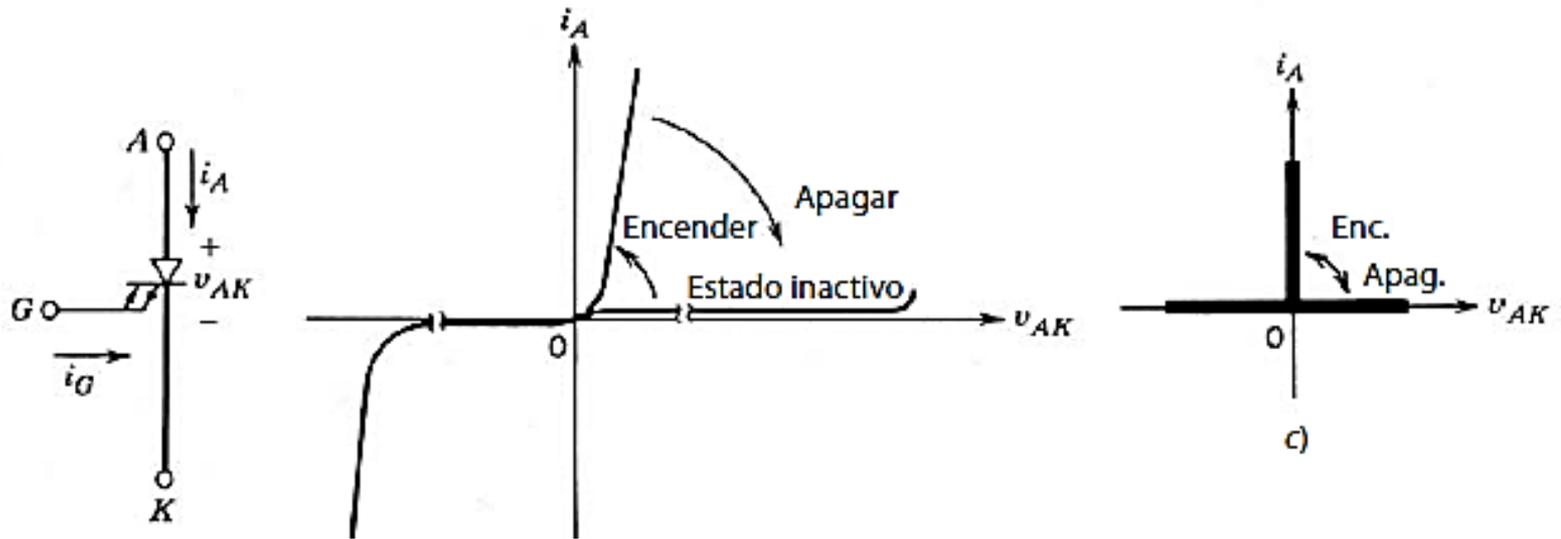
Ejemplo



Factor de Reducción (Calor por Convección)



Desactivación por puerta de tiristores (GTO)



