

Transistores Bipolares

El término transistor es la contracción de **transfer resistor**, es decir, de resistencia de transferencia. El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que se utiliza como amplificador o conmutador electrónico. El transistor se utiliza, por tanto, como amplificador, como oscilador, como rectificador y como conmutador on-off.

Es un componente clave en nuestra civilización ya que toda la electrónica moderna los utiliza en: circuitos integrados, microprocesadores, controladores de motores eléctricos de corriente continua y, actualmente, están integrados a todos los dispositivos electrónicos de utilización diaria: radios, televisores, grabadores, etc.

Contenido

- 4.1 Reseña histórica
- 4.2 Conceptos básicos
- 4.3 Constitución física
- 4.4 Modelo de comportamiento
- 4.5 Estados del transistor
 - 4.5.1 Estado activo directo. Configuración emisor común
 - 4.5.2 Estado cortado
 - 4.5.3 Estado saturado
 - 4.5.4 Estado activo inverso
- 4.6 Modulación de la anchura de la base del transistor. Efecto Early
- 4.7 Variación de la ganancia de corriente
- 4.8 Bibliografía

4.1 Reseña histórica



(1910-1989) **William Bradford Shockley**, físico estadounidense, premiado con el Nobel y coinventor del transistor. Nació en Londres de padres estadounidenses. Trabajó en los laboratorios de la Compañía Telefónica Bell desde 1936 hasta 1956, año en que fue nombrado director de la Shockley Transistor Corporation en Palo Alto, California (su propia empresa). Dio conferencias en la Universidad Stanford desde 1958 y fue profesor de ingeniería en 1963. Sus investigaciones sobre los semiconductores le llevaron al desarrollo del **transistor** en 1948. Por esta investigación compartió en 1956 el Premio Nobel de Física con sus asociados John Bardeen y Walter H. Brattain.



(1902-1987) **Walter Houser Brattain**, físico y premio Nobel estadounidense, nacido en Atoyac, China. Después trabajó como físico en la división de radio del Instituto Nacional de Modelos y Tecnología. En la época en que trabajaba allí, él y los físicos estadounidenses William Shockley y John Bardeen inventaron un pequeño dispositivo electrónico llamado **transistor**. Se anunció por primera vez en 1948 y se terminó en 1952. Por su trabajo con los semiconductores y por el descubrimiento del transistor, Brattain compartió con Shockley y Bardeen en 1956 el Premio Nobel de Física.



(1908-1991) **John Bardeen**, físico y premio Nobel estadounidense, nació en Madison (Wisconsin) y estudió en las universidades de Wisconsin y Princeton. Como físico investigador (1945-1951) en los Laboratorios Telefónicos Bell, fue miembro del equipo que desarrolló el **transistor**. Por este trabajo, compartió en 1956 el Premio Nobel de Física con dos compatriotas, los físicos William Shockley y Walter H. Brattain. En 1972 compartió nuevamente el Premio Nobel de Física con los físicos estadounidenses Leon N. Cooper y John R. Schrieffer por el desarrollo de una teoría que explicaba la **superconductividad**. Bardeen fue el primer científico que ganó dos premios Nobel en la misma disciplina.



(1922-2004) **James M. Early**, ingeniero estadounidense. Se doctoró en Ingeniería eléctrica en la Universidad de Ohio en 1951, a partir de entonces, estuvo 18 años trabajando en los Laboratorios de la compañía Bell. Posteriormente trabajó para Fairchild, donde inventó diferentes dispositivos que concluyeron con la cámara CCD. Early desarrolló los transistores para el primer satélite de comunicaciones Americano, el **Telstar I**.



A mediados de los 50, **Raytheon Manufacturing Company** distribuía comercialmente el primer transistor de Germanio, al precio de 99 centavos de dólar. El modelo fue el **CK722**. La foto muestra uno de ellos, que se fabricó la semana 17 del año 1956 (617). Aún hoy, se sigue esta nomenclatura en la fabricación de los circuitos integrados, indicando la semana y el año de fabricación de los mismos.



(1921) **John Louis Moll**, se doctoró en Ingeniería Eléctrica en la Universidad estatal de Ohio en 1952, trabajando en multitud de empresas como RCA, BTL, Fairchild, Hewlett-Packard, etc. Su trabajo más conocido es el **modelado del transistor bipolar** realizado junto a Jewell J. Ebers.



(1921) **Jewell James Ebers**, contribuyó de forma decisiva al modelo del transistor bipolar junto con John L. Moll. El IEEE estableció en 1971 un premio en su honor. El primer ganador de este galardón fue su compañero de desarrollo del modelo del transistor bipolar John L. Moll.

4.2 Conceptos básicos

Antecedentes

Para comprender algunas de las ecuaciones que conforman el funcionamiento del transistor, se hace necesario recordar algunas ecuaciones y relaciones previas.

Relación de Einstein

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{kT}{q}$$

D_p, D_n = Constante de difusión de huecos y electrones.

μ_n, μ_p = Movilidad de electrones y huecos.

V_T = Tensión térmica = 25.84mV \approx 26mV a 300K.

k = Constante de Boltzman \approx 1.38x10⁻²³ J/K.

T = Temperatura absoluta \approx 27°C = 300K.

q = Carga del electrón \approx 1.602x10⁻¹⁹ C.

