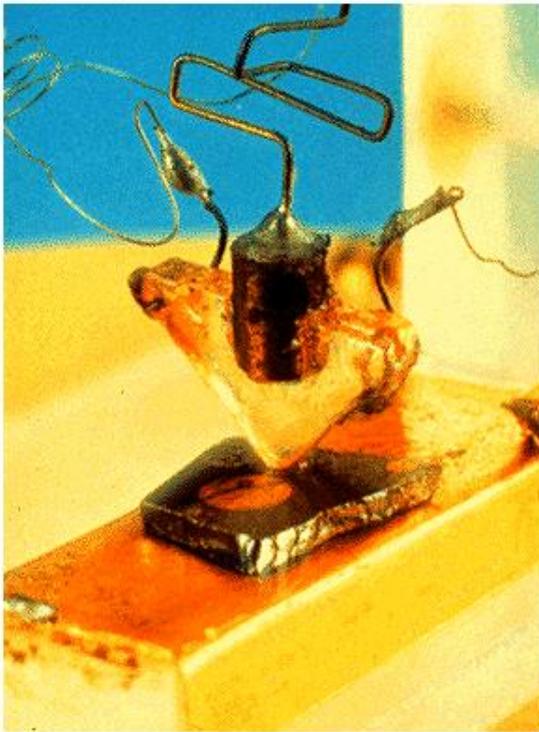
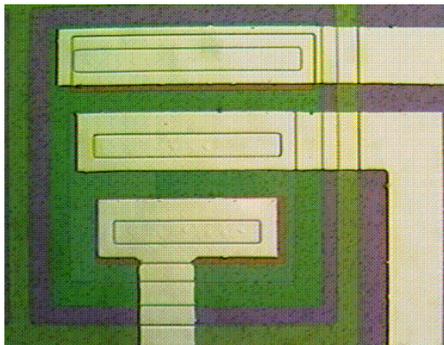


Transistor bipolar de unión (BJT)



Primer transistor de contacto puntual



Transistor bipolar integrado

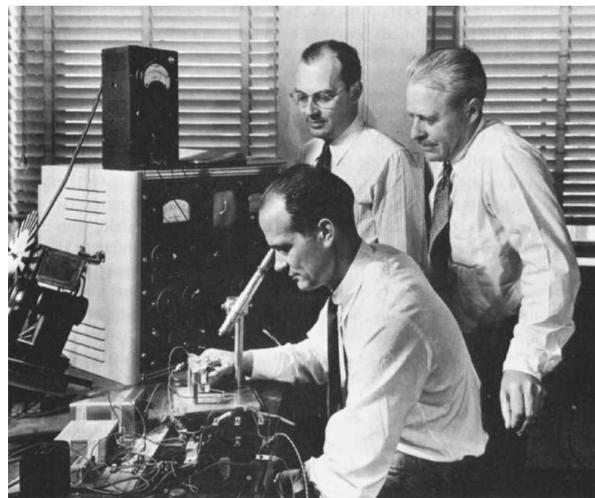
Por la invención y desarrollo del transistor bipolar de unión Brattain, Bardeen y Shockley (foto) compartieron el Premio Nobel de Física en 1956.

El transistor bipolar de unión (BJT) fue el primer dispositivo de estado sólido de uso práctico utilizado para reemplazar a las válvulas de vacío. Fue desarrollado en 1947 en los Laboratorios Bell por Brattain, Bardeen y Shockley.

Shockley trabajó, inicialmente, en el transistor de efecto de campo cuya idea, patentada por Julius Lilienfeld en 1930, no había podido llevarse a la práctica por cuestiones tecnológicas. El primer tipo de transistor desarrollado fue el denominado de contacto puntual (foto).

El 23 de diciembre de 1947, el transistor de unión fue utilizado para demostrar la amplificación de señales de voz.

Los costos de investigación y desarrollo del transistor de estado sólido estuvieron a cargo del Ministerio de Defensa de los Estados Unidos. El interés de los militares se centraba en la miniaturización de los equipos de armamento. El desarrollo de la tecnología del transistor bipolar, con la participación de empresas privadas, fue decisivo para la explosión de la electrónica de estado sólido, que llevó a la integración de dispositivos en chips cada vez más pequeños y más densos, y que aún continúa.



1- Transistor bipolar de unión (BJT)

1.1- Características generales

El transistor bipolar de unión (BJT) consiste básicamente de dos junturas PN conectadas en oposición. Por lo tanto, el funcionamiento del dispositivo puede comprenderse del conocimiento de la operación física de la juntura PN.

Las Figuras 1a) y 1b) muestran un corte y un esquema, que corresponde a la región entre líneas de puntos de la Figura 1a), de un transistor bipolar de unión.

Como puede verse en las figuras anteriores se forman dos junturas. Una es la compuesta por la región de emisor (E) y de base (B), JEB. La segunda juntura se forma entre la región de base (B) y de colector (C), JCB. En condiciones típicas de operación la juntura E-B se polariza en directa y la juntura C-B en inversa; entre las junturas aparecen dos zonas o regiones de agotamiento: B-E y B-C. La región de base se hace mucho más corta que la longitud de difusión de los portadores minoritarios en ella. De este modo, el exceso de portadores minoritarios inyectados en la base en la juntura JEB pueden atravesarla y llegar al colector sin demasiada pérdida por recombinación.

Existen dos tipos posibles de transistores bipolares según como se conecten las junturas, los tipos NPN y PNP, cuyos símbolos y polaridades de referencia se indican en la Figura 1c).

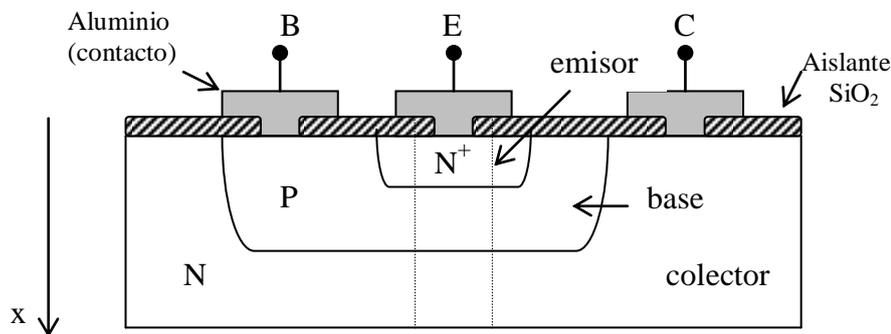


Figura 1a)

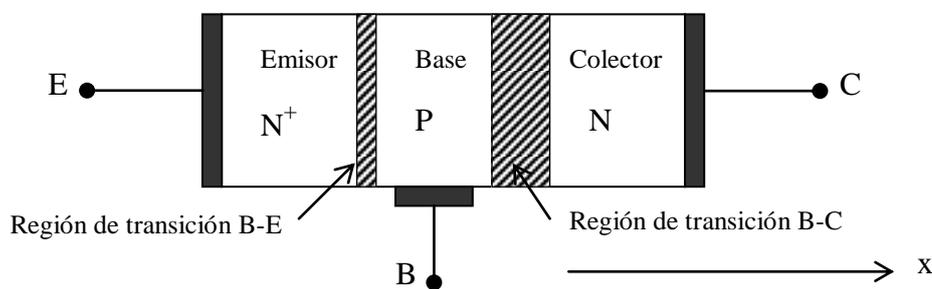


Figura 1b)

