

# PRÁCTICAS DE ELECTRÓNICA I.

4º FÍSICA

Juan Antonio Jiménez Tejada

## Índice

<b>1. MANEJO DE INSTRUMENTOS.</b>	<b>1</b>
<b>2. ANÁLISIS EN FRECUENCIA DE UN CIRCUITO.</b>	<b>3</b>
<b>3. COMPORTAMIENTO DEL DIODO. APLICACIONES.</b>	<b>6</b>
<b>4. EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS DE DISPOSITIVOS.</b>	<b>9</b>
4.1. DETERMINACIÓN DE LA VIDA MEDIA DE PORTADORES MINORITARIOS . . . . .	9
4.2. PERFIL DE IMPUREZAS EN UN SEMICONDUCTOR. . . . .	13
4.3. PARÁMETROS DE LA UNIÓN P-N. . . . .	14
4.4. EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS EN UN DISPOSITIVO DESCONOCIDO. . . . .	15
4.5. EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS EN UN TRANSISTOR BIPOLAR. .	18

# 1. MANEJO DE INSTRUMENTOS.

**OBJETIVO.** Familiarizarse con los instrumentos que se utilizarán en las prácticas de las asignaturas Electrónica I y II: generador de señales, fuente de alimentación, osciloscopio, multímetro y zócalo de montaje de circuitos. Familiarizarse con herramientas de análisis temporal de circuitos electrónicos: comportamiento ac, transitorios.

**IMPORTANTE: ES OBLIGATORIO LA PRESENTACIÓN DE TODOS LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y LA RESPUESTA A TODAS LAS PREGUNTAS PARA PODER REALIZAR LA SESIÓN DE LABORATORIO.**

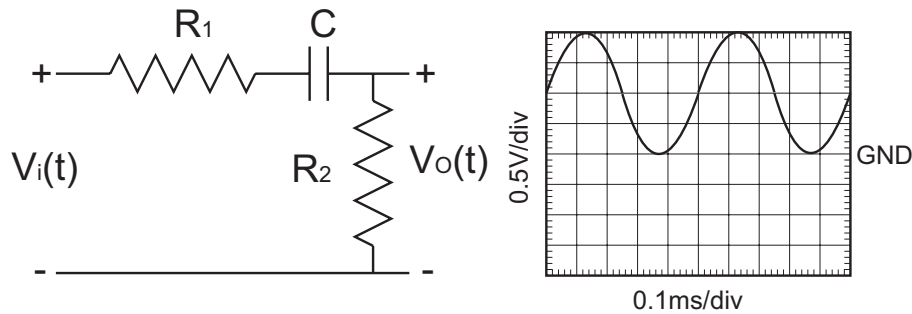


Figura 1:  $R_1 = 10K\Omega$ ,  $R_2 = 16K\Omega$ ,  $C = 2.2nF$

**MONTAJE 1.** Considérese el circuito de la figura 1. La señal de entrada de este circuito,  $V_i(t)$ , se muestra también en dicha figura, tal y como se vería en la pantalla del osciloscopio.

1. Trabajo teórico: Expresar en forma de función matemática la señal que se representa en la figura 1. Representar junto a la señal de entrada la señal que se obtendría a la salida,  $V_o(t)$ , indicando claramente los valores de la amplitud, el desfase respecto a la señal  $V_i(t)$  y el valor medio.
2. Trabajo de laboratorio:
  - Reproducir exactamente la señal de la figura 1 en el osciloscopio. Ver la señal en modo AC y DC. ¿Qué diferencia se observa? ¿Para que sirven estos dos modos de medida?
  - Medir la señal  $V_o(t)$  y comparar los resultados con lo obtenido teóricamente.
  - El objeto de este montaje es familiarizarse con los conceptos de offset, amplitud, frecuencia, forma de onda que se encontrarán en el panel frontal del generador de señal.

## MONTAJE 2.

1. Trabajo teórico: En el circuito que se muestra en la figura 2a se ha aplicado un escalón de tensión a la entrada  $V_i(t)$  entre 0 y 2 V.
  - Analizar el comportamiento transitorio de este circuito.
  - ¿Cuál es la expresión de  $V_o(t)$ ? Hacer una representación de esta función.

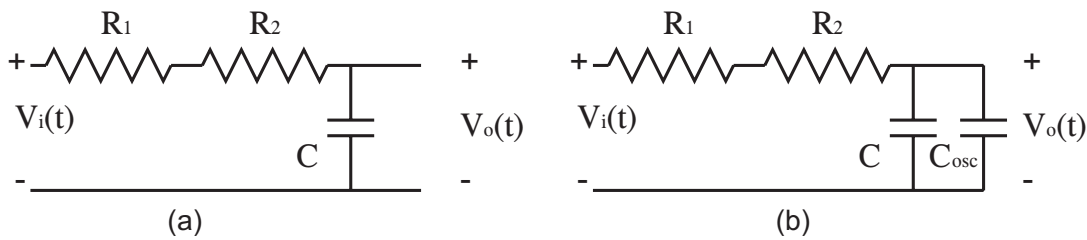


Figura 2:  $R_1 = 10K\Omega$ ,  $R_2 = 16K\Omega$ ,  $C = 33pF$ ,  $C_{osc} = 90pF$

- Encontrar un tiempo de respuesta característico que denominaremos  $\tau$ .
- Si tomamos el origen de tiempos en el momento de la conmutación ¿qué tiempo transcurre desde que la señal pasa por el 10 % de su valor máximo hasta que alcanza el 90 %? Relacionar este tiempo, que llamaremos de subida, con el tiempo característico  $\tau$ .

Para realizar la medida de la señal  $V_o(t)$  en el laboratorio se coloca una sonda del osciloscopio en paralelo con el condensador  $C$ . El efecto de la sonda es como si pusieramos en paralelo una capacidad  $C_{osc} \sim pF$  y una resistencia  $R_{osc} \sim M\Omega$ . Dichos valores no deben afectar a la medida salvo que en el propio circuito encontremos valores parecidos, como es el caso de las capacidades (Figura 2b).

- Calcular el tiempo característico  $\tau$  y el tiempo de subida para el circuito de la figura 2b.
2. Trabajo de laboratorio: Montar este circuito y aplicar cambios de tensión a la entrada entre 0 y 2 V. De las señales que proporciona el generador utilizar la que se considere más adecuada.
- Observar en el osciloscopio ambas señales.
  - Compararlo con el trabajo teórico.
  - Obtener el tiempo característico del transitorio haciendo uso de las medidas en el 10 % y 90 % de la señal.
  - Calcular la capacidad que introducen las sondas del osciloscopio.

