

# Dispositivos Electrónicos



**AÑO: 2010**

**TEMA 4: UNIÓN P-N. EL DIODO DE UNIÓN P-N**



Rafael de Jesús Navas González  
Fernando Vidal Verdú



## TEMA 4: UNIÓN p-n. EL DIODO DE UNIÓN p-n

### 4.1. Unión p-n en equilibrio.

### 4.2. Unión p-n en polarización directa e inversa.

### 4.3. Diodo de unión p-n. Curva característica del diodo. Modelos estáticos.

### 4.4. El diodo como elemento de circuito. Circuitos con diodos

*4.4.1 Cálculo del punto de trabajo.*

*4.4.2 Cálculo de la característica de transferencia.*

### 4.5. Características dinámicas del diodo. Diodo en conmutación.

*4.5.1 Capacidad de Deplexión o de Transición*

*4.5.2 Capacidad de Difusión. Tiempo de almacenamiento. Tiempo de recuperación*

### 4.6. Lógica con diodos.

*4.6.1 Puertas AND y OR con diodos.*

*4.6.2 Calidad de las puertas lógicas con diodos.*

### 4.7. Otros tipos de diodos:

*4.7.1 Diodo Zener. Diodo LED. Fotodiodo. Diodo Varactor. Diodo Schottky*

## TEMA 4: UNIÓN p-n. EL DIODO DE UNIÓN p-n

### OBJETIVOS

Al estudiar este tema el alumno debe ser capaz de:

- Explicar de forma cualitativa las características de conducción en la zona de unión de materiales semiconductores de tipo P y N en equilibrio, esto es, ausencia de polarización externa.
- Explicar de forma cualitativa las características de conducción en la zona de unión de materiales semiconductores de tipo P y N en polarización directa.
- Explicar de forma cualitativa las características de conducción en la zona de unión de materiales semiconductores de tipo P y N en polarización inversa.
- Identificar el dispositivo electrónico diodo de unión pn y reconocer su característica intensidad-tensión.
- Conocer los modelos básicos de diodo en condiciones estáticas: ideal, tensión umbral y linealizado.
- Realizar cálculos en circuitos sencillos: circuito rectificador, limitador de tensión y puente de diodos. Análisis DC y característica de transferencia.
- Conocer el comportamiento del diodo en condiciones dinámicas: Capacidad de deplexión y capacidad de difusión: Modelo en condiciones dinámicas.
- Analizar circuitos básicos que implementan puertas lógicas AND OR con diodos.
- Identificar las principales características de diferentes tipos de diodos: diodos Zener, diodos LED y fotodiodos, diodo varactor, diodo Schottky.

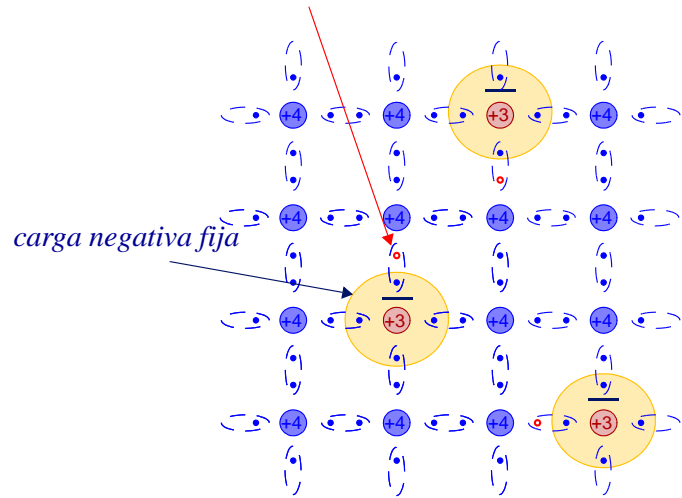
## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Navas González R. y Vidal Verdú F. "Curso de Dispositivos Electrónicos en Informática y Problemas de Examen Resueltos" Universidad de Málaga/ Manual 70, 2006. Tema 4: pag.131-180.
- Fernández Ramos, J. y otros, "Dispositivos Electrónicos para Estudiantes de Informática" Universidad de Málaga / Manuales 2002. Tema 4: pag. 59- 89.
- Malik, N.R., "Circuitos Electrónicos. Análisis, Simulación y Diseño", Editorial Prentice-Hall 1996. Tema: 3: pag. 146-165.
- Pollán Santamaría, Tomás, "Electrónica Digital I. Sistemas Combinacionales", Prensas Universitarias de Zaragoza 2003. APENDICE A2: pag. 263-268, TEMA 7: pag. 269-273.
- Daza A. y García J. "Ejercicios de Dispositivos Electrónicos" Universidad de Málaga/Manuales 2003. Tema 2: pag 69-105.
- <http://jas.eng.buffalo.edu/education/index.html>

## REPRESENTACIÓN SIMBÓLICA DE SEMICONDUCTORES DE TIPO P y N

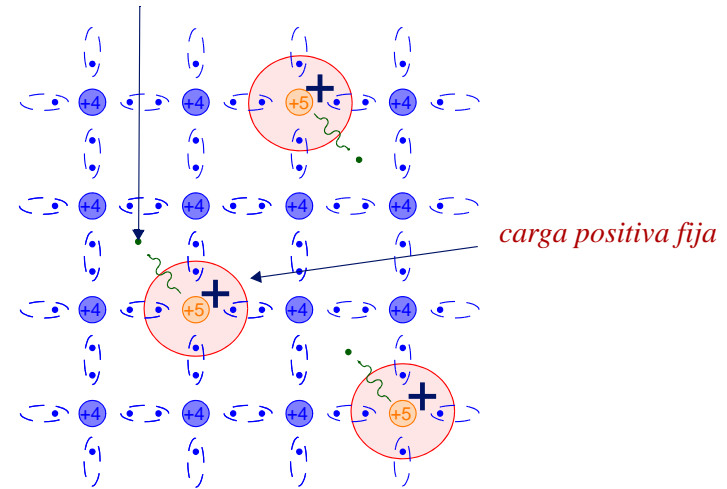
*material de tipo p*

*hueco que se desplaza generado por la impureza aceptora*

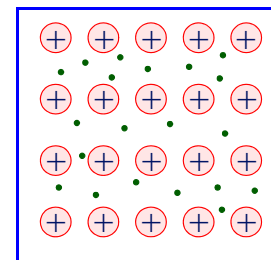
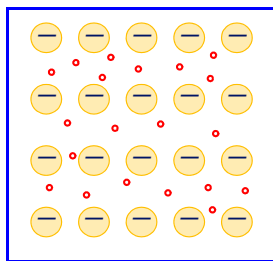


*material de tipo n*

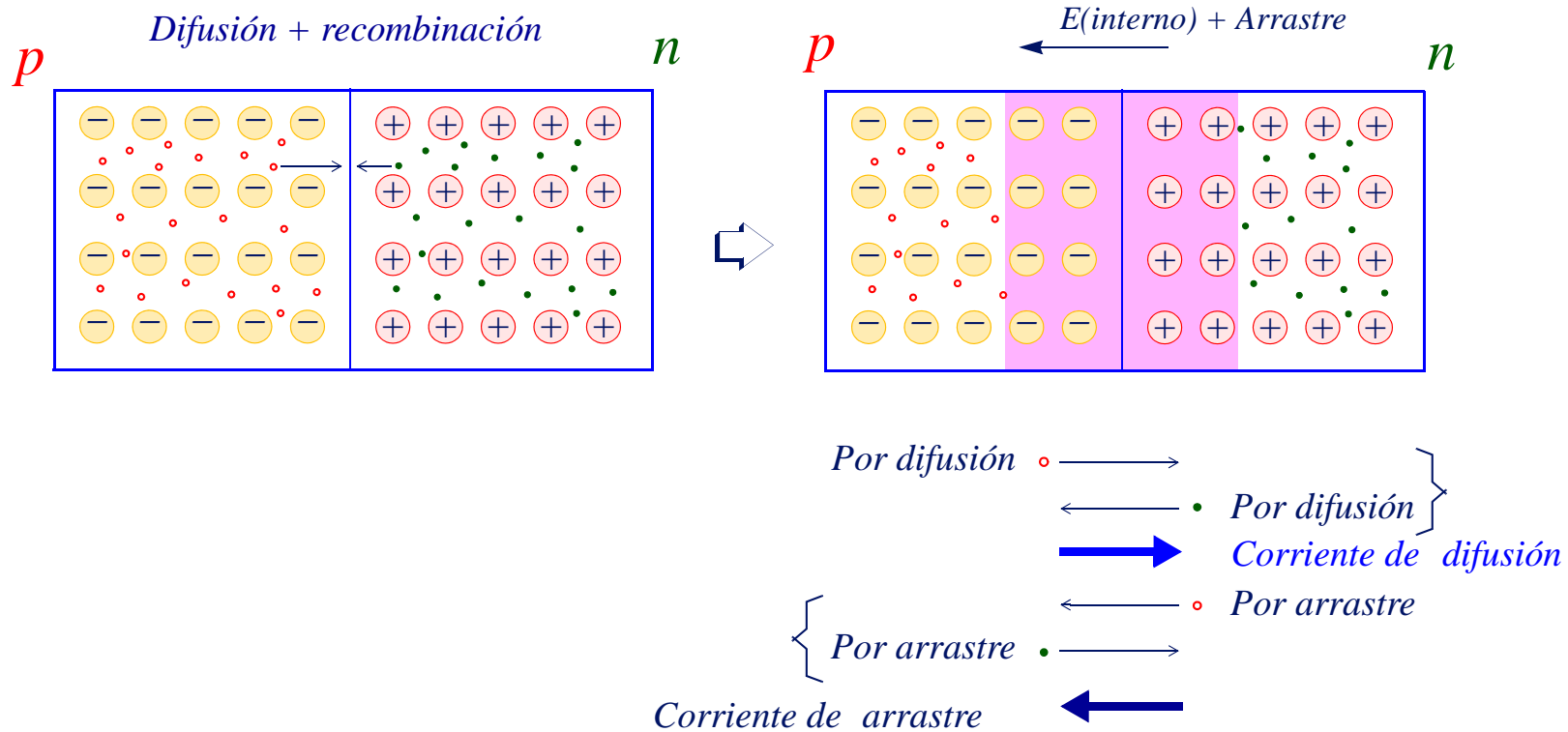
*electrón libre generado por la impureza donadora*



*representación simbólica*



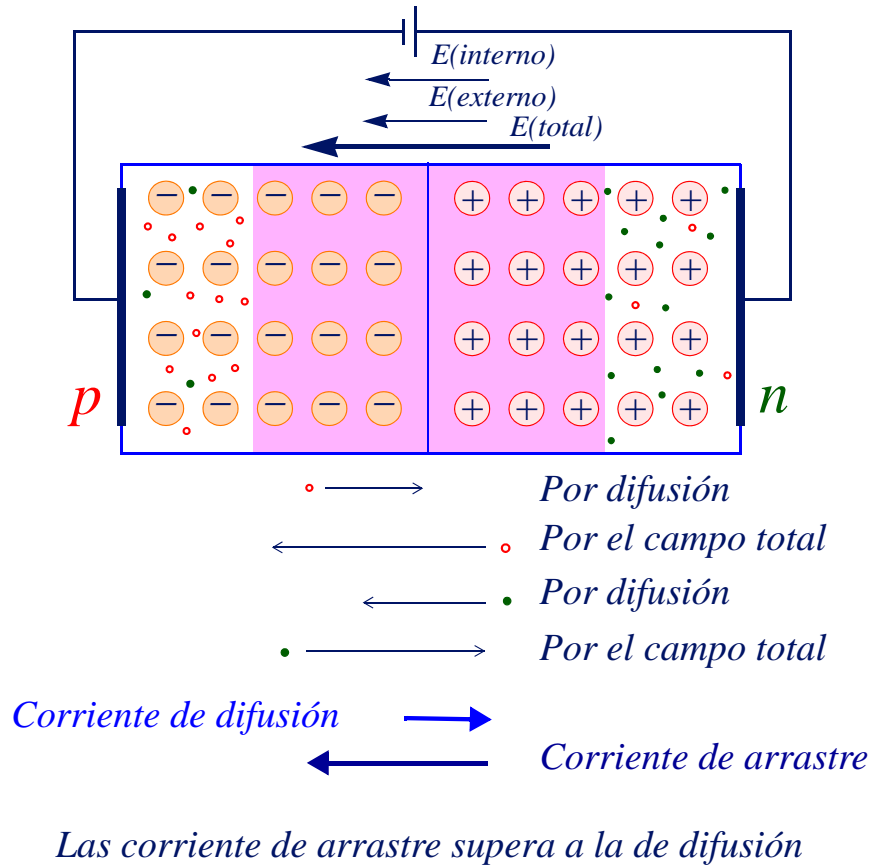
# UNIÓN PN EN EQUILIBRIO



*Las corrientes de difusión y arrastre se cancelan*

## UNIÓN PN EN POLARIZACIÓN INVERSA

6/37



La corriente neta está formada  
 por portadores minoritarios  
 huecos en la zona  $n$   
 y  
 electrones en la zona  $p$   
 que se originan  
 por generación-recombinación

