

PRACTICA 7

El transistor: estudio del componente

7.1. INTRODUCCION

De la misma forma que el diodo semiconductor significó un gran avance frente a los componentes a los que sustituyó funcionalmente, el transistor (dispositivo semiconductor también) no sólo amplía los campos de aplicación de la electrónica de su época sino que supone el inicio de una evolución vertiginosa que, partiendo de los años cincuenta (momento de su invención por Shokley, Bardeen y Brattain), llega a los actuales circuitos integrados y microprocesadores y deja adivinar la conversión de la ciencia ficción en realidad.

Como resumen de sus aplicaciones podemos decir, sin riesgo apreciable de error, que se encuentra presente en todos los sistemas electrónicos discretos e integrados que realicen cualquier tratamiento de señales.

Existen dos grandes familias de transistores, que son:

- Transistores unipolares.
- Transistores bipolares.

Esta clasificación se basa en el tipo de portadores de carga (electrones y huecos) que intervienen en su proceso de conducción.

El primer transistor descubierto fue el bipolar y, en esta práctica, iniciamos su estudio, tratando de descubrir sus peculiaridades y funcionamiento.

7.2. DESCRIPCION BASICA

Es un dispositivo cuya resistencia interna puede variar en función de la señal de entrada. Esta variación de resistencia provoca que sea capaz de regular la corriente que circula por el circuito en que se encuentre conectado.

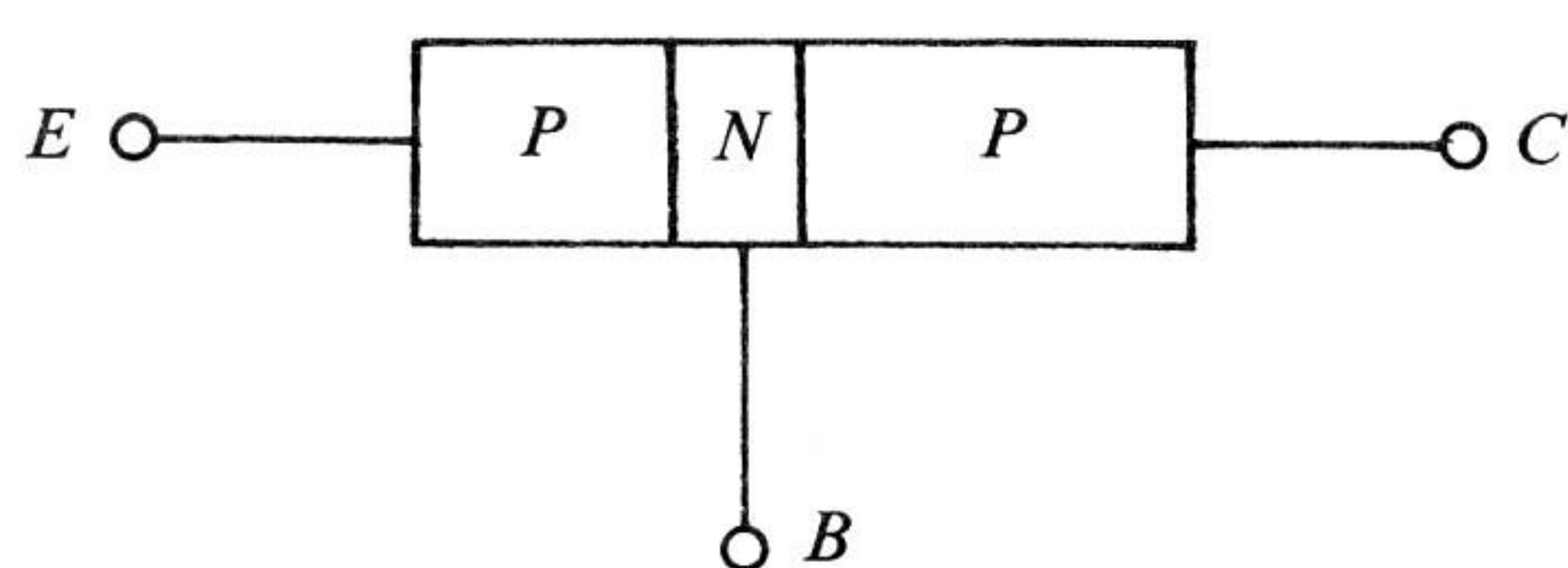
De dicho comportamiento como resistencia variable se deriva su nombre, del inglés: TRANSfer-reSISTOR.

Un transistor de unión bipolar es un cristal semiconductor en el que una zona tipo P o

