

Tema 3. Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Material de apoyo para el grupo 14.2 de INEL

Rebeca Herrero

rebeca.herrero@ies-def.upm.es

IES-ETSIT, UPM, Curso 2013-2014

Tema 3. Diodos de unión

OBJETIVOS

- Conocer la construcción, funcionamiento y principales aplicaciones del diodo de unión p-n, así como los principales modelos que se usan para aproximar su comportamiento
- Distinguir entre los modos de funcionamiento en estática y dinámica, así como entre gran señal y pequeña señal
- Analizar aplicaciones sencillas que utilizan circuitos con diodos, fuentes independientes y resistencias, seleccionando para ello el modelo adecuado y haciendo uso del método analítico (planteamiento de hipótesis, resolución y verificación de hipótesis)
- Conocer los diferentes tipos de diodos según sus funciones

Introducción a la Electrónica

Tema 3: Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Objetivos

- Presentar el funcionamiento no lineal del diodo, enunciando algunas de sus aplicaciones
- Veremos la clasificación del régimen de funcionamiento del diodo
- Deducir, a partir de la física de semiconductores, el comportamiento de una unión p-n en polarización directa e inversa

Bibliografía

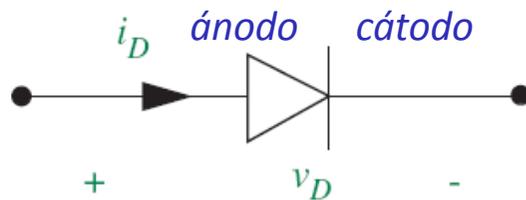
- Sedra, apto. 3.1 y 3.7 Sedra (5ª edición)

Diodos

INTRODUCCIÓN

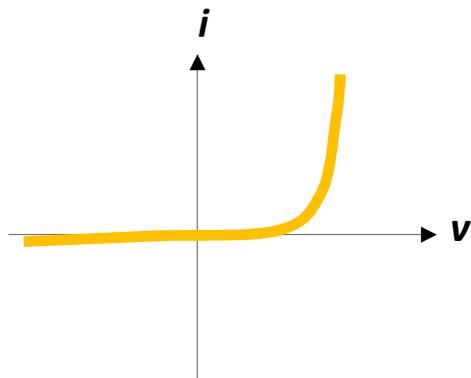
Diodo: dispositivo de comportamiento no lineal:

deja pasar corriente en un sentido y la bloquea en sentido contrario



$$i_D = I_S \left(e^{v_D(t)/V_T} - 1 \right) + C_D(v_D) \frac{dv_D}{dt}$$

- $I_S = I_S(T)$, corriente inversa de saturación
 $10^{-12} - 10^{-15} \text{ A (Si)}$
- $V_T = kT/e$, voltaje térmico, $25 \text{ mV } (T_0=290^\circ\text{K})$
- Componente pasivo no lineal
- Dependencia explícita de d/dt :



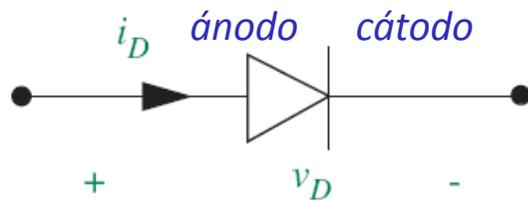
$$\text{Si } \left| C(v) \frac{dv}{dt} \right| \ll |A(e^{Bv} - 1)| \rightarrow i \cong A(e^{Bv} - 1)$$

Diodos

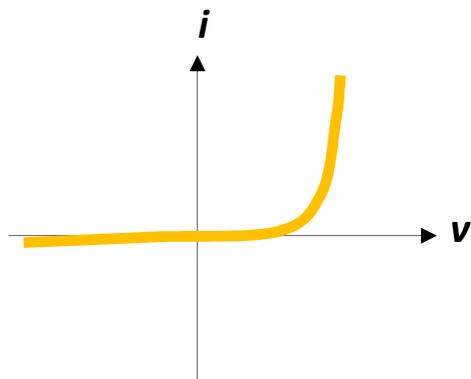
INTRODUCCIÓN

Diodo: dispositivo de comportamiento no lineal:

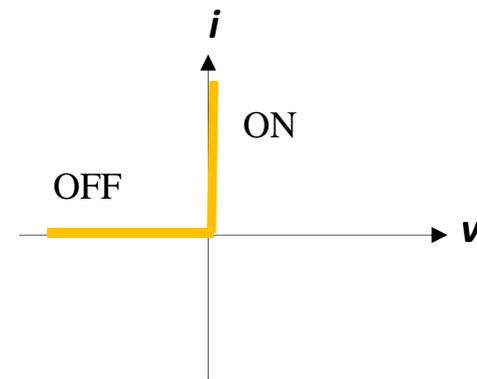
deja pasar corriente en un sentido y la bloquea en sentido contrario



$$i_D = I_S \left(e^{v_D(t)/V_T} - 1 \right) + C_D(v_D) \frac{dv_D}{dt}$$



aproximación



¡Similar a un interruptor!

Diodos

INTRODUCCIÓN

El **régimen de funcionamiento** del diodo se clasifica según **dos criterios**:

| | | |
|-----------|---|----------------------------------|
| 1. | importancia de los fenómenos capacitivos | Situación cuasi-estática* |
| | | Situación dinámica |
| 2. | tensión y corriente del dispositivo | Pequeña señal |
| | | Gran señal |

*Caso particular: Estática

Diodos

INTRODUCCIÓN

1. importancia de los fenómenos capacitivos

Situación **cuasi-estática**

$$\left| C_D(v_D(t)) \frac{dv_D(t)}{dt} \right| \ll |I_S(e^{v_D(t)/V_T} - 1)| \rightarrow i_D \approx I_S(e^{v_D(t)/V_T} - 1)$$

Caso particular: **DC (estática)**:

$$v_D(t) = V_D, \quad i_D(t) = I_D, \quad \frac{dv_D(t)}{dt} = 0$$

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_T} - 1)$$

Ecuación de Shockley

Diodos

INTRODUCCIÓN

1. importancia de los fenómenos capacitivos

Situación **dinámica**

$$C_D(v_D(t)) \frac{dv_D(t)}{dt} \sim I_S (e^{v_D(t)/V_T} - 1)$$

- Se mantienen las dependencias temporales
- Efectos capacitivos no despreciables

Diodos

INTRODUCCIÓN

2. tensión y corriente del dispositivo

Pequeña señal

Se verifica que $i_d(t)$ y $v_d(t)$ son pequeños.

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Se puede [aproximar](#) el diodo por un [dispositivo lineal](#)

Diodos

INTRODUCCIÓN

2. tensión y corriente del dispositivo

Gran señal

$i_d(t)$ y $v_d(t)$ no son pequeños.

No se puede aproximar el diodo por un dispositivo lineal

Diodos

INTRODUCCIÓN

El diodo puede funcionar en:



Diodos

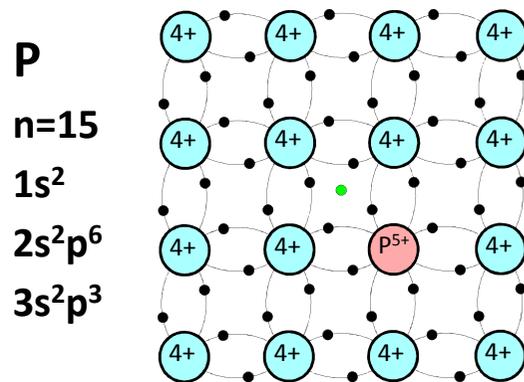
INTRODUCCIÓN

¿Cómo se fabrican los diodos?

A partir de la unión de **semiconductores** con distinto tipo de portadores de carga:

tipo *n*

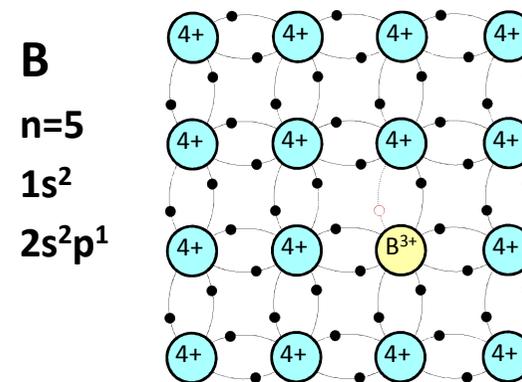
En Si, impurezas grupo V
(P, As, Sb, ...)



Concentración de
impurezas donantes: N_D

tipo *p*

En Si, impurezas grupo III
(B, Al, Ga, ...)



Concentración de
impurezas aceptoras: N_A

$$n + N_A = N_D + p$$

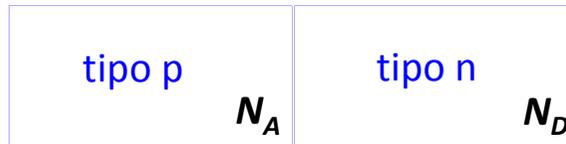
ECUACIÓN DE NEUTRALIDAD DE CARGA

Diodos

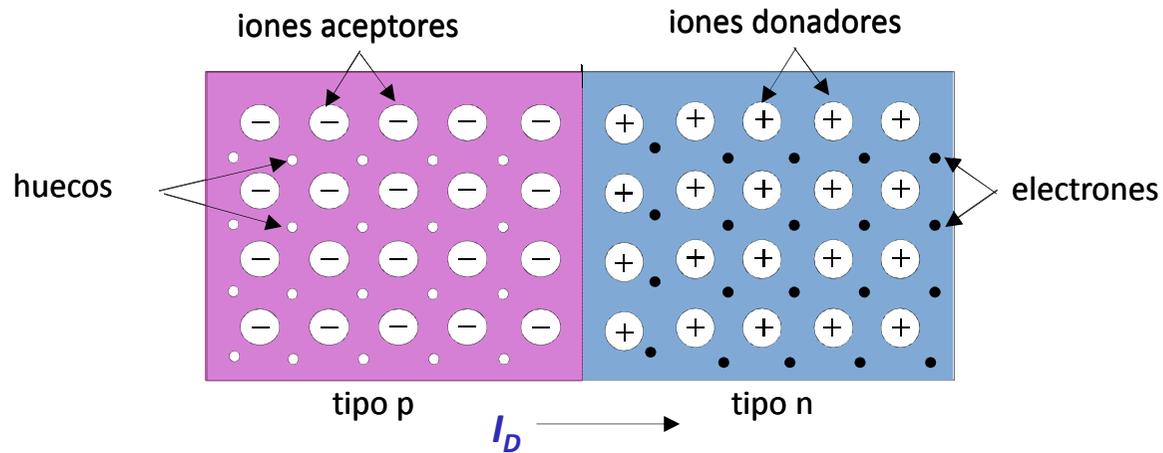
INTRODUCCIÓN

¿Cómo se fabrican los diodos?

A partir de la unión de semiconductores con distinto tipo de portadores de carga:



✓ Difusión de mayoritarios I_D

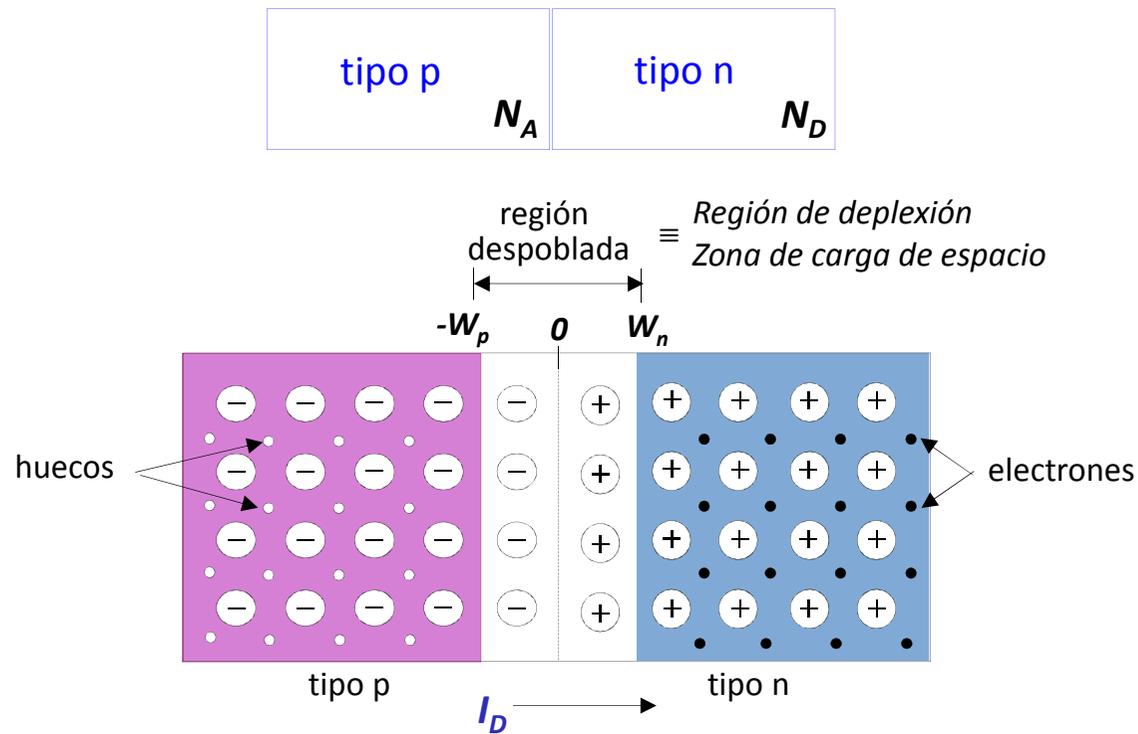


Diodos

INTRODUCCIÓN

¿Cómo se fabrican los diodos?

A partir de la unión de semiconductores con distinto tipo de portadores de carga:



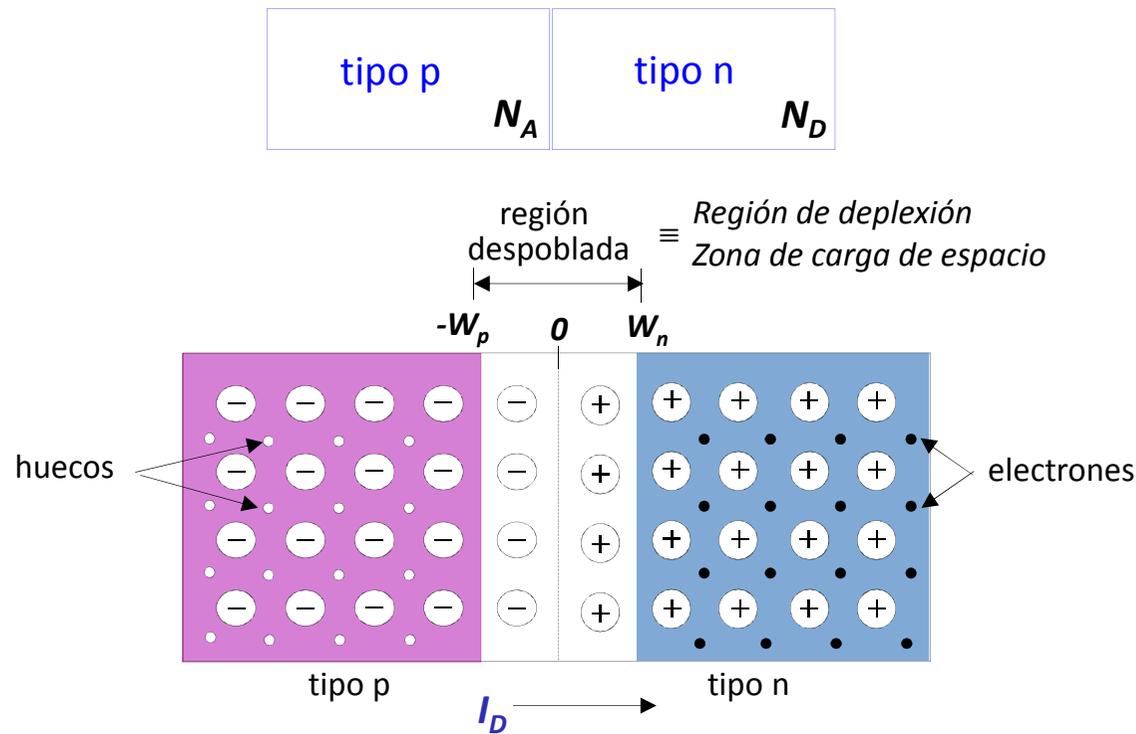
- ✓ Difusión de mayoritarios I_D
- ✓ Región despoblada de electrones libres y huecos

Diodos

INTRODUCCIÓN

¿Cómo se fabrican los diodos?