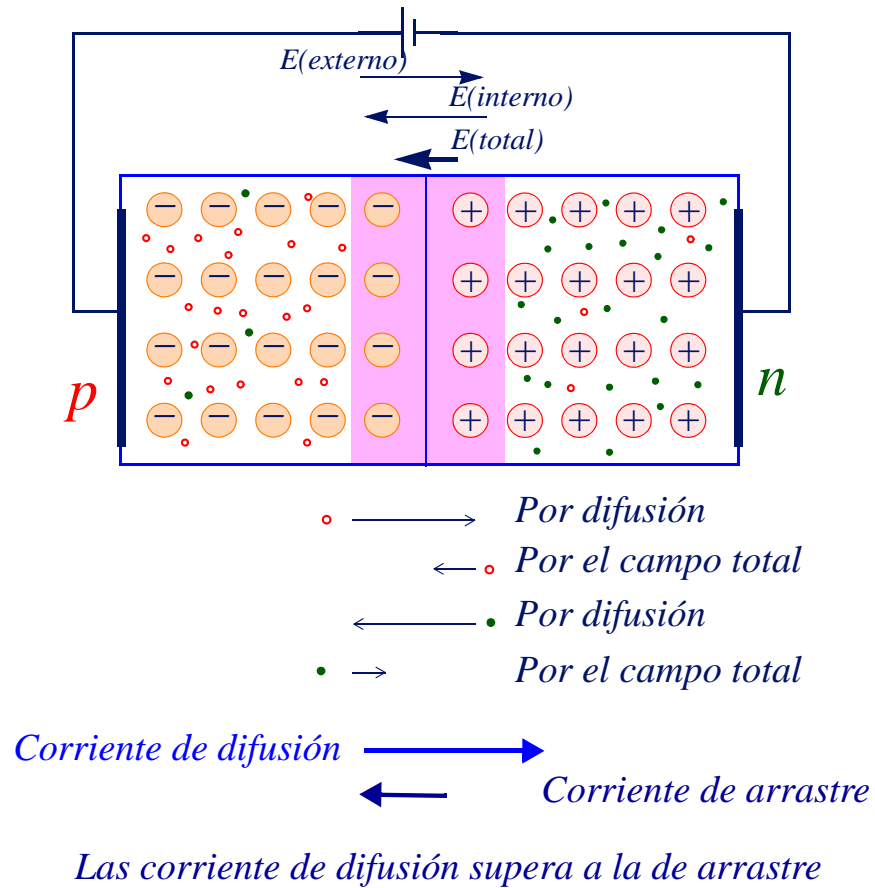


Por tanto la corriente  
 que circula por la unión  
 es muy pequeña  
 y depende fuertemente de la temperatura



## UNIÓN PN EN POLARIZACIÓN DIRECTA

7/37



La corriente neta está formada  
por portadores mayoritarios

*huecos* en la zona  $p$

y

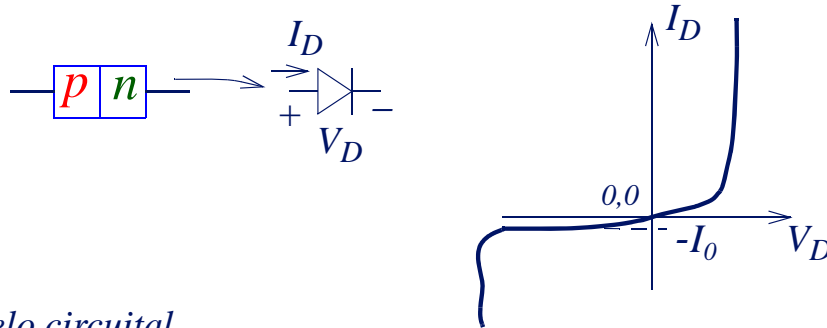
*electrones* en la zona  $n$

cuyas concentraciones se controlan  
por adición de impurezas aceptoras  
y donadoras respectivamente



Por tanto la corriente que circula  
por la unión es grande  
y depende más débilmente  
de la temperatura.

## DIODO DE UNIÓN PN: CURVA CARACTERÍSTICA. DIODO COMO ELEMENTO DE CIRCUITO: MODELOS ESTÁTICOS DE DIODO



Modelo matemático

$$I_D = I_0 \left( e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

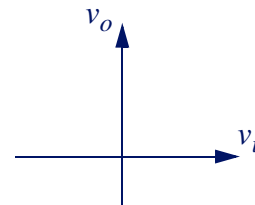
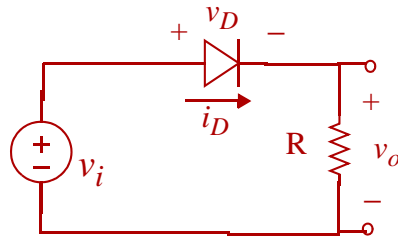
$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Modelo circuital

<u>Modelo ideal</u>	<u>Modelo con tensión umbral</u>	<u>Modelo linealizado general</u>
<p style="color: red; text-align: center;">cortocircuito <math>V_D = 0</math> <math>I_D \geq 0</math></p> <p style="color: red;">c circuito abierto <math>I_D = 0</math> <math>V_D \leq 0</math></p>	<p style="color: red; text-align: center;">fuente de tensión <math>V_D = V_\gamma</math> <math>I_D \geq 0</math></p> <p style="color: red;">c circuito abierto <math>I_D = 0</math> <math>V_D \leq V_\gamma</math></p>	<p style="color: red; text-align: center;">resistencia en serie con fuente de tensión <math>V_D = I_D R_D + V_\gamma</math> <math>I_D \geq 0</math></p> <p style="color: red;">c circuito abierto <math>I_D = 0</math> <math>V_D \leq V_\gamma</math></p>

## DIODO COMO ELEMENTO DE CIRCUITO: EJEMPLOS

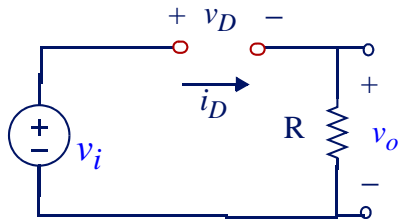
*Ej: Determinar el estado de conducción del diodo en el circuito de la figura en función de la tensión  $v_i$ .  
Obtener también la curva  $v_o$ - $v_i$  o curva de transferencia.  
Resolver el problema considerando los modelos circuitales de diodo ideal y linealizado y comparar los resultados.*



$$v_o = Ri_D$$

### 1) Modelo ideal

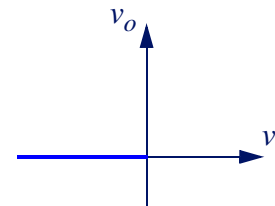
A) Suponemos que el diodo está cortado  $i_D = 0 \rightarrow v_o = 0$



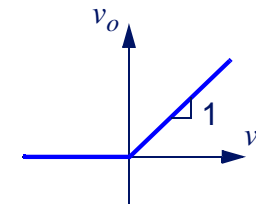
Se ha de cumplir que  $v_D \leq 0$

$$v_D = v_i - v_o \leq 0$$

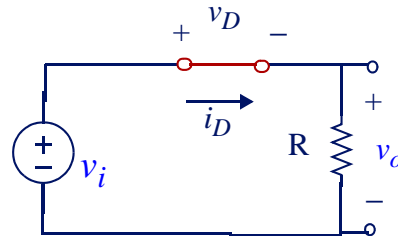
Se cumple si  $v_i \leq 0$



La característica de transferencia resulta:



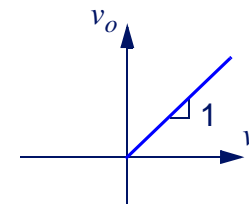
B) Suponemos que el diodo conduce  $v_D = 0 \rightarrow v_o = v_i$



Se ha de cumplir que  $i_D \geq 0$

$$i_D = \frac{v_i}{R} \geq 0$$

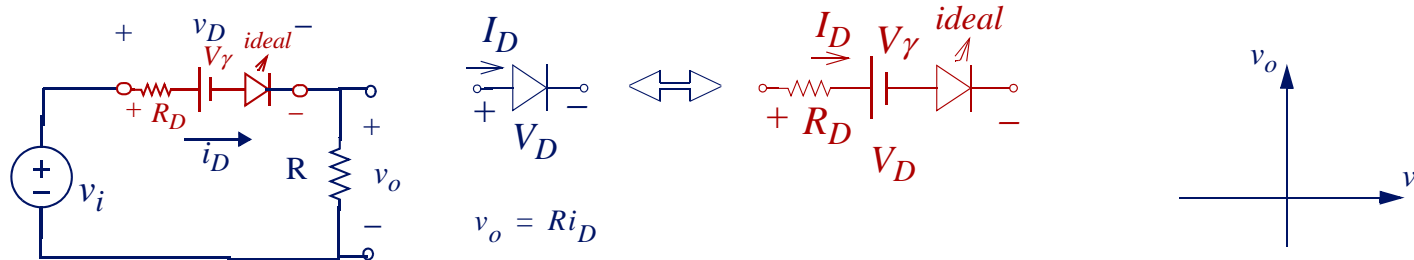
Se cumple si  $v_i \geq 0$



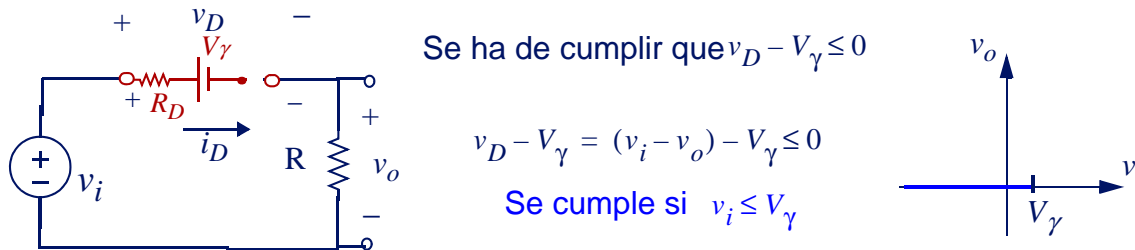
## DIODO COMO ELEMENTO DE CIRCUITO: EJEMPLOS

*Ej. . (Continuación)*

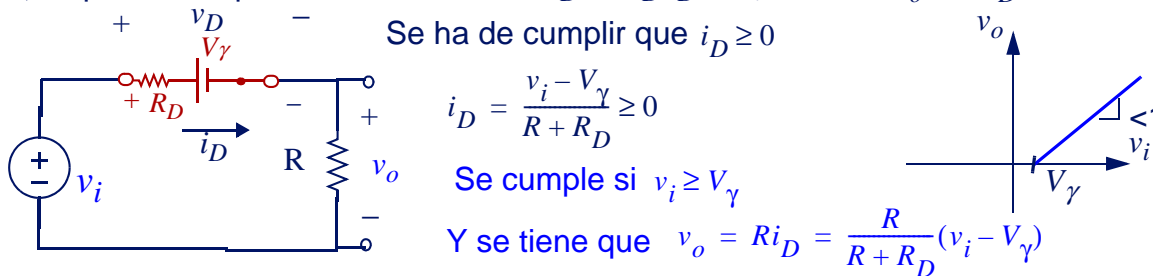
### 2) Modelo linealizado



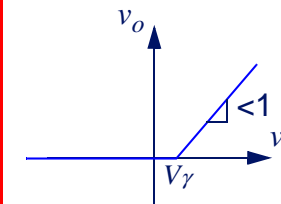
A) Suponemos que el diodo está cortado  $i_D = 0 \longrightarrow v_o = 0$



B) Suponemos que el diodo conduce  $v_D = R_D i_D + V_\gamma \longrightarrow v_o = Ri_D$

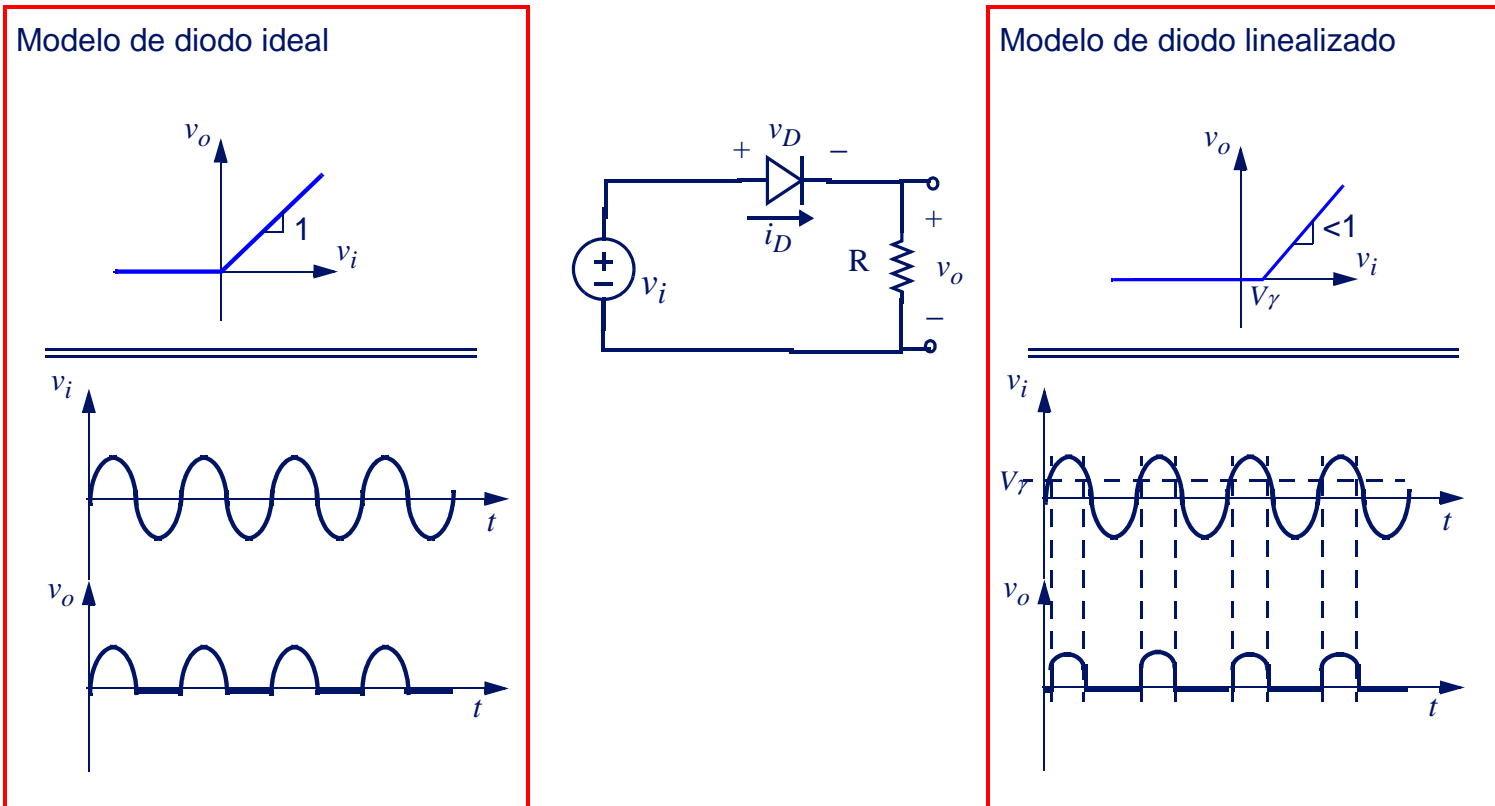


La característica de transferencia resulta:



## DIODO COMO ELEMENTO DE CIRCUITO: EJEMPLOS

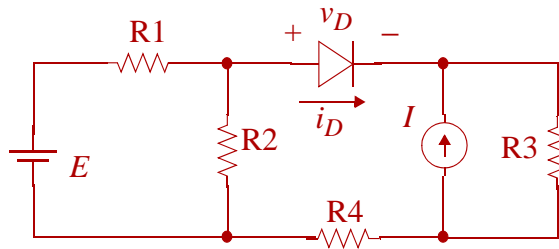
*Ej: .(Continuación) Comparación*



**Circuito rectificador de media onda**

## DIODO COMO ELEMENTO DE CIRCUITO: EJEMPLOS

*Ej: Determinar los valores de la corriente y la tensión en el diodo del circuito de la figura. Resolver el problema considerando los tres modelos circuitales de diodo y comparar los resultados. (Usar  $V_\gamma = 0,4V$  y  $R_D = 50\Omega$  en los modelos correspondientes)*



$$E=6V \quad R1=4k\Omega \quad R3=1k\Omega$$

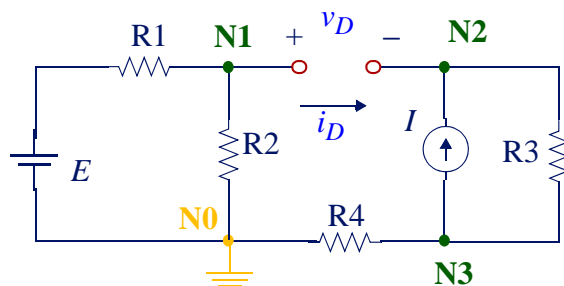
$$I=1mA \quad R2=2k\Omega \quad R4=1k\Omega$$

Variables cuyo valor hay que calcular:

-Tensión e Intensidad en el diodo ( $v_D, i_D$ )

### 1) Modelo ideal

A) Suponemos que el diodo está cortado  $i_D = 0$



Y se verifica si se cumple que  $v_D \leq 0$

$$v_D = v_{N1} - v_{N2} \quad v_{N1} = \frac{R_2 E}{R_1 + R_2}$$

$$v_{N2} = R_3 I$$

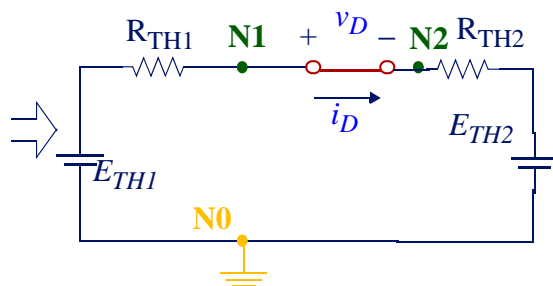
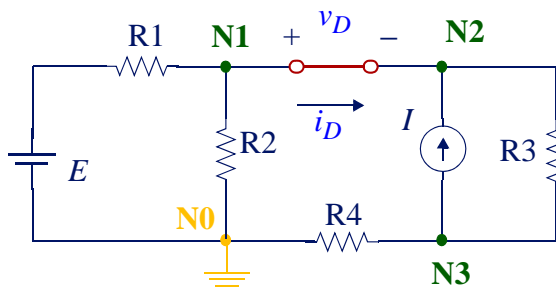
Sustituyendo valores numéricos

$$v_D = 2V - 1V \geq 0$$

No se cumple que  $v_D \leq 0$  luego el diodo no está cortado

B) Suponemos que el diodo conduce  $v_D = 0$

Y se verifica si se cumple que  $i_D \geq 0$



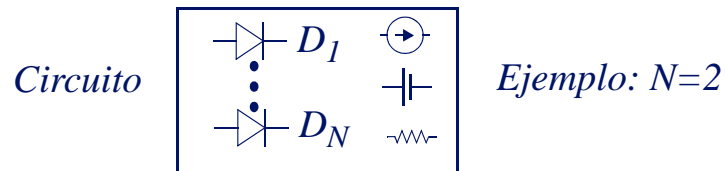
$$E_{TH1} = \frac{R_2 E}{R_1 + R_2} \quad E_{TH2} = R_3 I$$

$$R_{TH1} = \frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2} \quad R_{TH2} = R_3 + R_4$$

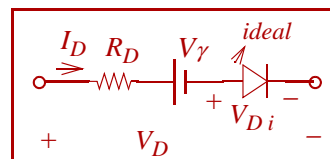
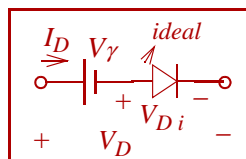
$$i_D = \frac{E_{TH1} - E_{TH2}}{R_{TH1} + R_{TH2}} = \frac{2V - 1V}{\frac{4}{3}k\Omega + 2k\Omega}$$

$$i_D = 0,3mA \geq 0 \quad v_D = 0$$

## CÁLCULO DEL PUNTO DE TRABAJO: UN ALGORITMO



1. Identificar el modelo circuital a emplear para analizar el circuito. Si el modelo es el de tensión umbral o bien el linealizado, se sustituyen por su equivalente con el diodo ideal, y a partir de aquí todos los diodos del circuito son ideales.



2. Se consideran todas las situaciones posibles, que son  $M = 2^N$ , si  $N = 2$ ,  $M = 4$  :

i=1: D1 ON D2 ON

i=2: D1 ON D2 OFF

i=3: D1 OFF D2 ON

i=4: D1 OFF D2 OFF

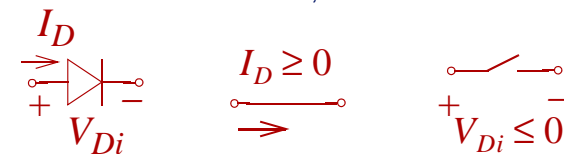
inicializo la variable  $i = 0$

3. Tomo el caso  $i = i + 1$  y sustituyo los diodos por los modelos:

Diodo ON -> cortocircuito

Diodo OFF -> circuito abierto

4. Para todos los diodos compruebo las condiciones bajo las cuales los modelos son válidos, o sea:



NO

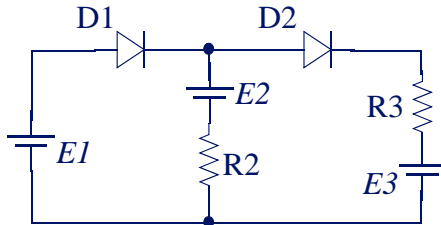
¿Se cumplen las condiciones?

SI

FIN: CALCULO LO QUE QUIERO DEL CIRCUITO

## CÁLCULO DEL PUNTO DE TRABAJO: EJEMPLO

Ej: Determinar los valores de la intensidad de corriente en las fuentes de tensión del circuito de la figura. Usar el modelo de tensión umbral para los diodos.



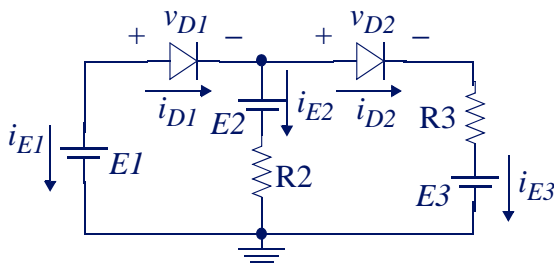
$$E1=3V \quad E2=1V \quad E3=4V$$

$$V_{\gamma}=0,7V \quad R2=2k\Omega \quad R3=4k\Omega$$

Variables cuyo valor hay que calcular:

- Intensidad en  $E1, E2$  y  $E3$  ( $i_{E1}, i_{E2}, i_{E3}$ )

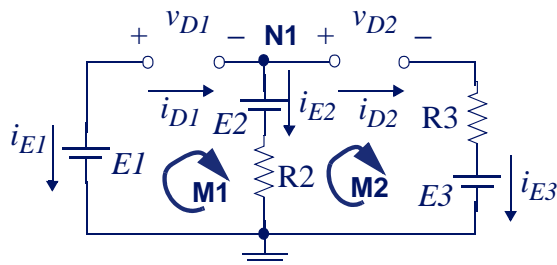
- 1) Asignamos nombre y referencia a las variables del circuito que se van a emplear en los cálculos. Y consideramos todos los casos posibles para el estado de los diodos:



2) CASOS	MODELO	CONDICIONES DE VALIDEZ
A) D1 OFF D2 OFF	$i_{D1} = 0$ $i_{D2} = 0$	$v_{D1} - V_{\gamma} \leq 0$ $v_{D2} - V_{\gamma} \leq 0$
B) D1 OFF D2 ON	$i_{D1} = 0$ $v_{D2} = V_{\gamma}$	$v_{D1} - V_{\gamma} \leq 0$ $i_{D2} \geq 0$
C) D1 ON D2 ON	$v_{D1} = V_{\gamma}$ $v_{D2} = V_{\gamma}$	$i_{D1} \geq 0$ $i_{D2} \geq 0$
D) D1 ON D2 OFF	$v_{D1} = V_{\gamma}$ $i_{D2} = 0$	$i_{D1} \geq 0$ $v_{D2} - V_{\gamma} \leq 0$

- 3,4) Se analizan los diferentes casos sustituyendo el modelo y verificando sus condiciones de validez hasta encontrar la situación verdadera

A)  $\left. \begin{array}{l} \text{D1 OFF} \quad i_{D1} = 0 \quad v_{D1} - V_{\gamma} \leq 0 \quad \text{(a)} \\ \text{D2 OFF} \quad i_{D2} = 0 \quad v_{D2} - V_{\gamma} \leq 0 \quad \text{(b)} \end{array} \right\}$



$$\text{N1: } i_{E2} = 0$$

$$\text{M1: } v_{D1} = E1 - E2$$

$$\text{M2: } v_{D2} = E2 - E3$$

$$v_{D1} = 3V - 1V = 2V$$

$$v_{D2} = 1V - 4V = -3V$$

$$v_{D1} - V_{\gamma} = 2V - 0,7V > 0$$

$$v_{D2} - V_{\gamma} = -3V - 0,7V < 0$$

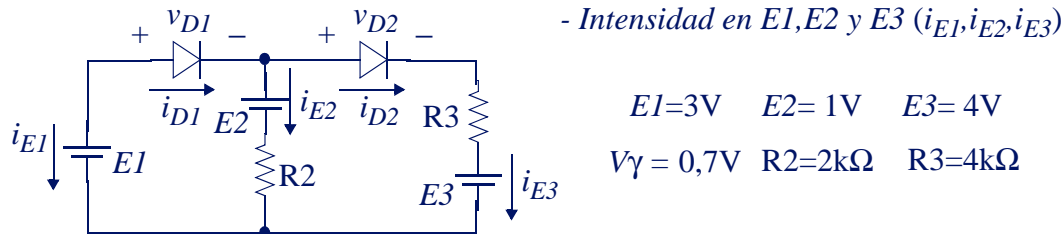
aunque se cumple (b), no se cumple (a),

luego ésta no es la situación real de los diodos



## CÁLCULO DEL PUNTO DE TRABAJO: EJEMPLO

Ej: (Continuación) Variables cuyo valor hay que calcular:



$$E1=3V \quad E2=1V \quad E3=4V$$

$$V_\gamma = 0,7V \quad R2=2k\Omega \quad R3=4k\Omega$$

B) **D1 OFF**  $i_{D1} = 0 \quad v_{D1} - V_\gamma \leq 0$  (a)  
**D2 ON**  $v_{D2} = V_\gamma \quad i_{D2} \geq 0$  (b)