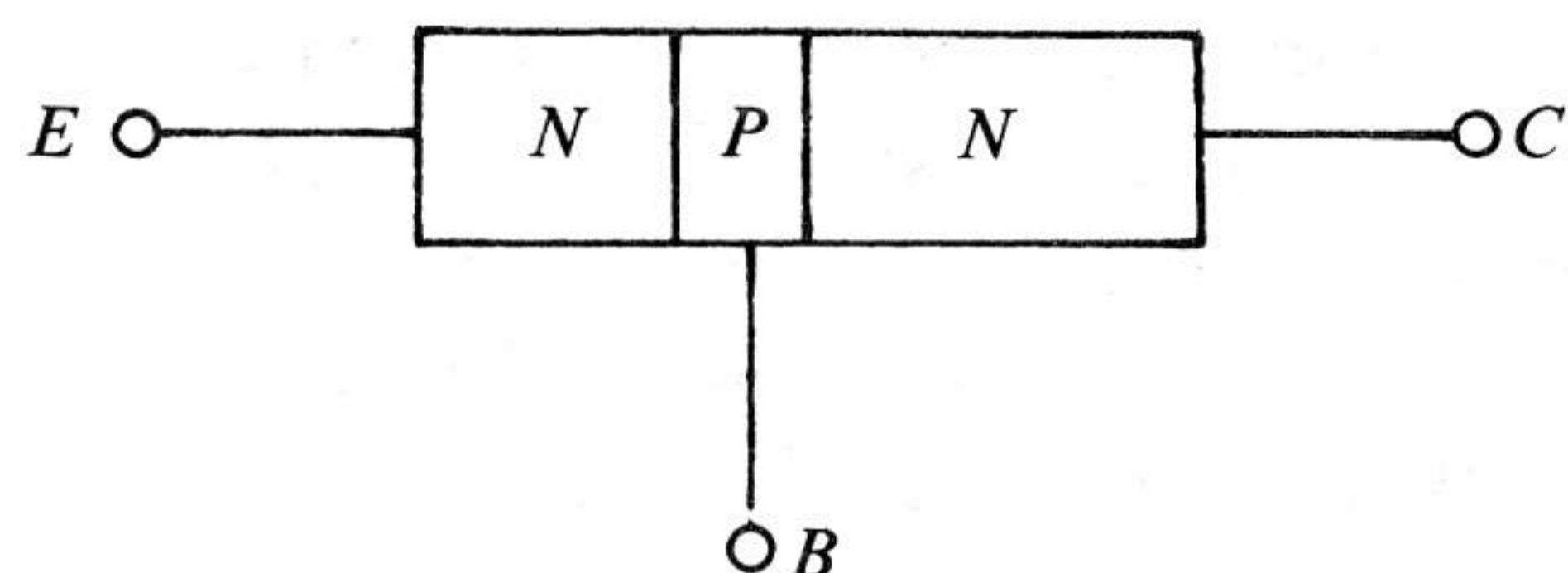
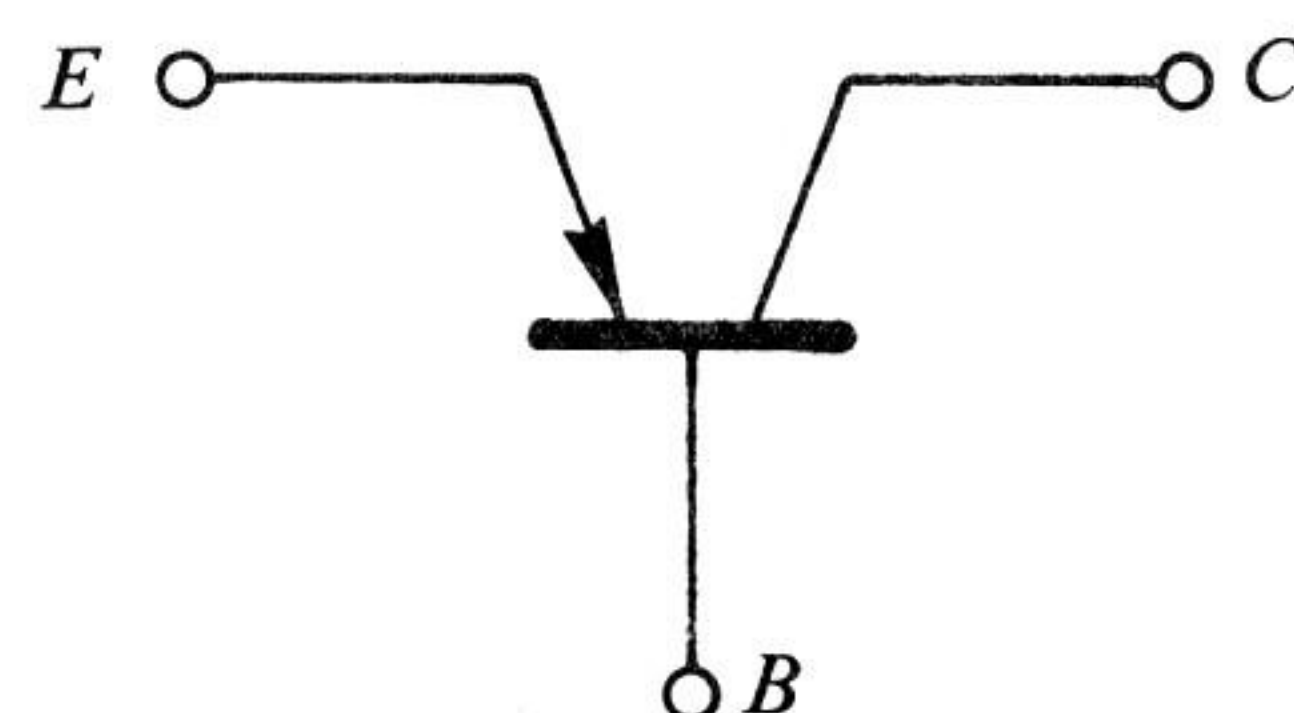
N está entre medias de otras dos N o P . En el primer caso el transistor es del tipo $N-P-N$ y en el segundo $P-N-P$.

El conjunto así formado se encierra herméticamente en una cápsula metálica o de plástico. Presenta al exterior tres terminales de conexión que parten de cada una de las regiones semiconductoras.

En la Figura 7.1 se representa la estructura y el símbolo esquemático correspondiente a cada tipo.



(a) PNP



(b) NPN

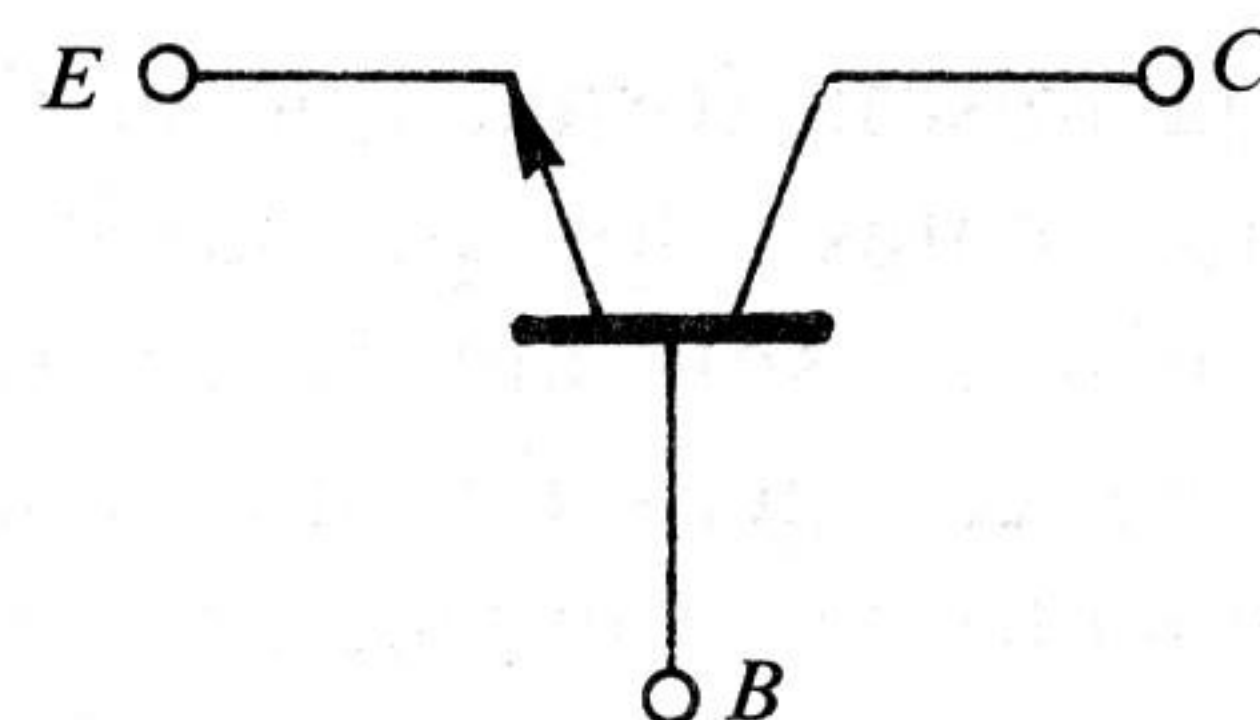


Figura 7.1. Estructuras simplificadas y símbolos del transistor.

Observando la misma figura nos podemos hacer una idea de la geometría y naturaleza del componente.

El emisor está fuertemente dopado y su misión es inyectar portadores en la base.

La base que está ligeramente impurificada es muy delgada (algunas micras); siendo atravesada por la mayor parte de los portadores que abandonan el emisor y se dirigen hacia el colector.

