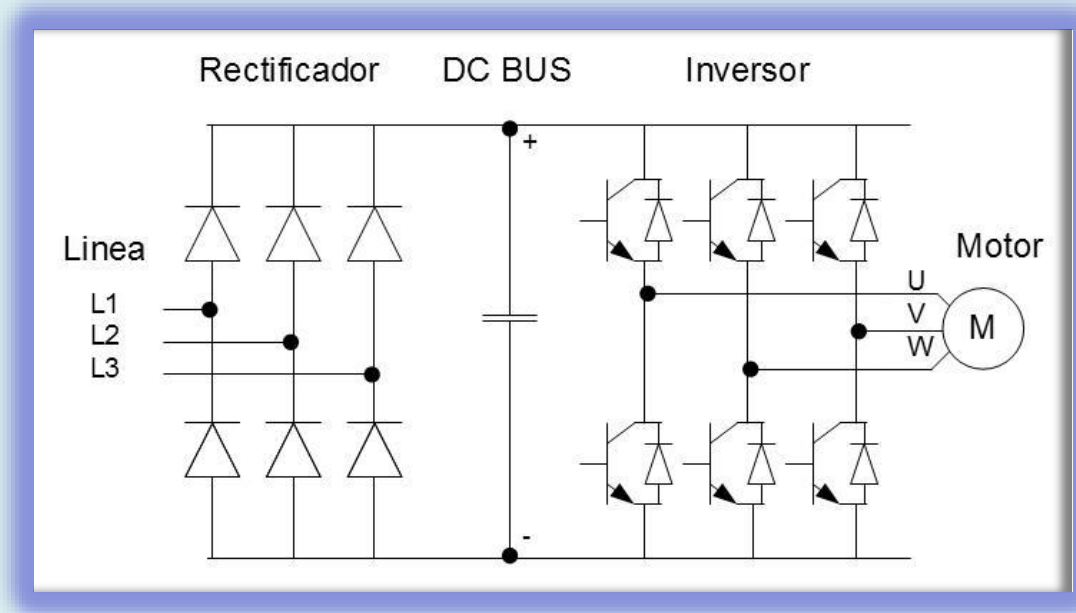


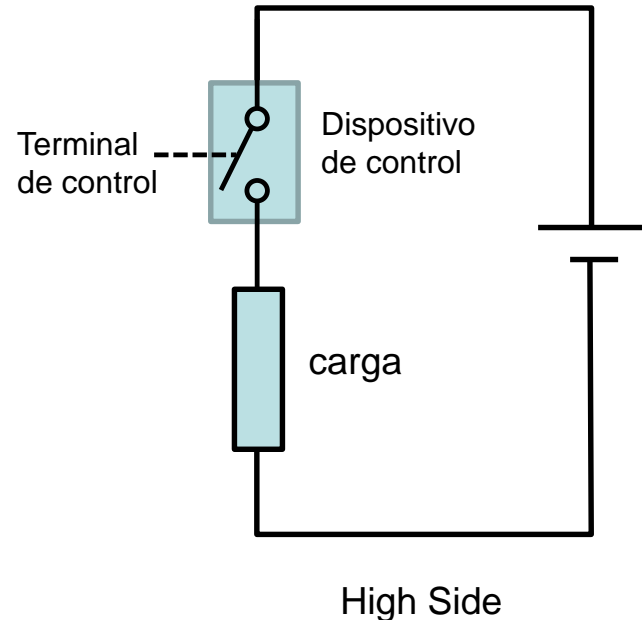
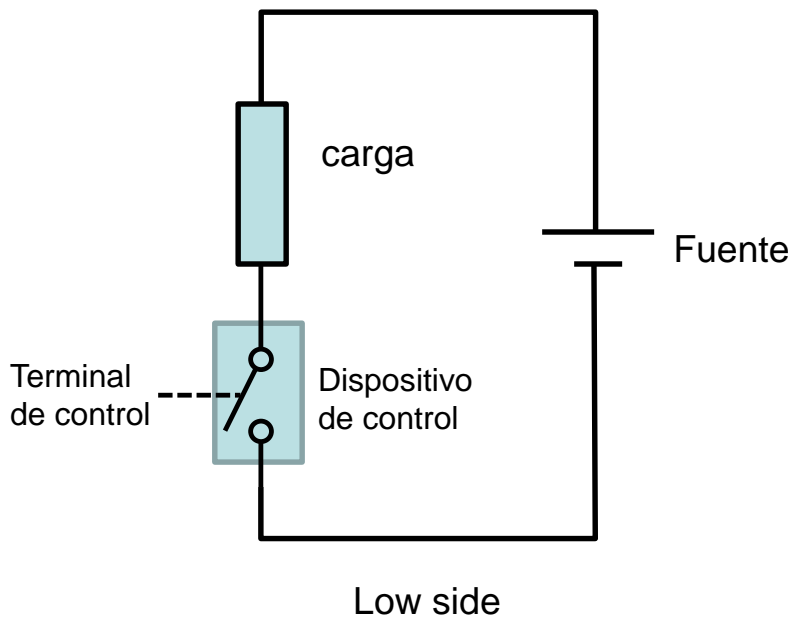
Unidad 2: Principios de Electrónica de Potencia



2.A Introducción

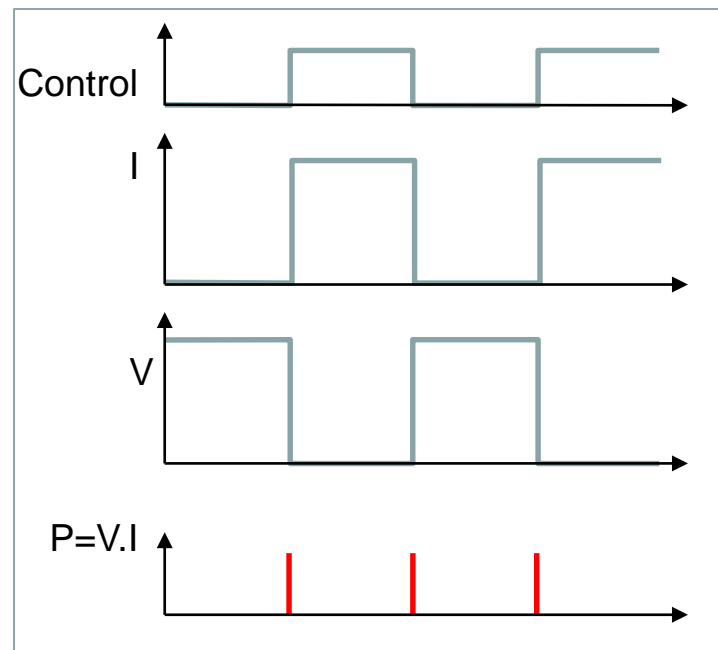
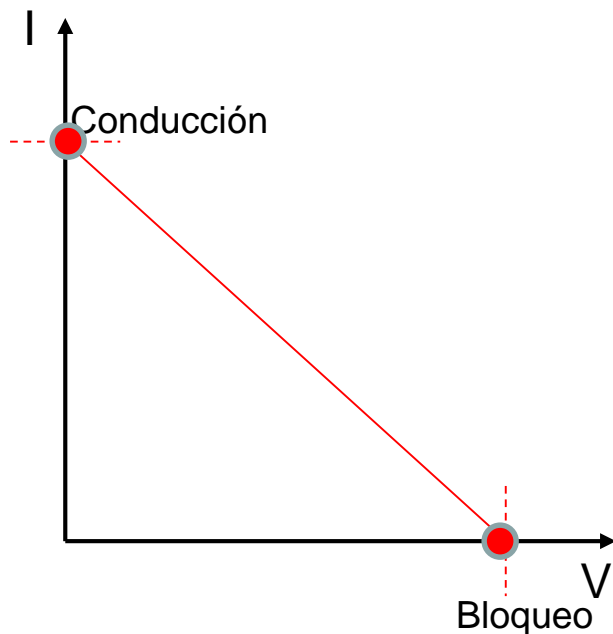
Regulación de potencia. Régimen de conmutación

- La Regulación Electrónica de Potencia consiste en interponer un circuito electrónico, con uno o más dispositivos controlados (Ej. Transistor/es), entre la Fuente de entrada y la Carga.
- En aplicaciones de alta potencia se utiliza casi exclusivamente el régimen de **Conmutación**, con métodos como PWM, control de fase (subciclo) o control multiciclo.
- Los dispositivos controlados trabajan como **llaves** que pasan del estado abierto (bloqueo) a cerrado (conducción) mediante una **entrada de control** (Ej transistor controlado por V_{be}).
- Este cambio de estado **bloqueo** \leftrightarrow **conducción** se denomina conmutación.
- Según las características dinámicas del sistema a controlar, se requieren frecuencias de conmutación de pocas decenas de Hz a cientos de KHz.



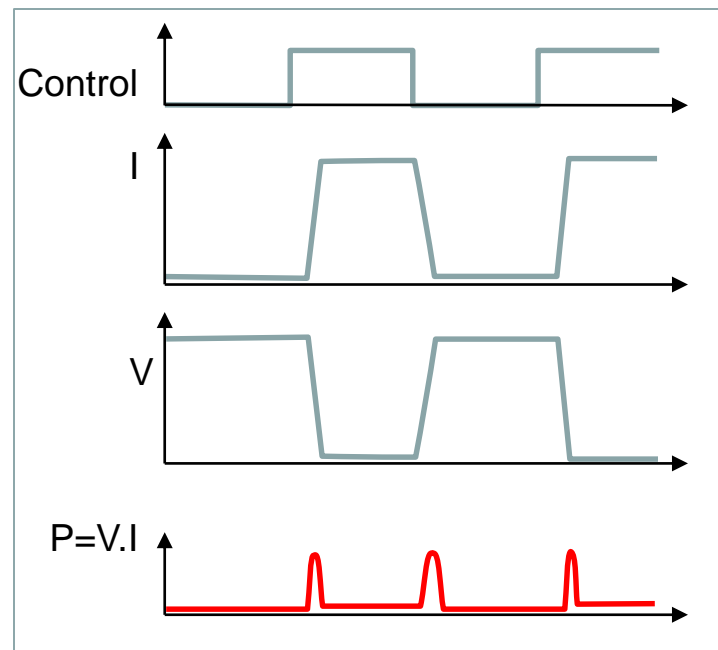
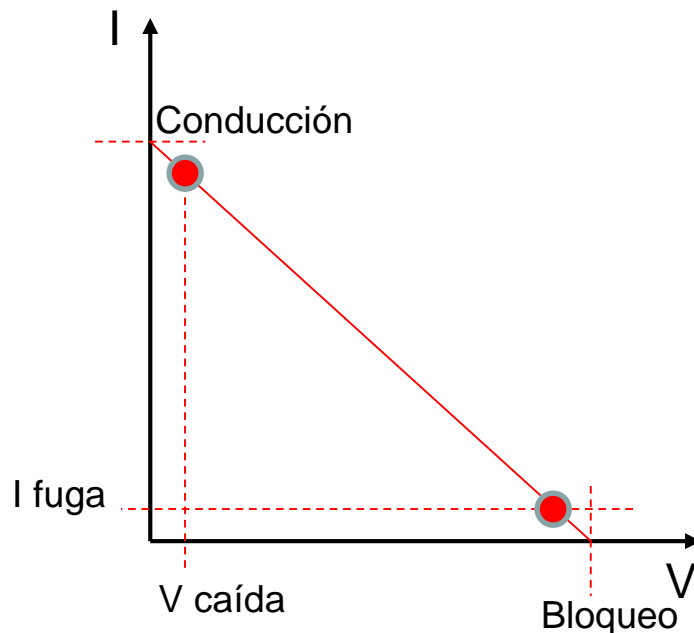
Características de una llave electrónica ideal

- Caída de voltaje nula en conducción, sin límite de corriente.
- Corriente de fuga nula en bloqueo, sin límite de voltaje.
- Paso instantáneo de un estado al otro.
- Control sencillo, como valores lógicos de tensión (0-5v) con mínima demanda de corriente.



Llave real (diodo, transistor, tiristor etc)

- Caída de voltaje (y por ello disipación de potencia) durante la conducción, del orden de 1 ó 2 volts en dispositivos bipolares, o por efecto de una resistencia de conducción del orden de miliohms en dispositivos unipolares.
- Corrientes de fuga durante bloqueo, encendido inducido por excesiva dV/dt .
- Tiempo de conmutación **finito**, de ns a decenas/cientos de μs (particularmente el T_{off}), que produce disipación de potencia en el dispositivo.
- Límites operativos de potencia, corriente y tensión (si se pasan el dispositivo se destruye).
- Efectos que dificultan el bloqueo o producen oscilaciones en la conmutación.
- Efectos que producen la destrucción durante el bloqueo o la conducción.
- Necesidad de circuitos de control de diversa complejidad.



Problemas (temas de estudio) de la Electrónica de Potencia

- **Topología del control** (esquema circuital) dada la aplicación.
- **Dispositivos:** Conocimiento de la tecnología de los dispositivos, materiales, construcción, principio de funcionamiento, SOA, características estáticas y dinámicas, eléctricas y térmicas, para definir su ámbito de aplicación. O, dada la aplicación, elegir con criterio el dispositivo adecuado.
- **Circuitos y técnicas** para el encendido, apagado, protección e inmunización.
- **Técnicas de agrupamiento** de dispositivos para aumentar su capacidad de bloqueo (dispositivos en serie) o de conducción (dispositivos en paralelo), y efectos que limitan las prestaciones de los agrupamientos.
- **Encapsulados, Montajes** y técnicas para disipación del calor, robustez frente a ciclos térmicos, aislación eléctrica.
- **Medición de grandes corrientes** en CC y CA.
- **Gestión de sistemas:** encendido, *setpoints*, diagnóstico de alarmas y fallas
 - SOA: *Safe Operating Area*. Área de funcionamiento seguro

Pasos en el diseño de un sistema de potencia

1) Especificaciones externas:

Dadas por la **aplicación**.

Niveles de tensión, corrientes e impedancias de las fuentes de entrada (monofásica, trifásica, CC etc) y cargas de salida (motores CC-CA, R etc)

Condiciones ambientales: Térmicas, barométricas, electromagnéticas etc.

Otras restricciones, normativas etc.

2) Topología y modo de control:

Esquema de conexionado de dispositivos (“llaves”, diodos, elementos reactivos) según fases y niveles de tensión/corriente de entrada y salida.

3) Especificaciones internas:

Corrientes, tensiones y frecuencias de conmutación de los elementos derivadas de la topología escogida.

4) Dispositivos:

Elección de elementos activos. Tipo (MOSFET, IGBT, Tiristor, BJT etc) y modelos según corrientes, tensiones y frecuencias.

5) [Agrupamiento]:

Considerar la posibilidad en caso de rangos muy exigentes de corriente o tensión.

6) Cálculo térmico:

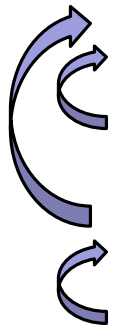
Estimación de las pérdidas en conmutación (potencia a disipar), cálculo de disipadores /ventilación a partir del incremento de temperatura admisible e impedancias térmicas de encapsulados, recálculo de disipadores.

7) Circuitos de excitación/bloqueo, protección e inmunización:

Dimensionamiento de drivers, snubbers, aislaciones, diodos etc.

8) Diseño de montaje definitivo:

Accesorios y técnicas de sujeción mecánica, aislación térmica y eléctrica, cableados.



Es un proceso iterativo, puede requerir replanteo aún de las primeras etapas

1) Algunas aplicaciones de la Electrónica de Potencia

Control de movimiento

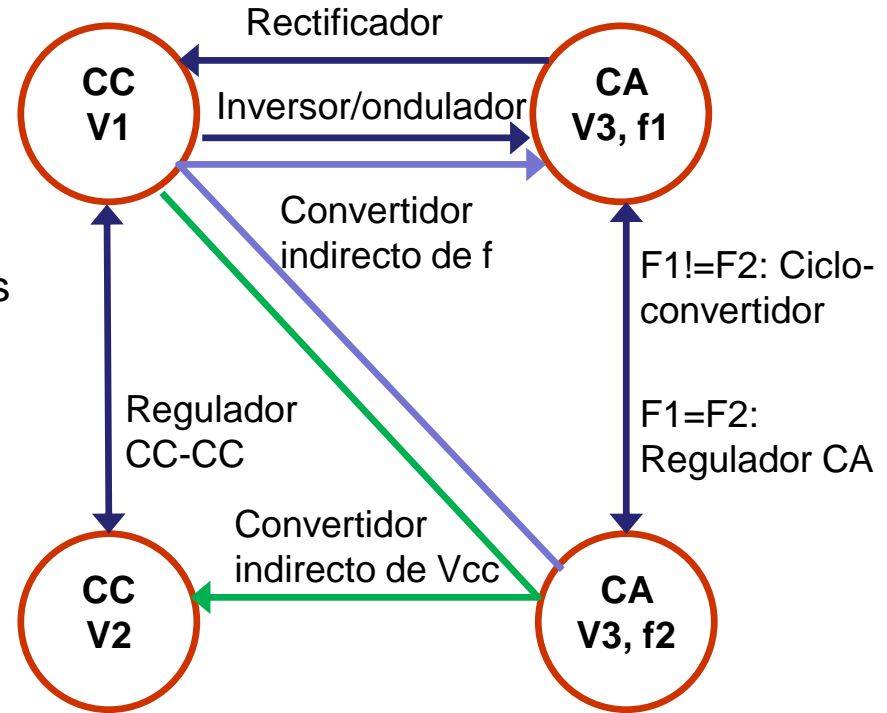
- Vehículos eléctricos (motos, automóviles, autobuses, trenes, AGVs etc)
- Transportadores (ascensores, escaleras mecánicas, cintas etc)
 - Control de tracción/velocidad, freno regenerativo.
- Bombas, ventiladores y compresores.
 - Rotación constante, poca variación de par.
- Máquinas-herramienta, Robótica (control en posición/velocidad/torque)
 - Control preciso de posición, velocidad y/o torque
- Generadores eólicos, hidroeléctricos, a combustible.
 - Basados en alternadores en su última etapa
- Máquinas extrusoras, rotativas, textiles
 - Control de velocidades proporcionales.

Otras

- Fuentes de alimentación. Cargadores/inversores para generadores solares/baterías, UPSs.
 - Rectificación CA/CC, Control de corriente y tensión en DC, generación de CA.
- Hornos eléctricos resistivos, cubas de electrólisis etc.
 - Carga resistiva/capacitiva.
- Correctores de factor de potencia
 - Intercambio de energía con la red para compensar atraso de corriente.

Conversión de potencia implicada en las aplicaciones

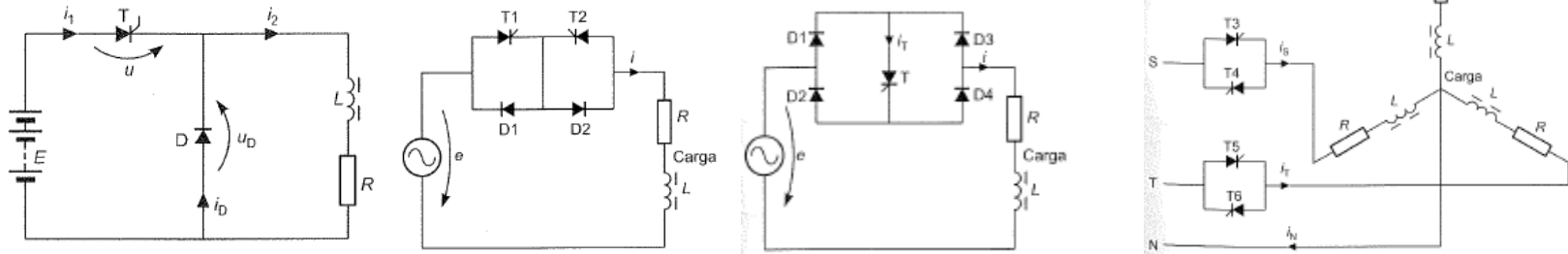
- Reguladores de V_{cc} (CC/CC)
 - Lineales o disipativos
 - Conmutados: Reductores o elevadores
- Reguladores de V_{ca} , sin cambio de f
 - Basados en transformadores e inductancias
 - Basados en CA/CC y CC/CA – (ej UPS)
- Reguladores de V_{ca} con cambio de f
 - Cicloconvertidores
 - UPS
- Rectificadores CA/CC.
 - No controlados (diodos).
 - Controlados (tiristores y transistores)
- Inversores CC/CA



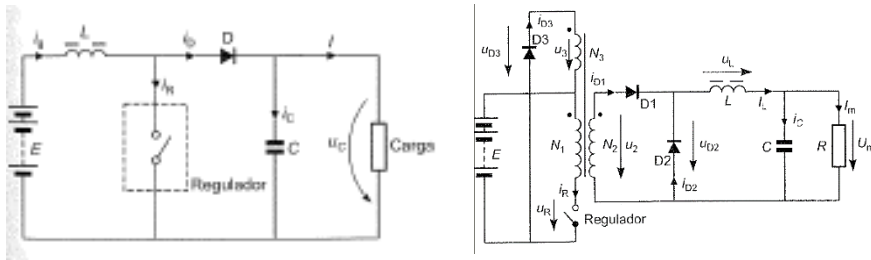
Otros: Interruptores estáticos de CC y CA, filtros activos de I y V , acondicionadores conmutados, correctores de Factor de Potencia

2) Topologías → 3) Especificaciones internas

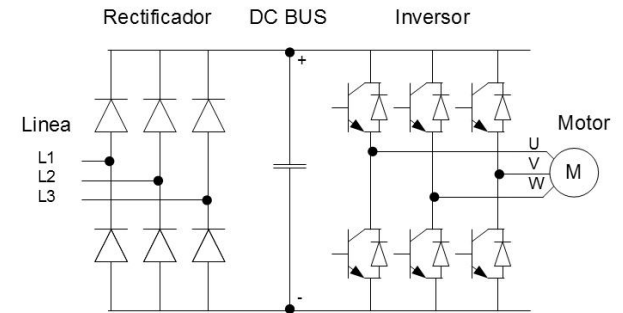
Interrupidores estáticos de CC y CA



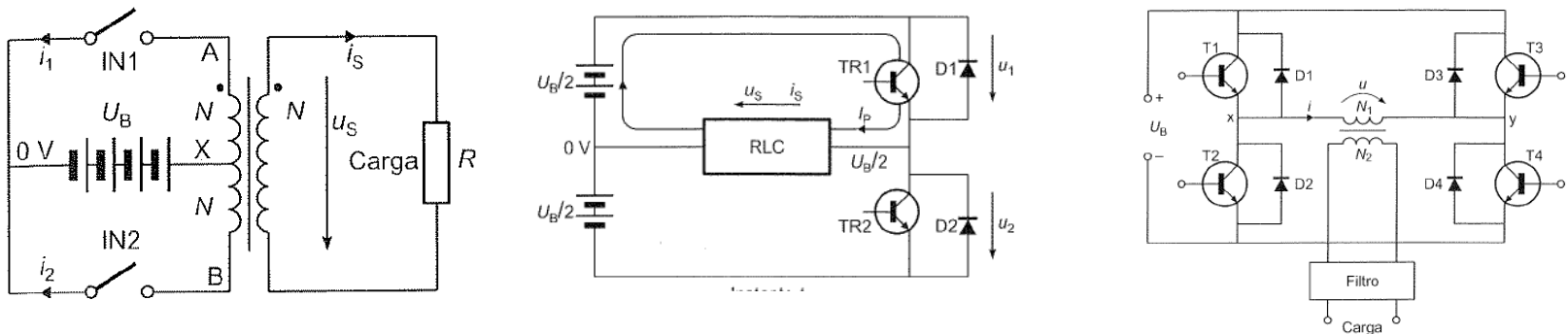
Reguladores de Vcc



Convertidores Trifásicos



Inversores CC/CA

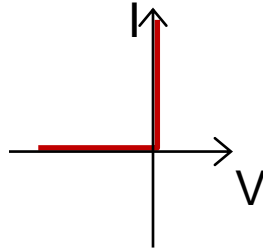


4) Dispositivos de conmutación de potencia PSD

NO CONTROLADOS

- **Diodos**

- P-N
- P-I-N (alta tensión)
- Schottky
- FRED (*Fast Recovery Epitaxial Diode*)



- **Auxiliares**

- DIAC
- Diodo Zener/avalancha
- MOV (*Metal-oxide-varistor*)

CONTROLADOS (por terminal denominado base o puerta)

- **Tiristores (regenerativos)**

- PCT - SCR (*phase controlled thyristor*)
- IGCT (*Integrated Gate Controlled Thyristor*)
- GTO (*Gate Turn Off Thyristor*)

- **Transistor Bipolar (BJT)** (*bipolar junction*)

- **MOSFET**

- VMOS/DMOS
- Trench MOS
- SJ MOS (*Super Junction MOSFET*)

- **IGBT** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

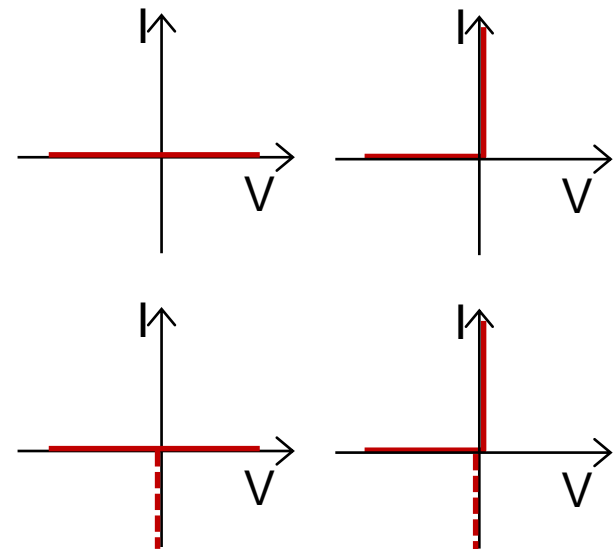
- IGBT1,2,3,4

- **Integrados (PIC)** (*Power Integrated Circuit*)

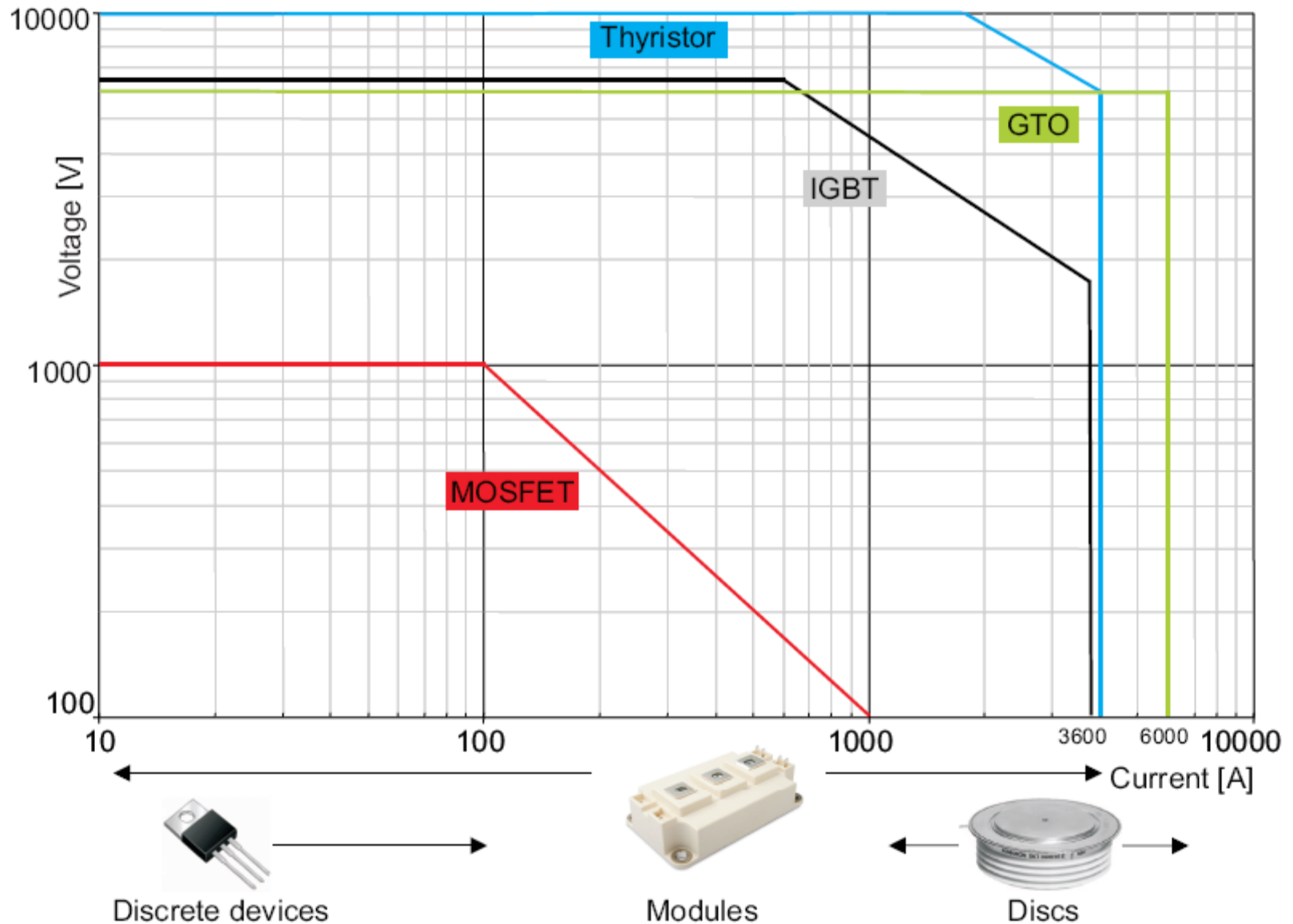
(en MOSFETs hay conducción por diodo zener integrado)