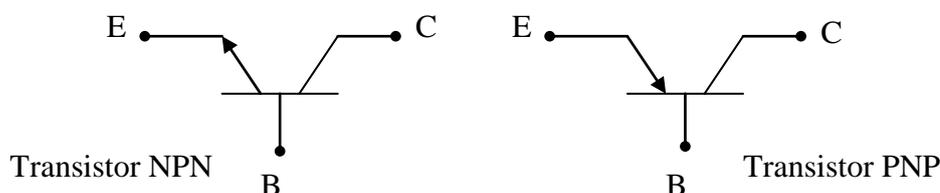


Figura 1c)

La Figura 1 d) muestra una estructura típica de un BJT en un circuito integrado. Constructivamente la región de emisor tiene mayor dopaje que la base, quien a su vez es más dopada que colector.

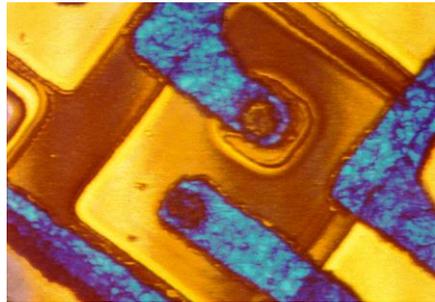
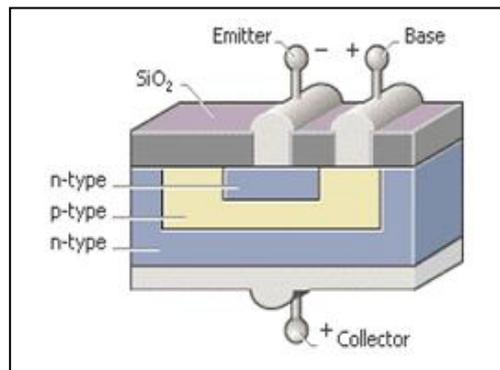
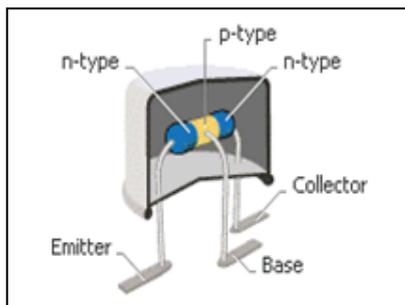


Figura 1 d)



1.2- Modos de operación

En condiciones típicas de operación la juntura emisor- base (JEB) se polariza en directa y la juntura colector-base (JCB) en inversa. Es el llamado modo de operación **activo directo**, y se usa para aplicaciones de amplificación. La acción o efecto transistor también se verifica si se intercambian los terminales de Colector y Emisor. Sin embargo, el comportamiento que resulta no es idéntico dado que el dispositivo no es simétrico: el Emisor está más contaminado que el Colector. Esta asimetría hace que este modo de operación llamado **activo inverso** no sea utilizado.

La polarización en sentido directo de ambas junturas es el modo de operación denominado **modo de saturación**. Cuando ambas junturas se polarizan en forma inversa se tiene un cuarto tipo llamado **modo de corte**. Estos dos últimos modos: saturación y corte son los utilizados cuando el transistor se hace operar como llave, corresponde a estados lógicos *On/Off* en circuitos digitales.

La Figura 2 muestra las regiones de operación para un transistor bipolar como función de la polarización aplicada.

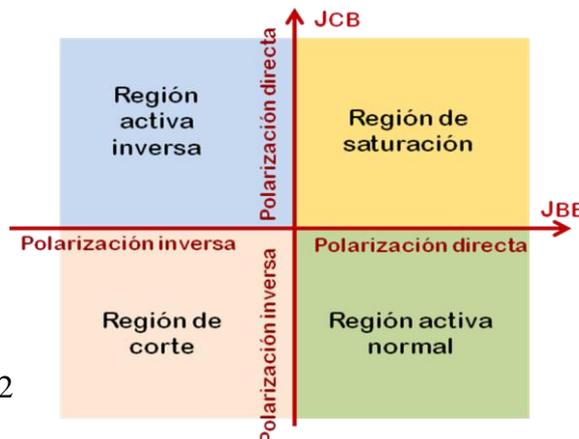


Figura 2

La figura 3 es una representación de los distintos modos de operación del transistor sobre la característica de salida en la denominada configuración de Emisor Común (EC).

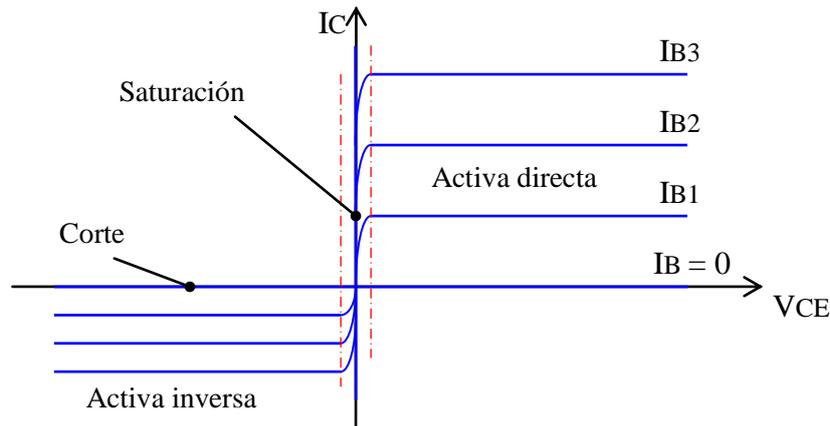


Figura 3

La Tabla 1 muestra los distintos modos de operación de un transistor NPN y en correspondencia la polarización de cada juntura.

Tabla 1

Modo de operación	Polarización JEB	Polarización JCB	Funcionamiento
Activa directa	Directa ($V_{BE} > 0$)	Inversa ($V_{CB} > 0$)	Fuente controlada
Corte	Inversa ($V_{BE} < 0$)	Inversa ($V_{CB} > 0$)	Llave abierta
Saturación	Directa ($V_{BE} > 0$)	Directa ($V_{CB} < 0$)	Llave cerrada
Activa inversa	Inversa ($V_{BE} < 0$)	Directa ($V_{CB} < 0$)	Fuente controlada

1.2.1- Características cualitativas de los modos de operación

- **Región activa directa:** el transistor se comporta como una fuente controlada en la cual la corriente de entrada determina la corriente de salida. Los cambios en el nivel de polarización de la juntura E-B ajustan el valor de la corriente de emisor y en correspondencia el valor de la corriente de colector.
- **Región de corte:** como ambas junturas están polarizadas en inversa tanto la corriente de emisor como la corriente de colector son del orden de las corrientes de saturación de las junturas correspondientes. En el caso ideal pueden asemejarse a circuitos abiertos.
- **Región de saturación:** como las junturas se polarizan directamente la corriente de colector será apreciable pero la tensión en la unión de colector será pequeña en correspondencia a su polarización directa. El funcionamiento se asemeja a una llave cerrada.
- **Región activa inversa:** se comporta como una fuente controlada pero de menor ganancia comparada con la región activa directa debido a la asimetría en el dopaje de cada región.

