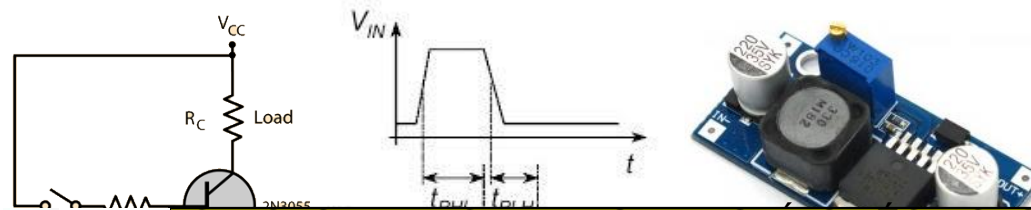




# Tecnología Electrónica

## Capítulo 9: Introducción a los Dispositivos en conmutación.

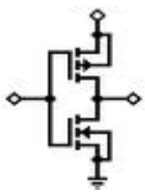


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Índice general



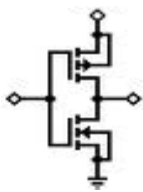
- ❑ El diodo en conmutación
  - Conmutación
    - *cambios bruscos de portadores en la unión PN*
  - Tensiones y corrientes en conmutación
    - *Transiciones (Off → On) y (On → Off)*
- ❑ Transistores en conmutación
  - Procesos de carga/descarga en transistores unipolares.
  - FET: formas de onda en conmutación.
  - Conmutación en BJT. Procesos y formas de onda.
- ❑ Introducción a los circuitos electrónicos digitales
  - Inversor CMOS.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Índice general



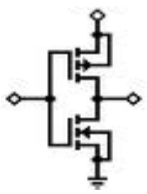
- ❑ **El diodo en conmutación**
  - **Conmutación**
    - *cambios bruscos de portadores en la unión PN*
  - **Tensiones y corrientes en conmutación**
    - *Transiciones (Off → On) y (On → Off)*
- ❑ **Transistores en conmutación**
  - Procesos de carga/descarga en transistores unipolares.
  - FET: formas de onda en conmutación.
  - Conmutación en BJT. Procesos y formas de onda.
- ❑ **Introducción a los circuitos electrónicos digitales**
  - Inversor CMOS.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



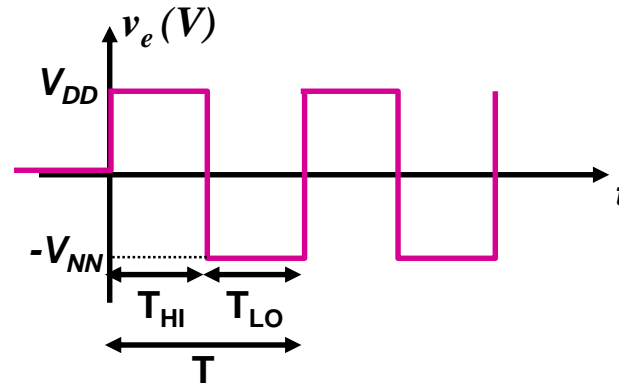
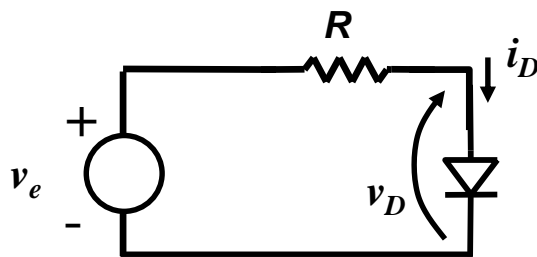
# El diodo en conmutación

## Caso de estudio: circuito básico

□ Conmutación ⇒ **Paso de conducción a corte y viceversa a elevada frecuencia**

- $i_D$  → sí puede variar instantáneamente
- $v_D$  → no puede variar instantáneamente debido a la capacidad interna del diodo; efectos: capacidad de *difusión*,  $C_d$ , y de *transición* (o unión)  $C_j$ .

### → Circuito para estudiar la conmutación



Datos de partida:

- $V_{DD} \gg V_\gamma$   
para garantizar el paso a ON.
- $|V_{NN}| < |V_{RM}|$   
para evitar romper el diodo en inverso.

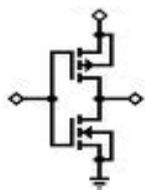
Según el circuito de la figura:

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# El diodo en conmutación

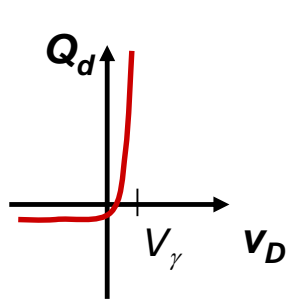
## Unión PN: capacidades internas



❑ Causas y formulación, definidas con parámetros Spice:

■ En **directo**:  $C_d \rightarrow$  **Capacidad de difusión**

■ *Fluctuaciones de portadores debido a la lentitud del proceso de difusión.*



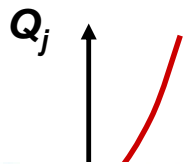
$$Q_d = K \left( e^{q v_D / k T} - 1 \right)$$

$$C_d = \tau_T \cdot g_d = \tau_T \cdot (I_{DQ} / V_T)$$

$\tau_T = \tau_T =$  tiempo medio de vida de portadores

- **Despreciable en inversa**
- Importante en **alta frecuencia y conmutación**

■ En **inverso**:  $C_j \rightarrow$  **Capacidad de transición.**



$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left( 1 - V_{DQ} / V_{j0} \right)^m}$$

$C_{j0}$  = Capacidad de transición a tensión cero

$V_{j0}$  = potencial de barrera de la unión

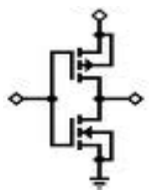
$m$  = coeficiente de gradiente

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

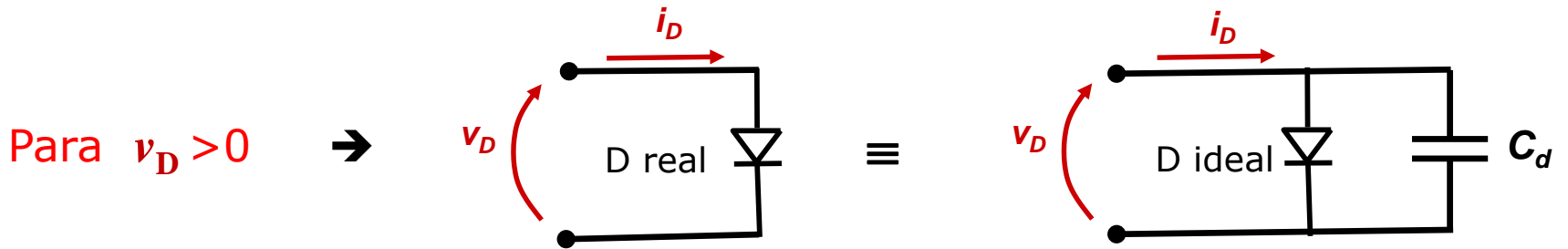


# El diodo en conmutación

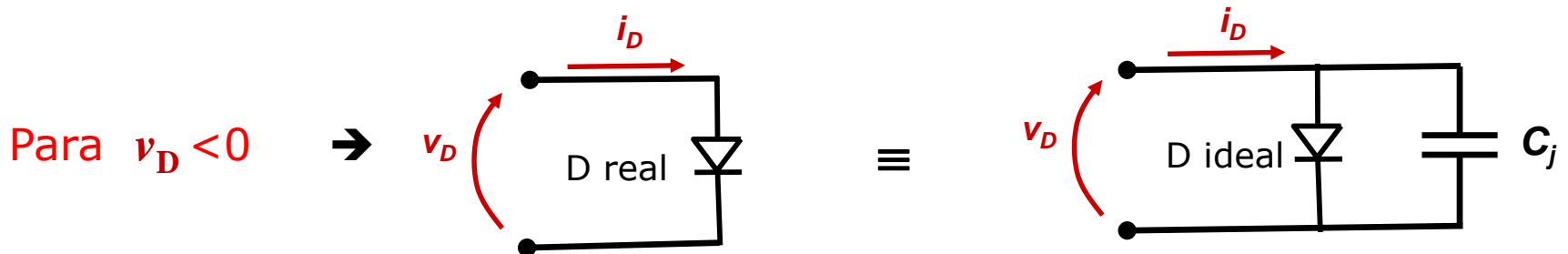
## Caso de estudio: circuito básico

Desde el punto de vista de conmutación un diodo real se puede **aproximar** por un diodo ideal en paralelo con una capacidad.

En **directa** el circuito equivalente aproximado es:



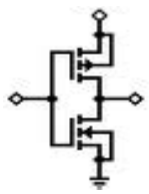
En **inversa** el circuito equivalente aproximado es:



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

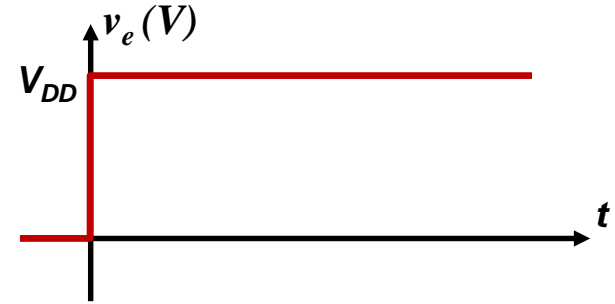
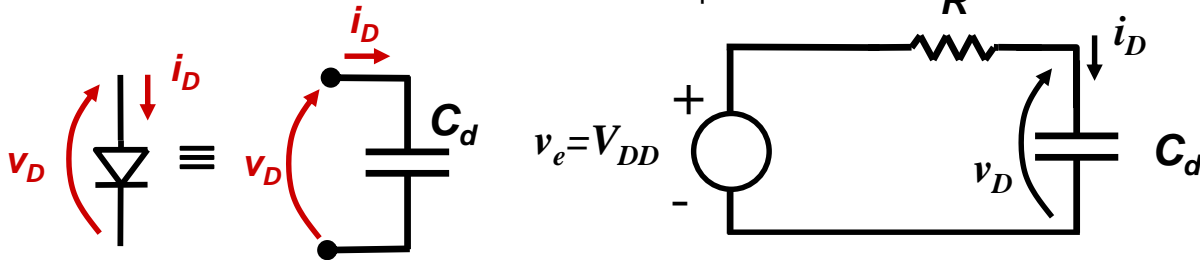


# El diodo en conmutación

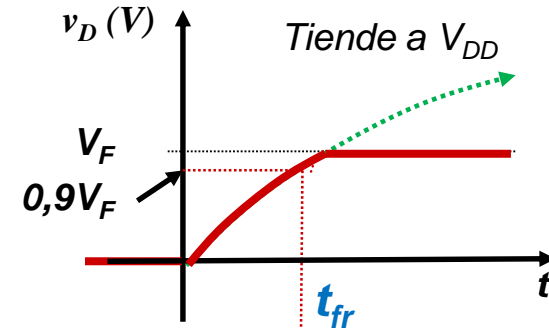
## Paso a ON: carga de la unión PN

### □ Paso corte-conducción: $v_e \rightarrow V_{DD}$

- Modelo equivalente en conducción (D ideal inicialmente cortado  $v_D < V_\gamma$ )



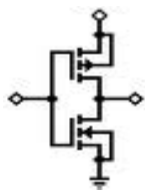
- $C_d$  se carga tendiendo hacia  $V_{DD}$ , con una  $\tau_1 = R \cdot C_d$
- $v_D$  se estabiliza cuando el D ideal conduce, fijando una tensión  $V_F = V_{DQ} = V_\gamma$
- $i_D$  se estabiliza al conducir el D ideal, en  $I_F = I_{DQ}$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

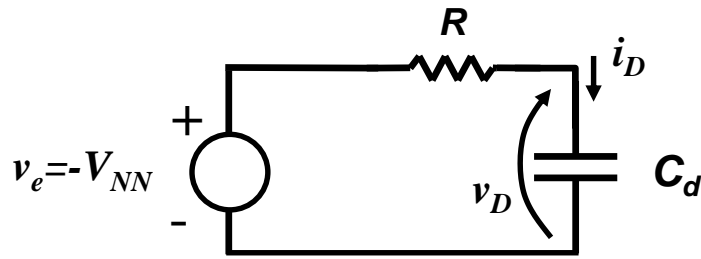


# El diodo en conmutación

## Paso a OFF: descarga de la unión PN (1)

### □ Paso conducción-corte: $v_e \rightarrow -V_{NN}$

- Suponiendo que el diodo está conduciendo ( $v_e = V_{DD}$ ) y pasamos a  $v_e = -V_{NN}$  inicialmente el modelo equivalente del diodo será una  $C_d$ , mientras  $v_D > 0$