A partir de la unión de semiconductores con distinto tipo de portadores de carga:



- ✓ Difusión de mayoritarios I_D
- ✓ Región despoblada de electrones libres y huecos

Dipolo de cargas fijas por las impurezas ionizadas:

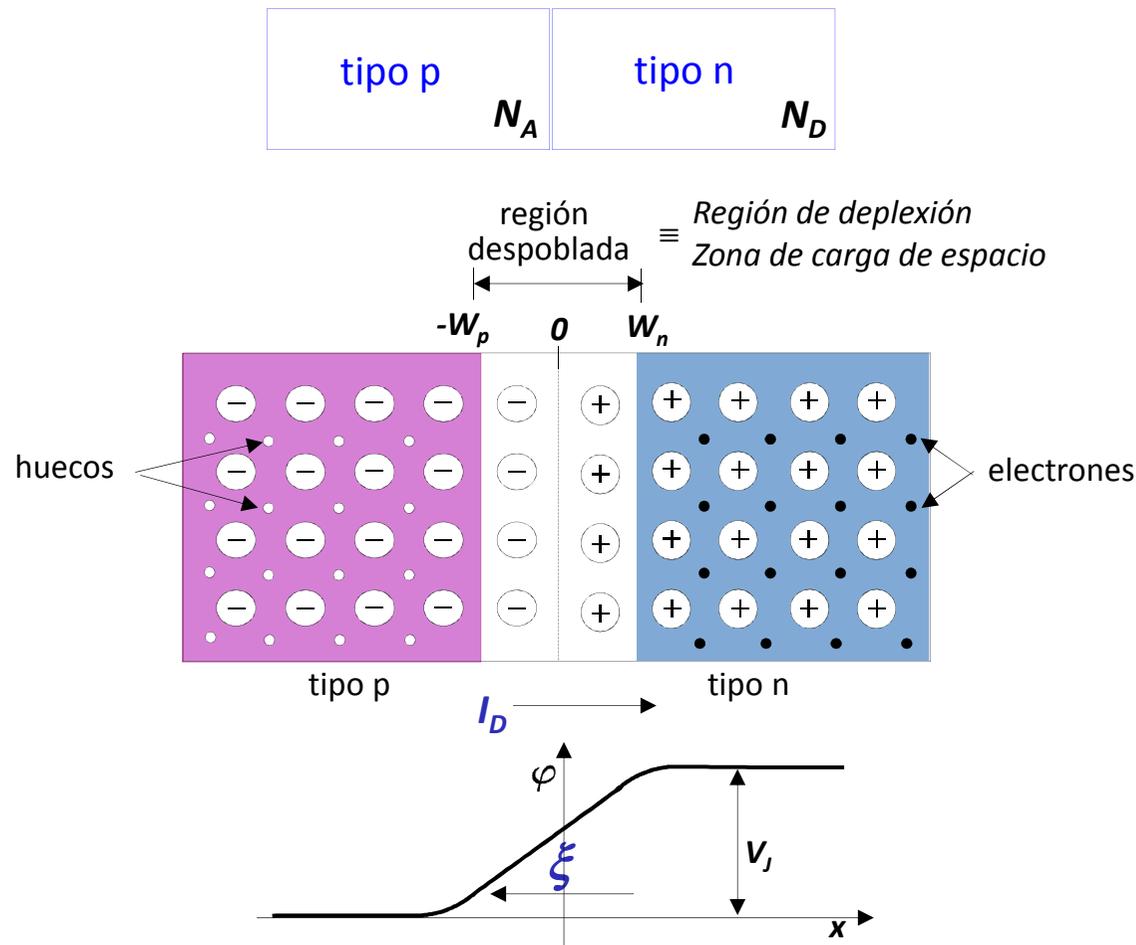
ZONA DE CARGA ESPACIAL

Diodos

INTRODUCCIÓN

¿Cómo se fabrican los diodos?

A partir de la unión de semiconductores con distinto tipo de portadores de carga:



- ✓ Difusión de mayoritarios I_D
- ✓ Región despoblada de electrones libres y huecos

Dipolo de cargas fijas por las impurezas ionizadas:

ZONA DE CARGA ESPACIAL

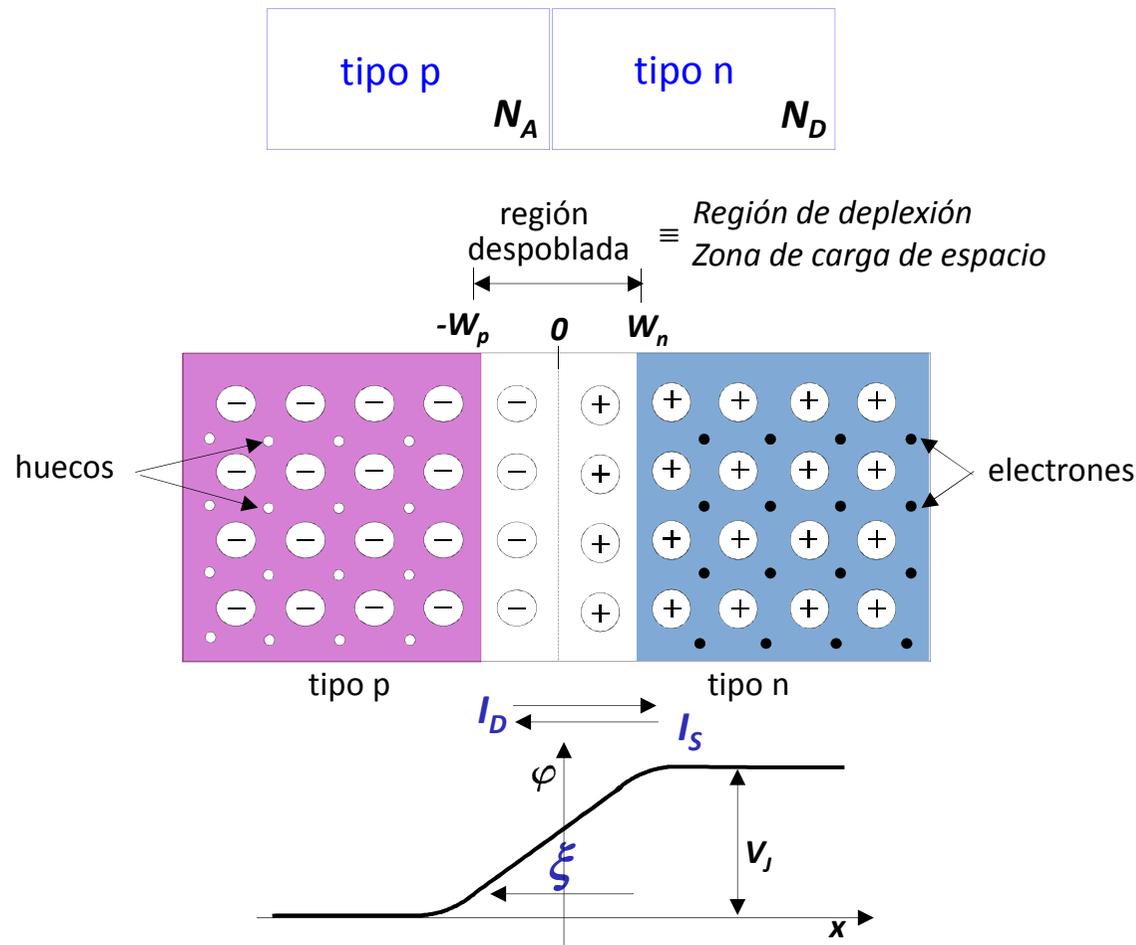
- ✓ El dipolo produce campo eléctrico ξ
- ✓ Barrera de potencial V_j que se opone a la difusión de portadores

Diodos

INTRODUCCIÓN

¿Cómo se fabrican los diodos?

A partir de la unión de semiconductores con distinto tipo de portadores de carga:



✓ **Difusión de mayoritarios I_D**

✓ **Región despoblada de electrones libres y huecos**

Dipolo de cargas fijas por las impurezas ionizadas:

ZONA DE CARGA ESPACIAL

✓ **El dipolo produce campo eléctrico ξ**

✓ **Barrera de potencial V_j que se opone a la difusión de portadores**

✓ **Arrastre de minoritarios I_S**

Diodos

INTRODUCCIÓN

¿Cómo funcionan los diodos?

El **campo eléctrico interno** y la **barrera de potencial asociada** son el **fundamento**.

La **corriente de difusión** I_D es fuertemente dependiente de la **barrera de potencial**

La **corriente de arrastre** I_S es fuertemente dependiente de la **temperatura**

Como varían estas corrientes con el voltaje del dispositivo se verá en el siguiente apartado:

Diodo en estática

$$V_{J0} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Voltaje de barrera

N_i = concentración intrínseca

$\epsilon\epsilon_0$ = permitividad relativa

$$w_{dep} = w_p + w_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_{J0}}$$

Anchura de ZCE

Introducción a la Electrónica

Tema 3: Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Objetivos

- Introducir las propiedades eléctricas del diodo a través del modelo ideal
- Caracterizar el comportamiento del diodo en sus tres regiones de funcionamiento mediante la ecuación de Shockley y su característica en la zona de ruptura
- Conocer los principales efectos de la temperatura en la característica de un diodo

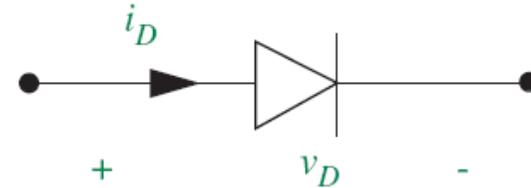
Bibliografía

- Sedra, apto. 3.2 y 3.7 (5ª Edición)

Diodos en estática

1.

importancia de los
fenómenos capacitivos



Situación **cuasi-estática**

$$\left| C_D(v_D(t)) \frac{dv_D(t)}{dt} \right| \ll |I_S(e^{v_D(t)/V_T} - 1)| \rightarrow i_D \approx I_S(e^{v_D(t)/V_T} - 1)$$

Caso particular: **DC (estática)**:

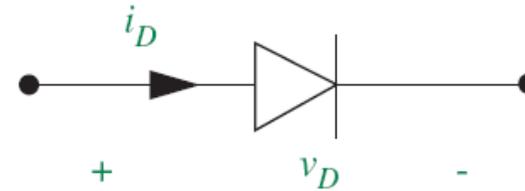
$$v_D(t) = V_D, \quad i_D(t) = I_D, \quad \frac{dv_D(t)}{dt} = 0$$

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_T} - 1) \quad \text{Ecuación de Shockley}$$

Diodos en estática

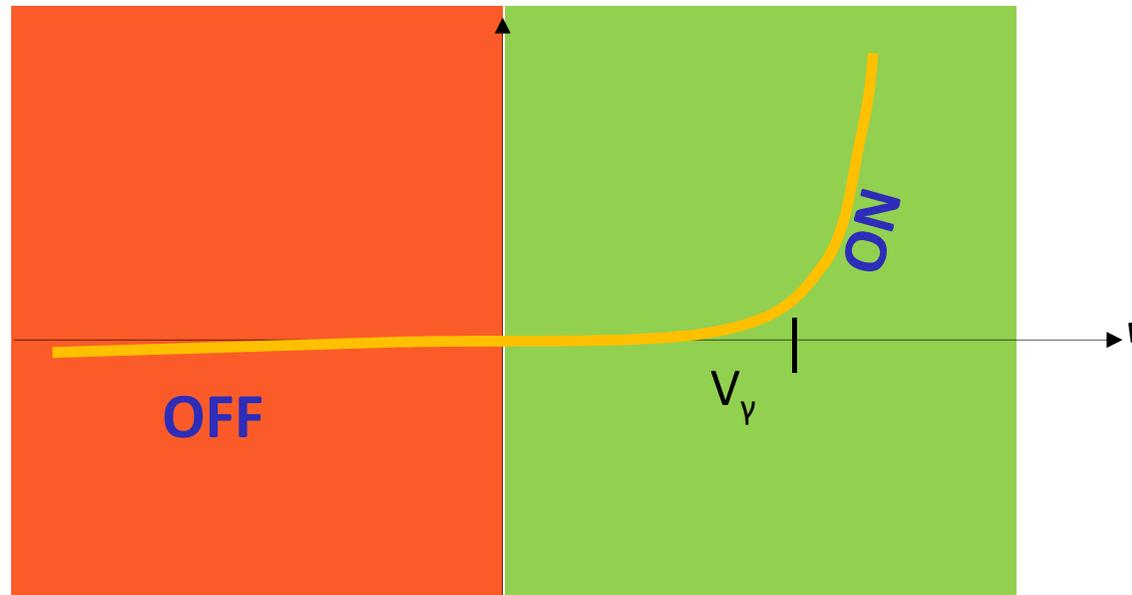
Ecuación de Shockley

$$I_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$



$v_D \leq 0$, Polarización inversa

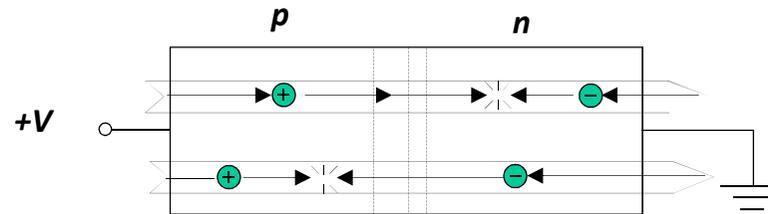
$v_D \geq 0$, Polarización directa



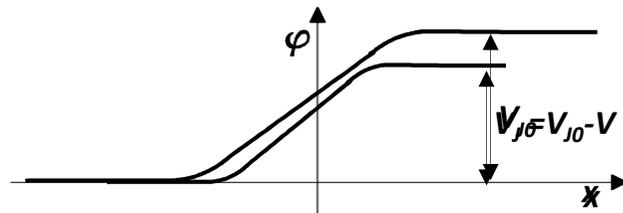
Estados del diodo: $\left\{ \begin{array}{l} \text{ON (conducción): } v_D > V_\gamma \\ \text{OFF (corte): } v_D < V_\gamma \end{array} \right.$

Diodos en estática

Polarización directa



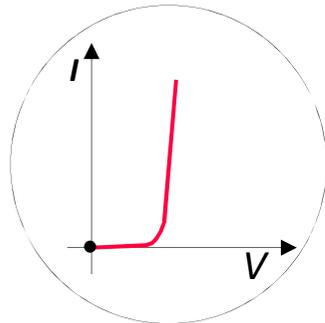
Toda la tensión aplicada se invierte en disminuir la barrera de tensión en la unión



Disminución de la barrera \Rightarrow Huecos de la zona p se inyectan en la zona n y electrones de la zona n en la zona p \Rightarrow INYECCIÓN DE MAYORITARIOS

$$w_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{J0} - V)} \downarrow$$

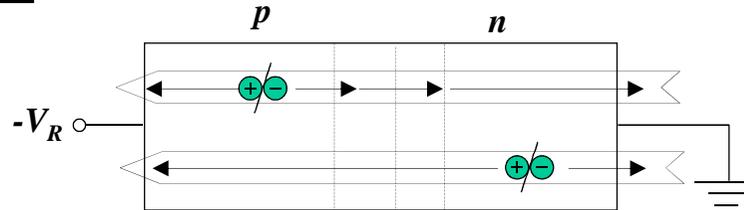
Esta inyección de portadores **disminuye la anchura de la zona de deplexión**