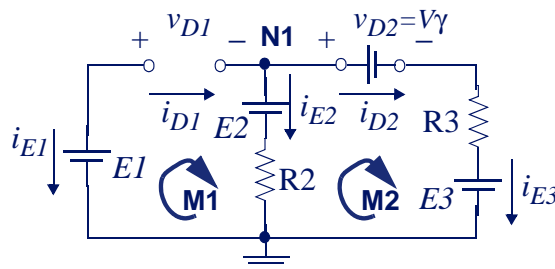
**M1:**  $v_{D1} = E1 - (E2 + R2i_{E2})$

**N1:**  $i_{D2} = i_{E3} = -i_{E2}$

**M2:**  $V_\gamma + R3i_{E3} + E3 - R2i_{E2} - E2 = 0$

$$V_\gamma + R3i_{D2} + E3 + R2i_{D2} - E2 = 0$$

$$i_{D2} = \frac{E2 - E3 - V_\gamma}{R2 + R3} = \frac{1 - 4 - 0,7}{6k\Omega} < 0$$



aunque se pudiera cumplir (a), (b) no se cumple,

luego ésta tampoco es la situación real de los diodos

C) **D1 ON**  $v_{D1} = V_\gamma \quad i_{D1} \geq 0$  (a)  
**D2 ON**  $v_{D2} = V_\gamma \quad i_{D2} \geq 0$  (b)

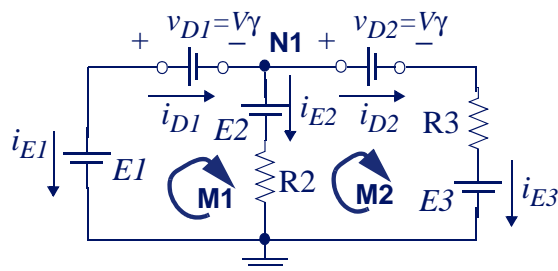
**N1:**  $i_{D1} - i_{D2} - i_{E2} = 0$

**M1:**  $R2i_{E2} = E1 - E2 - V_\gamma$

**M2:**  $R3i_{D2} - R2i_{E2} = E2 - E3 - V_\gamma$

**M1+M2:**  $R3i_{D2} = E1 - E3 - 2V_\gamma$

$$i_{D2} = \frac{E1 - E3 - 2V_\gamma}{R3} = \frac{3 - 4 - 1,4}{4k\Omega} < 0$$

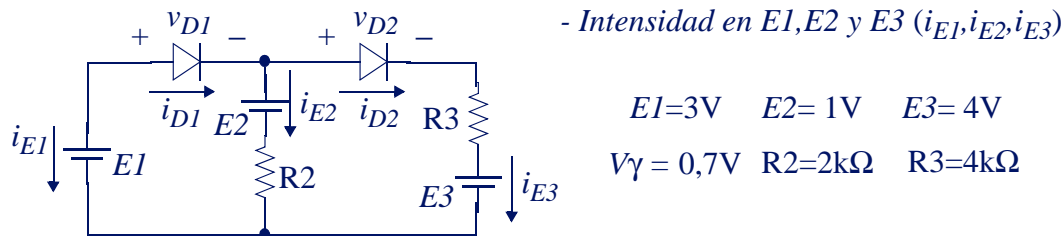


aunque se pudiera cumplir (a), (b) no se cumple,

luego ésta tampoco es la situación real de los diodos

## CÁLCULO DEL PUNTO DE TRABAJO: EJEMPLO

Ej: (Continuación) Variables cuyo valor hay que calcular:



$$E1 = 3V \quad E2 = 1V \quad E3 = 4V$$

$$V_\gamma = 0,7V \quad R2 = 2k\Omega \quad R3 = 4k\Omega$$

**D)** **D1 ON**  $v_{D1} = V_\gamma \quad i_{D1} \geq 0$  (a)  
**D2 OFF**  $i_{D2} = 0 \quad v_{D2} - V_\gamma \leq 0$  (b)

**M2:**  $v_{D2} = (E2 + R2 i_{E2}) - E3$

**N1:**  $i_{D1} = i_{E2} = -i_{E1}$

**M1:**  $V_\gamma + E2 + R2 i_{E2} - E1 = 0$

$$V_\gamma + E2 + R2 i_{D1} - E1 = 0$$

$$i_{D1} = \frac{E1 - E2 - V_\gamma}{R2}$$

$$i_{D1} = \frac{3 - 1 - 0,7}{2k\Omega} = 0,65mA$$

$$v_{D2} = 1V + 2k\Omega \times 0,65mA - 4V = -1,7V$$

$$v_{D2} - V_\gamma \leq 0$$

Hemos verificado que se cumplen  
tanto (a) como (b),

luego la situación D) es la situación real de los diodos, de modo que  
el punto de operación de los diodos queda determinado por los valores

$$v_{D1} = 0,7V \quad v_{D2} = -1,7V$$

$$i_{D1} = 0,65mA \quad i_{D2} = 0$$

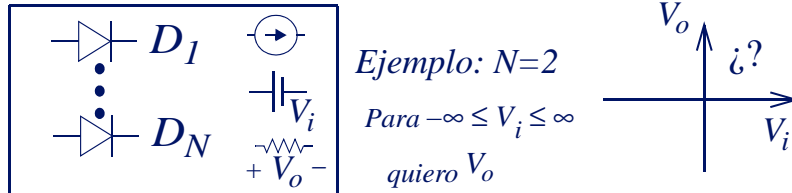
**FIN)** A partir de estos datos se obtiene los valores requeridos en el enunciado

De **N1:**  $i_{D1} = i_{E2} = -i_{E1}$   $i_{E1} = -0,65mA$   
 $i_{E2} = 0,65mA$

Del circuito:  $i_{D2} = i_{E3}$   $i_{E3} = 0$

**Ejercicio:** Encuentra el valor mínimo de tensión de la fuente E1 y la potencia que ha de suministrar para que ambos diodos conduzcan el este circuito.

## CÁLCULO DE CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA:



1. Si los diodos son con tensión umbral o linealizado, los sustituyo por su equivalente con el diodo ideal, y a partir de aquí todos los diodos del circuito son ideales.

2. Se consideran todas las situaciones posibles, que son  $M = 2^N$ , es decir si  $N = 2$ ,  $M = 4$ , en concreto:

i=1: D1 ON D2 ON

i=2: D1 ON D2 OFF

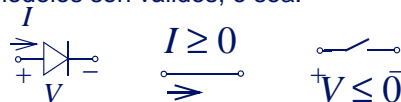
i=3: D1 OFF D2 ON

i=4: D1 OFF D2 OFF

inicializo la variable  $i = 0$

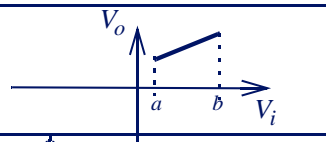
3. Tomo el caso  $i = i+1$  y sustituyo los diodos por los modelos:  
 Diodo ON  $\rightarrow$  cortocircuito, Diodo OFF  $\rightarrow$  circuito abierto

4. Para todos los diodos impongo las condiciones bajo las cuales los modelos son válidos, o sea:



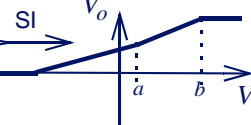
5. De las condiciones sobre  $I$  y  $V$  obtengo las condiciones sobre  $V_i$ :  
 $I \geq 0$   
 $V \leq 0$   $\rightarrow a \leq V_i \leq b$

6. Cálculo  $V_o$



NO

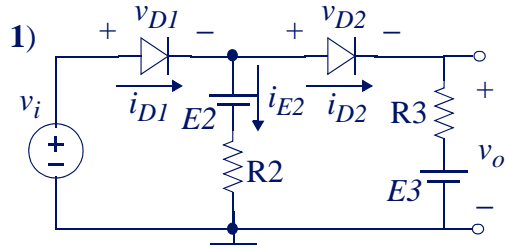
¿ $i = M$ ?



SI

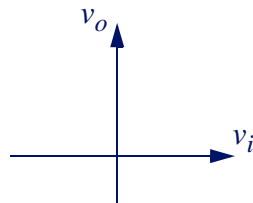
### CÁLCULO DE CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA: EJEMPLO

Ej: Determinar la característica de transferencia  $v_o-v_i$  para el circuito de la figura. Usar el modelo de tensión umbral para los diodos.



$E2 = 1V \quad E3 = 4V$   
 $V_\gamma = 0,7V \quad R2 = 2k\Omega \quad R3 = 4k\Omega$

Hay que obtener la gráfica  $v_o-v_i$

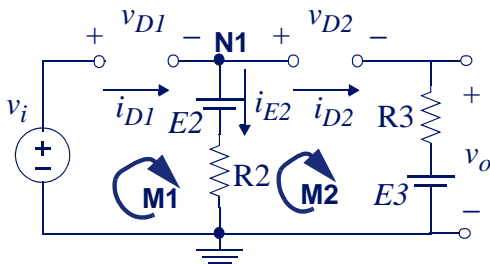


2) CASOS	MODELO	CONDICIONES DE VALIDEZ
A) D1 OFF D2 OFF	$i_{D1} = 0$ $i_{D2} = 0$	$v_{D1} - V_\gamma \leq 0$ $v_{D2} - V_\gamma \leq 0$
B) D1 OFF D2 ON	$i_{D1} = 0$ $v_{D2} = V_\gamma$	$v_{D1} - V_\gamma \leq 0$ $i_{D2} \geq 0$
C) D1 ON D2 ON	$v_{D1} = V_\gamma$ $v_{D2} = V_\gamma$	$i_{D1} \geq 0$ $i_{D2} \geq 0$
D) D1 ON D2 OFF	$v_{D1} = V_\gamma$ $i_{D2} = 0$	$i_{D1} \geq 0$ $v_{D2} - V_\gamma \leq 0$

3,4,5,6) Se analizan los diferentes casos sustituyendo el modelo y se busca la condición que ha de cumplir  $v_i$  para que se cumplan las condiciones de validez del modelo. Se obtiene la expresión de  $v_o$  en función de  $v_i$ . Se repite el análisis para todos los casos posibles.

A) **D1 OFF**  $i_{D1} = 0 \quad v_{D1} - V_\gamma \leq 0$  (a)  
**D2 OFF**  $i_{D2} = 0 \quad v_{D2} - V_\gamma \leq 0$  (b)

**N1:**  $i_{E2} = 0$   
**M1:**  $v_{D1} = v_i - E2$   
**M2:**  $v_{D2} = E2 - E3$

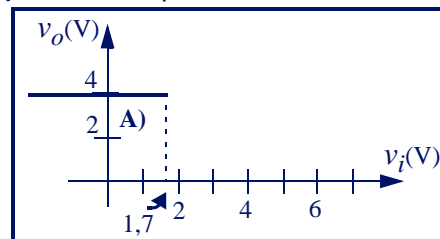


$v_o = E3$   $v_{D1} = v_i - 1V$   
 $v_{D2} = 1V - 4V = -3V$

(a):  $v_{D1} - V_\gamma = v_i - 1V - 0,7V \leq 0$

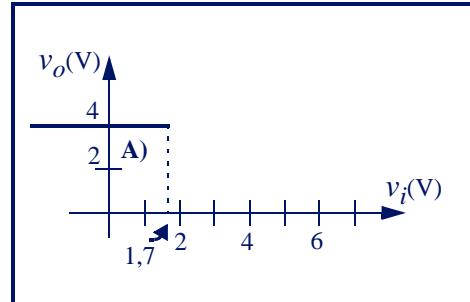
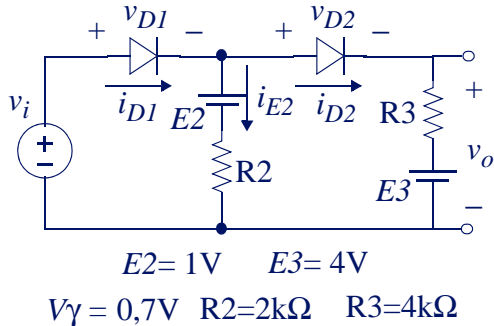
(b):  $v_{D2} - V_\gamma = -3V - 0,7V < 0$

(b) Se cumple siempre;  
 (a) Se cumple si  $v_i \leq 1,7V$   
 En ésta situación  $v_o = 4V$

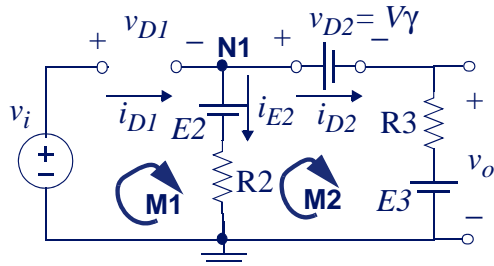


### CÁLCULO DE CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA: EJEMPLO

Ej: (Continuación)



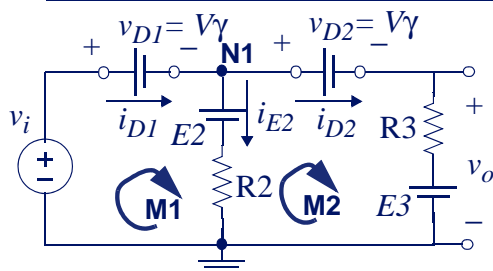
- B) D1 OFF**  $i_{D1} = 0$   $v_{D1} - V_\gamma \leq 0$  (a)  
**D2 ON**  $v_{D2} = V_\gamma$   $i_{D2} \geq 0$  (b)



$$\begin{aligned} \text{M1: } v_{D1} &= v_i - (E2 + R_2 i_{E2}) \\ \text{N1: } i_{D2} &= -i_{E2} \\ \text{M2: } V_\gamma + R_3 i_{E3} + E3 - R_2 i_{E2} - E2 &= 0 \\ V_\gamma + R_3 i_{D2} + E3 + R_2 i_{D2} - E2 &= 0 \\ i_{D2} &= \frac{E2 - E3 - V_\gamma}{R_2 + R_3} = \frac{1 - 4 - 0,7}{6k\Omega} < 0 \end{aligned}$$

Aunque se pudiera imponer una condición a  $v_i$  para cumplir (a), (b) no se cumplirá nunca, luego situación no se dará y por tanto no le corresponderá ningún tramo de la característica de transferencia.