- $C_d$  se carga tendiendo hacia  $-V_{NN}$  con una  $\tau_1 = R \cdot C_d$ , si bien se puede aproximar la corriente de descarga por una constante, ya que:

$$i_D = \frac{-V_{NN} - v_D}{R} \approx \frac{-V_{NN}}{R} = -I_R$$

- Cuando  $v_D$  pase por cero el modelo equivalente del diodo es una capacidad  $C_i$  y

Cartagena99

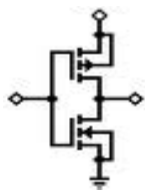
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

tiempo de almacenamiento  $t_s$





# El diodo en conmutación

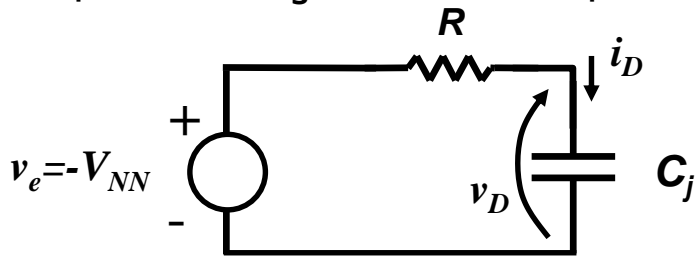
## Paso a OFF: descarga de la unión PN (y 2)

### Tiempo de almacenamiento, $t_s$

$\tau_T$  (tiempo de tránsito de portadores)

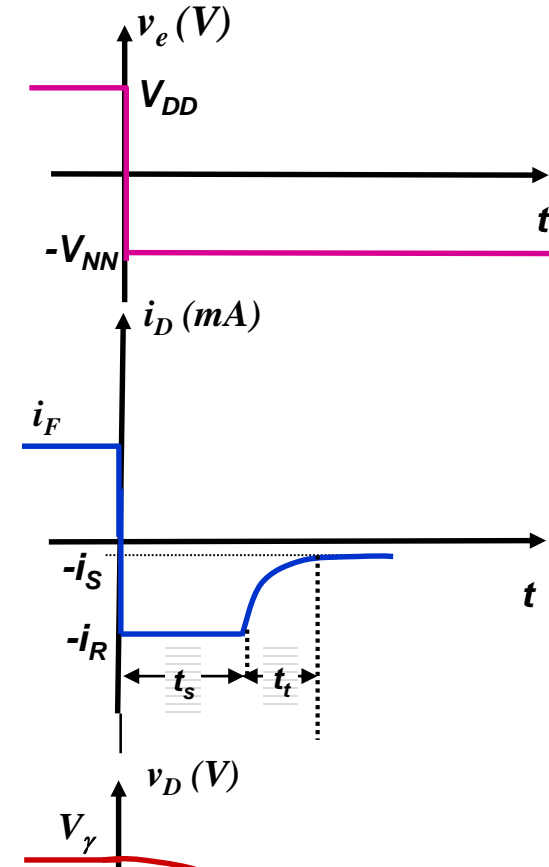
$$t_s = \tau_T \cdot \ln \left( 1 + \left| \frac{I_F}{I_R} \right| \right)$$

■ A partir de  $t_s$  el circuito equivalente en corte es



■  $C_j$  se carga tendiendo hacia un valor final  $\approx -V_{NN}$  con una  $\tau_2 = R \cdot C_j$

■  $v_D$  se estabiliza en  $v_D \approx -V_{NN}$  transcurrido un tiempo  $t_t$  que se puede aproximar por  $t_t = 3 \cdot R \cdot C_j$



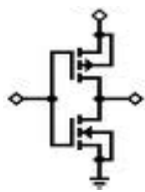
### Tiempo de recuperación en inversa

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

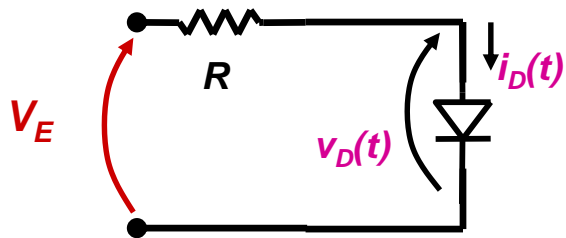
$t_{rr}$



# El diodo en conmutación

## Ciclo de conmutación: carga-descarga

### Formas de onda



■ En estado **estacionario** ( $t \gg T$ , en cada periodo)

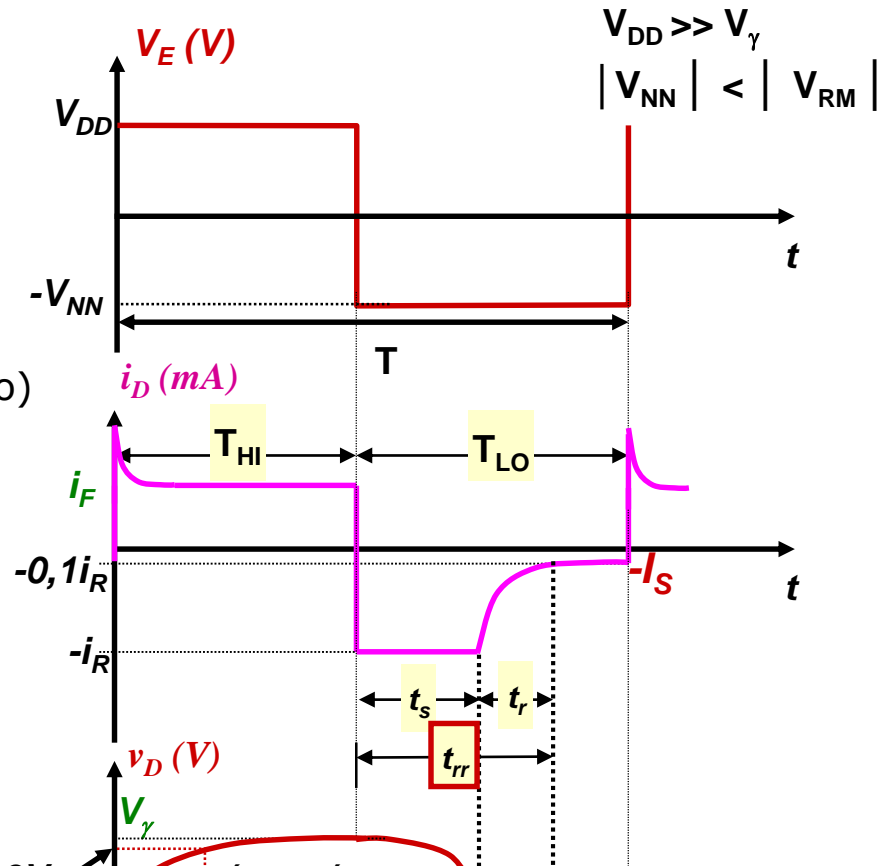
○ **Diodo en conducción (ON)**

$$v_E = V_{DD} \Rightarrow v_D = V_\gamma \Rightarrow i_D = i_F = \frac{V_{DD} - V_\gamma}{R} \approx \frac{V_{DD}}{R}$$

○ **Diodo en corte (OFF)**

$$v_E = -V_{NN} \Rightarrow i_D = -I_S \Rightarrow v_D = V_R = (-V_{NN} + I_S R)$$

■ En la transición de ON-OFF

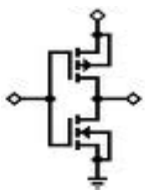


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

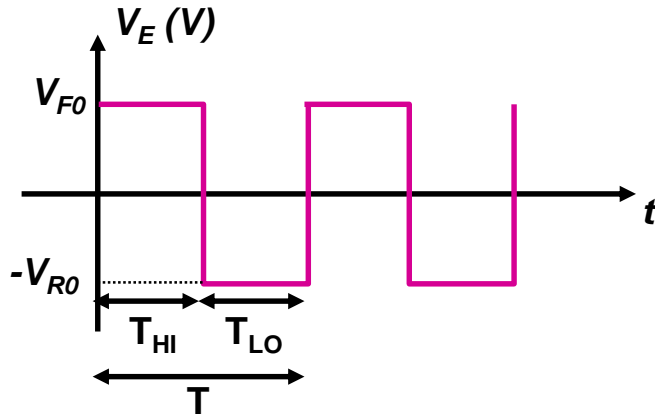


# El diodo en conmutación

## Frecuencia máxima de conmutación

### ■ Frec. máxima en función de los tiempos **On→Off y Off→On**

- Para que el diodo pueda responder a las variaciones de la señal de entrada  $v_E$ , se ha de cumplir:



A la vez:

$$\begin{cases} T_{HI} \geq t_{fr} \\ T_{LO} \geq t_{rr} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_{m\acute{a}x} = \frac{1}{t_{fr} + t_{rr}} \\ D = \frac{t_{fr}}{t_{fr} + t_{rr}} \end{cases}$$

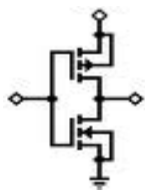
- **Particularización:** señal con ciclo de trabajo  $D = 50\%$  ( $T_{HI} = T_{LO}$ )

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# El diodo en conmutación

## Observaciones en Pspice (1)



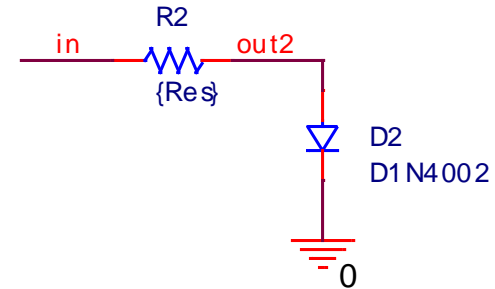
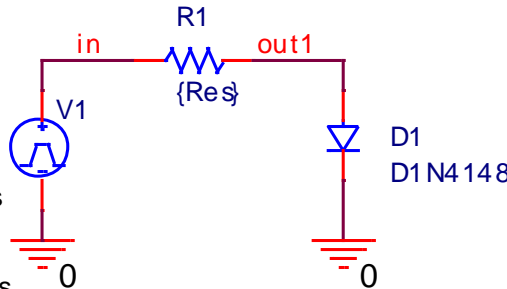
### Actividad:

- Con PSpice, visualice las formas de onda de conmutación de los diodos 1N4148 (pequeña señal) y 1N4002 (rectificador)

#### PARAMETERS:

Res = 100

V1 = -10  
 V2 = 10  
 TD = 10ns  
 TR = 0.1ns  
 TF = 0.1ns  
 PW = 5ns  
 PER = 40ns



- Parámetros Spice, de interés en conmutación, para los diodos 1N4148 y 1N4002:

Nombre	1N4148	1N4002
Cjo	4p	5,12E-11
M	0,3333	0,2762
Vj	0,5	0,3905
Tt	1,15E-08	4,76E-06

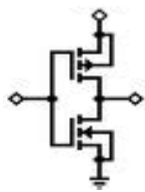
### Ejercicio. Sobre el circuito de la figura:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