Bloqueo

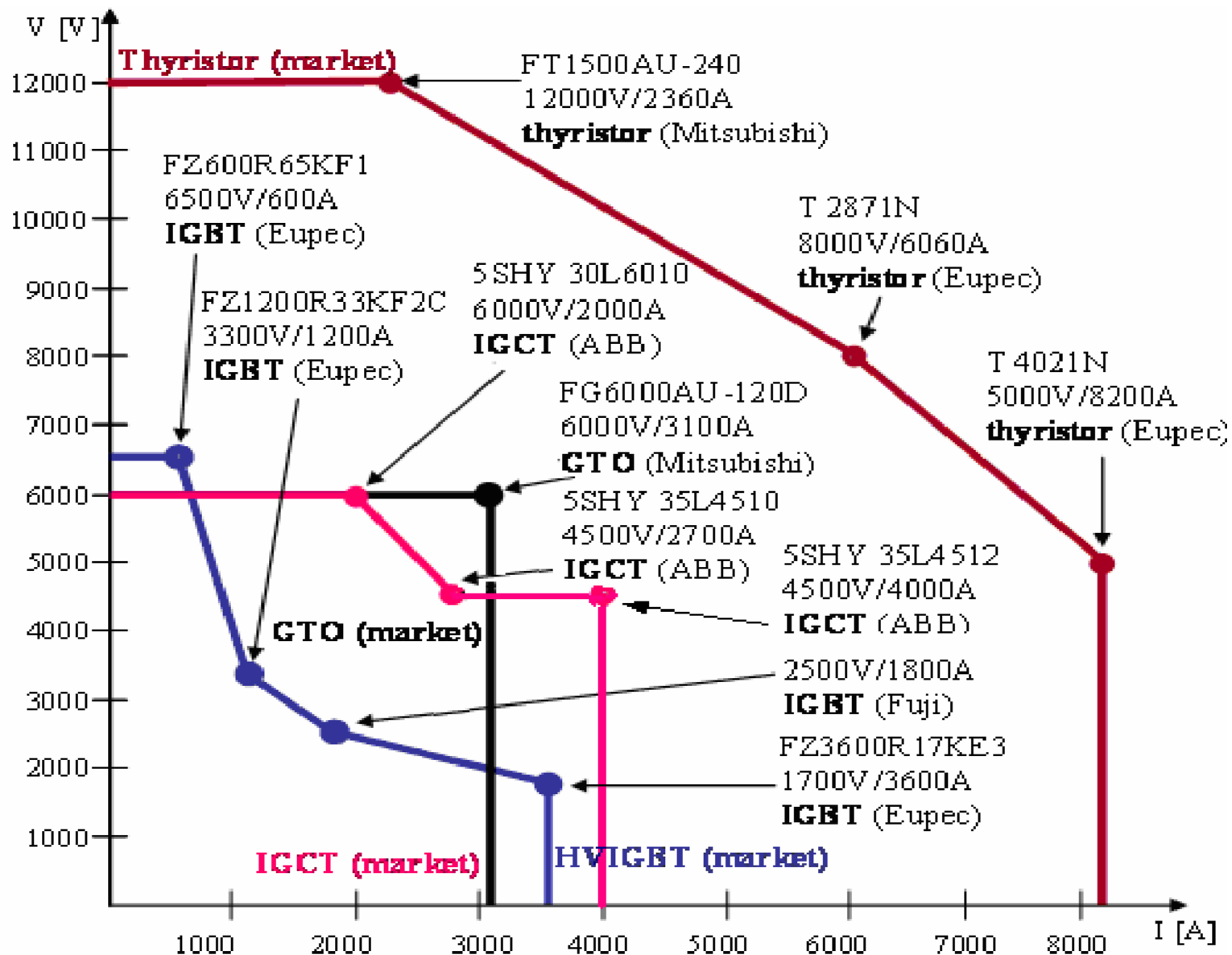
Conducción



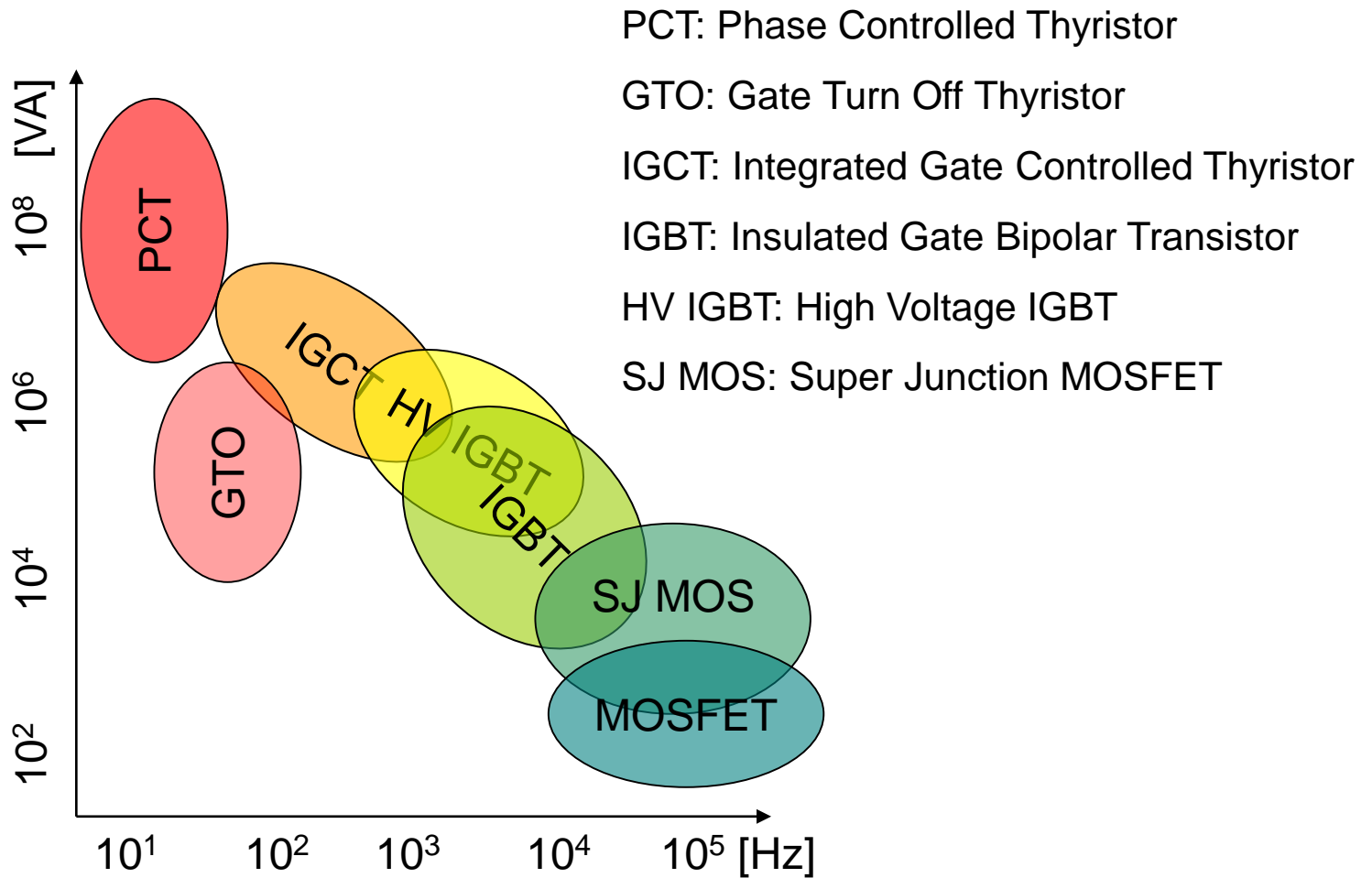
Dispositivos en el límite tensión/corriente



Dispositivos en el límite tensión/corriente (2)



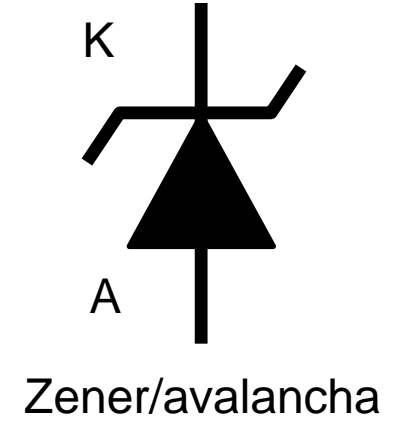
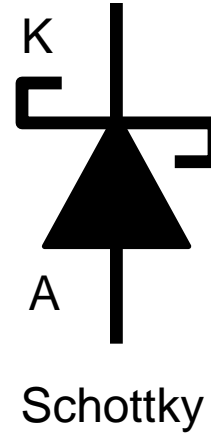
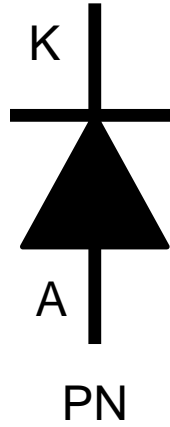
Dispositivos en el límite Potencia / Frecuencia



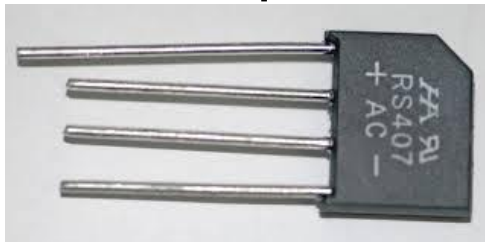
2.B Dispositivos

Diodos

Símbolos



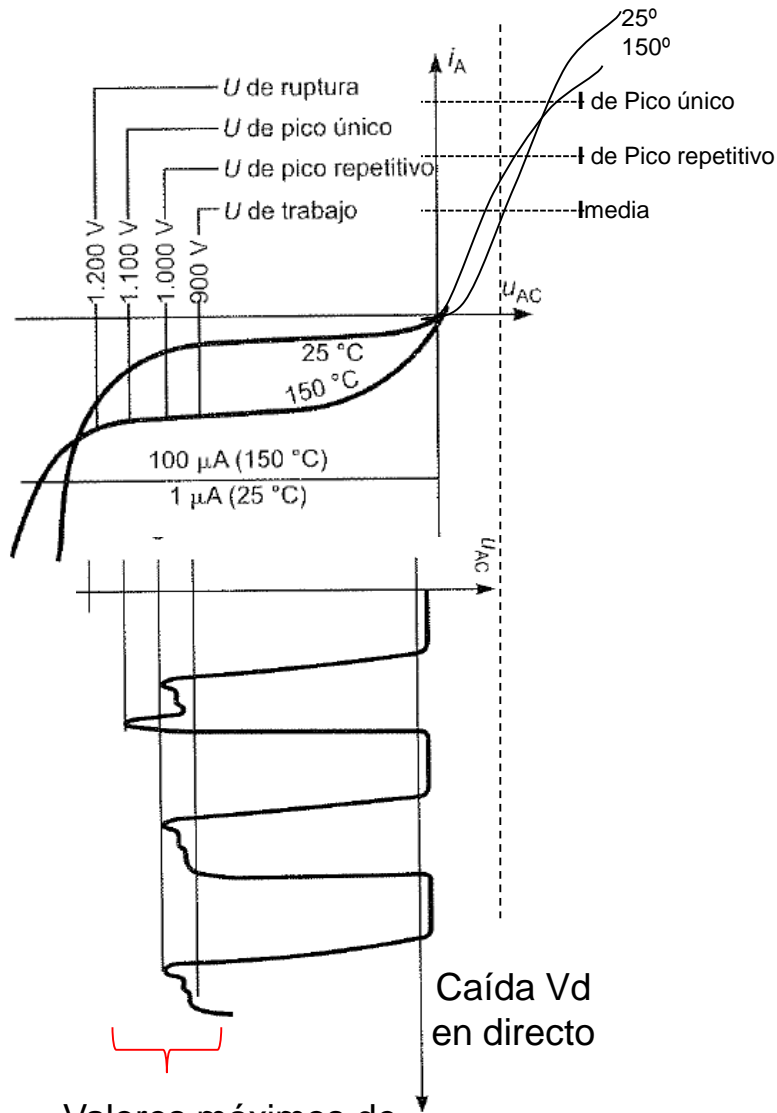
Encapsulados



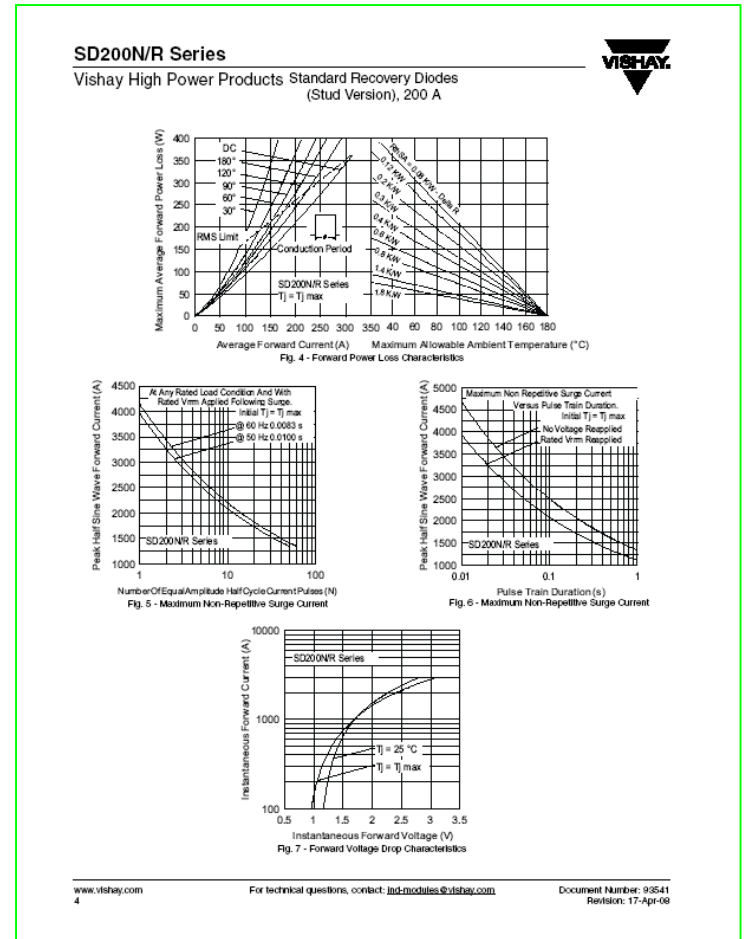
Diodos de potencia

Tipo de diodo	V ruptura (máxima actual)	I_{max}	V_{fw}	T_{sw}	Aplicación
Rectificadores de alta tensión	30kV	500mA	10V	100ns	Circuitos de alta tensión
Propósito general	5kV	10kA	0.7 a 2.5V	<25μs	Rectificadores 50/60Hz
Rápidos (fast recovery)	3kV	2kA	0.7 a 1.5V	<5μs	Conmutación <100kHz
Diodos Schottky	100V...300V	300A	0.2 a 0.9V	30ns	Conmutación f>100kHz
Diodos Zener de potencia	300V	75W (I _r)			Referencia y enclavamiento

Diodo PN

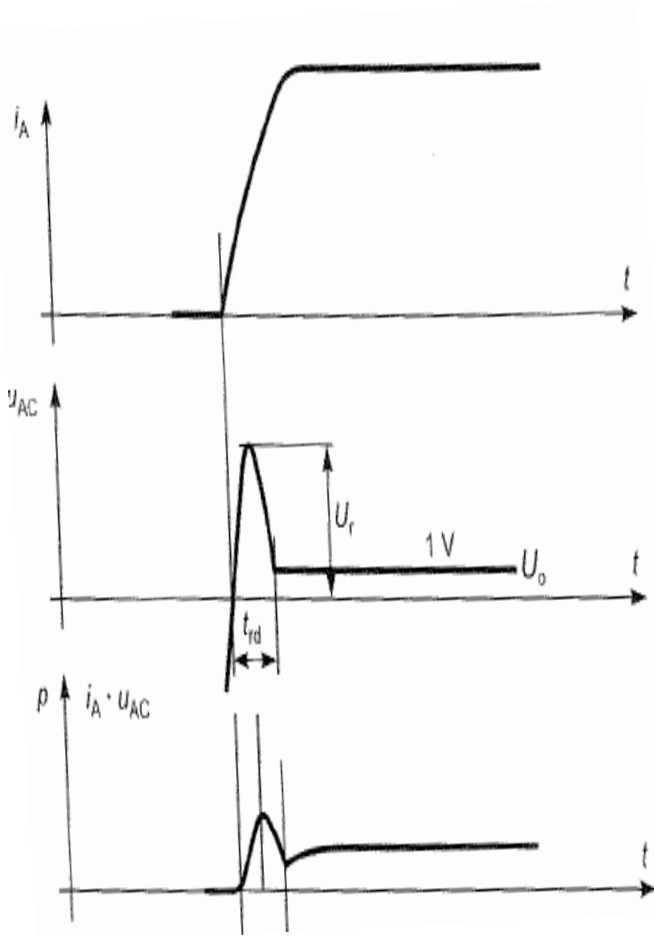


Valores máximos de corriente en conducción

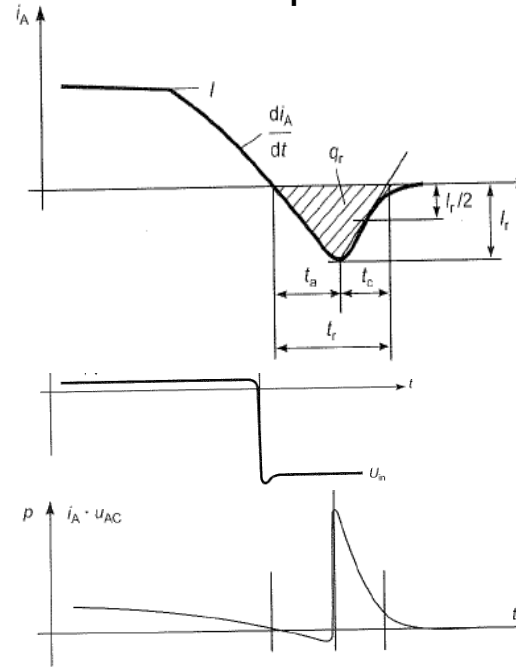


Diodo PN de propósito general

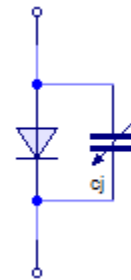
Recuperación directa



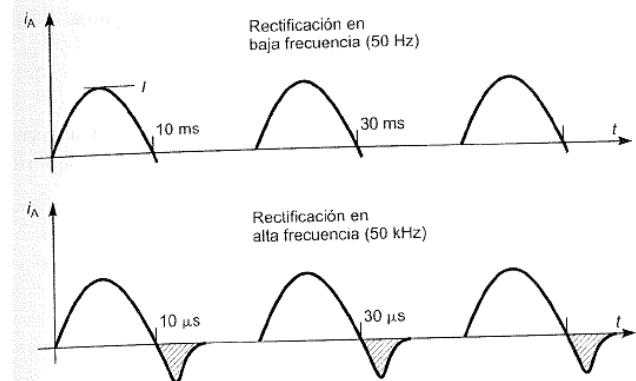
Recuperación inversa



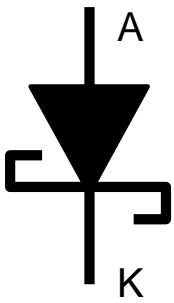
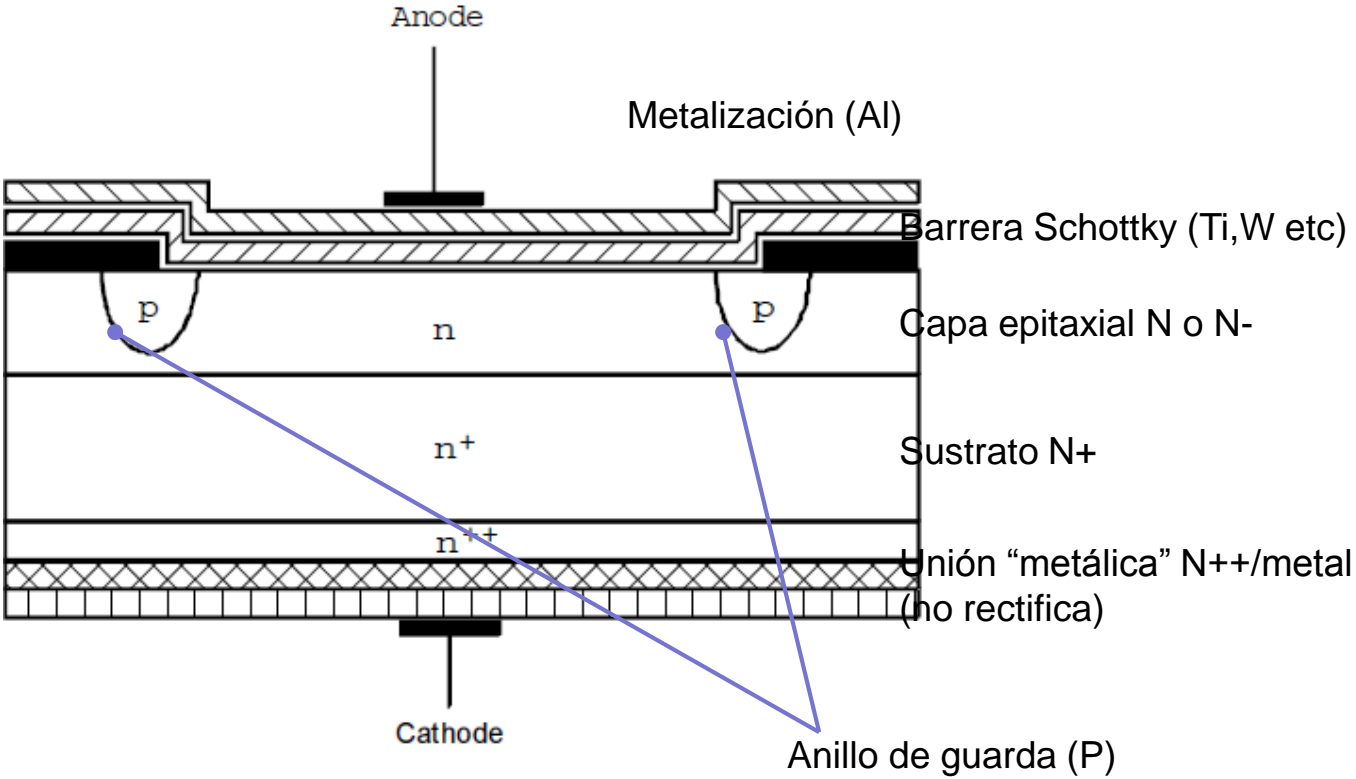
t_a : tiempo de almacenamiento
 t_c : tiempo de caída
 t_r : tiempo de recuperación inversa



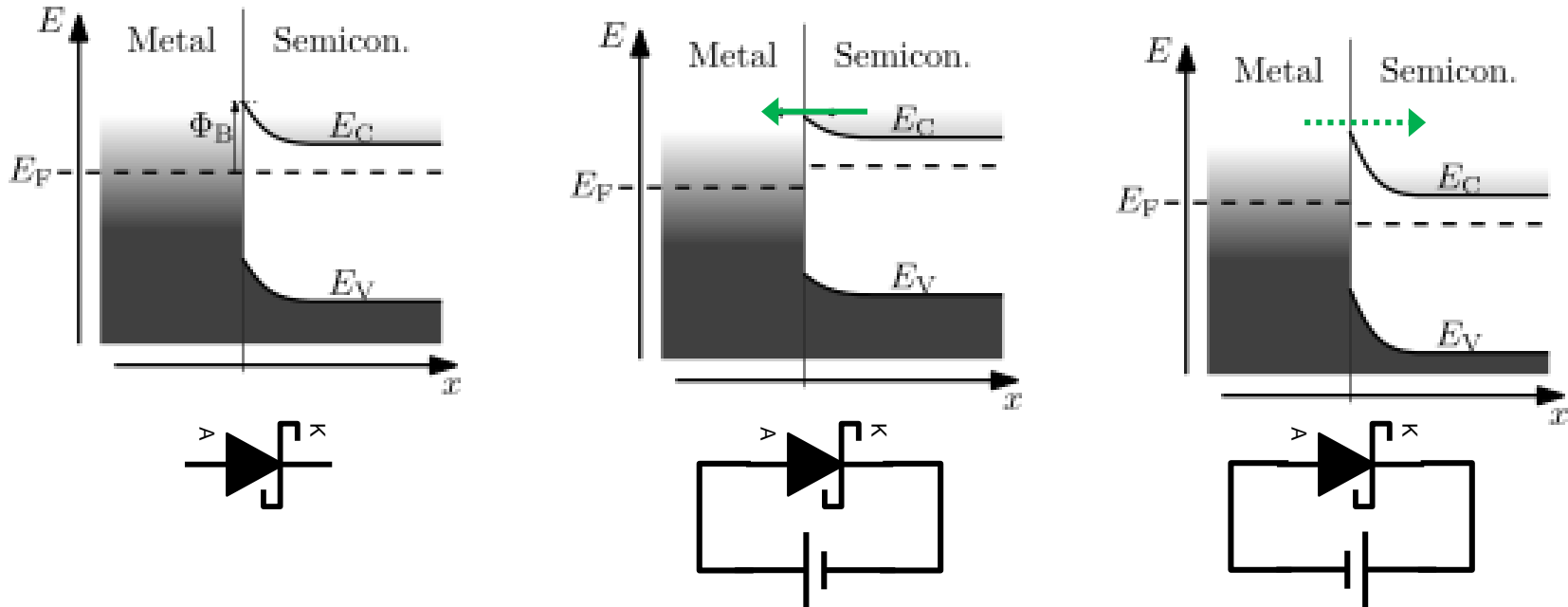
Modelo equivalente en alta velocidad de conmutación (recuperación inversa)



Diodo Schottky



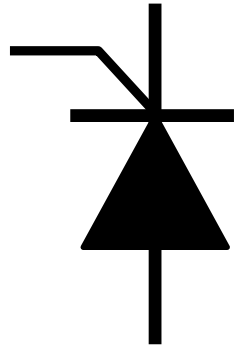
Diodo Schottky (2)



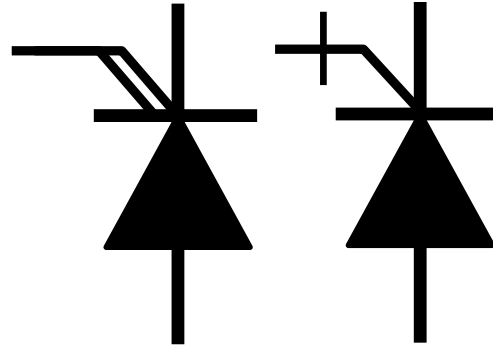
- Corriente casi exclusivamente por portadores mayoritarios (electrones a ambos lados de la juntura (no por recombinación). Por tanto menor capacitancia equivalente, mayor velocidad de respuesta (Menor tiempo de recuperación inversa (30ns frente a varios μ s, capacidad 40 pf frente a 400 pf)
- Menor caída de tensión en directo (En Schottky de señal es 0.2 V frente a 0.6 V en diodos PN de silicio. En Schottky de potencia es 0,8V frente a 1,2V en PN)
- Se pueden alcanzar menores tensiones de ruptura que en un diodo PN o PIN (100 volts frente a miles de volts en diodos P-N)
- Las corrientes de fuga en bloqueo son mayores que en diodo PN

Tiristores

Símbolo



SCR (estándar)



GTO

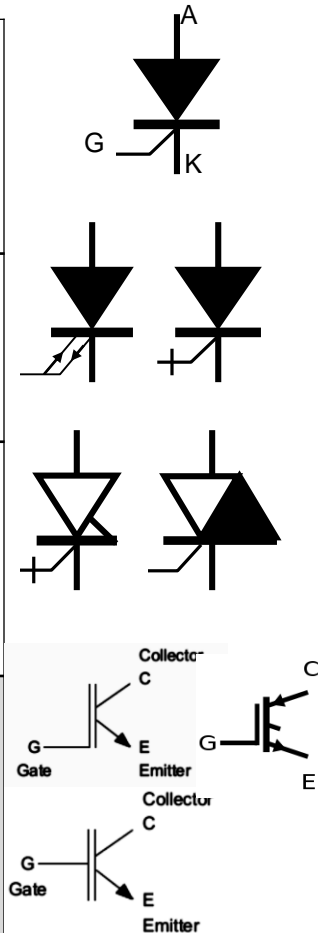
IGCT

Encapsulados

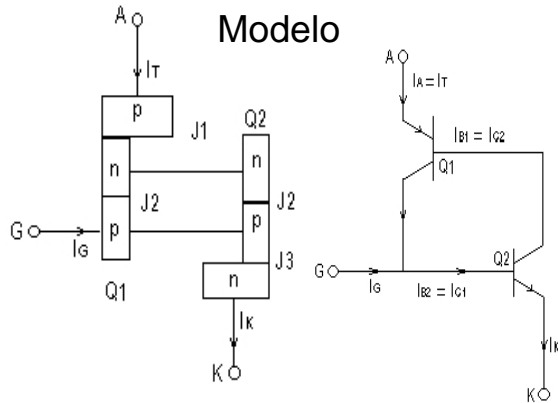


Dispositivos para bloqueo de alto voltaje

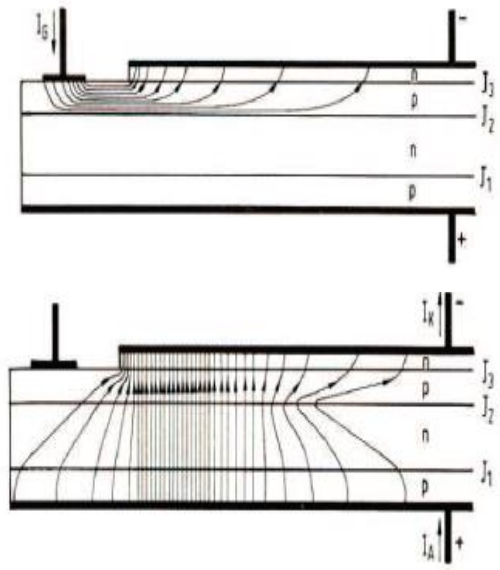
Tiristores / PCT	<ul style="list-style-type: none"> •Mínima pérdida en conducción •Alta confiabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> •Baja frecuencia de trabajo. •Necesidad de circuitos complejos para bloqueo (extinción de corriente) •Sensible a dV/dt (requiere <i>snubber</i>)
GTO	<ul style="list-style-type: none"> •Bloqueo por puerta. •Frecuencia de trabajo hasta cientos de Hz 	<ul style="list-style-type: none"> •Altas pérdidas en conducción •Demanda potencia de control en puerta. •Sensible a dV/dt (requiere <i>snubber</i>)
IGCT	<ul style="list-style-type: none"> •Mínima pérdida en conducción •Resiste alta dV/dt •Bloqueo por puerta. •Frecuencia de trabajo hasta varios kHz (según la carga) 	
IGBT	<ul style="list-style-type: none"> •Bloqueo por puerta. •Frecuencia de trabajo de 10kHz mínimo •Muy baja demanda de potencia en puerta. 	<ul style="list-style-type: none"> •Altas pérdidas en conducción comparado con los tiristores