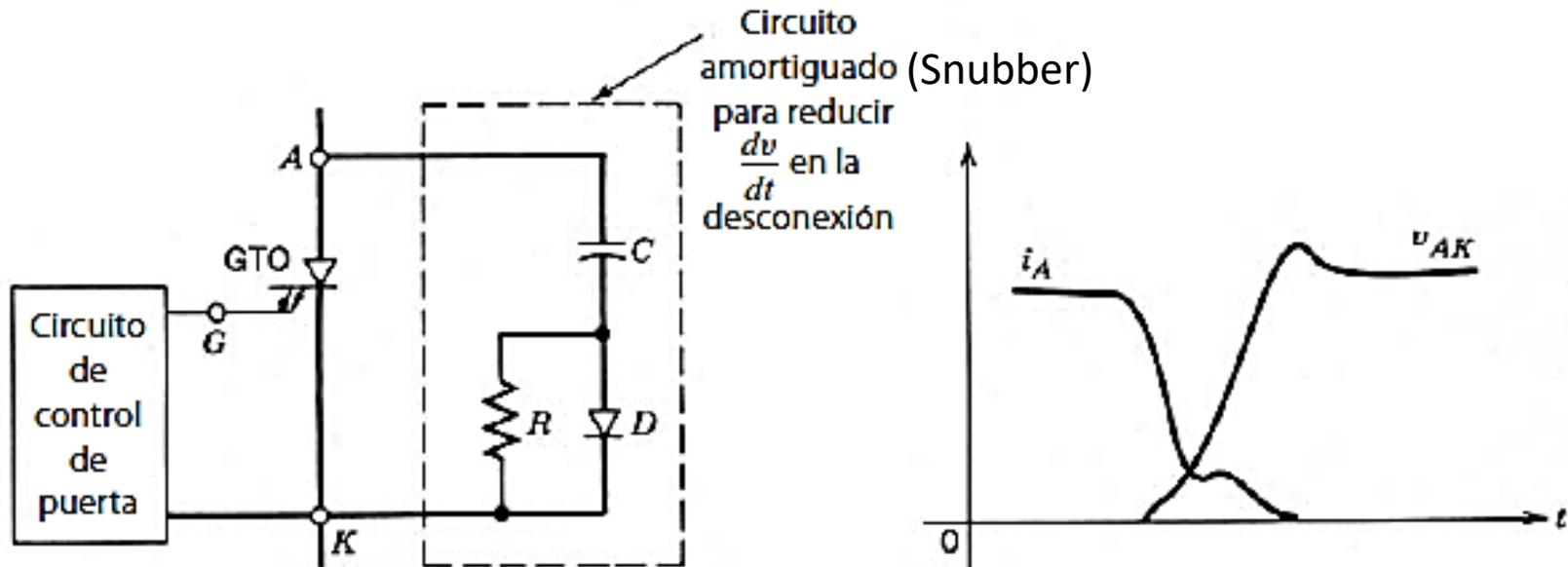
Características del GTO

- Se enciende por medio de un impulso de corriente de puerta de corta duración
- Se mantiene encendido sin más corriente de compuerta una vez activo
- Para apagarlo se aplica una tensión de puerta a cátodo negativa para que fluya una corriente de puerta negativa bastante grande (μs)
- Bloquean voltajes negativos (magnitud depende de los detalles del circuito amortiguador)