El objeto de este montaje es: 1) familiarizarse con los selectores de fondo de escala del osciloscopio, utilizando los valores prefijados en la escala de tiempos (pues se van a medir tiempos) y los intermedios en la escala de tensiones (para situar la señal en los indicadores de pantalla del osciloscopio 0 % y 100 %) y 2) ver cómo se modifica un circuito por el hecho de medir sobre él.

## Referencias

- [1] López Villanueva, J.A., Jiménez Tejada, J.A., "Fundamentos de Teoría de Circuitos para Electrónica"
- [2] Jiménez Tejada, J.A., López Villanueva, J.A., "Problemas de Electrónica Básica"

## 2. ANÁLISIS EN FRECUENCIA DE UN CIRCUITO.

**OBJETIVO.** Familiarizarse con herramientas de análisis de circuitos electrónicos: diagrama de Bode, frecuencia de corte, concepto de impedancia de salida (equivalente Thevenin). **IMPORTANTE: ES OBLIGATORIO LA PRESENTACIÓN DE TODOS LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y LA RESPUESTA A TODAS LAS PREGUNTAS PARA PODER REALIZAR LA SESIÓN DE LABORATORIO.**

**TRABAJO TEÓRICO.** Considerar el circuito de la Figura 3.

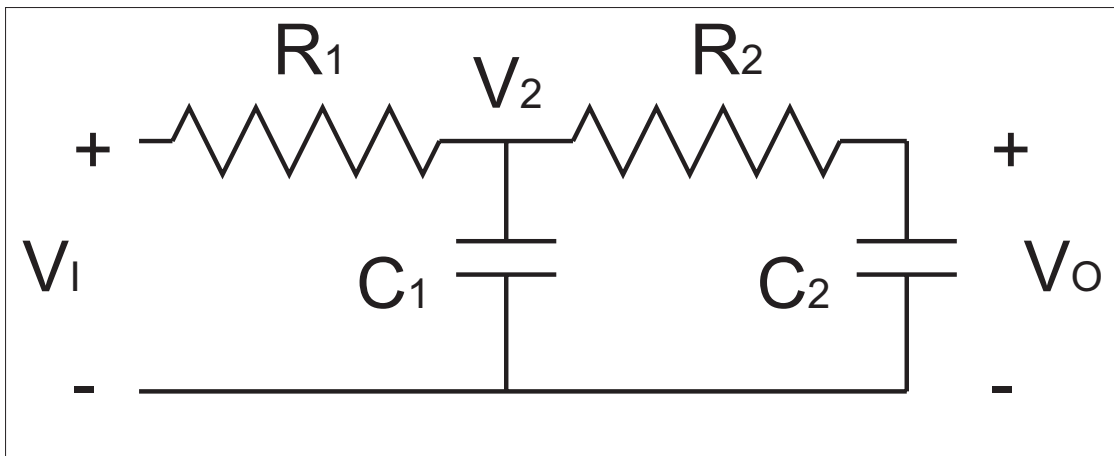


Figura 3:

- Calcular la función de transferencia  $H(s) = V_o(s)/V_I(s)$ .
- Calcular por separado  $V_o(s)/V_2(s)$  y  $V_2(s)/V_I(s)$ . Efectuar el producto y comprobar que se cumple:

$$H(s) = \frac{V_o V_2}{V_2 V_I}$$

- Para los apartados siguientes tened en cuenta las conclusiones extraídas en la práctica 1 acerca de los efectos de la medida.
- Representar el diagrama de Bode en módulo y fase de la función  $H(j\omega)$  que esperaréis encontrar en el laboratorio. ¿Cómo denominaréis a este circuito visto el diagrama de Bode?. Determinar la frecuencia de corte. Considerad que montáis un circuito con los siguientes elementos:  $R_1 = R_2 = R = 100K\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = 33pF$ .
- Calcular el equivalente Thevenin ( $V_T, Z_T$ ) a la salida del circuito (usad notación fasorial para  $V_T$ ). Si  $V_I(t) = 1V \cdot \text{sen}(2\pi ft)$ , ¿cuál será la tensión Thevenin  $V_T(t)$  que veríamos en el laboratorio a la frecuencia  $f = 3.0kHz$ ?, ¿y la impedancia Thevenin  $Z_T$ ?

- El proceso para obtener el equivalente Thevenin experimentalmente difiere del teórico. Se fundamenta en lo siguiente: Como la impedancia Thevenin es compleja,  $Z_T = R_T + jX_T$ , tenemos que obtener tres parámetros:  $V_T$ ,  $R_T$  y  $X_T$ . Por tanto, necesitamos realizar tres medidas:

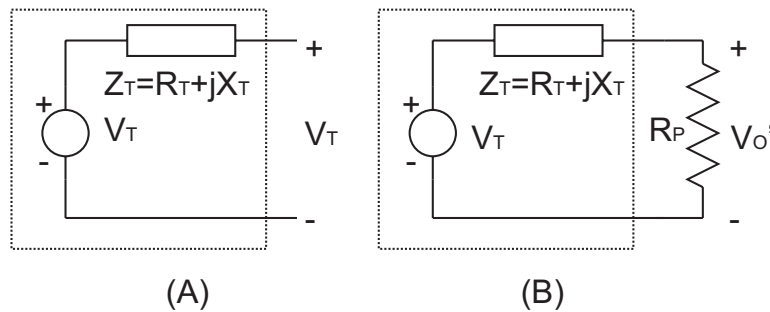


Figura 4: Medida experimental del equivalente Thevenin

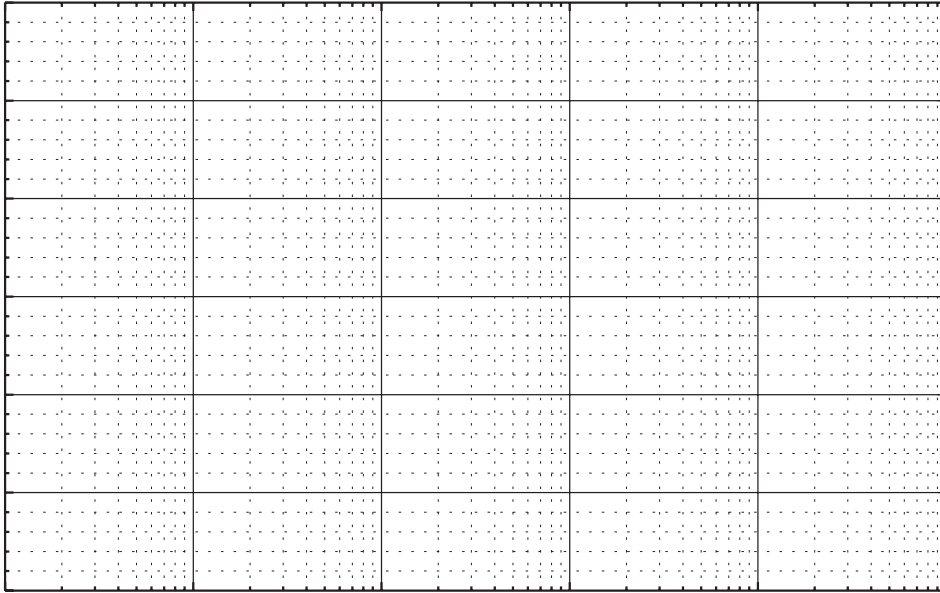
- Se mide la amplitud de la señal  $V_O(t)$  sin conectar ningún elemento adicional a la salida. Con ella conocemos la amplitud de  $V_T$  (Fig. 4a)
- Con la ayuda de una resistencia de prueba  $R_P$  conectada a la salida se vuelve a medir la amplitud de la señal a la salida,  $V_{O'}(t)$  (Fig. 4b).
- Se repite el paso anterior con otra resistencia  $R'_P$ , midiendo la amplitud de  $V_{O''}(t)$ . Obtener teóricamente las expresiones que permitan calcular  $R_T$  y  $X_T$  en función de las dos resistencias de prueba y de las tres amplitudes de tensión a la salida del circuito (Fig. 4b). Como se ha calculado teóricamente el valor de  $R_T$  y  $X_T$  a 3.0kHz ¿qué valores de resistencias de prueba debéis elegir para que  $|V_{O'}| = |V_T|/2$  y  $|V_{O''}| = |V_T|/4$ ?

## TRABAJO PRÁCTICO

- Montar el circuito de la figura 3 con  $R_1 = R_2 = 100K\Omega$  y  $C_1 = C_2 = 33pF$ .
- Obtener el diagrama de Bode experimental en módulo y fase de la función  $H(jw) = V_O(jw)/V_I(jw)$ . Entregar al final de la sesión representándolo en las figuras 5 y 6 junto con el resultado teórico. Para ello se realizarán a diferentes frecuencias las medidas siguientes. Tensión pico a pico de las señales de entrada,  $V_{I_{p.p.}}$ , y de salida,  $V_{O_{p.p.}}$ , y desfase entre ambas señales,  $\phi$ . Con estas medidas se representaran en función de la frecuencia las funciones  $20 \cdot \log(V_{O_{p.p.}}/V_{I_{p.p.}})$  y  $\phi$ .
- Obtener experimentalmente la impedancia Thevenin vista a la salida del circuito para la frecuencia  $f=3.0kHz$ .

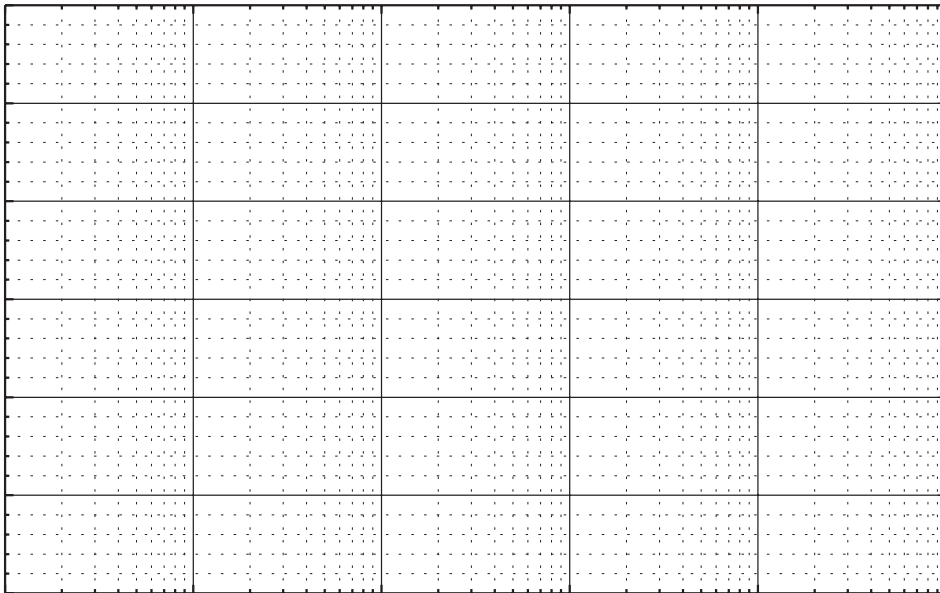
## Referencias

- [1] López Villanueva, J.A., Jiménez Tejada, J.A., "Fundamentos de Teoría de Circuitos para Electrónica"
- [2] Jiménez Tejada, J.A., López Villanueva, J.A., "Problemas de Electrónica Básica"



**f(Hz)**

Figura 5: Plantilla para representar el diagrama de Bode en módulo.



**f(Hz)**

Figura 6: Plantilla para representar el diagrama de Bode en fase.

### 3. COMPORTAMIENTO DEL DIODO. APLICACIONES.

**OBJETIVO.** Obtención de la característica I-V de una unión p-n e iniciación a los circuitos con diodos. **(PRESENTAR AL INICIO DE LA SESIÓN LAS RESPUESTAS A TODAS LAS CUESTIONES QUE SE PLANTEAN)**

**FUNDAMENTO TEÓRICO** La característica I-V de una unión p-n tiene la siguiente forma:

$$I = I_S \left( e^{qV/nKT} - 1 \right)$$

Si trabajamos con circuitos donde aparecen diodos, el manejo de relaciones no lineales puede dar lugar a que nos encontremos con ecuaciones trascendentes, complicando el análisis de dichos circuitos. Por ello, lo que se suele hacer, cada vez que nos encontremos con un dispositivo cuya relación I-V sea no lineal, es linealizar dicha relación. En el caso del diodo la curva I-V anterior puede linealizarse de acuerdo con el modelo representado en la figura 7:

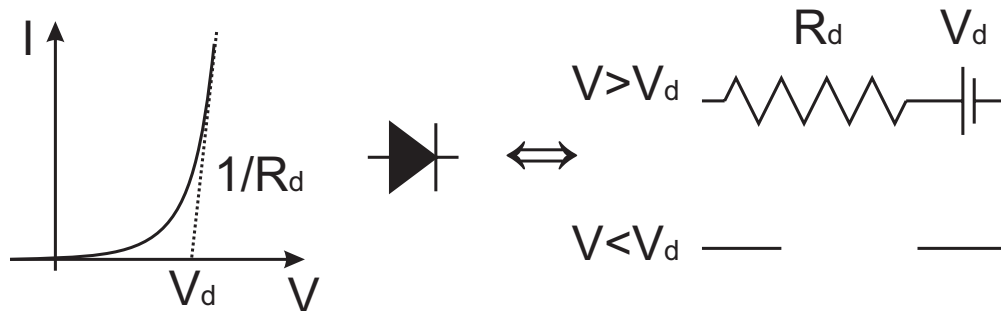


Figura 7: Aproximación de la curva del diodo por dos tramos rectos y modelo equivalente de cada uno de esos tramos.