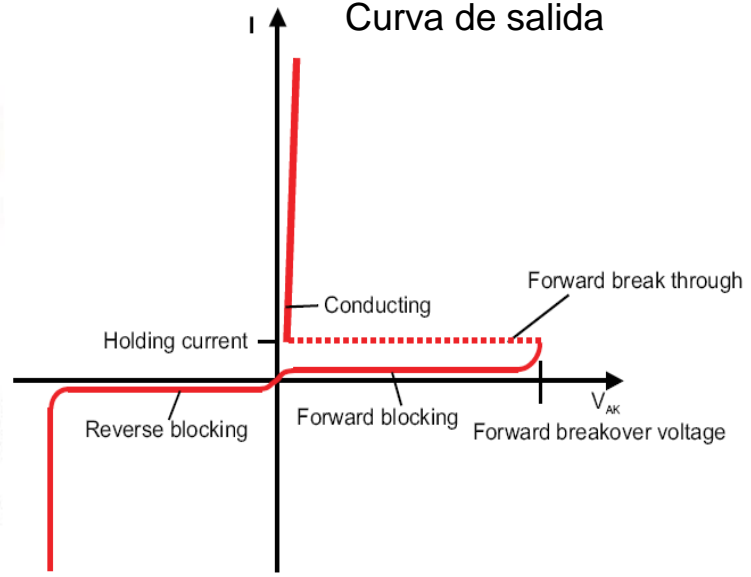
Tiristores: Tiristor estándar



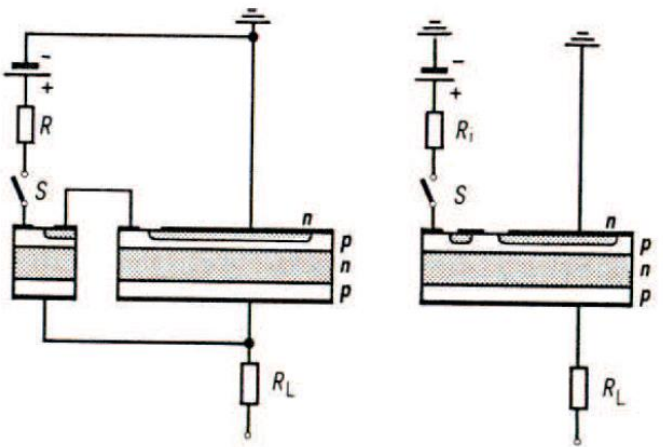
Proceso de disparo



Curva de salida

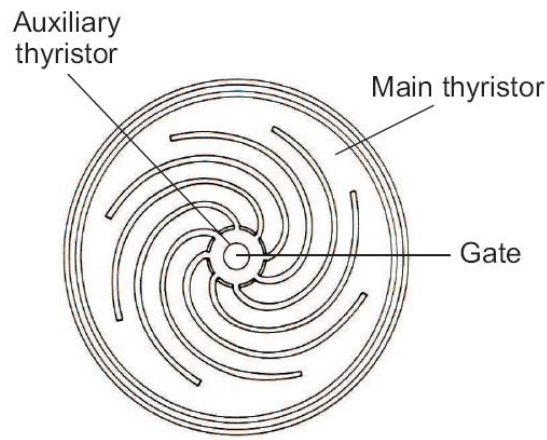


Estructura física



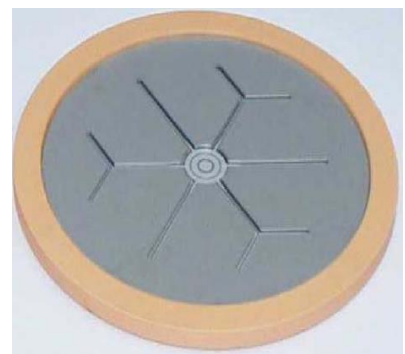
Hybrid auxiliary thyristor

Integrated auxiliary thyristor

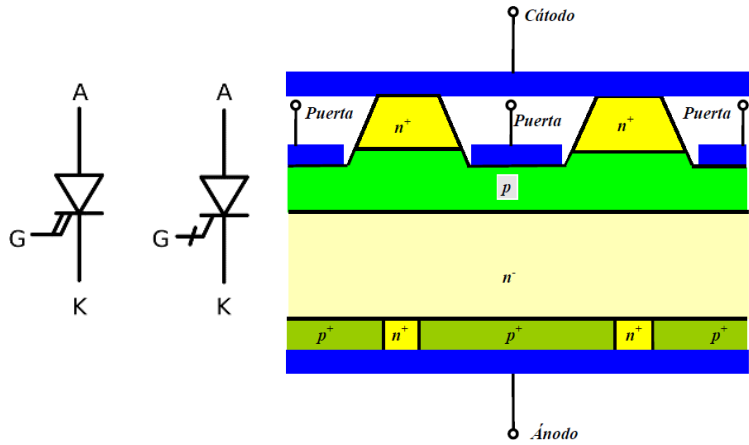


Finger like auxiliary thyristor

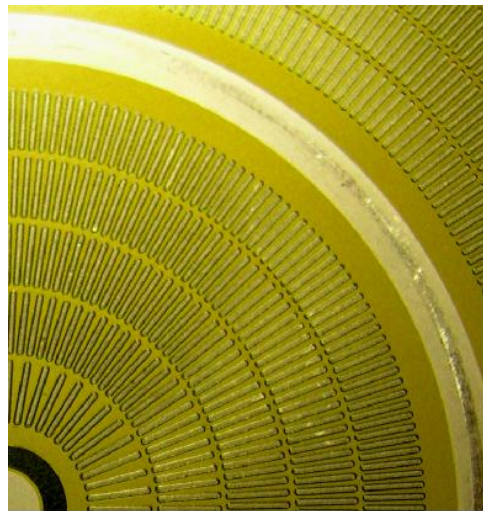
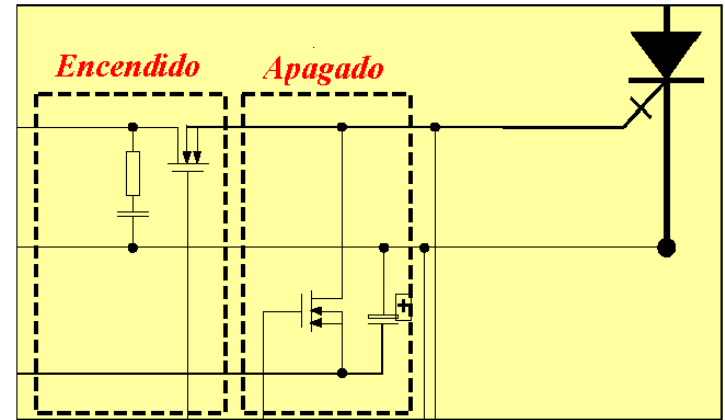
Pastilla



Tiristor/GTO (apagado por puerta)

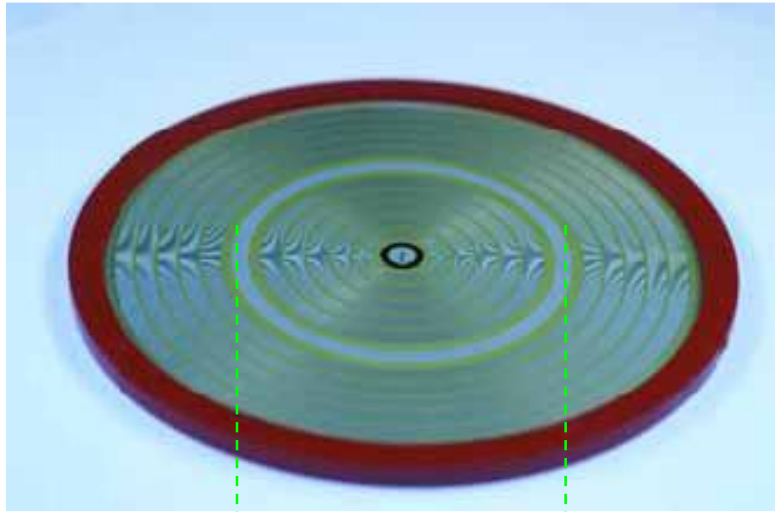


GTO



Para apagarlo por puerta debe drenarse un 20% de la corriente principal A-K

IGCT (Tiristor controlado por puerta integrada)



Un wafer IGCT de unos 2700 segmentos de cátodo agrupados en 10 anillos, rodeados por la metalización de puerta. El anillo central es el punto de contacto de los terminales de puerta

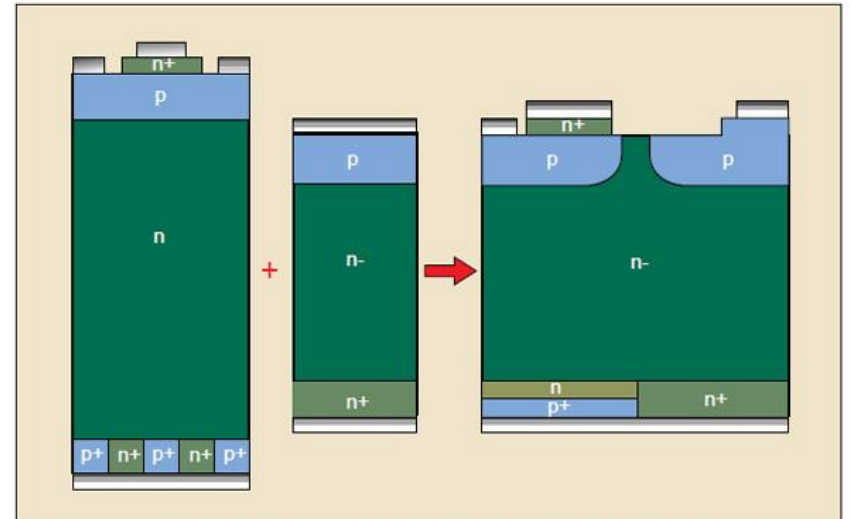
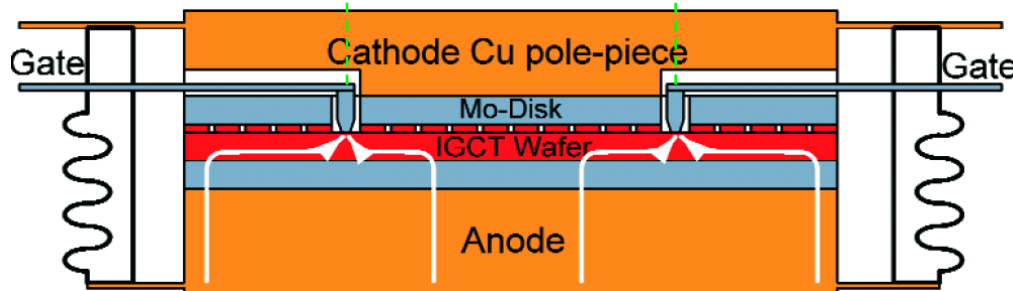
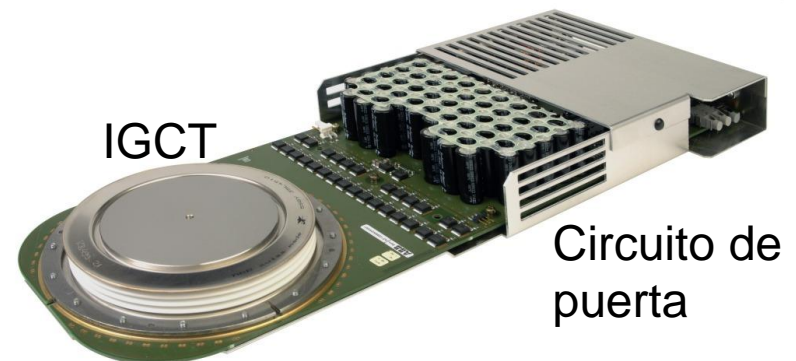


Figure 1 — Integrating a GTO thyristor with a diode produces what ABB engineers call a Gate Commutated Thyristor (GCT). The transparent emitter and buffer layer of the GCT accommodates a thin n -base permitting snubberless operation.

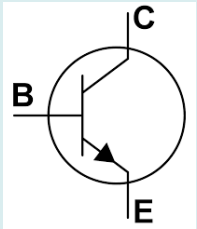
Tensión de bloqueo 4 a 10 kV

Corrientes hasta unos 7 kA

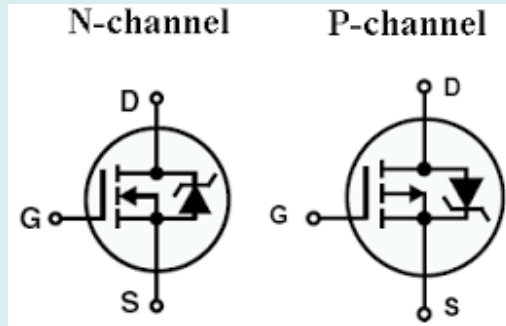
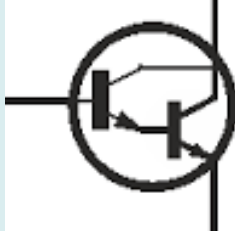


Transistores

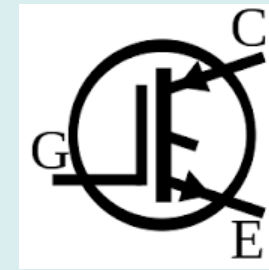
Símbolos



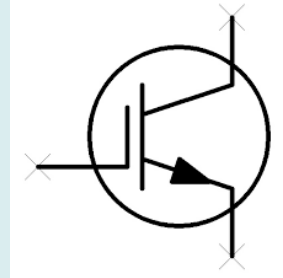
Bipolar (BJT) NPN



MOSFET de enriquecimiento



IGBT

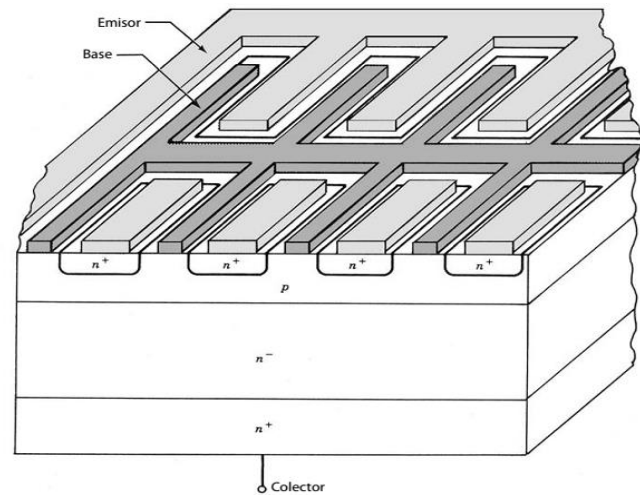
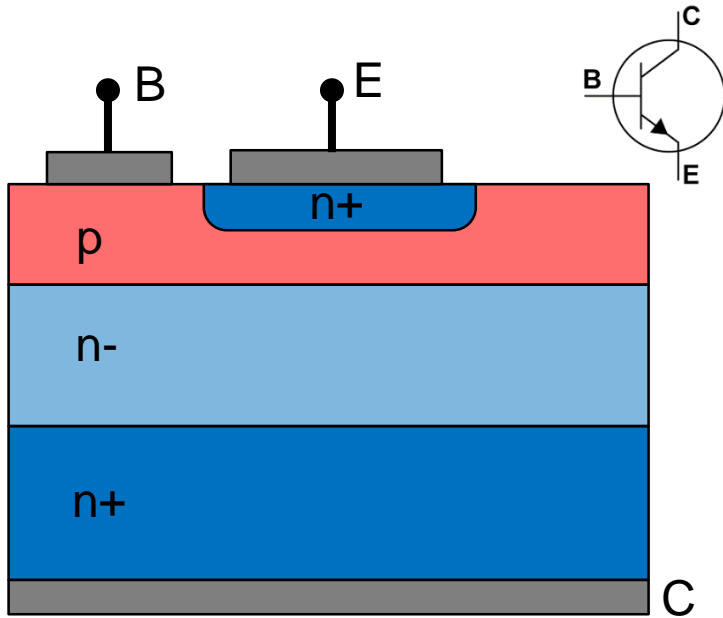


Encapsulados

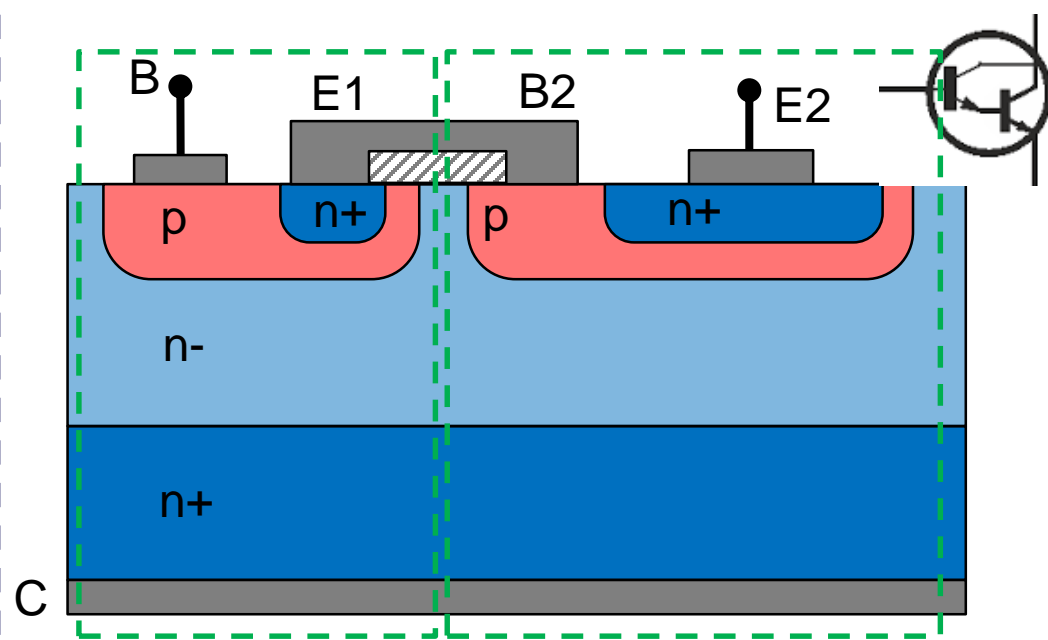


Transistor Bipolar de Potencia

Transistor de potencia normal

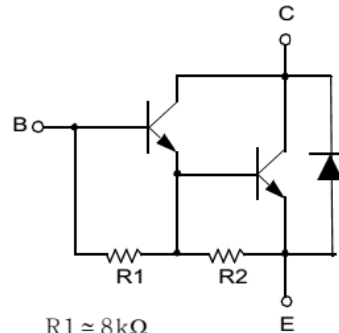


Transistor de potencia tipo Darlington



Tip120

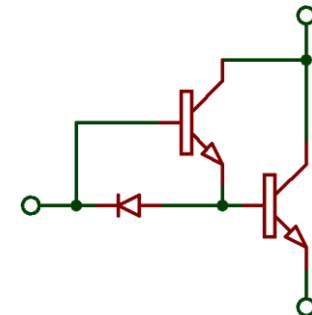
Equivalent Circuit



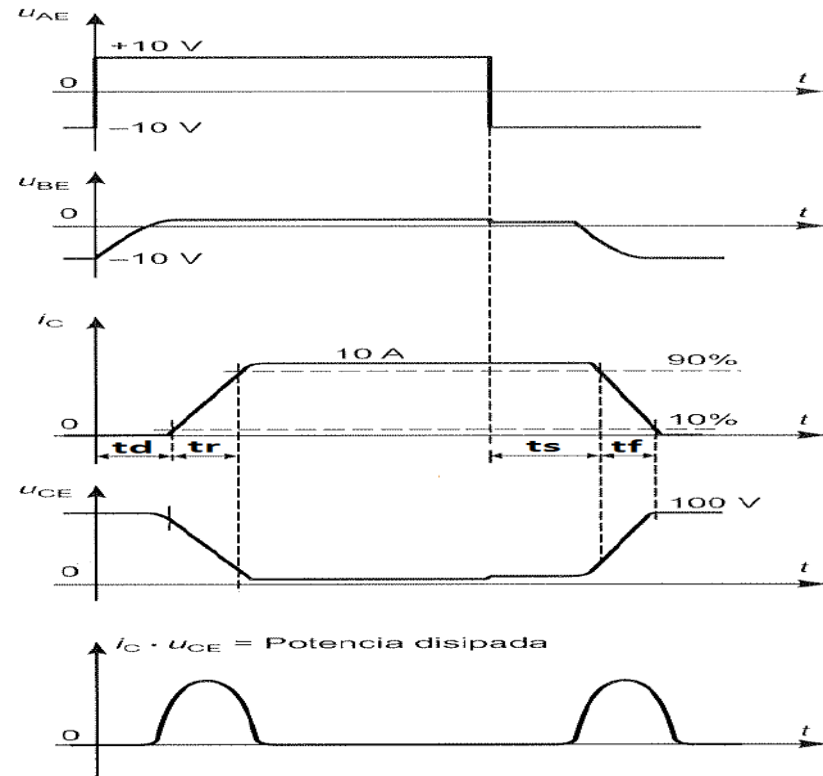
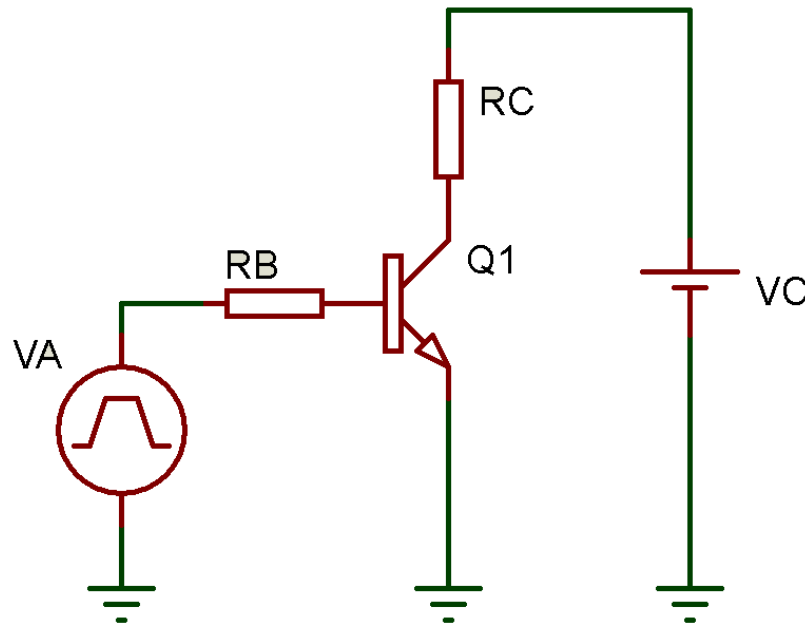
$$R1 \cong 8k\Omega$$

$$R2 \cong 0.12k\Omega$$

D acelera el apagado



Transistor Bipolar de Potencia: Conmutación con carga R



Encendido

t_d : tiempo de retardo (*delay time*). Se carga la capacitancia BE y se alcanza la tensión V_{be} de encendido

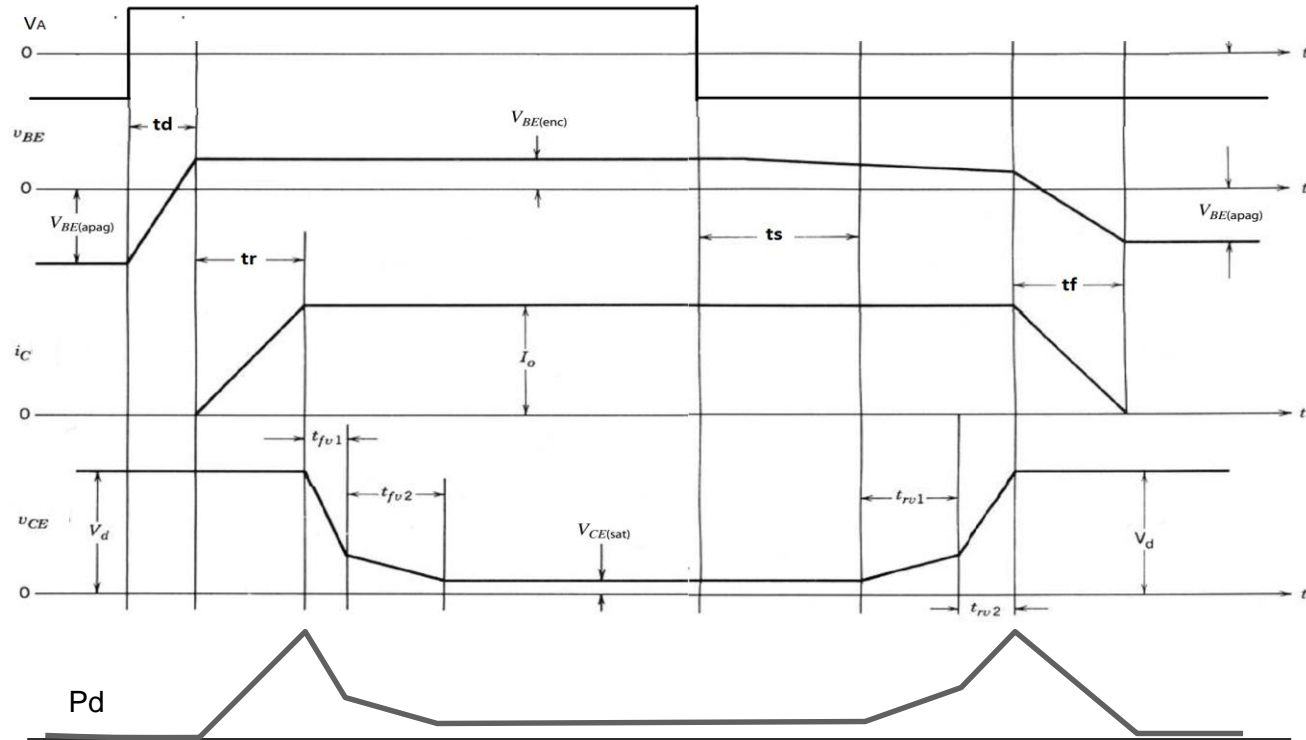
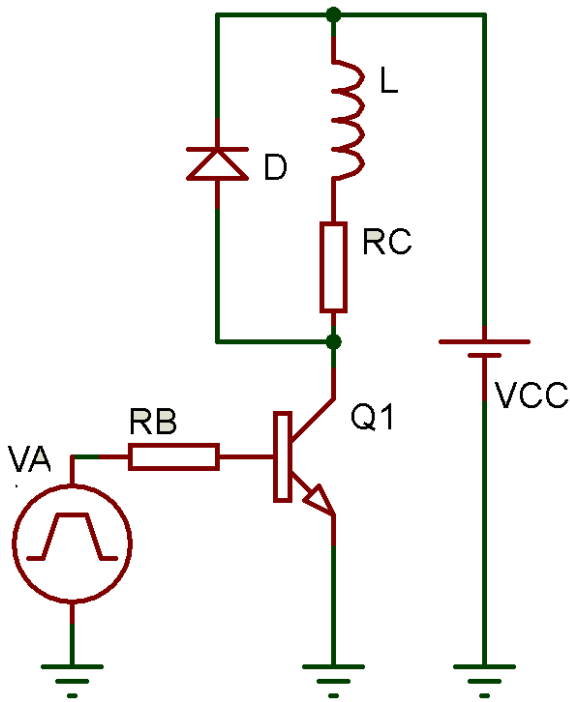
t_r : tiempo de subida (*rise time*). V_{ce} decrece conforme aumenta I_c

Apagado

t_s : tiempo de almacenamiento (*store time*). I_b negativa extrae el exceso de portadores de la base sobresaturada. I_c permanece casi constante

t_f : tiempo de caída (*fall time*). La tensión de V_{be} decae por debajo del umbral de conducción. I_c se extingue al tiempo que aumenta V_{ce}

Transistor Bipolar de Potencia: Conmutación con carga RL



Encendido

t_d : tiempo de retardo (*delay time*). Se carga la capacitancia BE y se alcanza la tensión V_{be} de encendido

t_r : tiempo de subida (*rise time*). $V_{ce} \approx V_{cc}$ **mientras** $I_c < I_L$ (diodo conduce en directo)

$t_{fv1} + t_{fv2}$: Se inyectan portadores en la juntura CB (decrece zona de deplexión). V_{ce} cae con pendiente variable