El colector tiene una impurificación media y recoge los portadores liberados por el emisor que no son recogidos por la base. Es mayor que ninguna de las otras regiones y disipa más calor que ninguna de ellas.

Con un poco de imaginación (dividiendo la base en dos) nos podemos encontrar con la Figura 7.2:

Esto nos sirve para apreciar la presencia de dos uniones PN , existiendo por tanto dos diodos (teóricamente hablando): el diodo base-emisor o simplemente diodo emisor y el diodo base-colector o diodo colector.

De la misma forma que existen diodos de silicio y de germanio hay transistores de ambos materiales. Mientras no se diga lo contrario haremos referencia implícita a transistores de silicio que conservan las mismas ventajas que presentaban los diodos de silicio frente a los de germanio. De igual forma realizaremos el estudio con transistores NPN , extensivo a transistores PNP , teniendo presente que en éstos los portadores mayoritarios

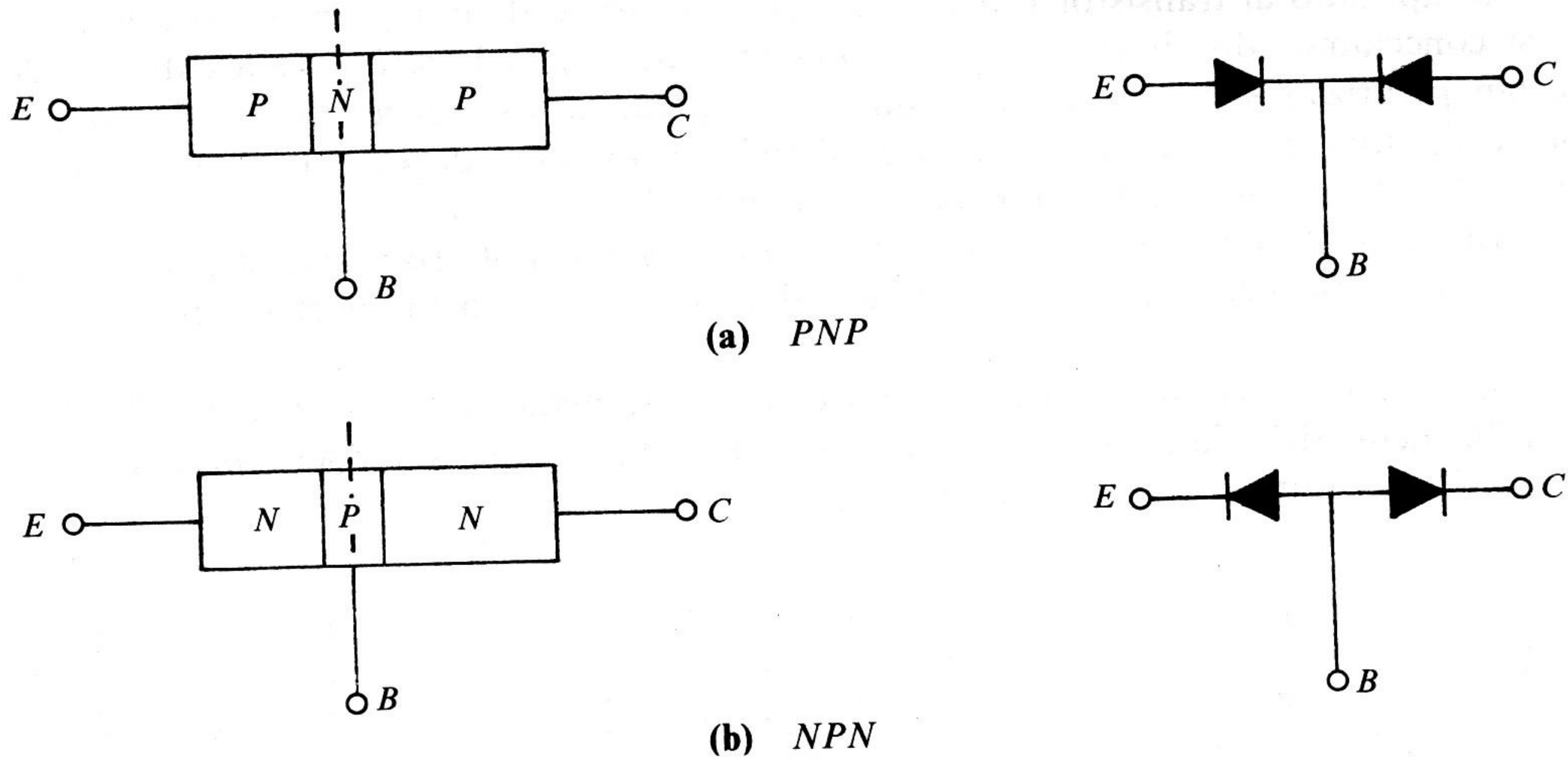


Figura 7.2. Equivalencia elemental del transistor.

son los huecos y ello implica el cambio de sentido de las corrientes y de las polaridades de las tensiones.

Se debe abandonar la posible idea de construir un transistor a partir de la conexión de dos diodos, pues si bien se consiguen dos uniones *PN* su comportamiento es radicalmente distinto debido sobre todo a la diferente geometría y más concretamente a las dimensiones de la base y a los diferentes niveles de dopado en cada región del transistor.

■ Polarización

En ausencia de tensiones de polarización los electrones libres producen dos capas agotadas producidas por recombinación con una barrera de potencial próxima a 0,7 V (Fig. 7.3) insalvable para los portadores si no se les comunica energía suficiente.

