



# ***Dispositivos semiconductores para la Electrónica de Potencia***

Tema 2



# TIPOS DE DISPOSITIVOS

---

## 1. NO CONTROLADOS

- DIODOS

## 2. SEMICONTROLADOS

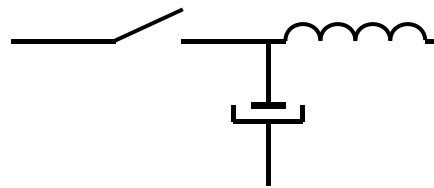
- TIRISTORES

## 3. CONTROLADOS

- TRANSISTORES BIPOLARES
- MOSFET
- IGBT
- GTO
- ETC...

## *Modo de operación*

Los semiconductores utilizados en la Electrónica de Potencia operan como interruptores:



Nos interesa conocer

- Características de conducción
- Características de conmutación
- Método de control

## Valores que definen un componente

### Tensión Inversa

Tensión que debe poder bloquear sin dañarse

- Tensión máxima en continua
- $V_{RRM}$  : Maximum Repetitive Peak Reverse Voltage  
Tensión de pico repetitivo
- $V_{RSM}$  : Maximum Non Repetitive Peak Reverse Voltage  
Tensión de pico no repetitivo

### Tensión Directa

Caída de tensión en conducción

- $V_F$  : Forward Voltage  
También aparece como  $V_D$ , VCE sat...

## Valores que definen un componente

### Corriente Directa

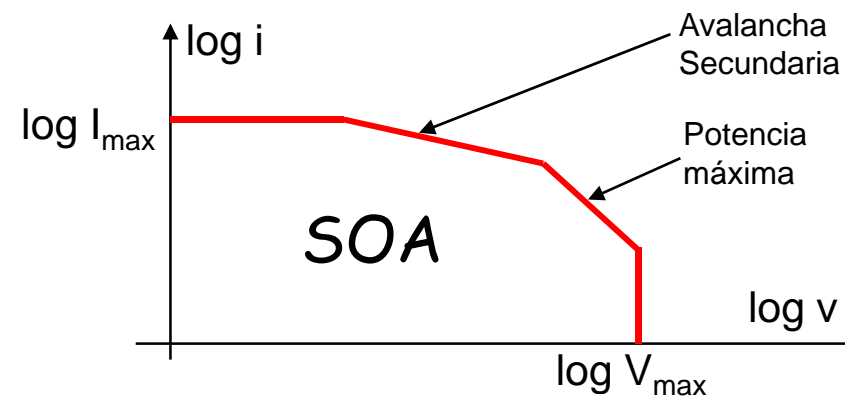
- Corriente media máxima  
 $I_{F(Avg)}$  : Average Forward Current
- Corriente eficaz máxima  
 $I_{F(RMS)}$  : Maximum RMS Current
- Corriente de pico repetitivo  
 $I_{FRM}$  : Maximum Repetitive Peak Forward Current
- Corriente de pico no repetitivo  
 $I_{FSM}$  : Maximum Non Repetitive Peak Forward Current

## Valores que definen un componente

### Otros límites

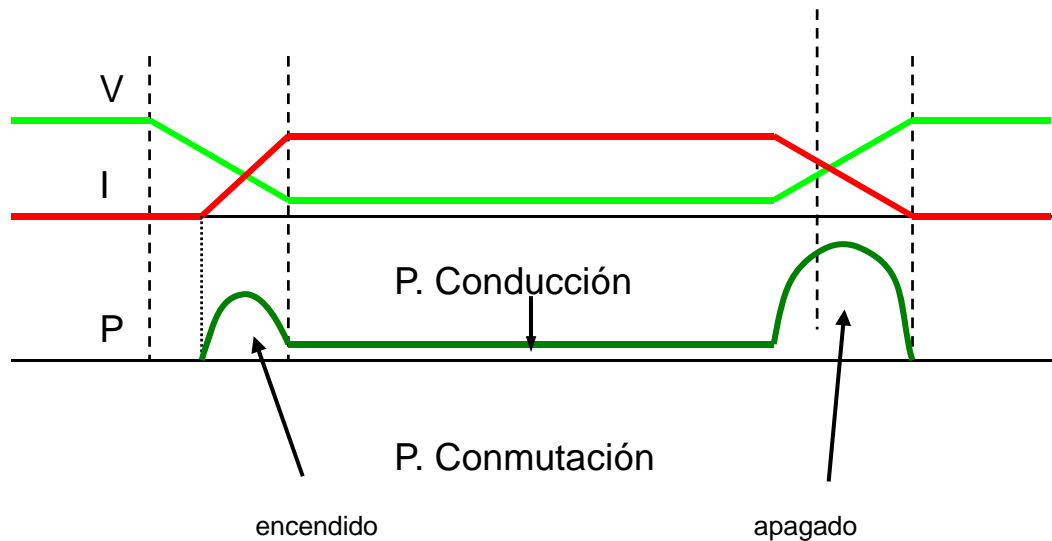
- Potencia máxima
- Temperatura máxima en la unión
- Avalancha Secundaria

Safe  
Operating  
Area



## Pérdidas

Siempre que existe convivencia tensión corriente en el componente, se disipa energía en forma de calor



$$E = \int_0^T u \cdot i \cdot dt$$

$$P = \frac{\sum E}{T} = f \cdot \sum E$$

$$P_{\text{TOTALES}} = P_{\text{ENCENDIDO}} + P_{\text{APAGADO}} + P_{\text{CONDUCCIÓN}} + P_{\text{EXCITACIÓN}}$$