Apagado

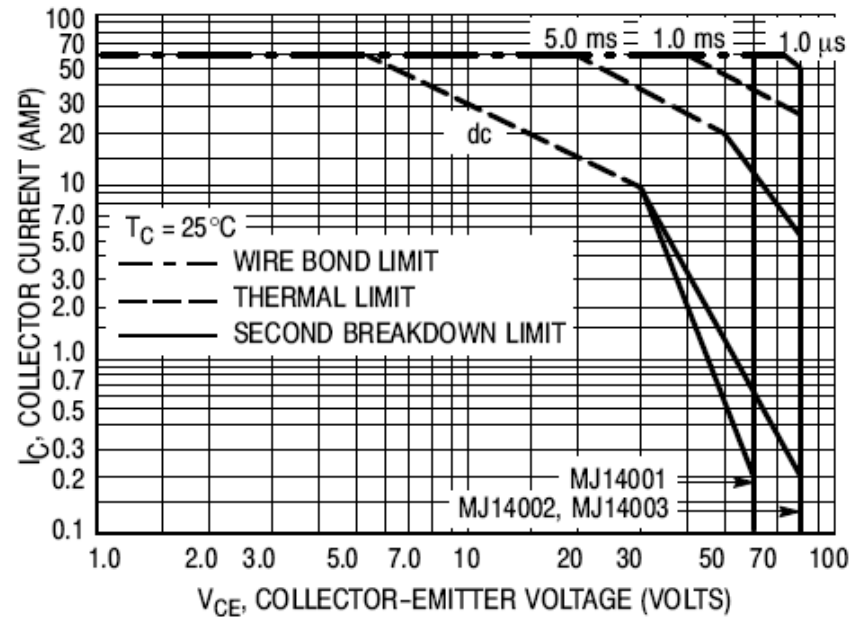
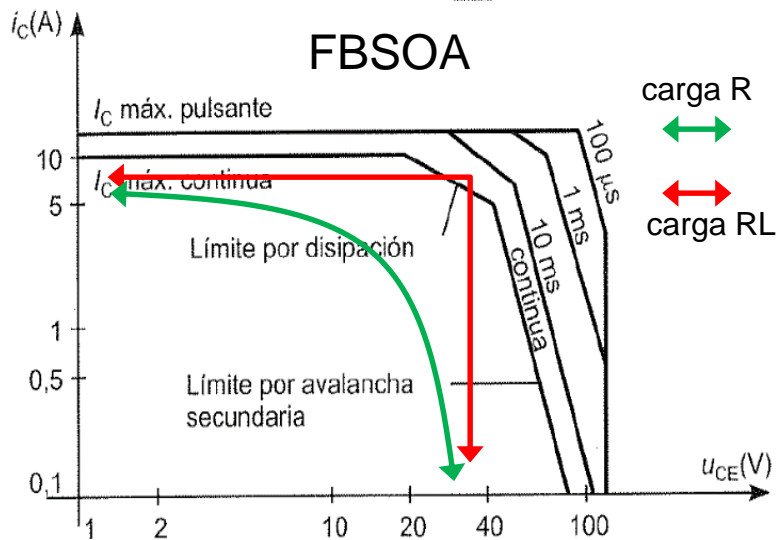
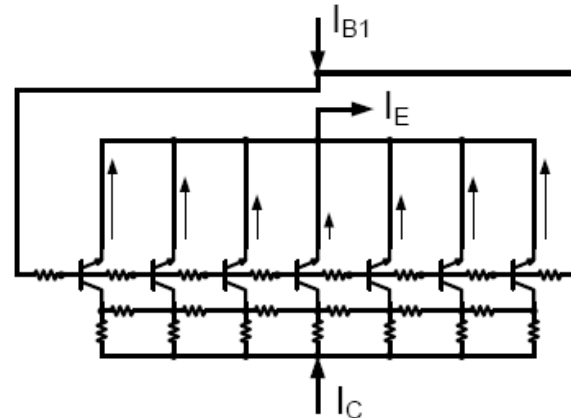
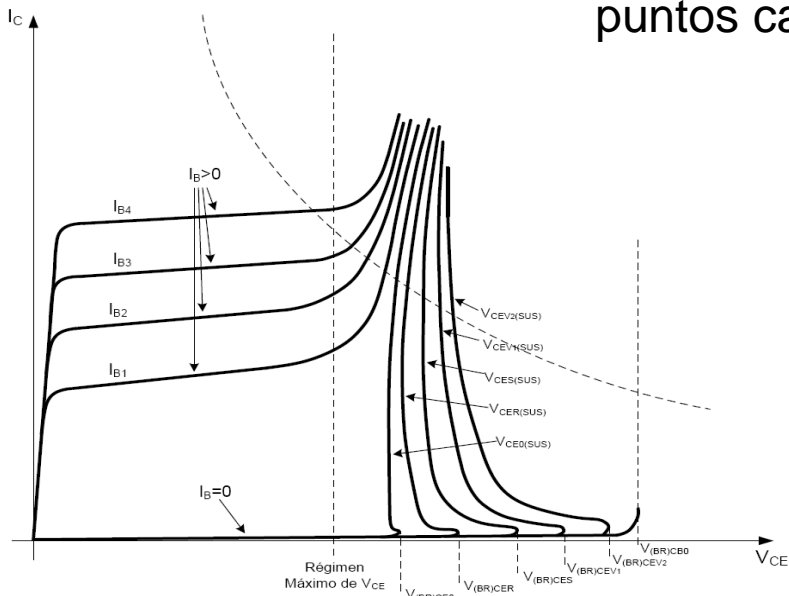
t_s : tiempo de almacenamiento (*store time*). I_b negativa extrae el exceso de portadores de la base sobresaturada. I_c permanece casi constante

$t_{rv1} + t_{rv2}$: I_c carga la capacitancia CB (aumenta zona de deplexión) con pendiente variable según el beta del transistor

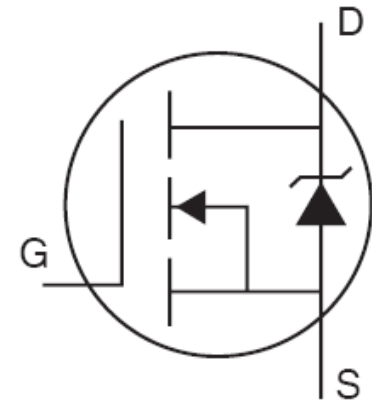
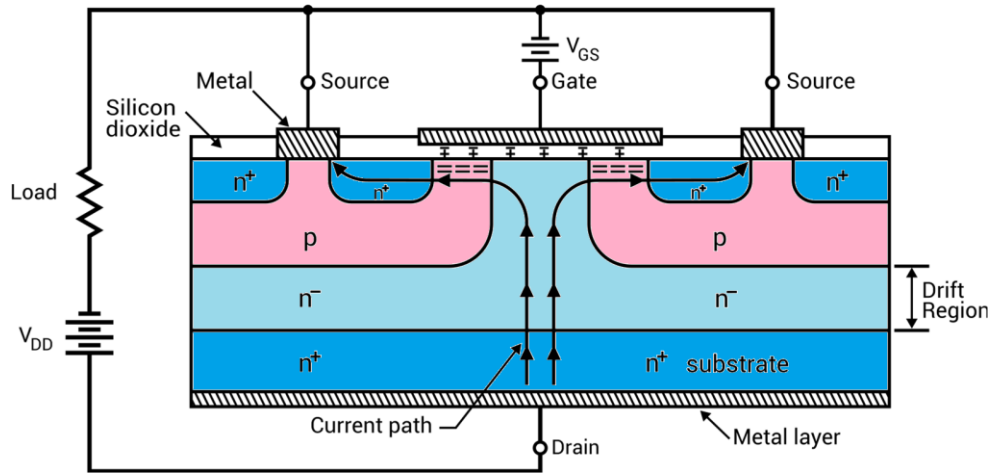
t_f : tiempo de caída (*fall time*). La tensión de V_{be} decae por debajo del umbral de conducción, luego I_c se extingue

Transistor Bipolar de Potencia: Curvas de salida - SOA

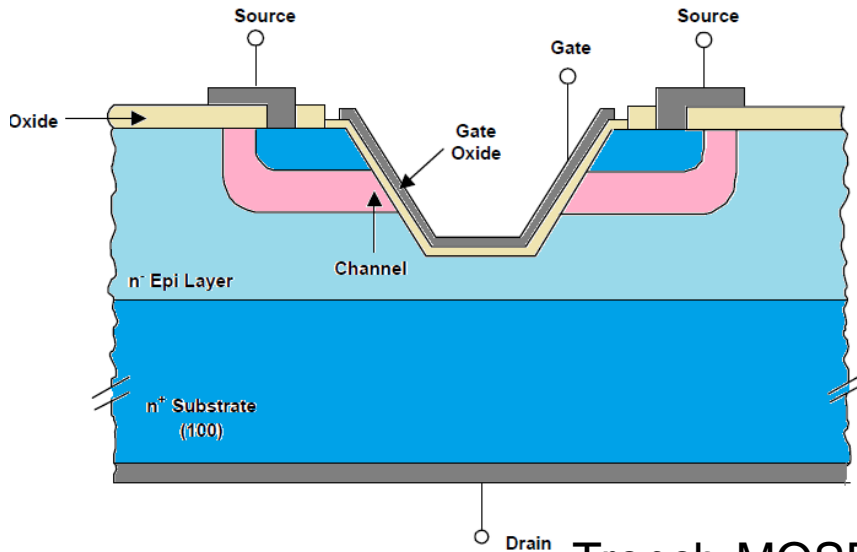
puntos calientes + Temp coef (-) → ruptura secundaria



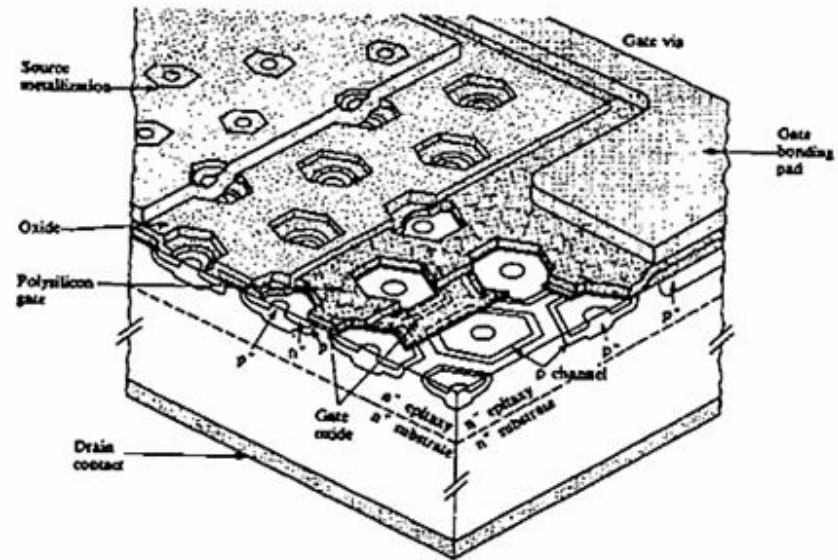
MOSFET de Potencia



D-MOSFET

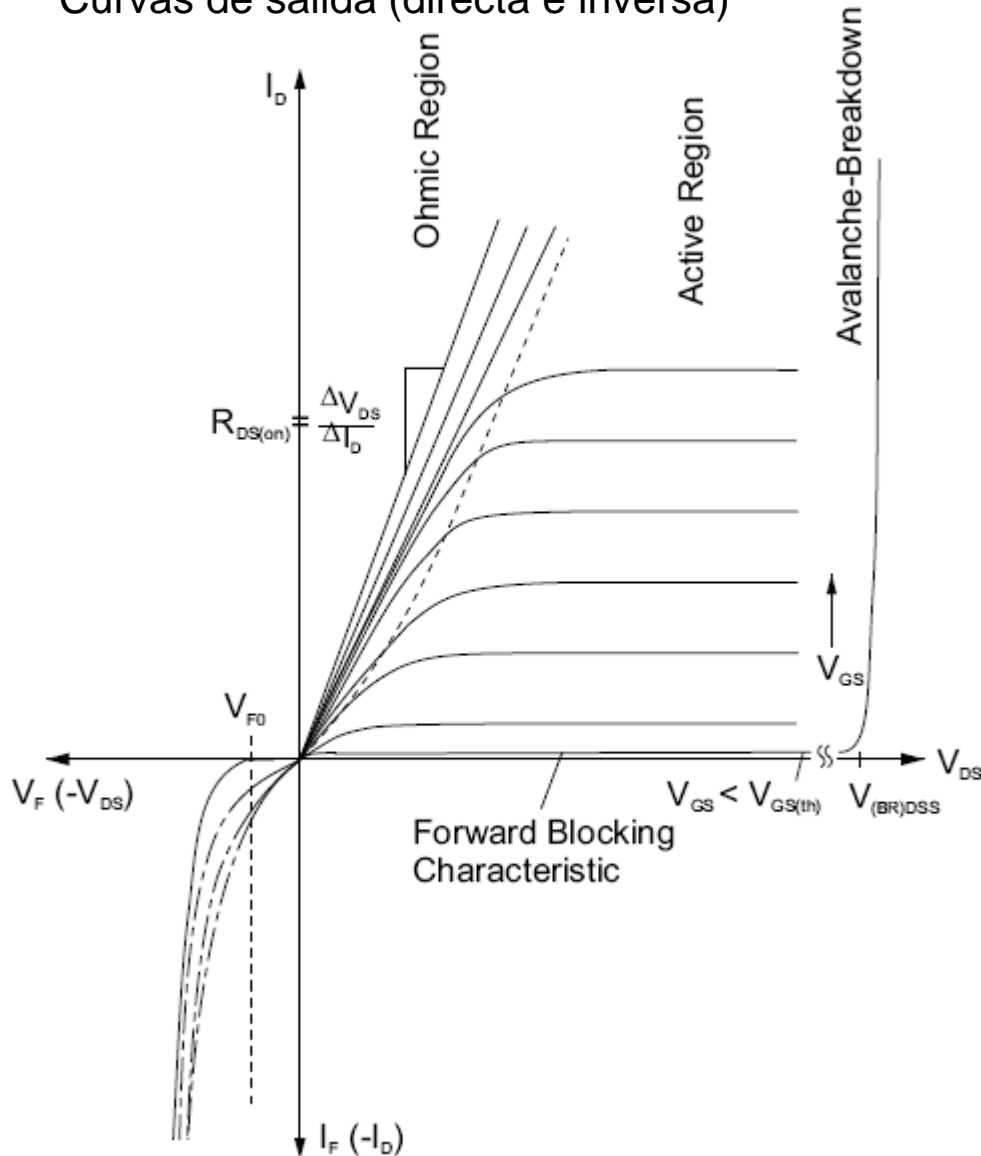


Trench-MOSFET

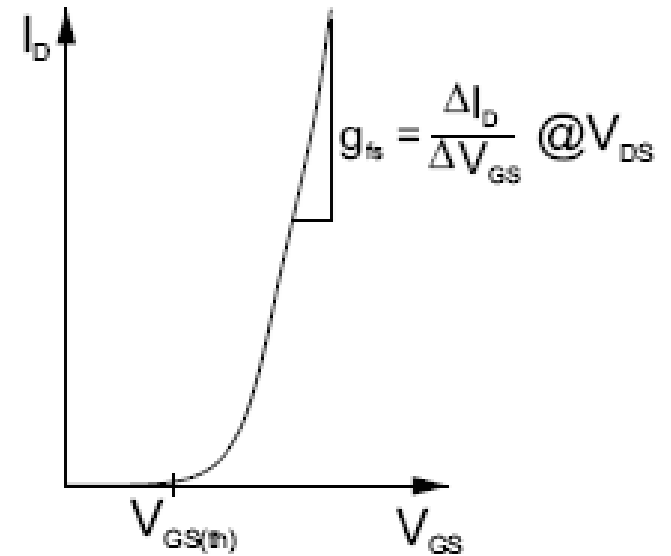


MOSFET: Curvas de salida directa-inversa – Curva de transferencia

Curvas de salida (directa e inversa)

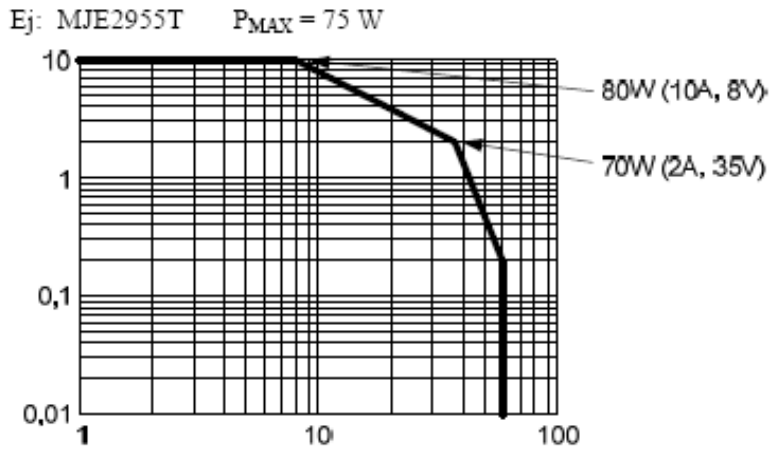


Curva de transferencia (para un valor dado de V_{DS})

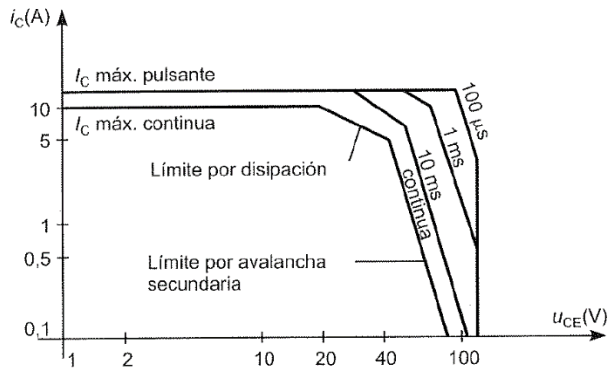


MOSFET: SOA (FBSOA SSOA)

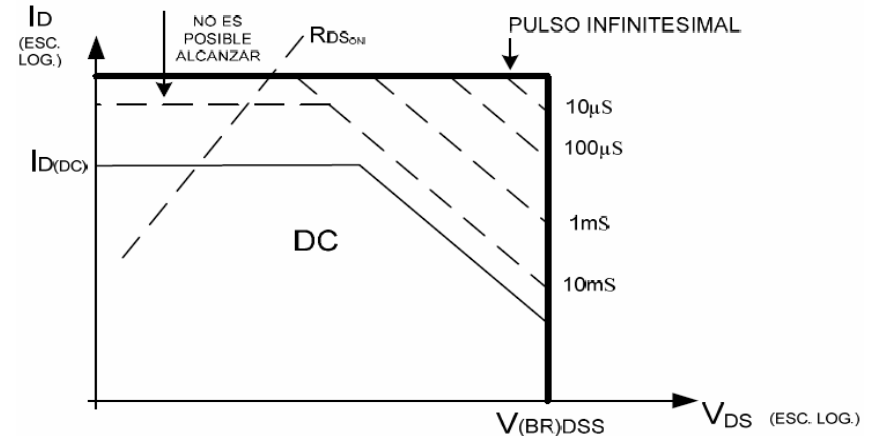
BIPOLAR



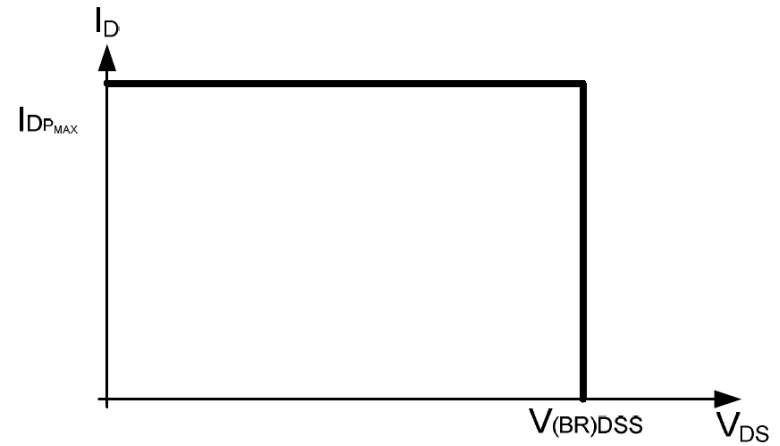
SOA en Transistor Bipolar



MOSFET

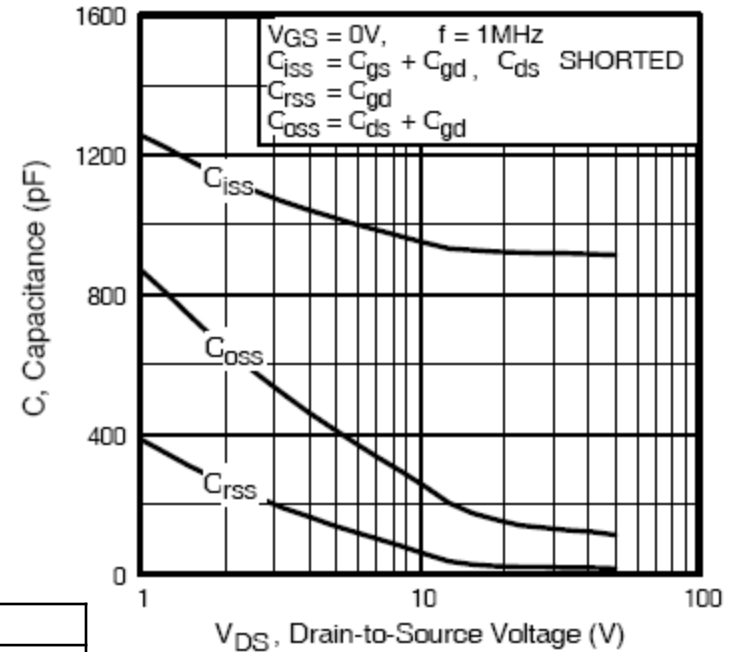
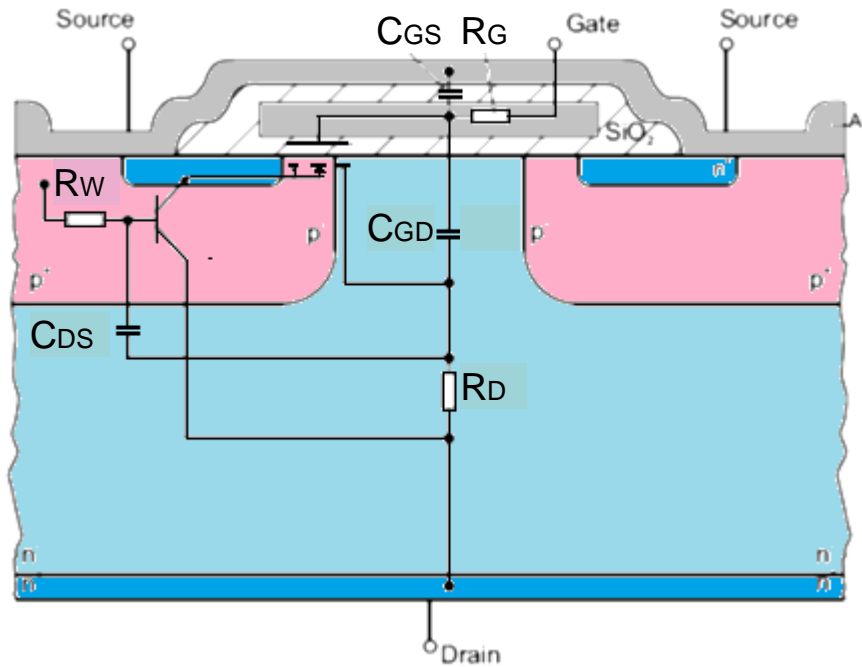


FBSOA (Forward SOA)



SSOA (Switched SOA)

MOSFET de potencia: elementos intrínsecos



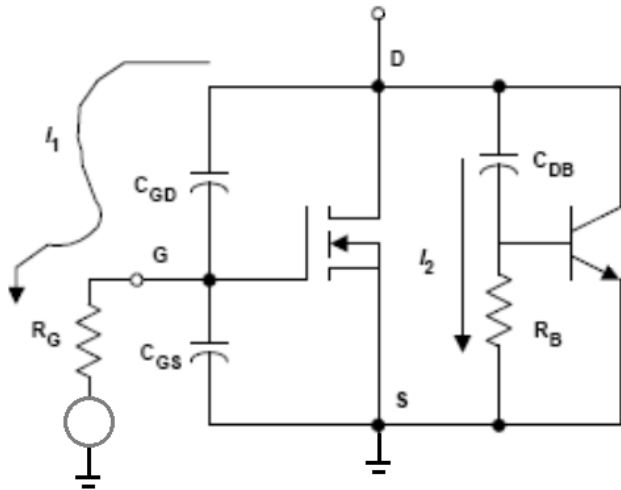
Parámetro	Descripción
Cgs	Capacitancia puerta-fuente Solapamiento Independiente de Vds de la metalización entre G y S.
Cds	Capacitancia drenaje-fuente Capacitancia de juntura entre la zona N de deplexión y la zona P. Disminuye a mayor Vds
Cgd	Capacitancia puerta-drenaje Capacitancia de Miller por solapamiento entre la puerta y la zona de deplexión.
Rg	Resistencia interna de puerta Resistencia del silicio de puerta.
Rd	Resistencia de Drenaje Resistencia de la región N, parte central de la Rdson
Rw	Resistencia lateral de la zona P. Resistencia Base-Emisor del NPN parásito.

$$C_{ISS} = C_{GS} + C_{GD} \quad \text{C de entrada}$$

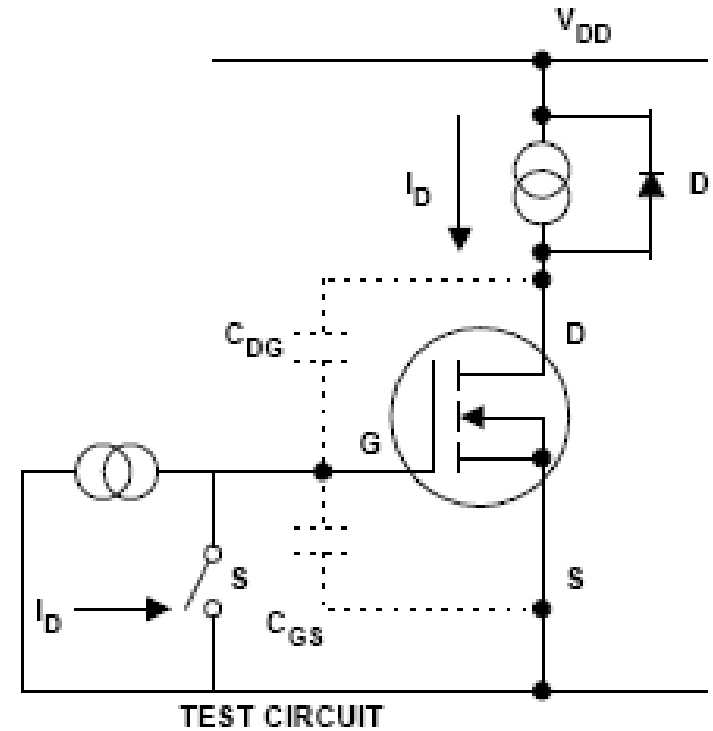
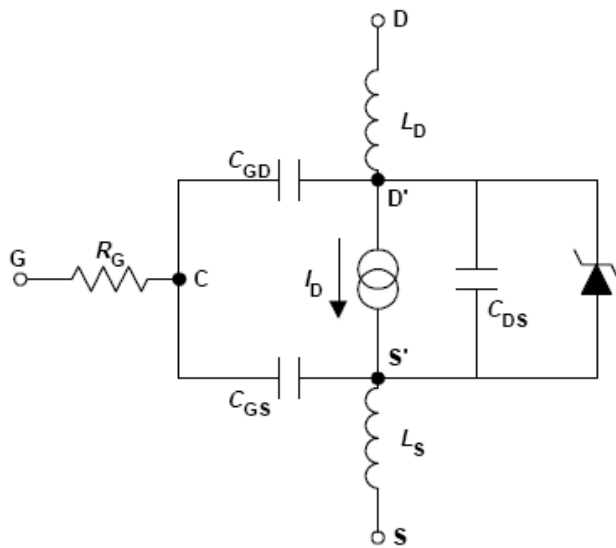
$$C_{RSS} = C_{GD} \quad \text{C reversa}$$