Ecuación del diodo, ley del diodo o ecuación de Shockley

Teniendo en cuenta la suma de corrientes de electrones y huecos, la corriente que circula por un diodo viene definida por:

$$i_F = A n_i^2 q \left[\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right] \left(e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right)$$

A = Área de Silicio.

n_i^2 = Concentración de huecos o electrones.

(Ley de acción de masas: Producto de huecos y electrones libres es constante).

L_p, L_n = Longitudes de difusión de huecos y electrones.

N_d, N_a = Concentraciones de átomos donadores y aceptores.

η = Parámetro dependiente del material (1 para el Germanio y 2 para el Silicio).

4.3. Constitución física

Descripción cualitativa

Una de las muchas clasificaciones que pueden realizarse de los transistores, es la debida a las dos grandes familias que los componen, es decir, Bipolares y “no bipolares”.

Cada una de estas familias están, a su vez, subdivididas en los dos tipos de impurezas que se les añade a los materiales semiconductores, tipo P o tipo N.

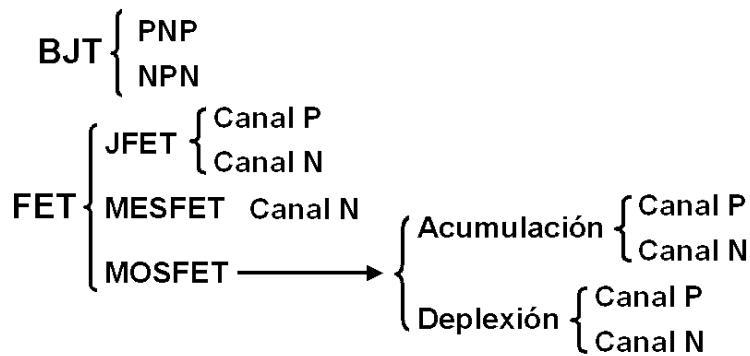


Figura 4.1: Clasificación constructiva de los transistores

BJT: Transistores Bipolares de Unión.

FET: Transistores de Efecto de Campo.

JFET: Transistores de Efecto de Campo de Unión.

MESFET: Transistores de Efecto de Campo de METal Semiconductor.

MOSFET: Transistores de Efecto de Campo de Metal-Oxido-Semiconductor.

Si atendemos a la forma en la cual se fabrican los transistores, el siguiente gráfico ilustra muy bien las variables a las que están sometidos la obtención de transistores bipolares.

Por un lado, los materiales que *dopan* al Silicio puro y, por otro lado, la concentración de éstas impurezas. Si controlamos adecuadamente estos valores, podremos construir un transistor bipolar que cumpla con los requisitos válidos para el funcionamiento de los mismos, a saber:

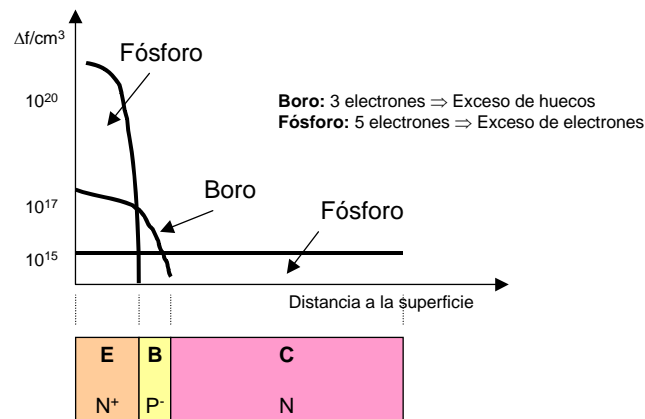


Figura 4.2: Gráfico de concentraciones de portadores de un transistor NPN. (Escalado)

- El emisor debe estar mucho más dopado que la base.
- La longitud de la base debe ser mucho más pequeña que la longitud de difusión de los portadores mayoritarios del emisor.

Sin estas dos premisas, no conseguiremos un elemento de tres uniones NPN o PNP en el cual se produzca el **efecto transistor**.

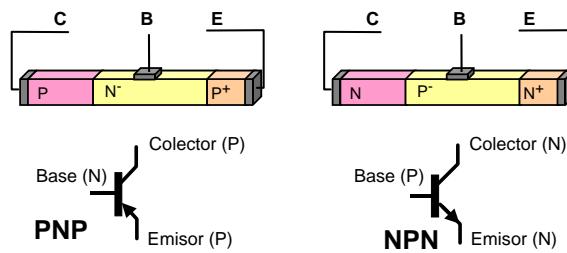


Figura 4.3: Dibujo esquemático de un transistor PNP y NPN con sus terminales identificativos. (No a escala)

En el transistor esquematizado en la figura 4.2, existen dos uniones NP, que se comportan de manera individual como dos diodos, siguiendo su ecuación de comportamiento la *ecuación del diodo*. Sin embargo al estar unidas las tres regiones de esta forma, aparece un nuevo fenómeno debido a que las uniones están dentro de una misma red cristalina y pueden comunicarse. Este efecto nuevo es el *efecto transistor*.

En un transistor sin polarizar, es decir, en *ausencia de voltajes*, el potencial que deben tener los electrones del emisor para poder atravesar la región de la base es tan alto que, sólo aquellos con una alta energía cinética serán capaces de llegar hasta el colector. Figura 4.4.