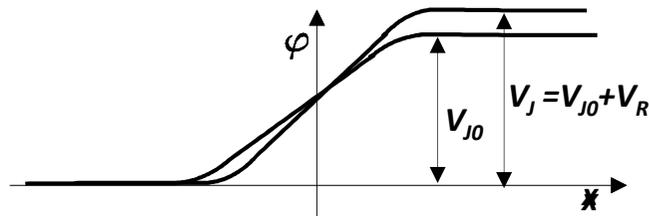
Difunden ahora como minoritarios, recombinándose a medida que avanzan \Rightarrow Predomina corriente de difusión ($I_D > I_S$), fuertemente dependiente del voltaje

Diodos en estática

Polarización inversa



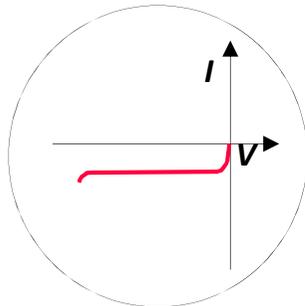
Toda la tensión aplicada se invierte en aumentar la barrera de tensión en la unión



$$w_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{J0} + V_R)} \uparrow$$

Aumento de la barrera \Rightarrow Electrones de la zona p se inyectan en la zona n y huecos de la zona n en la zona p \Rightarrow INYECCIÓN DE MINORITARIOS

Esta inyección de portadores deja más iones descubiertos, aumentando la anchura de la zona de deplexión

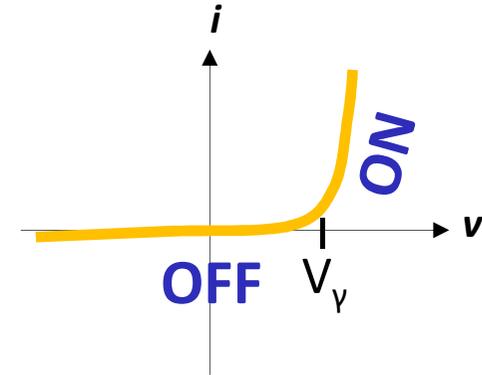


Predomina corriente de arrastre ($I_S > I_D$) \Rightarrow Al inyectar portadores de los que hay pocos en sus zonas de origen, corrientes muy débiles

Diodos en estática

Dependencia de la ecuación de Shockley con la temperatura:

$$i_D = I_S(T) \left(e^{v_D/V_T(T)} - 1 \right)$$



A través de dos parámetros:

Estados del diodo: $\left\{ \begin{array}{l} \text{ON (conducción): } v_D > V_\gamma \\ \text{OFF (corte): } v_D < V_\gamma \end{array} \right.$

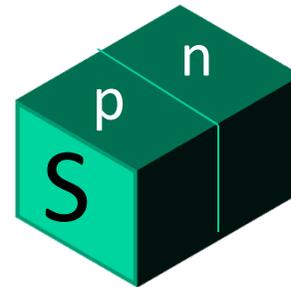
1. $I_S(T) = B \times S \times n_i^2(T)$

B = constante

S = sección del dispositivo

$n_i(T)$ = concentración intrínseca

2. $V_T = \frac{kT}{e}$



afecta al valor de la tensión de codo V_γ

Diodos en estática

Dependencia de la ecuación de Shockley con la temperatura:

Tensión de codo:

$$V_V(\text{Si}) = 0,5-0,7 \text{ V}$$

$$V_V(\text{GaAs}) = 1,2 \text{ V}$$

$$V_V(\text{Ge}) = 0,3 \text{ V}$$

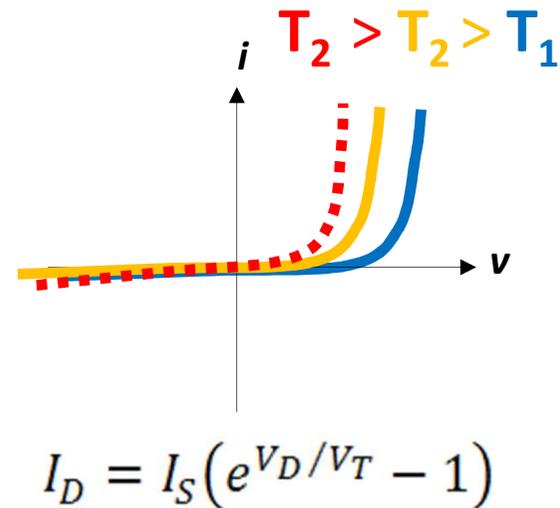
Dependencia de la ecuación de Shockley con la temperatura:

- $I_S(T)$: aumenta al aumentar T
- $V_V(T)$: disminuye al aumentar T

Aunque la variación de v , a corriente constante, con la temperatura no es uniforme, se suele tomar:

$$\frac{\Delta v}{\Delta T} = -K$$

En silicio, $K \approx 2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$



Diodos en estática

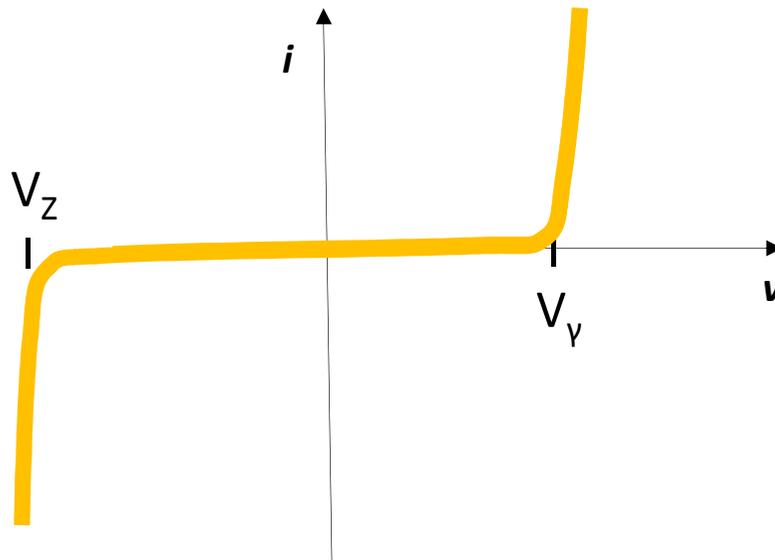
Modificaciones de la ecuación de Shockley:

- a) **Factor de idealidad** n distinto de 1

$$i_D = I_S(T) \left(e^{v_D / n V_T(T)} - 1 \right)$$

$n = n(T, V)$, aunque en la práctica es cte, típicamente entre 1 y 2.

- b) **Disrupción** de la unión para polarización inversa elevada ($V < -V_Z$):



La corriente inversa **crece rápidamente** para incrementos de tensión muy pequeños

Se distinguen **dos** mecanismos de ruptura: **Zener** y **avalancha**

Diodos en estática

Modificaciones de la ecuación de Shockley:

- a) **Factor de idealidad** n distinto de 1

$$i_D = I_S(T) \left(e^{v_D / n V_T(T)} - 1 \right)$$

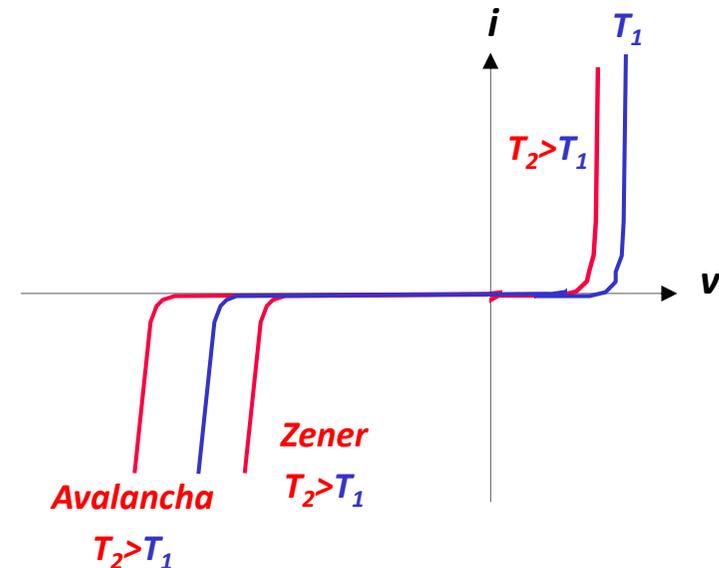
$n = n(T, V)$, aunque en la práctica es cte, típicamente entre 1 y 2.

- b) **Disrupción** de la unión para polarización inversa elevada ($V < -V_Z$):

$|V_Z|$ **varía con la temperatura:**

- **umenta** al aumentar T para el mecanismo de **avalancha**
- **disminuye** al aumentar T para el mecanismo **Zener**

En silicio, $\Delta |V_Z| \approx 2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$



Diodos en estática

Regiones de funcionamiento:

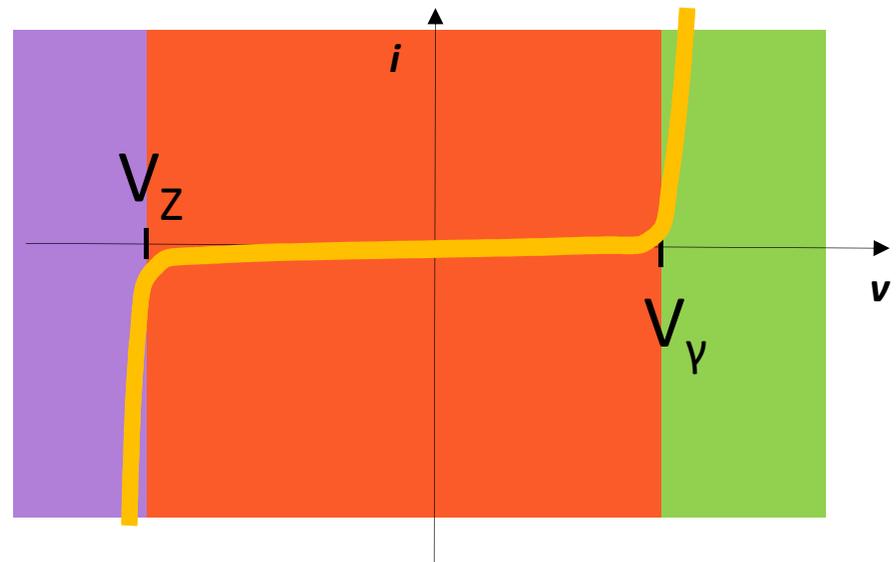
1. $v > V_\gamma \rightarrow$ **DIRECTA**

ON, en conducción

2. $-V_Z < v < V_\gamma \rightarrow$ **INVERSA**

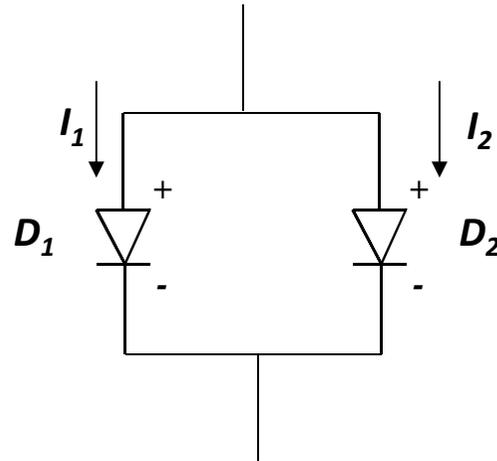
OFF, en corte

3. $v < -V_Z \rightarrow$ **DISRUPCIÓN**

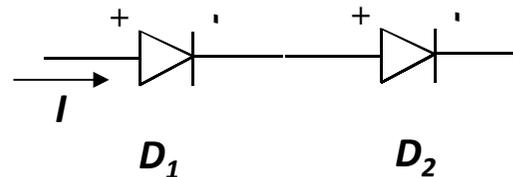


Diodos en estática

Ej. 1. En el circuito de la figura, obtenga la relación entre I_1 e I_2 sabiendo que los valores de corriente inversa de saturación de los diodos valen $I_{S1} = 4 \text{ nA}$ e $I_{S2} = 1 \text{ nA}$ y que $V_T = 25 \text{ mV}$



Ej. 2. En el circuito de la figura, obtenga la relación entre V_1 y V_2 para polarización directa sabiendo que los valores de corriente inversa de saturación de los diodos valen $I_{S1} = 4 \text{ nA}$ e $I_{S2} = 1 \text{ nA}$ y que $V_T = 25 \text{ mV}$ (suponiendo V_1 y $V_2 > 3 V_T$)



Ej. 3. Obtener las características I-V para las combinaciones de diodos de los ejercicios 1 y 2.

RESUMEN DEL APTO. 3.2

- Idealmente, el diodo deja pasar corriente cuando se polariza en sentido positivo e impide el paso de corriente en sentido contrario.
- La curva $i-v$ del diodo se deriva de las propiedades físicas de la unión p-n.
- La ecuación de Shockley caracteriza el comportamiento del diodo en las regiones de directa (tensión prácticamente constante a partir de un cierto valor) e inversa (corriente prácticamente nula).
- En directa se inyectan portadores mayoritarios (en su zona de origen), que se difunden como minoritarios al otro lado de la unión, dando lugar a una corriente fuertemente dependiente del voltaje aplicado.
- En inversa se inyectan portadores minoritarios (en su zona de origen), dando lugar a corrientes de arrastre muy débiles.
- A partir de una determinada tensión negativa, el diodo entra en disrupción, permitiendo el paso de corriente de cátodo a ánodo.
- La tensión de ruptura marca el límite a partir de la cual fenómenos de avalancha o Zener producen corrientes negativas grandes con incrementos de tensión pequeños.
- Al aumentar la temperatura de trabajo, la curva característica del diodo se desplaza.