## *Frecuencia de conmutación*

Rapidez con la cual es capaz de conmutar un dispositivo

Viene limitada por:

- Capacidades parásitas
- Difusión de portadores
- Pérdidas en conmutación

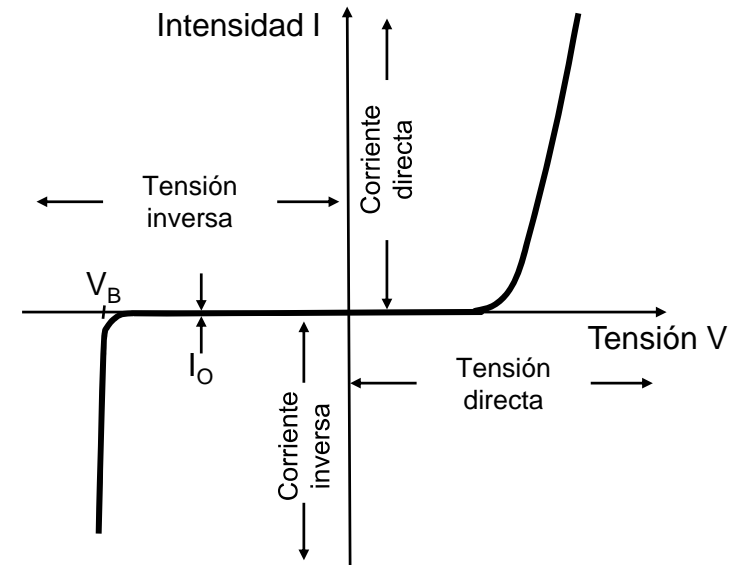
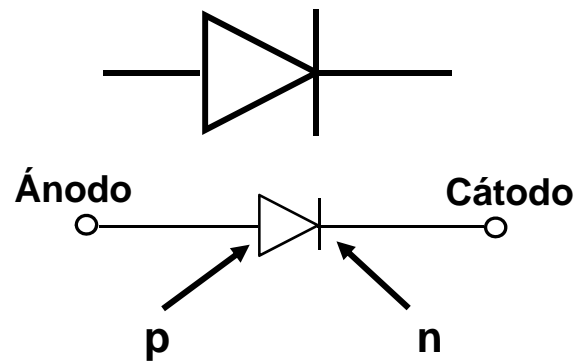
$$E = \int_0^T u \cdot i \cdot dt \qquad P = \frac{\sum E}{T} = f \cdot \sum E$$