$$C_{OSS} = C_{DS} + C_{GD} \quad \text{C de salida}$$

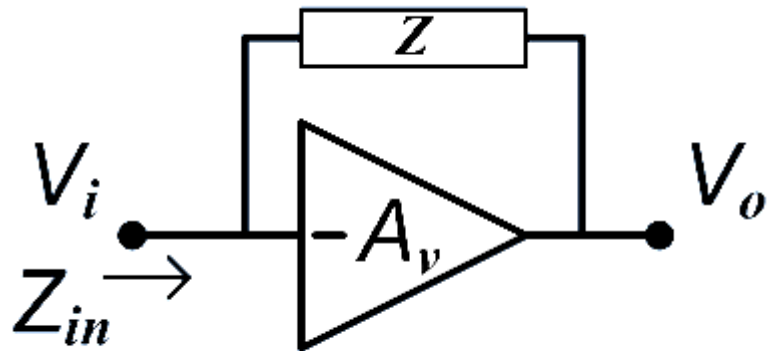
MOSFET de potencia en conmutación



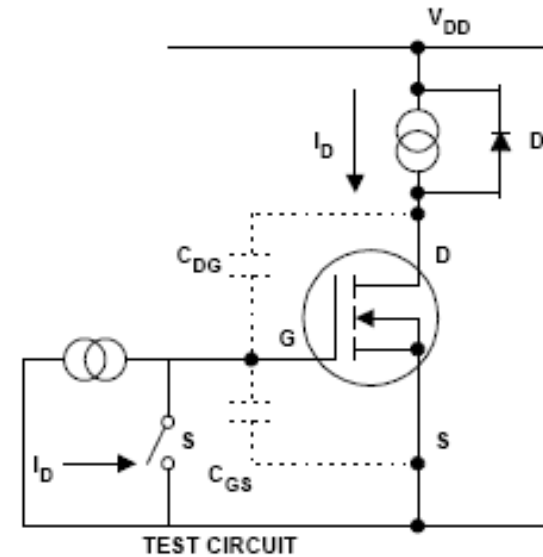
Modelos para conmutación



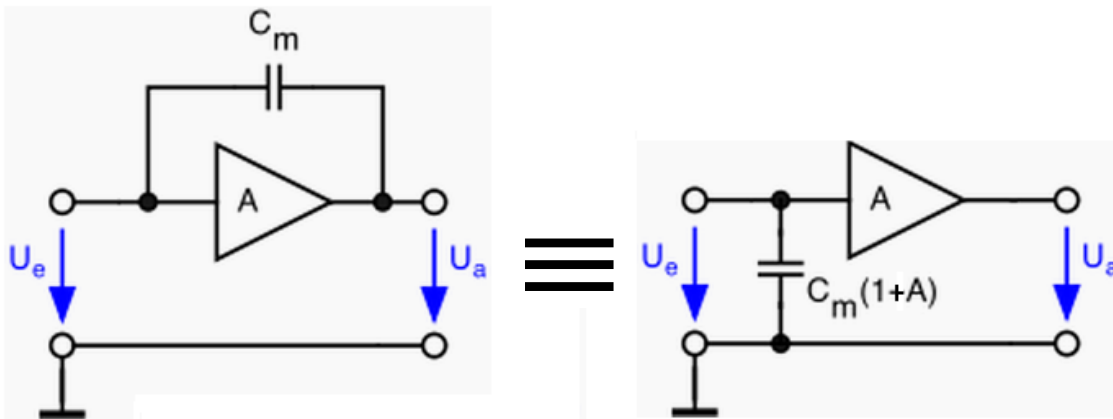
Nota: Efecto Miller



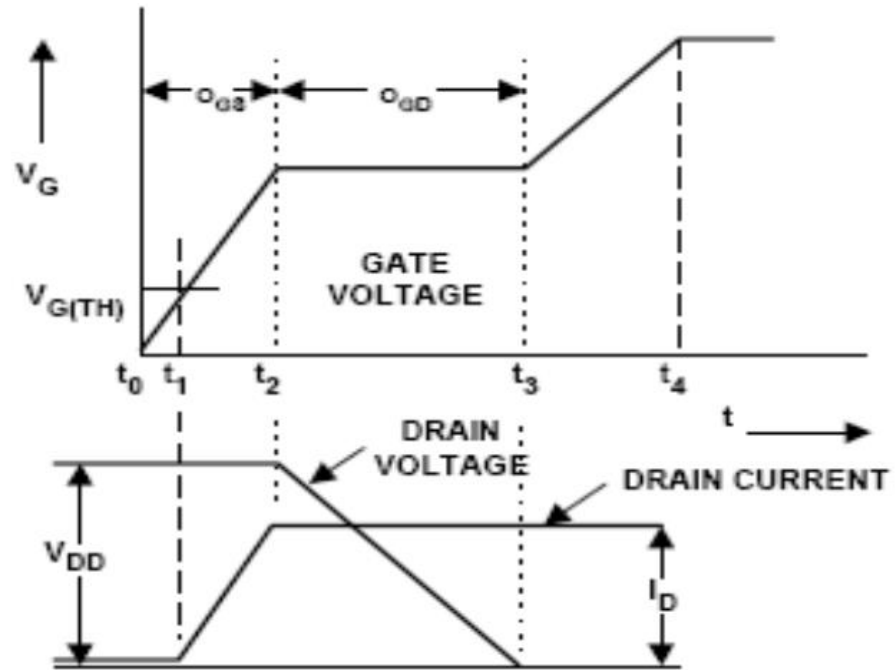
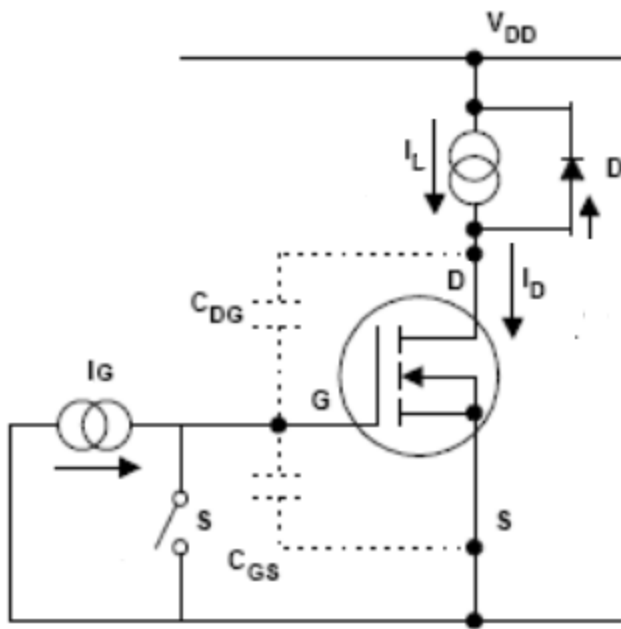
$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} = \frac{V_i(1 + A_v)}{Z}$$



$$C_M = (1 + A_v) \cdot C_{DG}$$



MOSFET de potencia: Encendido con corriente limitada



Encendido:

- t_0-t_1 : La V_{GS} no llega a $V_{G(TH)}$ del MOSFET, $I_D=0$
- t_1-t_2 : I_D comienza a aumentar pero V_D no cae **mientras $I_D < I_L$** , (hay caída en directo en diodo de recirculación).
- t_2-t_3 : Cuando I_D iguala a I_L se bloquea el diodo D, y una gran dV_{DS}/dt negativa se acopla por C_{GD} (capacitancia de Miller) impidiendo aumentar la V_{GS} (I_G debe cargar la C_{GD})
- $t_3 \rightarrow$: I_G termina de cargar las capacitancias C_{GD} y C_{GS} y prosigue el aumento de V_G hasta la plena conducción (aunque en la gráfica no se refleja, una mayor V_{GS} produce una $R_{DS(on)}$ menor, y en consecuencia menores pérdidas de conducción).

Apagado:

- Aparecen fenómenos similares que retrasan el apagado. Al aplicar una I_G negativa V_{GS} disminuye, pero en cuanto V_{DS} comienza a aumentar, la dV_{DS}/dt positiva se acopla por C_{GD} impidiendo bajar V_{GS} . Una vez descargada C_{GS} ($C_{GD}+C_{GS}$). V_{GS} continúa bajando y en consecuencia I_D , hasta llegar a V_{Gsth} y de allí al bloqueo. En caso de carga inductiva aparece una sobretensión en V_D , moderada por el diodo de recirculación D. (ver IGBT)

MOSFET de potencia: Encendido inducido (no deseado)

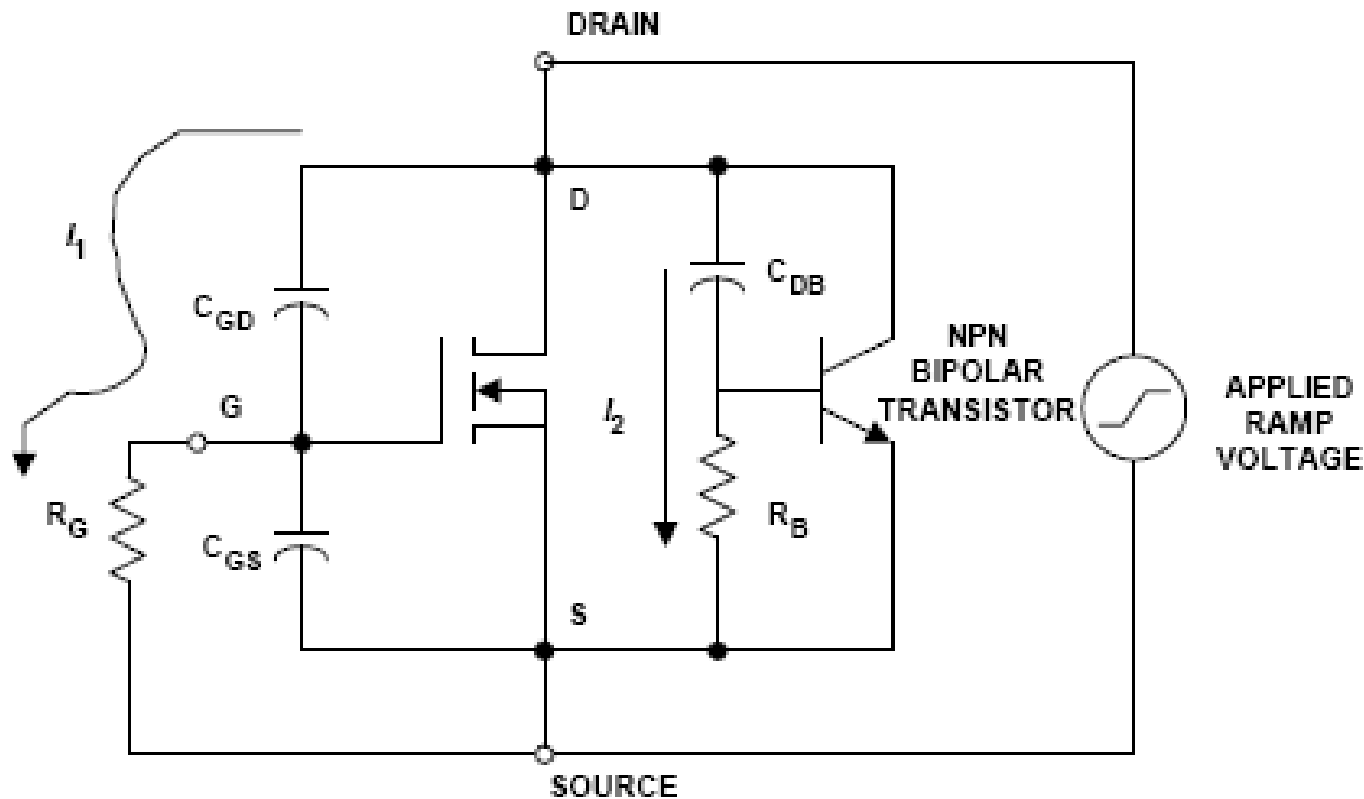
Encendido (no deseado) por dV/dt :

- Por puerta a través de C_{gd} : **(I1)**

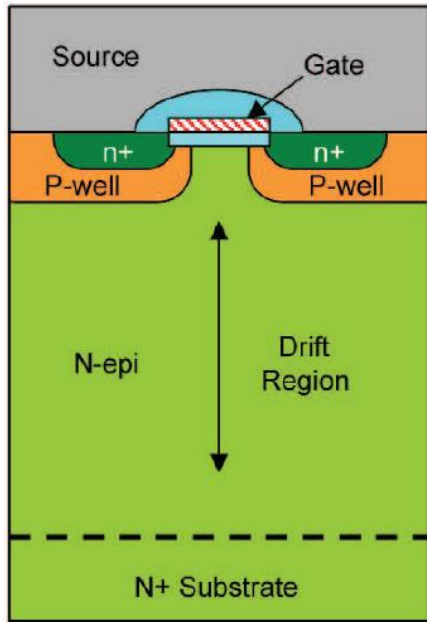
$$C_{gd} \cdot R_g \cdot dV/dt \geq V_{th} \rightarrow dV/dt \geq V_{th} / (C_{gd} \cdot R_g)$$

- Por encendido del transistor interno a través de C_{db} **(I2)**

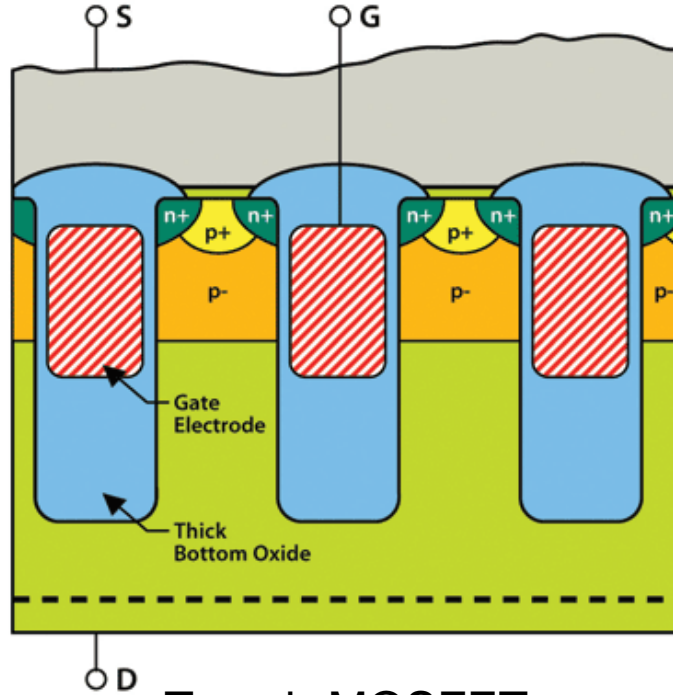
$$C_{db} \cdot R_b \cdot dV/dt \geq V_{be(th)} \rightarrow dV/dt \geq V_{be(th)} / (C_{db} \cdot R_b)$$



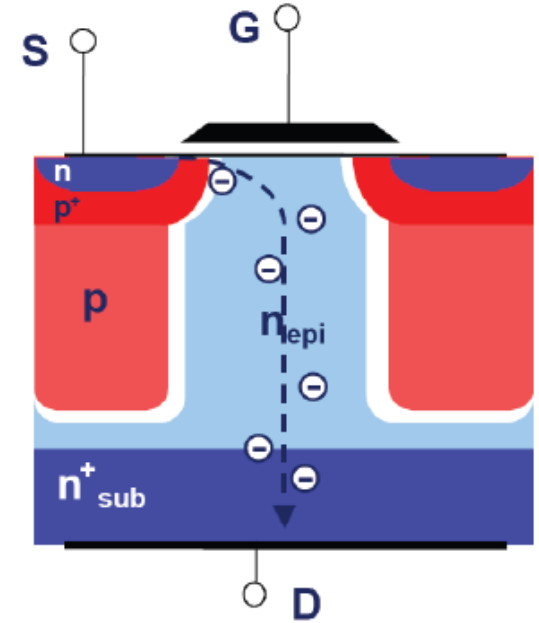
MOSFET de potencia: Tecnologías



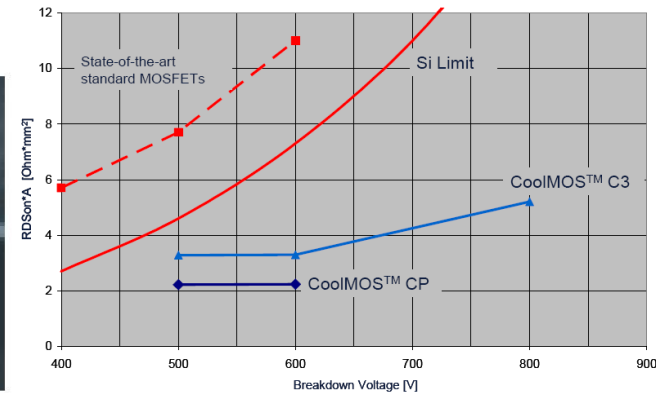
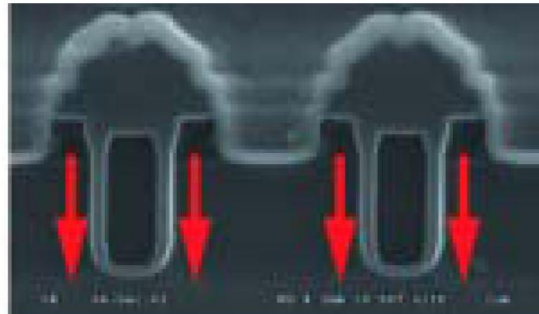
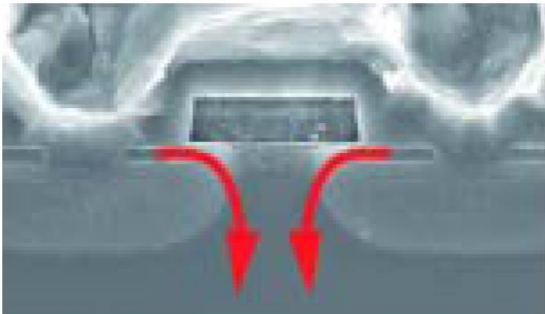
V-MOSFET, D-MOSFET
HEXFET etc



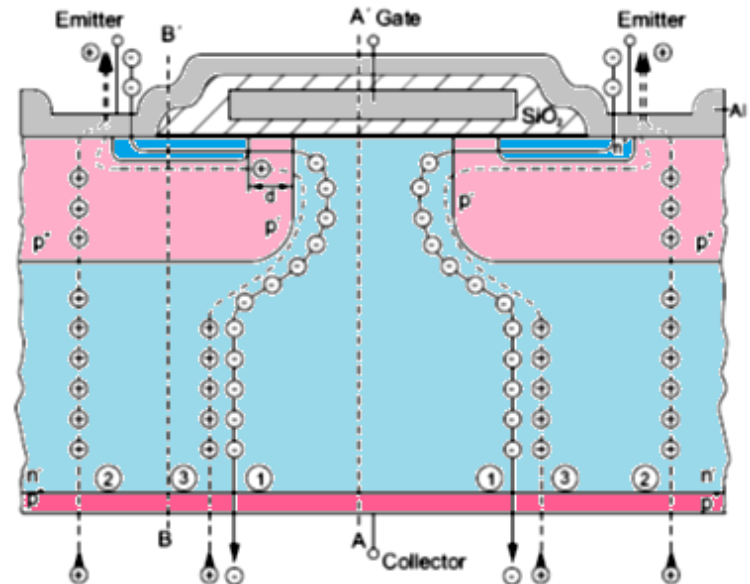
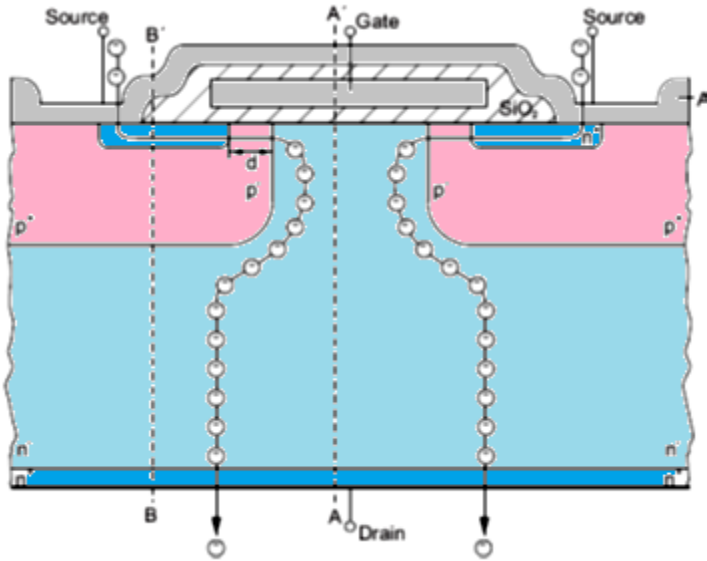
Trench-MOSFET



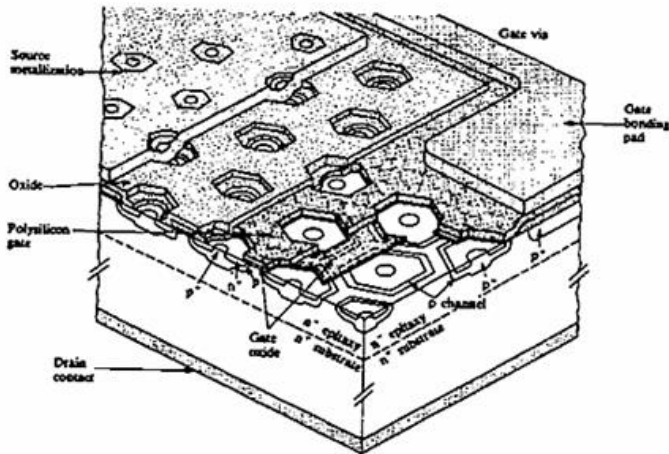
SJ-MOSFET (CoolMOS)



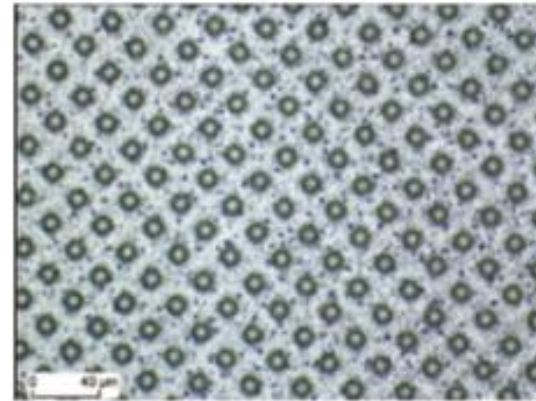
IGBT: Similitudes y diferencias con MOSFET



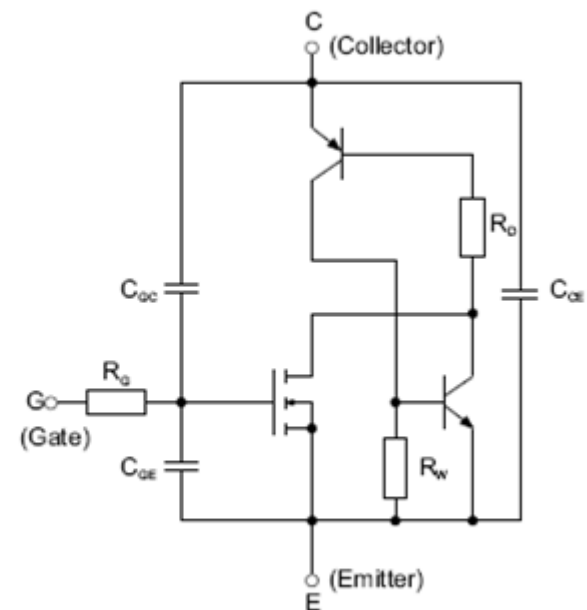
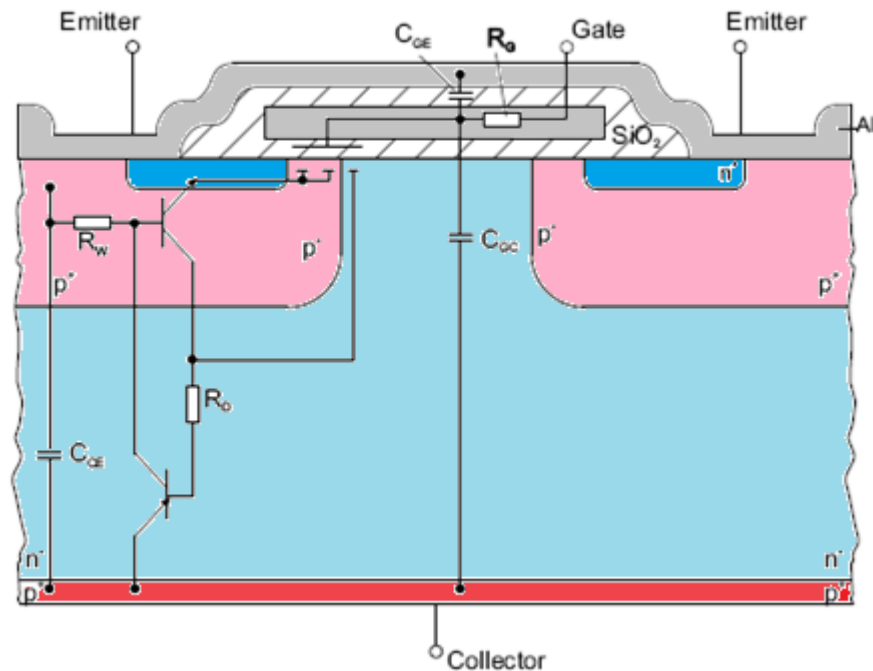
MOSFET



IGBT



IGBT: elementos intrínsecos-circuito equivalente

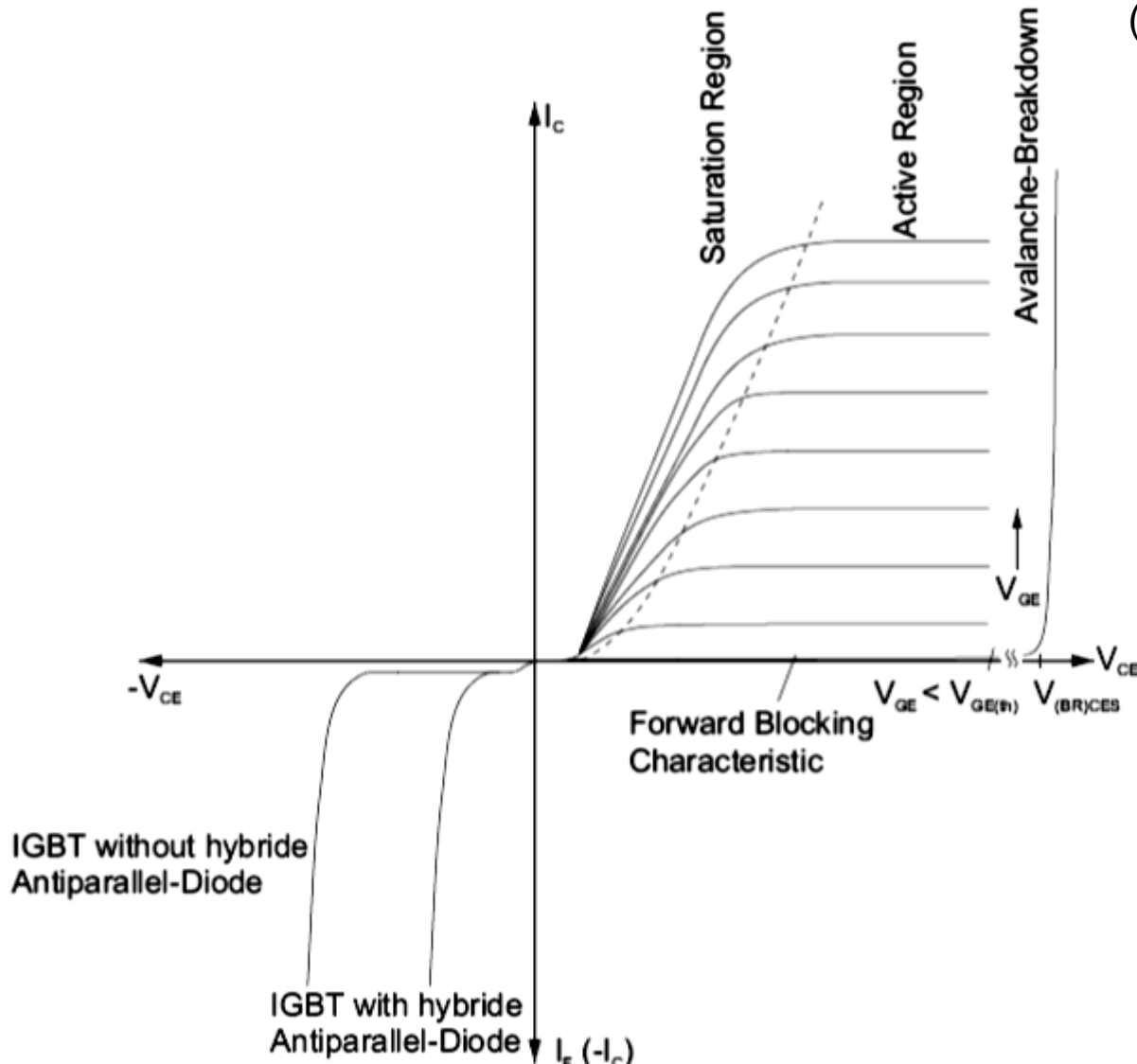


Symbol	Designation	Physical Description
C_{GE}	Gate-emitter capacitance	Overlapping gate and source metallisation; dependent on gate-emitter voltage; independent of collector-emitter voltage
C_{CE}	Collector-emitter capacitance	Junction capacitance between n- drift area and p-well; dependent on cell surface, breakdown voltage and collector-emitter voltage
C_{GC}	Gate-collector capacitance	Miller capacitance; generated by overlapping of gate and n-drift area
R_G	Internal gate resistance	Polysilicon gate resistance; additional series resistors are often needed in modules with several transistor chips to minimise oscillations between chips
R_D	Drift resistance	Resistance of the n- region (base resistance of the PNP transistor)
R_W	Lateral resistance of the p-well	Base-emitter resistance of the parasitic bipolar NPN transistor

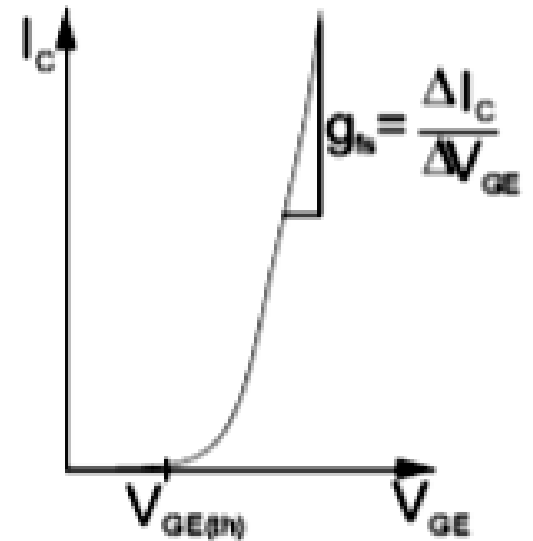
	IGBT
Input capacitance	$C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$
Reverse transfer capacitance (Miller capacitance)	$C_{res} = C_{GC}$
Output capacitance	$C_{oes} = C_{GC} + C_{CE}$