Introducción a la Electrónica

Tema 3: Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Objetivos

- Presentar modelos lineales por tramos que aproximan el comportamiento del diodo y permiten un análisis circuital sencillo
- Familiarizarse con el uso de estos modelos para la resolución de circuitos de continua y con señales de variación lenta
- Conocer, a partir del análisis con estos modelos, algunas de las aplicaciones de los diodos en circuitos electrónicos sencillos

Bibliografía

- Sedra, apto. 3.3 (5ª edición)

Modelos en cuasi-estática y gran señal

Habíamos visto hablando de componentes que la presencia de elementos no lineales no suele permitir obtener soluciones analíticas en la resolución de circuitos

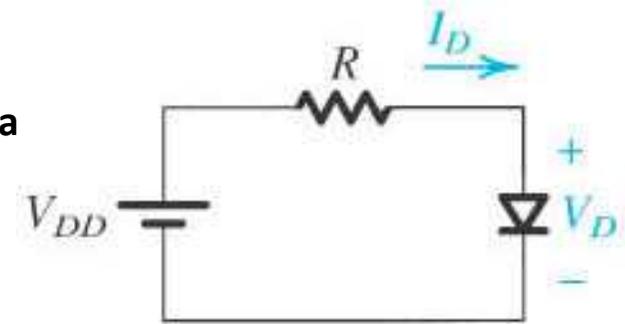
Ej. 4. En el circuito de la figura,

a) obtenga el sistema de ecuaciones I-V,

b) represente la solución gráfica usando la ecuación característica del diodo

c) resuelva numéricamente el sistema del apartado a)

Datos: $V_{DD}=10V$ $R=1K\Omega$

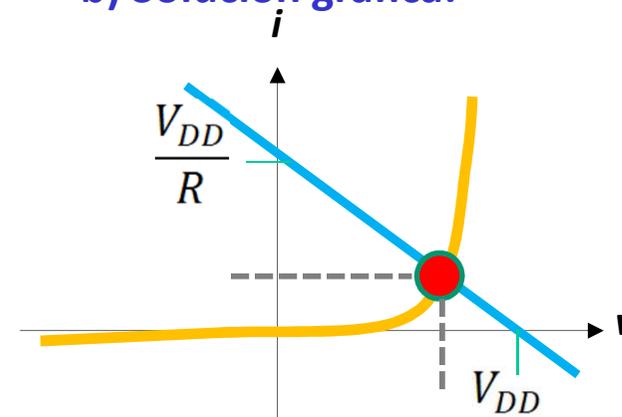


a) Ecuación trascendente:

$$V_{DD} = RI_D + V_D = RI_S \left[\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] + V_D$$

c) Solución por iteración

b) Solución gráfica:



Ecuación de Shockley: apropiada para modelar el diodo en directa e inversa, pero engorrosa y poco práctica para análisis de circuitos

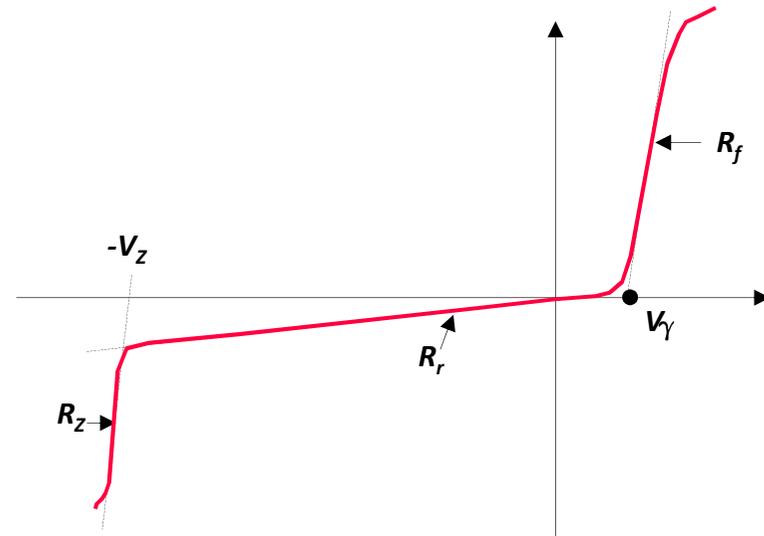
Modelos en cuasi-estática y gran señal

Circuitos complejos: necesidad de un análisis rápido

Modelos aproximados por tramos lineales:

simplificación del análisis
balance precisión-complejidad

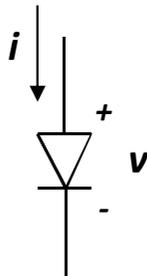
Ejemplo: aproximación por tres resistencias



Útiles para diodos trabajando en cuasi-estática y gran señal

Gran señal $\longrightarrow i_D(t)$ y $v_D(t)$ no son pequeños.

Estudiaremos cinco modelos lineales por tramos:



Modelo 1 – Diodo ideal

Modelo 2 – Tensión de codo

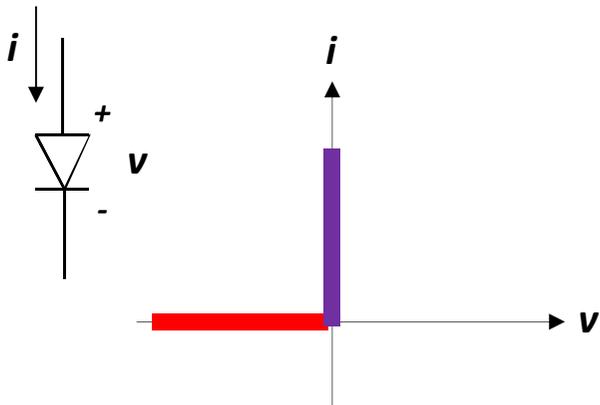
Modelo 3 – Tensión de codo y resistencia directa

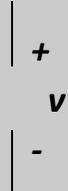
Modelo 4 – Tensión de codo y interrupción

Modelo 5 – Tensión de codo y resistencias directa y interrupción

Modelos en cuasi-estática y gran señal

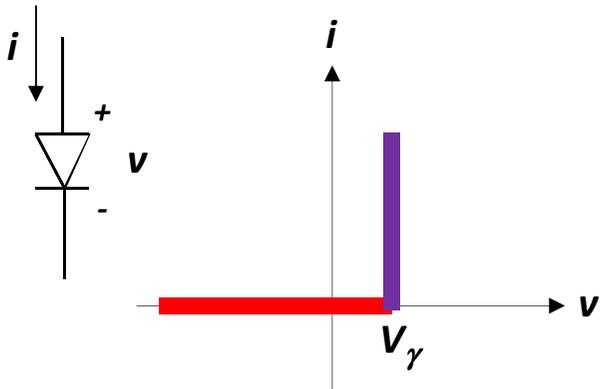
Modelo 1: DIODO IDEAL



| Región | Condición | Ecuación | Circuito equivalente |
|---------|-----------|----------|---|
| INVERSA | $v < 0$ | $i = 0$ |  |
| DIRECTA | $i > 0$ | $v = 0$ |  |

Modelos en cuasi-estática y gran señal

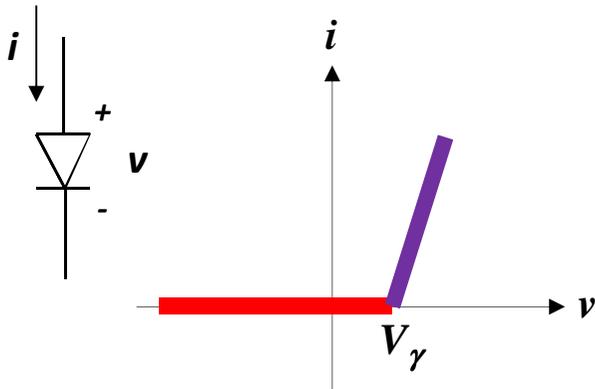
Modelo 2: TENSIÓN DE CODO



| Región | Condición | Ecuación | Circuito equivalente |
|---------|----------------|----------------|----------------------|
| INVERSA | $v < V_\gamma$ | $i = 0$ | |
| DIRECTA | $i > 0$ | $v = V_\gamma$ | |

Modelos en cuasi-estática y gran señal

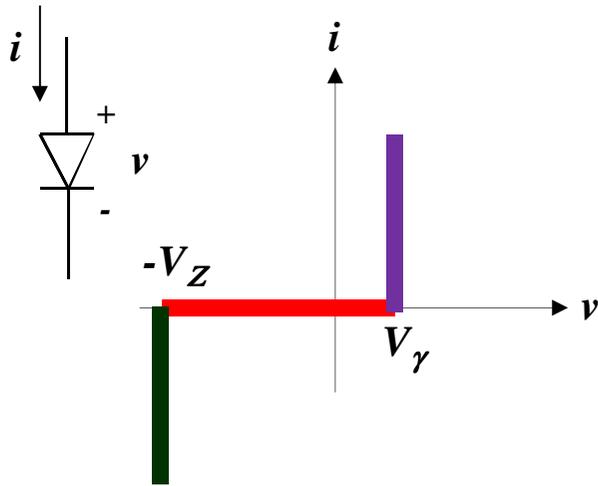
Modelo 3: TENSIÓN DE CODO Y RESISTENCIA DIRECTA



| Región | Condición | Ecuación | Circuito equivalente |
|---------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| INVERSA | $v < V_\gamma$ | $i = 0$ | |
| DIRECTA | $i > 0$ $v > V_\gamma$ | $v = r_f i + V_\gamma$ | |

Modelos en cuasi-estática y gran señal

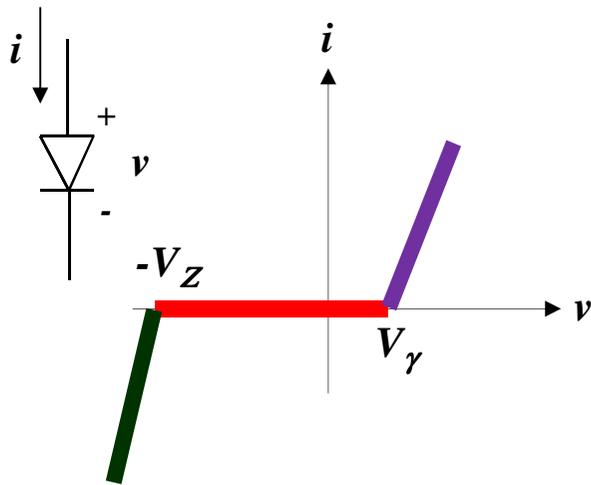
Modelo 4: TENSIÓN DE CODO Y DISRUPCIÓN



| Región | Condición | Ecuación | Circuito equivalente |
|---------|-----------------------|----------------|----------------------|
| DISRUP. | $i < 0$ | $v = -V_Z$ | v_Z |
| INVERSA | $-V_Z < v < V_\gamma$ | $i = 0$ | |
| DIRECTA | $i > 0$ | $v = V_\gamma$ | v_γ |

Modelos en cuasi-estática y gran señal

Modelo 5: TENSIÓN DE CODO Y RESISTENCIAS DIRECTA Y ZENER



| Región | Condición | Ecuación | Circuito equivalente |
|---------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| DISRUP. | $i < 0$ $v < -V_z$ | $v = -V_z + r_z i$ | |
| INVERSA | $-V_z < v < V_\gamma$ | $i = 0$ | |
| DIRECTA | $i > 0$ $v > V_\gamma$ | $v = r_f i + V_\gamma$ | |

Modelos en cuasi-estática y gran señal

ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN ESTÁTICA

- 1.- **Plantear hipótesis** sobre la región de funcionamiento en que se encuentran los diodos
- 2.- **Elegir modelo** aproximado y sustituir diodos por sus circuitos equivalentes
- 3.- **Calcular corrientes y tensiones** mediante análisis de circuitos
- 4.- **Comprobar la validez de las hipótesis**, verificando el cumplimiento de las condiciones
 - Si **no hay contradicción**, planteamiento correcto
 - Si **hay contradicción**, replantear a partir de otra hipótesis

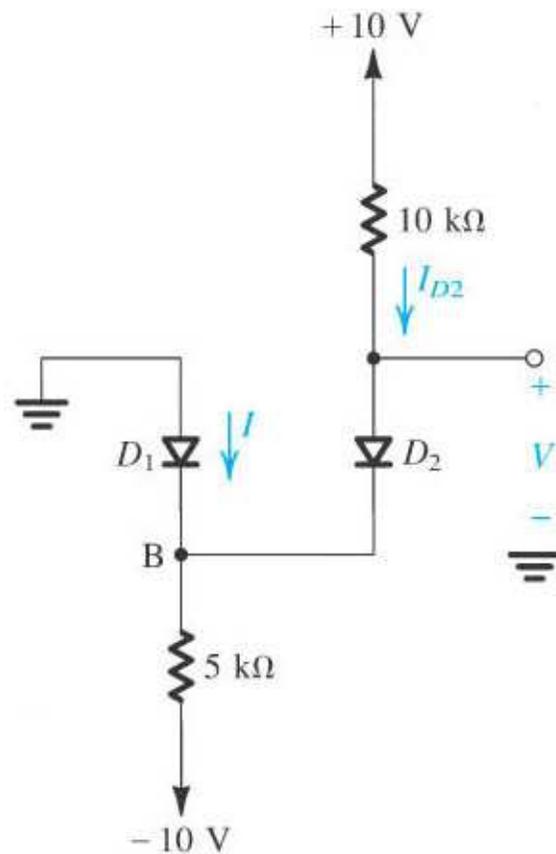
Modelos en cuasi-estática y gran señal

ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN ESTÁTICA

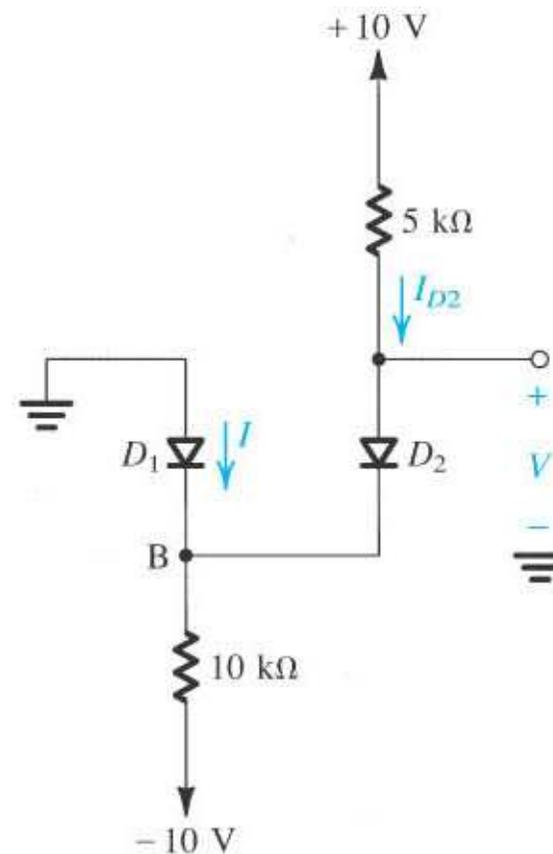
Para modelos de **tres estados** suele ser recomendable:

| Hipótesis falsa | Nueva hipótesis |
|-------------------------------|-----------------------|
| OFF , $v_D < v_\gamma$ | ON , $i_D > 0$ |
| OFF , $-v_Z < v_D$ | DISRUPCIÓN |
| ON | cualquiera |
| DISRUPCIÓN | cualquiera |

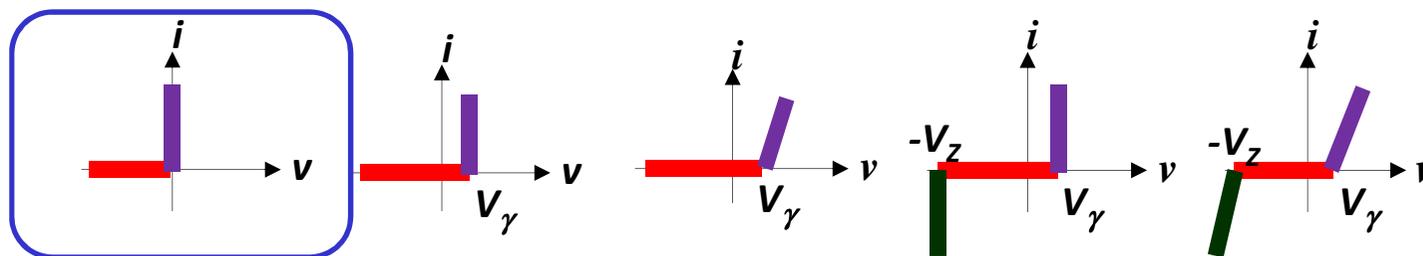
Ej. 5. Suponiendo que los diodos de los siguientes circuitos se pueden aproximar por interruptores ideales en función de su polarización, encuentre los valores de I y V en cada caso.



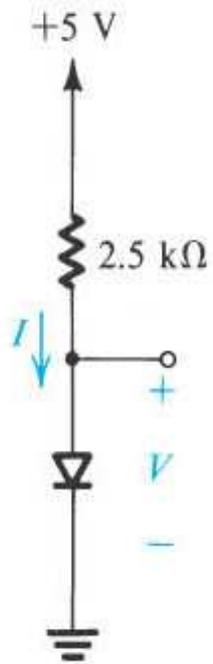
(a)



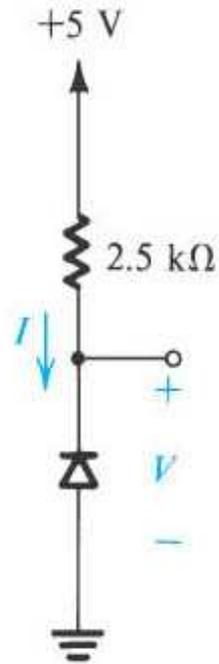
(b)



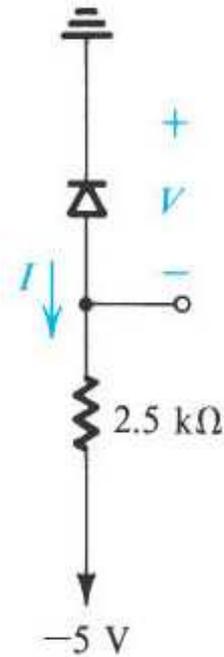
Ej. 6. Suponiendo que los diodos de los siguientes circuitos se pueden aproximar por interruptores ideales en función de su polarización, encuentre los valores de I y V en cada caso.