1.2.2- Análisis cualitativo de las componentes de corriente en un BJT

La figura 4 muestra un esquema del flujo de portadores y distribución de corrientes en un transistor NPN.

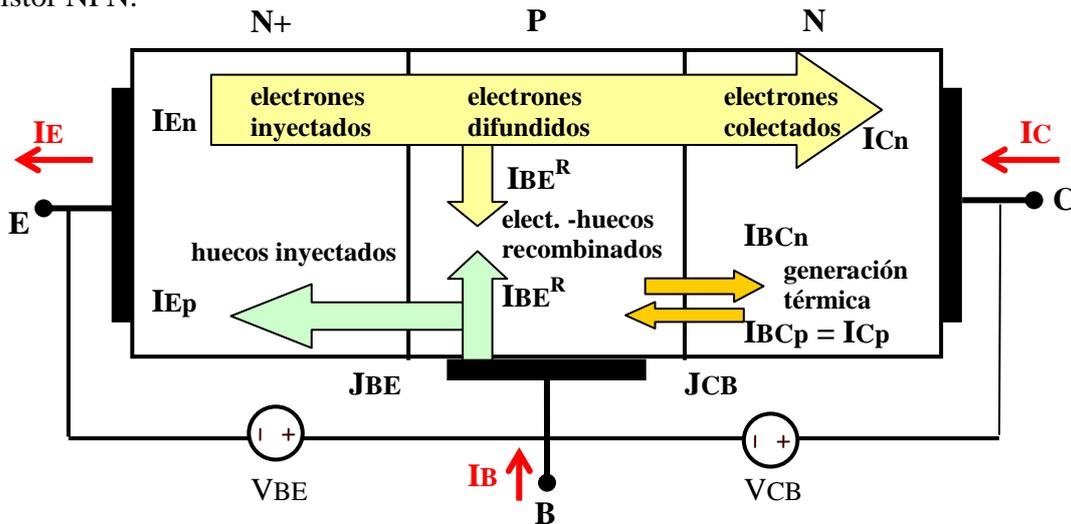


Figura 4

I_{En} : corriente de emisor inyectada hacia la base, electrones que atraviesan la JEB.

I_{Ep} : componente de la corriente de base inyectada hacia el emisor, huecos inyectados desde B hacia E por difusión a través de la juntura JEB.

I_{BE}^R : corriente de recombinación en la región de base.

I_{Cn} : corriente de electrones desde el emisor que son colectados en el colector.

I_{Bcp} (I_{Cp}): huecos (generados térmicamente) inyectados desde la JCB polarizada en inversa. Son importantes cuando la corriente de emisor tiende a cero.

I_{Bcn} : electrones (generados térmicamente) inyectados desde la JCB polarizada en inversa

Resumiendo: la polarización directa de la juntura de base y emisor provoca la circulación de una corriente. Esta corriente está compuesta por: electrones inyectados desde el emisor a la base, componente de la corriente I_{En} , y de huecos inyectados desde la base al emisor, componente de la corriente I_{Ep} . La mayoría de los electrones inyectados desde el emisor llegan a la juntura entre colector y base, y son barridos de la región de agotamiento ayudados por la polarización aplicada a esta juntura, pasando al colector donde constituyen la componente I_{Cn} . La componente de la corriente de colector I_{Cp} es el resultado de los huecos generados térmicamente cerca de la unión colector-base y que se desplazan entrando a la base. La corriente de base consiste de huecos que se recombinan con electrones inyectados desde el emisor y de huecos que son inyectados a través de la unión emisor-base hacia el emisor. Las componentes de corrientes de huecos y electrones generados térmicamente que fluyen en la unión base-colector sólo tienen una contribución importante cuando la corriente de emisor tiende a cero.

Las corrientes en los terminales pueden expresarse en función de las componentes de corriente:

$$\begin{aligned} I_E &= I_{En} + I_{Ep} \\ I_C &= I_{Cn} + I_{Cp} \end{aligned}$$

$$I_B = I_E - I_C \quad (\text{Ley de Kirchhoff})$$

1.3- Parámetros de rendimiento estático.

1.3.1- Factor de transporte de base (α_T)

Es la relación de corriente de electrones que se difunden hacia el colector respecto a la corriente de electrones inyectada en la unión E-B, es decir:

$$\alpha_T = \frac{I_{Cn}}{I_{En}}$$

En los dispositivos ideales α_T es la unidad puesto que no hay recombinación en la base. En los dispositivos reales a medida que los electrones viajan a través de la base se recombinan con los huecos, de manera que α_T es menor a la unidad aunque muy próximo a ese valor ($\alpha_T \rightarrow 1$) debido a la estrechez de la región de base.

1.3.2- Eficiencia de inyección de emisor (γ)

Se define como la relación entre la corriente de electrones inyectada desde el emisor a la corriente total del emisor

$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}}$$

Para tener una alta eficiencia de emisor γ la corriente inyectada desde la base I_{Ep} debe ser lo menor posible. Esto se logra haciendo la base estrecha y dopando fuertemente el emisor en comparación a la base. En estas condiciones $\gamma \rightarrow 1$.

1.3.3- Alfa de corriente continua (Ganancia de corriente α en Base Común)

La relación entre las corrientes de colector (I_C) y de emisor (I_E) es llamada relación de transferencia de corriente o ganancia de corriente α y se define por:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_{Cn} + I_{Cp}}{I_{En} + I_{Ep}}$$

Cuando el dispositivo está polarizado en la región activa directa $I_{Cn} \gg I_{Cp}$ y la ecuación anterior puede aproximarse por:

$$\alpha \cong \frac{I_{Cn}}{I_{En} + I_{Ep}} = \frac{I_{Cn}}{I_{En}} \left[\frac{1}{1 + \frac{I_{Ep}}{I_{En}}} \right] = \alpha_T \left[\frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}} \right] = \alpha_T \cdot \gamma$$

Idealmente $\alpha \rightarrow 1$, puesto que también $\alpha_T \rightarrow 1$ y $\gamma \rightarrow 1$. En un dispositivo real α es ligeramente menor, pero muy próxima, a la unidad.

1.3.4- Beta de corriente continua (Ganancia de corriente β en Emisor Común)

El parámetro β se define por:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

β (llamado también hFE) es el factor de amplificación de la corriente de colector. Su valor puede ser bastante grande porque α es muy cercano a la unidad.