La curva exponencial se ha aproximado por dos tramos rectos. La línea recta de pendiente elevada que se observa en la figura 7 puede modelarse por un circuito eléctrico que consta de una resistencia (la inversa de la pendiente de la recta) en serie con una fuente de tensión de valor  $V_d$  (el desplazamiento respecto del origen). En el rango de tensiones aplicadas al diodo inferiores a  $V_d$  el comportamiento del dispositivo es como el de un circuito abierto (resistencia muy elevada). Para diodos de silicio un valor típico para  $V_d$  es 0.6 V.

**Ejemplo de aplicación del modelo.** Consideremos el circuito de la figura 8. En él se polariza un diodo con una fuente de tensión  $V_i$  y una resistencia en serie. Es interesante calcular el valor de la tensión en el diodo,  $V_o$ , para distintos valores de la tensión de alimentación  $V_i$  (este cálculo se conoce como característica de transferencia, no confundir con la función de transferencia).

- Si  $V_i < V_d$  hemos visto en la figura 7 que el diodo se comporta como un circuito abierto. El circuito equivalente será el que se muestra en la figura 9a. En este caso, ¿cuánto vale la tensión  $V_o$ ?

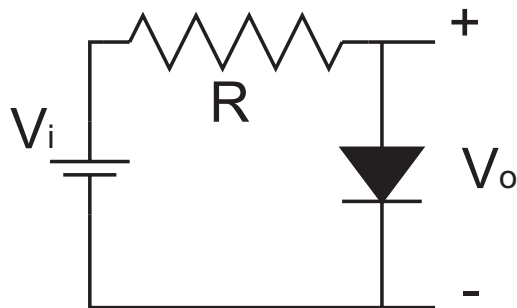


Figura 8:

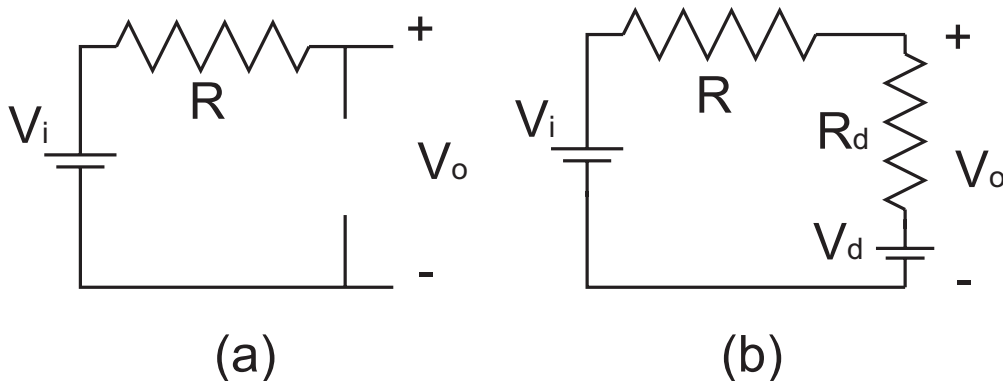


Figura 9: a) Circuito equivalente para  $V_i < V_d$ . b) Circuito equivalente para  $V_i > V_d$ .

- Si  $V_i > V_d$  el diodo se modela por una fuente de tensión de valor  $V_d$  en serie con una resistencia  $R_d$ . En este caso el circuito que habría que analizar sería el de la figura 9b.
  - ¿Cuánto vale ahora la tensión  $V_o$  en los extremos del diodo?
- Hacer una representación  $V_o - V_i$  donde  $V_i$  puede tomar cualquier valor real (considerar  $R_d \ll R$ ).
- Si la señal  $V_i$  fuera una función seno de amplitud 1V ¿cómo sería la salida  $V_o$ ? Representar entrada y salida conjuntamente

## REALIZACIÓN PRACTICA.

1. Trabajo teórico: Calcular la resistencia de protección  $R_{pro}$  que se debe poner siempre en serie con el diodo para que la potencia disipada por el dispositivo no supere los 0.25 W (Figura 10a).
2. Trabajo de laboratorio: Determinar los valores de los elementos del modelo lineal del diodo ( $R_d$ ,  $V_d$ ) a partir de la curva I-V. Para la medida de la curva se utilizaran dos métodos. Uno de ellos hace uso de un analizador de parámetros que proporciona directamente la curva I-V. El otro, aunque mucho más laborioso, tiene el objetivo de que os familiaricéis con los circuitos con diodos. Para ello tenéis que utilizar diversos valores de la resistencia  $R_{var}$  que se muestra en el circuito de la figura 10b y medir para cada valor la tensión que cae en los extremos del diodo y la corriente que circula



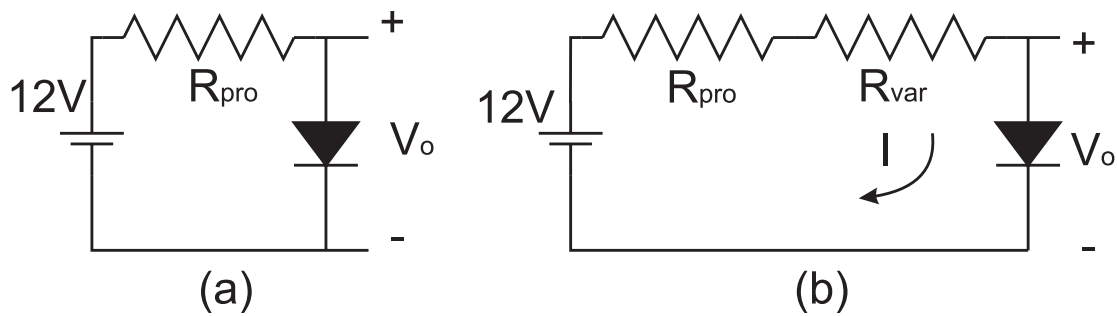


Figura 10:

por el circuito (para ello se mide la tensión en la resistencia  $R_{var}$ ). Tomar sólo tres valores de  $R_{var}$  y comprobar que los resultados coinciden con los obtenidos por el primer método (este se hará en la sesión de laboratorio 4).