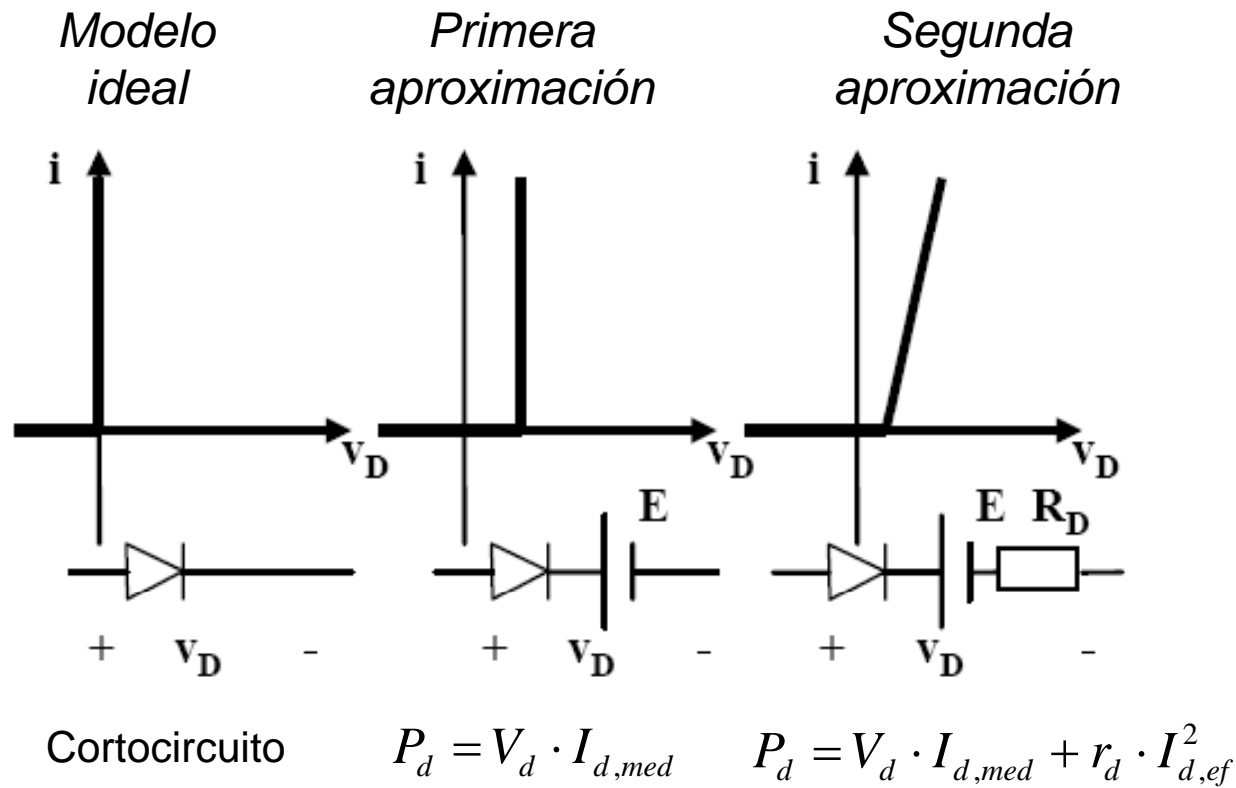


# ***DIODOS***

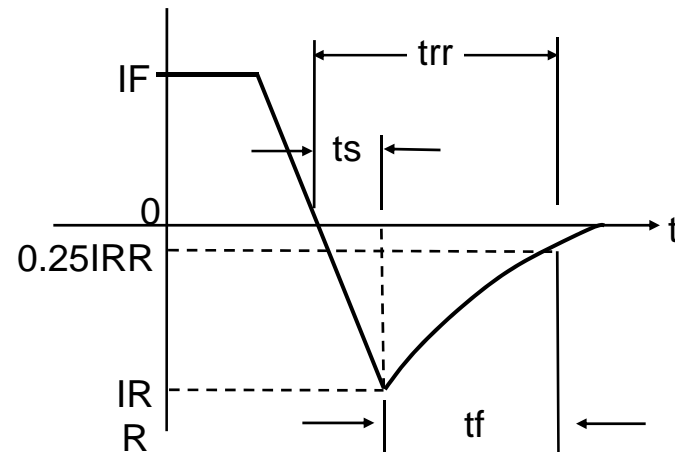
## Característica estática del diodo



## Modelos estáticos del diodo en estado de conducción



## Característica dinámica del diodo: tiempo de recuperación inversa $t_{rr}$



Ejemplo de conmutación con recuperación suave  $S < 1$

**Q<sub>rr</sub>**

**Carga eléctrica almacenada o desplazada.**

**S**

**Factor de suavizado.** Es la relación entre los tiempos de caída y almacenamiento

$$S = \frac{t_f}{t_s}$$

### Influencia del $t_{rr}$ en la conmutación

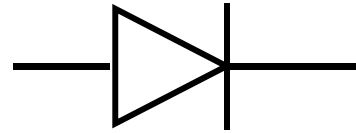
Si el tiempo que tarda el diodo en conmutar no es despreciable :

- Se limita la **frecuencia de funcionamiento** → no se puede conmutar hasta después de la recuperación
- Existe una **disipación de potencia** durante el tiempo de recuperación inversa → convivencia V e I

### Clasificación diodos

- **LENTOS**
- **RÁPIDOS**
- **ULTRARÁPIDOS**
- **SCHOTTKY**

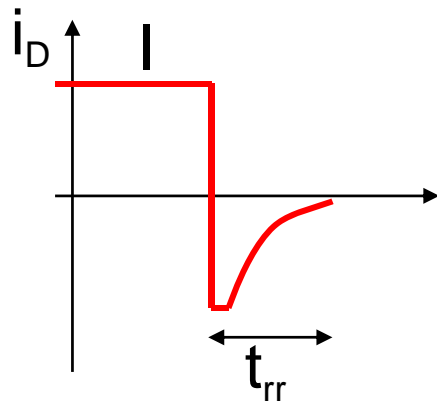
## DIODO



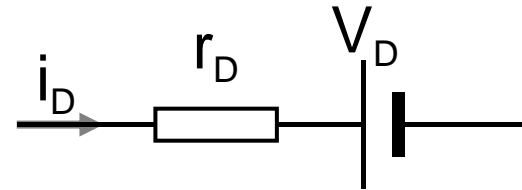
### No Controlado

- $V_{RRM} < 15000V$
- $I_F < 3800A$
- $f_{m\acute{a}x} < \text{tipo}$

Tiempo de recuperaci3n inversa



### P3rdidas en conducci3n



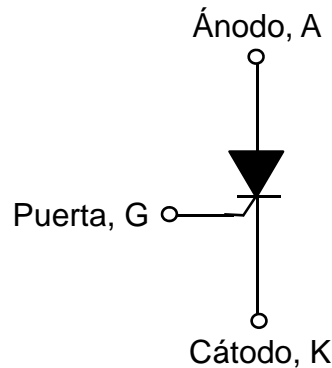
$$P = V_D \cdot \overline{i_D} + r_D \cdot i_{D(RMS)}^2$$