1.3.5- Corriente de saturación inversa I_{CB0}

Utilizando las definiciones anteriores se puede establecer una relación entre las corrientes de colector y de emisor.

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn} = I_{Cp} + \alpha_T I_{En} = I_{Cp} + \alpha_T \gamma I_E = I_{Cp} + \alpha I_E$$

La ecuación anterior relaciona las corrientes de colector y emisor para la configuración denominada de base común (BC).

Se define la corriente de saturación inversa de la juntura de colector-base (I_{CB0}) como la corriente que fluye entre colector y base con el terminal de emisor abierto ($I_E = 0$)

$$I_{Cp} \cong I_{CB0}$$

Por lo tanto, la ecuación anterior puede escribirse como:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

1.3.6- Corriente I_{CE0}

Como $I_E = I_B + I_C$ por la ley de Kirchhoff aplicada a los terminales del dispositivo, resulta:

$$I_C = \alpha (I_B + I_C) + I_{CB0}$$

$$I_C (1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CB0}$$

$$I_C = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) I_B + \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha}$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0} = \beta I_B + I_{CE0}$$

Esta última ecuación manifiesta la relación entre las corrientes de colector y base para la región activa en la configuración denominada de emisor común (EC).

Cuando la corriente de base es igual a cero ($I_B = 0$) circulará entre colector y emisor una corriente denominada I_{CE0} , dada por:

$$I_{CE0} = (1 + \beta) I_{CB0}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

Ejemplo 1:

Para un dispositivo NPN con: $I_{En} = 100 \mu A$, $I_{Ep} = 1 \mu A$, $I_{Cn} = 99 \mu A$ e $I_{Cp} = 0.1 \mu A$ calcular:

- a) factor de transporte de base, α_T
- b) eficiencia de inyección de emisor, γ
- c) α y β
- d) I_{CBo} e I_{CEo}
- e) Recalcular β si $I_{Cn} = 99.5 \mu A$
- f) Ídem si $I_{Cn} = 99 \mu A$ e $I_{Ep} = 2 \mu A$
- g) Comparar resultados

a)
$$\alpha_T = \frac{I_{Cn}}{I_{En}} = \frac{99 \mu A}{100 \mu A} = 0.99$$

b)
$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}} = \frac{100 \mu A}{100 \mu A + 1 \mu A} = 0.990099$$

c) $\alpha = \alpha_T \gamma \cong 0.9802$,

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 49.5$$

d) $I_{CBo} \cong I_{Cp} = 0.1 \mu A$,

$$I_{CEo} = (1 + \beta) I_{CBo} = 1.05 \mu A$$

e) para $I_{Cn} = 99.5 \mu A$, resulta: $\alpha \cong \frac{I_{Cn}}{I_E} = 0.9851$,

$$\beta = 66.1$$

f) para $I_{Cn} = 99 \mu A$, $I_{Ep} = 2 \mu A$, resulta $\alpha = 0.9705$,

$$\beta = 32.9$$

g) De los resultados anteriores se desprende que pequeñas variaciones en el valor de la ganancia de corriente α producen grandes variaciones en la ganancia de corriente β .

2- Características estáticas tensión- corriente (Transistor bipolar ideal)

En lugar de trabajar con las expresiones analíticas que representan las corrientes en función de las tensiones aplicadas a las juntas, es común trabajar con gráficos de las corrientes en función de las tensiones. En general se representan: una característica de entrada y una característica de salida que dependen del tipo de configuración utilizada para trabajar con el dispositivo. Como el transistor bipolar es un dispositivo de tres terminales podemos encontrar tres tipos de configuraciones, dependiendo de cual sea el terminal que resulte común a la entrada y a la salida. Según se muestra en la Figura 5 para un transistor bipolar NPN se tiene:

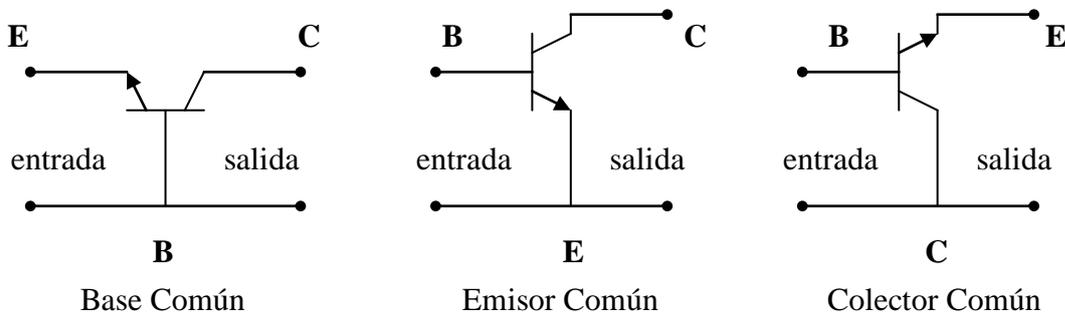


Figura 5

Cada una de estas configuraciones tiene características particulares. Se analizarán las configuraciones de Base Común (BC) y Emisor Común (EC), tomando como ejemplo un transistor NPN.

2.1- Configuración de Base Común

En la configuración de Base Común (BC) para un transistor NPN la característica de entrada queda determinada por la relación $I_E = f(V_{BE}, V_{BC})$ o por la relación $V_{BE} = f(V_{BC}, I_E)$.

La característica de salida se determina por la relación $I_C = f(V_{BC}, I_E)$.

La característica de entrada, Figura 6 a), representa las características del diodo base-emisor para distintas tensiones base-colector, es decir, I_E en función de V_{BE} para distintos valores de V_{BC} .

Para $V_{BC} = 0$ la característica de entrada es similar a la de un diodo polarizado en directa y se observa la existencia de una tensión de corte o umbral V_γ por debajo de la cual la corriente I_E es muy pequeña. Como en la región activa JEB está polarizada en directa y JCB en inversa, la corriente de salida I_C es prácticamente independiente del valor de V_{CB} , aproximadamente a partir de unas decenas de mV, aproximadamente $4 |V_T|$, la corriente I_E puede aproximarse por:

$$I_E \cong I_{ES} e^{V_{BE}/V_T}$$

Con esta suposición la característica de entrada se puede considerar como la de un diodo polarizado en directa.

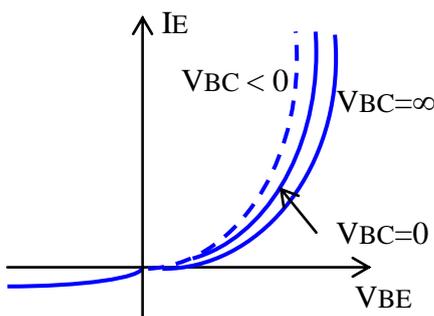


Figura 6 a) Característica de entrada BC

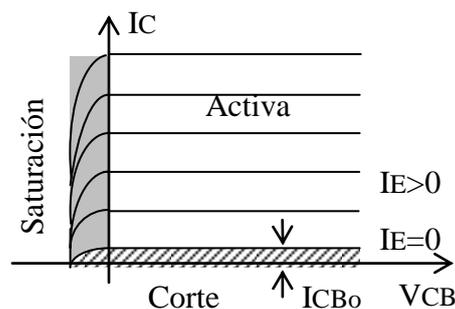


Figura 6 b) Característica de salida BC

La característica de salida, Figura 6 b) muestra las tres regiones de funcionamiento: activa, corte y saturación para un transistor NPN ideal.