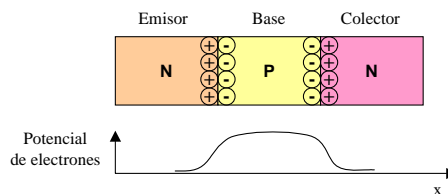


Figura 4.4: Regiones de deplexión de un transistor sin polarizar

Si polarizamos las regiones como se indica en la figura 4.5a, se produce un cambio en los potenciales de barrera de las uniones. Se reduce el ancho de deplexión de la región BE y se aumenta el de BC, con el consiguiente cambio en los potenciales de los electrones. Figura 4.5b.

Como consecuencia de ello, los electrones son inyectados desde el emisor en la base del transistor, donde se convierten en portadores minoritarios. Gran parte de estos electrones se difunden por la base y llegan hasta el colector, atraídos por el alto potencial existente, el resto se recombinan con los huecos mayoritarios de la base. Los electrones que alcanzan el colector lo hacen en una cantidad llamada *factor de transporte* o α_t . Este valor debe ser lo más cercano a la unidad que sea posible. Para compensar la recombinación de electrones durante su travesía por la base, y la disminución de α_t , se hace la región de la base muy estrecha.

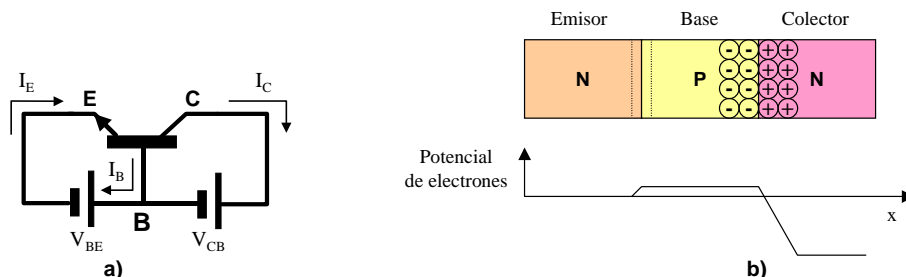


Figura 4.5: Regiones de deplexión de un transistor polarizado en Directa-Inversa

Estos electrones que llegan desde el emisor más los correspondientes a la polarización inversa BC, conforman el total de la intensidad de colector, I_C . Una pequeña corriente de base, I_B , recoge los electrones recombinados en su travesía y genera nuevos huecos para permitir el funcionamiento del dispositivo de forma continuada, figura 4.6. A esta configuración se la denomina *activa directa*.

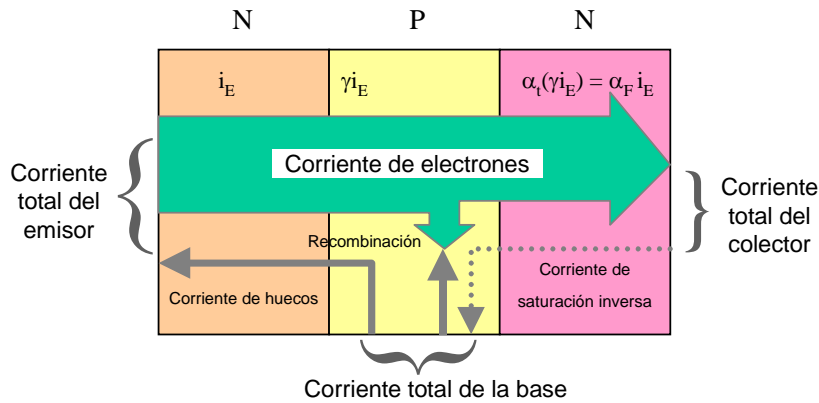


Figura 4.6: Flujo de corrientes y cargas en un transistor polarizado en Directa-Inversa

Al reducir el potencial de barrera de la unión base emisor se produce una recombinación indeseable de huecos de la base hacia el emisor. Para lograr que esta fracción sea lo más pequeña posible, el denominado *rendimiento de la inyección*, γ ; se dopa al emisor con mayor cantidad de impurezas que la base. Esta característica está recogida matemáticamente en la *ecuación del diodo*.

Al estar polarizada inversamente la unión base-colector, línea punteada de la figura 4.6, aparece una componente de saturación inversa entre BC. Esta componente es de pequeño valor comparado con los electrones que llegan al colector, $\alpha_F I_E$.

Resumiendo, una parte importante de los electrones que salen del emisor llegan al colector. Al parámetro que indica esa proporción se la denomina *alfa directa*, α_F .

$$i_C = \alpha_t (\gamma i_E) = \alpha_F i_E \qquad \alpha_F = \alpha_t \gamma$$

Este parámetro, α_F , es muy importante dentro del funcionamiento en directa del transistor. Su valor tiene oscilaciones entre 0.98 y 0.999.

4.4. Modelo de comportamiento

Descripción cuantitativa

Los investigadores Ebers y Moll introdujeron una descripción general del transistor *útil para todas las configuraciones* del mismo. A este modelo de comportamiento se le denominó **Modelo Ebers-Moll**. Figura 4.7.