# ***TIRISTOR***

## Característica estática del tiristor

SCR-Silicon-Controlled Rectifier



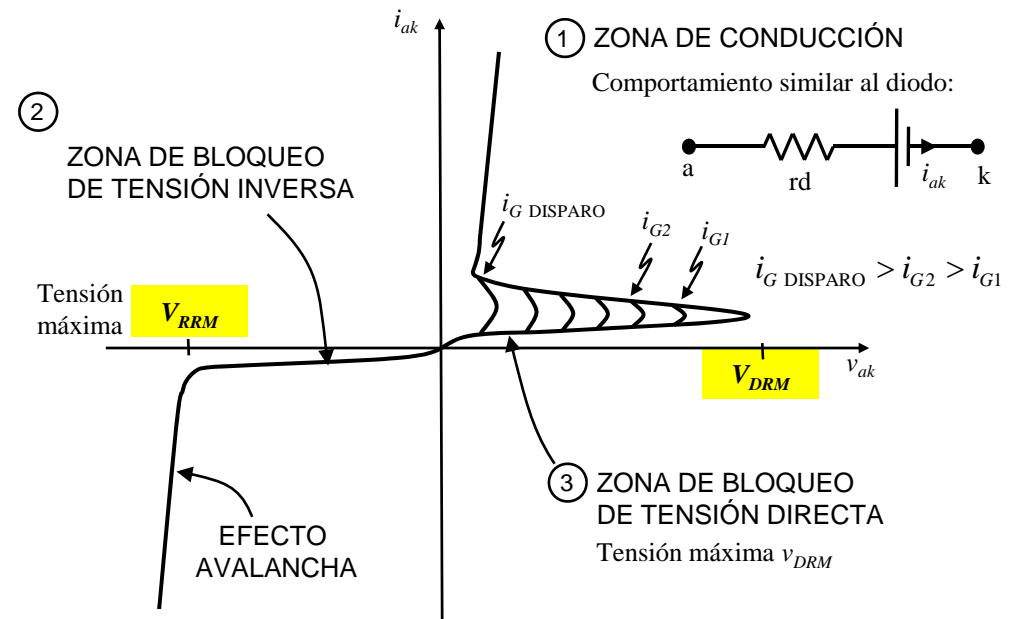
### IMPLICACIONES CARACTERÍSTICA ESTÁTICA

#### 1. REQUISITOS DE DISPARO

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ak} > 0 \text{ (Previamente polarizado en directa)} \\ i_G > i_{G \text{ DISPARO}} \\ I_{ak} > I_H \text{ CORRIENTE DE ENCLAVAMIENTO} \end{array} \right.$$

#### 2. REQUISITOS DE APAGADO

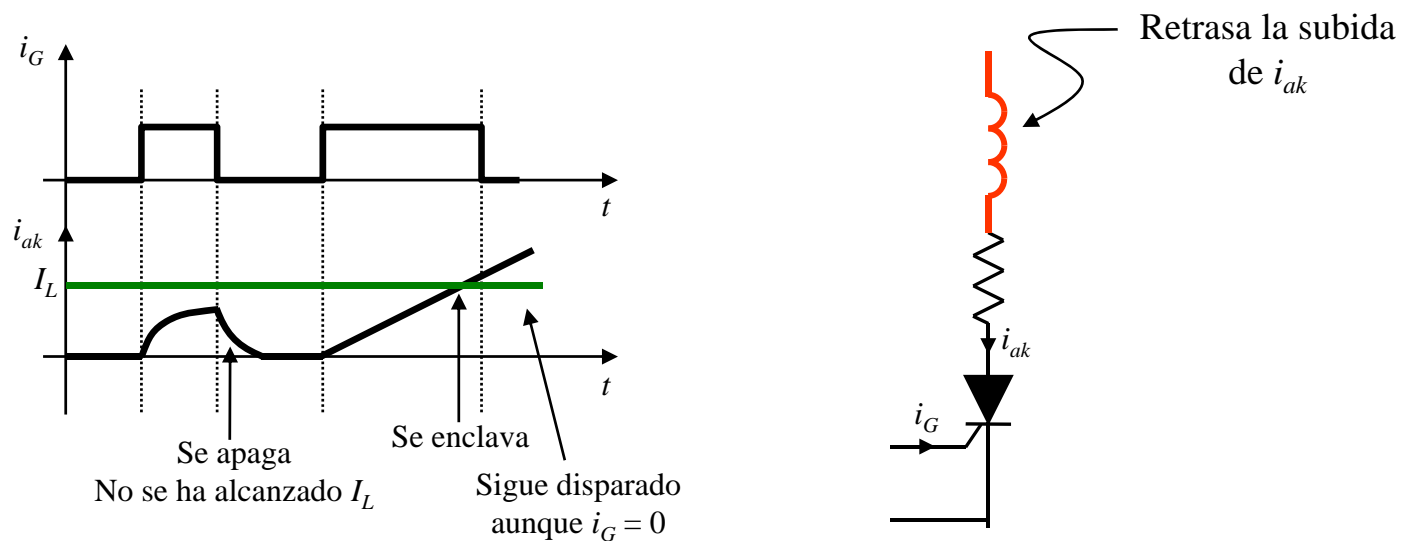
$$\left\{ i_{ak} < 0 \text{ CORRIENTE DE MANTENIMIENTO} \right.$$



El modelo de pérdidas en conducción es igual al del diodo

## Corriente de enclavamiento (Latching current $I_L$ )

HAY QUE MANTENER EL PULSO DE  $i_G$  HASTA QUE  $i_{ak} > I_L$



$I_H$	Maximum holding current	600	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , anode supply 12V resistive load
$I_L$	Max. (typical) latching current	1000 (300)		



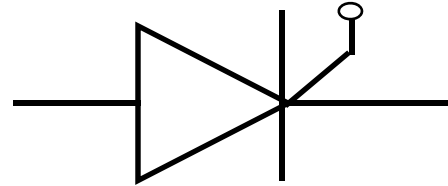
## *Formas de apagado*

1. NATURAL.

2. FORZADA.

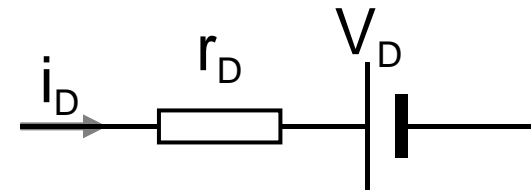
- Apagado por fuente inversa de tensión.
- Apagado por fuente inversa de intensidad.