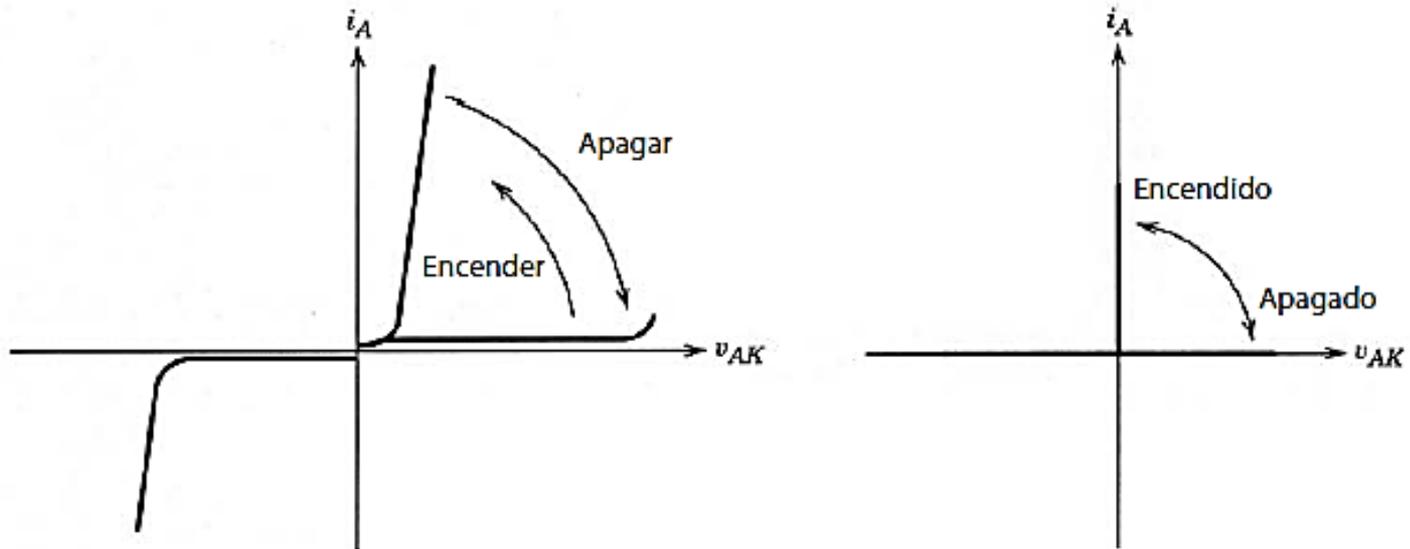
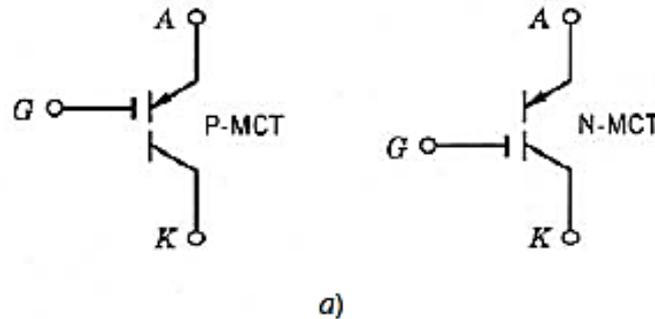
Características del GTO

- Voltaje de estado activo: 2-3 V
- Velocidades de conmutación: unos cuantos μs hasta 25 μs
- Capacidad de voltajes: hasta 4.5 kV
- Capacidad de corriente: hasta unos cuantos kA
- Frecuencia de conmutación: 100xHz hasta 10 kHz

Transitorio de Desconexión de la Puerta



Tiristores Controlados MOS (MCT)



Características del MCT

- Dispositivo controlado por tensión
- Caída de baja tensión en el estado activo con relativamente altas corrientes
- Permanece encendido aún cuando se quita la activación de la puerta
- Requiere más o menos la misma energía para conmutar un MCT que un MOSFET o IGBT