IGBT: Curvas de salida directa-inversa – Curva de transferencia

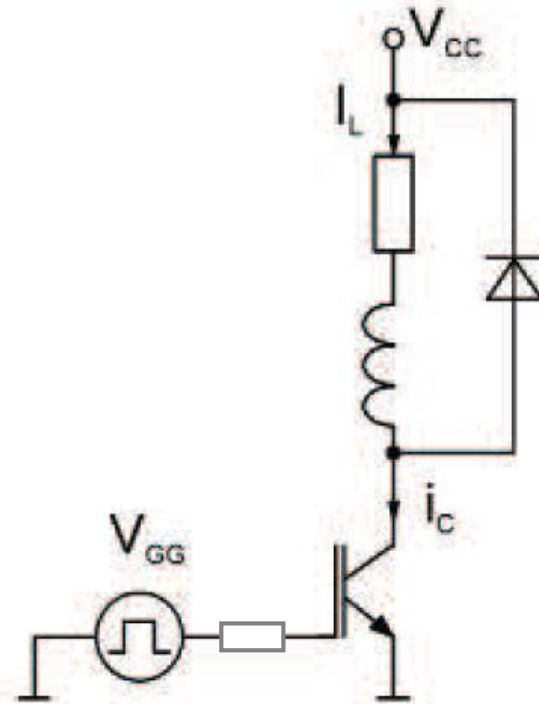
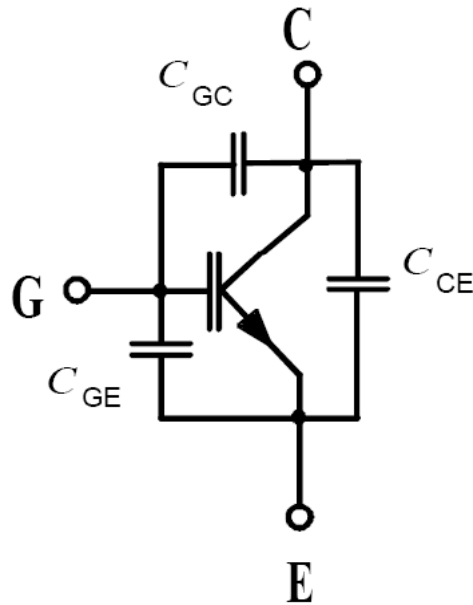
Curvas de salida (directa e inversa)



Curva de transferencia (para un valor dado de V_{CE})

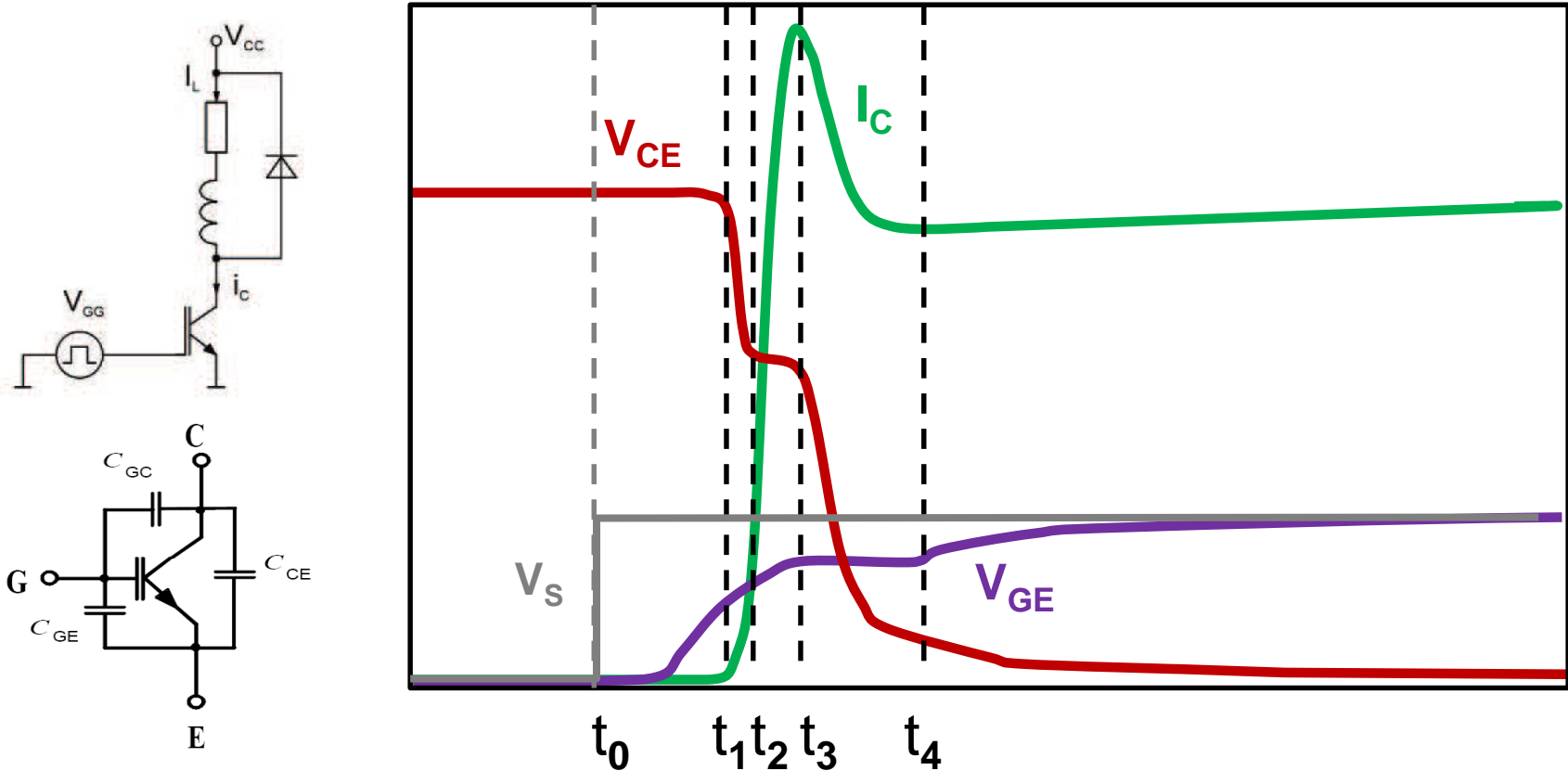


Efectos durante la conmutación del IGBT



- C_{GC} es la capacitancia parásita G-C, grande con bajos valores de V_{CG} , y menor para alta V_{CG} . Produce un efecto de realimentación negativa de la tensión de C a G (efecto Miller)
- C_{CE} es la capacitancia del diodo integrado entre C y E, que se carga durante el bloqueo.

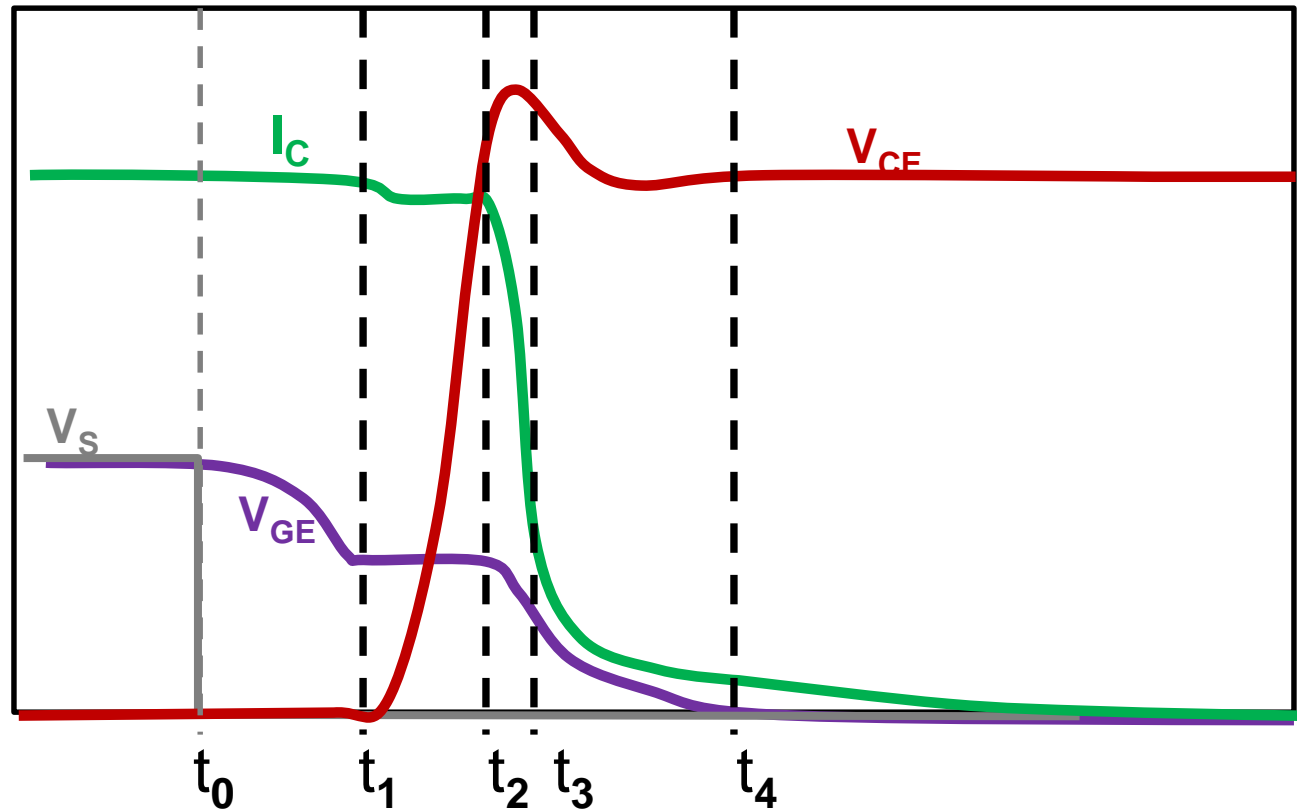
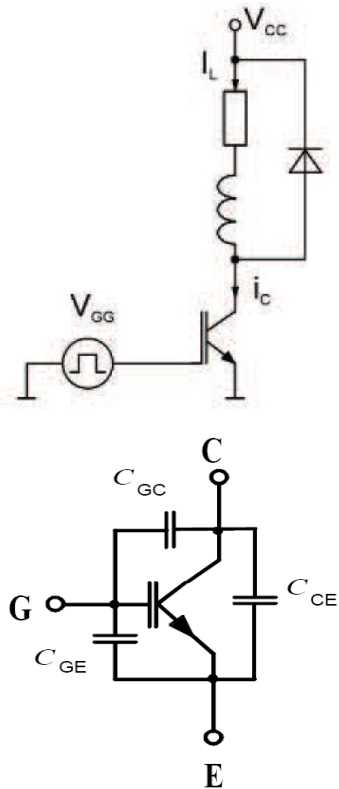
Efectos en la conmutación del IGBT: Conducción



Encendido por tensión (corriente limitada):

- t_0 - t_1 : La V_{GE} no llega a $V_{GE(T)}$ del IGBT, $I_C=0$
- t_1 - t_2 : Crece I_C y disminuye V_{CE} (y V_{CG}).
- t_2 - t_3 : I_C tiene un sobrepico por la recuperación inversa del diodo *freewheeling*, V_{CE} no decae en este intervalo.
- t_3 - t_4 : Una gran dV_{CE}/dt negativa se acopla por C_{GC} , impidiendo aumentar la V_{GE} (I_G carga la C_{GC})
- $t_4 \rightarrow$: Al disminuir la magnitud de dV_{CE}/dt (y dV_{GC}/dt), V_{GG} termina de cargar las capacitancias C_{GC} y C_{GE} .

Efectos en la conmutación del IGBT: Bloqueo



Bloqueo:

- t_0 - t_1 : I_G descarga la tensión de puerta hasta el umbral de bloqueo del IGBT V_{TH} .
- t_1 - t_2 : Una pequeña disminución de I_c inicia un aumento de V_C , que se acopla a través de C_{GC} aportando carga a G, que la excitación debe drenar. En este intervalo V_{GE} se mantiene casi constante.
- t_2 - t_3 : Terminada de cargar C_{GC} , V_{GE} e I_c disminuyen rápidamente, provocando el pico de tensión en t_3 debido a la fem de la carga inductiva.
- t_3 - $t_4 \rightarrow$: Desaparece la fem, V_{CE} se equilibra, I_c termina de extinguirse (*tail current*)

IGBT: PT vs NPT

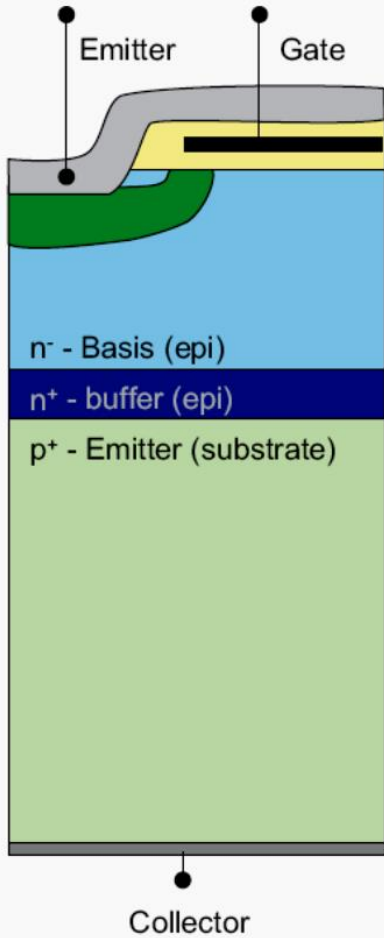
	Punch Through (PT)	Non - Punch Through (NPT)	Soft Punch Through (SPT)
Structure			
Features	Some devices show snappy turn-off at high V_{DC}	Positive temperature coefficient of on-state Extremely rugged	Positive temperature coefficient of on-state Extremely rugged Low losses
Material	Epitaxial	Float Zone	Float Zone

N+ acelera la recombinación de huecos (disminuye T_{off})

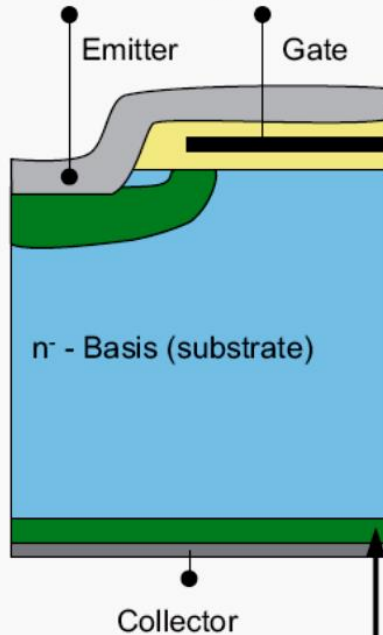
	PT	NPT
Pérdidas de conmutación	bajo T_{off} (tail current)	medio T_{off}
Pérdidas de conducción	bajas, disminuyen con T	medias, aumentan con T
Conexión en paralelo	difícil $V_{ce} T^{\circ} \propto (-)$	Fácil ($T^{\circ} \text{ coef } +$)
Resiste cortocircuito	limitado	Sí

IGBT: Generaciones

Punch Through



IGBT (1/2)
Punch Through



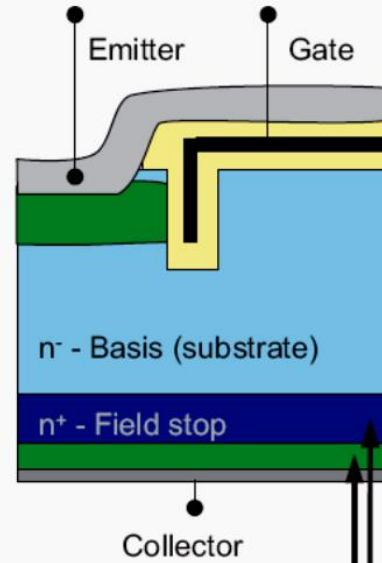
Advantage

- Implanted back-emitter, better adjustable

Performance

- Lower switching losses
- Higher switching robustness

IGBT3
Trench + Field stop



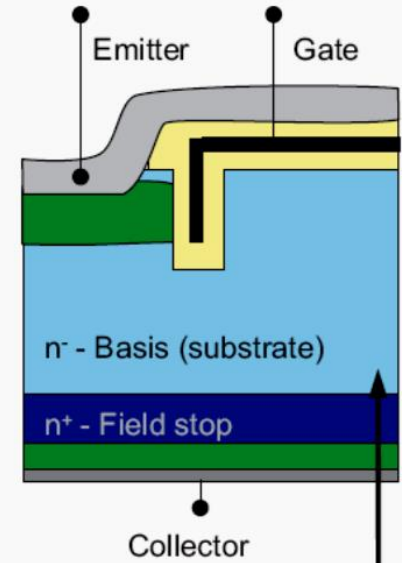
Advantage

- Implanted back-emitter
- Implanted field stop enables thinner base region

Performance

- Lower $V_{CE(sat)}$
- Lower switching losses
- Robustness like NPT

IGBT4
Trench + Field stop



Advantage

- Optimised charge carrier Modulation

Performance

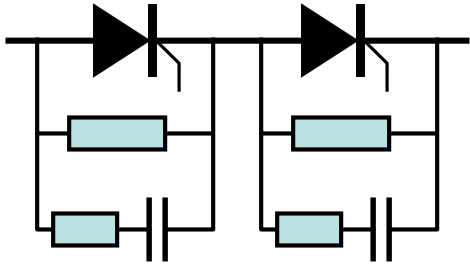
- Lower switching losses
- Improved "softness"
- Robustness like NPT

5) Agrupamiento de dispositivos

5) Conexión en serie y paralelo

Conexión Serie

- Se utiliza cuando la tensión de bloqueo requerida por la aplicación supera las especificaciones de bloqueo de los dispositivos.
- Debe utilizarse externamente resistencias y capacitores en paralelo con cada elemento para equilibrar las tensiones durante el bloqueo y la conmutación.
- Mientras más estricto deba ser el equilibrio, menores deberán ser los valores de las R y mayores los de los C.



Conexión paralelo

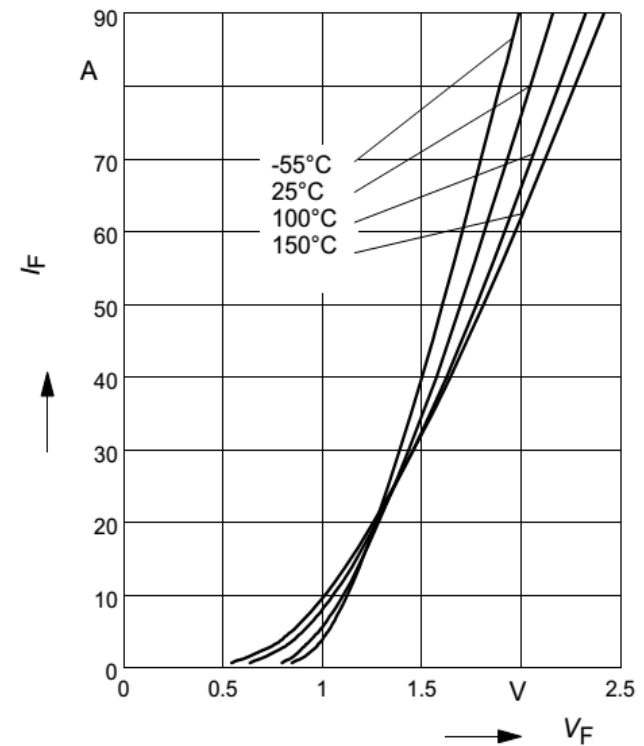
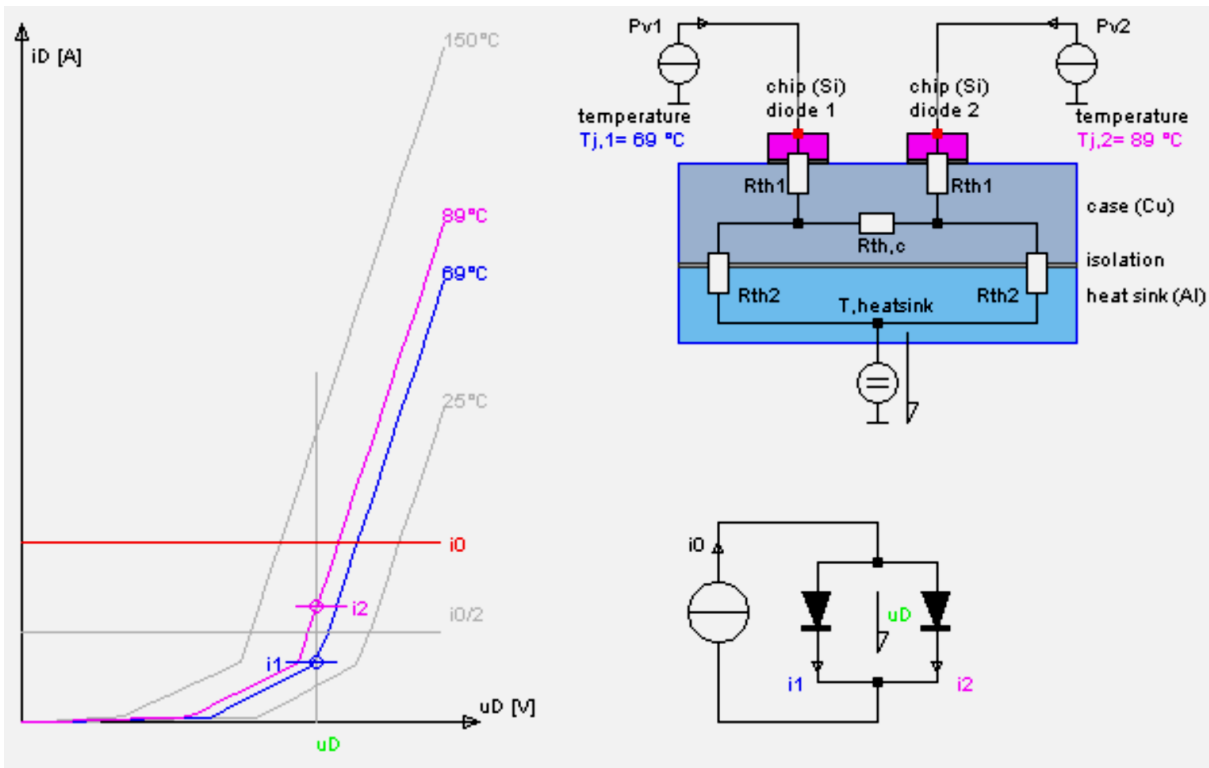
- Se utiliza cuando la corriente de conducción requerida por la aplicación supera las especificaciones de corriente o disipación de los dispositivos.
- En los dispositivos con coeficiente positivo de temperatura para la caída de tensión en conducción (Ej MOSFET) la corriente tiende a distribuirse uniformemente (ej 50/50 para 2 elementos).
- En dispositivos con coeficiente negativo de temperatura (Ej tiristores, diodos, IGBTs) es fundamental emparejar sus características y equilibrar térmicamente los elementos. A pesar de esto la corriente se va a distribuir de manera despareja, por ejemplo 60/40 para 2 elementos. Se utilizan métodos estadísticos para determinar la distribución esperable de corrientes en el peor caso (Monte Carlo: simulación con variación aleatoria de parámetros de dispositivos según especificaciones del fabricante)

La conmutación debe ser lo más simultánea posible.

Diodos/Tiristores en paralelo

Ejemplo: Diodos en paralelo

- Se simula la redistribución de corrientes durante la conducción, y la influencia del desbalance térmico, según ubicación en disipador



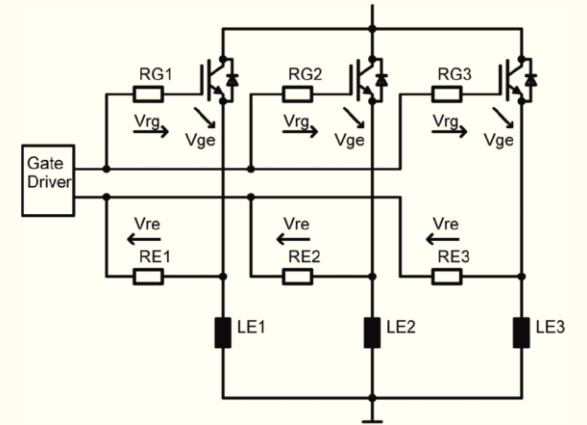
Diodo paralelizable (infineon IDB30E60)
(no *Thermal Runaway*)

IGBTs en paralelo

Utilizar un mismo *driver* para evitar defasajes de la excitación.

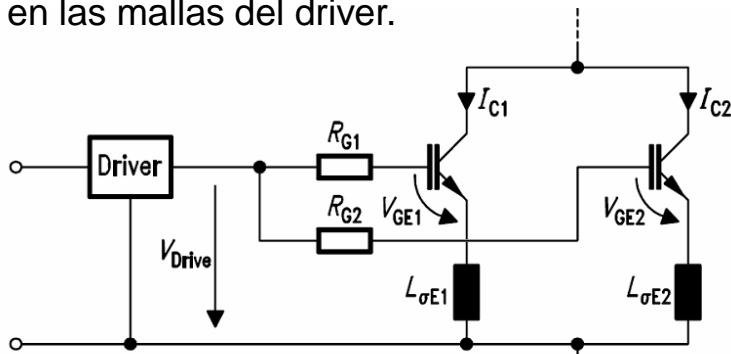
R_{G1} , R_{G2} , R_{G3} , aseguran una distribución de la excitación.

R_{E1} , R_{E2} , R_{E3} conectadas directamente sobre los emisores compensan los desbalances de las L_{Ei} (parásitas)

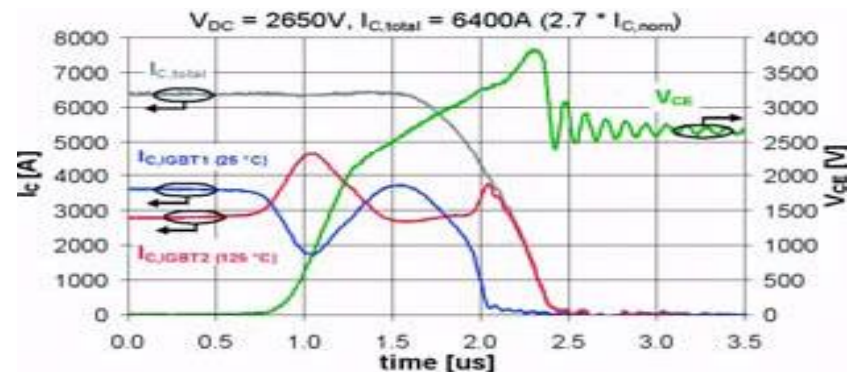
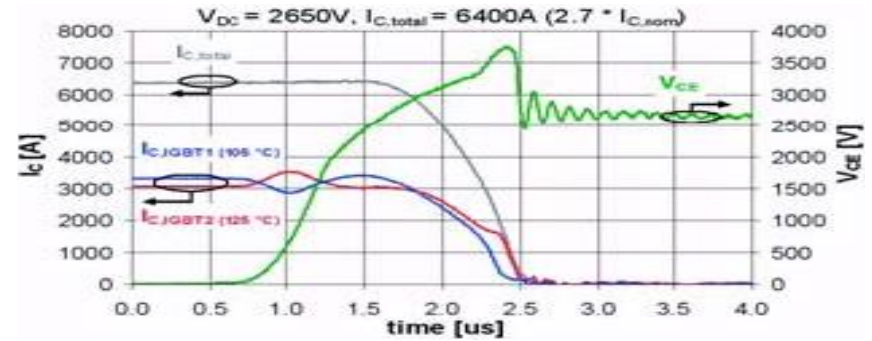


Ejemplo:

- Se muestra el efecto de desbalances térmicos de 20° y 100° en la redistribución de corrientes durante la conducción y durante la conmutación. También el efecto de oscilación durante el paso a bloqueo (*Turn-off*) por inductancias parásitas en las mallas del driver.



Revista Bodo's Power Marzo 2007, pp 28-31

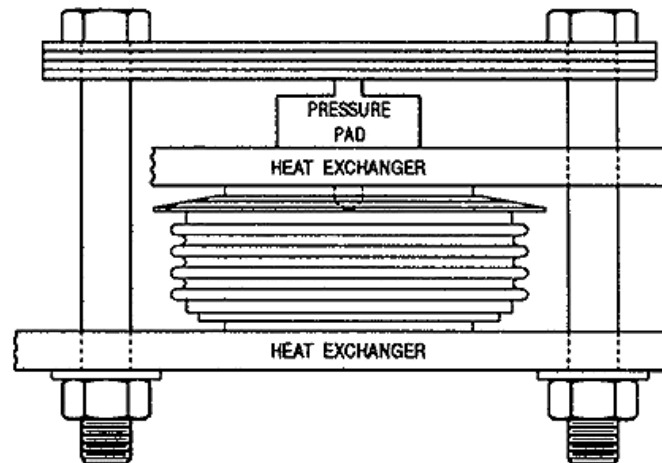
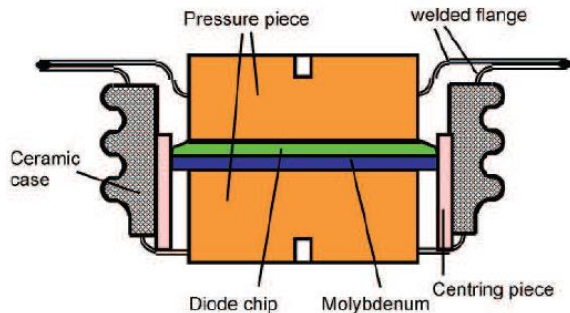


6) Encapsulados para PSD – Cálculo Térmico

Encapsulado Disco



En el encapsulado **Disk** o **press pack** los terminales están conectados internamente a presión. Al no tener conexiones soldadas ni aleadas, ofrece la mayor la robustez frente a ciclos térmicos, pues permite que los componentes internos con distinto coeficiente de dilatación térmica se muevan independientemente. Para funcionar **DEBEN ESTAR PRESIONADOS EXTERNAMENTE** para asegurar el contacto interior. **NUNCA** se debe utilizar un dispositivo disco sin la presión mecánica externa adecuada. El valor adecuado de esta fuerza axial se encuentra especificado, y debe aplicarse a través del disipador, lo que asegura una distribución uniforme de la presión.