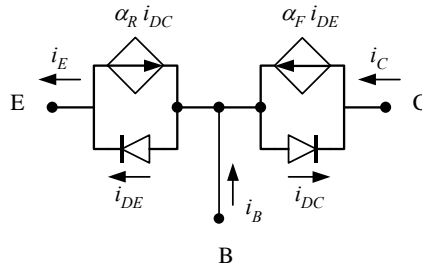


Figura 4.7: Circuito equivalente del Modelo de Ebers-Moll

Aplicando la primera ley de Kirchoff al colector, nos queda

$$i_C = \alpha_F i_{DE} - i_{DC}$$

Donde i_{DC} es la corriente de la unión base-colector como diodo y $\alpha_F I_{DE}$ es el efecto transistor de esta unión. Si sustituimos estos valores en la ecuación del diodo, sin tener en cuenta las polarizaciones de las uniones, nos queda

$$i_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde I_{ES} e I_{CS} son las corrientes de saturación inversas de las respectivas uniones.

Si hacemos trabajar el transistor con la unión colector-base en directa y la unión emisor-base en inversa, esto es, en modo *activo inverso*, los electrones inyectados desde el colector son recogidos por la base y el emisor.

De la misma forma que existe una alfa directa existe una *alfa inversa*, α_R . De la misma forma que α_F , α_R , es el producto de un rendimiento de inyección por un factor de transporte. Aplicando la primera ley de Kirchoff al emisor del modelo de Ebers-Moll, nos queda

$$i_E = I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \quad \text{Ec. 4.2}$$

Dado que el transistor está construido para una *alfa directa* grande, la *alfa en inversa* deberá ser pequeña. Además, el colector está poco dopado con respecto a la base para limitar la expansión de la región de deplexión dentro de la base. Normalmente se encuentra entre valores de 0.05 a 0.5.

De esta circunstancia se intuye que hay una relación entre la alfa directa y la inversa. A esta relación, cuya explicación cae fuera del estudio que nos ocupa, se la denomina *ley de reciprocidad*.

$$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS} = I_S$$

Como se ha comentado anteriormente el valor de α_F es muy próximo a la unidad, con lo que el valor de I_S es muy similar al valor de I_{CS} de la ecuación del diodo.

Sustituyendo el valor de este parámetro, I_S , en las ecuaciones 4.1 y 4.2, nos quedan definidas las **ecuaciones de Ebers-Moll**.

$$i_C = I_S \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$i_E = \frac{I_S}{\alpha_F} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - I_S \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Queda claro en la figura 4.6 que la corriente de emisor se desdobra en la corriente de base y la corriente de colector. Por lo tanto

$$i_E = i_C + i_B \quad \text{Ec. 4.5}$$

Por otro lado, si contemplamos todos los estados de conducción de las uniones del transistor, nos queda

Modo de funcionamiento	Pol. Base-Emisor	Pol. Base-Colector
Activo directo	Directa ($V_{BE} \geq V_\gamma$)	Inversa ($V_{BC} \leq V_\gamma$)
Activo inverso	Inversa ($V_{BE} \leq V_\gamma$)	Directa ($V_{BC} \geq V_\gamma$)
Cortado	Inversa ($V_{BE} \leq V_\gamma$)	Inversa ($V_{BC} \leq V_\gamma$)
Saturado	Directa ($V_{BE} \geq V_\gamma$)	Directa ($V_{BC} \geq V_\gamma$)

Tabla 4.1: Definiciones de los estados del transistor

4.5. Estados del transistor

4.5.1. Estado activo directo. Configuración emisor común

En este modo de funcionamiento el transistor trabaja como una fuente de corriente controlada por corriente.

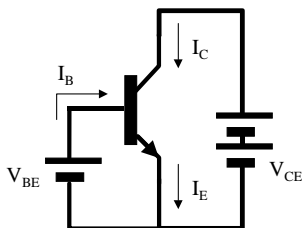


Figura 4.8: Configuración en emisor común

Según vimos en la figura 4.6 $I_C = \alpha_F I_E$ y, teniendo en cuenta la ecuación 4.5, nos queda

$$I_C = \alpha_F (I_B + I_C) \Rightarrow I_C (1 - \alpha_F) = I_B \alpha_F$$

$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B \quad \text{Ec. 4.6}$$

A este parámetro β_F o β , se le denomina *ganancia de corriente en directa* o *Beta Forward*. Es un parámetro de fácil medición en los transistores, con un valor comprendido entre 20 y 800.

Se dice que un transistor está en la configuración *activa directa* cuando la tensión V_{BE} está comprendida entre 0.5-0.7V y la tensión V_{CB} es mucho mayor que este valor.