# El diodo en conmutación

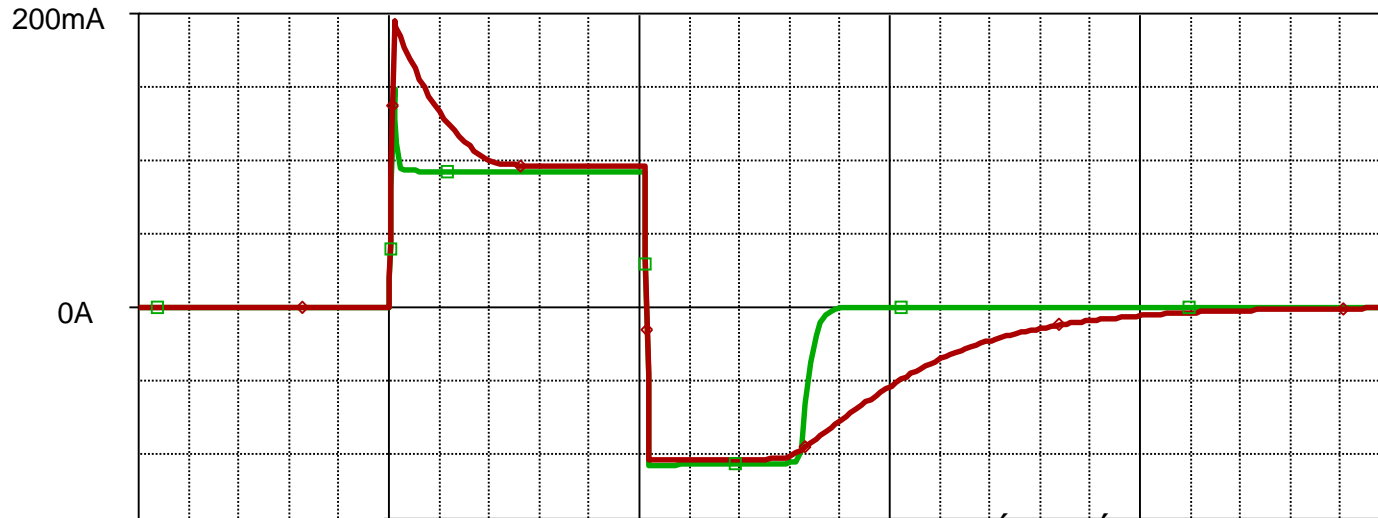
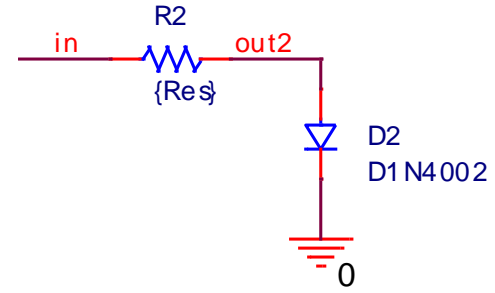
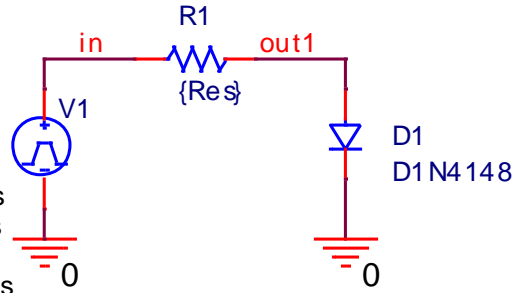
## Observaciones en Pspice: corrientes (2)



### PARAMETERS:

Res = 100

V1 = -10  
V2 = 10  
TD = 10ns  
TR = 0.1ns  
TF = 0.1ns  
PW = 5ns  
PER = 40ns

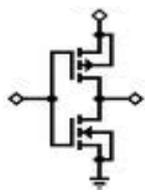


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



# El diodo en conmutación

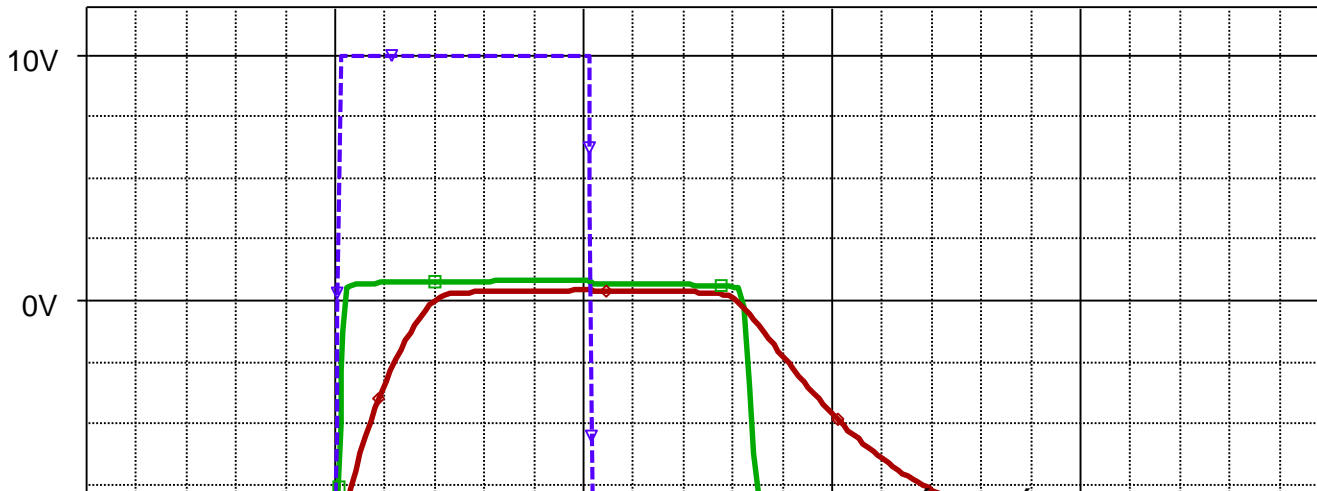
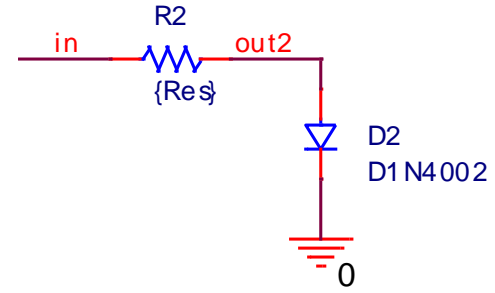
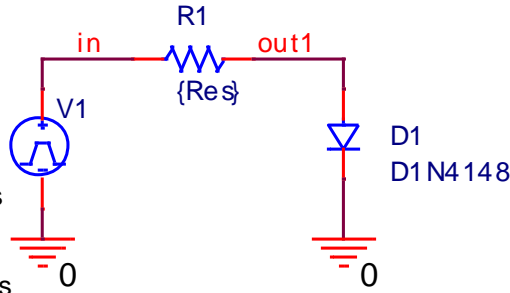
## Observaciones en Pspice: tensiones (3)



### PARAMETERS:

Res = 100

V1 = -10  
 V2 = 10  
 TD = 10ns  
 TR = 0.1ns  
 TF = 0.1ns  
 PW = 5ns  
 PER = 40ns

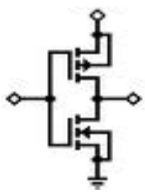


CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

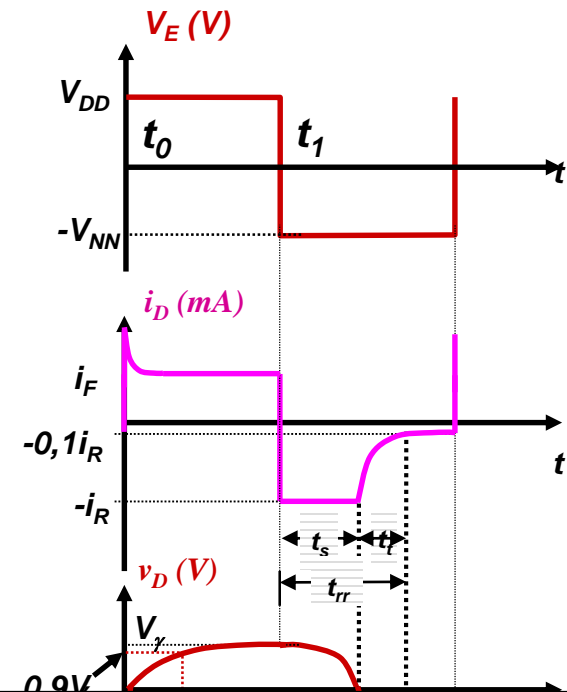
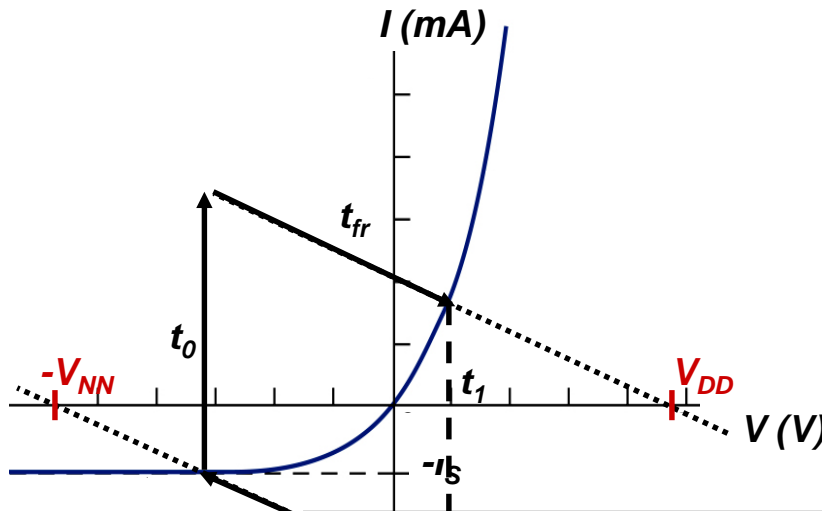
Cartagena99



# El diodo en conmutación

## Trayectorias de conmutación

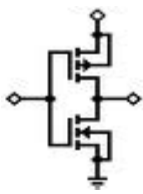
- ❑ Cambios del punto de trabajo sobre las curvas V-I del diodo:
  - Pasos **On-Off**: cambio en *generador* → cambio en *rectas de carga*
  - Los cambios de Q no son instantáneos...



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Índice general



- ❑ El diodo en conmutación
  - Conmutación
    - *cambios bruscos de portadores en la unión PN*
  - Tensiones y corrientes en conmutación
    - *Transiciones (Off → On) y (On → Off)*
  
- ❑ **Transistores en conmutación**
  - **Procesos de carga/descarga en transistores unipolares.**
  - **FET: formas de onda en conmutación.**
  - **Conmutación en BJT. Procesos y formas de onda.**
  
- ❑ Introducción a los circuitos electrónicos digitales
  - Inversor CMOS

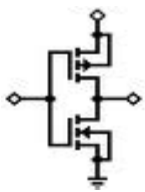
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



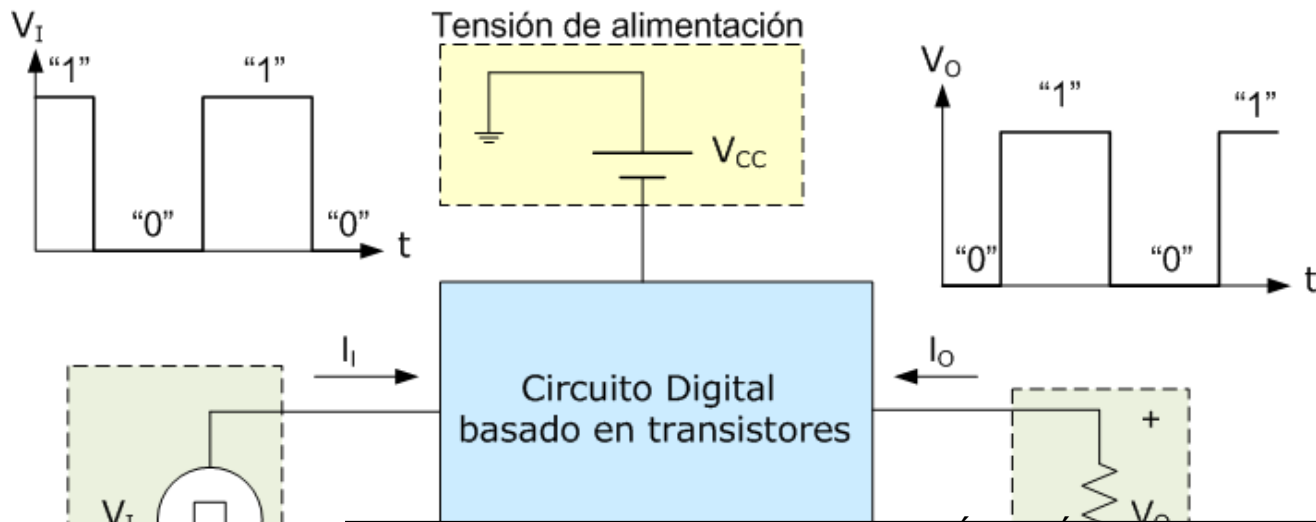


# Introducción

## Aspectos generales

### Transistores en conmutación.

- En muchos sistemas electrónicos las señales de entrada hacen que los trt's funcionen en **corte y saturación (BJT's)** o **corte y óhmica (FET's)**
- Un ejemplo: en **sistemas digitales**, las **señales de entrada** y salida toman **sólo dos estados (niveles)**: que representan el "1" y el "0" lógicos.