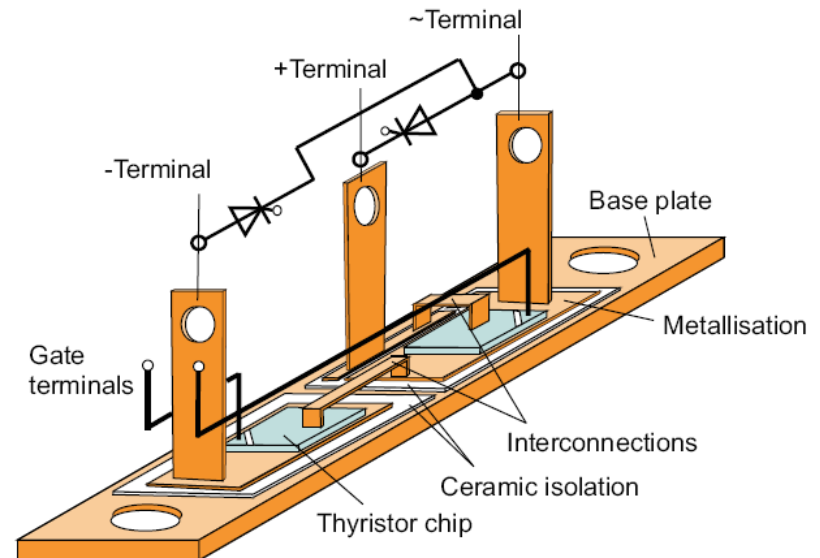
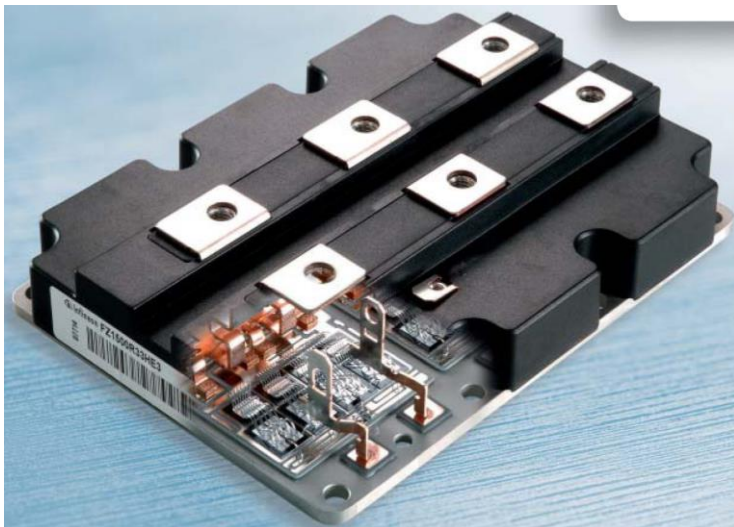


Roughness 0.8 μm
Flatness 10 a 15 μm
diámetros 50 a 100mm
Fm 1 a 5kN/cm²















Encapsulado en módulo



El encapsulado tipo **módulo** consiste en una base de metal (no siempre) que conduce el calor al disipador de calor, una placa cerámica conductora del calor pero aislante eléctrico entre las partes activas y la base, uno o varios elementos semiconductores interconectados, y una caja protectora de plástico con terminales roscados.



Encapsulados para MOSFETs de potencia

MOSFET DE POTENCIA			
Encapsulados y Figuras			
<p>DIL-4</p> 	<p>SO-8</p> 	<p>SOT-227</p> 	<p>TO-3</p> 
<p>TO-3P TO-247</p> 	<p>TO-39</p> <p>BOTTOM VIEW</p>  <p>01 02 03</p> <p>1 - DRAIN 2 - GATE 3 - SOURCE</p>	<p>TO-92</p> 	
<p>TO-220</p> 	<p>T-220-5</p> 	<p>TO-251AA</p> <p>I PACK</p> 	<p>TO-252AA</p> <p>D PACK</p> 
<p>TO-262</p> 	<p>TO-263-3</p> <p>D2PAK</p> 	<p>TSMD</p> 	

G. M. Electrónica S. A. - Av. Rivadavia 2458 - C1034ACQ - Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina - Tel.: (011) 4953-041 71324 - Fax: (011) 4953-2971

Web: <http://www.gmelectronica.com.ar> - E-mail: ventas@gmelectronica.com.ar

Tecnologías de conexión eléctrica-mecánica-térmica

Técnicas:

- Soldadura térmica
- Soldadura ultrasónica (*wire bonding*)
- Sinterizado de plata (*diffusion sinthering*)
- Contacto flexible

Factores:

- Temperatura
- Ciclos térmicos
- Vibración
- Corrosión

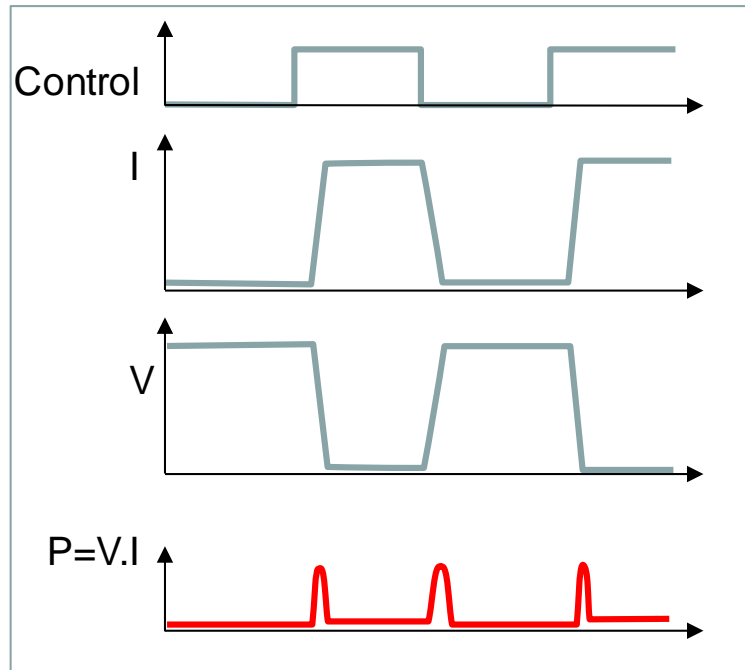
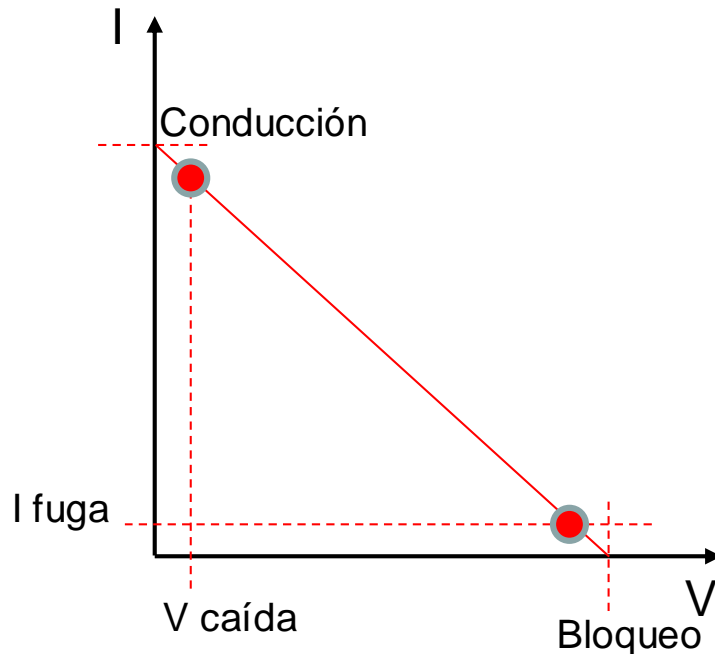
Property		Solder layer SnAg(3)	Ag sintered layer
Melting point	°C	221	962
Heat conductivity	W/mK	70	240
Electric conductivity	MS/m	8	41
Typical layer thickness	µm	90	20
Thermal expansion coefficient	ppm/K	28	19

Disipación del calor – Cálculo térmico

Cualquier dispositivo de potencia (diodo, BJT, Tiristor, MOSFET, IGBT etc) aún trabajando en conmutación, tendrá pérdidas.

Las **pérdidas estáticas** se deben a que el dispositivo en **conducción** (llave cerrada) presenta una **caída de tensión**, y en **bloqueo** (llave abierta) una **corriente de fuga**. Suele ser más significativa la **pérdida en conducción** que la **pérdida en bloqueo**.

Por otra parte, y durante el paso de un estado al otro se produce la existencia simultánea de corriente y tensión de un valor significativo, dando lugar a pulsos de potencia con máximos en la zona central de la recta de carga. Si el dispositivo trabaja conmutando a una cierta frecuencia habrá entonces un valor de potencia media, proporcional a esta frecuencia de conmutación. Esta potencia constituye las **pérdidas dinámicas** o **pérdidas en conmutación**.



Disipación del calor en dispositivos de potencia

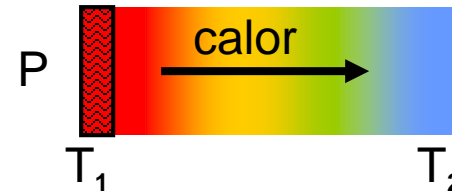
La suma de ambas pérdidas (estáticas y dinámicas) provocan que el dispositivo eleve su temperatura. Es importante determinar que la temperatura a la que estará sometido el semiconductor, denominada **Temperatura de Juntura T_J** esté por debajo de la temperatura máxima **T_{Jmax}** indicada por el fabricante, por un margen razonable, por ejemplo 10 a 20°C, aún a la mayor temperatura ambiente esperable.

La diferencia que se produce entre la de juntura **T_J** y la temperatura ambiente **T_A** es directamente proporcional a la potencia disipada, e inversamente proporcional a la conductividad térmica del camino entre la juntura y el ambiente. En las hojas de datos de los dispositivos se suele especificar, en vez de la conductividad térmica, su inversa que es la resistencia térmica.

Así podemos definir la Ley de Fourier, análoga a la Ley de Ohm, en la que en vez de corriente (flujo de portadores) se produce el **flujo de calor** que es la potencia generada en un punto 1 **P_1** , en vez de Resistencia Eléctrica se tiene la **Resistencia Térmica, R_{θ} o R_{th}** y en lugar de diferencia de potencial **$V_1 - V_2$** se produce una **Diferencia de Temperatura $\Delta T = T_1 - T_2$**

Es decir, **$\Delta T = P_1 \cdot R_{\theta 12}$**

O también **$T_1 = T_2 + P_1 \cdot R_{\theta 12}$**



Cuando la producción de calor no es constante sino pulsante, cobra importancia la capacidad calorífica del medio que rodea a la fuente de calor. Esta capacidad calorífica actúa de manera análoga a la capacitancia eléctrica. En estos casos se habla entonces de **Impedancia térmica Z_{θ} o Z_{th}** .

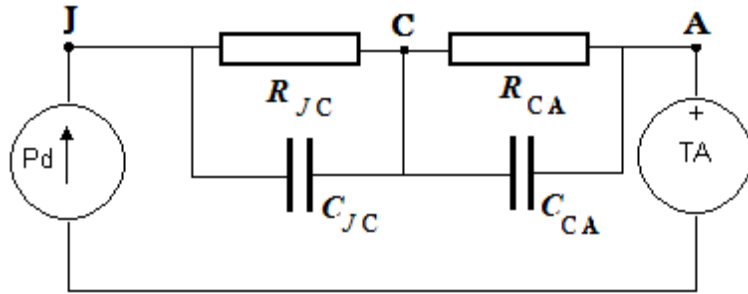
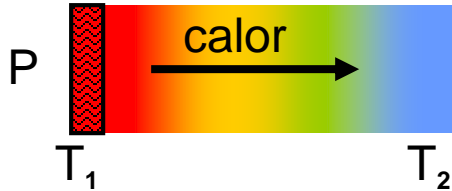
En ambos casos, **Z_{θ} o R_{θ}** , se trata de una simplificación, ya que se está asignando un único escalar que representa la inversa de la conductividad conjunta de los múltiples caminos para el flujo del calor desde la zona de generación hacia el ambiente.

Disipación del calor – Cálculo térmico

R_{TH} ó R_{θ} : Resistencia térmica

Z_{TH} ó Z_{θ} : Impedancia térmica

$$Z_{th}(t) = \frac{T_1(t) - T_2(t)}{P}$$



Sin disipador:

$$R_{JA} = 40 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Z_{THJC} Impedancia térmica junta-carcasa

Z_{THCS} Impedancia térmica carcasa-disipador

Z_{THSA} Impedancia térmica disipador-ambiente

Z_{THJA} Impedancia térmica junta-ambiente

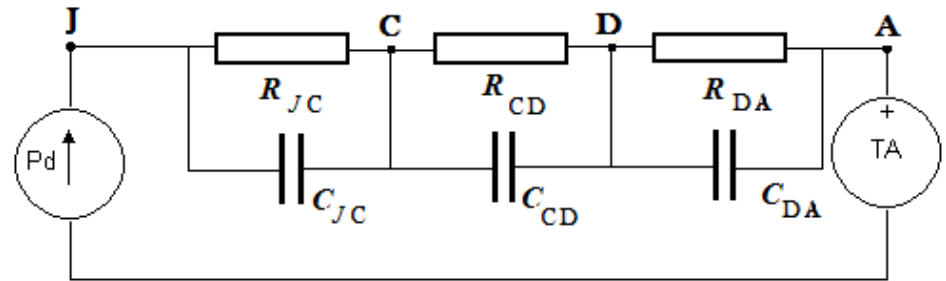
Ej: IRF530 MOSFET Encapsulado TO-262

$$R_{thJC} = 2.15 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{thJA} = 40 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{thCS(\text{Típica})} = 2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

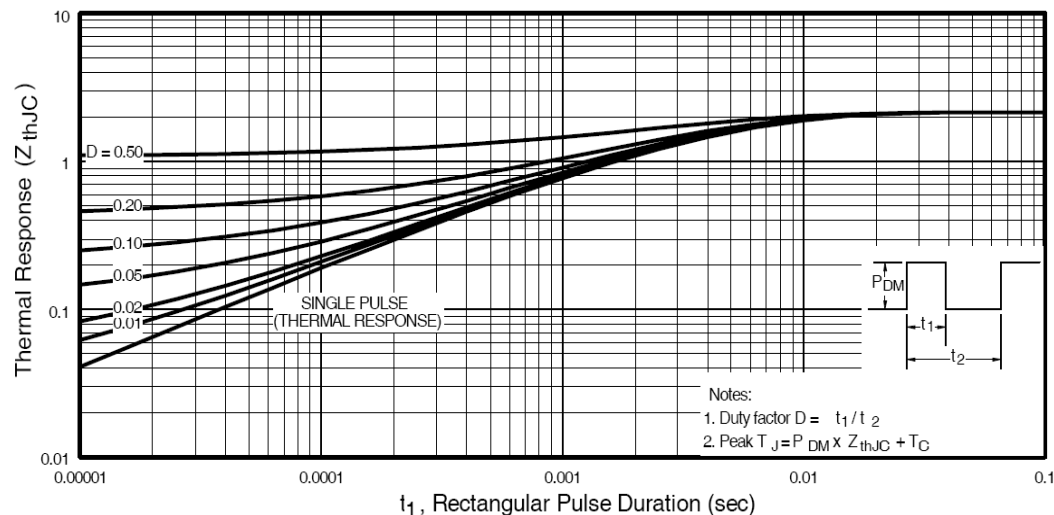
$$R_{thSA} = 6 \text{ } ^\circ\text{C/W} \text{ (ejemplo de disipador)}$$



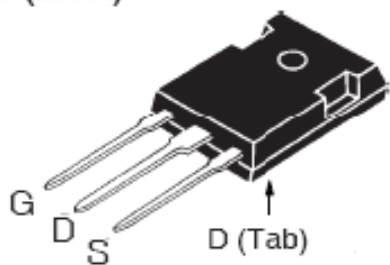
Con disipador:

$$R_{JA} = R_{JC} + R_{CS} + R_{SA} = 2,15 + 2 + 6 = 10,15 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Disipación – Impedancia térmica (1)



TO-247 (IXTH)



TO-268 (IXTT)

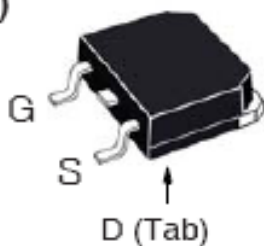
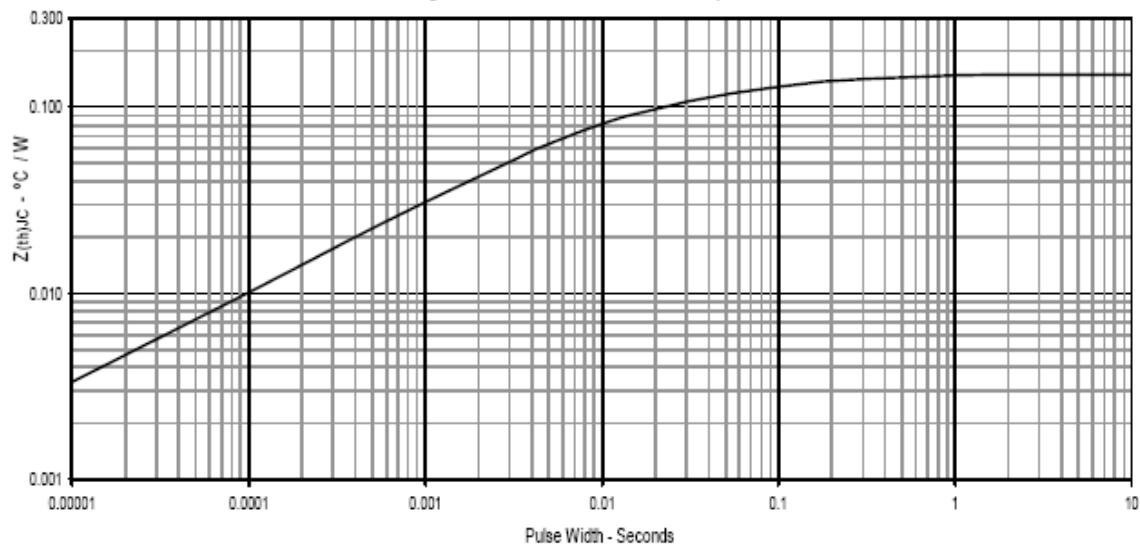


Fig. 19. Maximum Transient Thermal Impedance



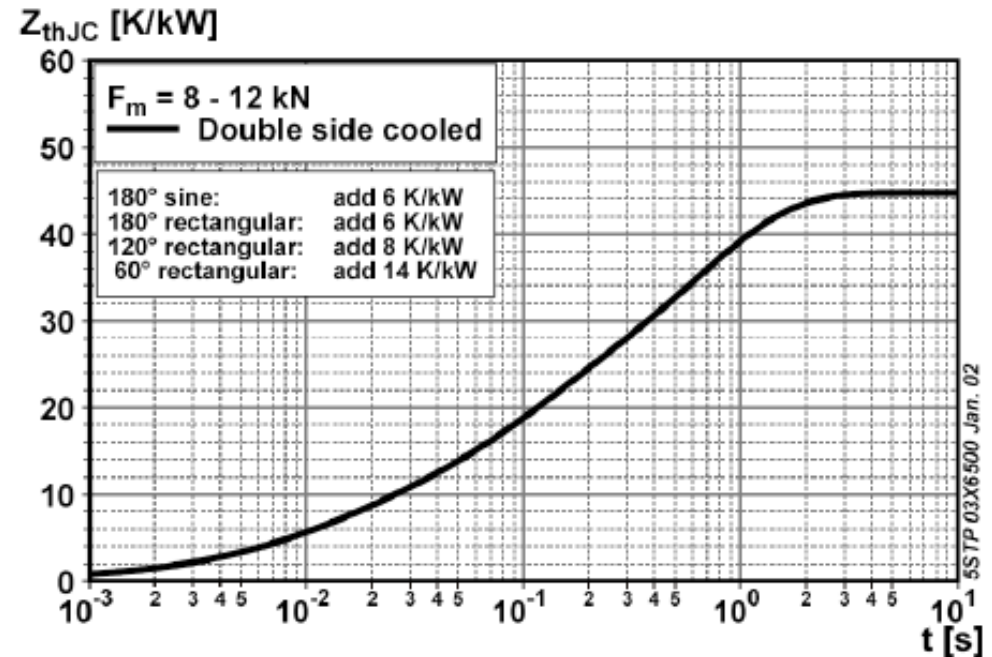
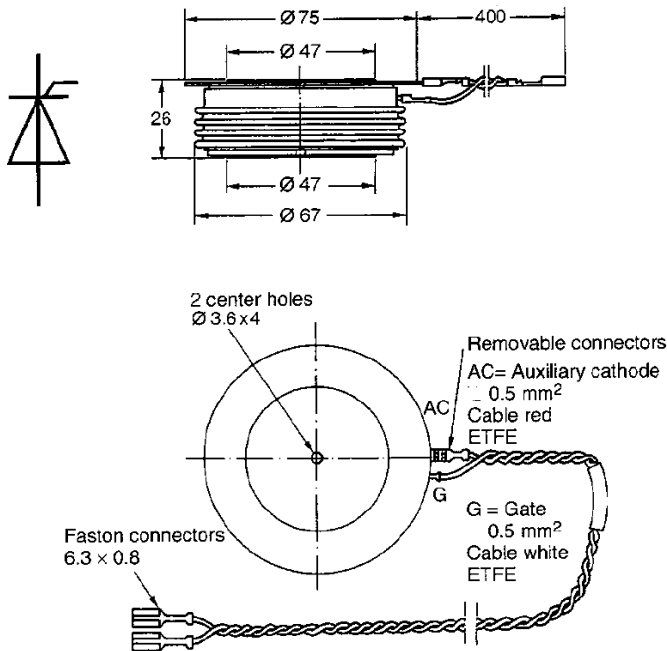
Disipación – Impedancia térmica (2)

5STP 03X6500 (Tiristor ABB 6500V, 550A)

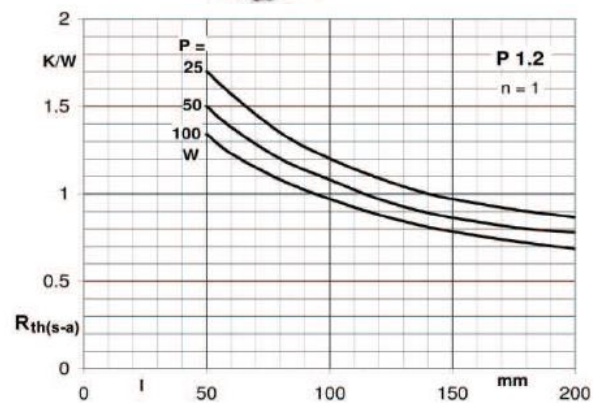
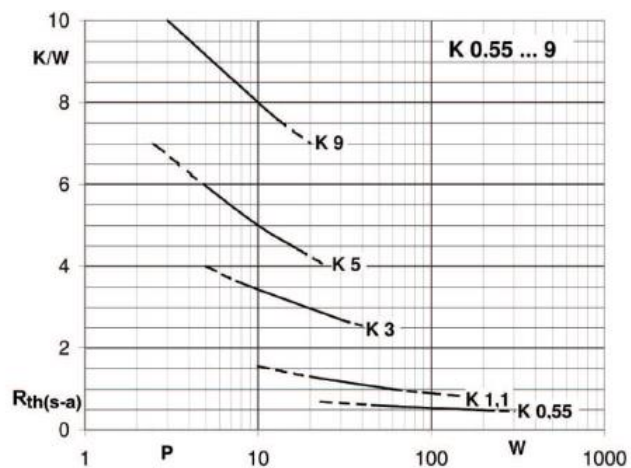
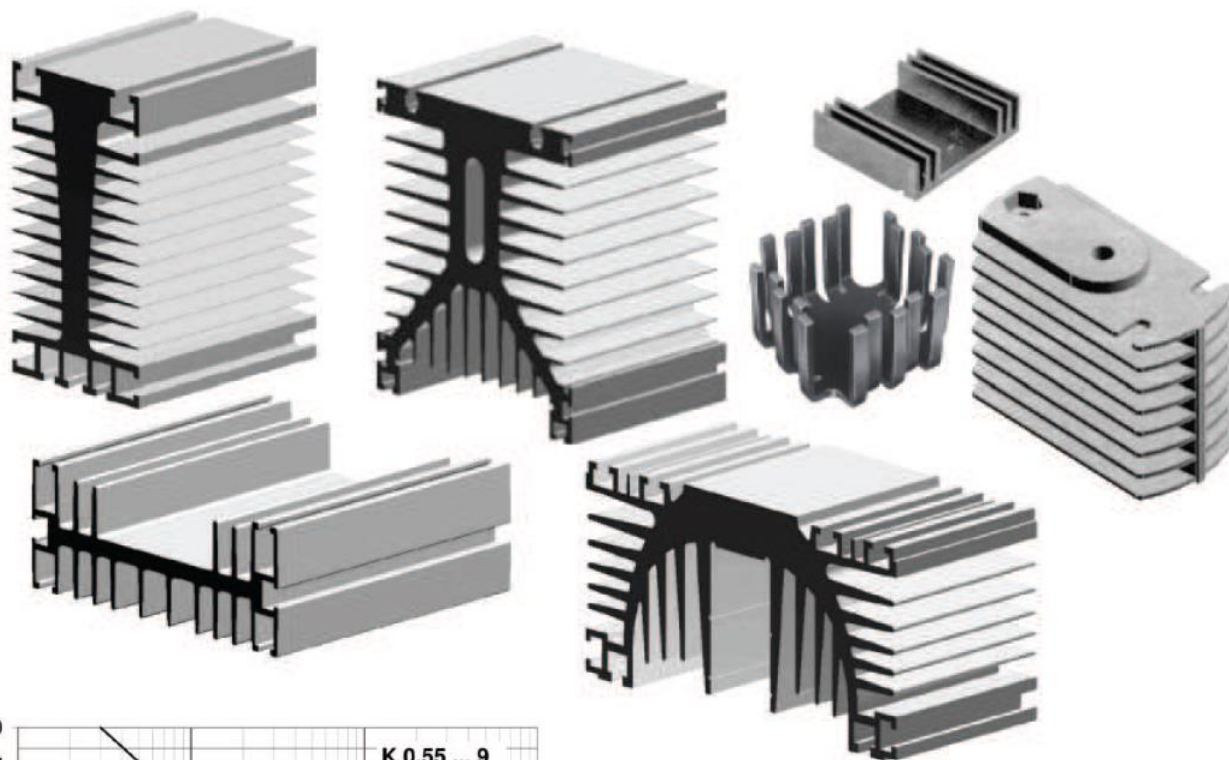
$$Z_{thJC}(t) = \sum_{i=1}^n R_i(1 - e^{-t/\tau_i})$$

Función analítica de impedancia térmica transitoria J-C

i	1	2	3	4
R_i (K/kW)	26.07	12.16	3.37	3.1
τ_i (s)	0.6439	0.0812	0.0161	0.0075



Disipación del calor – Disipadores en aire



Disipación del calor – Disipadores con agua



Phase arm for combination of Diodes, Thyristors & Fuses
Nom. Thermal resistance = 0.012°C/W @ 6L/min.



Base for isolated Diode/Thyristor and IGBT packs.
Nom. Thermal resistance = 0.024°C/W @ 4L/min.

Cálculo térmico en un MOSFET

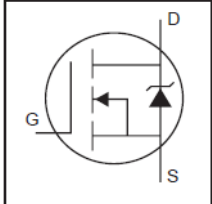
En la hoja de datos de un MOSFET típico encontramos estos datos importante para el cálculo térmico. En primer lugar vamos a evaluar las pérdidas estáticas del MOSFET, que son prácticamente las de conducción, y se calculan como $P=I^2 \cdot R_{DS(on)}$. La $R_{DS(on)}$ es un dato, en este caso 17,5miliohms a 25°C. Observe que el valor de $R_{DS(on)}$ aumenta con la temperatura, a 140°C duplica el valor (35mohms)

International Rectifier PD - 94053

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$V_{DSS} = 55V$

$R_{DS(on)} = 17.5m\Omega$

$I_D = 49A$

Description
Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve

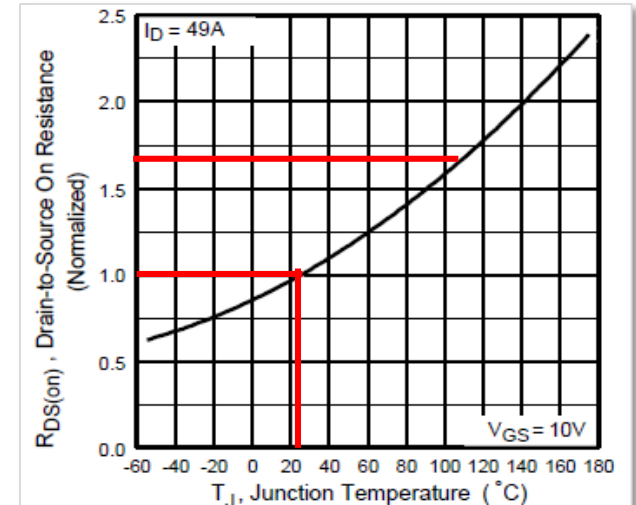


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Suponga que a este transistor de 49 A pretende utilizarlo en una aplicación que requiera 20A.

La pérdida de conducción a 25°C sería $P=20^2 \cdot 0,0175 = 7$ watts.

La resistencia térmica juntura-ambiente (es decir el transistor sin disipador) es de 62°C/W.

La temperatura que alcanzará la juntura es: $T_j = 25^\circ C + 7 W \cdot 62 \text{ }^\circ C/W = 459 \text{ }^\circ C$!!!

Es decir, se destruye, ya que la máxima temperatura de trabajo es 175°C.

Colocando un pequeño disipador de cobre con una ventilación de 1m/s, la $R_{da}=10^\circ C/W$

$R_{ja}=R_{jc}+R_{cd}+R_{da} = 1,5+0,5+10=12^\circ C/W \rightarrow T_j = 25^\circ C + 7W \cdot 12 \text{ }^\circ C/W = 109^\circ C$

Pero... ahora R_{dson} del transistor es mayor, de unos 30miliohm, y la $P=20^2 \cdot 0,03 = 12$ watts...