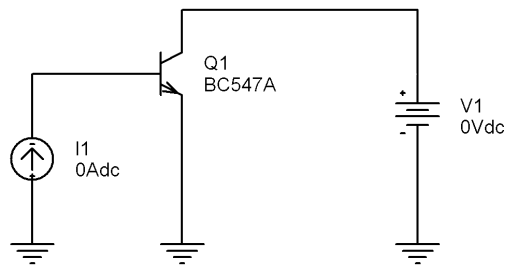


Figura 4.9: Circuito emisor común

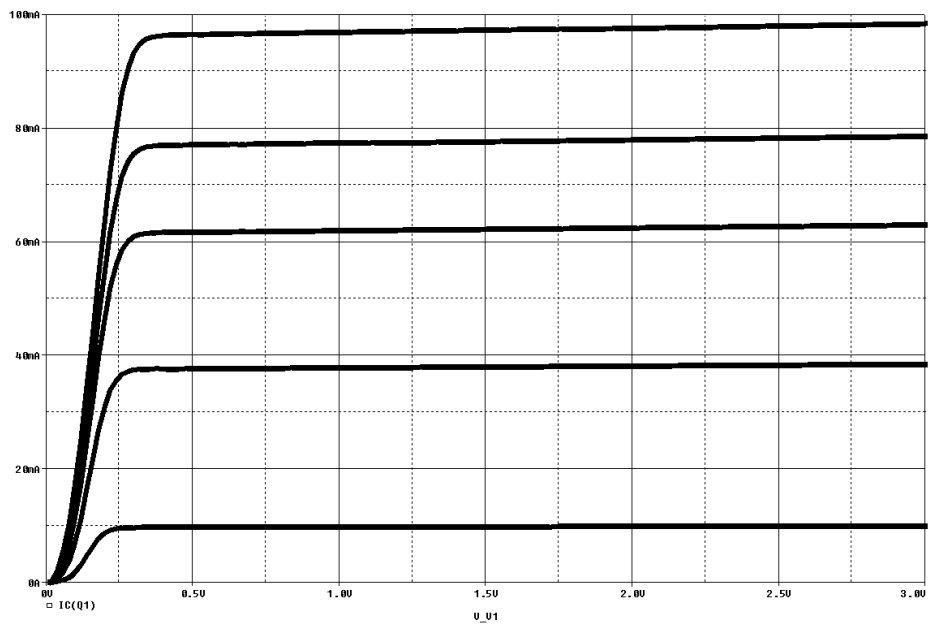


Figura 4.10: Curvas de colector de la configuración emisor común (1mA máx.)

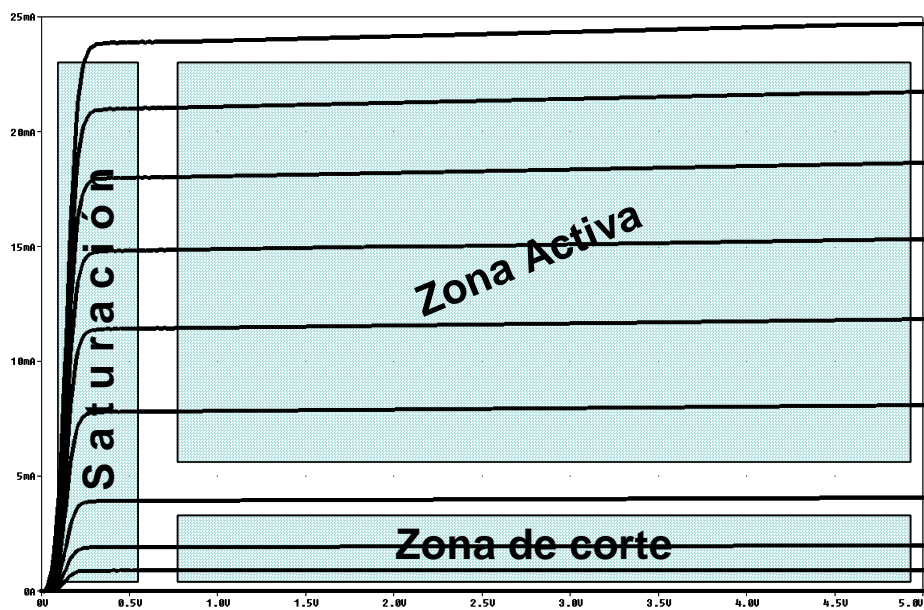


Figura 4.11: Zonas de trabajo del transistor

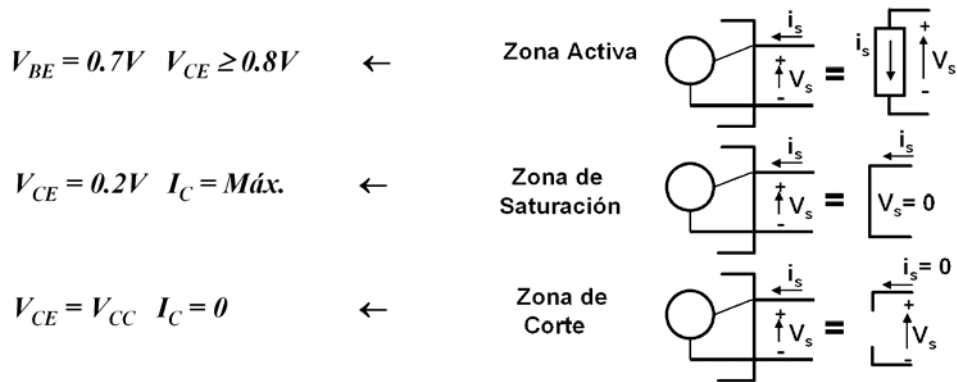


Figura 4.12: Zonas de funcionamiento del transistor y su comportamiento

Modelo de gran señal

Los modelos de gran señal se utilizan para estudiar la polarización de los componentes en corriente continua. El valor de la tensión base-emisor corresponde con la tensión de un diodo estándar, es decir, $V_{BE} = 0.7V$.

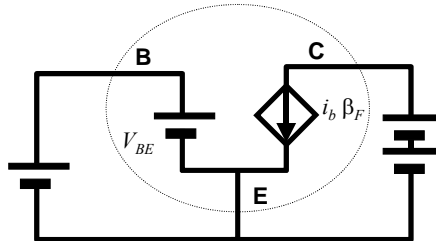


Figura 4.13: Modelo de gran señal del transistor en emisor común

4.5.2. Estado cortado

Si las dos uniones se encuentran polarizadas en inversa, se dice que el transistor está en corte. En esta situación, el transistor se considera *abierto*. Algunos fabricantes ofrecen el dato de I_{CB0} , indicado para polarización inversa del diodo colector-base con emisor desconectado. Este dato se utiliza para situaciones de funcionamiento en corte a altas temperaturas.