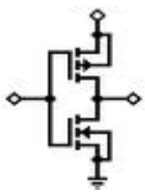


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
---  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Señal de entrada

Carga de salida



# Introducción

## Aspectos generales



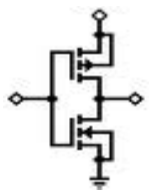
- ❑ Las **características** (velocidad de conmutación, consumo, etc.) de los **sistemas digitales** están estrechamente relacionadas con las **características de los transistores** utilizados y **de los circuitos básicos** diseñados a partir de ellos.
- ❑ En conmutación, las **regiones de funcionamiento** son **corte y saturación** para los **BJTs** y **corte y óhmica** para los unipolares (**FETs**):
  - **Estado OFF → Circuito abierto:** se corresponde con la región de **corte** del transistor
  - **Estado ON → "cortocircuito":** regiones de **saturación**, caso de **BJTs**, o **óhmica**, caso de **FETs**.
- ❑ El control de estos dos estados se realiza por el terminal de base (caso de BJTs) o puerta (caso de FETs) Cuando los **transistores** funcionan en estos **dos estados (on-off)** interesa que las **transiciones** de uno a otro sean lo **más rápidas posibles**.
- ❑ Los **sistemas conmutados** (sistemas digitales, microprocesadores, sistemas de

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

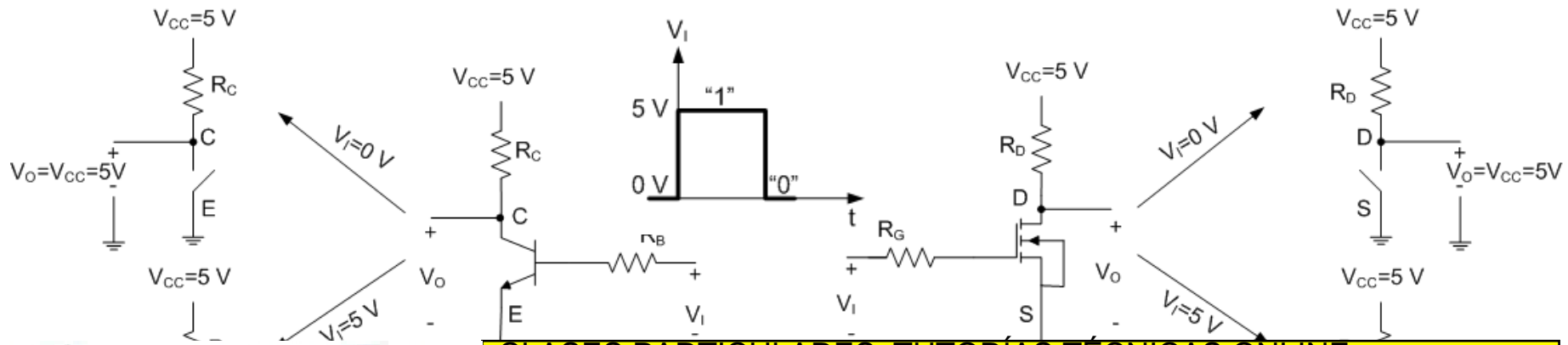
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Transistores en conmutación

## Aspectos generales

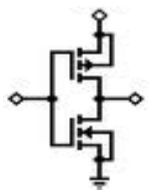
- En la figura se muestran **dos ejemplos básicos** de utilización de **transistores funcionando como interruptores**.
  - Nótese el comportamiento básico tipo **inversor**: la salida de ambos circuitos es la complementaria de la entrada. Un "0" a la entrada produce un "1" a la salida y viceversa.
- Estado **OFF**: se debe dar que para  $V_I=0V$  los transistores estén cortados (circuitos abiertos)
- Estado **ON**: en esta situación, se debe dar que para  $V_I=5V$  los transistores estén en saturación (BJT  $\rightarrow V_{CESAT} \approx 0V$ ), o en óhmica (MOSFET  $\rightarrow R_{DS-On} \approx 0$ ).



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

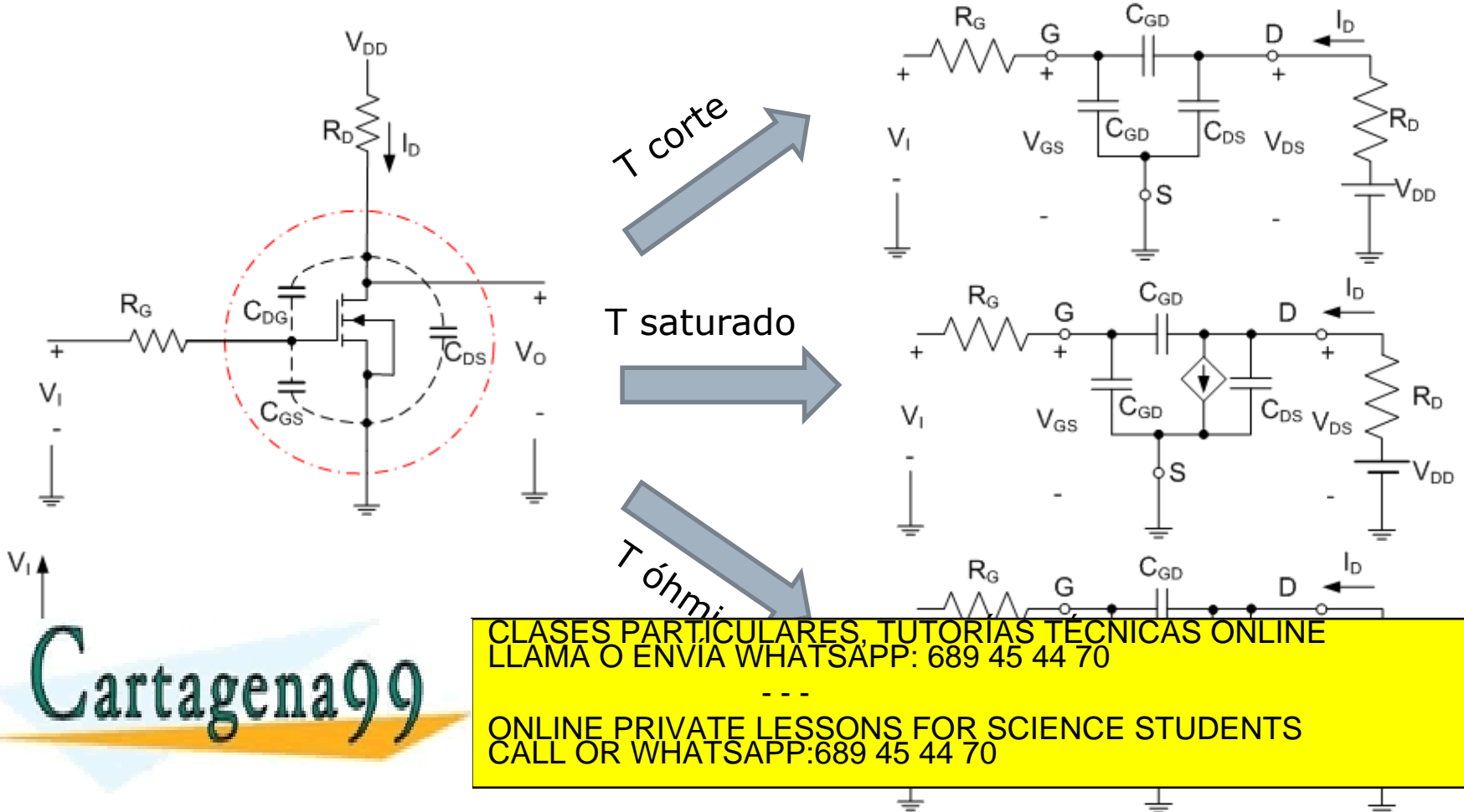
Cartagena99



# Transistores FET's en conmutación

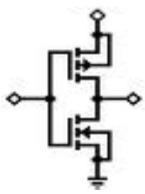
## Tiempos de conmutación

- Para los transistores MOSFET, la **velocidad de respuesta** está **determinada** por la **velocidad de carga y descarga** de las **capacidades del circuito** y del **dispositivo**. A las capacidades del dispositivo se le suelen conocer como "capacidades parásitas".



CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

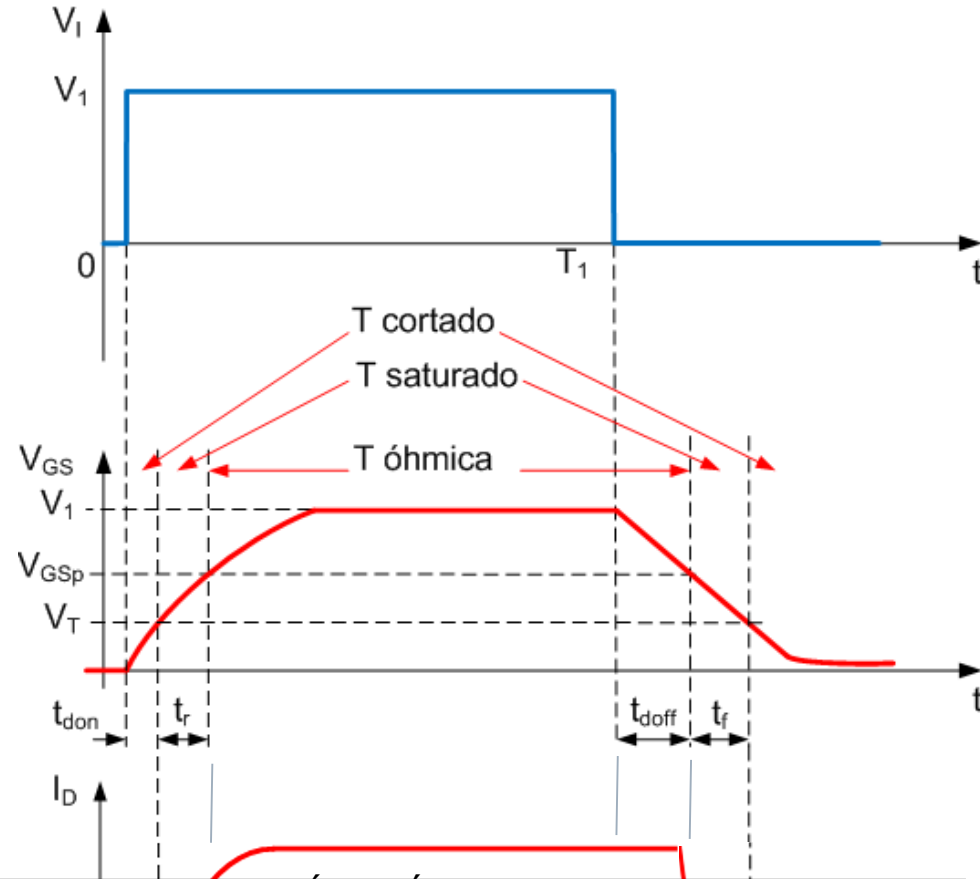
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Transistores FET's en conmutación

## Tiempos de conmutación

- En la **figura** se muestran las **formas de onda** de  $V_{GS}$  e  $I_D$  para la señal de entrada indicada.
- Sobre estas gráficas se indican los **tiempos más** significativos que intervienen en las conmutaciones **on-off y off-on** del transistor MOSFET.



$t_{don}$  = turn-on delay time.

$t_r$  = rise time.

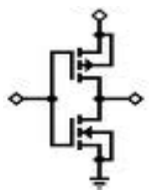
$t_{d(off)}$  = turn-off delay time.