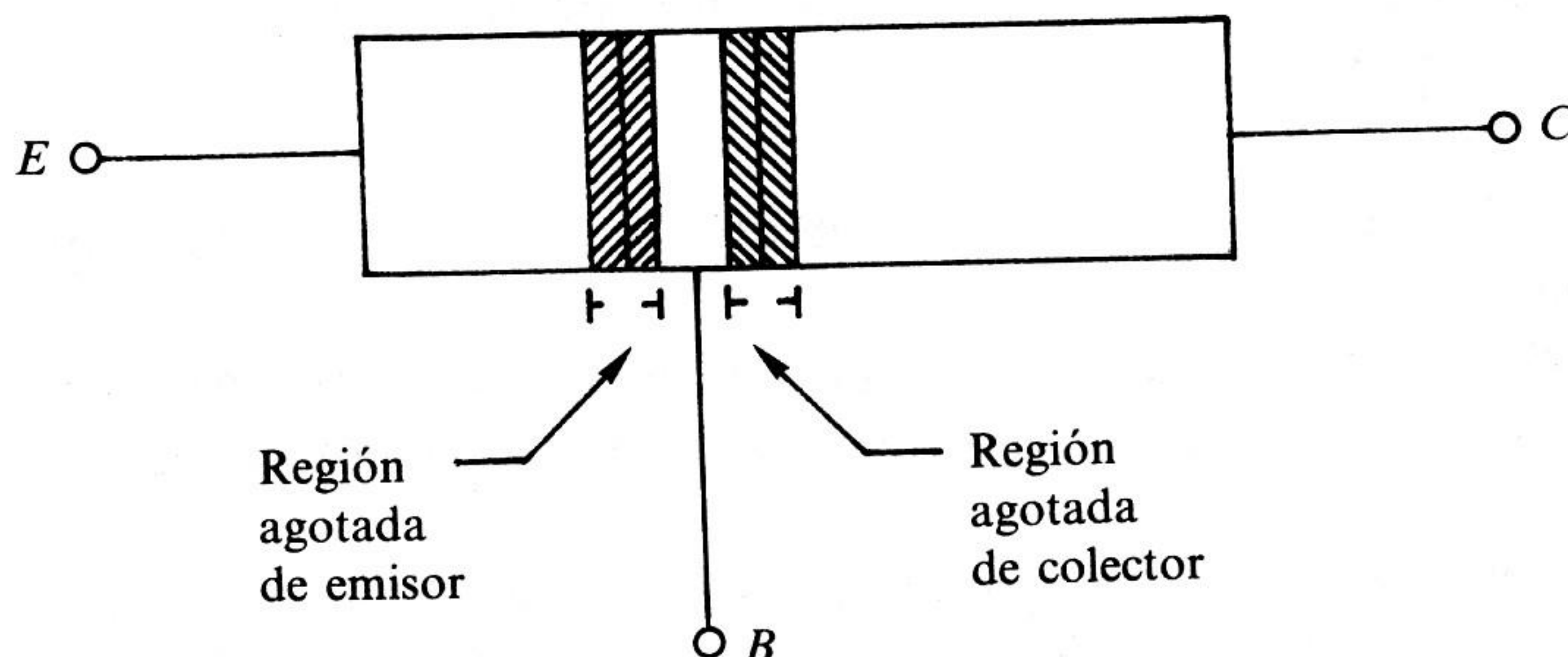


Figura 7.3. Regiones agotadas en las uniones del transistor.

Esto aplicado al transistor provoca un estrechamiento de la región efectiva de base.

Si conectamos dos baterías de la forma indicada en la Figura 7.4a los dos diodos quedan polarizados directamente y, una vez superados los valores de las barreras de potencial, circularán corrientes elevadas, debidas a los portadores mayoritarios, por el emisor I_E , por el colector I_C y por la base la suma de ambas I_B .

Invirtiendo las polaridades de V_1 y V_2 , Figura 7.4b, se polarizan inversamente ambas uniones y las pequeñas corrientes que circulan son debidas a los portadores minoritarios.

Polarizando directamente el diodo emisor e inversamente el diodo colector (Fig. 7.4c), previsiblemente debería circular una corriente elevada por el emisor y sería prácticamente nula la de colector. Veamos que esto no es así.

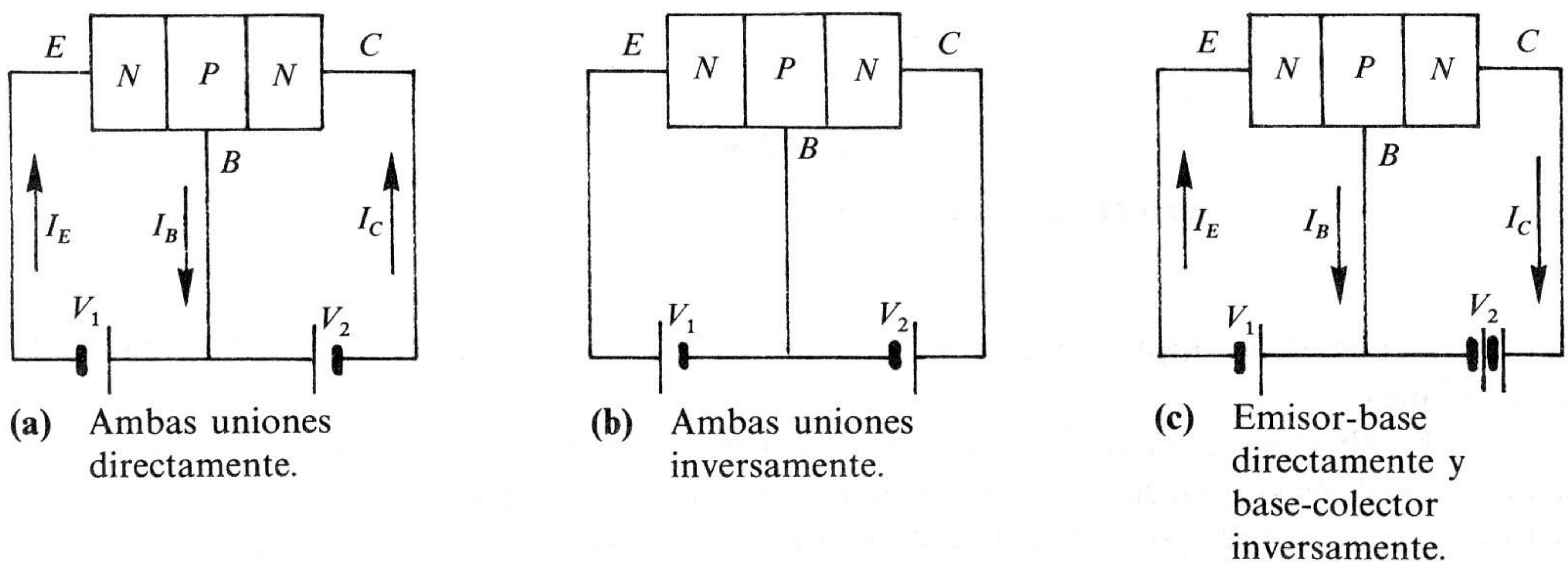


Figura 7.4. Polarizaciones del transistor *NPN*.

NOTA: Las flechas de corriente emplean sentido electrónico.

Si V_1 es suficiente para vencer el potencial de barrera, los electrones «emitidos» por el emisor alcanzan en grandes cantidades la región de base; de éstos no todos encuentran camino a través de la base hacia el polo positivo de V_1 , por dos razones:

1. Existen pocos huecos a causa del bajo dopado de la base.
2. La delgadez de la base.

De esta forma la base se satura rápidamente dando lugar a una pequeña corriente a través de su terminal.

El excedente de electrones, la mayoría, posee energía suficiente para difundirse hacia la zona agotada de colector y, una vez en ésta, es atraído por el campo eléctrico proporcionado por V_2 ($|V_2| > |V_1|$).

Visto lo anterior podemos decir que la mayoría de electrones que abandonan el emisor (más del 95 por 100 en la mayoría de los transistores) alcanzan el colector y circulan por el circuito exterior de éste. El resto se recombinan con los huecos de la base y circulan por su terminal externo.