## TIRISTOR



- **Semicontrolado por corriente de puerta**
- $V_{\text{máx}} < 8000\text{V}$
- $I_{\text{AVG}} < 15000\text{A}$
- $f_{\text{máx}} = 50 - 60\text{Hz}$
- **Circuitos de apagado**
  - Controla el instante de encendido, pero el apagado debe producirlo el circuito externo
  - Apaga cuando  $I_{\text{AK}}=0$

Pérdidas en conducción

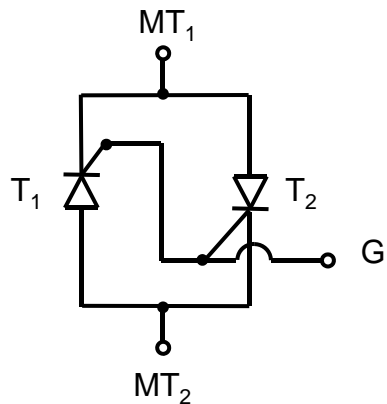


$$P = V_D \cdot \overline{i_D} + r_D \cdot i_{D(\text{RMS})}^2$$

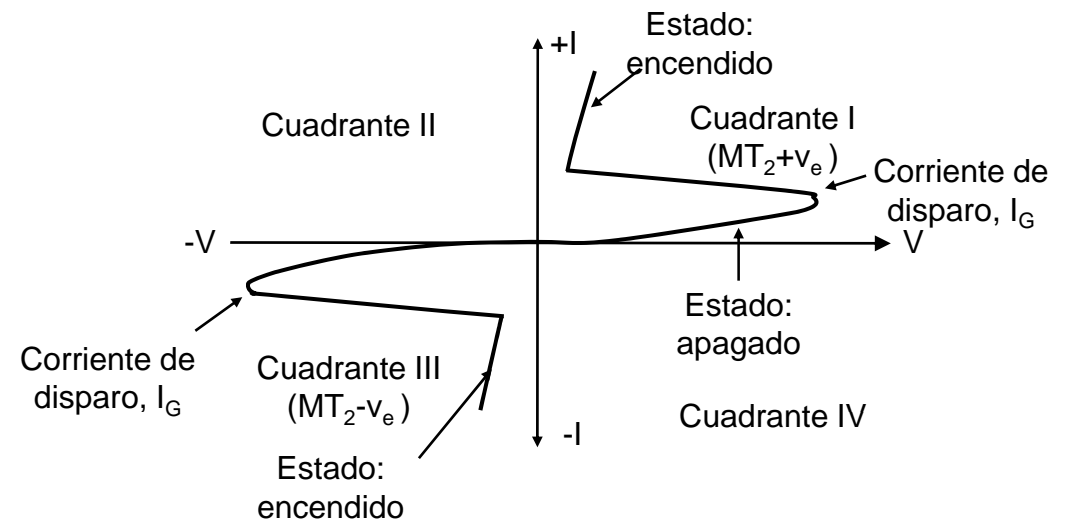
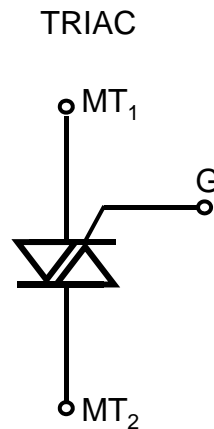