4.5.3. Estado saturado

En este estado el transistor deja de funcionar como tal, de hecho, no son válidas las ecuaciones anteriores de funcionamiento del transistor. Cuando las dos uniones están polarizadas en directa, existe una caída de $0.8V$ entre base-emisor y una diferencia de potencial de $0.2V$ entre colector-emisor. En este punto, el transistor se comporta como un cortocircuito entre C-E, con la citada caída de $0.2V$.

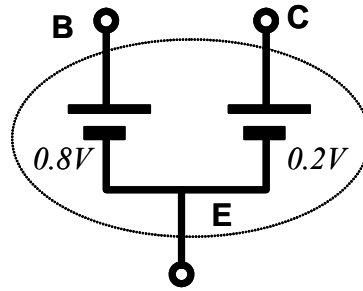


Figura 4.14: Estado de saturación de un transistor bipolar

4.5.4. Estado activo inverso

Si permutamos los terminales de emisor y colector obtendremos la configuración *activo-inverso*. Con ello, la unión colector-base queda polarizada a 0.7V y la fuente de corriente dependiente está ahora en sentido emisor-colector. Figura 4.15.

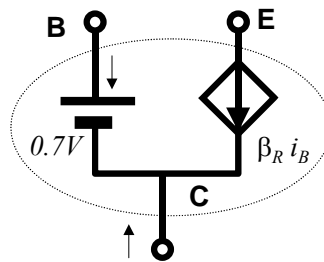


Figura 4.15: Funcionamiento activo-inverso

En estas circunstancias, la *corriente de emisor* viene definida por $\beta_R i_B$, donde

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

Denominándose el valor de β_R , *beta inversa* del transistor. Aplicando la ecuación 4.5, nos queda

$$i_C = i_E - i_B = -(\beta_R + 1)i_B$$

Esta ecuación describe las curvas del colector de esta configuración. Teniendo en cuenta que $\beta_R + 1 \ll \beta_F$ las curvas de la figura 4.16 están mas juntas que sus homónimas de la figura 4.10. Los valores de estas curvas son de bajo valor debido a la configuración inversa de la unión colector-base.

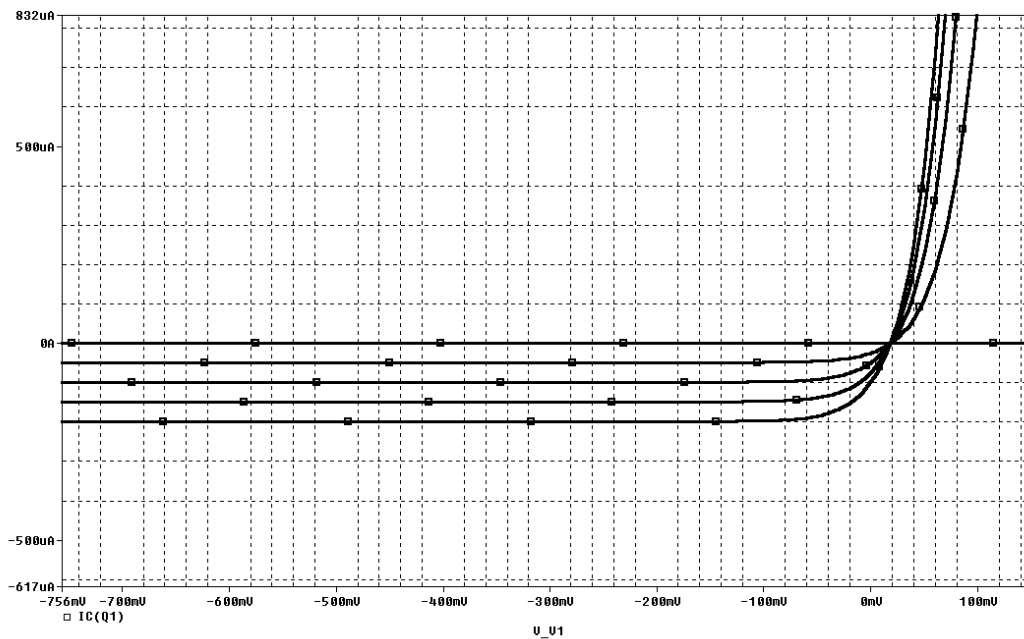


Figura 4.16: Curvas del transistor activo inverso

4.6. Modulación de la anchura de la base del transistor. Efecto Early

Al estar polarizado el transistor en activa directa, la unión colector-base se estrecha y la zona de unión base-emisor prácticamente desaparece, figura 4.5b. Con este fenómeno, la cantidad de electrones que circulan por el colector es mayor, el valor de α_F se acerca a la unidad y la corriente de base disminuye. Igualmente, también se ve afectado el valor de la ganancia de corriente β_F .

Si continuamos aumentando el valor de la tensión inversa entre la unión colector-base, este fenómeno se ve incrementado, hasta un valor en el cual crece tanto i_C , que acaba por destruir el transistor. A esta tensión V_A , se la denomina *tensión Early*, debido a la persona que la descubrió. Este fenómeno se muestra más acentuado en la configuración emisor común.