La Figura 7.5 aclara estas ideas

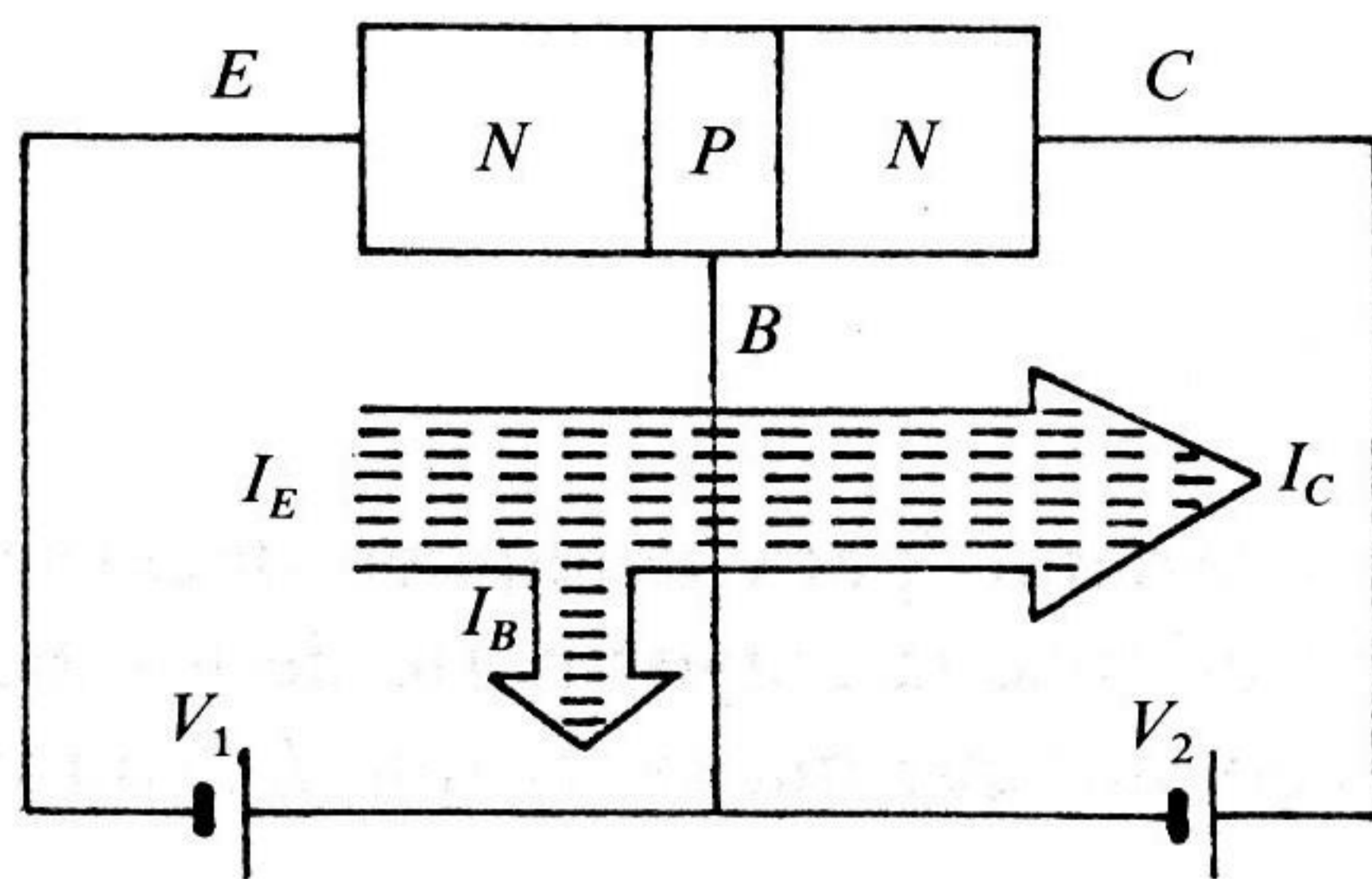


Figura 7.5. Flujos de corriente electrónica en el transistor *NPN*.

■ Tensiones y corrientes

En el transistor de la Figura 7.6 podemos apreciar los diferentes voltajes y tensiones existentes.

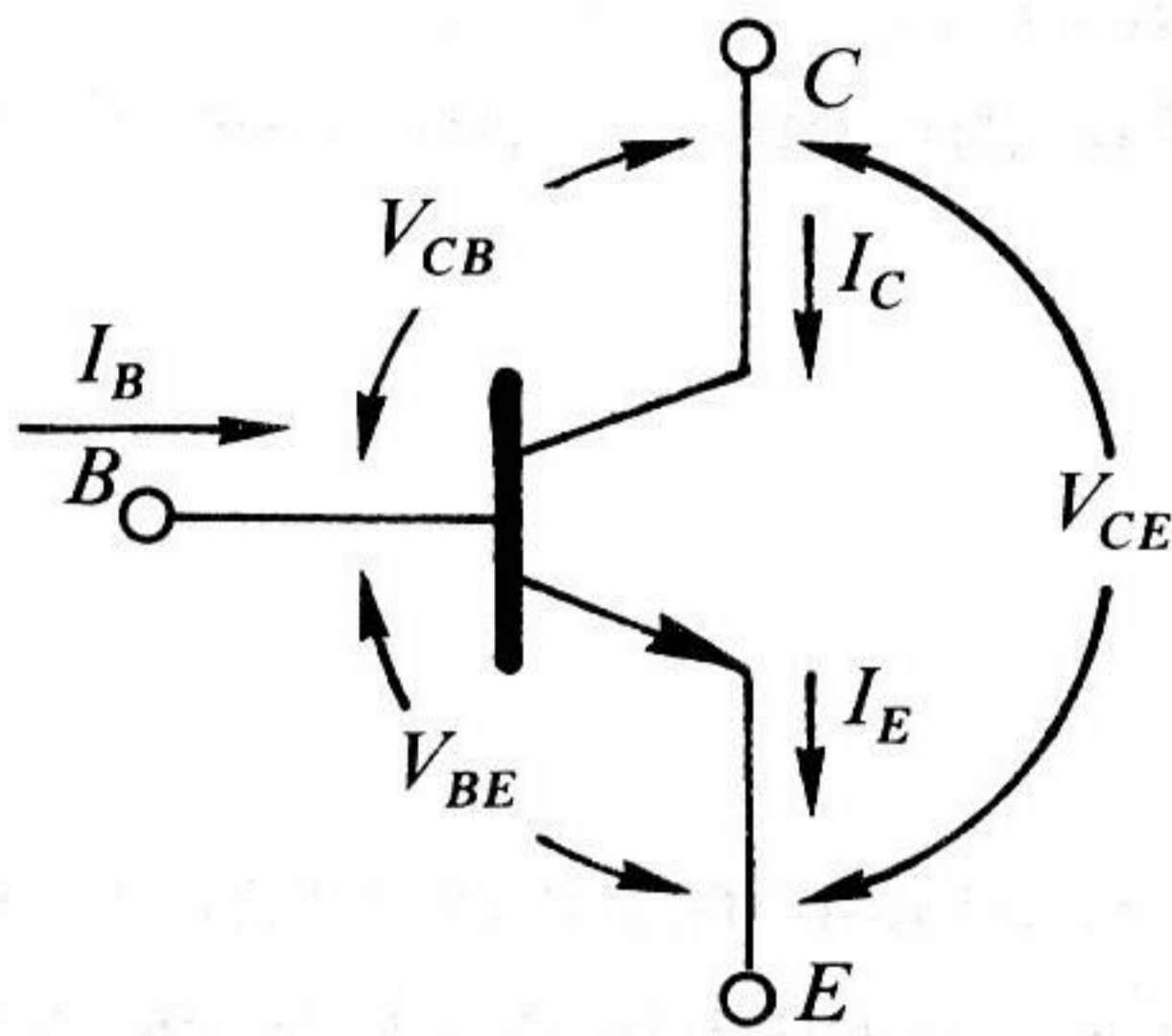


Figura 7.6. Tensiones y corrientes en un transistor *NPN*.