Cuando $I_E = 0$ la corriente de colector I_C es muy pequeña e igual a la corriente de saturación inversa de la juntura colector-base: I_{CB0} . En la región activa, dado que puede considerarse que $I_C \cong \alpha I_E$, con α muy cercano a la unidad, la corriente de colector es sólo ligeramente menor que la de emisor.

La región a la izquierda del eje de ordenadas, $V_{CB} = 0$ y por encima de la curva $I_E = 0$, en la que las uniones de colector y de emisor se polarizan directamente, se denomina región de saturación. La corriente cae bruscamente y su intersección con el eje de abscisas está muy próxima al punto $V_{CB} \cong 0$.

La región por debajo de $I_E = 0$, en que las uniones de emisor y colector se polarizan inversamente se denomina región de corte.

2.2- Configuración de Emisor común

En la mayor parte de los circuitos con transistores la configuración de Emisor Común es la más utilizada porque permite obtener gran ganancia de potencia.

En esta configuración la característica de entrada, para un transistor NPN, se representa por: $I_B = f(V_{BE}, V_{CE})$ y la característica de salida por: $I_C = f(V_{CE}, I_B)$, como se muestra en las Figuras 7 a) y b) respectivamente, para un transistor NPN ideal.

La característica de entrada (Figura 7 a)) es similar a la de un diodo polarizado en forma directa. Cuando la unión de colector se polariza en inversa y se cumple que V_{CE} es mayor que unos pocos V_T , la característica se independiza prácticamente de V_{CE} , porque los cambios en la tensión V_{BE} quedan determinados por la corriente de base I_B :

$$I_B \propto e^{V_{BE}/V_T}$$

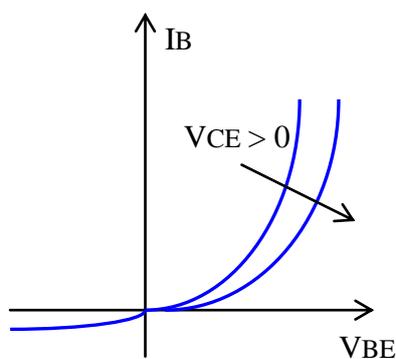


Figura 7 a) Característica de entrada EC

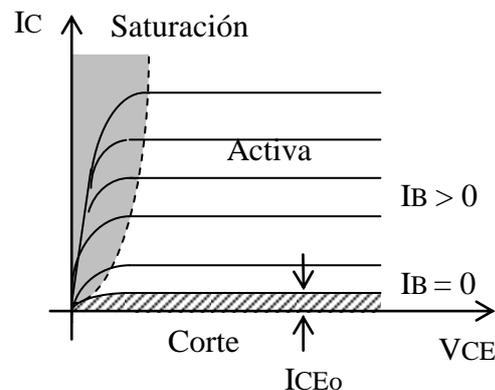


Figura 7 b) Característica de salida EC

La característica de salida (Figura 7 b)) puede dividirse en tres regiones: activa, corte y saturación.

La región activa queda delimitada desde unas pocas décimas de voltio de la tensión V_{CE} y por encima de $I_B = 0$. Si se desea utilizar al dispositivo como amplificador, sin una distorsión apreciable, se lo debe utilizar en esta región.

Esta región se caracteriza por una elevada ganancia de corriente denominada β (h_{FE} en las hojas de datos dadas por el fabricante), definida como la relación: $\beta = I_C/I_B$.

La Figura 8 muestra la característica de salida de un transistor real.

Se observa que la corriente en la zona activa tiene cierta dependencia de la tensión entre colector y emisor, evidenciada por la pendiente de las rectas que representan la corriente I_C .

Este efecto se denomina Efecto Early y es más notable en la configuración de Emisor Común.

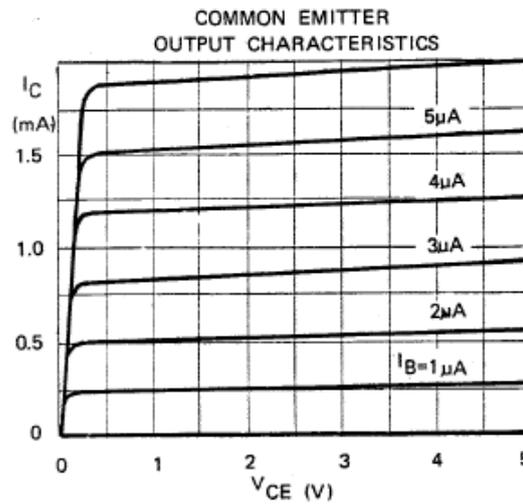


Figura 8

La región de corte, donde ambas junturas se polarizan en forma inversa, está por debajo de $I_B = 0$. Una característica de esta región es que aún con la base en circuito abierto ($I_B = 0$) puede circular una corriente apreciable debido a la "acción del efecto transistor".

En párrafos anteriores se había encontrado que la corriente de colector I_C y la de emisor I_E podían relacionarse a través del parámetro α por la expresión:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} = I_B + (1 + \beta) I_{CB0}$$

Para $I_B = 0$ entre emisor y colector circula la corriente I_{CE0} :

$$I_{CE0} = (1 + \beta) I_{CB0}$$

Esta corriente puede ser importante cuando aumenta la temperatura ya que depende de la ganancia de corriente β y de I_{CB0} que se duplica aproximadamente cada $10^\circ C$ de incremento de temperatura.

La Figura 9 muestra una curva de I_{CB0} en función de la temperatura para un transistor típico.

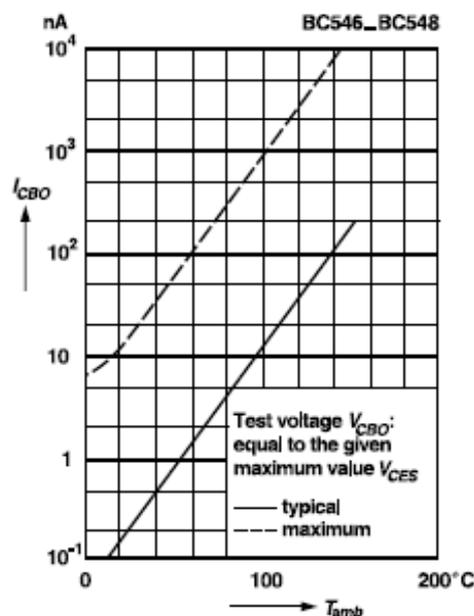


Figura 9

La región de saturación se define por la polarización directa de ambas junturas. La tensión colector-emisor V_{CE} en esta zona es de unos pocos mV, de modo que está muy próxima al origen, donde se unen todas las curvas y caen en forma abrupta. Cuando aumenta la polarización colector-base aumenta también la cantidad de portadores (electrones para un transistor NPN) que se inyectan desde el colector hacia la base, ayudados por el potencial VCB. Este flujo de electrones es opuesto al flujo que llega desde emisor provocando una disminución de la corriente de colector y un aumento de la corriente de base. Debido a este comportamiento físico, en esta zona de funcionamiento ya no se verifica que $\beta = I_C/I_B$ sino que $I_{Bsat} > I_C/\beta$ y la corriente de colector queda limitada por el circuito externo al dispositivo.