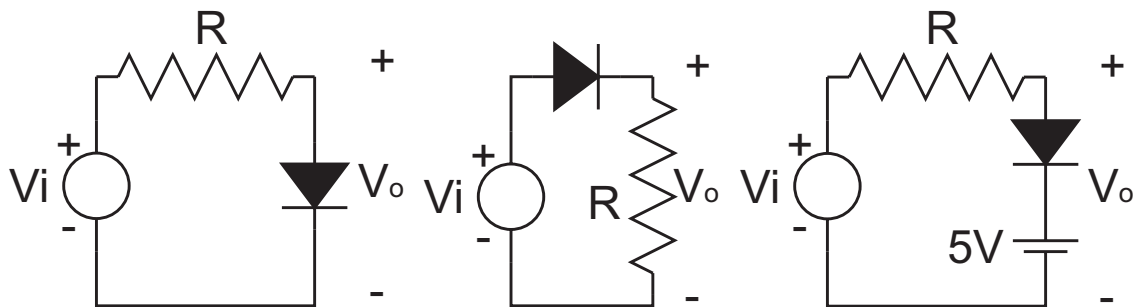


Figura 11:

3. Trabajo teórico: Obtener la característica de transferencia ( $V_o - V_i$ ) de los siguientes circuitos de la figura 11. Si se introduce una señal senoidal a la entrada ¿qué se observa a la salida?
4. Trabajo de laboratorio: Medir experimentalmente dichas características (se aconseja utilizar el modo XY del osciloscopio) y comparar con la teoría. Comparar también con la teoría el comportamiento temporal introduciendo a la entrada una señal seno.

## Referencias

- [1] Jiménez Tejada, J.A., López Villanueva, J.A., "Problemas de Electrónica Básica"

## 4. EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS DE DISPOSITIVOS.

### 4.1. DETERMINACIÓN DE LA VIDA MEDIA DE PORTADORES MINORITARIOS

**OBJETIVO** Determinación de la vida media de los portadores minoritarios en una unión p<sup>+</sup>-n analizando un transitorio de corte. Análisis de modelos que calculan el tiempo de almacenamiento en relación con la vida media.

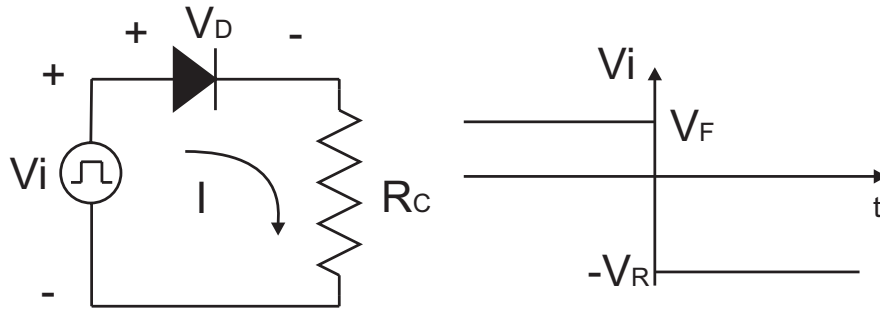


Figura 12: Aplicación de un escalón de tensión de directa a inversa a un diodo.

**FUNDAMENTO TEÓRICO** Si un diodo está polarizado en directa mediante una fuente de alimentación de valor  $V_F$  y una resistencia en serie  $R$ , y de forma brusca se cambia el valor y el sentido de esta fuente de tensión a  $-V_R$ , el diodo evoluciona hacia inversa, hacia el estado estacionario. Para estudiar dicha evolución debemos fijarnos en la carga almacenada en exceso en las zonas neutras de la unión. Consideraremos una unión p<sup>+</sup>-n y por tanto nos fijaremos sólo en el almacenamiento de huecos en la zona neutra n (Fig 13a).

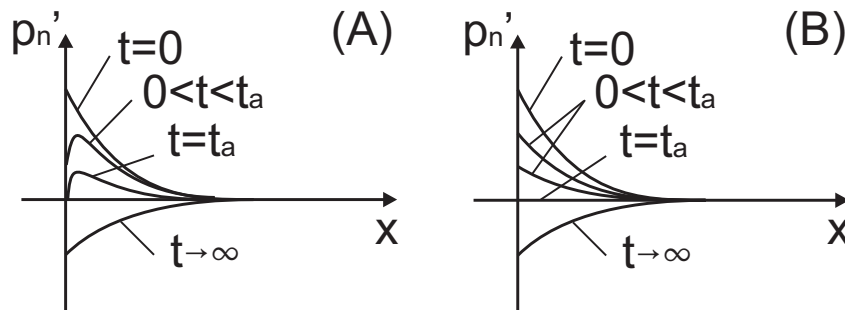


Figura 13: Evolución del exceso de huecos en la zona neutra n. (a) Caso real ( $p_n(0, t_a) = 0$ ) (b) Aproximación ( $Q_p(t_a) = 0$ )

Antes de aplicar el escalón de tensión, para  $t < 0$  la corriente que circula por el diodo vale:

$$I_F = \frac{V_F - V_D}{R} \approx \frac{V_F}{R} \quad (1)$$

inmediatamente después de la aplicación de este escalón cambia a :

$$I_R = \frac{-V_R - V_D}{R} \approx \frac{V_R}{R} \quad (2)$$

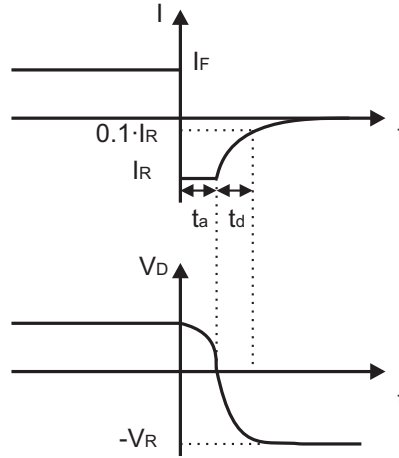


Figura 14: Transitorios de corriente que circula por el circuito y tensión que cae en los extremos del diodo

La razón por la que aparece esta corriente elevada en inversa es que la carga almacenada (y por lo tanto la tensión en los extremos del diodo) no pueden cambiar bruscamente (Fig. 13a). La relación entre la carga almacenada y tensión en los extremos del diodo viene dada por:

$$V_D(t) = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{p_n(0, t)}{p_{n0}} \right) \quad (3)$$