# ***TRIAC***

## Característica estática del TRIAC



Circuito equivalente de un TRIAC





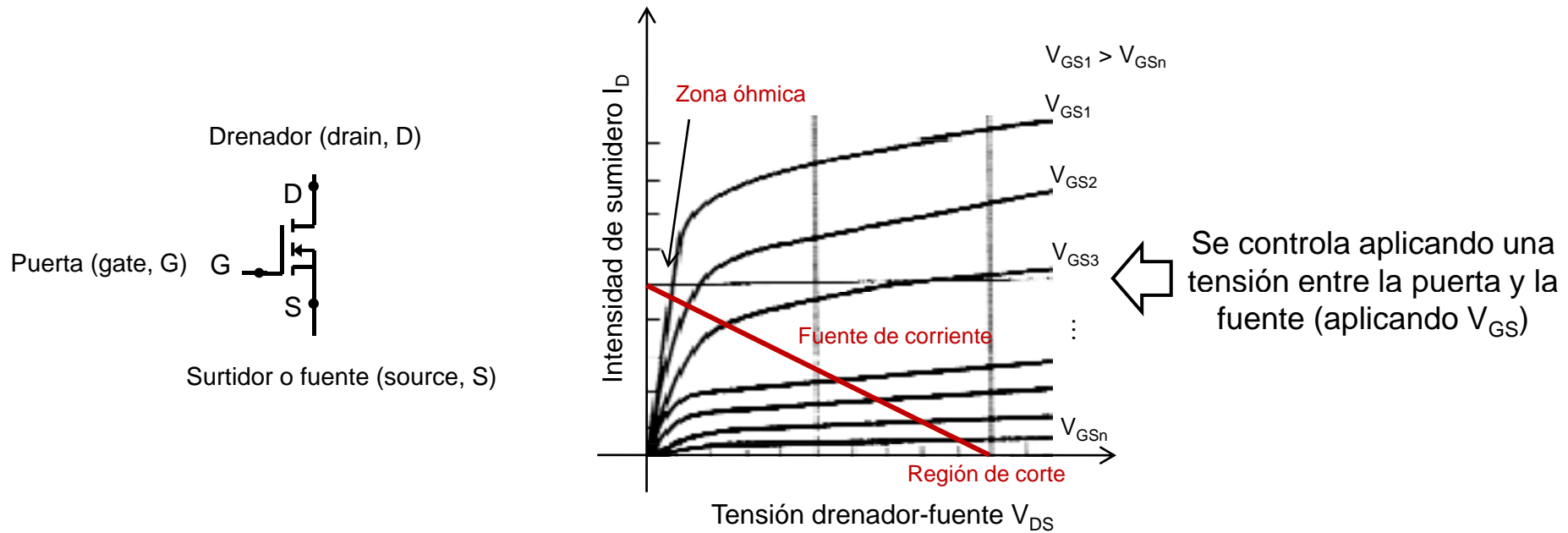
---

# ***MOSFET***

***(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)***

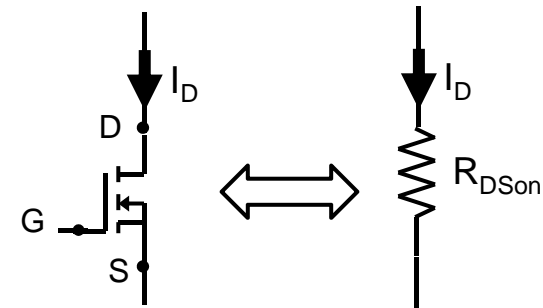
## Característica estática del MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

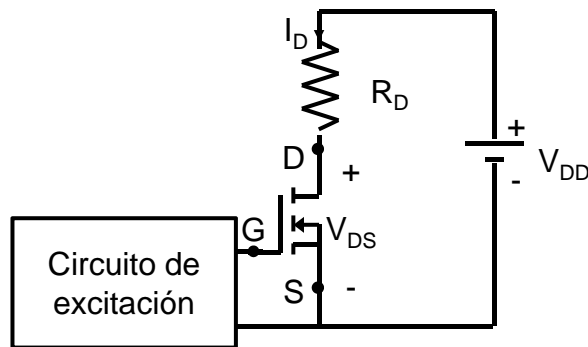


El MOSFET se modela en conducción como una resistencia ( $R_{DSon}$ )  
 Por tanto, el modelo de pérdidas en conducción del MOSFET es:

$$P_{cond} = R_{DSon} \cdot I_{D,ef}^2$$



## Disparo del MOSFET



Symbol	Conditions	Maximum Ratings		
$V_{DSS}$	$T_{VJ} = 25^{\circ}\text{C to } 150^{\circ}\text{C}$	100	V	
$V_{GS}$		$\pm 20$	V	
$I_{D25}$	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$ ①	1000	A	
$I_{D80}$	$T_C = 80^{\circ}\text{C}$ ①	800	A	

Symbol	Conditions	Characteristic Values ( $T_{VJ} = 25^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}; I_D = I_{D80}$	0.75	1.2	m $\Omega$
$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = 20\text{ V}; I_D = 10\text{ mA}$	2		4 V

VMM 1000-01P

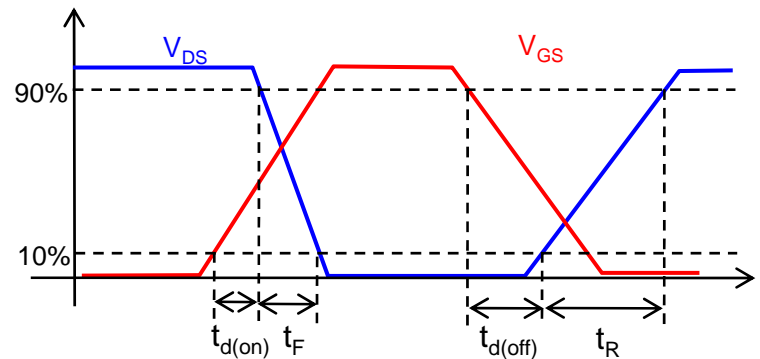
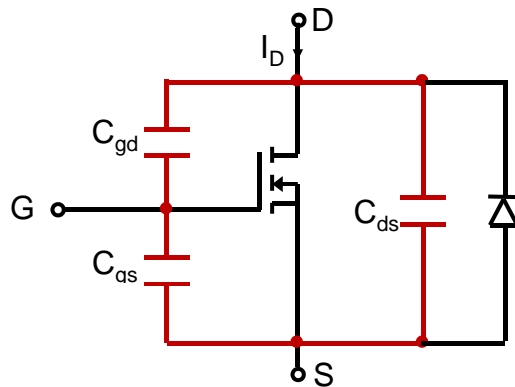


El correcto manejo de la puerta es fundamental para utilizar un MOSFET

- **Tensión umbral** ( $V_{GS(th)}$ ): tensión mínima entre puerta y surtidor para ponerlo en conducción
- **Tensión máxima:** el MOSFET se rompe si se aplica una tensión superior entre puerta y surtidor
- Interesa **gobernarlo con la tensión más alta posible** ( $V_{GS} \sim 10\text{ V}$ ): cuanto más alta es la tensión de puerta, menor es la  $R_{DS(on)}$

## Características dinámicas del MOSFET

La carga y descarga de las capacidades parásitas tiene un efecto muy importante en la conmutación del dispositivo, limitando la frecuencia de conmutación