De forma gráfica podemos observar esta tensión en la continuación de las curvas de la base en sentido $-V_{CE}$. Todas las curvas de la corriente de base se unen en un valor de tensión negativa, la citada V_A o tensión Early.

Antes de que alcancemos el valor de la tensión Early, el cambio que se produce en la corriente de colector afecta a la ecuación 4.6. Quedando ésta como

$$i_C = f(V_{CE}, i_B) = \left[\left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) \beta \right] \cdot i_B \quad \text{Ec. 4.7}$$

Como se observa, dado el alto valor de la tensión Early respecto de las tensiones de polarización que vamos a utilizar tiene un efecto casi despreciable en los cálculos que realicemos. Por tanto, no se contemplará en las ecuaciones salvo indicación expresa.

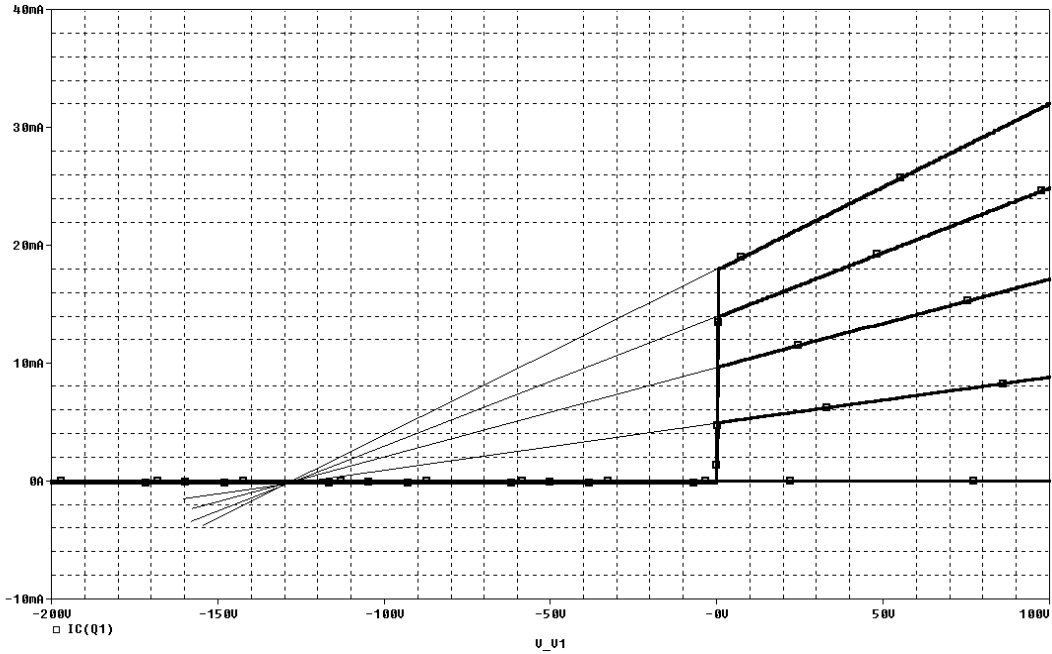


Figura 4.17: Representación gráfica del Efecto Early. Tensión Early = -126V

En los cálculos por ordenador se suele incluir este efecto para aumentar la precisión de los mismos. Para ello, añadimos al modelo del transistor de Ebers-Moll una resistencia de salida, r_o . Que se define como

$$\frac{1}{r_o} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{\text{punto } Q}$$

Derivando la ecuación 4.7 y evaluándola respecto del punto de funcionamiento en continua, nos queda

$$\frac{1}{r_o} = \frac{1}{V_A} \beta I_B$$

Teniendo en cuenta la ecuación 4.6 y siendo $V_{CE} \ll V_A$, nos queda

$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

Como se ha comentado, esto supone añadir una resistencia de alto valor entre colector y emisor en el modelo del transistor. Esta circunstancia no perjudica el cálculo que se realice si despreciamos la misma.

Al disminuir el ancho efectivo de la base, y por ello las corrientes de base y colector, se produce un fenómeno de interacción entre el circuito de entrada, la base del transistor, y el circuito de salida, es decir, el colector. A este hecho se le denomina de **realimentación interna** dentro del transistor. Por ello, se hace necesario modificar el modelo de gran señal en emisor común de la figura 4.13.

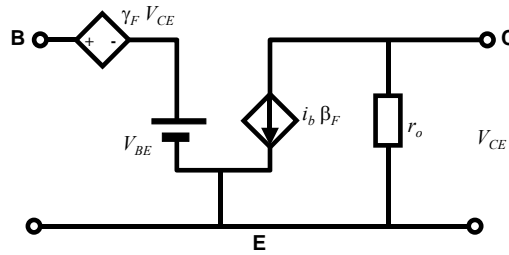


Figura 4.18: Modelo en emisor común teniendo en cuenta el Efecto Early

4.7. Variación de la ganancia de corriente

Como se ha comentado anteriormente, α es variable, sin embargo, la ganancia de corriente en directa, β , definida como $\alpha/(1-\alpha)$ es bastante sensible a las pequeñas variaciones de α , a la temperatura y al propio valor de las corrientes. Por si esto fuese poco, además es dependiente de la física del transistor. Podemos comprobar como pequeños cambios en α afecta bastante a la ganancia de corriente.