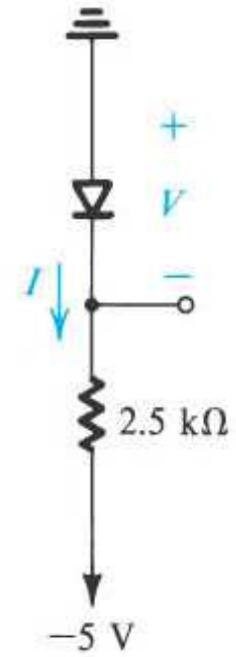
(a)



(b)

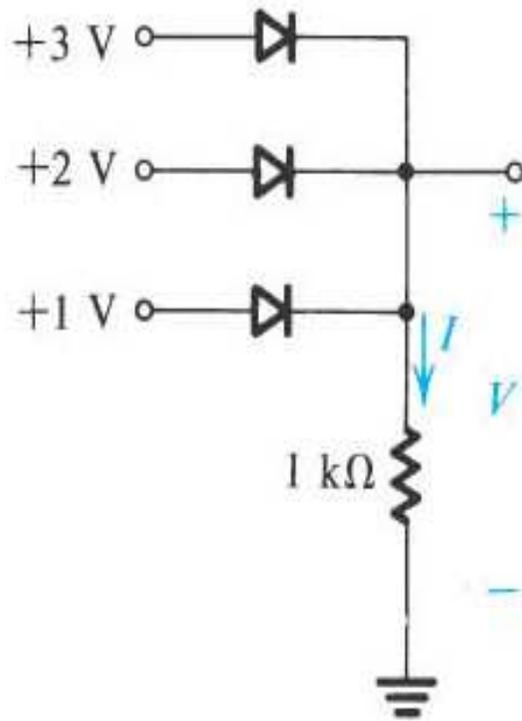


(c)

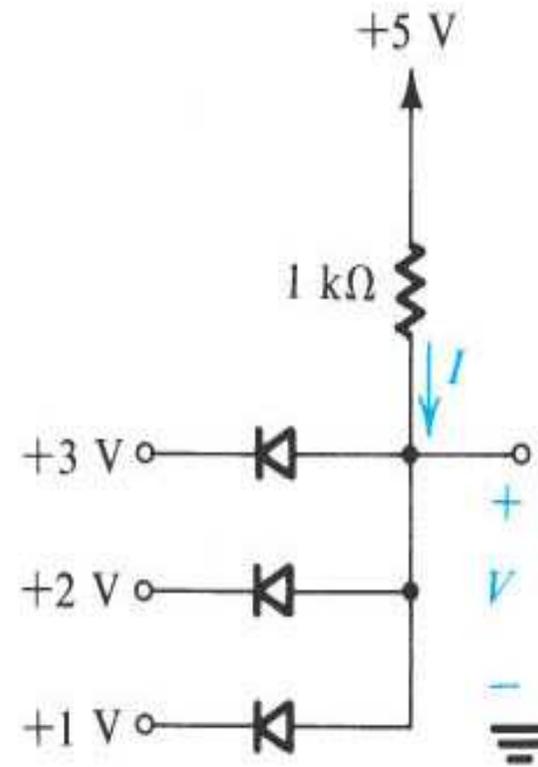


(d)

Ej. 7. Suponiendo que los diodos de los siguientes circuitos se pueden aproximar por interruptores ideales en función de su polarización, encuentre los valores de I y V en cada caso.



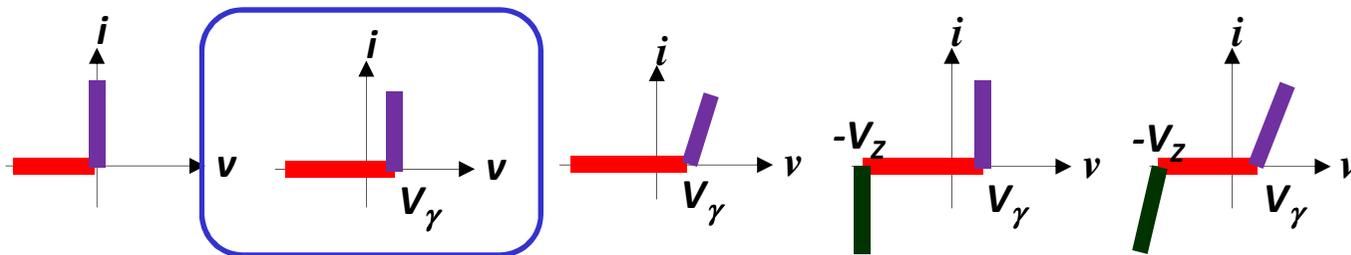
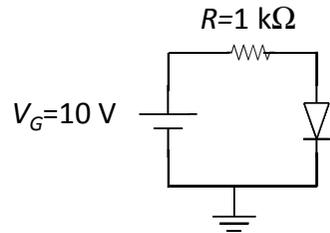
(e)



(f)

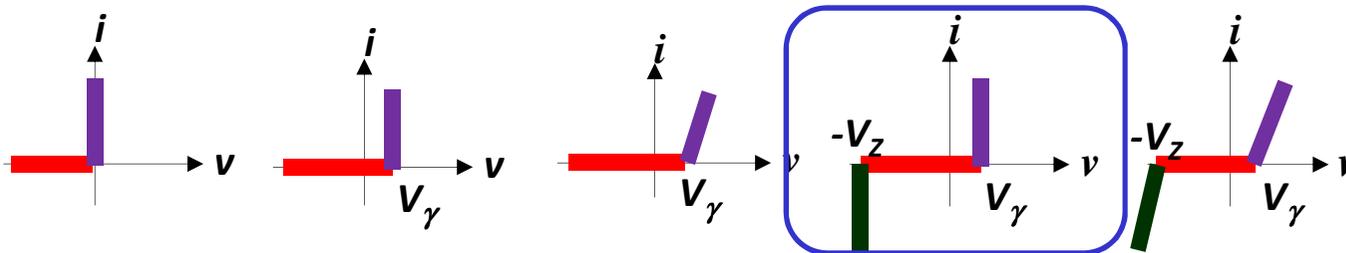
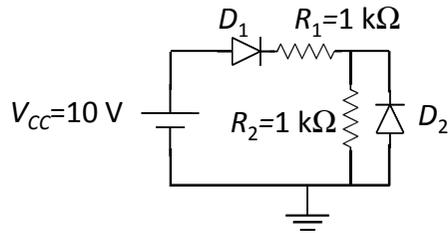
Modelos en cuasi-estática y gran señal

Ej 8. En el circuito de la figura, calcule la corriente que atraviesa el diodo, si se usa un modelo de tensión de codo con $V_\gamma = 0,5 \text{ V}$. Represente la solución gráfica.



Modelos en cuasi-estática y gran señal

Ej 9. En el circuito de la figura, calcule la potencia disipada por cada diodo. Use el modelo de tensión de codo y disrupción, con $V_\gamma(T=300^\circ\text{K})=0,5\text{ V}$ y $V_Z(T=300^\circ\text{K})=4\text{ V}$, $dV_\gamma/dT=-2\text{mV}/^\circ\text{K}$ (a 300°K), $dV_Z/dT=0$ (a 300°K),



ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN CUASI-ESTÁTICA

1.- Sustituir generador $v_G(t)$ por uno de **continua (valor instantáneo)**.

2.- Calcular la **función de transferencia** $v_O=f(v_G)$

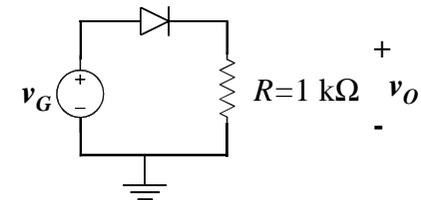
- Resolver circuito de **estática** para todas las hipótesis.
- Calcular rango de valores de v_G para el que **cada hipótesis es cierta**.
- Obtener la **solución** del circuito “enlazando” las soluciones de cada circuito lineal.

3.- Presentar la **solución** $v_O(t)=f(v_G(t))$

Modelos en cuasi-estática y gran señal

Ej 10. Calcular la función de transferencia $v_o=f(v_G)$ en el circuito de la figura si $v_G(t) = 3\text{sen}(2t)$. Para ello, suponga:

- el modelo ideal
- el modelo de tensión de codo con $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$.
- el modelo de tensión de codo $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$ y resistencias directa $r_f = 1 \Omega$ y Zener $r_z = 2 \Omega$, con $V_Z = 2,8 \text{ V}$.



RESUMEN DEL APTO 3.3

- Para simplificar el análisis con diodos usamos modelos lineales por tramos.
- La elección entre un modelo u otro se basa en un compromiso entre precisión del resultado y complejidad del análisis.
- Para resolver un circuito con diodos en continua se ha de plantear una hipótesis sobre el estado del diodo, resolver el circuito, y verificar el cumplimiento de la hipótesis inicial.
- Para resolver un circuito con diodos en variación lenta, se ha de resolver el circuito para todas las hipótesis, planteando el rango de valores de la señal de entrada para cada una de ellas.
- Algunas aplicaciones de diodos en circuitos electrónicos: regulación de voltajes, rectificación de señales, recorte, fijación de nivel, etc.

Introducción a la Electrónica

Tema 3: Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Objetivos

- Interiorizar los conceptos de polarización y pequeña señal
- Justificar la pertinencia y el uso de la aproximación de pequeña señal a partir de la deducción del circuito equivalente del diodo
- Mostrar algunas aplicaciones sencillas de circuitos con diodos trabajando en frecuencias medias y pequeña señal

Bibliografía

- Sedra, apto. 3.3.8 (5ª edición)

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Según el modo de operación del diodo:

Situación **cuasi-estática**

$$\left| C_D(v_D(t)) \frac{dv_D(t)}{dt} \right| \ll |I_S(e^{v_D(t)/V_T} - 1)| \rightarrow i_D \approx I_S(e^{v_D(t)/V_T} - 1)$$

Se pueden **despreciar** los **efectos capacitivos**.

Pequeña señal

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Se puede **aproximar** el diodo por un **dispositivo lineal**.

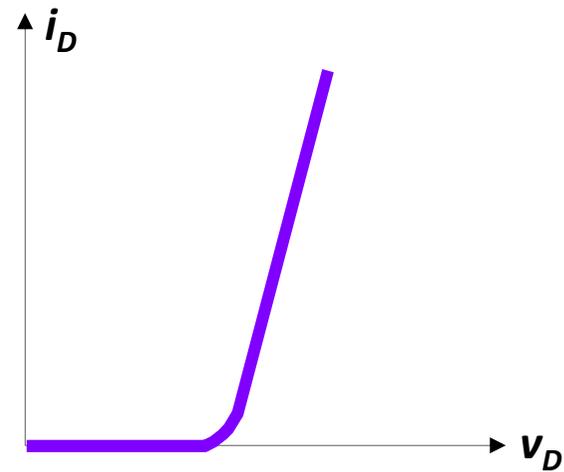
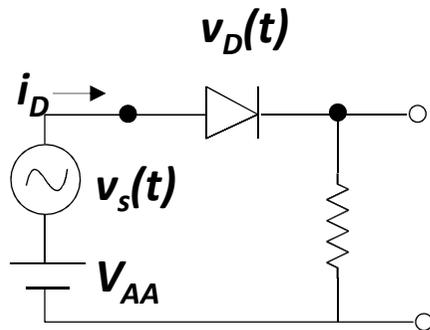
Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

La componente de **polarización** fija el punto de trabajo:

La **señal** modula la operación del diodo alrededor del punto de trabajo:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Ejemplo:



Ecuación de Shockley

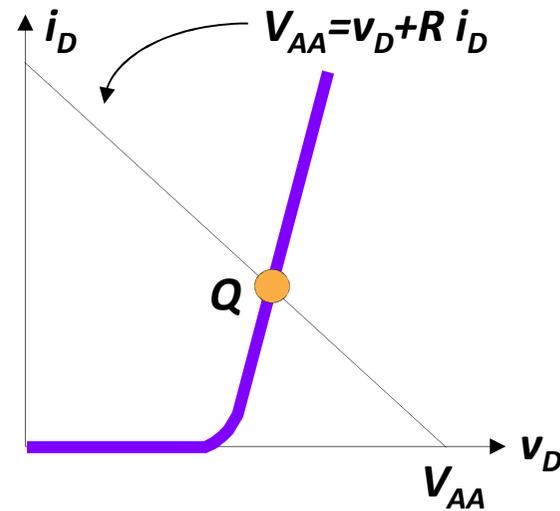
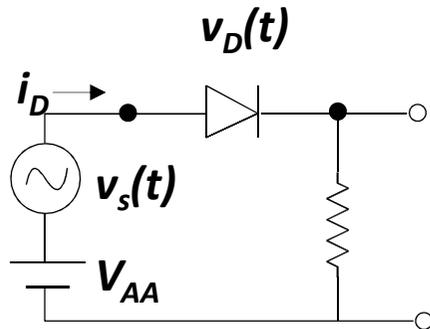
Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

La componente de **polarización** fija el punto de trabajo:

La **señal** modula la operación del diodo alrededor del punto de trabajo:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Ejemplo:



Ecuación de Shockley + recta de carga

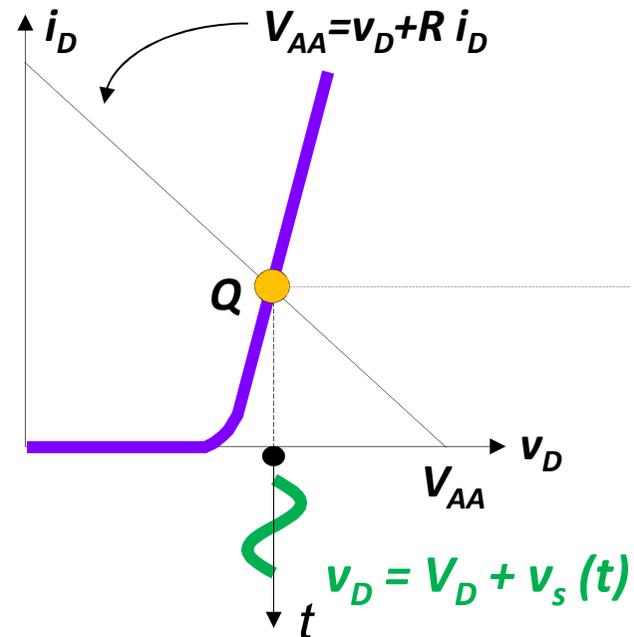
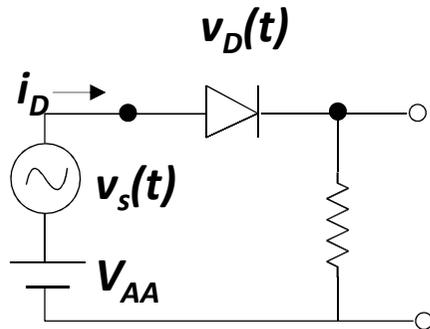
Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

La componente de **polarización** fija el punto de trabajo:

La **señal** modula la operación del diodo alrededor del punto de trabajo:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Ejemplo:



Modulación del punto de trabajo

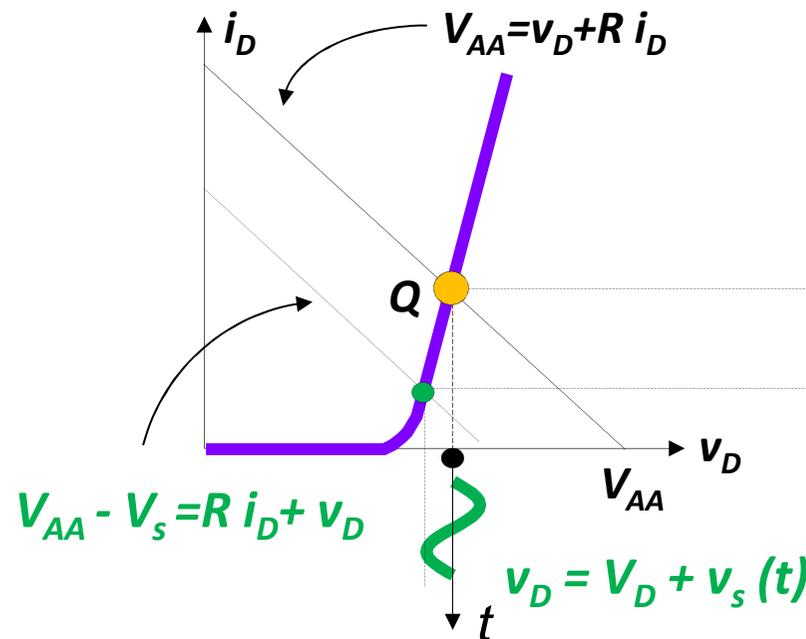
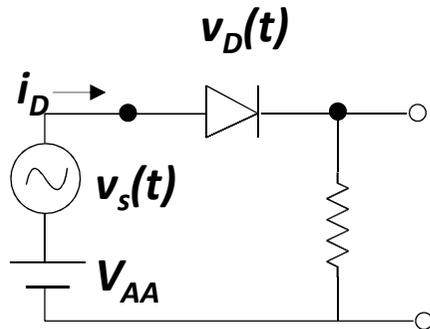
Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

La componente de **polarización** fija el punto de trabajo:

La **señal** modula la operación del diodo alrededor del punto de trabajo:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Ejemplo:



Modulación mínima del punto de trabajo

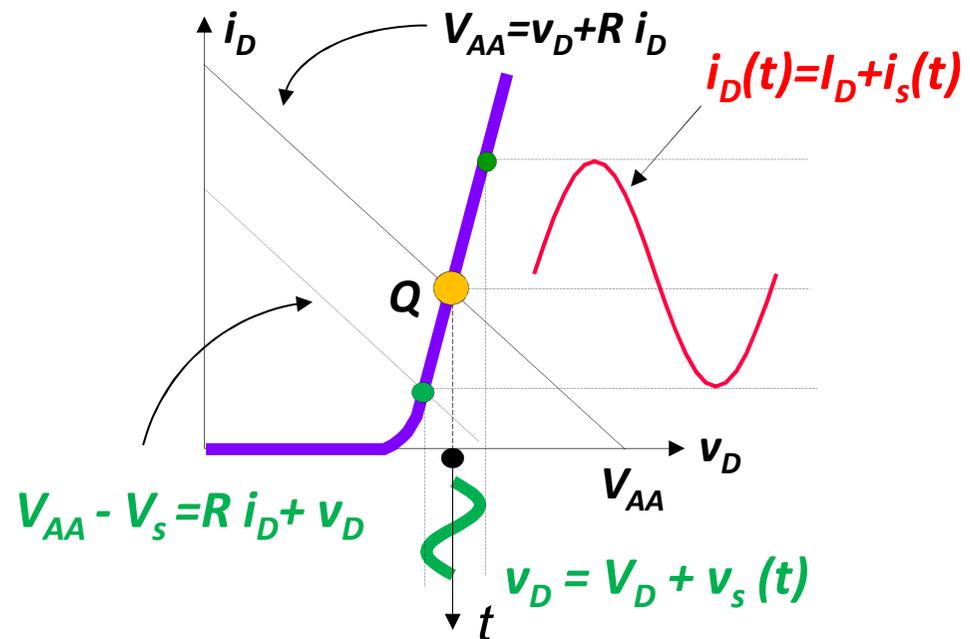
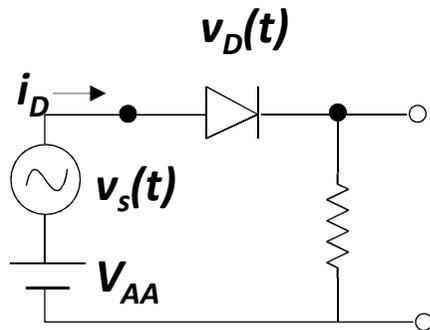
Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

La componente de **polarización** fija el punto de trabajo:

La **señal** modula la operación del diodo alrededor del punto de trabajo:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Ejemplo:



Modulación máxima del punto de trabajo

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Matemáticamente se puede **aproximar** la operación del diodo por una **función lineal** alrededor del punto de trabajo.

Desarrollo en serie de Taylor (1^{er} orden):

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

donde:

$$f(x) = f(v_D) = i_D(v_D) = I_S(e^{v_D/V_T} - 1) \quad \text{ec. Shockley}$$

Entonces:

$$i_D(v_D) \approx I_D + \underbrace{\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q}_{g_d} (v_D - V_D)$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} \quad \text{conductancia de pequeña señal del diodo}$$

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Matemáticamente se puede **aproximar** la operación del diodo por una **función lineal** alrededor del punto de trabajo.

Sustituyendo la ecuación de Shockley como $f(x)$:

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = \frac{d}{dv_D} [I_S(e^{v_D/V_T} - 1)]_Q = I_S \frac{1}{V_T} e^{V_D/V_T}$$

Como:

$$I_D(V_D) = I_S e^{V_D/V_T} - I_S$$

Entonces:

$$\boxed{g_d(I_D) = \frac{I_D + I_S}{V_T}} \quad \boxed{r_d(I_D) = \frac{V_T}{I_D + I_S}}$$

Por tanto:

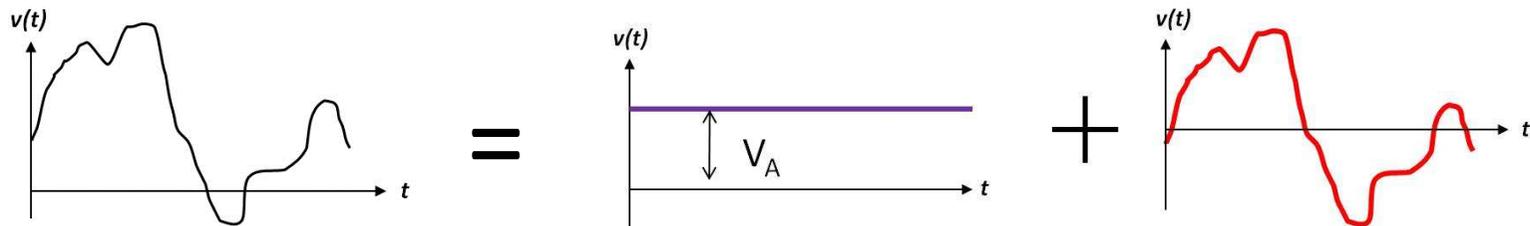
$$i_D(v_D) \approx I_D + g_d(v_D - V_D) \longrightarrow i_D - I_D \approx g_d(v_D - V_D)$$

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Matemáticamente se puede **aproximar** la operación del diodo por una **función lineal** alrededor del punto de trabajo.

Habíamos definido en el primer tema la **señal completa** como **suma** de **componente de polarización** y **señal propiamente dicha**:

$$v_A(t) = V_A(t) + v_a(t)$$



De manera que:

$$i_D - I_D \approx g_d(v_D - V_D) \longrightarrow \boxed{i_d \approx g_d v_d} \quad \boxed{r_d \approx \frac{v_d}{i_d}}$$

Relación lineal i-v

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Matemáticamente se puede **aproximar** la operación del diodo por una **función lineal** alrededor del punto de trabajo.

Rango de validez de la aproximación lineal:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \underbrace{\frac{1}{2}f''(x_0)(x - x_0)^2 + \dots}_{\text{Error cometido a primer orden}}$$

Consideramos una buena aproximación si se cumple:

$$\frac{1}{2}f''(x_0)(x - x_0)^2 \ll f'(x_0)(x - x_0) \quad \text{despreciando órdenes superiores}$$

En nuestro caso:

$$i_D(v_D) = I_D + \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q v_d + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2i_D}{dv_D^2} \right|_Q v_d^2 + \dots$$

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Matemáticamente se puede **aproximar** la operación del diodo por una **función lineal** alrededor del punto de trabajo.

Consideraremos que se debe cumplir:

$$\left| \frac{1}{2} \frac{d^2 i_D}{dv_D^2} \right|_Q v_d^2 \approx \left| \frac{1}{10} g_d v_d \right| \quad \text{hasta un 10\% de distorsión no lineal}$$

Siendo:

$$\frac{d^2 i_D}{dv_D^2} = \frac{d}{dv_D} \left(\frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \right) \Big|_{v_D=V_D} = \frac{I_S}{V_T^2} e^{v_D/V_T} = \frac{1}{V_T} g_d$$

Entonces:

$$\frac{1}{2} \frac{g_d}{V_T} |v_D^2| \approx \frac{1}{10} g_d |v_d| \quad \longrightarrow \quad \boxed{|v_d| \approx \frac{V_T}{5}} \quad \boxed{|i_d| \approx \frac{V_T}{5r_d}}$$

Condición de pequeña señal

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Matemáticamente se puede **aproximar** la operación del diodo por una **función lineal** alrededor del punto de trabajo.

Aproximaremos:

$$r_d(I_D) = \frac{V_T}{I_D + I_S} \approx \begin{cases} \infty & \text{En inversa } (I_D = -I_S) \\ \frac{V_T}{I_D} & \text{En directa } (I_D \gg -I_S) \end{cases}$$

Gran vs. pequeña señal:

- **GS:** modelos lineales por tramos – aproximación global
- **PS:** modelo lineal alrededor de pto. de trabajo – aproximación local

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN CUASI-ESTÁTICA Y PEQUEÑA SEÑAL

1.- Cálculo de la polarización y del punto de trabajo de cada diodo

- En el circuito original se **anulan** los **generadores independientes de pequeña señal**.

generador de tensión $v_g = 0 \rightarrow$ **cortocircuito**

generador de corriente $i_g = 0 \rightarrow$ **circuito abierto**

- **Resolver el circuito de estática** utilizando modelos lineales por tramos (gran señal), calculando I_D , V_D para cada diodo.

2.- Cálculo de la pequeña señal

- En el circuito original se **anulan** los **generadores independientes de continua**, quedando los de pequeña señal.

generador de tensión $V_G = 0 \rightarrow$ **cortocircuito**

generador de corriente $I_G = 0 \rightarrow$ **circuito abierto**

- **Calcular** los valores $r_d(I_D)$ para cada diodo.
- **Sustituir cada diodo por su resistencia equivalente** de pequeña señal.
- Resolver el circuito de pequeña señal calculando i_d , v_d .

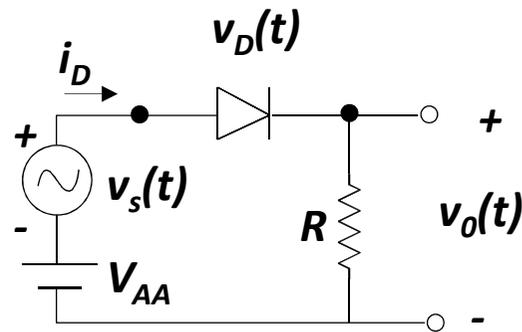
3.- Cálculo de la solución final:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t), \quad i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

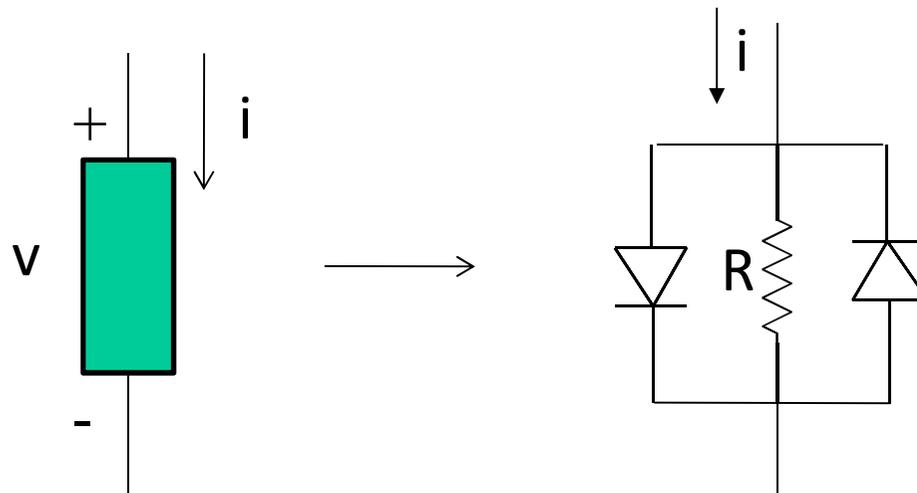
Ej 11. Calcular $v_D(t)$ y $i_D(t)$ en el circuito de la figura, utilizando un modelo lineal por tramos para el diodo trabajando en estática, con los siguientes parámetros:

- $V_\gamma = 0,5 \text{ V}$.
- $r_f = 0 \ \Omega$.
- $V_T = 25 \text{ mV}$.
- $V_{AA} = 10 \text{ V}$
- $R = 1\text{k}\Omega$



Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

- Ej 12.** Sea el componente de la figura, donde $R = 1 \text{ k}\Omega$, $V_T = 25 \text{ mV}$ y $V_y = 700 \text{ mV}$. Dicho componente actúa como una resistencia de tensión limitada. Obtenga:
- La tensión límite utilizando un modelo lineal por tramos con tensión de codo.
 - La característica I-V del componente.
 - Considerando la aproximación del modelo de Shockley con $I_s = 2,1 \text{ pA}$, calcule la resistencia equivalente R_{eq} del componente en pequeña señal para un punto de trabajo $V_Q = 580 \text{ mV}$

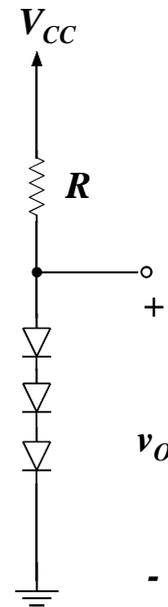


Modelos en cuasi-estática y pequeña señal

Ej 13. Considere el circuito de la figura, en el que se usan tres diodos en serie, con $V_\gamma = 0,7$ V, para fijar una tensión de alrededor de 2,1 V.

- a) Suponiendo que al valor de la fuente de alimentación se superpone una senoide de 50 Hz de 1 V_{pico} (imperfección de la fuente conocida como *rizado de fuente*), calcule el porcentaje de variación del voltaje regulado v_o .
- b) Haga un cálculo similar para el caso en que se conecte una resistencia de carga de 1 k Ω .