- C) D1 ON**  $v_{D1} = V_\gamma$   $i_{D1} \geq 0$  (a)  
**D2 ON**  $v_{D2} = V_\gamma$   $i_{D2} \geq 0$  (b)



$$\begin{aligned} \text{N1: } i_{D1} - i_{D2} - i_{E2} &= 0 \\ \text{M1: } R_2 i_{E2} &= v_i - E2 - V_\gamma \\ \text{M2: } R_3 i_{D2} - R_2 i_{E2} &= E2 - E3 - V_\gamma \\ \text{M1+M2: } R_3 i_{D2} &= v_i - E3 - 2V_\gamma \\ \text{(b) } i_{D2} &= \frac{v_i - E3 - 2V_\gamma}{R_3} \geq 0 \end{aligned}$$

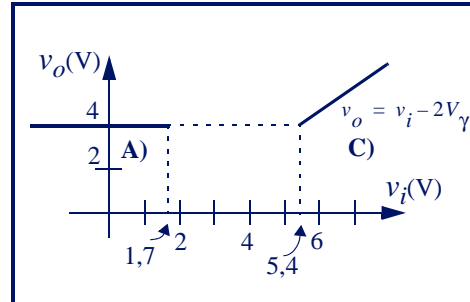
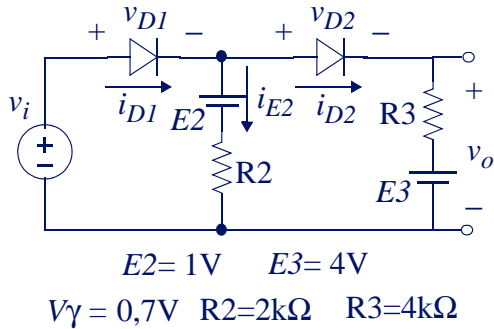
$$\text{(a) } i_{D1} = \frac{(R_2 + R_3)v_i - R_2 E3 - R_3 E2 - (2R_2 + R_3)V_\gamma}{R_2 R_3} > 0 \longrightarrow v_i \geq 2,93V$$

para que (a) y (b) se cumplan simultáneamente  $v_i \geq 5,4V$

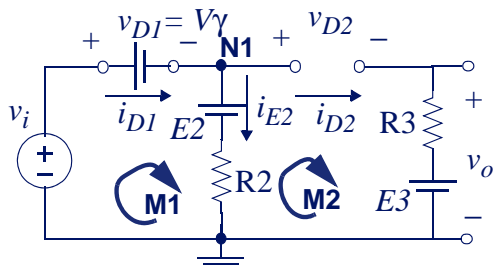
$$\text{y se tiene que } v_o = R_3 i_{D2} + E3 = v_i - 2V_\gamma$$

## CÁLCULO DE CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA: EJEMPLO

Ej: (Continuación)



**D) D1 ON**  $v_{D1} = V_\gamma \quad i_{D1} \geq 0$  (a)  
**D2 OFF**  $i_{D2} = 0 \quad v_{D2} - V_\gamma \leq 0$  (b)



**M2:**  $v_{D2} = (E2 + R_2 i_{E2}) - E3$

**N1:**  $i_{D1} = i_{E2}$

**M1:**  $V_\gamma + E2 + R_2 i_{E2} - v_i = 0$

$V_\gamma + E2 + R_2 i_{D1} - v_i = 0$

(a)  $i_{D1} = \frac{v_i - E2 - V_\gamma}{R_2} \geq 0$   
 $v_i \geq 1 + 0,7 = 1,7V$

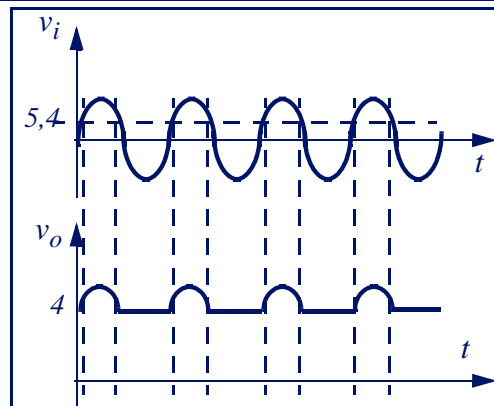
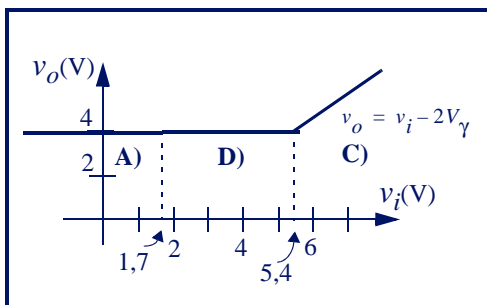
$v_{D2} = (E2 + R_2 i_{E2}) - E3 = v_i - E3 - V_\gamma \rightarrow$  (b)  $v_{D2} - V_\gamma = v_i - E3 - 2V_\gamma \leq 0$   
 $v_i \leq E3 + 2V_\gamma = 5,4V$

Tanto (a) como (b) se cumplen en el intervalo  $1,7V \leq v_i \leq 5,4V$

luego el caso D) es la situación en dicho intervalo

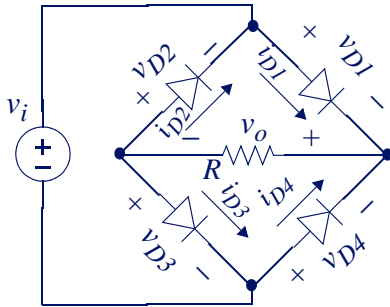
y se tiene que  $v_o = E3 = 4V$

**FIN) Así definitivamente la característica resulta:**

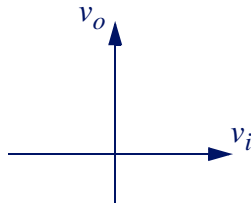


### CÁLCULO DE CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA: EJEMPLO

Ej: Determinar la característica de transferencia  $v_o-v_i$  para el circuito de la figura. Usar el modelo ideal para los diodos.



Hay que obtener la gráfica  $v_o-v_i$

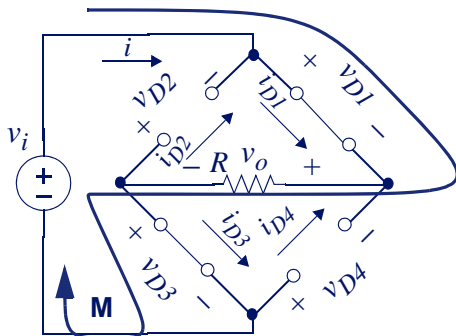


CASOS	MODELO	CONDICIONES DE VALIDEZ
A) D1 ON D2 OFF D3 ON D4 OFF	$v_{D1} = 0$ $i_{D2} = 0$ $v_{D3} = 0$ $i_{D4} = 0$	$i_{D1} \geq 0$ $v_{D2} \leq 0$ $i_{D3} \geq 0$ $v_{D4} \leq 0$
B) D1 OFF D2 ON D3 OFF D4 ON	$i_{D1} = 0$ $v_{D2} = 0$ $i_{D3} = 0$ $v_{D4} = 0$	$v_{D1} \leq 0$ $i_{D2} \geq 0$ $v_{D3} \leq 0$ $i_{D4} \geq 0$

A) D1 ON	$v_{D1} = 0$	$i_{D1} \geq 0$	(a)
D2 OFF	$i_{D2} = 0$	$v_{D2} \leq 0$	(b)
D3 ON	$v_{D3} = 0$	$i_{D3} \geq 0$	(c)
D4 OFF	$i_{D4} = 0$	$v_{D4} \leq 0$	(d)

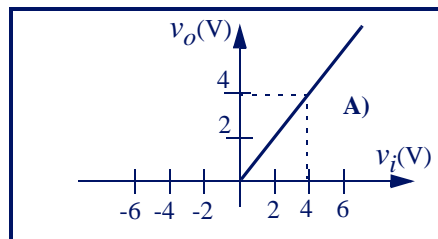
$$M: \left. \begin{aligned} i &= i_{D1} = i_{D3} \\ v_i &= v_o = Ri \end{aligned} \right\}$$

- (a):  $i_{D1} = i = \frac{v_i}{R} \geq 0 \longrightarrow v_i \geq 0$
- (b):  $v_{D2} = -v_o = -v_i \leq 0 \longrightarrow v_i \geq 0$
- (c):  $i_{D3} = i = \frac{v_i}{R} \geq 0 \longrightarrow v_i \geq 0$
- (d):  $v_{D4} = -v_o = -v_i \leq 0 \longrightarrow v_i \geq 0$



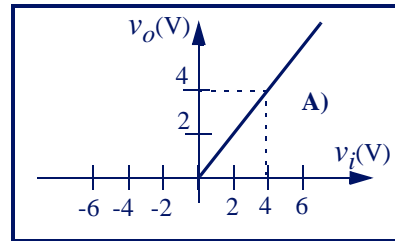
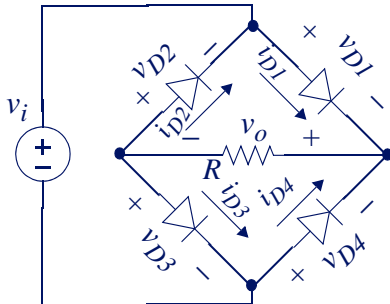
(a),(b),(c) y (d) Se cumplen si  $v_i \geq 0$

En ésta situación  $v_o = v_i$



### CÁLCULO DE CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA: EJEMPLO

Ej: Determinar la característica de transferencia  $v_o-v_i$  para el circuito de la figura. Usar el modelo ideal para los diodos. (Continuación)



B)	D1 OFF	$i_{D1} = 0$	$v_{D1} \leq 0$	(a)
	D2 ON	$v_{D2} = 0$	$i_{D2} \geq 0$	(b)
	D3 OFF	$i_{D3} = 0$	$v_{D3} \leq 0$	(c)
	D4 ON	$v_{D4} = 0$	$i_{D4} \geq 0$	(d)

$$i = -i_{D2} = -i_{D4} \left. \vphantom{i} \right\} \text{M: } v_i = -v_o = Ri$$

(a):  $v_{D1} = -v_o = v_i \leq 0 \rightarrow v_i \leq 0$

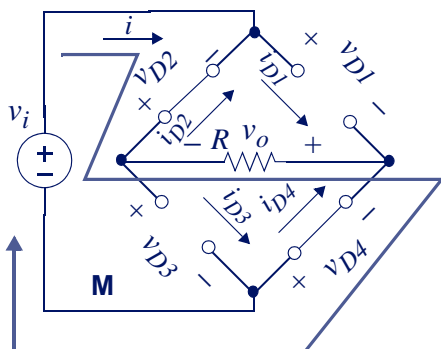
(b):  $i_{D2} = -i = \frac{v_i}{R} \geq 0 \rightarrow v_i \leq 0$

(c):  $v_{D3} = -v_o = v_i \leq 0 \rightarrow v_i \leq 0$

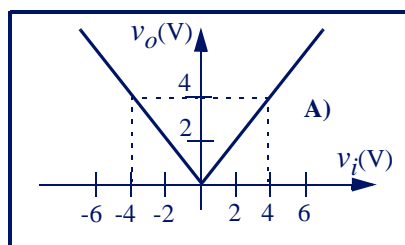
(d):  $i_{D4} = -i = \frac{v_i}{R} \geq 0 \rightarrow v_i \leq 0$

(a),(b),(c) y (d) Se cumplen si  $v_i \leq 0$

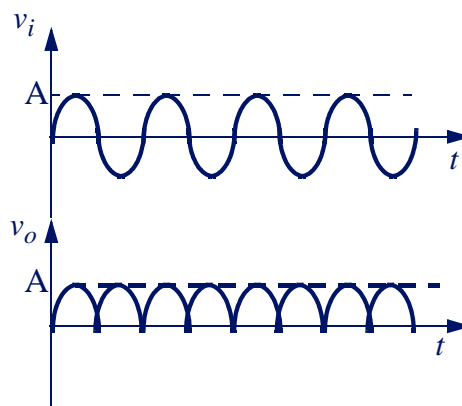
En esta situación  $v_o = -v_i$



Así definitivamente la característica resulta:



Circuito rectificador de onda completa





## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL DIODO. DIODO EN CONMUTACIÓN.