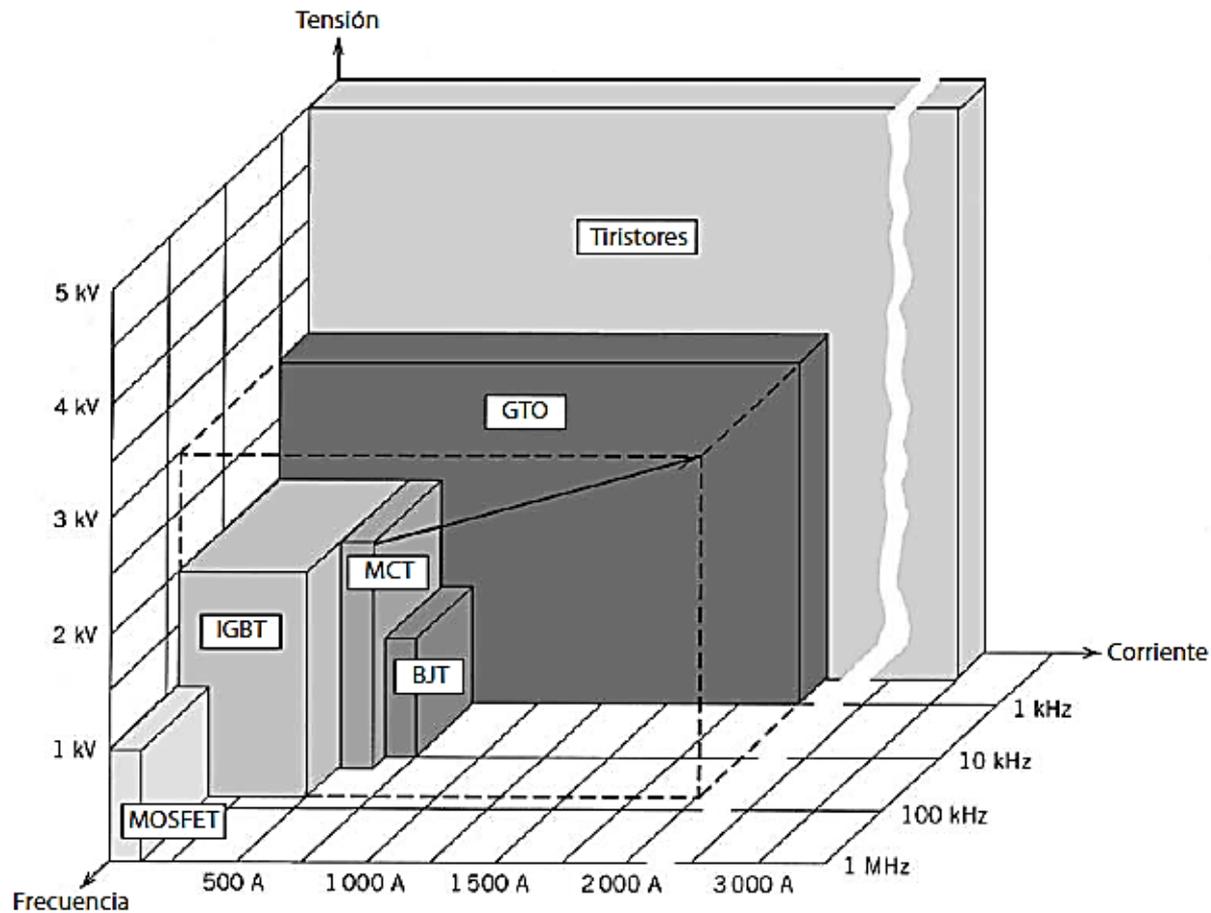
Ventajas del MCT

- Requisitos de control sencillos
- Velocidades de conmutación más rápidas que el GTO (unos cuantos μs)
- Caídas de voltaje de estado activo más pequeña que en IGBT
- Disponible en tensiones nominales hasta 1500 V
- Corrientes nominales de 50 A a unos cuantos cientos de amperios

Comparación de Interruptores Controlables

Dispositivo	Capacidad de Potencia	Velocidad de Conmutación
BJT/MD	Media	Media
MOSFET	Baja	Rápida
GTO	Alta	Lenta
IGBT	Media	Media
MCT	Media	Media

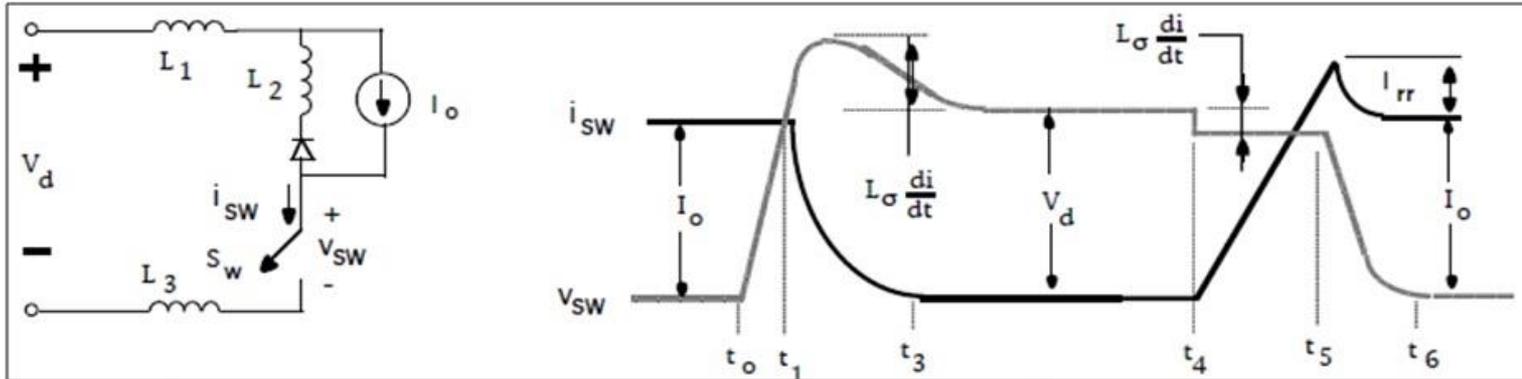
Capacidades de Dispositivos de Semiconductores de Potencia