Mientras se cumpla la relación  $p_n(0, t) > p_{n0}$ ,  $V_D(t)$  es del orden de  $KT/q$  y la corriente es constante (con valor  $I_R$ ). Cuando la carga existente en la zona neutra sea inferior a la de equilibrio,  $p_{n0}$ , en los extremos de la unión aparece una tensión negativa, con lo que la corriente que circula por el diodo tiende a cero. Mientras la tensión y la carga almacenada en la zona neutra no pueden cambiar bruscamente, la corriente sí puede hacerlo con un simple cambio de pendiente de la distribución de huecos en la zona neutra,  $p_n(x, t)$ , en  $x = 0$ . Esta evolución temporal viene representada por un tiempo característico denominado tiempo de recuperación,  $t_r$ , y se define como el tiempo en el que la corriente alcanza el 10% de su valor inicial  $I_R$ . Dicho tiempo se descompone, como acabamos de ver, en otros dos: el tiempo de almacenamiento,  $t_a$ , que corresponde con la fase de corriente constante, y el tiempo de caída,  $t_d$ , que corresponde con la fase donde la corriente decrece a cero. Ambos tiempos dependen tanto del tiempo de vida media de los portadores minoritarios en las dos regiones de la unión, n y p, como de los niveles de tensión  $V_F$  y  $V_R$ . El objeto de esta práctica es calcular dicha relación. Seguimos admitiendo que se trata de una unión p<sup>+</sup>-n, y por tanto trabajaremos únicamente con el tiempo de vida media de los huecos. Para ello vamos a hacer un análisis aproximado utilizando la expresión del modelo de control de carga. Dicha expresión se obtiene integrando la ecuación de continuidad para los huecos en la zona neutra n:

$$-\frac{dJ_p(x, t)}{dx} = \frac{p'_n(x, t)}{\tau_p} + \frac{\partial p'_n(x, t)}{\partial t} \quad (4)$$

y definiendo la variable:

$$Q_p(t) = qA \int_0^\infty p'_n(x, t) dx \quad (5)$$

El resultado es:

$$\frac{dQ_p}{dt} + \frac{Q_p}{\tau_p} = i(t) \quad (6)$$

Los términos que aparecen en la ecuación anterior tienen el siguiente significado. En estado estacionario la corriente que circula por la unión debe mantener la neutralidad y suplir la recombinación:

$$I_p = \frac{Q_p}{\tau_p} \quad (7)$$

Cuando varía la tensión aplicada hay dos términos de corriente:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{neutralidad} \\ \text{modificar carga} \end{array} \quad \begin{array}{l} Q_p/\tau_p \\ dQ_p/dt \end{array} \right] \rightarrow I_p = \frac{Q_p}{\tau_p} + \frac{dQ_p}{dt}$$

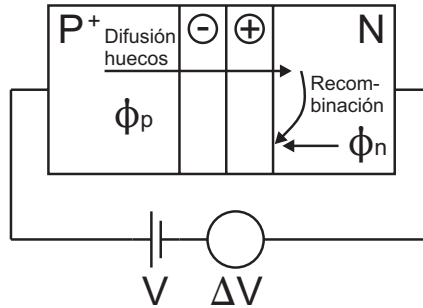


Figura 15:

La ecuación diferencial (6) se resuelve imponiendo como condición inicial:

$$Q_p(0) = I_F \tau_p \quad (8)$$

la solución a dicha ecuación resulta ser:

$$Q_p = (I_F - I_R) \tau_p e^{-\frac{t}{\tau_p}} + I_R \tau_p \quad (9)$$

El tiempo de almacenamiento se ha definido como el tiempo transcurrido hasta que la tensión en los extremos del diodo se hace cero (o la densidad de huecos en  $x = 0$  es cero). Para obtener una expresión analítica del tiempo de almacenamiento se suele emplear la aproximación de estado cuasi estacionario. Dicha aproximación considera que la densidad de huecos no cambia su pendiente en  $x = 0$  durante toda su evolución temporal, como se observa en la Figura 13b. Con esa dependencia temporal en  $t = t_a$  la diferencia de potencial en los extremos del diodo es cero,  $p_n(0, t_a) = 0$  y  $Q_p(t_a) = 0$ . Esta última condición nos permite calcular el tiempo de almacenamiento haciendo  $t = t_a$  en la última ecuación, obteniéndose definitivamente:

$$t_a = \tau_p \ln \left( 1 - \frac{I_F}{I_R} \right) \quad (10)$$

Valores más realistas, tanto para el tiempo de almacenamiento como para el tiempo de caída, se obtienen resolviendo la ecuación de continuidad. Las soluciones las propuso Kingston<sup>1</sup> y vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_a}{\tau_p}} = \frac{1}{1 - \frac{I_R}{I_F}} \quad (11)$$

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_d}{\tau_p}} + \frac{e^{-\frac{t_d}{\tau_p}}}{\sqrt{\pi \frac{t_d}{\tau_p}}} = 1 - 0.1 \left( \frac{I_R}{I_F} \right) \quad (12)$$

**REALIZACIÓN PRÁCTICA** Calcular el tiempo de vida media de los huecos en una unión  $p^+ - n$  probando con diferentes niveles de tensión. Se deberá comprobar a su vez que el tiempo de almacenamiento varía con los valores de estas tensiones. Utilizar las expresiones resultantes del modelo de control de carga y de la ecuación de continuidad. Comparar los resultados. Para ello montar el circuito de la Figura 12. Aplicar pulsos a la entrada usando diferentes valores de las tensiones en directa e inversa. Medir para cada pulso de entrada la corriente en directa  $I_F$  y la corriente en inversa  $I_R$  y los tiempos de almacenamiento y caída. Recordar que para medir corrientes se mide la diferencia de potencial en la resistencia  $R$ . (Usar como diodo un 1N4004)

## Referencias

- [1] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2ª Edición, Wiley Interscience, 1981.
- [2] B.G. Streetman, S, Banerjee, "Solid State Electronic Devices", 5ª Edición Prentice Hall, 2000.

V(V)	C(pF)	V(V)	C(pF)
0	16.02	14	4.54
0.2	13.15	15	4.43
0.4	11.67	16	4.35
0.6	10.83	17	4.27
0.8	10.34	18	4.18
1	9.83	19	4.12
2	8.19	20	4.05
3	7.3	21	3.98
4	6.72	22	3.92
5	6.26	23	3.87
6	5.92	24	3.81
7	5.66	25	3.77
8	5.43	26	3.71
9	5.22	27	3.66
10	5.06	28	3.62
11	4.91	29	3.58
12	4.77	30	3.54
13	4.65		

Tabla 1: Medidas de capacidad en alta frecuencia en una unión  $p^+ - n$

## 4.2. PERFIL DE IMPUREZAS EN UN SEMICONDUCTOR.

**OBJETIVO.** Obtención del perfil de impurezas en una unión  $p^+ - n$  de silicio a partir de medidas de capacidad en alta frecuencia.