3- Modelos equivalentes para corriente continua

3.1- Modelo equivalente en la región activa directa

La Figura 10 muestra un modelo de primer orden que permite representar el funcionamiento de un transistor bipolar NPN en el modo activo directo. La juntura entre B y E se representa por un diodo polarizado en forma directa por la tensión aplicada entre B y E (V_{BE}) dada por la siguiente expresión:

$$I_E = I_{SE} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) \cong I_{SE} e^{V_{BE}/V_T}$$

Una parte $\alpha_F I_E$ de la corriente de emisor I_E llega al colector formando parte de la corriente de colector I_C .

Si la juntura entre C y B está polarizada en forma inversa ($V_{CB} > 0$ para un transistor NPN), la corriente de colector es aproximadamente independiente del valor de V_{CB} . De esta forma, en el modo activo directo, la juntura entre C y B puede ser identificada con un modelo circuital equivalente correspondiente a una fuente controlada de corriente dependiente de la tensión aplicada entre B y E.

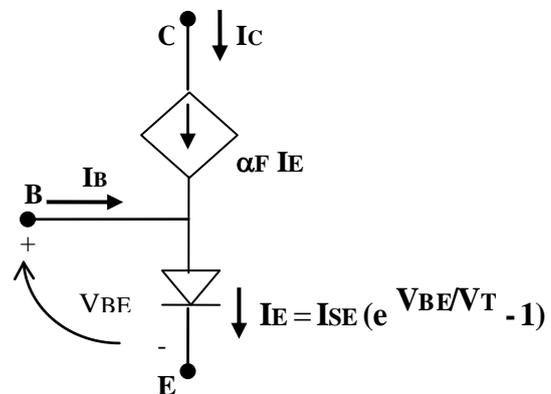


Figura 10

3.2- Modelo equivalente en la región activa inversa

Realizando un análisis similar al anterior, se puede representar al transistor bipolar NPN en el modo activo inverso, (juntura CB en directa y juntura EB en inversa) como en el circuito de la Figura 11.

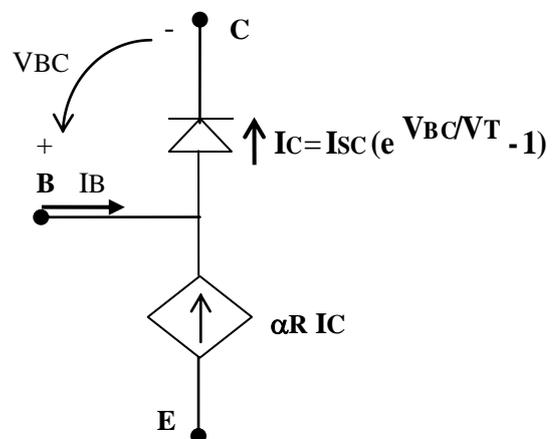


Figura 11

3.3- Modelo de Ebers-Moll

El modelo de Ebers-Molls es un modelo que, basado en los circuitos anteriores, permite analizar al transistor en todas las regiones de funcionamiento, Figura 12.

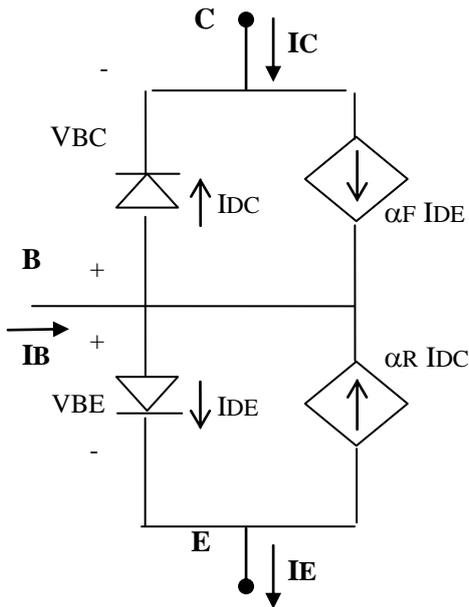


Figura 12

El modelo consta de dos diodos en oposición, representando a las junturas E-B y C-B, por los cuales circulan las corrientes IDE e IDC, en paralelo con fuentes de corriente dependientes que tienen en cuenta el transporte de los portadores a través de la región de base.

Las corrientes IDE e IDC quedan determinadas por las tensiones a través de las junturas:

$$I_{DE} = I_{SE} (e^{V_{BE}/V_T} - 1)$$

$$I_{DC} = I_{SC} (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

Aplicando las leyes de Kirchoff en los nodos de emisor y de colector, resultan las siguientes relaciones:

$$I_E = I_{DE} - \alpha_R I_{DC}$$

$$I_C = \alpha_F I_{DE} - I_{DC}$$

Reemplazando y ordenando los términos, se encuentran las ecuaciones que relacionan las corrientes de emisor y colector con las tensiones aplicadas a las junturas VBE y VBC.

$$I_E = I_{SE} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) - \alpha_R I_{SC} (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{SE} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) - I_{SC} (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

El modelo así desarrollado está caracterizado por cuatro parámetros: α_F , α_R , I_{SE} e I_{SC} . Sin embargo, sólo tres parámetros son independientes ya que por reciprocidad:

$$\alpha_F I_{SE} = \alpha_R I_{SC}$$

Veamos como el modelo de Ebers-Moll puede aplicarse a las distintas regiones de funcionamiento del transistor bipolar.

1- Región activa directa

En esta región la juntura E-B se polariza en directa, considerándose un valor típico para $V_{BE} = 0.7$ V. La juntura C-B se polariza en inversa y para tensiones $V_{CB} > 4 V_T \cong 100$ mV puede despreciarse el efecto del término exponencial. Aplicando esta consideración a las ecuaciones de Ebers-Moll:

$$I_E = I_{SE} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + \alpha_R I_{SC}$$

$$I_C = \alpha_F I_{SE} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + I_{SC}$$

Operando con las ecuaciones anteriores se puede expresar la corriente de colector IC en función de la corriente de emisor IE:

$$I_C = \alpha_F I_E + I_{CBo}$$

Se define IC_{Bo} como la corriente que circula entre colector y base cuando no circula corriente de emisor ($IE = 0$).

$$IC_{Bo} = ISC (1 - \alpha_F \alpha_R)$$

La componente de corriente IC_{Bo} es debida a la corriente de saturación inversa de la juntura C-B. Si bien tiene un valor muy pequeño es fuertemente dependiente de la temperatura (se duplica aproximadamente cada 10 °C de aumento de la temperatura) y puede tener importancia en condiciones de circuito abierto de emisor o para corrientes de emisor muy pequeñas.