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Transistores FET's en conmutación

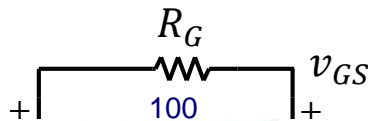
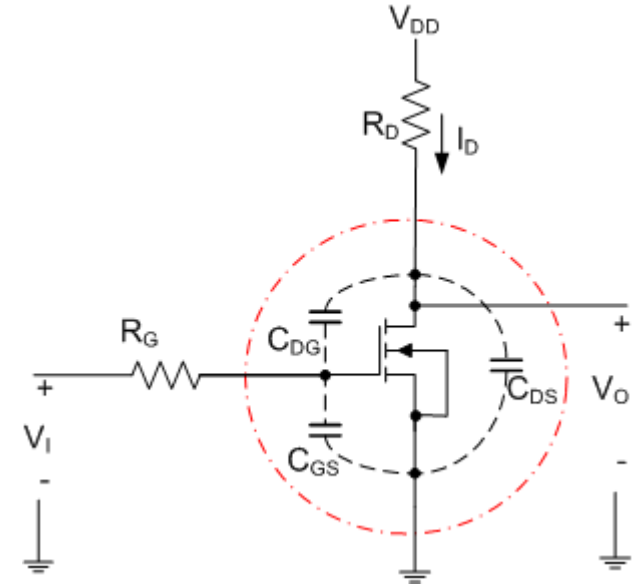
## Ejercicio

Del cto. y MOS de la figura se conocen los siguientes datos:

- $R_G = 0.1k\Omega$ ;  $R_D = 1.2k\Omega$ ;  $V_{DD} = 5V$ ;  
 $k = 4mA/V^2$ ;  $V_t = 3V$ ;  
 $C_{GS} = 10pF$ ;  $C_{GD} \approx 0$ ;  $C_{DS} \approx 0$
- El MOS pasa de activa a óhmica para una entrada de valor  $V_{GSP} = 4.25V$

Calcule:

- $t_{d(on)}$ ,  $t_{d(off)}$ ,  $t_r$  y  $t_f$  si  $T=10\mu s$
- Máxima frecuencia de señal que garantice que el MOS alcanza los estados finales (óhmica y corte)

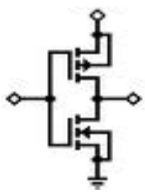


# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

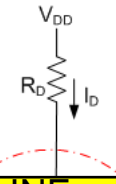
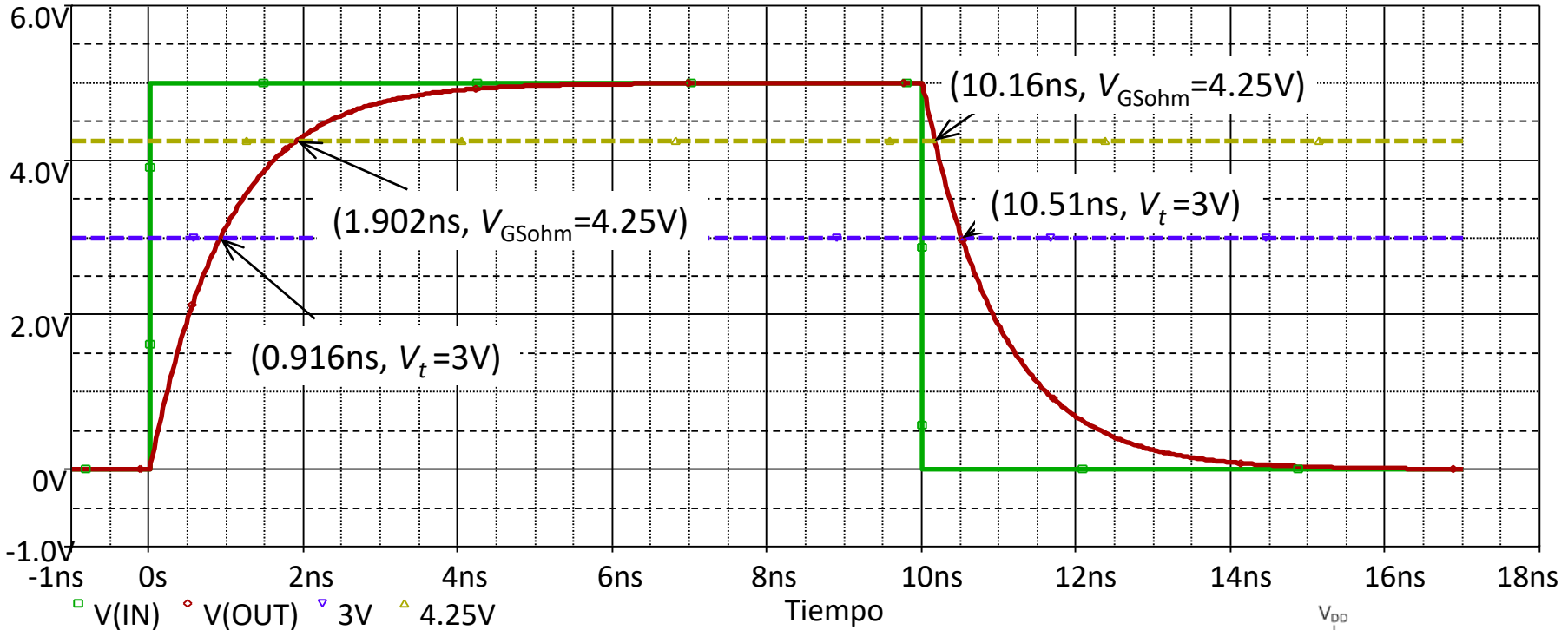
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Transistores FET's en conmutación

## Ejercicio



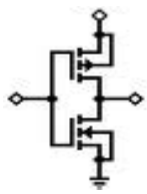
□ Soluciones:

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

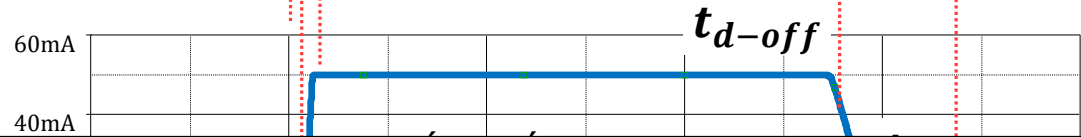
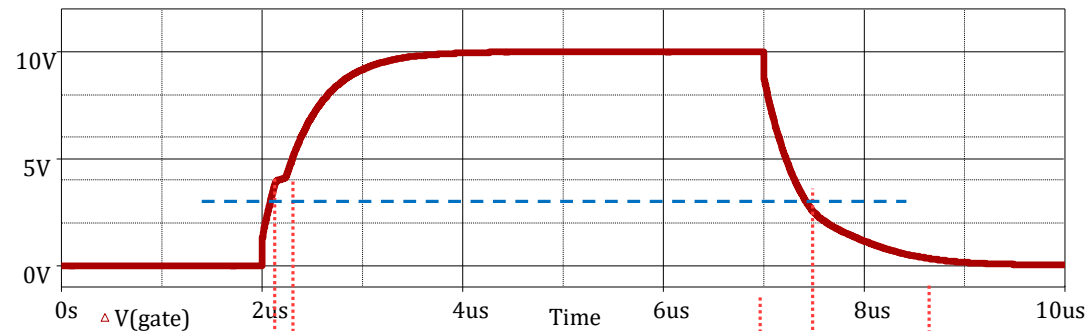
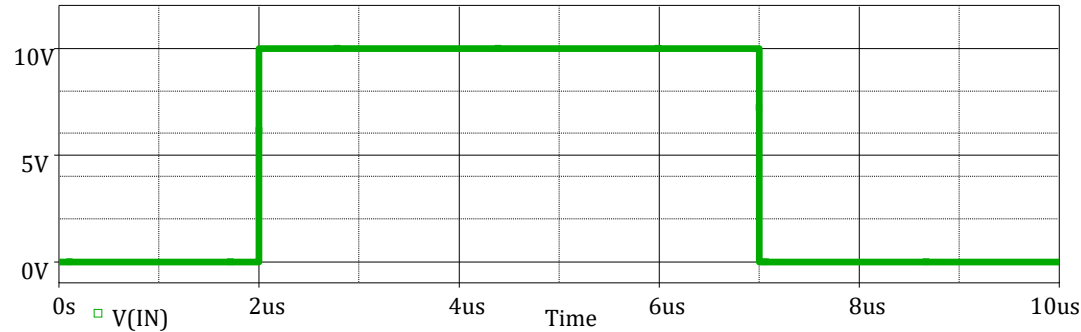
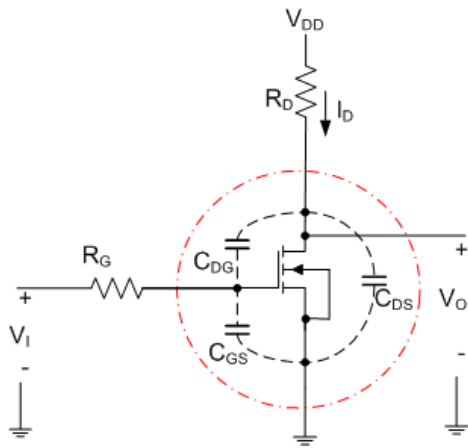
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Transistores FET's en conmutación

## Tiempos de conmutación: simulaciones

- Tomando en cuenta todos los procesos de transferencias de cargas, la conmutación en un MOS es más compleja.
- Conmutaciones reales en un MOS, con carga resistiva:

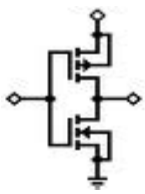


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

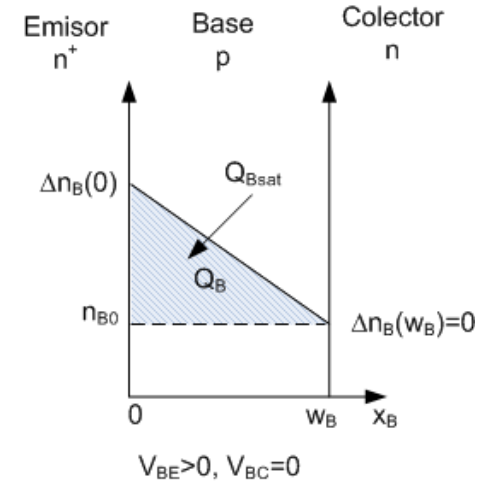




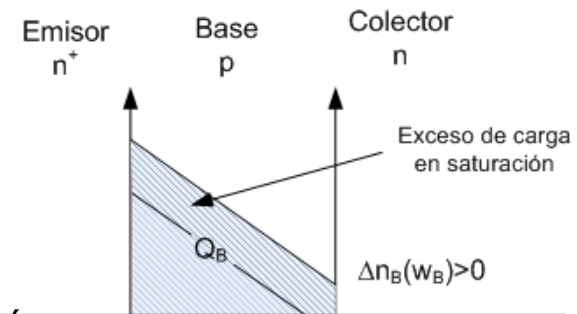
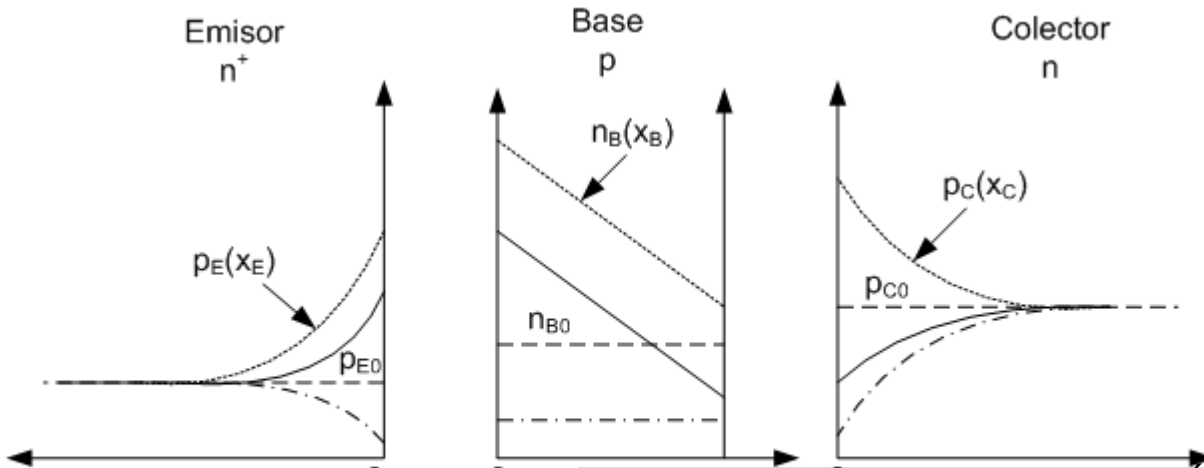
# Transistores bipolares en conmutación

## Modelo de control de carga

- El tiempo que tardan los BJT en las conmutaciones de **on** a **off** y viceversa se **relaciona** con la evolución de la **concentración** de portadores **en las uniones E-B y B-C**.
- Off → On:** se han de inyectar suficientes portadores en base como para saturarlo rápidamente...
  - alta corriente de base → **OJO: ¡exceso de portadores!**
- On → Off:** para cortar el BJT se debe extraer tal exceso de carga → **corriente inversa por la base** (→ descarga de  $C_{BE}$ )



Limite activa- saturación



Saturación

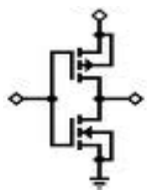
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