**REALIZACIÓN PRACTICA.** A partir de unas medidas de capacidad en alta frecuencia en función de la tensión inversa aplicada a una unión  $p^+ - n$  (Tabla 1) determinar el perfil de impurezas en la región  $n$  de la unión. Para ello considerar la relación que existe entre el perfil de impurezas y la capacidad de la unión cuando el diodo está polarizado en inverso:

$$N(x_n) = \frac{2}{\epsilon_s A^2 q \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{C^2} \right)}$$

$$x = \frac{\epsilon A}{C}$$

Estimar el área del dispositivo de acuerdo con las dimensiones del encapsulado del diodo (hojas características) y de modo que la concentración de impurezas lejos de la unión caiga en el rango  $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

## Referencias

- [1] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2ª Edición, Wiley Interscience, 1981.
- [2] P. Cartujo, Electrónica I (Física), Unidades didácticas UNED.

### 4.3. PARÁMETROS DE LA UNIÓN P-N.

**OBJETIVO.** Obtención de la curva característica intensidad-tensión (I-V) para un diodo. Determinación de los parámetros correspondientes al modelo lineal y a la característica real.

**FUNDAMENTO TEÓRICO.** La característica I-V de un diodo:

$$I = I_S \left( e^{qV/nKT} - 1 \right)$$

se puede aproximar (cuando haya conducción) mediante un modelo lineal correspondiente a una fuente de tensión en serie con una resistencia  $R_d$  (Práctica 3).

#### **REALIZACIÓN PRÁCTICA.**

1. Encontrar los valores del modelo lineal del diodo ( $V_d$ ,  $R_d$ ) a partir de la curva I-V experimental obtenida en el trazador de curvas.
2. Encontrar también los valores de los parámetros  $I_S$  y  $n$  mediante ajuste de la característica I-V experimental.

#### 4.4. EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS EN UN DISPOSITIVO DESCONOCIDO.

**OBJETIVO.** Determinación de los parámetros que modelan las características corriente-tensión en un dispositivo electrónico desconocido. Identificar de qué dispositivo se trata.

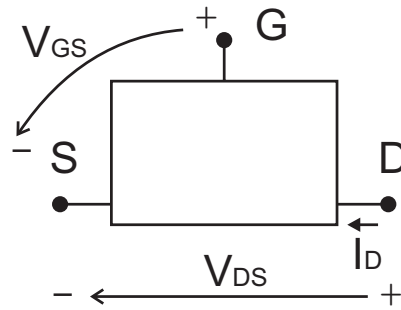


Figura 16:

**FUNDAMENTO TEÓRICO** Consideremos un dispositivo del que sólo conocemos que tiene tres terminales: G "puerta", D "drenador" y S "fuente". Aplicando diferencias de potencial entre sus terminales, en concreto  $V_{GS}$  y  $V_{DS}$  se observa una corriente que entra por el terminal de drenador y sale por el de fuente, con el mismo valor en ambos terminales, y que llamaremos  $I_D$  (Figura 16). Se puede observar también que la relación entre esta corriente y las dos tensiones anteriores vienen descritas por la siguiente función:

$$I_D = \beta \left[ 2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 \right] \quad V_{DS} < V_{DS_{sat}} \quad (13)$$

$$I_D = \beta(V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda(V_{DS} - V_{DS_{sat}})) \quad V_{DS} > V_{DS_{sat}} \quad (14)$$

donde  $V_{DS_{sat}}$  es el valor de  $V_{DS}$  que maximiza la ecuación 13:

$$\begin{aligned} V_{DS_{sat}} &= V_{GS} - V_T \\ I_{DS_{sat}} &= I_D(V_{DS} = V_{DS_{sat}}) \end{aligned}$$

Si la tensión  $V_{DS}$  es tal que la corriente viene descrita por la ecuación (13) se dice que el dispositivo está trabajando en la **región triodo**. Si por el contrario la corriente viene descrita por la ecuación (14) decimos que el dispositivo se encuentra en  **saturación**.

$\beta$ ,  $V_T$  y  $\lambda$  son parámetros que describen a este dispositivo y sus valores son los que deberemos encontrar en esta práctica.  $V_T$  se define como tensión umbral,  $\lambda$  es la pendiente de la curva en saturación y  $\beta$ , cuando identifiquemos el dispositivo, veremos que se relaciona con parámetros internos del mismo:

$$\beta = \frac{k' W}{2 L}, \quad k' = \mu_n C_{ox}$$

La ecuación (13) se puede linealizar si  $V_{DS}$  toma valores pequeños. De esta forma, para valores bajos de la tensión de drenador  $V_{DS}$ , y manteniendo ésta fija, la representación  $I_D$  en función de  $V_{GS}$  proporciona una curva donde el punto de máxima pendiente guarda información de la tensión umbral  $V_T$  (figura 17):

$$I_D \approx \frac{k' W}{2 L} 2(V_{GS} - V_T)V_{DS} \quad V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$$



Como estamos trabajando con un modelo hay ciertas regiones que se apartan del mismo. Se suele introducir el parámetro corriente umbral  $I_T$  (véase figura 17) para caracterizar la región de tensiones  $V_{GS}$  próximas a la tensión umbral, donde el modelo dice que  $I_D = 0$ . Determinéese también este nuevo parámetro.

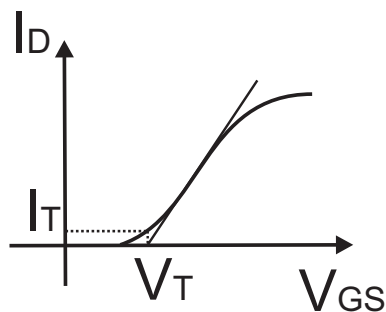


Figura 17:

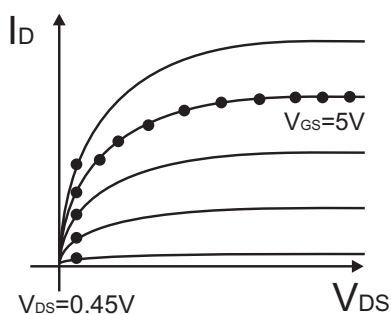


Figura 18:

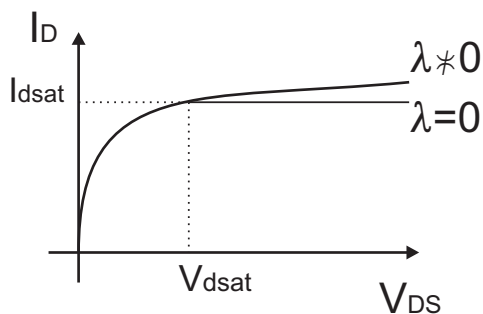


Figura 19:

## REALIZACIÓN PRÁCTICA

1. Para un valor bajo de la tensión de drenador  $V_{DS}$  (0.45V en la figura 18, aunque no tiene por qué tomarse ese necesariamente) medir  $I_D$  para distintos valores de  $V_{GS}$ . Extraer de esa curva los parámetros  $V_T$ ,  $I_T$  y  $(k'/2) \cdot W/L$
2. Medir ahora  $I_D$  en función de  $V_{DS}$  medida a un valor fijo de  $V_{GS}$  (5V en la figura 18, a modo de ejemplo).