Si consideramos que la corriente inversa de saturación de la juntura de colector ISC es despreciable, resulta el circuito equivalente mostrado en la Figura 13 para la región activa directa.

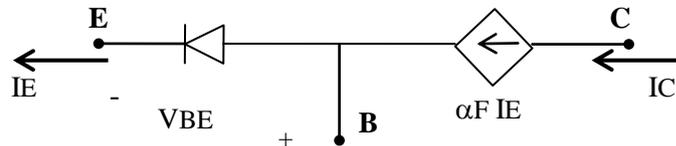


Figura 13

Si relacionamos la corriente de colector IC con la corriente de base IB:

$$IC = \alpha_F IE + IC_{Bo}$$

$$IE = IC - IB$$

resulta:

$$IC = \beta_F IB + IC_{Bo} (1 + \beta_F)$$

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

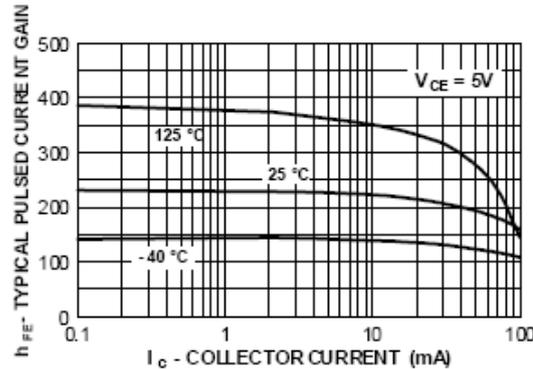
β_F es la ganancia de corriente continua en emisor común, dato típico que aparece en las hojas características del dispositivo dadas por el fabricante. En general, despreciando el efecto de IC_{Bo} se obtiene la siguiente relación que representa el funcionamiento del transistor en la región activa:

$$\beta_F = h_{FE} \approx \frac{IC}{IB}$$

Esta ecuación establece que en la región activa la relación entre las corrientes de colector y base es una constante. Sin embargo, el valor de h_{FE} depende del proceso de fabricación del dispositivo produciéndose una gran dispersión en sus valores y también depende fuertemente de la temperatura. En general, los datos del fabricante establecen un valor típico (typ), un valor máximo (max) y un valor mínimo (min). Por ejemplo para el transistor 2N3904 (NPN, uso como amplificador) se obtiene:

Electrical Characteristics		$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted			
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Max	Units
h_{FE}	DC Current Gain	$I_C = 0.1 \text{ mA}, V_{CE} = 1.0 \text{ V}$ $I_C = 1.0 \text{ mA}, V_{CE} = 1.0 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}, V_{CE} = 1.0 \text{ V}$ $I_C = 50 \text{ mA}, V_{CE} = 1.0 \text{ V}$ $I_C = 100 \text{ mA}, V_{CE} = 1.0 \text{ V}$	40	70	300
			100	60	
			60	30	
			30		

Como h_{FE} varía con la corriente de colector IC , la tensión de polarización V_{CE} y la temperatura, el fabricante da curvas características de $h_{FE} = f(IC, T)$, como la mostrada para el transistor 2N3904.



2- Región de corte

Para el régimen de corte ambas junturas se polarizan en inversa ($V_{BE} < 0$ y $V_{BC} < 0$ para un transistor NPN), de modo que las corrientes en los terminales quedan determinadas por las pequeñas corrientes de saturación de las dos junturas, Figura 14.

Aplicando el modelo de Ebers- Moll resulta:

$$I_E = -I_{SE} + \alpha_R I_{SC}$$

$$I_C = -\alpha_F I_{SE} + I_{SC}$$

Estas corrientes son muy pequeñas y pueden despreciarse en un modelo de primera aproximación. Con estas consideraciones el modelo equivalente en corte puede representarse como en la Figura 15 donde las junturas E-B y C-B se representan por llaves abiertas.

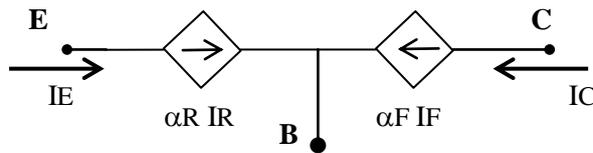


Figura 14

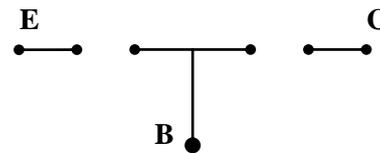


Figura 15

3- Región de saturación

En esta región las junturas se polarizan en forma directa ($V_{BE} > 0$ y $V_{BC} > 0$ para un transistor NPN) y será necesario considerar el circuito completo para describir el funcionamiento del transistor.

$$I_E = I_{SE} e^{V_{BE}/V_T} - \alpha_R I_{SC} e^{V_{BC}/V_T}$$

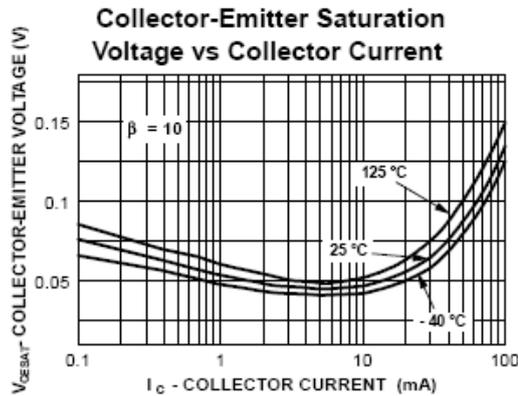
$$I_C = \alpha_F I_{SE} e^{V_{BE}/V_T} - I_{SC} e^{V_{BC}/V_T}$$

Como en saturación la tensión resultante entre colector y emisor es: $V_{CEsat} = V_{BEsat} - V_{BCsat}$ la tensión resultante es muy pequeña del orden de 0.2 V a 0.3 V, prácticamente un cortocircuito, la corriente de colector puede tomar un valor elevado y queda limitada por el circuito externo.

En saturación se cumple $I_B > I_C / \beta_F$, donde β_F corresponde a la operación en la región activa, y se puede considerar que el transistor opera en saturación con $\beta_{Fsat} = I_{Csat} / I_{Bsat} < \beta_{Factiva}$.

Para reconocer en un circuito si un transistor está saturado se pueden calcular I_B e I_C por caminos deferentes, si $I_B > I_C / \beta_F$, el transistor trabajará en saturación.