### - Respuesta del diodo a un pulso

.) Cuando el diodo conduce

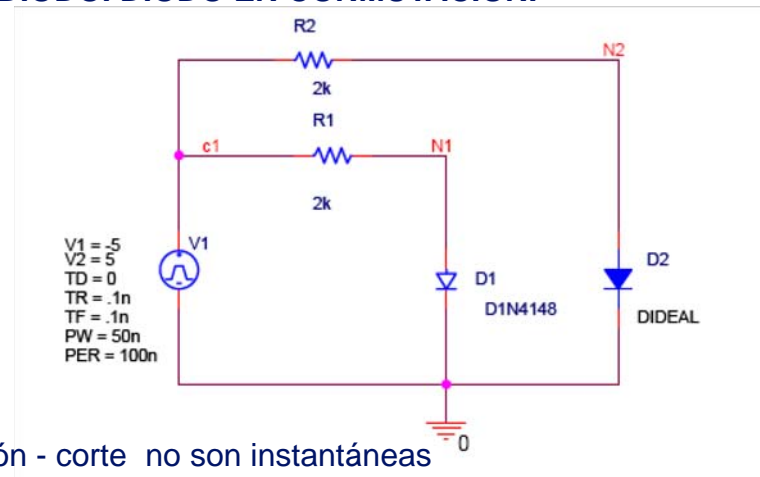
- Dideal:  $v_D = 0$        $i_D = \frac{v_i}{R} = 2.5\text{mA} \geq 0$

- Dreal:  $v_D = V_\gamma$        $i_D = \frac{v_i - V_\gamma}{R} = 2.19\text{mA} \geq 0$

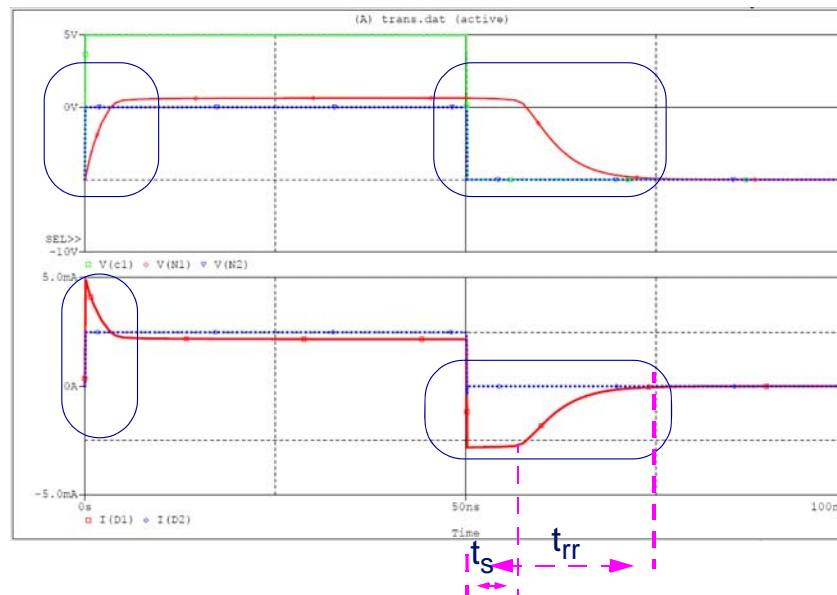
.) Cuando el diodo está en corte

- Dideal y Dreal:  $v_D = v_i$     $i_D = 0$

.) Las transiciones de corte - conducción y de conducción - corte no son instantáneas



y limitan la velocidad del circuito.



.) Transición de corte - conducción:

**Capacidad de Deplexión o Transición**

.) Transición de corte - conducción:

**Capacidad de Difusión**

- Tiempo de almacenamiento

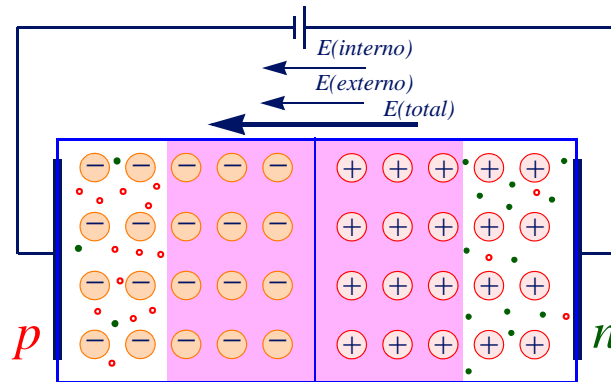
- Tiempo de recuperación

## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL DIODO.

### - Capacidad de Deplexión o Transición.

.) Consecuencia de la región de carga espacial generada en la unión p-n al ser polarizada en inversa:

**La unión p-n se comporta como un condensador controlado por tensión**



$$C_{dep} \begin{array}{c} \downarrow + \\ v_D \\ | \\ - \end{array}$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

$$C = \frac{dQ}{dV}$$

$$C_{dep}(v_D) = \frac{C_{jo}}{(1 - v_D/V_{jo})^m}$$

En la transición corte-conducción es como si este condensador,

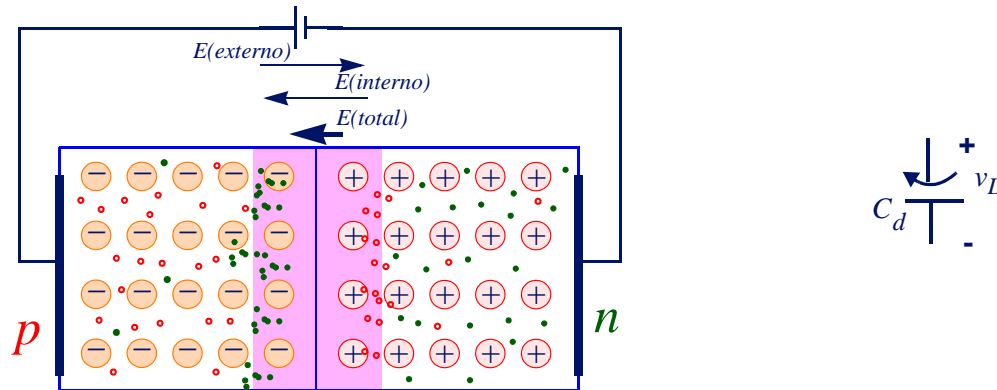
cargado a la tensión de polarización inversa,

se descargase hasta un valor de tensión próximo a la tensión umbral.

## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL DIODO.

### - Capacidad de Difusión.

- .) Consecuencia del exceso sobre el nivel de equilibrio de portadores minoritarios en las regiones próximas a la unión p-n polarizada en directo, consecuencia a su vez de la difusión desde sus regiones de origen.



En la transición conducción-corte ese exceso de portadores minoritarios ha de ser eliminado, **(tiempo de almacenamiento)**

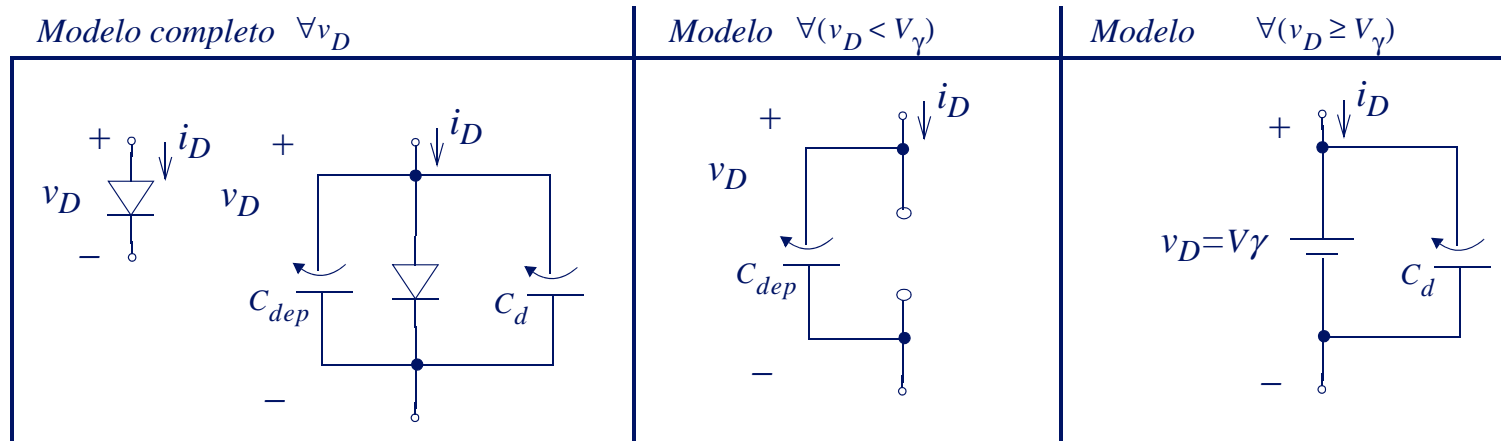
y sólo así es posible que el diodo alcance los valores de equilibrio de tensión y corriente asociados al diodo cortado **(tiempo de recuperación)**.

El efecto es equivalente a la descarga de un condensador **(capacidad de difusión)**

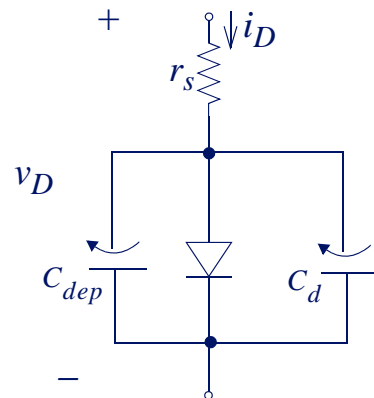
## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL DIODO.

26/37

### - Modelo dinámico para el diodo

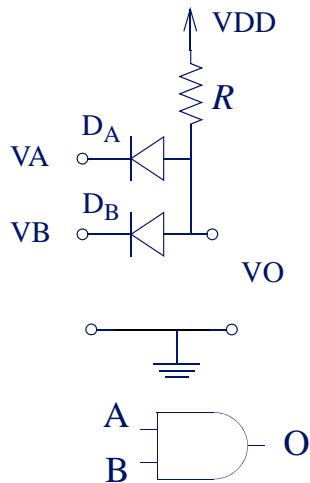


### - Modelo para SPICE



Modelo	Notación		Valor por defecto
	Modelo	SPICE	
Estático	$I_s$	IS	1,0E-14A
	$V_z$	BV	$\infty$
	$r_s$	RS	0 $\Omega$
Dinámico	$C_{j0}$	CJ0	0F-V <sup>1/2</sup>
	m	M	0,5
	$V_j$	VJ	1,0V
	$\tau_p$	TT	0s

## LÓGICA CON DIODOS



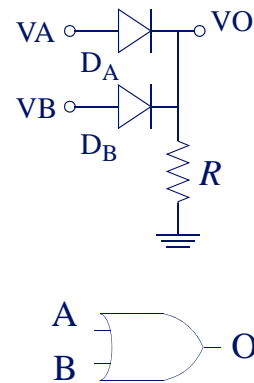
PUERTA AND

**NIVELES LÓGICOS**  
(CON DIODOS IDEALES)

VA(V)	VB(V)	VO(V)
0	0	0
0	VDD	0
VDD	0	0
VDD	VDD	VDD

TABLA DE VERDAD

A	B	O
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



PUERTA OR

**NIVELES LÓGICOS**  
(CON DIODOS IDEALES)

VA(V)	VB(V)	VO(V)
0	0	0
0	VDD	VDD
VDD	0	VDD
VDD	VDD	VDD

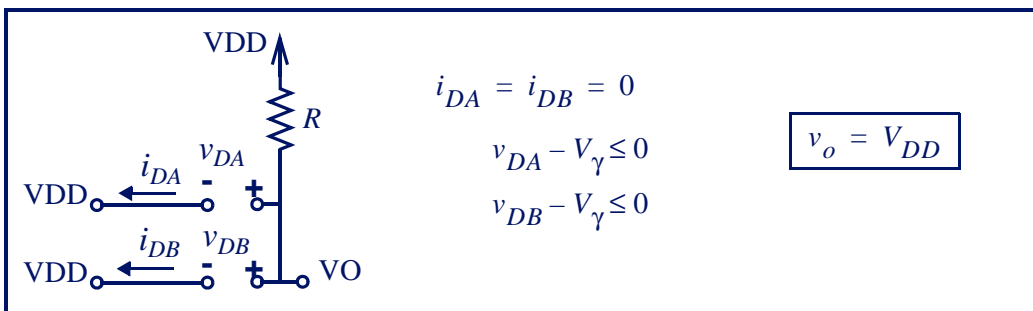
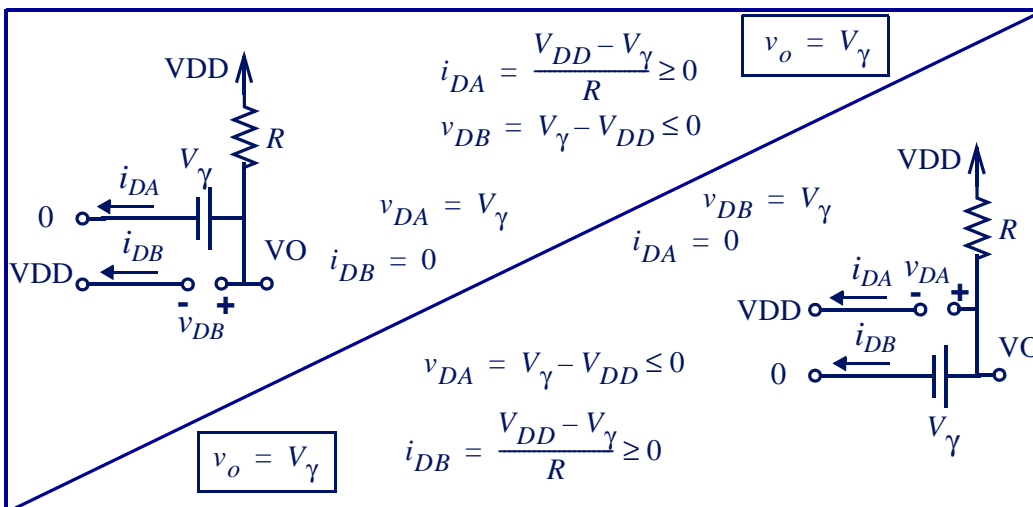
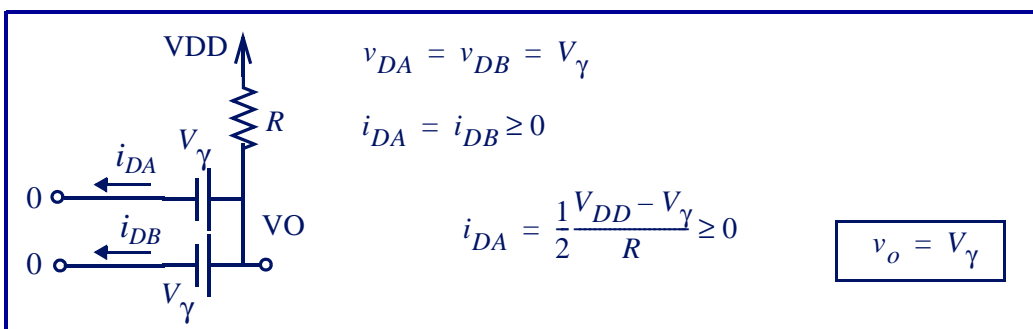
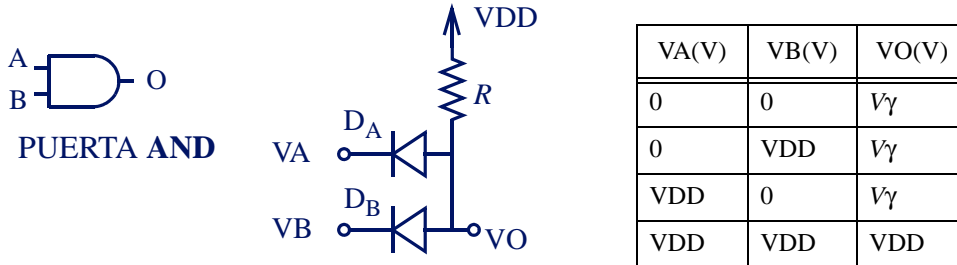
TABLA DE VERDAD