Para valores altos de  $V_{DS}$  (región de saturación, Figura 19) extraer  $\lambda$ , conocido como parámetro de modulación de la longitud del canal.

3. Introduciendo los parámetros obtenidos en las ecuaciones del transistor en la zona triodo y saturación comparar gráficamente dichas curvas con la medida experimental  $I_D - V_{DS}$ .
4. Normalmente este modelo tan simple no reproduce correctamente las medidas experimentales. (Comprobar que es cierto). Para mejorar el modelo es necesario introducir un parámetro adicional,  $\delta$ , en la característica I-V tal y como mostramos a continuación.

$$I_D = \frac{K' W}{2 L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - (1 + \delta)V_{DS}^2] \quad V_{DS} < V_{DS_{sat}}$$

$$I_D = \frac{K' W}{2 L} \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{1 + \delta} (1 + \lambda(V_{DS} - V_{D_{sat}})) \quad V_{DS} > V_{D_{sat}}$$

$$\delta = \frac{\gamma}{2\sqrt{2}\phi_F} \quad V_{D_{sat}} = \frac{(V_{GS} - V_T)}{(1 + \delta)} \quad \gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_D}}{C_{ox}}$$

Conocido el valor de  $\beta$  y  $V_T$ , calculado en el apartado 1, se puede calcular  $\delta$  de la pendiente de la representación  $I_D/V_{DS}$  en función de  $V_{DS}$  (curva del apartado 2 restringida a la zona lineal). El nuevo valor de  $\lambda$  se obtiene de la representación  $I_D - V_{DS}$  en la región de saturación.

5. Comparar ahora la curva  $I_D - V_{DS}$  experimental con las nuevas curvas teóricas (zona triodo y saturación) corregidas con el parámetro  $\delta$ . ¿Se obtiene un mejor ajuste?

## 4.5. EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS EN UN TRANSISTOR BIPOLAR.

**OBJETIVO.** Medida de curvas características de un transistor bipolar. Determinación de las ganancias en corriente en gran señal ( $\beta_F$ ) y en pequeña señal  $h_{fe}$ .

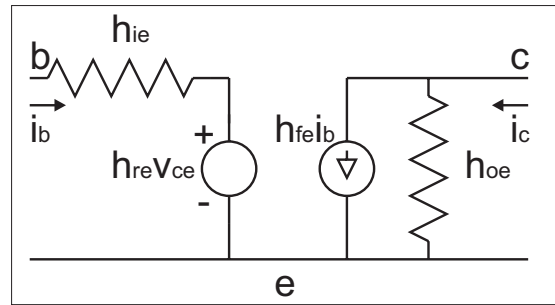


Figura 20:

**FUNDAMENTO.** En la figura 20 se muestra el modelo de parámetros h (pequeña señal) de un transistor bipolar en emisor común. En él se ve como la corriente de colector se relaciona con la corriente de base y la tensión colector emisor:

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \quad (15)$$

$$h_{fe} = \left( \frac{i_c}{i_b} \right)_{v_{ce}=0} = \left( \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE}=cte} \quad (16)$$

$$h_{oe} = \left( \frac{i_c}{v_{ce}} \right)_{i_b=0} = \left( \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B=cte} \quad (17)$$

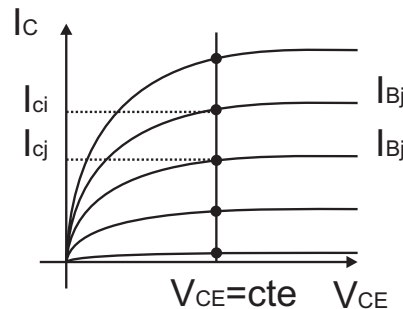


Figura 21:  $h_{fe} = (I_{Ci} - I_{Cj}) / (I_{Bi} - I_{Bj})$ ,  $I_C = (I_{Ci} + I_{Cj}) / 2$

**REALIZACIÓN PRÁCTICA.** Obtención de los parámetros  $h_{FE} (\equiv \beta_F)$  y  $h_{fe}$  del transistor a partir de curvas  $I_C - V_{CE}$  (Figura 21).

- Las curvas  $h_{FE}$  y  $h_{fe}$  se deben representar en función de  $I_C$  con  $V_{CE}$  tomando un valor constante (Figura 22).

- Para realizar esta práctica es necesario fijarse como los fabricantes de transistores bipolares representan estos mismos parámetros en las hojas características y posteriormente compararlos entre sí. En las dos gráficas, con los resultados experimentales obtenidos, representar también los valores que proporciona el fabricante para la serie de transistores BC546-BC548.
- Las curvas aquí medidas serán utilizadas en las prácticas de Electrónica II

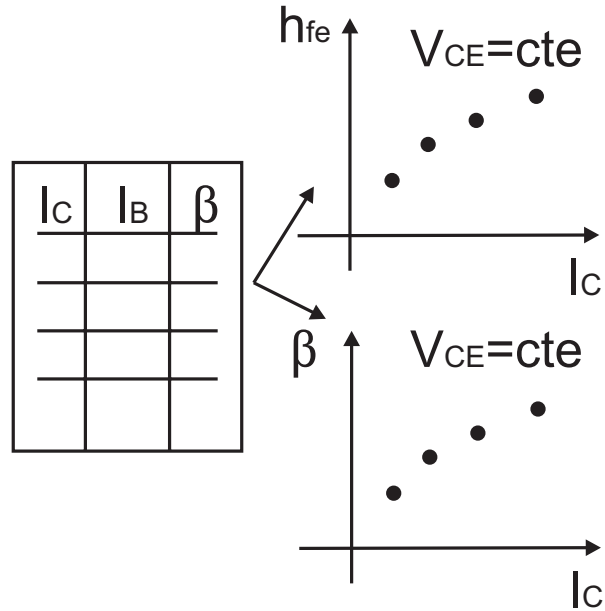


Figura 22:

## Referencias

- [1] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2ª Edición, Wiley Interscience, 1981.