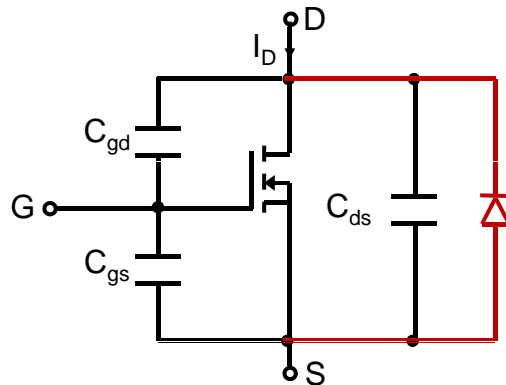
$t_r$  = tiempo de subida

$t_f$  = tiempo de bajada

$t_{d(on)}$  = retraso de encendido

$t_{d(off)}$  = retraso de apagado

Existe un diodo parásito entre drenador y fuente que puede conducir cuando el MOSFET está en estado de bloqueo. Su conducción no es aconsejable porque es un **diodo lento** y **aumenta considerablemente las pérdidas**



Symbol	Conditions	Characteristic Values ( $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$t_{d(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}; V_{DS} = 50\text{ V};$ $I_D = 250\text{ A}; R_G = 0.68\ \Omega$		50	ns
$t_r$			100	ns
$t_{d(off)}$			260	ns
$t_f$			100	ns
$V_F$		(diode) $I_F = 500\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}$	1.0	1.5
$t_{rr}$	(diode) $I_F = 200\text{ A}; -di/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}; V_{DS} = 30\text{ V}$	100		ns

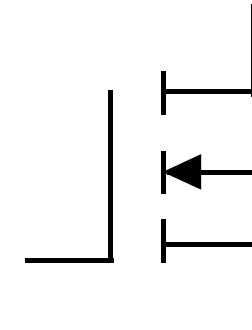
**IXYS**

VMM 1000-01P

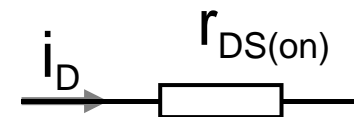


## MOSFET

- Controlado por tensión de puerta
- $V_{\text{máx}} < 1500\text{V}$
- $I_{\text{máx}} < 400\text{A}$
- $f_{\text{máx}} < 10\text{ MHz}$
- No presenta avalancha secundaria
- Coeficiente negativo de temperatura
- La mayoría de los MOSFET de potencia son de acumulación y canal N



Pérdidas en conducción



$$P_{\text{CON}} = r_{\text{DS(on)}} \cdot i_{\text{D(RMS)}}^2$$



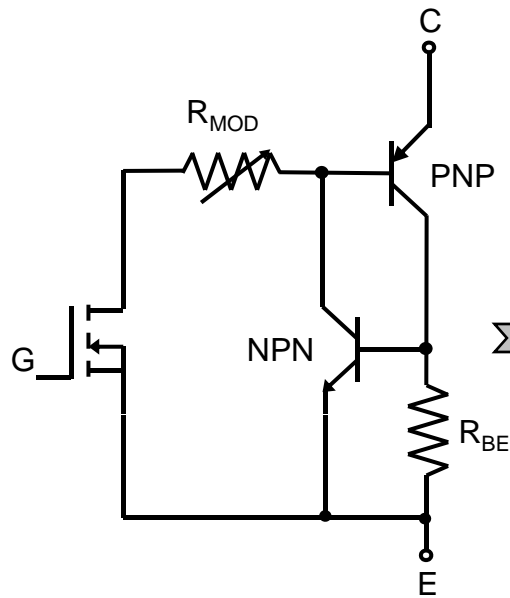
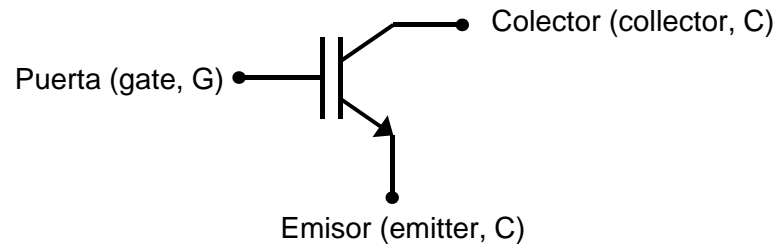
---

# ***IGBT***

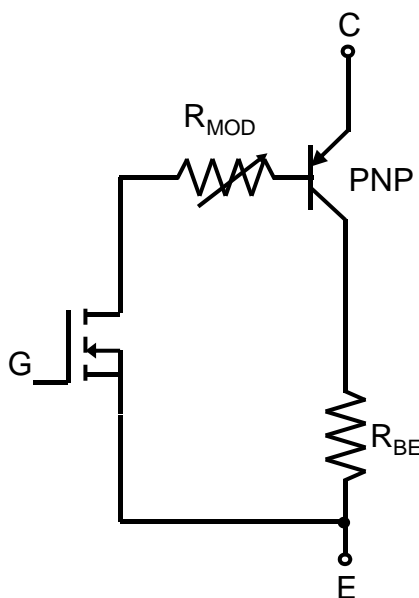
## ***(Insulated Gate Bipolar Transistor)***