A	B	O
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

# LÓGICA CON DIODOS

28/37

## NIVELES LÓGICOS (DIODOS TENSION UMBRAL ( $V_\gamma$ ))

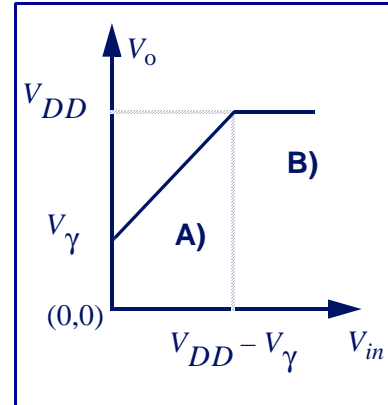
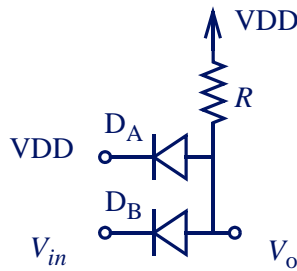
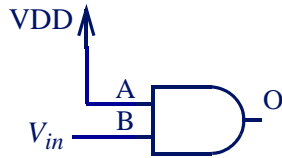


# LÓGICA CON DIODOS

29/37

## CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA (DIODOS TENSION UMBRAL ( $V_\gamma$ ))

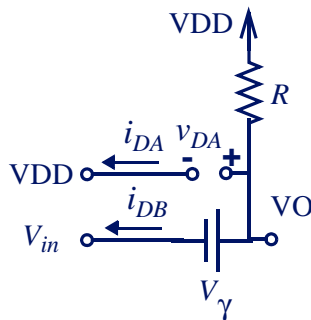
### PUERTA AND



#### A) $D_B$ ON

$$i_{DA} = 0$$

$$v_{DB} = V_\gamma$$

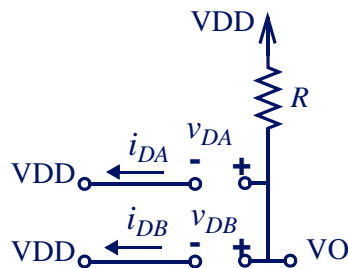


Se ha de cumplir:

$$i_{DB} = \frac{V_{DD} - (v_{in} + V_\gamma)}{R} \geq 0 \longrightarrow v_{in} \leq V_{DD} - V_\gamma \longrightarrow V_o = v_{in} + V_\gamma$$

#### B) $D_B$ OFF

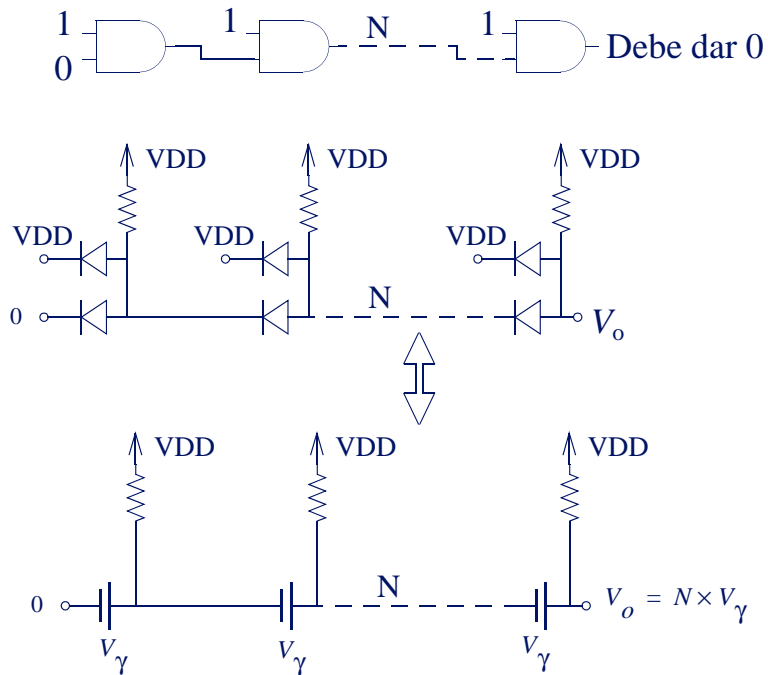
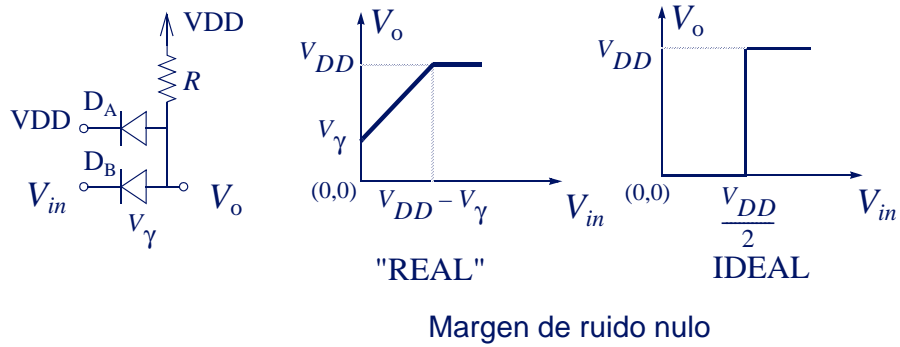
$$i_{DA} = i_{DB} = 0$$



Se ha de cumplir:

$$v_{DB} - V_\gamma = V_{DD} - v_{in} - V_\gamma \leq 0 \longrightarrow v_{in} \geq V_{DD} - V_\gamma \longrightarrow V_o = V_{DD}$$

## CALIDAD DE LA LÓGICA CON DIODOS



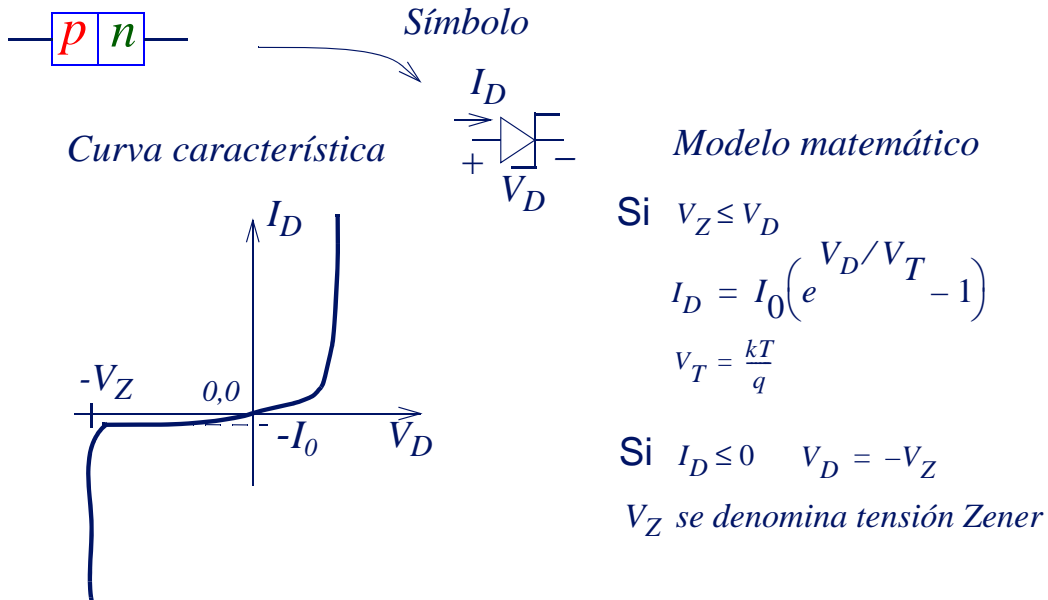
Cuanto más grande es  $N$ , más grande es la salida, en lugar de un "cero" me da un "uno" !!!

No se regeneran los niveles



## OTROS TIPOS DE DIODOS

### DIODO ZENER

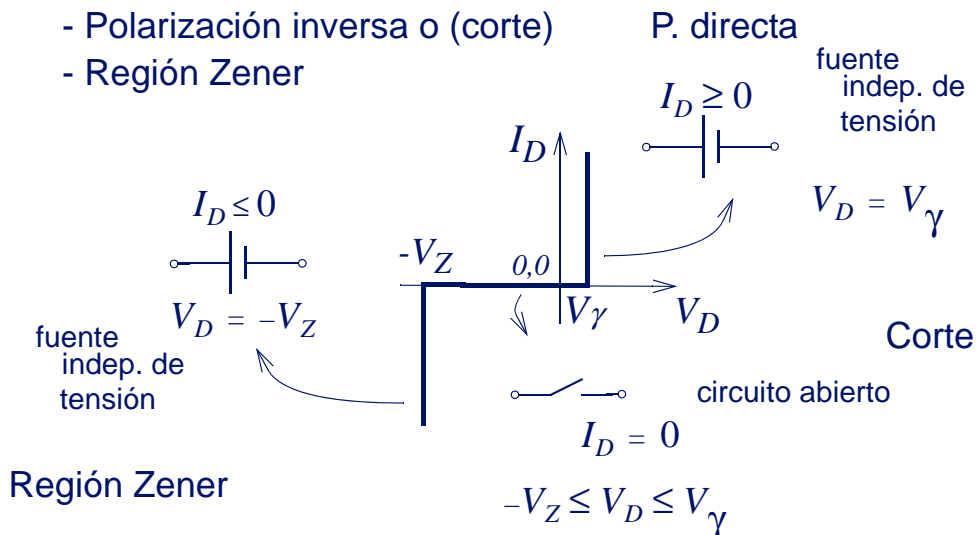


#### Modelo circuital

##### Modelo con tensión umbral

Tres modos de funcionamiento:

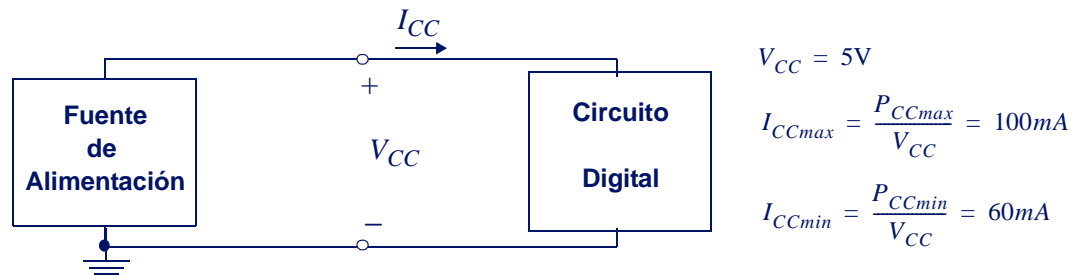
- Polarización directa
- Polarización inversa o (corte)
- Región Zener



## OTROS TIPOS DE DIODOS: ZENER COMO REGULADOR DE TENSIÓN

Ejemplo: Un circuito digital ha de ser alimentado a una tensión constante  $V_{CC} = 5V$ , y se sabe que su consumo de potencia puede variar entre  $300mW$  y  $500mW$ .

Para conseguir que  $V_{CC}$  se mantenga constante en ese intervalo de valores es necesario que la fuente de alimentación empleada sea una fuente de alimentación regulada.



Si se emplea una fuente real de tensión no regulada,  $V_{CC}$  no puede ser constante para todo el rango de valores de  $I_{CC}$ .