Circuitos de Amortiguadores

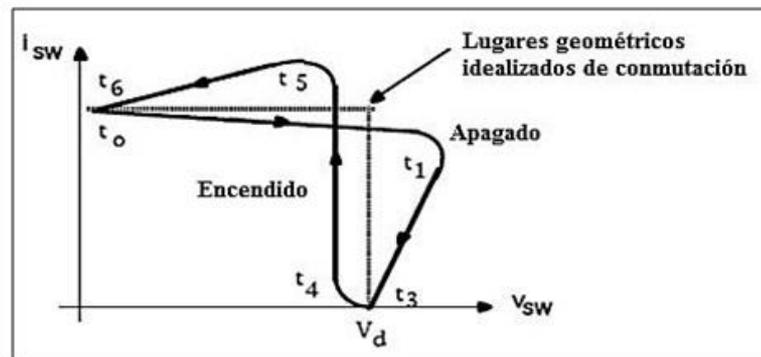
- Objetivo: modificar las formas de onda de conmutación de interruptores controlables
- Categorías:
 - Amortiguadores de conexión para minimizar grandes sobrecorrientes a través del dispositivo en la fase de encendido
 - Amortiguadores de desconexión para minimizar grandes sobretensiones a través del dispositivo en la fase de apagado
 - Amortiguadores reductores de esfuerzo que forman las formas de ondas de conmutación del dispositivo (V , I asociadas al dispositivo no estén en alto en forma simultánea)

Convertidor sin Circuitos de Amortiguadores



1

2



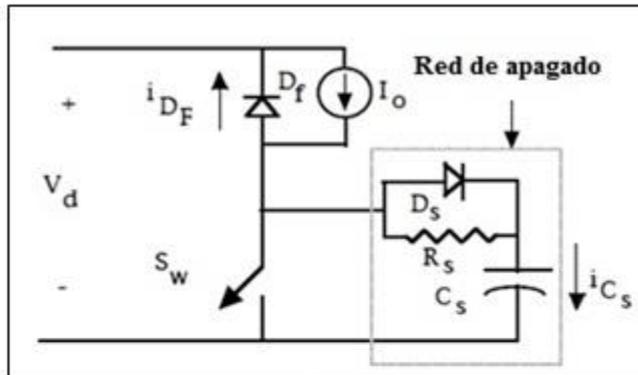
3

Asumiendo:
 -Cero inductancias parásitas
 -No hay corriente de recuperación reversa en el diodo

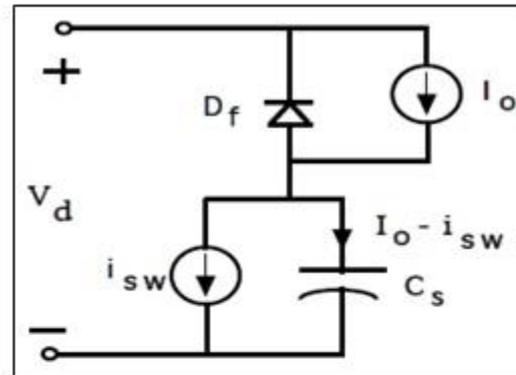
Consecuencias del Uso de Convertidor sin Circuitos de Amortiguadores