# Circuito equivalente del IGBT

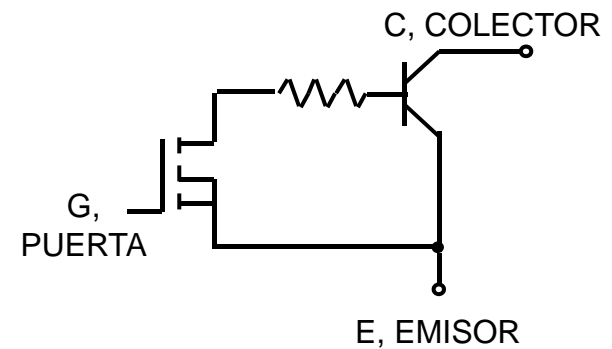
Isolated Gate Bipolar Transistor



Circuito equivalente



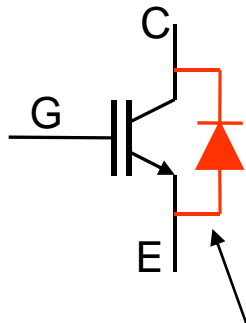
Circuito simplificado



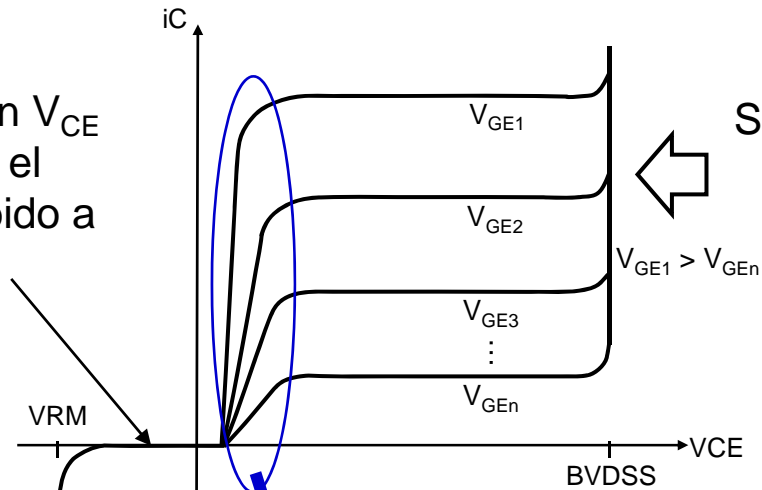
Circuito equivalente de un IGBT

## Característica Estática del IGBT

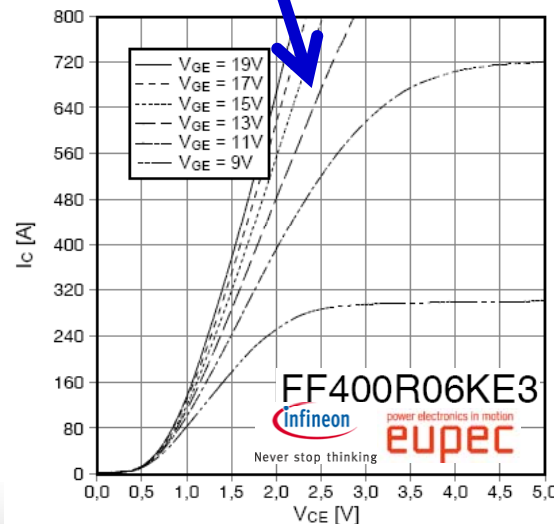
Es capaz de bloquear tensión  $V_{CE}$  negativa, al contrario que el MOSFET, que no puede debido a su diodo parásito



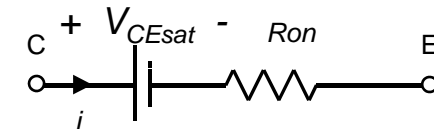
En muchas ocasiones se incorpora internamente un diodo al dispositivo, pero no pertenece a la estructura del IGBT



Se controla con tensión de puerta como un MOSFET



Modelo de pérdidas en conducción similar al de un transistor bipolar



$$P_{cond} = V_{CE,sat} \cdot I_{C,med} + R_{on} \cdot I_{C,ef}^2$$

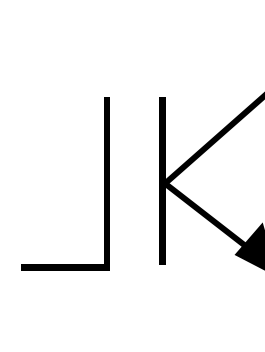
## IGBT

### Ventajas como MOSFET

- Totalmente Controlado por tensión de puerta
- Rapidez de conmutación
- No presenta avalancha secundaria

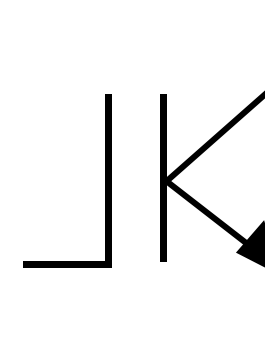
### Ventajas como Bipolar

- Modelo pérdidas en conducción
- Corriente de colector similar al bipolar



- $V_{\text{máx}} < 6500\text{V}$
- $I_{\text{máx}} < 3600\text{A}$
- $f_{\text{máx}} < 75\text{ kHz}$

## IGBT

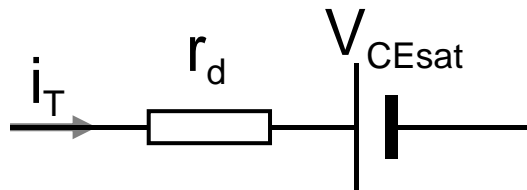


### Desventajas

- Cola de corriente
- Efecto tiristor parásito

- $V_{\text{máx}} < 6500\text{V}$
- $I_{\text{máx}} < 3600\text{A}$
- $f_{\text{máx}} < 75\text{ kHz}$

### Pérdidas en conducción



$$P = V_{\text{CEsat}} \cdot \overline{i_T} + r_d \cdot i_{T(\text{RMS})}^2$$