

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 2: Diodos

Patricio Parada

`pparada@ing.uchile.cl`

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

3 de agosto de 2009

Introducción I

- El diodo es un dispositivo semiconductor de dos terminales, cuya característica $i - v$ es
 - ▶ **exponencial** cuando se polariza en forma **directa**,
 - ▶ prácticamente **cero** cuando se polariza en forma **inversa**.
- Esta propiedad permite pasar de corriente alterna a continua, e implementar circuitos lógicos.
- Necesitamos un modelo matemático para poder analizar circuitos con diodos.



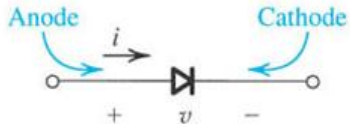
Introducción II

- Utilizaremos **heurísticas** para poder simplificar el análisis ("back of the envelope") y realizar diseño de "orden cero".
- Los diodos se pueden clasificar en seis tipos:
 - ▶ Diodos de juntura pn o np ,
 - ▶ Celdas solares,
 - ▶ Fotodiodos,
 - ▶ Diodos emisores de luz (LED),
 - ▶ Diodos de barrera Schotcky,
 - ▶ Diodos Zener.

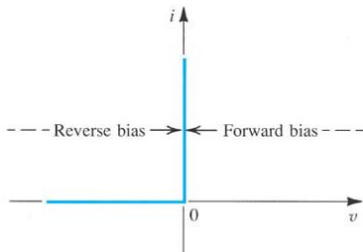


Diodo Ideal

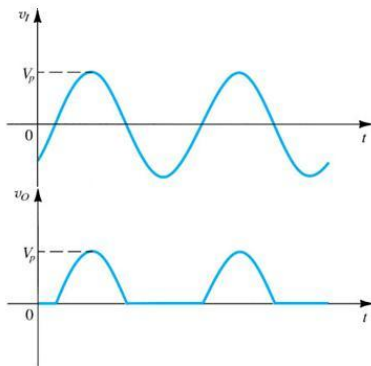
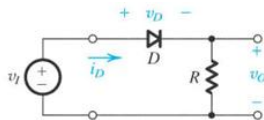
El símbolo para el diodo ideal es:



La característica $i - v$ es:

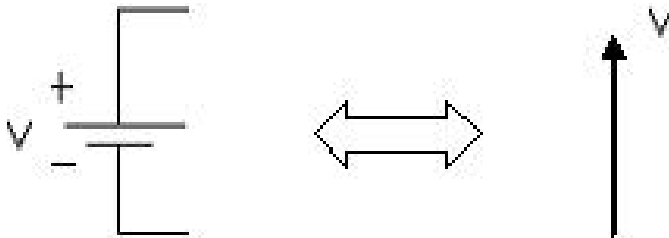


Aplicación: Rectificador



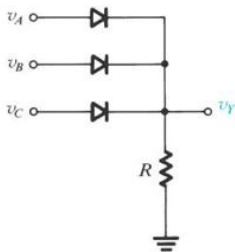
Aplicación: Compuertas Lógicas

Convención: una manera alternativa para dibujar fuentes de voltaje es mediante la equivalencia:

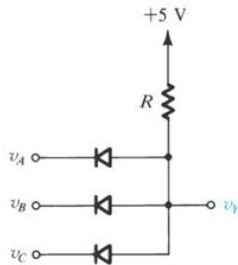


Aplicación: Compuertas Lógicas

Ejemplo



(a)

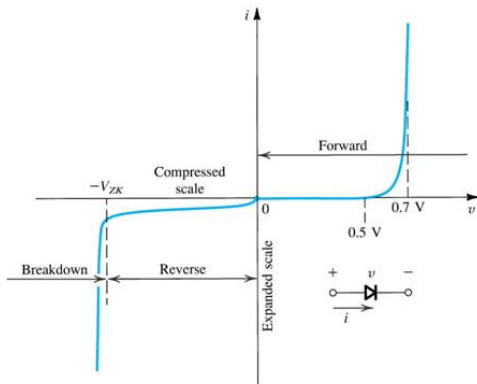


(b)

Diodo de Juntura pn

Se distinguen tres regímenes de operación del diodo de juntura:

- i) Polarizado en forma directa
- ii) Polarizado en forma inversa
- iii) Región de ruptura



Modelo de la Característica del Diodo de Polarización Directa I

El modelo clásico de física electrónica es

$$i = I_s(\exp^{v/nV_T} - 1),$$

donde I_s es la corriente de saturación y depende de T , y

$$V_T = \frac{kT}{q}, \quad (1)$$

que recibe el nombre de **voltaje de térmico**.