Método para cálculo térmico en MOSFET

Vemos que el cálculo sería un proceso iterativo, pues la R_{dson} depende fuertemente de la temperatura. Para simplificar la aproximación, conviene comenzar estimando la R_{dson} con la temperatura T_{jx} que consideramos admisible para el trabajo, por ejemplo $T_{jx}=175-20=155^{\circ}\text{C}$. También con la temperatura ambiente correspondiente a la situación más desfavorable, por ejemplo 50°C . Partiendo de estos valores se puede calcular la R_{da} que debería tener el disipador para la aplicación.

$$R_{da} = \frac{(T_{jx} - T_{amb})}{P} - (R_{jc} + R_{cd})$$

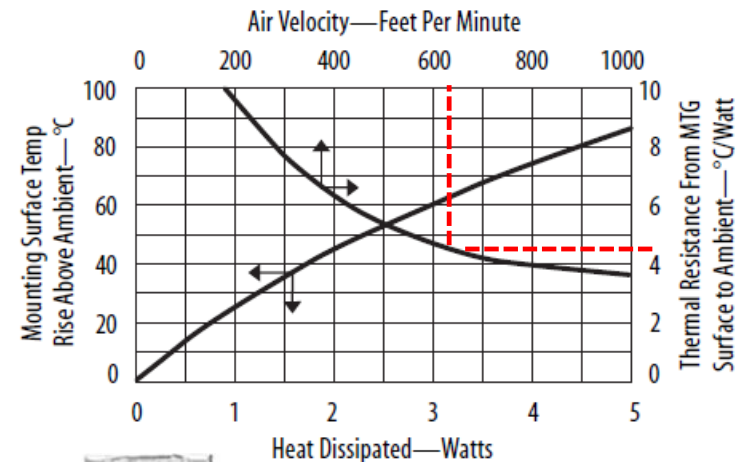
Con $P = I^2 \cdot R_{dson} (@T_{jx})$

Si R_{da} resulta de valor negativo o muy inferior a los valores de disipadores para el encapsulado del MOSFET seleccionado, debe cambiarse de MOSFET, con menor R_{dson} , o cuyo encapsulado permita disipadores del valor calculado.

Retomando el ejemplo anterior, suponemos trabajar con $T_{jx}=140^{\circ}\text{C}$. De la curva de R_{th} normalizada resulta $R_{jc}=2 \times 0,0175 = 0,035$ ohms.
 $P=20^2 \cdot 0,035 = 14\text{W}$

El disipador debería tener una $R_{da}=(140-50)/14\text{W} - (1,5+0,5) = 4,42^{\circ}\text{C/W}$

Existen disipadores de este valor para el encapsulado TO-220, pero con convección forzada.



Pérdidas dinámicas

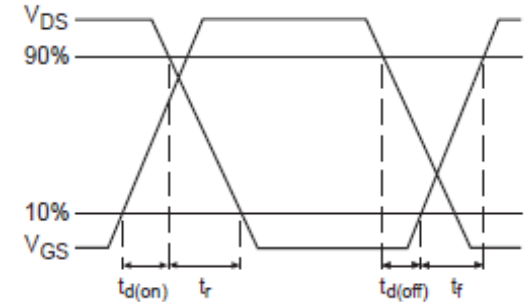
IRFZ44

$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	---	12	---	ns	$V_{DD} = 28V$ $I_D = 25A$ $R_G = 12\Omega$ $V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
t_r	Rise Time	---	60	---		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	---	44	---		
t_f	Fall Time	---	45	---		

IRG4PC40U

$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	----	34	----	ns	$T_J = 25^\circ C$ $I_C = 20A$, $V_{CC} = 480V$ $V_{GE} = 15V$, $R_G = 10\Omega$ Energy losses include "tail"
t_r	Rise Time	----	19	----		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	----	110	175		
t_f	Fall Time	----	120	180		

$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	----	30	----	ns	$T_J = 150^\circ C$, $I_C = 20A$, $V_{CC} = 480V$ $V_{GE} = 15V$, $R_G = 10\Omega$ Energy losses include "tail"
t_r	Rise Time	----	19	----		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	----	220	----		
t_f	Fall Time	----	160	----		



Una aproximación conservadora consiste en suponer que en t_r y t_f se tiene un pulso cuadrado de disipación de valor $P_d = V_{dd} \cdot I_d / 4$ durante todo el intervalo (en vez de una parábola invertida de máximo $V_{dd} \cdot I_d / 4$). Para un IRFZ44 a 40Volts y 20A, será $P(t_r) = 40 \times 20 / 4 = 200W$ durante t_r y t_f . Multiplicando por t_r y t_f se calculan los pulsos de energía, y dividiendo por el período se determina la potencia media disipada por conmutación.

Por ejemplo, a una frecuencia de 100kHz, $T = 10\mu s$, $P(\text{conmut}) = 200W \cdot (60ns + 45ns) / 10\mu s = 2,1W$

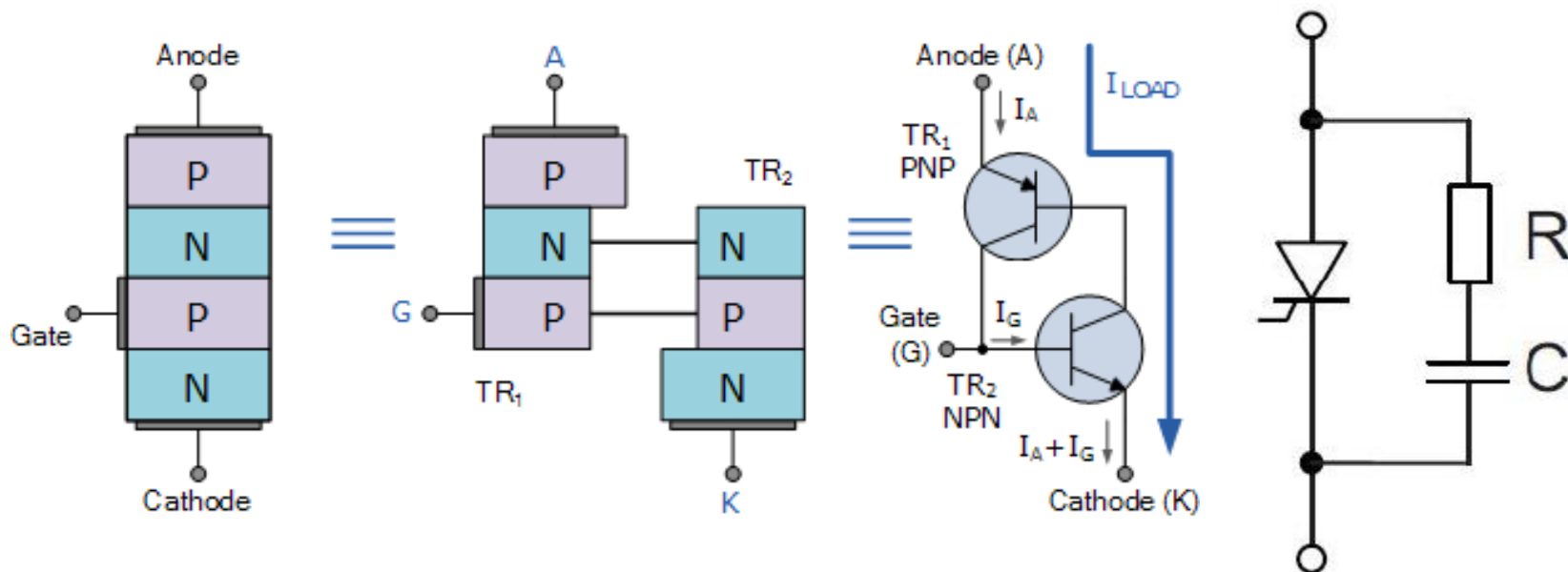
Para el IGBT a igual frecuencia, a $25^\circ C$, $P(\text{conmut}) = 200W \cdot (19ns + 120ns) / 10\mu s = 2,78W$

Y a $150^\circ C$ $P(\text{conmut}) = 200W \cdot (19ns + 160ns) / 10\mu s = 3,5W$

Estas pérdidas se sumarían a las pérdidas estáticas. Por supuesto que con un duty cycle menor al 100% las pérdidas estáticas disminuyen, pero debe contemplarse un caso desfavorable de duty cycle cercano al 100%, en el que se tienen simultáneamente ambas pérdidas a prácticamente el 100%. El cálculo térmico sigue como se vio anteriormente.

7) Circuitos de excitación/bloqueo, protección e inmunización

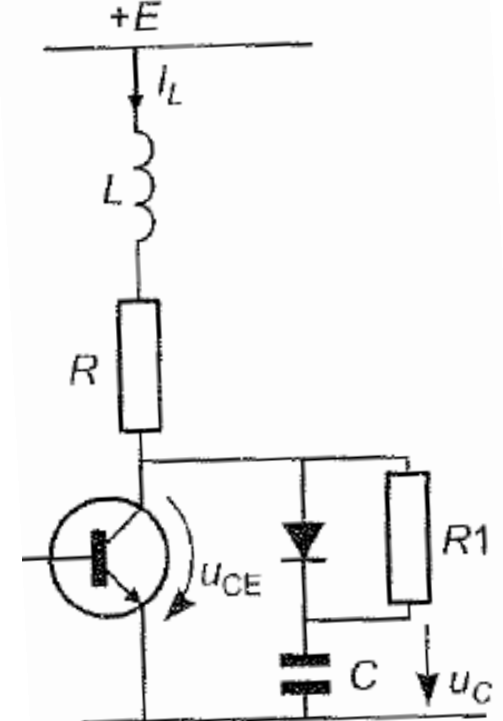
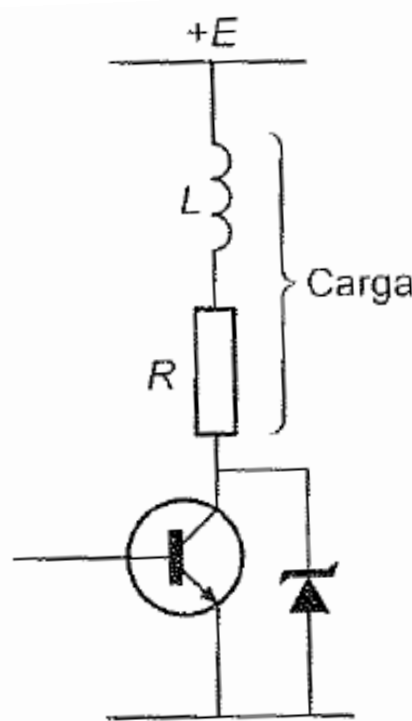
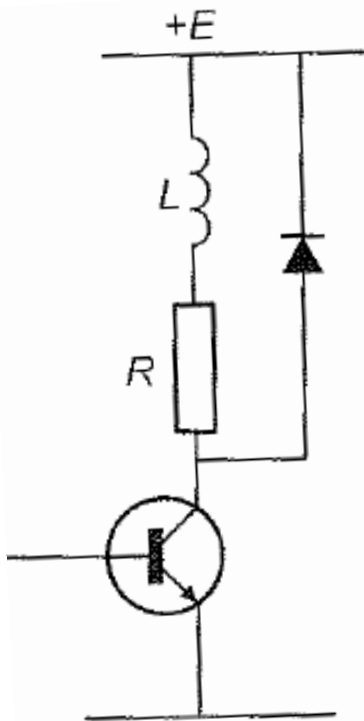
Inmunización básica de un tiristor contra dV/dT



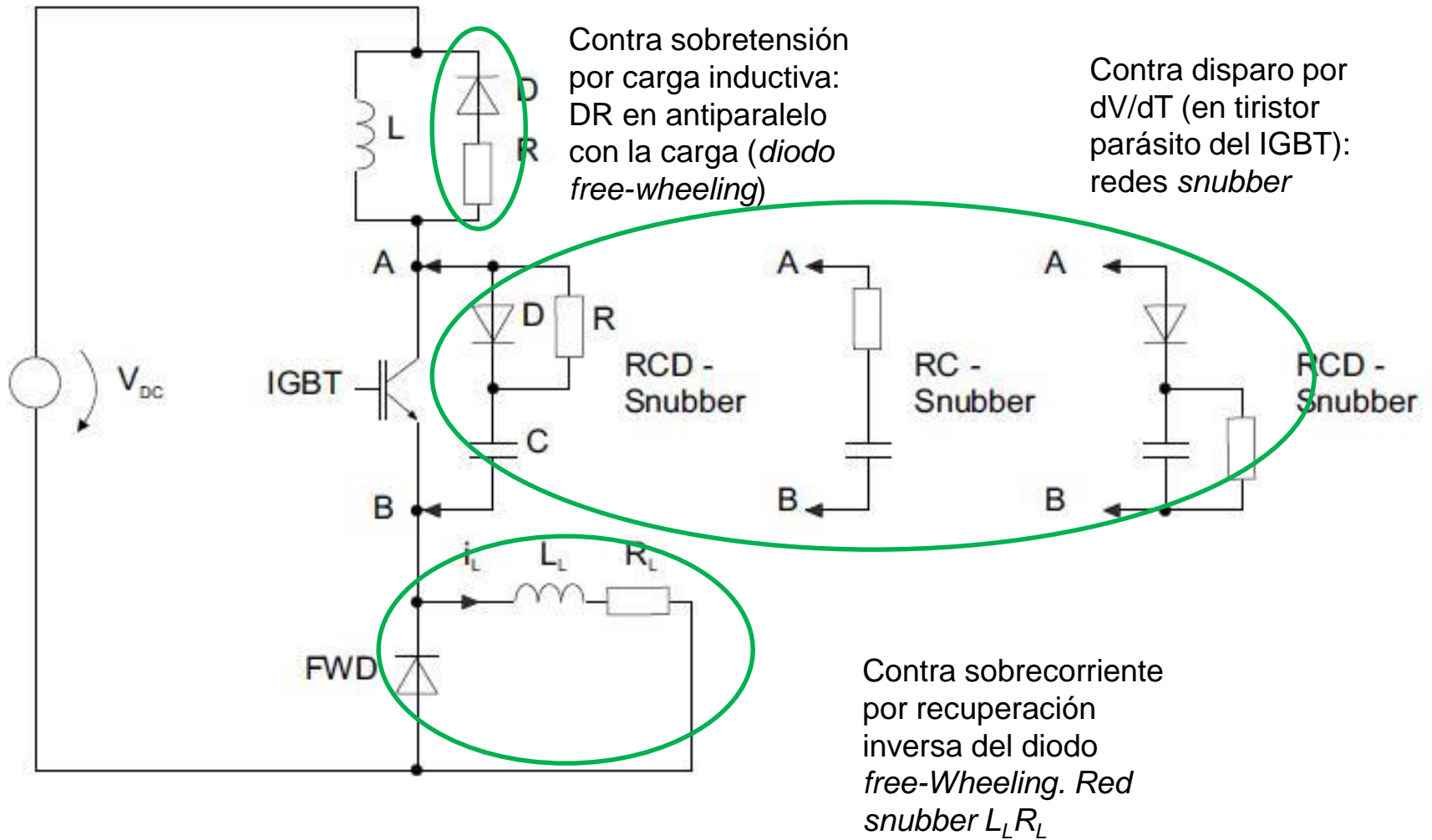
- Cuando el tiristor está bloqueado, casi toda la tensión es soportada en la juntura NP central. La zona de deplexión en esta juntura actúa como una capacitancia C_{np} . Si la tensión ánodo-cátodo crece rápidamente, aunque sea un valor bajo de tensión (es decir, si dV/dT es grande), circulará una corriente $i = C_{np} \cdot dV/dT$ que se inyecta directamente en la base del transistor NPN, provocando el disparo accidental del tiristor.
- Para evitar este efecto, se coloca en paralelo con el tiristor un capacitor C que actuará como un bypass para estas corrientes por dV/dT . El resistor R debe colocarse para proteger a C de corrientes excesivas. A este circuito se lo denomina *Snubber network* (red suavizadora)

Protección básica contra sobretensión en conmutación (ej. carga inductiva)

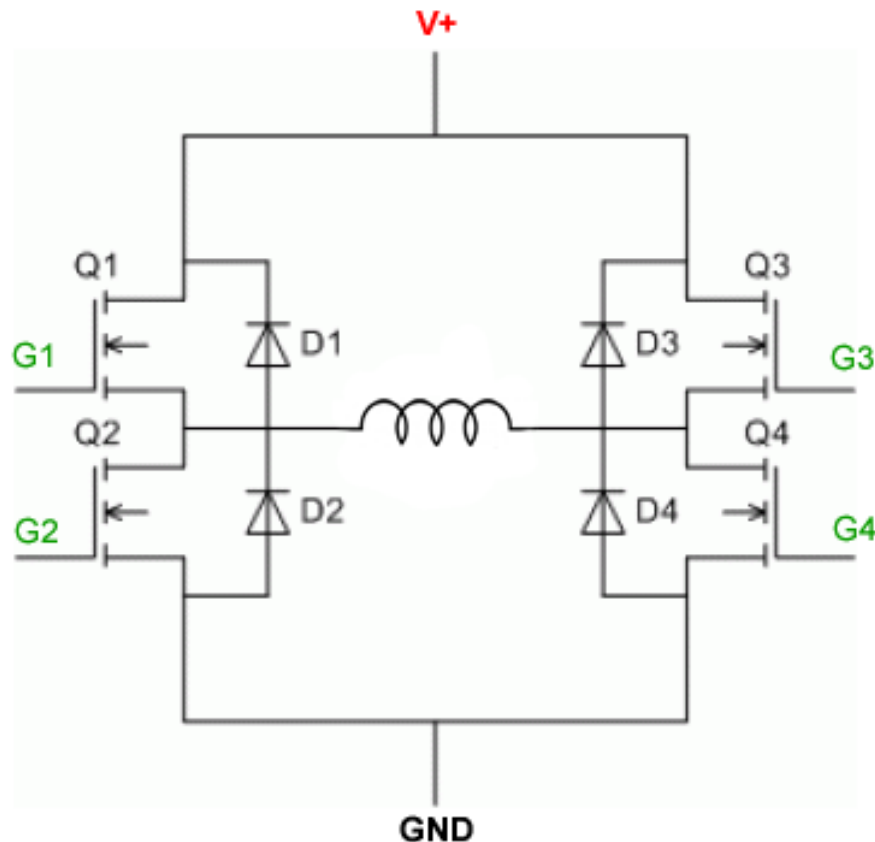
- Diodo en paralelo con la carga. Según la frecuencia de conmutación y tensión inversa a soportar se utilizará PN común (50Hz), PN *fast recovery*, Schottky (kHz, MHz).
- Diodo Zener en paralelo con el dispositivo (sólo para baja energía)
- RCD *snubber*. En bloqueo conduce D y carga C. En conducción se descarga C por R1



Ejemplo de protecciones de un IGBT

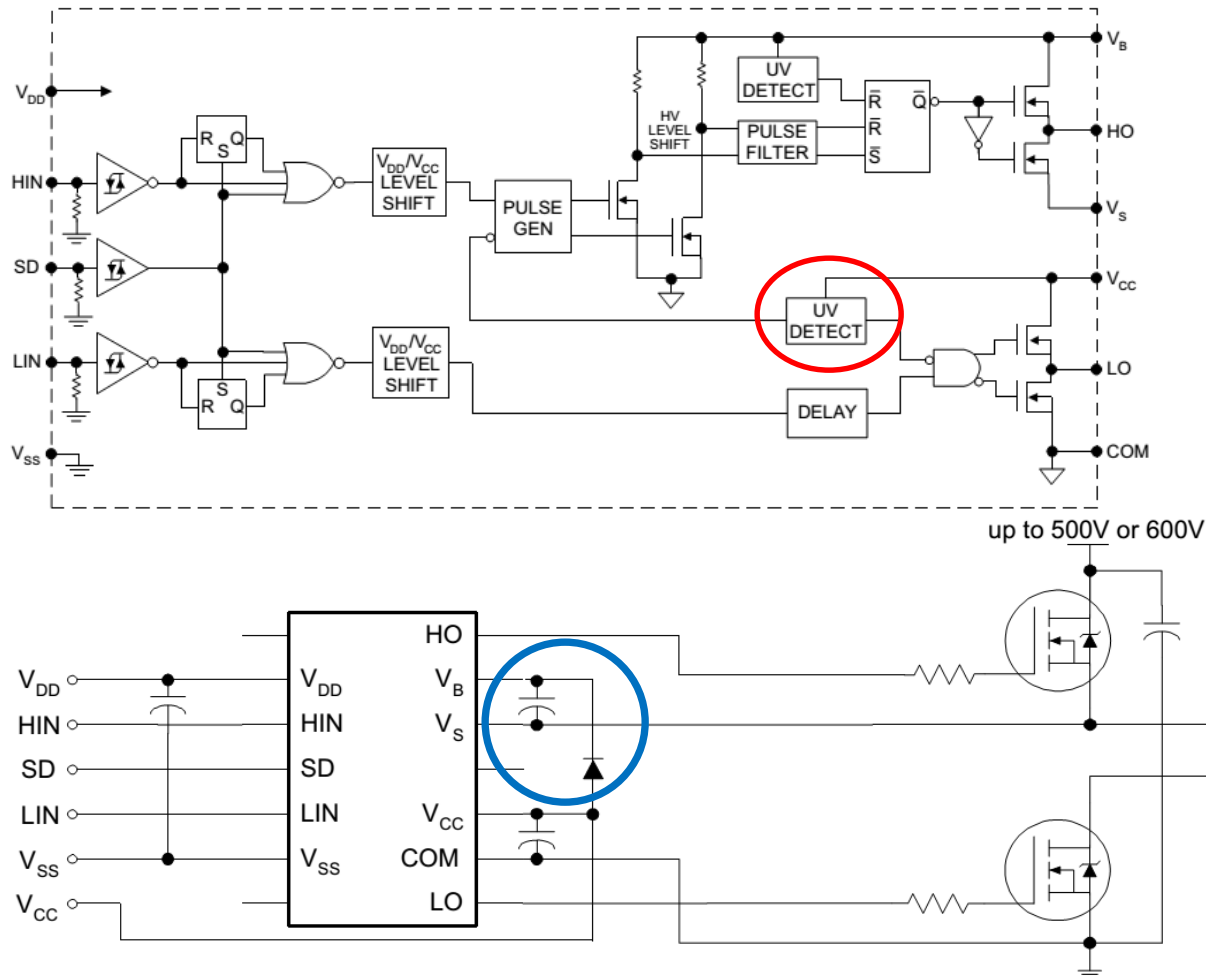


Protección de transistores de un puente con carga L



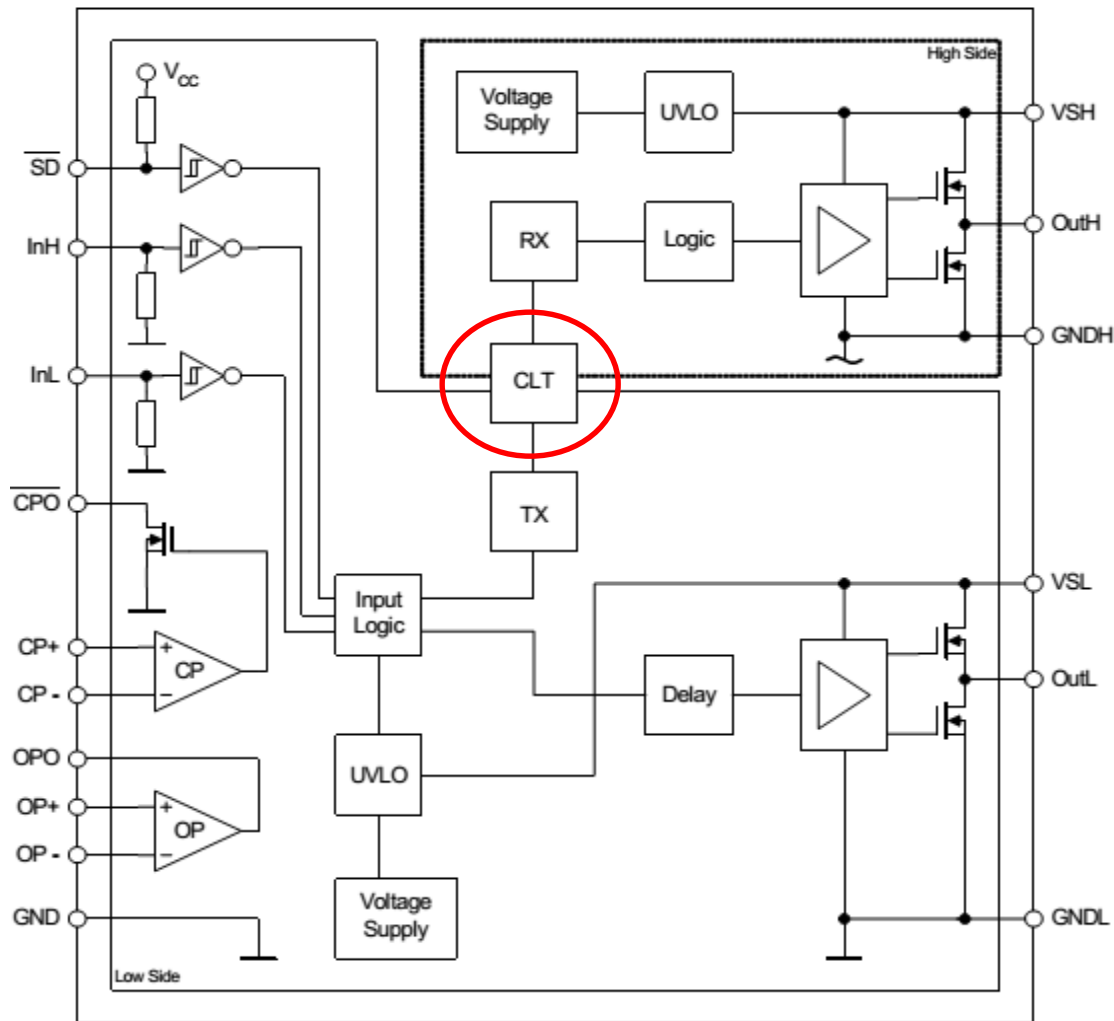
Suponga que en el circuito, $Q1$ y $Q4$ están en conducción y $Q2$ y $Q3$ bloqueados. Se ha establecido una corriente en L de izquierda a derecha. Al bloquear $Q1$ y $Q4$, los diodos $D2$ y $D3$ permiten que la corriente en L no caiga bruscamente, lo que provocaría una sobretensión en $Q1$ y $Q4$.

Excitación de puentes MOSFETs e IGBTs: Integrado IR2110 (International Rectifier)



Este integrado está previsto para trabajar con una **bomba de carga** (*charge pump*), que permite obtener el voltaje necesario para excitar el transistor del *High Side*, y *circuitos detector-bloqueador por bajo voltaje* (*Undervoltage lockout, UVLO*) para evitar que los MOSFET entren en zona "lineal" por tensión de excitación insuficiente.

Driver de MOSFETs e IGBTs 2ED020112-FI (Infineon)

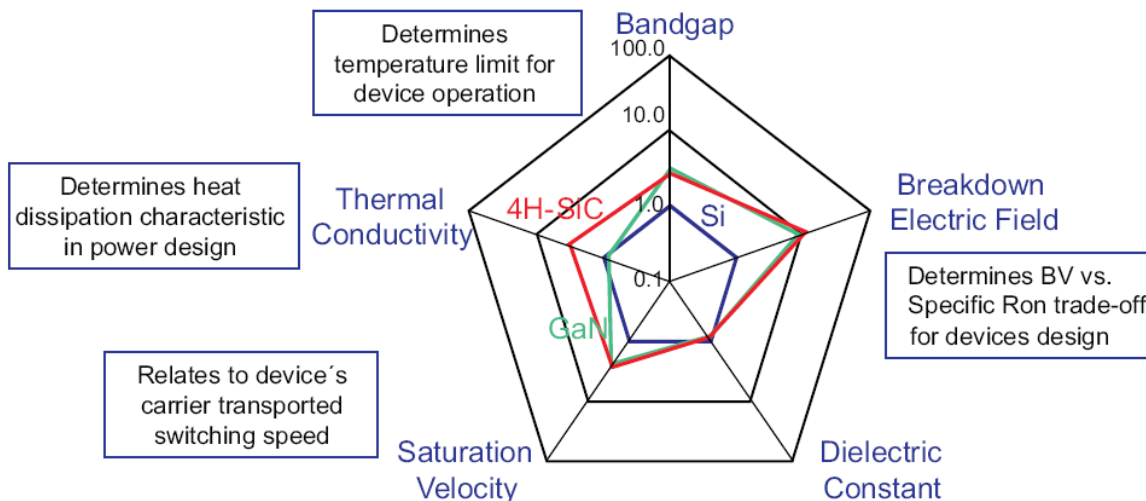


Este circuito dispone de un transformador integrado (*coreless transformer*), que provee 1200 V de aislación galvánica y permite la excitación del transistor del *High Side*.

Tendencias en la Electrónica de Potencia

Nuevos materiales semiconductores

Parameters			Si	4H-SiC	GaN
Bandgap energy	E_g	eV	1.12	3.26	3.39
Intrinsic density	n_i	cm^{-3}	$1.4 \cdot 10^{-10}$	$8.2 \cdot 10^{-9}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$
Breakdown field intensity	E_c	MV/cm	0.23	2.2	3.3
Electron mobility	μ_n	cm^2/Vs	1,400	950	1,500
Drift velocity	v_{sat}	cm/s	10^7	$2.7 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$
Dielectric constant	ϵ_r	-	11.8	9.7	9.0
Heat conductivity	λ	W/cmK	1.5	3.8	1.3



SiC

- ✓ La resistencia ON se baja en un factor de 1/300
- ✓ Permite temperaturas de funcionamiento de hasta 500°C
- ❖ La tensión umbral de juntura es incrementada a 2,5
- ❖ Las capacitancias de juntura son mucho mayores.
- ❖ No se pueden aplicar tecnologías de difusión de impurezas.