DATOS: $V_{CC} = 10$ V; $R = 1$ k Ω ; $V_T = 0,025$ V



RESUMEN DEL APTO. 3.4

- Para señales variables pequeñas ($v_d \ll V_T$), se puede descomponer el análisis de un circuito con diodos en dos partes:
 - Análisis del circuito de polarización, eliminando las señales variables, con el modelo de estática y gran señal
 - Análisis del circuito equivalente de pequeña señal, eliminando las señales continuas y sustituyendo el diodo por una resistencia incremental (cuyo valor depende del punto de trabajo)
- La aproximación de pequeña señal se basa en equiparar la curva característica del diodo, en un pequeño margen, a una recta tangente a la misma en el punto de trabajo

Introducción a la Electrónica

Tema 3: Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Objetivos

- Definir el régimen de funcionamiento en dinámica
- Mostrar el origen de las capacidades internas del diodo
- Conocer los modelos del diodo en dinámica, para gran señal y pequeña señal

Bibliografía

- Sedra, apto. 3.7.3 y 3.7.5 (5ª Edición)

Diodos en dinámica

Dinámica: régimen de funcionamiento en el que la rápida variación de las señales impide despreciar los efectos capacitivos asociados a los dispositivos

Situación **dinámica**

$$C_D(v_D(t)) \frac{dv_D(t)}{dt} \sim I_S (e^{v_D(t)/V_T} - 1)$$

- Se mantienen las dependencias temporales
- Efectos capacitivos no despreciables

$$i_D = I_S (e^{v_D(t)/V_T} - 1) + C_D(v_D) \frac{dv_D}{dt}$$

No existe curva característica

Diodos en dinámica

Dinámica: régimen de funcionamiento en el que la rápida variación de las señales impide despreciar los efectos capacitivos asociados a los dispositivos

La capacidad del diodo tiene dos componentes:

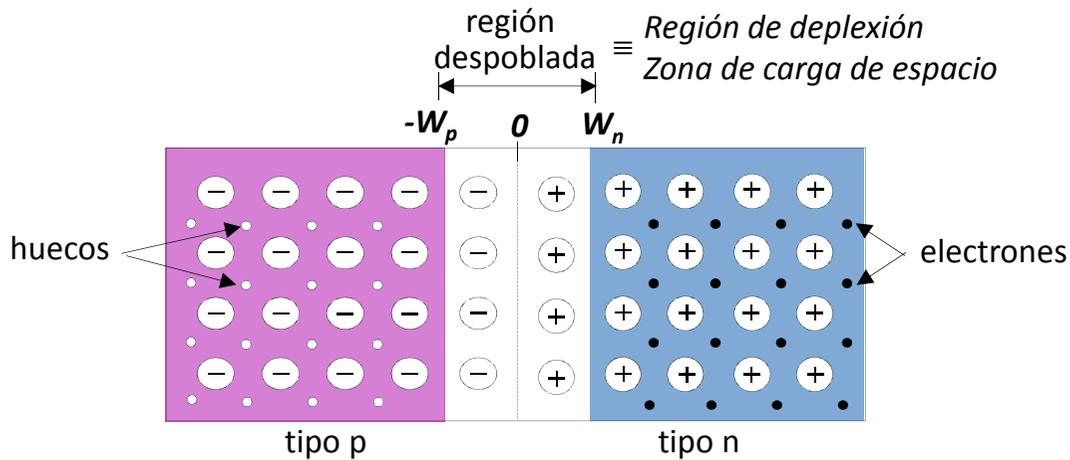
$$C(v_D) = C_d(v_D) + C_j(v_D)$$

$C_j \equiv$ Capacidad de unión / deplexión

$C_d \equiv$ Capacidad de difusión

Diodos en dinámica

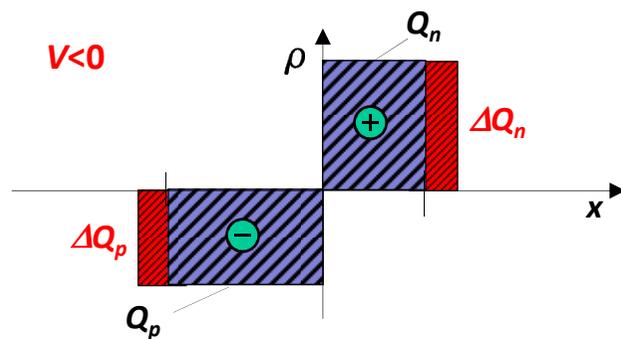
$C_j \equiv$ Capacidad de unión / deplexión



$$Q_p = e w_p N_A A = Q_n = e w_n N_D A$$

$$Q_j = e \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} w_{dep} A,$$

con $w_{dep} = w_p + w_n$

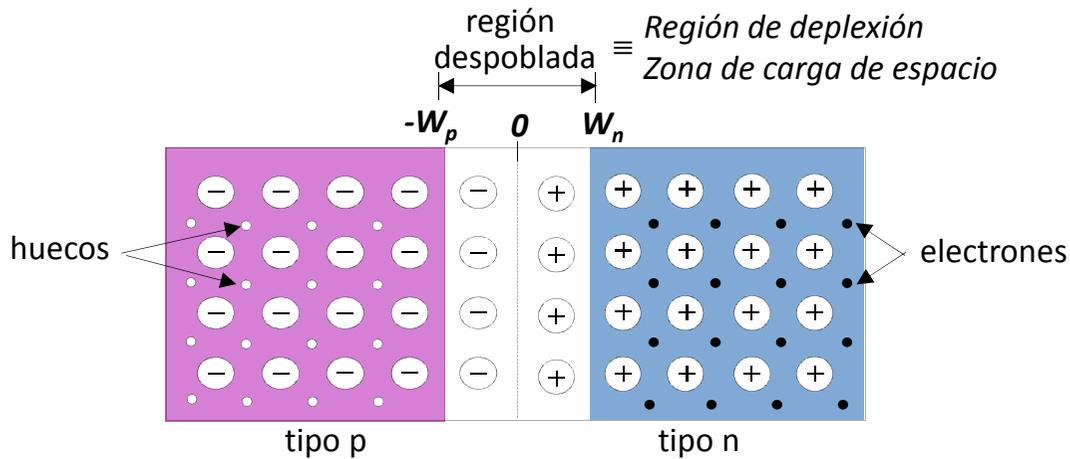


Al variar el voltaje aplicado a la unión, varía la carga almacenada en la zona de deplexión \Rightarrow efecto capacitivo

$$w_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{J0} - V)}$$

Diodos en dinámica

$C_j \equiv$ Capacidad de unión / deplexión



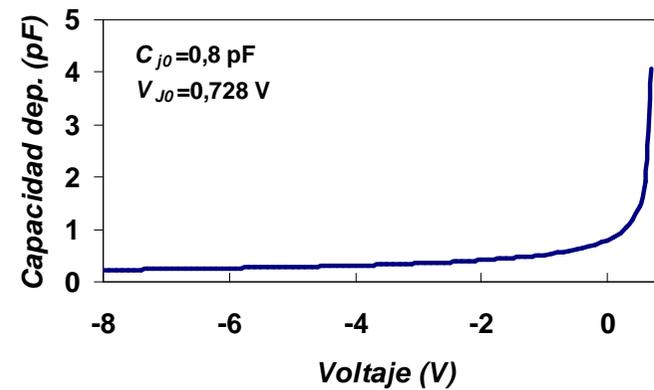
$$Q_p = ew_p N_A A = Q_n = ew_n N_D A$$

$$Q_j = e \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} w_{dep} A,$$

con $w_{dep} = w_p + w_n$

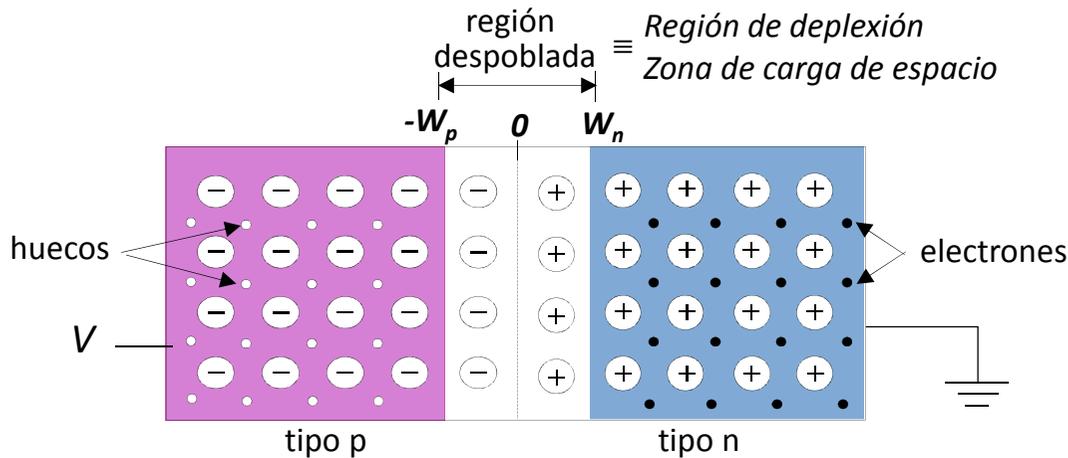
Capacidad de deplexión: dependiente del voltaje

$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{w_{dep}} = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V}{V_{J0}}}}$$

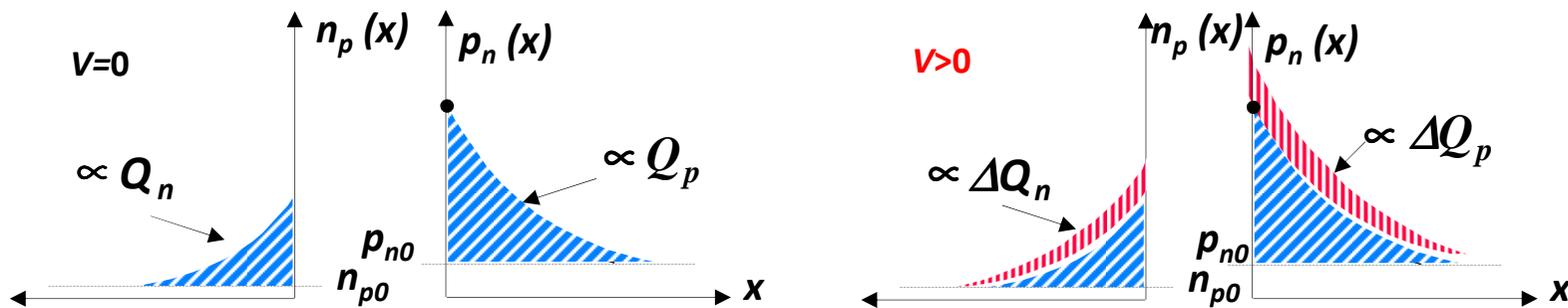


Diodos en dinámica

$C_d \equiv$ Capacidad de difusión



Carga asociada al exceso de minoritarios en las regiones p y n, a ambos lados de la zona de deplexión \Rightarrow efecto capacitivo

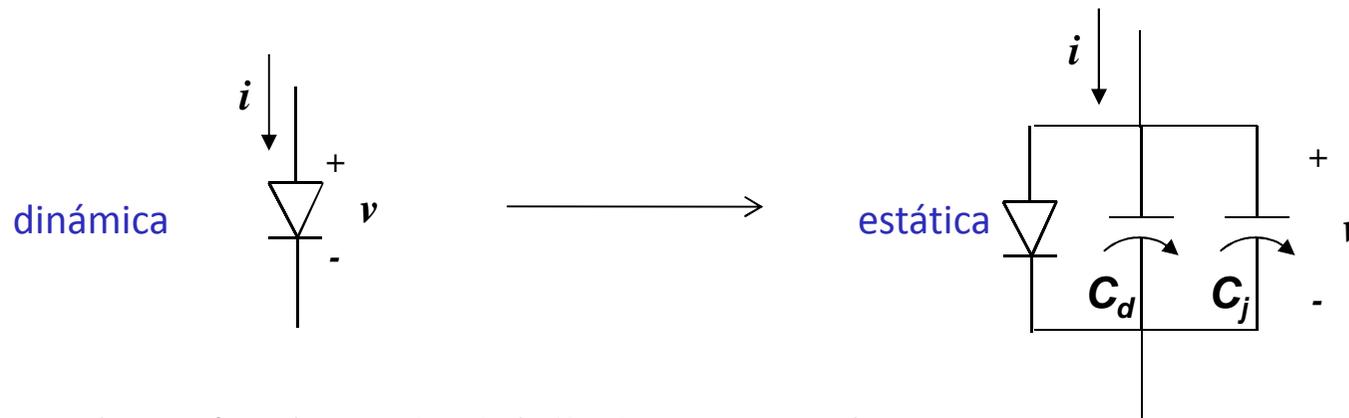


$$C_d = B \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right)$$

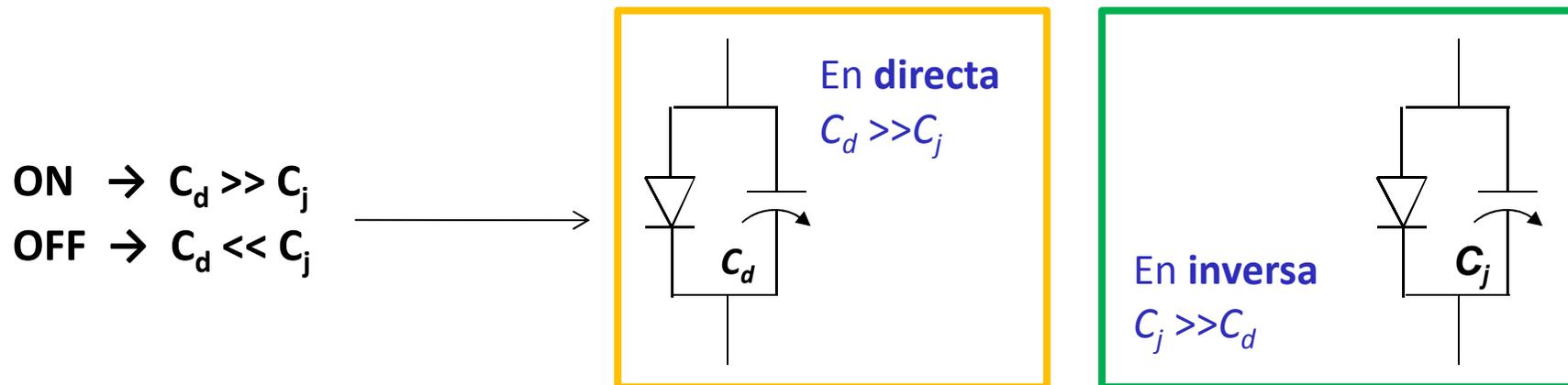
Diodos en dinámica

Incluyendo las capacidades asociadas al funcionamiento en **dinámica y gran señal**:

$$i(t) = I_s \left[\exp\left(\frac{v(t)}{V_T}\right) - 1 \right] + C_j(v(t)) \frac{dv(t)}{dt} + C_d(v(t)) \frac{dv(t)}{dt}$$



En general, según el estado del diodo, se cumple:



Diodos en dinámica

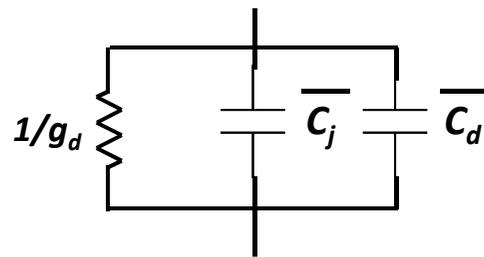
Incluyendo las capacidades asociadas al funcionamiento en **dinámica** y **pequeña señal**:

$$\frac{dv_D}{dt} = \frac{d(V_D + v_d)}{dt} = \frac{dv_d}{dt}$$

Se cumple entonces la relación lineal:

$$i_d = g_d(I_D)v_D + C(V_D)\frac{dv_d}{dt}$$

Circuito equivalente:



$\left. \begin{array}{l} \bar{C}_j \\ \bar{C}_d \end{array} \right\}$ Valores medios alrededor del punto de trabajo

Prueba Julio 2011

Ejercicio 4. Un diodo en dinámica se puede modelar como un diodo D en cuasi-estática en paralelo con un condensador C , que en primera aproximación se puede considerar de valor constante. Ese modelo es el que se ha empleado en el circuito de conmutación de la Figura 4.1, en el que, cuando se aplica en $t=0$ un escalón de tensión como el de la Figura 4.2, la corriente i_o cambia con el tiempo según lo indicado en la Figura 4.3. Calcule:

- La corriente $I_{O1} = i_o(t < 0)$ y la tensión V_{AB} para $t < 0$ (0,5 p.)
- La corriente $I_{O2} = i_o(t = 0^+)$ (0,5 p.)
- El tiempo t_s durante el cual el diodo permanece polarizado en ON (1,5 p.)