En esta expresión

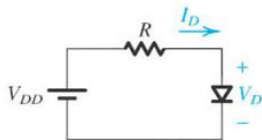
$$K = 1,38 * 10^{23} [\text{Joules/Kelvin}]$$

Modelo de la Característica del Diodo de Polarización Directa II

corresponde a la constante de Boltzmann, $T = 273^{\circ}\text{C}$,
 $q = 1,6 * 10^{-19}[\text{Coulomb}]$, que corresponde a la carga del electrón y
 $n \in [1, 2]$, dependiendo del material y la estructura del diodo.

Modelo Exponencial de Diodo de Juntura pn I

Al considerar el circuito:



Se tiene por LVK:

$$V_{DD} - i_D R - v_D = 0 \Rightarrow i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R}$$

Modelo Exponencial de Diodo de Juntura *pn* II

y por otro lado la característica $i - v$ del diodo:

$$i_D = I_S \exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right)$$

por lo tanto se obtiene la ecuación:

$$v_D = n \times V_T \times \log\left(\frac{V_{DD} - v_D}{RI_S}\right)$$

Modelo Exponencial de Diodo de Juntura pn III

Algoritmo

❶ Inicializar $v_D^{(0)} \in [0, V_{DD}]$.

❷ Calcular

$$v_D^{(k+1)} = nV_T \log\left(\frac{V_{DD} - v_D^{(k)}}{RI_S}\right). \quad (2)$$

❸ Si $|v_D^{(k+1)} - v_D^{(k)}| \leq \epsilon$, para algún $\epsilon \ll 1$ terminar. Si no, volver a Paso 2.

Método Gráfico

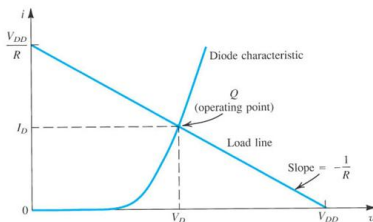
Se dibuja la curva:

$$i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R}$$

que corresponde a la **curva de carga**, y la curva característica del elemento:

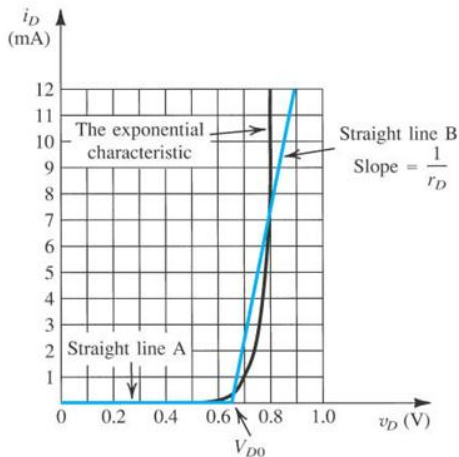
$$i_D = I_S \exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right)$$

y se busca la intersección entre ambas.

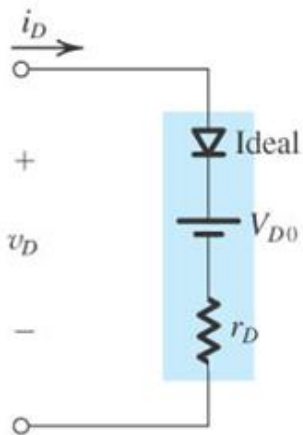


Modelo: Fuente + resistencia I

- Corresponde a una **aproximación lineal por segmentos** de la curva exponencial del diodo.
- Por lo tanto, se puede reemplazar el diodo por una fuente de voltaje de valor V_{D0} , conectado en serie con un diodo ideal y una resistencia r_D .