En adelante nos atenderemos a los siguientes convenios:

- Las flechas de corriente indican el sentido convencional (de positivo a negativo).
- Las letras de tensiones y corrientes y sus subíndices en mayúsculas son referidas a c.c. y en minúsculas, a c.a.
- Los subíndices, en magnitudes referidas a transistores, indican el terminal o terminales a que afectan.
- El mismo subíndice dos veces, representa el voltaje de la fuente que alimenta a ese terminal.
- Un tercer subíndice *O* indica que el terminal cuya inicial no está presente está en circuito abierto (open).
- En el caso de dos subíndices, se toma el primero como positivo.
- Un único subíndice en tensiones, representa el voltaje entre ese terminal y masa.

EJEMPLOS

V_{CE} = Tensión de c.c. entre colector y emisor.

I_B = Corriente de base de c.c.

i_b = Corriente de base en c.a.

V_{CC} = Tensión de alimentación de colector.

V_E = Tensión de c.c. entre emisor y masa.

Como el transistor posee tres terminales, existen seis magnitudes importantes que influyen sobre su previsible funcionamiento. Entre ellas hay relaciones importantes, veamos a continuación algunas de ellas:

Aplicando la ley de Kirchhoff de los nudos,

$$I_E = I_B + I_C$$

de donde deducimos que $I_E > I_C$, esto es invariante para cualquier disposición del transistor. Como se ha expuesto en párrafos anteriores, la mayor parte de los electrones que abandonan el emisor llegan al colector, luego, aunque mayor I_E que I_C , son bastante parecidas.

La relación entre estas corrientes viene dada por el parámetro «alfa»

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

valores usuales de α son de 0,95 a 0,99, pero en cualquier caso $\alpha < 1$.

De la misma forma se observa que $I_C \gg I_B$ y la relación entre ambas es el parámetro «beta»

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

Valores normales de β son de 50 a 500, encontrándose transistores cuyo valor es superior a 1000. Es usual encontrar β como H_{FE} y suele ser utilizada en los catálogos de información de los fabricantes de transistores.

De las expresiones de α y β y de la relación entre las tres corrientes se obtienen ecuaciones matemáticas que relacionan a ambas

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Por otra parte, las tensiones están relacionadas entre sí mediante la ley de las mallas aplicada a la Figura 7.6 y se observa que

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

al igual que en las corrientes, esta relación también es constante.

7.3. FUNCIONAMIENTO

Si, disponiendo de un circuito de polarización del transistor, hacemos variar de manera controlada ciertos parámetros, veremos la evolución del resto.

En el circuito de la Figura 7.7 se puede ver que V_{BB} y V_{CC} pueden variar la tensión

entregada, ello implica que todas las tensiones y corrientes son susceptibles de variación. R_C y R_B limitan las corrientes máximas que pueden circular por el transistor.

Ajustando V_{BB} podemos ajustar valores de I_B , pues bien, manteniendo constante dicha corriente a un valor determinado y variando V_{CC} variaremos a su vez V_{CE} , lo que implica una posible variación de I_C .

Con estos datos construiremos una gráfica de I_C en función de V_{CE} con I_B constante. Si ajustamos nuevos valores de la corriente de base y repetimos el proceso, obtendremos nuevas curvas. A la familia de curvas obtenidas se las llama *curvas características de colector* o, simplemente, curvas de colector (Gráfica 7.1). De ellas nos vamos a servir para ver el comportamiento del transistor.