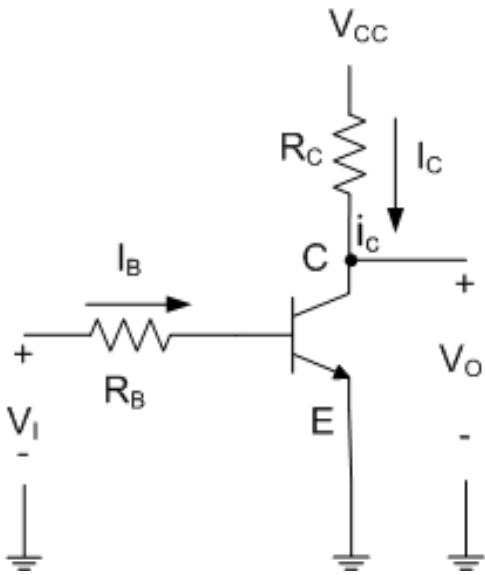
# Cartagena99

límites de las regiones de vaciamiento



# Transistores bipolares en conmutación

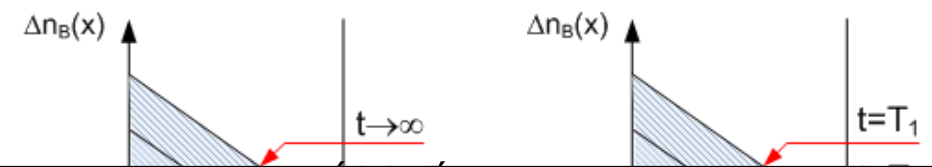
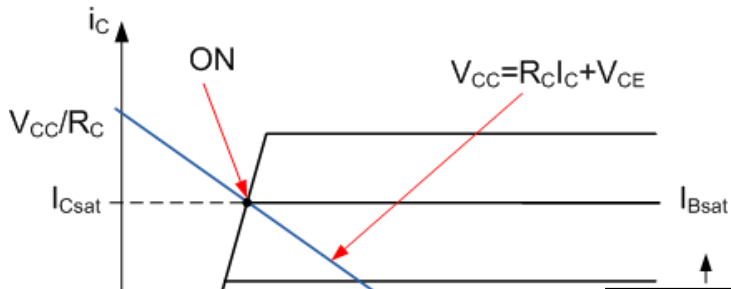
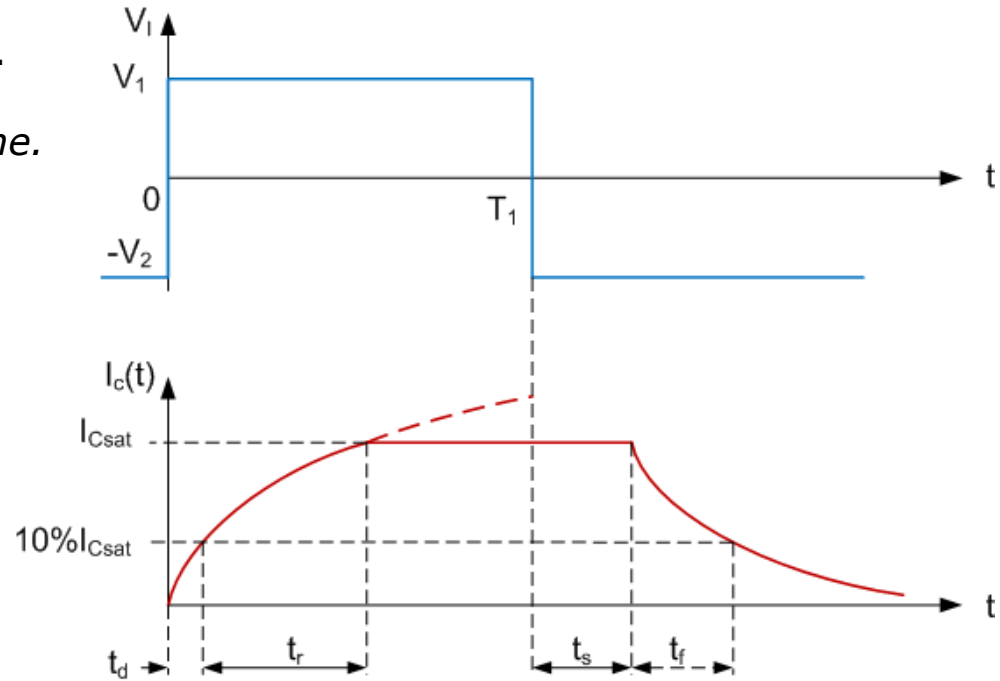
## Tiempos de conmutación



$t_d = \text{delay time.}$   
 $t_r = \text{rise time.}$   
 $t_s = \text{storage time.}$   
 $t_f = \text{fall time.}$

$t_{ON} = t_d + t_r$

$t_{OFF} = t_s + t_f$

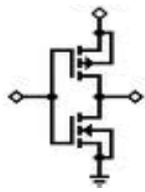


**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

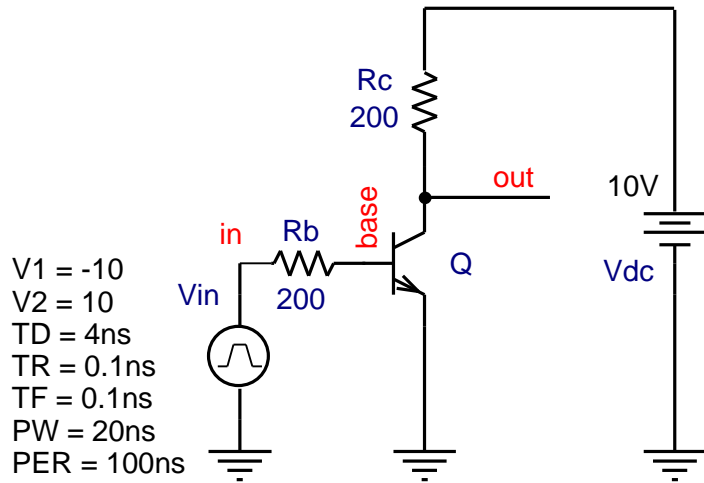
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

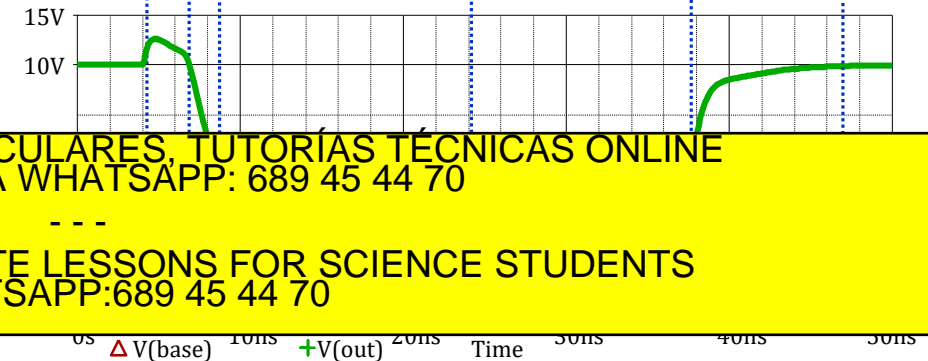
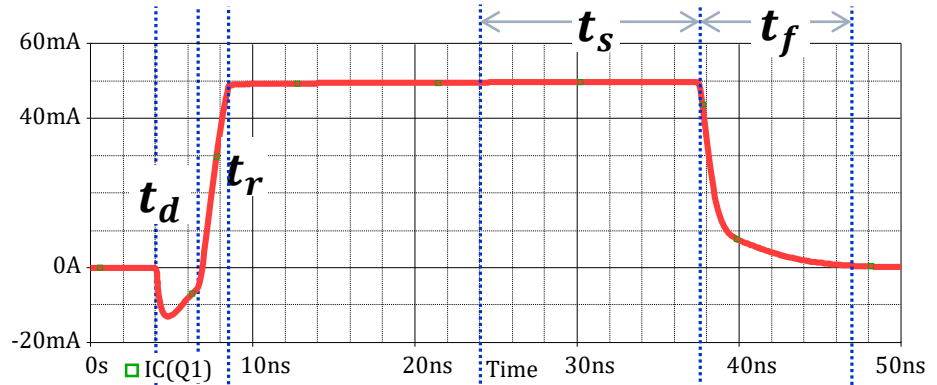
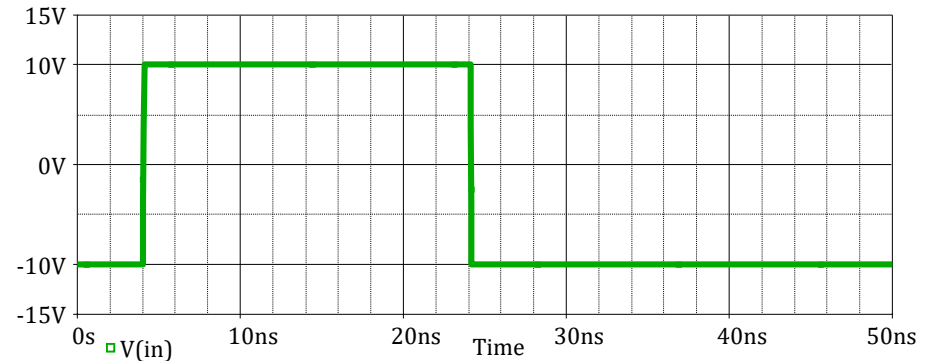


# Transistores bipolares en conmutación

## Tiempos de conmutación: simulación



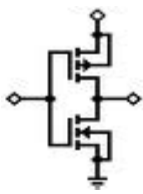
$t_d =$  delay time.  
 $t_r =$  rise time.  
 $t_s =$  storage time.  
 $t_f =$  fall time.



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



# Índice general



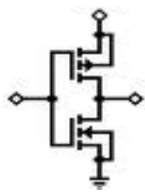
- ❑ El diodo en conmutación
  - Conmutación
    - *cambios bruscos de portadores en la unión PN*
  - Tensiones y corrientes en conmutación
    - *Transiciones (Off → On) y (On → Off)*
- ❑ Transistores en conmutación
  - Procesos de carga/descarga en transistores unipolares.
  - FET: formas de onda en conmutación.
  - Conmutación en BJT. Procesos y formas de onda.
- ❑ **Introducción a los circuitos electrónicos digitales**
  - **Inversor CMOS.**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

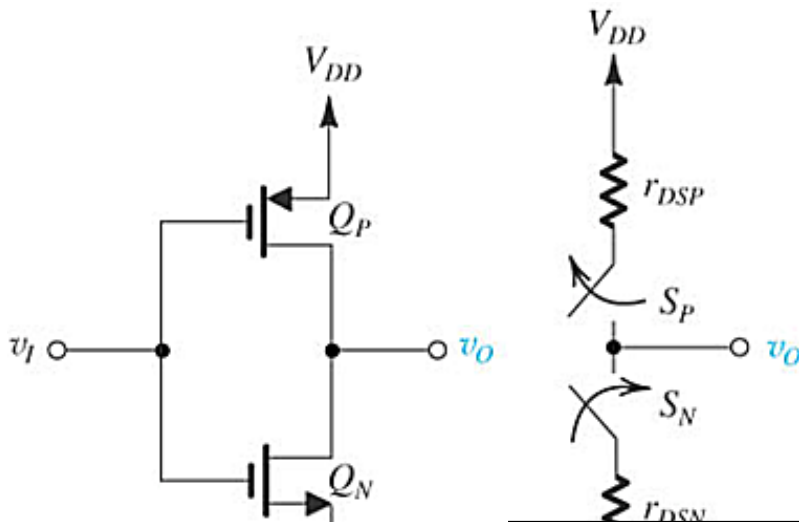


# Circuitos digitales CMOS

## Elemento básico: el inversor CMOS.



- Es el elemento básico en el origen de las tecnologías de c.i. digitales actuales, por su bajo consumo y alta escala de integración.
- CMOS** = **Complementary MOS transistors**.
  - El cto. más básico (un inversor) usa solo dos MOS: uno **P** y otro **N** (y por ello son *complementarios*)



- La **figura** muestra el **inversor CMOS básico**

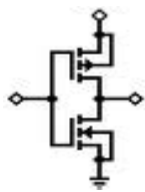
- (a): los MOS comparten Puerta (entrada) y Drenador (salida).
- (b): como circuito digital, ambos transistores se hacen funcionar en las zonas de:
  - corte (switch abierto)** y
  - óhmica (switch cerrado + resistencia).**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