- El transistor sufre grandes esfuerzos en el encendido y apagado cuando su voltaje y corriente están en el mismo tiempo
- Se produce una alta disipación de potencia
- L_{σ} generan una sobretensión más allá de V_d
- L_{σ} producen una sobrecorriente más allá de I_o

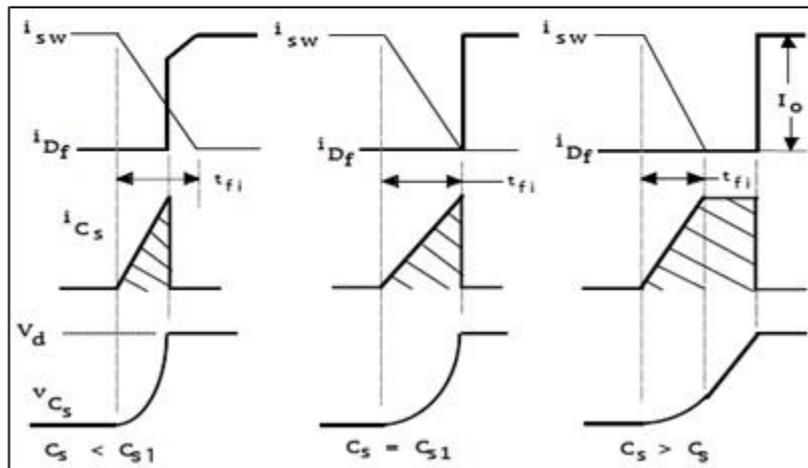
Snubber de Bloqueo o Apagado



1



2



3

Objetivo: proveer un voltaje cero a través del transistor mientras la corriente se apaga

Snubber de Bloqueo o Apagado

- Antes del apagado, la corriente del transistor es I_0 y el voltaje del transistor es esencialmente cero
- En el apagado:
 - i_c disminuye con un di/dt constante
 - $(I_0 - i_c)$ fluyen en el condensador a través del diodo D_s
 - $i_{c_s} = \frac{I_0 t}{t_{fi}}$ para $0 < t < t_{fi}$ donde $i_{c_s} = 0$ antes del apagado en $t = 0$
 - $V_{c_s} = V_{CE} = \frac{1}{C_s} \int_0^t i_{c_s} dt = \frac{1}{C_s} \int_0^t \frac{I_0 t}{t_{fi}} dt = \frac{I_0 t^2}{2C_s t_{fi}}$

Selección de Cs y Rs en Snubber de Bloqueo

- $C_{S1} = \frac{I_0 t_{fi}}{2V_d}$
- $\frac{V_d}{R_s} < I_{rr}$
- Diseñador
- $\frac{V_d}{R_s} = 0.2I_0$

Potencia Disipada en el Snubber de Apagado

- Disipada por R_s

$$P_{R_s} = \frac{C_s (V_d)^2}{2} f_s$$

f_s = frecuencia de conmutación

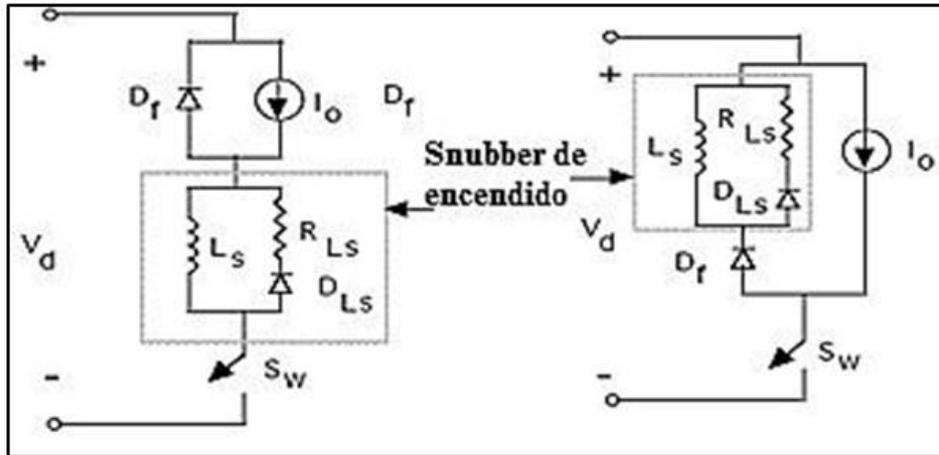
- Disipada por el transistor de snubber de apagado:

$$P_Q = \frac{I_o^2 t_{fi}^2 f_s}{24 C_{s1}}$$

Beneficios durante el encendido del transistor

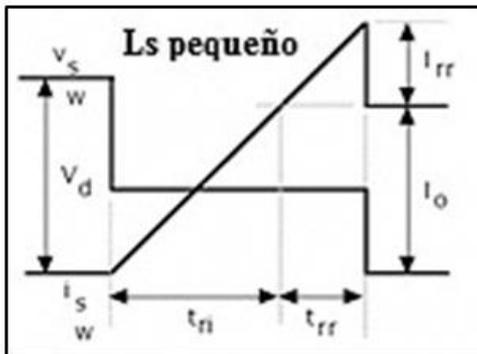
- Toda la energía del condensador se disipa en R_s → más fácil que enfriar que el transistor
- No ocurre ninguna disipación adicional en el transistor debido al *snubber* de apagado
- La corriente pico a conducir en el transistor no aumenta debido al *snubber* de apagado

Snubber de Disparo o Encendido

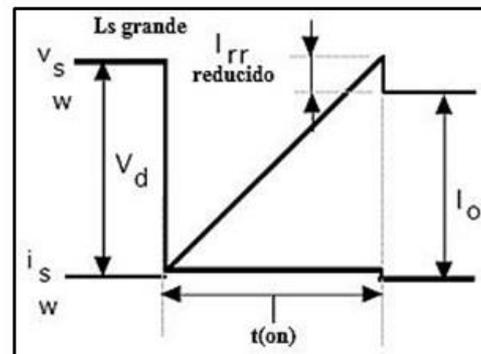


1

- Objetivo: reducir pérdidas por conmutación con altas frecuencias y limitar la máxima corriente de recuperación reversa del diodo



2



3

Snubber de Disparo o Encendido

- Trabajan mediante la reducción del voltaje a través del transistor a medida que se acumula la corriente
- Puede estar en serie con el transistor o con el diodo de libre circulación (formas de onda de conmutación son iguales para ambas configuraciones)
- La reducción de voltaje del transistor durante el encendido es debido a la caída de voltaje en L_S y está dada por:
$$\Delta V_{SW} = \frac{L_S I_o}{t_{ri}}$$
- t_{ri} = tiempo de subida de la corriente para valores pequeños de L_S

Snubber de Disparo o Encendido

- Corriente pico de recuperación reversa del diodo es la misma que sin el snubber de encendido
- Para reducir la corriente pico de recuperación reversa del diodo, colocar L_S grande
- Para la selección de R_{L_S} considerar:
 - $\Delta V_{SW,max} = R_{L_S} I_o$
 - $t_{estado\ inactivo} > 2.3 \frac{L_S}{R_{L_S}}$ para el transistor

Potencia Disipada en el Snubber de Encendido

- Disipada por R_{LS}

$$P_{R_{LS}} = \frac{L_s(I_o)^2}{2} f_s$$

f_s = frecuencia de conmutación

- Disipada por el transistor de snubber de encendido:

$$P_Q = \frac{(V_d - \Delta V_{SW}) I_o t_{ri} f_s}{2}$$

Consecuencias de Aplicación del Snubber de Encendido

- Una inductancia grande produce:
 - Voltajes de encendido más bajos
 - Pérdidas por encendido más bajas
- Se producen sobretensiones durante el apagado
- Se alarga el intervalo mínimo requerido en estado inactivo
- Se producen pérdidas más grandes en el snubber
- Se debe cuidar la selección de L_s y R_Ls