Siempre se cumple:  $V = E - IR_S$

- Si se diseña la fuente para  $I = I_{CCmax}$  dado que  $V = V_{CC}$  se tiene que:

$$E = V_{CC} + (I_{CCmax} \cdot R_S)$$

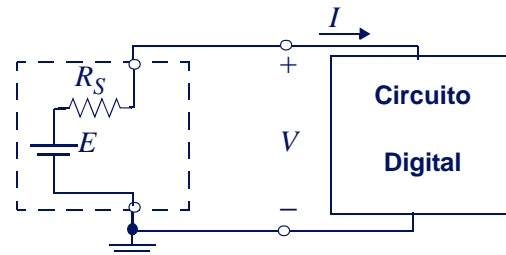
Pero entonces cuando  $I = I_{CCmin}$

se tendrá que  $V = E - I_{CCmin}R_S = V_{CC} + ((I_{CCmax} - I_{CCmin}) \cdot R_S) > V_{CC}$

- Si se diseña para  $I = I_{CCmin}$  dado que  $V = V_{CC}$  se tiene:  $E = V_{CC} + (I_{CCmin} \cdot R_S)$

Pero entonces cuando  $I = I_{CCmax}$

se tendrá que  $V = E - I_{CCmax}R_S = V_{CC} - ((I_{CCmax} - I_{CCmin}) \cdot R_S) < V_{CC}$



Mediante un diodo Zener es posible diseñar una fuente real de tensión regulada, esto es, que proporcione  $V_{CC}$  constante para todo el rango de valores de  $I_{CC}$ .

Si se escoge el diodo Zener tal que  $V_Z = V_{CC}$

Siempre se cumple:  $I_E = I_D - I$

Mientras el diodo trabaje en región Zener

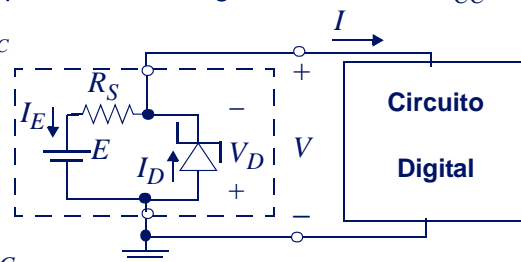
$$V = -V_D = V_Z = V_{CC}; \quad I_D \leq 0; \quad I_E = \frac{V_Z - E}{R_S}$$

- Si se diseña la fuente para una  $I_E = -I_{CCmax}$

ésto es  $I_D = 0$ , se tiene:  $E = R_S I_{CCmax} + V_Z$ ;  $V = -V_D = V_Z = V_{CC}$  e  $I = -I_E = I_{CCmax}$

Además, ahora cuando  $I = I_{CCmin}$  el diodo sigue en la región Zener  $V = V_Z = V_{CC}$

$$I_D = I_E + I_{CCmin} = \frac{V_Z - E}{R_S} + I_{CCmin} = \frac{V_Z - (R_S I_{CCmax} + V_Z)}{R_S} + I_{CCmin} = I_{CCmin} - I_{CCmax} < 0$$



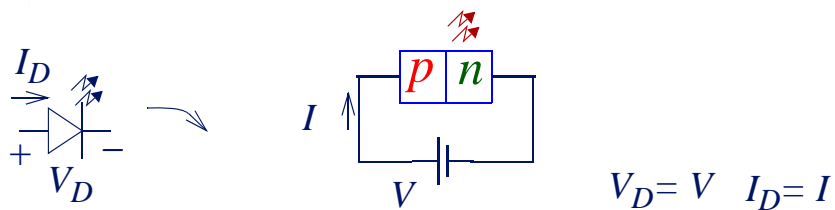
## OTROS TIPOS DE DIODOS

### DIODO EMISOR DE LUZ (LED)



#### Pincipales Características

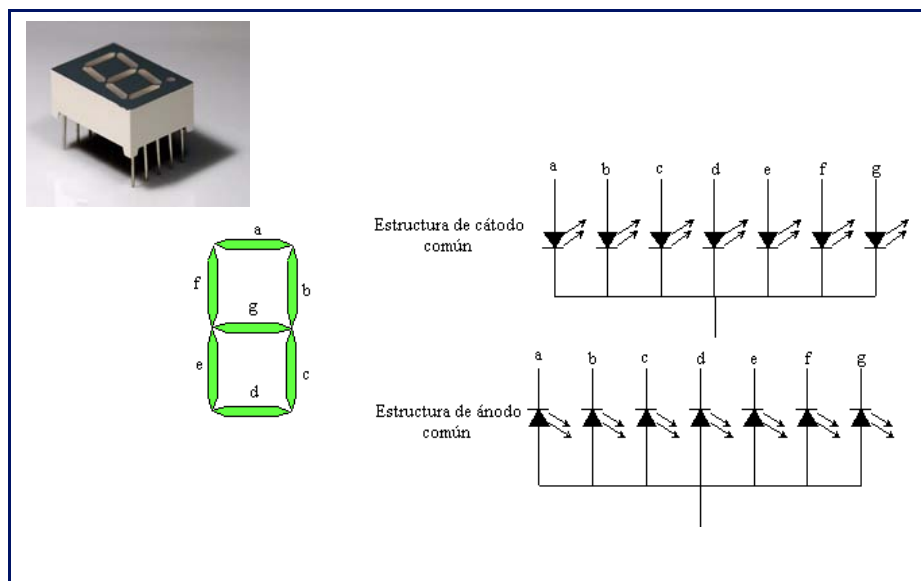
- Emite luz cuando se polariza en directo
- Polarizado en inverso se comporta como diodo normal
- Tensión Umbral algo superior a diodo normal



#### Pincipales Aplicaciones

- Indicadores de estado
- Dispositivos de señalización y paneles informativos
- Alumbrado de pantallas de cristal líquido de teléfonos móviles, calculadoras, agendas electrónicas, etc.

#### Display de 7 Segmentos



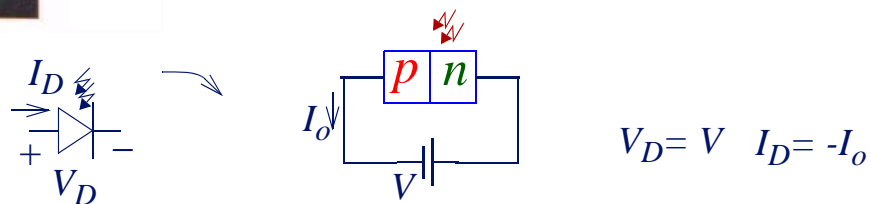
## OTROS TIPOS DE DIODOS

### FOTODIODO



#### Pincipales Características

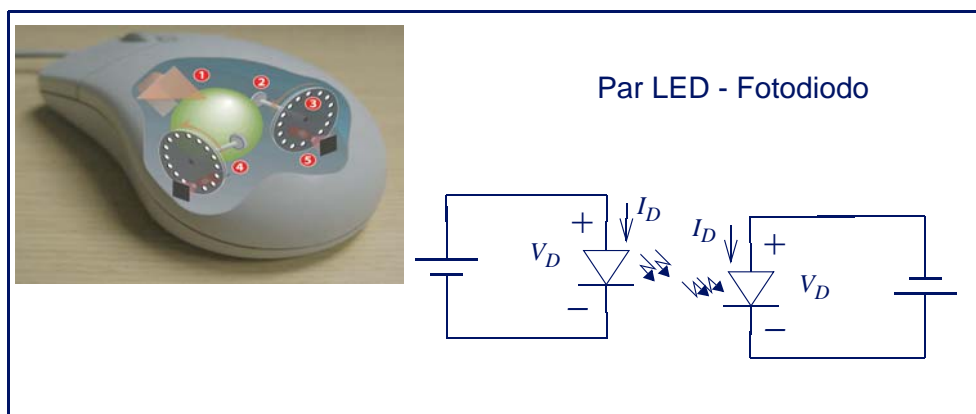
- Polarizado en inverso, al iluminar la union aumenta la corriente inversa de saturación en proporción a la luz incidente.



#### Pincipales Aplicaciones

- Sensores y Fotodetectores.
- Fotómetros. Control de Iluminación y brillo
- Medidores de distancias, espesores, transparencia, posición.
- Monitorización de gas y petroleo, sustancias químicas.
- Enfoque automático y control de exposición
- Lector de tarjetas y códigos de barras.
- Sensores de presencia
- Comunicaciones ópticas.

Sensores detectores de posición en un ratón mecánico-óptico

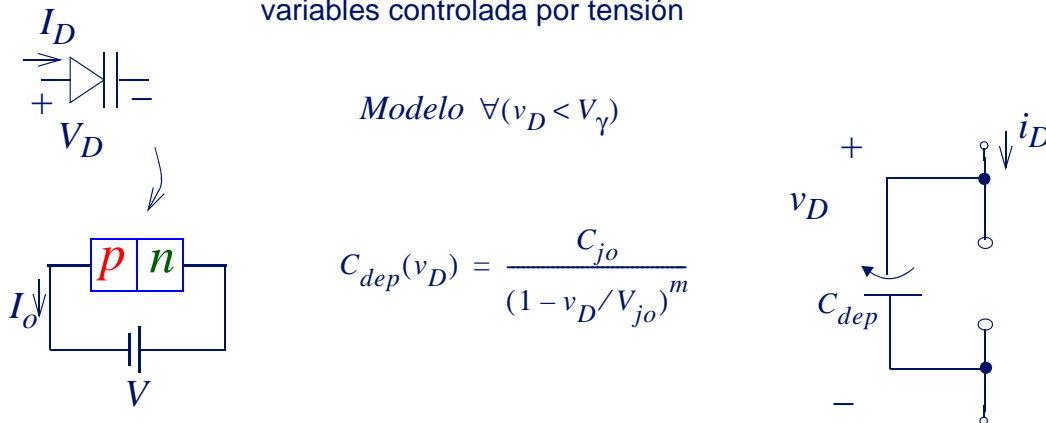


## OTROS TIPOS DE DIODOS

### DIODO VARACTOR o VARICAPS

#### Principales Características

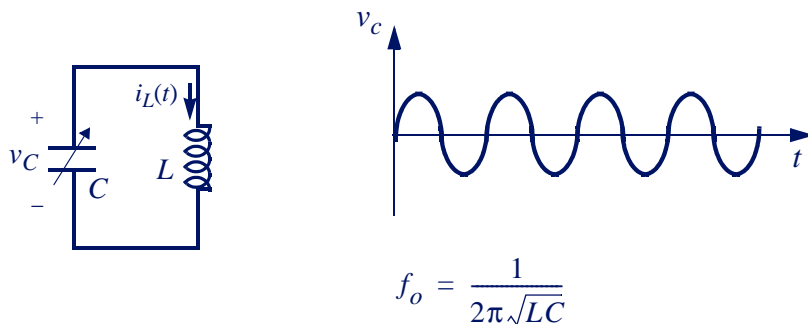
- Aprovecha la Capacidad de Deplexión en polarización inversa de la unión pn para obtener un condensador de capacidad variables controlada por tensión



- Los valores típicos están entre 10 y 100pF para tensiones de polarización inversa del orden de 3 a 25V.

#### Principales Aplicaciones

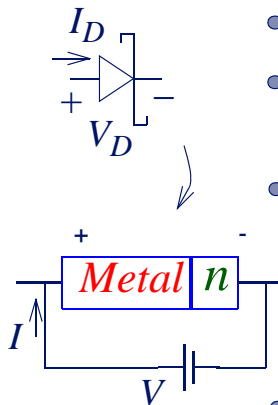
- Circuitos de sintonización:  
Sintonizador electrónico de frecuencia de resonancia.



## OTROS TIPOS DE DIODOS

### DIODO SCHOTTKY

#### Principales Características



- Unión rectificadora metal - semiconductor: diodo de barrera.
- Semiconductor debilmente dopado  
(en caso contrario la unión es de tipo óhmico, no rectificadora)
- En polarización inversa:
  - ▬ El potencial de contacto impide el paso de una cantidad elevada de electrones desde el metal al semiconductor.
- En polarización directa:
  - ▬ Se favorece la corriente de electrones desde la zona n al metal, donde en ambos son portadores mayoritarios al disminuir el potencial de contacto.
  - ▬ No hay difusión de portadores minoritarios como en la unión pn.
- Se consigue una tensión umbral inferior a la del diodo de unión pn, del orden de 0,2 a 0,4V dependiendo del metal utilizado.

#### Principales Aplicaciones

- Aplicaciones de alta frecuencia,  
gracias a su reducidos tiempos de conmutación y bajo nivel de ruido.
- Fuentes de alimentación de baja tensión y alta corriente
- Convertidores ac/dc de alta velocidad de funcionamiento.
- Puertas lógicas TTL de alta velocidad de conmutación. TTL Schottky.

## Reconocimientos

- La foto "Diodos\_LED", en pag. 33 es una obra de Saperaud bajo licencia CC BY-SA 3.0 Unported. Fuente: Wikimedia Commons
- La foto "Seven\_segment\_01\_Pengo", en pag. 33 es una obra de Peter Halasz bajo licencia CC BY-SA 2.5 Generic. Fuente: Wikimedia Commons
- La foto "fotodiodos", en pag. 34 es una obra de Ulfbastel bajo licencia CC BY-SA 3.0 Unported. Fuente: Wikimedia Commons
- La imagen "Mouse mechanism cutaway", en pag. 34 es una obra de Jeremykemp. El dueño de los derechos autoriza su utilización sin restricciones. Fuente: Wikimedia Commons