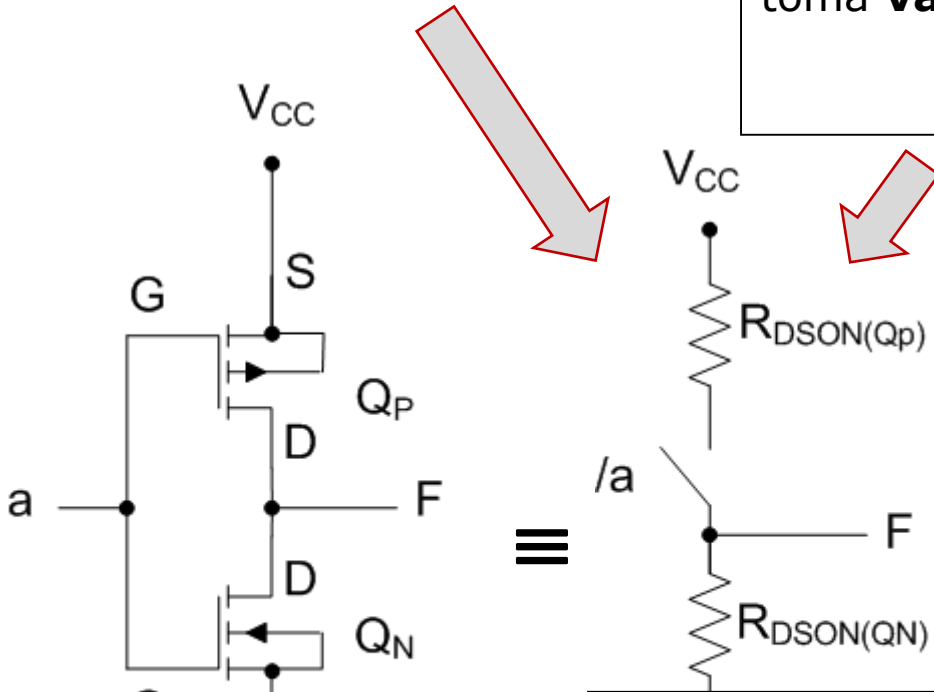
# Circuitos digitales CMOS

## Inversor CMOS: función lógica



Circuito equivalente funcionando los transistores en conmutación:

Los **interruptores** (MOS-p y MOS-n) se **cierran** cuando la **variable** que se indica a su lado toma **valor lógico "H"** y se **abren** cuando la **variable** toma **valor lógico "L"**. Esto es:  
/a o a = H → interruptor cerrado,  
/a o a = L → interruptor abierto



$$a = V_L \Rightarrow \begin{cases} Q_P \text{ ON} \\ Q_N \text{ OFF} \end{cases} \Rightarrow F = V_H$$
$$a = V_H \Rightarrow \begin{cases} Q_P \text{ OFF} \\ Q_N \text{ ON} \end{cases} \Rightarrow F = V_L$$

a	F
L	H
H	L

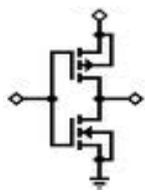
$$V_L \equiv L, V_H \equiv H$$

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





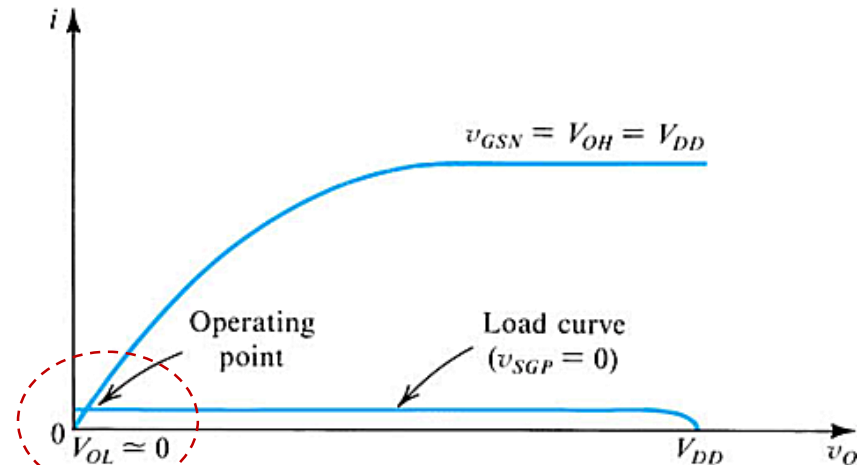
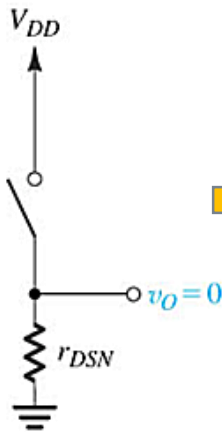
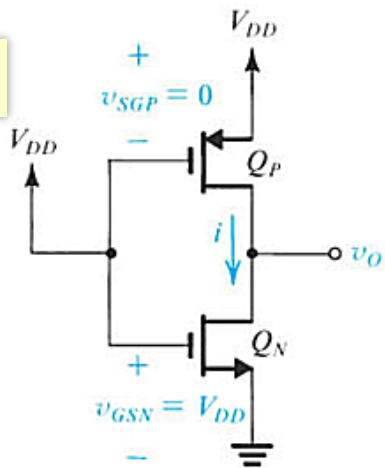
# Circuitos digitales CMOS

## Estados H y L en el inversor CMOS

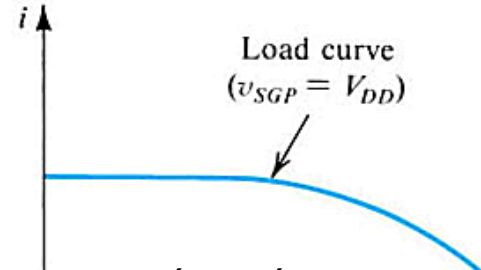
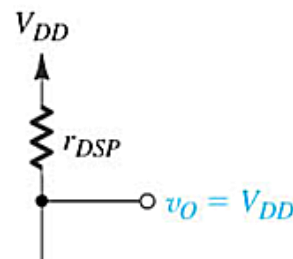
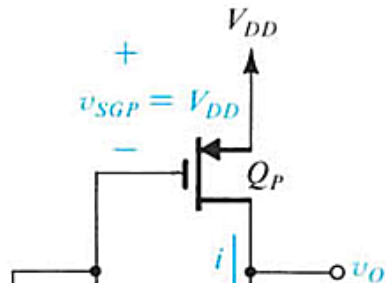


Características DC: **Puntos de trabajo** → *curvas de carga* de  $Q_P$  sobre  $Q_N$

$V_I = H$



$V_I = L$



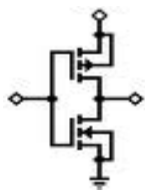
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$V_{DD}$   $v_O$



# Circuitos digitales CMOS

## Característica estática



❑ Variaciones lentas de  $v_I \rightarrow$  f. de transferencia en **baja frecuencia**

❑ Es una f. de t. **inversora**

■ **In = H  $\rightarrow$  Out = L**

■  $Q_N = ON, Q_P = OFF$

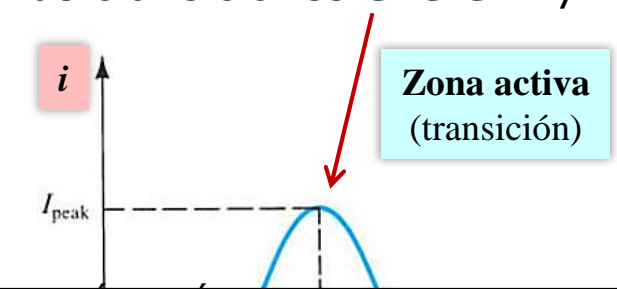
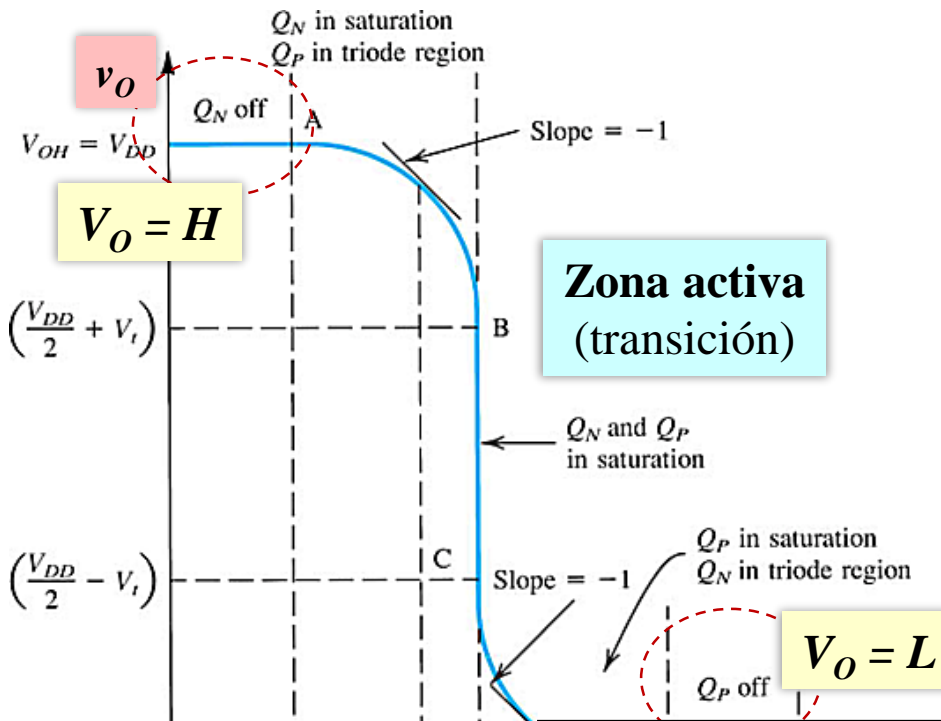
■ *iNo hay consumo de corriente!*

■ **In = L  $\rightarrow$  Out = H**

■  $Q_N = OFF, Q_P = ON$

■ *iNo hay consumo de corriente!*

❑ **Importante:** sólo hay consumos en las transiciones **entre** H y L

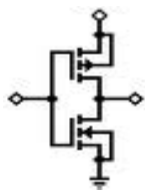


CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

$$V_{DD} - |V_{tp}|$$





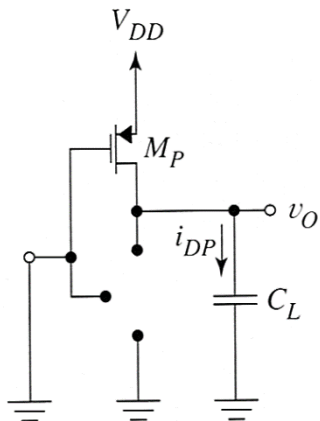
# Circuitos digitales CMOS

## Características dinámicas

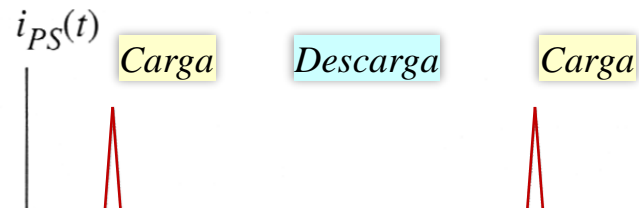
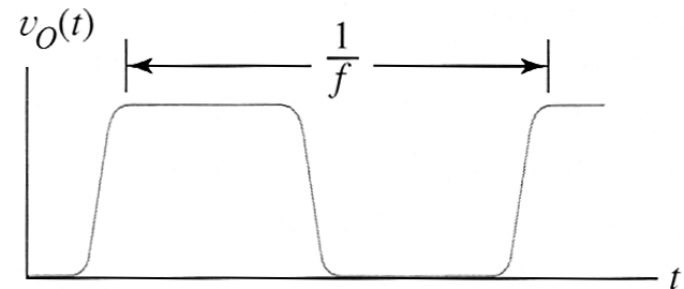
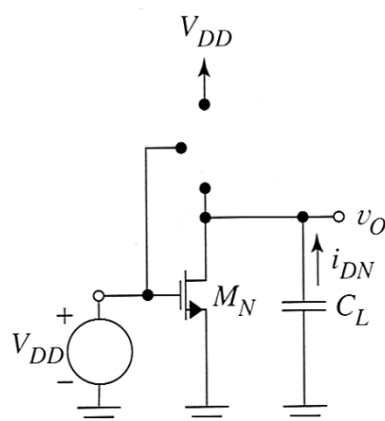


- Excitación: señal digital de frecuencia  $f \rightarrow$  ¿velocidad de conmutación?
  - En la salida hay un efecto capacitivo debido a las **pistas** de circuito y a las **entradas** de las puertas siguientes (modeladas por  $C_L$ )
  - Los transistores en **ON** deben ser capaces de cargar y descargar tales capacidades  $\rightarrow$  necesitan **tiempo** (retardos) y **corrientes** (energía)