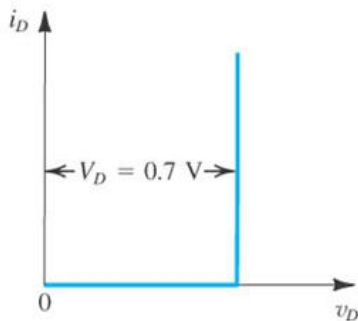


Modelo: Fuente + resistencia II

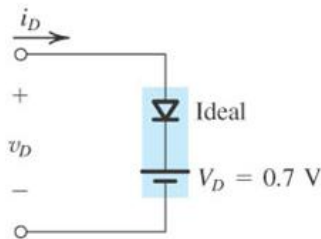


Modelo de caída constante de voltaje

Corresponde al modelo Fuente + Resistencia que hemos simplificado al asumir $r_D = 0$. Se tiene



(a)



(b)

El Modelo de Señal Pequeña I

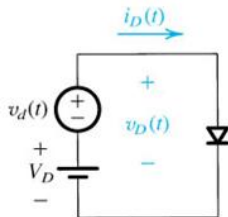
- Se considera la ecuación del diodo en polarización directa:

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)$$

- Ella permite determinar el punto de operación Q .
- El voltaje instantáneo entre los terminales del diodo es:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

El Modelo de Señal Pequeña II



- La corriente total por el diodo es:

$$\begin{aligned} i_D(t) &= I_S \cdot e^{v_D(t)/nV_T} \\ &= I_S \cdot e^{V_D/nV_T} \cdot e^{v_d(t)/nV_T} \\ &= I_D \cdot e^{v_d(t)/nV_T} \end{aligned} \tag{3}$$

El Modelo de Señal Pequeña III

- Si $v_d(t) \ll nV_T$, se puede obtener un modelo de señal pequeña para $i_D(t)$:

$$\exp \frac{x}{a} = 1 + \frac{1}{a}x + \frac{1}{2a^2}x^2 + O(x^3)$$

- Entonces

$$v_D(t) = I_D \left(1 + \frac{v_d(t)}{nV_T} \right)$$

para $|v_d(t)| \ll nV_T$

$$\Rightarrow i_D(t) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} \cdot v_d(t)$$

- Esta última ecuación corresponde al modelo de señal pequeña del diodo.

El Modelo de Señal Pequeña IV

- La condición típica que se pide a v_t para ser considerada señal pequeña es:

$$v_t < nV_T \cdot \underbrace{\frac{1}{5}}_{20\%} \quad (4)$$

$$\Rightarrow v_t = \begin{cases} < 5\text{mV} & \text{para } n = 1 \\ < 10\text{mV} & \text{para } n = 2. \end{cases}$$

- Definiremos entonces la **resistencia dinámica** del diodo como

$$r_D = \frac{nV_T}{I_D}. \quad (5)$$

- La linealidad del modelo nos permite separar el análisis del circuito en dos etapas:

El Modelo de Señal Pequeña V

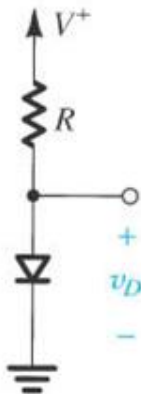
- 1 Cálculo del punto de operación Q .
- 2 Determinación de la respuesta de señal pequeña.

Ejemplo de Análisis de Circuito con Diodo

Considere en el circuito de la figura para el caso $R = 10 \text{ k}\Omega$.

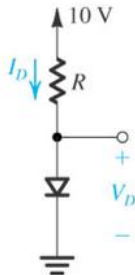
$$V^+ = 10 + \sin(2\pi \times 50t) [\text{V}].$$

Determine $v_D(t)$, asumiendo una caída de $0,7 \text{ [V]}$ a 1 [mA] y $n = 2$.



Solución I

Circuito DC:



Solución II

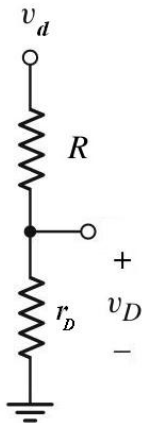
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{10 - 0,7}{10^4} = 0,93 \text{ [mA]}$$

Como $I_D = 0,93 \text{ [mA]} \sim 1 \text{ [mA]}$; podemos asumir $V_D = 0,7 \text{ [V]}$.
La resistencia dinámica del diodo en el punto de operación es:

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{2 \cdot 25}{0,93} = 53,8 \text{ [\Omega]}$$

El modelo de señal pequeña es:

Solución III



El valor máximo de $v_d = 1$ [V]

$$\Rightarrow v_D = \frac{r_d}{R + r_d} v_d$$

$$\Rightarrow v_D(\text{peak}) = 1 \cdot \frac{53,8}{10^4 + 53,8} = 5,35 \text{ [mV]}$$