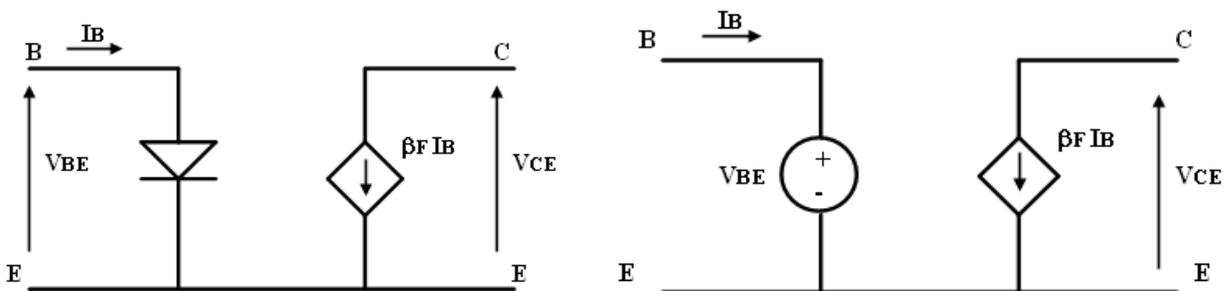
La característica de la tensión de saturación V_{CEsat} como función de I_C aparece en las hojas de datos del fabricante. Por ejemplo para el transistor 2N3904.



3.4- Modelos equivalentes para corriente continua

A partir del modelo de Ebers-Moll, y haciendo algunas sencillas consideraciones sobre la región de trabajo donde opera el transistor, se pueden construir modelos equivalentes de continua que permiten calcular rápidamente el punto de reposo. Si bien se considerará la configuración de emisor común, los modelos se pueden aplicar a otras configuraciones.

Para el caso de un transistor NPN polarizado en la región activa directa, y despreciando las corrientes de saturación inversas, se puede construir el circuito equivalente mostrado en la Figura 16:



$$I_B \cong (I_{CS} e^{V_{BE}/V_T})/\beta$$

Figura 16

La corriente de colector I_C queda determinada por una fuente de corriente dependiente de corriente de valor $\beta_F I_B$. La relación entre Base y Emisor correspondería al comportamiento del diodo Base-Emisor, representado por una batería de valor aproximado: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$.

Para la región de saturación puede dibujarse un circuito similar, donde se considera al diodo Base-Emisor representado por una batería $V_{BEsat} = 0.8 \text{ V}$ y la relación entre colector y emisor por una batería $V_{CEsat} = 0.2 \text{ V}$, como muestra la Figura 17.

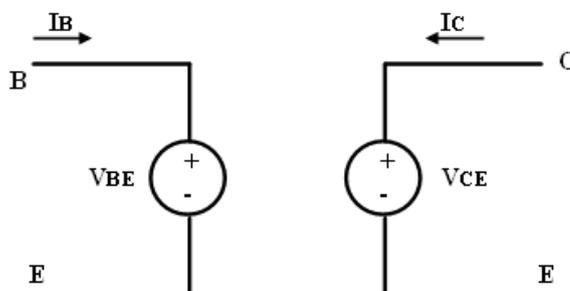


Figura 17

Ejemplo

Para el transistor bipolar del circuito mostrado en la Figura 18 a), determinar la región de funcionamiento y los valores de las corrientes para $R_B = 300\text{ K}\Omega$ y $R_B = 150\text{ K}\Omega$.

Suponer que las corrientes de saturación inversas se pueden despreciar y que $\beta_F = 100$, $V_{CEsat} = 0.2\text{ V}$, $V_{BEsat} = 0.8\text{ V}$, $V_{BE} = 0.7\text{ V}$.

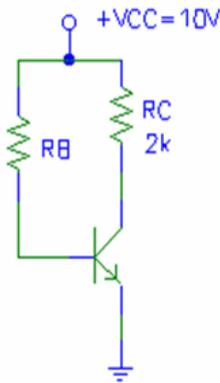


Figura 18 a)

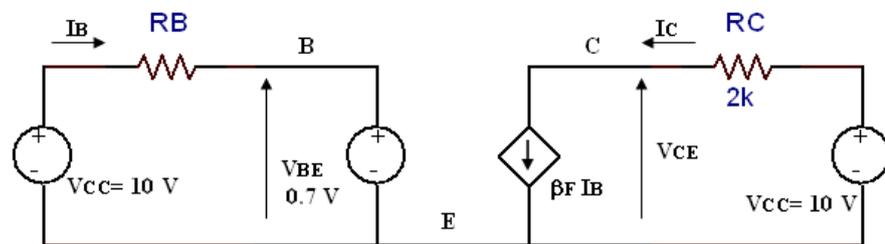


Figura 18 b)

Para determinar la región de funcionamiento observamos del circuito que la base se encuentra conectada a una tensión positiva y el emisor está conectado a tierra, así que resulta la tensión base-emisor mayor que cero ($V_{BE} > 0$). Por lo tanto, con seguridad, la unión emisor-base está polarizada en directa. Resulta así que puede descartarse la región de corte; el transistor estará polarizado en zona activa o en saturación. Suponemos, por hipótesis, que el transistor está en zona activa (si no lo está obtendremos resultados no concordantes o absurdos).

En la Figura 18 b) se dibuja el circuito equivalente para zona activa. Para comprobar que el transistor está en zona activa calculamos la tensión colector-emisor (V_{CE}) y verificamos que sea mayor que $V_{CEsat} = 0.2\text{ V}$. Si no lo es, el transistor estará en zona de saturación, la hipótesis fue incorrecta y deberán recalcularse las corrientes.

Caso 1: $R_B = 300\text{ K}\Omega$

Aplicamos ley de Kirchhoff al circuito de entrada (base-emisor) en la Figura 18 b):

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Despejando I_B y reemplazando valores se obtiene:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10\text{V} - 0.7\text{V}}{300\text{K}\Omega} = 0.031\text{ mA}$$

Aplicando la relación entre corriente de base y colector:

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.031\text{ mA} = 3.1\text{ mA}$$

De la malla de salida obtenemos V_{CE} :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10V - 3.1 \text{ mA} \times 2K\Omega = 3.8V$$

Como $V_{CE} > V_{CEsat}$, la suposición fue correcta, el transistor trabaja en la región activa.

Caso 2: $R_B = 150 K\Omega$

Usando las mismas ecuaciones:

$$I_C = \beta_F I_B = 100 \times 0.062 \text{ mA} = 6.2 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10V - 6.2 \text{ mA} \times 2K\Omega = -2.4V$$

En este caso $V_{CE} < V_{CEsat}$, entonces el transistor no se encuentra trabajando en zona activa. Por lo tanto, se encuentra en saturación. Reemplazando: $V_{CEsat} = 0.2 \text{ V}$ y $V_{BEsat} = 0.8 \text{ V}$:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_B} = \frac{10V - 0.8V}{150K\Omega} = 0.0613 \text{ mA}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{10V - 0.2V}{2 K\Omega} = 4.90 \text{ mA}$$

Se verifica que el transistor está polarizado en la región de saturación en emisor común porque se cumple que:

$$I_B > \frac{I_C}{\beta}$$

$$0.0613 \text{ mA} > \frac{4.90 \text{ mA}}{100} = 0.049 \text{ mA}$$