**L  $\rightarrow$  H**



**H  $\rightarrow$  L**

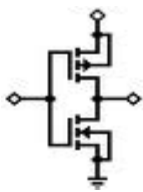


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Circuitos digitales CMOS

## Potencia y consumo en condiciones dinámicas



- Potencia consumida → significativa en condiciones **dinámicas**
- Cuando un c.i. digital **CMOS** es sometido a conmutaciones se produce un consumo de potencia apreciable. Dos causas diferentes:
  1. *Potencia debida a las transiciones ( $P_T$ )*. Su origen se debe:
    - *A las cargas y descargas de las capacidades parasitas propias de los transistores, y*
    - *A la conducción parcial y simultanea de los transistores canal P y N en el momento de la conmutación de corte a óhmica y viceversa (la potencia debida a este fenómeno es del orden del 10% de la potencia debida a las capacidades parasitas)*
  2. *Potencia debida a las cargas capacitivas en las salidas ( $P_L$ )*:
    - *Carga y descarga de las capacidades conectadas a las salidas del c.i. (CL)*
- Ambas dependen de la frecuencia de conmutación (ver Anexo I) por lo que en conjunto, la **potencia media consumida** resulta ser:

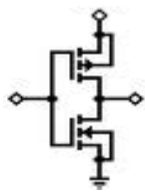
$$P_{media} = P_M = C_L \cdot V_{DD}^2 \cdot f$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



# Circuitos digitales CMOS

## Tiempos de propagación

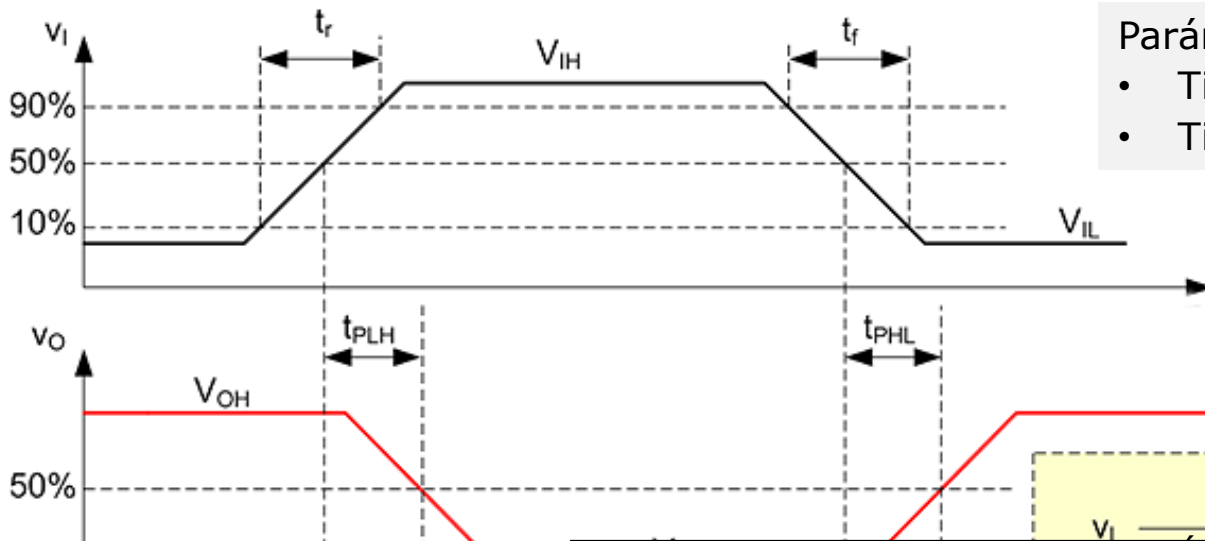


- En un circuito digital se dan múltiples fenómenos de carga/descarga como el descrito. Todos los fenómenos se engloban en un solo concepto: el **retardo**.
- Este **retardo** se describe con dos parámetros, definidos en la figura siguiente:

- $t_{pHL}$  (t. de propagación de nivel H a L) y
- $t_{pLH}$  (t. de propagación de nivel L a H).



$$\text{Tiempo de propagación: } t_p = \frac{t_{pLH} + t_{pHL}}{2}$$



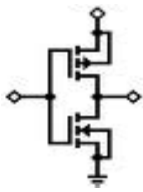
Parámetros típicos de las señales:

- Tiempo de subida (*rise time*):  $t_r$
- Tiempo de caída (*fall time*):  $t_f$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Control de revisiones



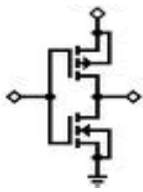
- 2017-04-21: versión inicial.
- 2020-05-12: modificadas las transparencias (actuales) 21, 22, 23, 24 y 27, para incorporar resultados de simulación y corregir un error en la gráfica de la transparencia 21.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



## Anexo I: Potencia en circuitos digitales

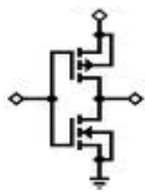
- Potencia en condiciones estáticas: CMOS
- Potencia en condiciones dinámicas: CMOS
- Potencia: condiciones de medida de CPD

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

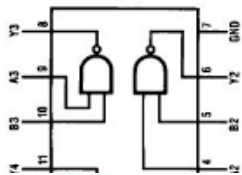


# A-I: Potencia en circuitos digitales

## Condiciones estáticas: familias CMOS

- ❑ Cuando un c.i. digital CMOS **no está sometido a conmutaciones** los **transistores** canal P y canal N **no conducen al mismo tiempo**
  - En consecuencia, idealmente **no existe corriente** entre  $V_{CC}$  y GND.
  - Sin embargo en la práctica **existen corrientes de minoritarios** (presentes en todas las uniones de diodos polarizados en inversa) dando lugar a una corriente de fuga muy pequeña, unos pocos nA, entre  $V_{CC}$  y GND.
  - Esta corriente de fuga se proporciona en las *datasheet* de los c.i. CMOS con el nombre de: *quiescent supply/device current,  $I_{CC}$*
  - Con este dato, se puede saber la **disipación** de energía en **reposo** (*Quiescent power dissipation*) cuyo valor es muy pequeño y se evalúa en DC:

$$P_{S1} = V_{CC} I_{CC}$$



Type 74HC00

At recommended operating conditions; voltages are referenced to GND (ground = 0 V).

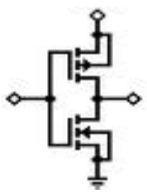
SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
		OTHER	UNIT				

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



# A-I: Potencia en circuitos digitales

## Condiciones dinámicas: familias CMOS

- ❑ Cuando un c.i. digital es sometido a conmutaciones se produce un consumo adicional de potencia:
  1. *Potencia debida a las transiciones ( $P_T$ ):* Su origen se debe: a) las cargas y descargas de las capacidades parasitas propias de los transistores, y b) conducción parcial y simultanea de los transistores canal P y N en el momento de la conmutación de corte a óhmica y viceversa (la potencia debida a este fenómeno es del orden del 10% de la potencia debida a las capacidades parasitas)
  2. *Potencia debida a las cargas capacitivas en las salidas ( $P_L$ ):* Carga y descarga de las capacidades conectadas a las salidas del c.i. ( $C_L$ )
- ❑ Por tanto, la potencia dinámica ( $P_D$ ) total consumida por un c.i, con  $n$  entradas y  $m$  salidas, debido a las conmutaciones viene dada por (como se demostrará más adelante):

$$P_D = P_T + P_L = \sum_{i=1}^n (C_{PDi} V_{CC}^2 f_{ii}) + \sum_{j=1}^m (C_{Lj} V_{CC}^2 f_{Oj})$$

- ❑ Donde:

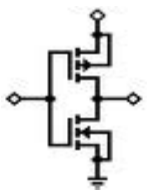
- $C_{PDi}$ : Capacitancia de disipación de potencia (*power dissipation capacitance*)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# A-I: Potencia en circuitos digitales

## Condiciones dinámicas: CMOS

- La **potencia total consumida** ( $P_{Total}$ ) es por tanto:

$$P_{Total} = P_D + P_S = \sum_{i=1}^n (C_{PDi} V_{CC}^2 f_{Ii}) + \sum_{j=1}^m (C_{Lj} V_{CC}^2 f_{Oj}) + V_{CC} \left[ \frac{n_1 I_{CCL} + n_2 I_{CCH}}{n_1 + n_2} + n_3 \Delta I_{CC} \right]$$

- $C_{PD}$  es un **parámetro** que suele **utilizarse**, con carácter general, para determinar la **potencia consumida** por **cualquier dispositivo** cuando la **potencia** es una **combinación lineal** de la **frecuencia**.
- En el caso de **c.i. digitales** las **condiciones de medida** de este parámetro son **diferentes** en función de la **función lógica del c.i.** (los fabricantes en sus *datasheets* hacen referencia explícita a las condiciones de medida de  $C_{PD}$ ).
- En general se puede decir que la **potencia consumida por los c.i. CMOS** y

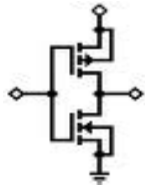
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

--

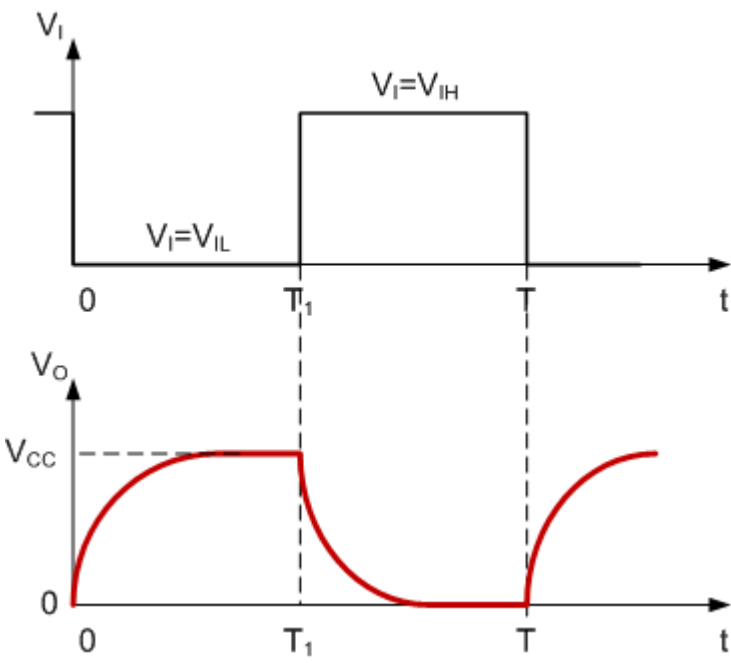
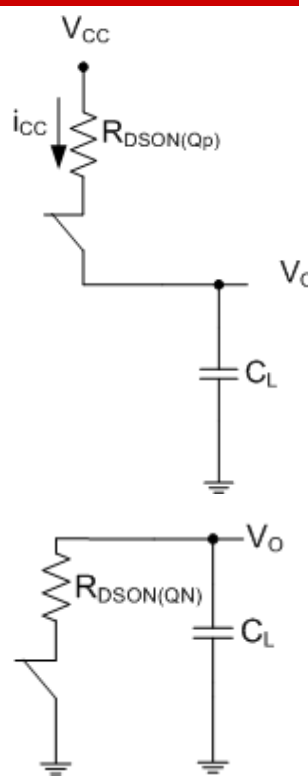
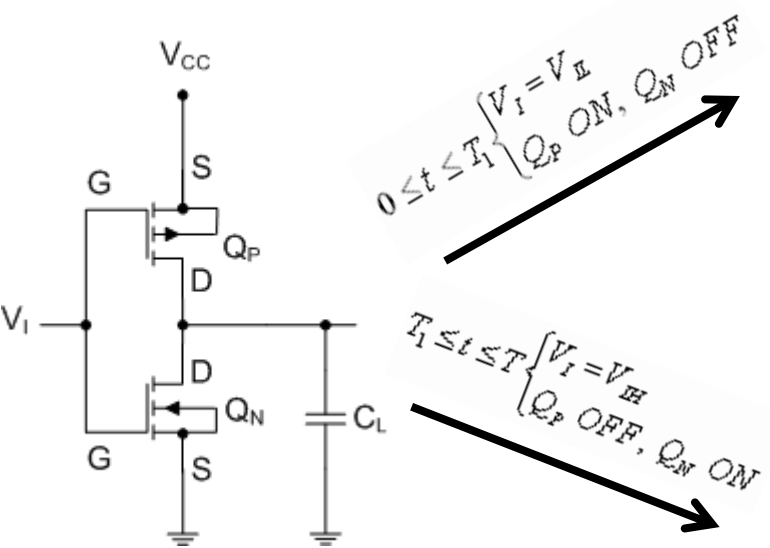
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70





# A-I: Potencia en circuitos digitales

Condiciones dinámicas: CMOS con carga capacitiva  $C_L$



$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i_{cc} V_{cc} dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} i_{cc} V_{cc} dt + \frac{1}{T} \int_{T_1}^T i_{cc} V_{cc} dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} i_{cc} V_{cc} dt \quad 0 \leq t \leq T_1: i_{cc} = C_L \frac{dV_o}{dt}$$

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70