Si $\alpha = 0.99 \rightarrow \beta = 0.99/(1-0.99) = 99$
 Si $\alpha = 0.999 \rightarrow \beta = 0.999/(1-0.999) = 999$

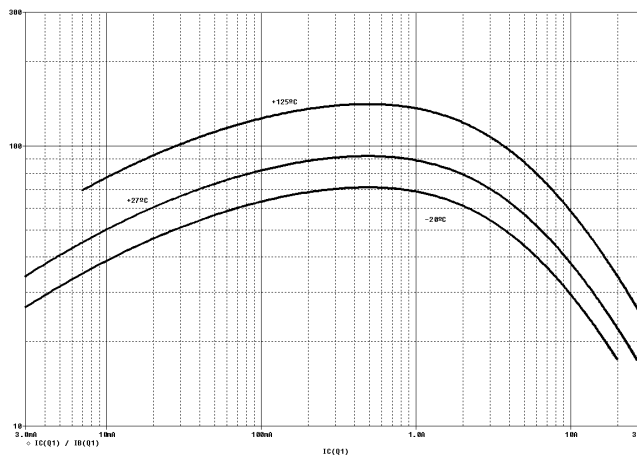


Figura 4.19: Variación de β con T (-20°C +27°C y 125°C) e I_C . 2N3055

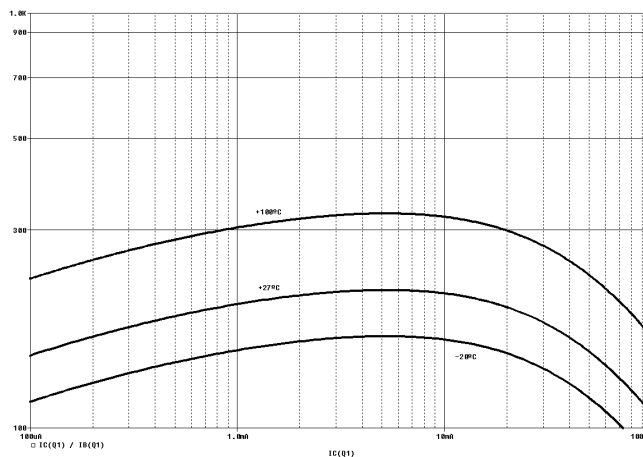


Figura 4.20: Variación de β con T (-20°C +27°C y 125°C) e I_C . BC547

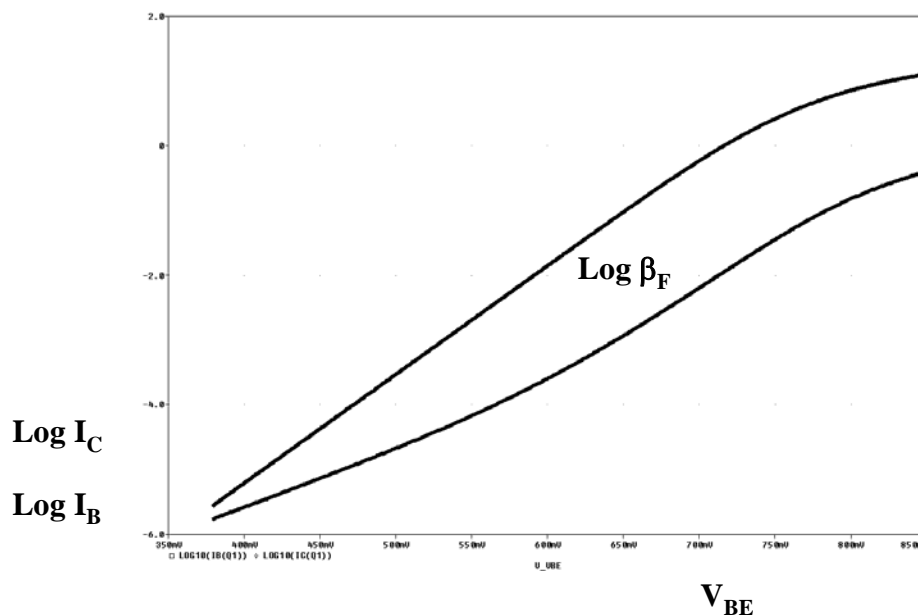


Figura 4.21: Gráfico de Gummel-Poon: Variación de β con la V_{BE} (0.35-0.85V)

Bibliografía

1. N.R. Malik, *Circuitos Electrónicos. Análisis, simulación y diseño*, Ed. Prentice Hall, 1998, ISBN: 84-89660-03-4.
2. G.W. Neudeck, *El transistor bipolar de unión*, Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, 1989, ISBN: 0-201-60143-5.
3. E. Muñoz Merino, *Circuitos Electrónicos: Analógicos I*, E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación (U.P.M.), 1986, ISBN: 84-7402-066-2.
4. A.P. Malvino, *Principios de Electrónica*. Ed. Mc Graw Hill, 1996, ISBN: 84-481-1999-1.
5. C.J. Savant Jr., M.S. Roden, G.L. Carpenter, *Diseño Electrónico: Circuitos y sistemas*, Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, 1992, ISBN: 0-201-62925-9.
6. A.R. Hambley, *Electrónica*, Ed. Prentice Hall, 2000, ISBN: 84-205-2999-0.
7. M.H. Rashid, *Circuitos Microelectrónicos. Análisis y Diseño*. International Thomson Editores. 2000. ISBN: 968-7529-79-2