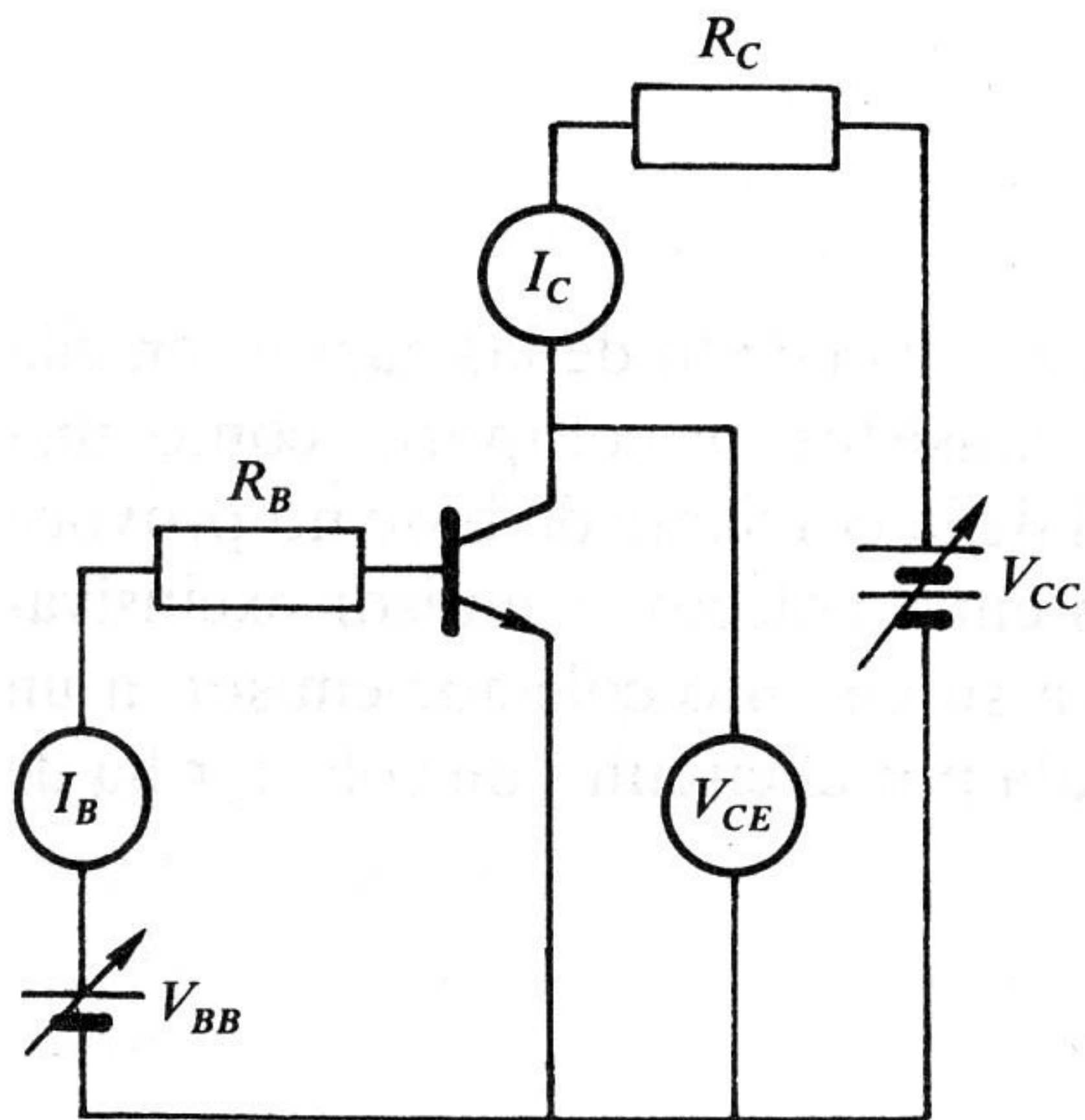
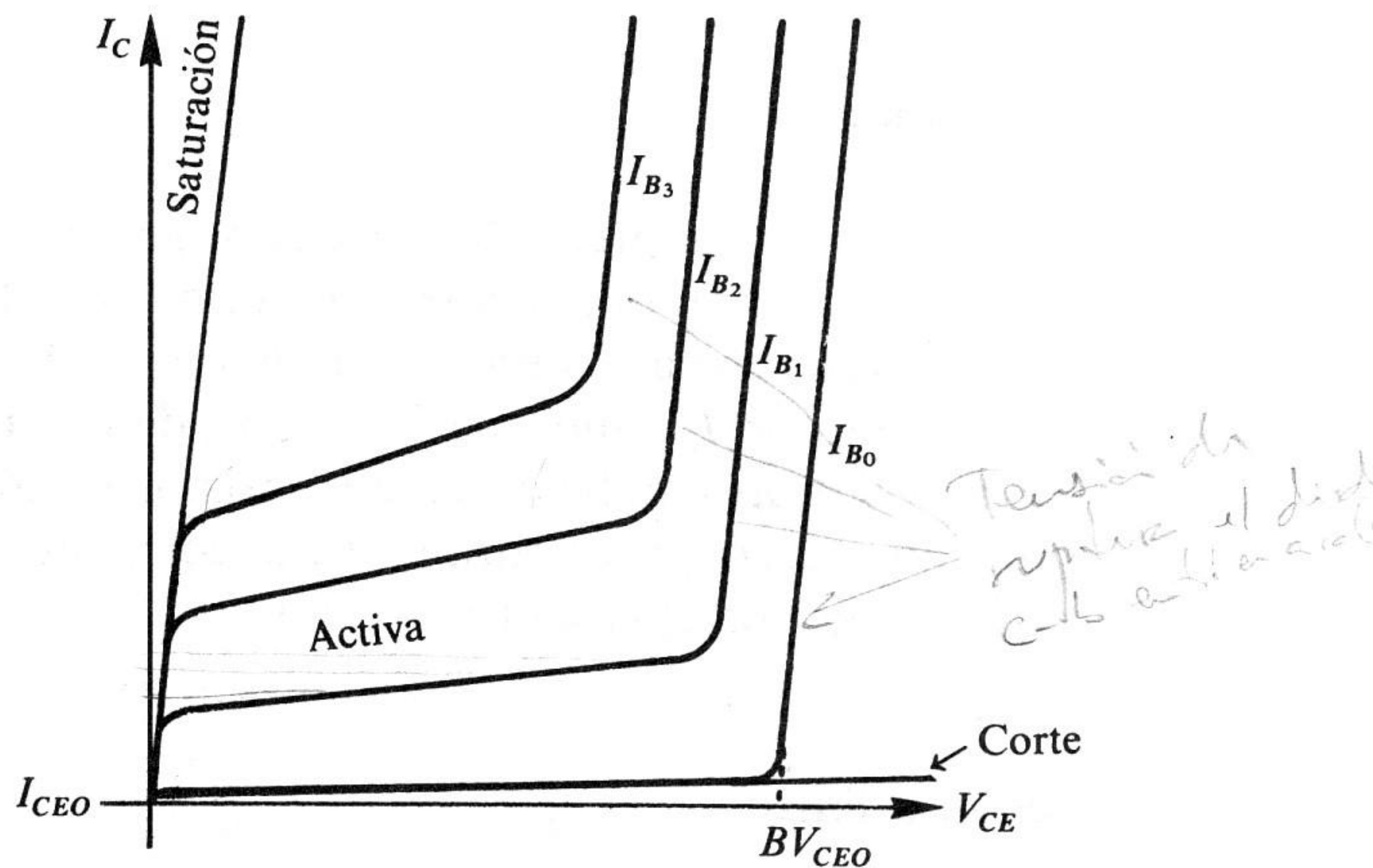


Figura 7.7. Disposición para obtener las características de colector.



Gráfica 7.1. Familia de curvas características de colector.

Cuando $I_B = 0$, para $V_{CE} = 0$, $I_C = 0$, si se va aumentando la tensión colector-emisor vemos que la corriente de colector se estabiliza rápidamente aunque a un valor muy bajo, algunos nA o μ A dependiendo del tipo de transistor. Ello es debido a la corriente de fuga del diodo colector que se encuentre en inverso y se la denomina I_{CBO} , si se sigue aumentando V_{CE} se alcanza la región de ruptura por avalancha donde el transistor se destruye irremediablemente, a este valor se le denomina BV_{CEO} ; los fabricantes indican un valor $V_{CEO\text{máx}}$, que no ha de ser sobrepasado bajo ninguna circunstancia para evitar el posible deterioro del componente.

Para un valor superior de I_B (I_{B1}), en el origen, $V_{CE} = 0$, la corriente de colector es nula, para pequeños aumentos de la tensión colector-emisor I_C crece rápidamente y, a partir de algunas décimas de voltio, se hace prácticamente constante, o más exactamente, los incrementos son muy pequeños y son debidos al ensanchamiento de la región agotada del diodo base-colector, lo que permite que éste recoja algunos electrones más de la base. Incrementando de nuevo V_{CE} se alcanzará de nuevo la tensión de ruptura, aunque en este caso a un valor inferior que para $I_B = 0$.

Repetiendo el proceso para nuevos valores de la corriente de base (I_{B2} , I_{B3} , ...) los

hechos se repiten: I_C se hace prácticamente constante a valores más elevados y cada vez se va alcanzando antes la tensión de ruptura.

A medida que la corriente de base se va haciendo mayor, la pendiente de la curva aumenta entre los puntos de codo y de ruptura, ello implica conjuntamente con los aumentos de I_C provocados por los incrementos de la tensión colector-emisor, que β no es constante, pues si así fuera en cualquier punto de cada curva la relación I_C/I_B sería la misma y es fácil comprobar que no lo es.

Las hojas de datos de los fabricantes suelen ofrecer dos valores de β (recuérdese H_{FE}) extremos. Valga como ejemplo el transistor BD137: $40 < \beta < 250$.

A la vista de la familia de curvas de la Gráfica 7.1 se distinguen tres zonas que coinciden con tres posibles condiciones de trabajo.

Saturación

Es la zona comprendida entre el origen de coordenadas y el codo de las curvas, en ella el diodo colector está polarizado directamente y el transistor se comporta como una pequeña resistencia. En esta zona un aumento adicional de la corriente de base no provoca un aumento de I_C , sino que ésta depende de la tensión entre colector y emisor exclusivamente. En estas condiciones, el transistor se asemeja, en su circuito colector-emisor, a un interruptor cerrado («saturado») y la corriente que circula por el circuito de colector ha de ser limitada por el circuito exterior.