DATOS: $C = 3 \text{ nF}$. Aproximación lineal por tramos para el diodo con $V_f = 0,7 \text{ V}$; $r_f = 10 \text{ } \Omega$; $R = 1 \text{ k}\Omega$; $V_{CC} = 10 \text{ V}$.

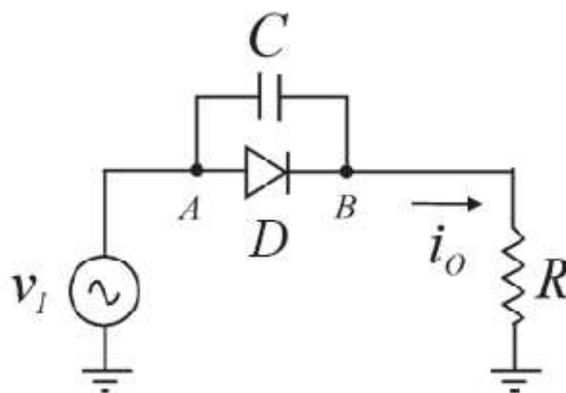


Figura 4.1

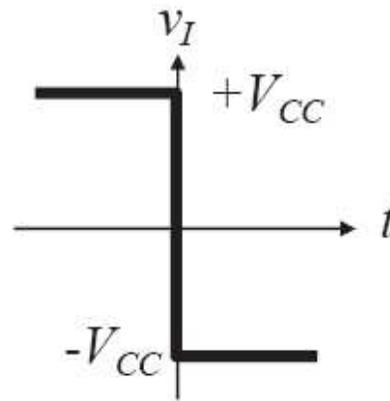


Figura 4.2

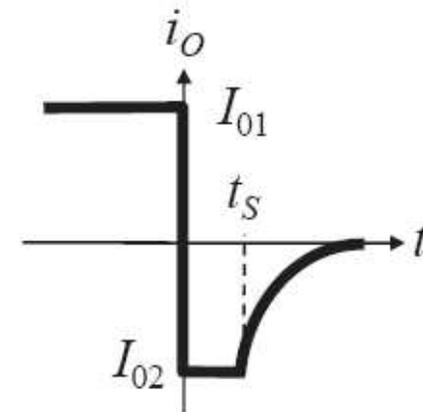


Figura 4.3

RESUMEN DEL APTO. 3.5

- **En el régimen de funcionamiento en dinámica se hacen sentir efectos capacitivos internos a los dispositivos electrónicos**
- **La capacidad de deplexión del diodo se debe a la carga almacenada en la zona de deplexión. Domina en el funcionamiento en inversa**
- **La capacidad de difusión del diodo se debe al exceso de minoritarios inyectados a ambos lados de la zona de deplexión. Domina en el funcionamiento en directa**
- **Se pueden analizar circuitos con diodos en dinámica a partir de circuitos equivalentes en los que aproximamos las capacidades internas, dependientes del voltaje, por valores medios alrededor del punto de trabajo.**

Introducción a la Electrónica

Tema 3: Diodos de unión

3.1 Introducción

3.2 Diodos en estática

3.3 Modelos aproximados en cuasi-estática y gran señal

3.4 Modelo aproximado en cuasi-estática y pequeña señal

3.5 Diodos en dinámica

3.6 Otros diodos

Objetivos

- Conocer el funcionamiento básico de tipos especiales de diodos.
- Conocer algunas de sus aplicaciones más comunes.
- Identificar dichos componentes en análisis de circuitos.

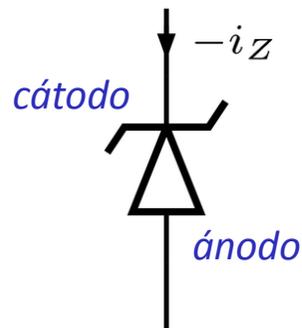
Bibliografía

- Sedra, apto. 3.4 y 3.8 (5ª Edición)

Otros diodos

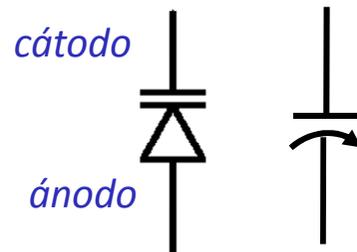
Existen diodos específicamente diseñados para realizar tareas específicas.

Diodo Zener:



- Trabaja en disrupción.
- Proporciona una tensión de referencia V_z .

Diodo varactor (varicap):

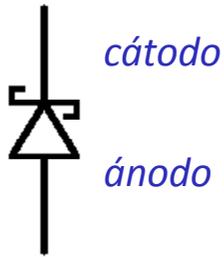


- Condensador variable.
- C_D controlado por tensión de polarización.

Otros diodos

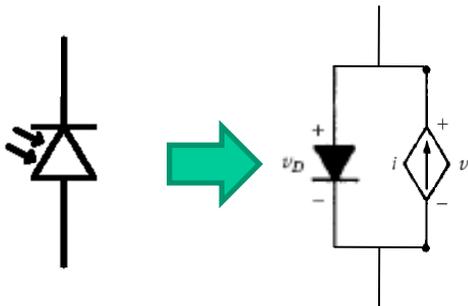
Existen diodos específicamente diseñados para realizar tareas específicas.

Diodo Schottky:



- Contacto metal-semiconductor rectificante
- Suelen presentar tensiones de codo V_γ menores
- Dispositivo controlado por mayoritarios (rápido).

Fotodiodo:

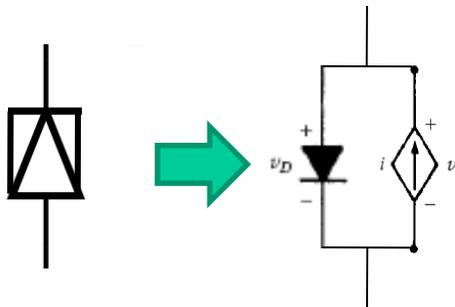


- Sensibles a la luz (superficie descubierta).
- Generan una fotocorriente proporcional a intensidad de iluminación.
- Se suelen utilizar como receptores de comunicación óptica operando en inversa.

Otros diodos

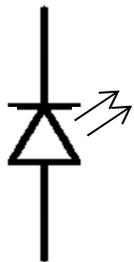
Existen diodos específicamente diseñados para realizar tareas específicas.

Célula solar:



- Sensibles a la luz (superficie descubierta).
- Generan una fotocorriente proporcional a intensidad de iluminación.
- Operan en directa, generando potencia.

Diodos emisores de luz (LEDs):



- Operando en ON emite luz monocromática, que puede ser coherente (laser).
- La intensidad de la luz emitida es proporcional a la corriente que se inyecta en el componente.
- Emisión por recombinación radiativa de electrones y huecos.
- LED + fotodiodo = optoaislador

Ej. 14. Suponiendo que la característica $I-V$ de los diodos Zener Z_1 y Z_2 es la representada en la figura 2.19 y que la característica $I-V$ del diodo D_1 es la de la figura 2.20, se pide, para el circuito de la figura 2.21:

- Calcule I_{D1} y V_{D1}
- Sabiendo que el diodo Z_1 está ON, deduzca el estado de Z_2
- Calcule I_{Z2}

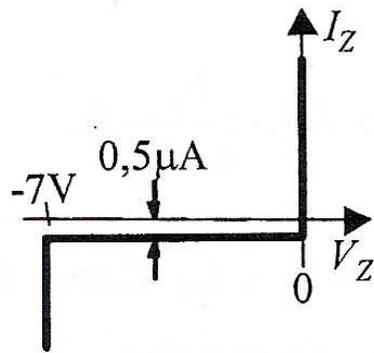


Figura 2.19

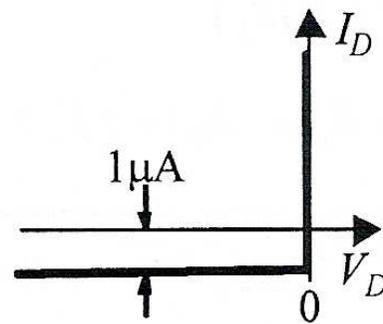


Figura 2.20

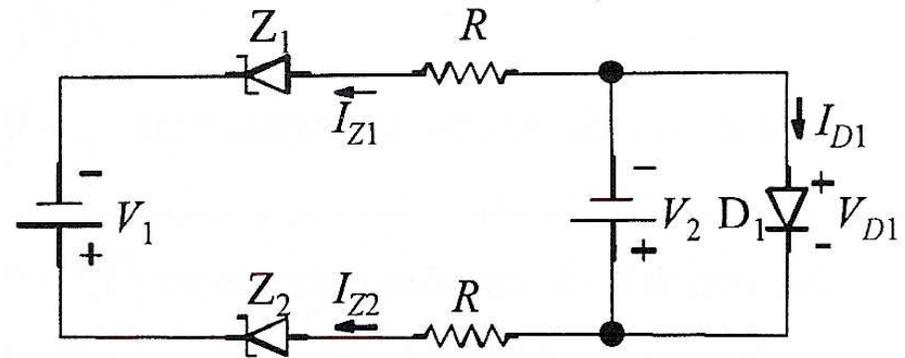


Figura 2.21

DATOS: $R = 1,1 \text{ M}\Omega$; $V_1 = 20 \text{ V}$; $V_2 = 8 \text{ V}$

Ej. 15. Para una determinada aplicación se desea utilizar como generador de energía eléctrica la célula solar que muestra la figura 2.30. Para ciertas condiciones de temperatura y radiación solar (que se estima que serán similares a las de operación real), la célula puede modelarse como un generador de corriente en paralelo con un diodo aproximado por un modelo lineal por tramos, tal y como muestra la figura 2.31. La característica I - V como componente de dos terminales de la célula tiene el aspecto de la figura 2.32. Para las condiciones mencionadas, se pide:

- La corriente en el punto A de la figura 2.32, que es la que produce la célula cuando se cortocircuitan sus terminales ($V = 0$). Indique el estado en que opera el diodo en dicho punto A.
- La tensión en el punto B de la figura 2.32, que es la que aparece en bornas de la célula cuando se deja en circuito abierto ($I = 0$). Indique el estado en que opera el diodo en dicho punto B.
- La potencia máxima que puede generar la célula, que se obtiene cuando trabaja en el punto C de la figura 2.32.
- La resistencia de carga que habría que poner en los terminales de la célula para que operase en el punto C de la figura 2.32.

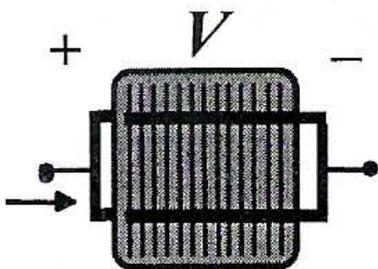


Figura 2.30

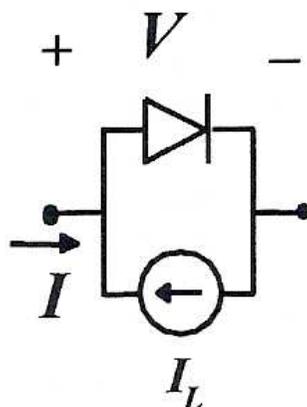


Figura 2.31

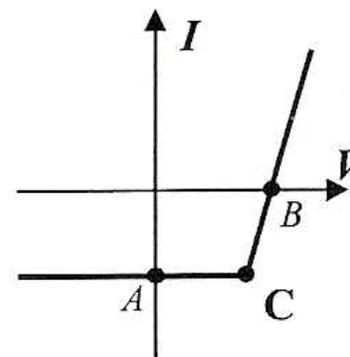


Figura 2.32

DATOS:

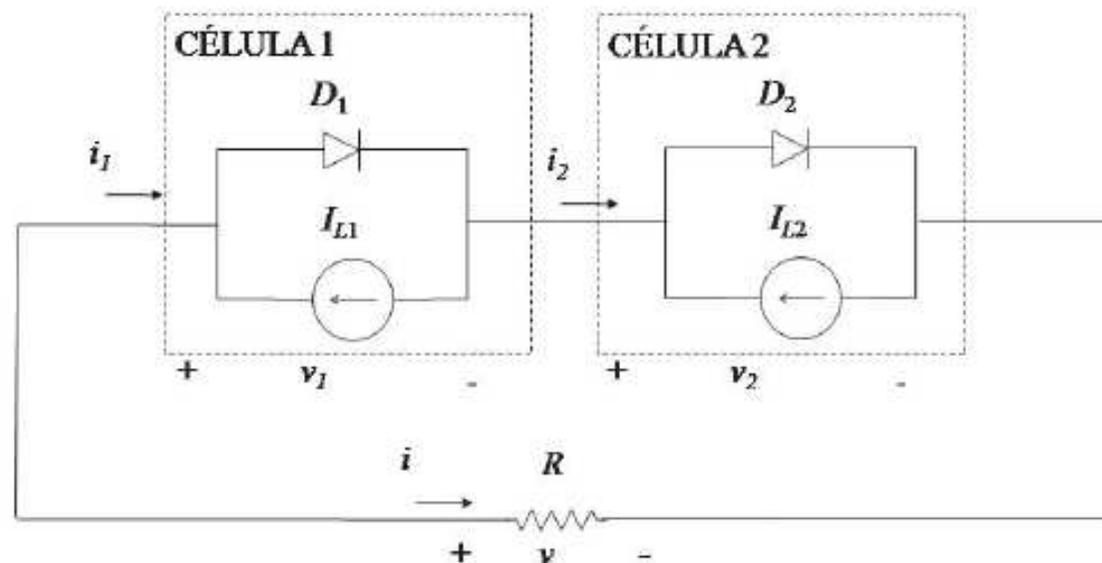
$I_L = 2$ A. Modelo lineal por tramos del diodo: $V_f = 0,5$ V; $r_f = 0,1$ Ω .

Ejercicio 1. Se conectan dos células solares iguales en serie y alimentan a una resistencia R , siendo el circuito equivalente del conjunto el representado en la Figura 1.

- a) Calcule el valor de la corriente i cuando $R = 0$ (corriente de cortocircuito, I_{SC}) y de la tensión v cuando $R \rightarrow \infty$ (tensión de circuito abierto, V_{OC}) del generador fotovoltaico formado por las dos células cuando la irradiancia que reciben ambas es $G = 0,1 \text{ W/cm}^2$, justificando el estado en el que se encuentran los diodos en cada caso (1 p.)

Accidentalmente se produce un sombreado parcial de la célula 1, de forma que su área iluminada se reduce a la mitad, permaneciendo la otra mitad en oscuridad. La iluminación de la célula 2 no sufre variación, y la irradiancia se mantiene estable en $G = 0,1 \text{ W/cm}^2$.

- b) Calcule el nuevo valor de la corriente de cortocircuito del generador ($i = I'_{SC}$ cuando $R = 0$), justificando el estado en el que se encuentran los diodos del circuito equivalente (1 p.)
- c) Justifique si en estas circunstancias la célula 1 está entregando o disipando potencia, indicando el valor de la misma (0,5 p.)



DATOS.

Modelo lineal por tramos de los diodos:
 $V_\gamma = 0,6 \text{ V}$, $r_F = 0,01 \Omega$

$A = 220 \text{ cm}^2$
 $S = 0,3 \text{ A/W}$

Figura 1

CONCEPTOS CLAVE DEL TEMA 3

- ➡ Estados del diodo: directa, inversa y interrupción
- ➡ Estática y dinámica, gran señal y pequeña señal
- ➡ Uso de modelos aproximados por tramos para el análisis en estática de circuitos con diodos
- ➡ Resolución de circuitos en estática por el “método analítico” (planteamiento de hipótesis del estado del dispositivo, resolución y verificación de hipótesis)
- ➡ Aproximación de pequeña señal