Activa o lineal

Para valores de V_{CE} comprendidos entre un voltio aproximadamente y valores cercanos a $V_{CE\text{máx}}$ se encuentra la zona activa. En este intervalo el transistor se comporta como una fuente de corriente, determinada por la corriente de base. A pequeños aumentos de I_B corresponden grandes aumentos de I_C , de forma casi independiente de V_{CE} .

Para hacer trabajar al transistor en esta zona las polarizaciones han de ser: diodo emisor, directamente y diodo colector, inversamente.

Corte

El hecho de hacer la corriente de base igual a cero es equivalente, como quedó expuesto, a mantener este circuito abierto. En estas circunstancias la corriente de colector es tan pequeña que, si la despreciamos, podemos comparar el transistor, su circuito colector-emisor, con un interruptor abierto, y se dice que el transistor está «en corte» o simplemente «cortado».

Las polarizaciones han de ser: diodo colector, inversamente y diodo emisor, inversamente o sin polarización.

7.4. CONSIDERACIONES GENERALES

Especificaciones máximas

Como cualquier otro componente, el transistor, como elemento físico real, tiene unas limitaciones en sus condiciones de trabajo, que no deben ser sobrepasadas para asegurar la vida del componente. Información acerca de estas limitaciones se encuentra en las hojas de datos; a continuación enumeramos algunas de las más importantes:

V_{CEO} = Máxima tensión colector-emisor.

V_{CBO} = Máxima tensión colector-base.

V_{EBO} = Máxima tensión emisor-base.

$V_{CE(sat)}$ = Máxima tensión colector-emisor en saturación.

$I_{Cmáx}$ = Máxima corriente de colector en régimen continuo.

$I_{CMmáx}$ = Máxima corriente de pico de colector.

$I_{BMmáx}$ = Máxima corriente de pico de base.

P_{tot} = Máxima potencia disipable. Según esta característica se dividen en: transistores «de pequeña señal» ($P_{tot} \leq 500$ mW) y «de potencia» para potencias superiores.

Es conveniente limitar los valores reales en régimen de trabajo, al menos, a 1/2 de los máximos especificados con el fin de asegurar un factor de seguridad, como mínimo, de 2. Este factor expresa la relación entre los valores máximos admisibles y los reales de trabajo.

Recuérdese que valores elevados de tensiones ocasionan ruptura por avalancha y que valores elevados de corriente generan un exceso de calor que influye en las corrientes de fuga, modificando por completo las condiciones de trabajo y llegando en situaciones extremas a la destrucción del componente.

La potencia total es la suma de las disipadas en el circuito de base y en el circuito de colector. Como la corriente de base es muy baja frente a la de colector, se puede despreciar y considerar, por aproximación, la potencia total como

$$P_{tot} = V_{CE} \cdot I_C$$

Debido a la importancia que tiene el anterior parámetro, en las hojas de datos de transistores de potencia es normal encontrar dos tipos de gráficas:

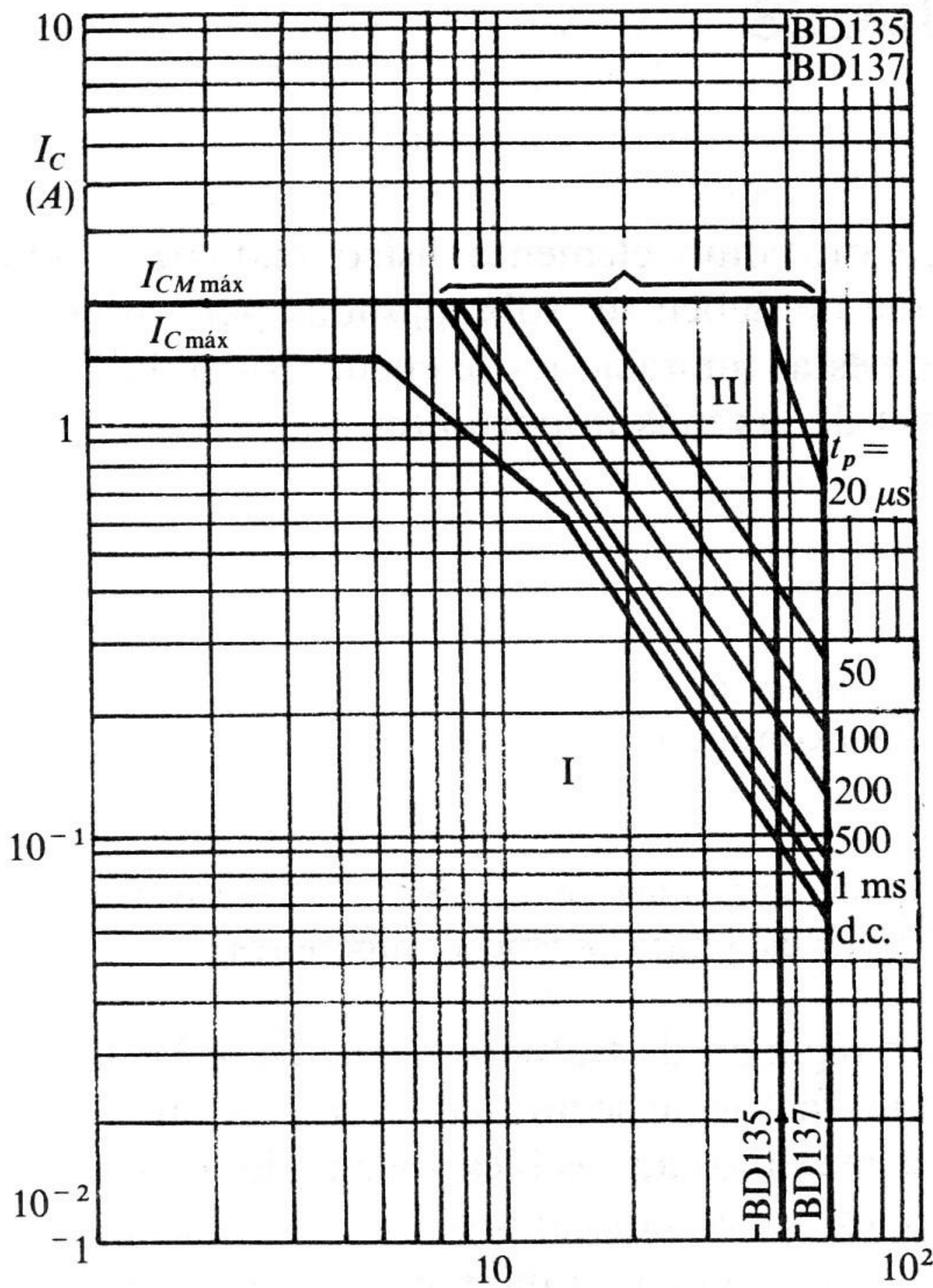
Una (Gráfica 7.2) que expresa la máxima potencia disipable en términos de pares de valores de I_C y de V_{CE} , denominándose **curva de máxima potencia**. Nótese que ésta varía en función de la duración en el tiempo de las condiciones.

Otra curva (Gráfica 7.3) da información acerca de la variación de la potencia disipable en función de la temperatura. Se la conoce como **curva de degradación de potencia**.

Verificación de transistores

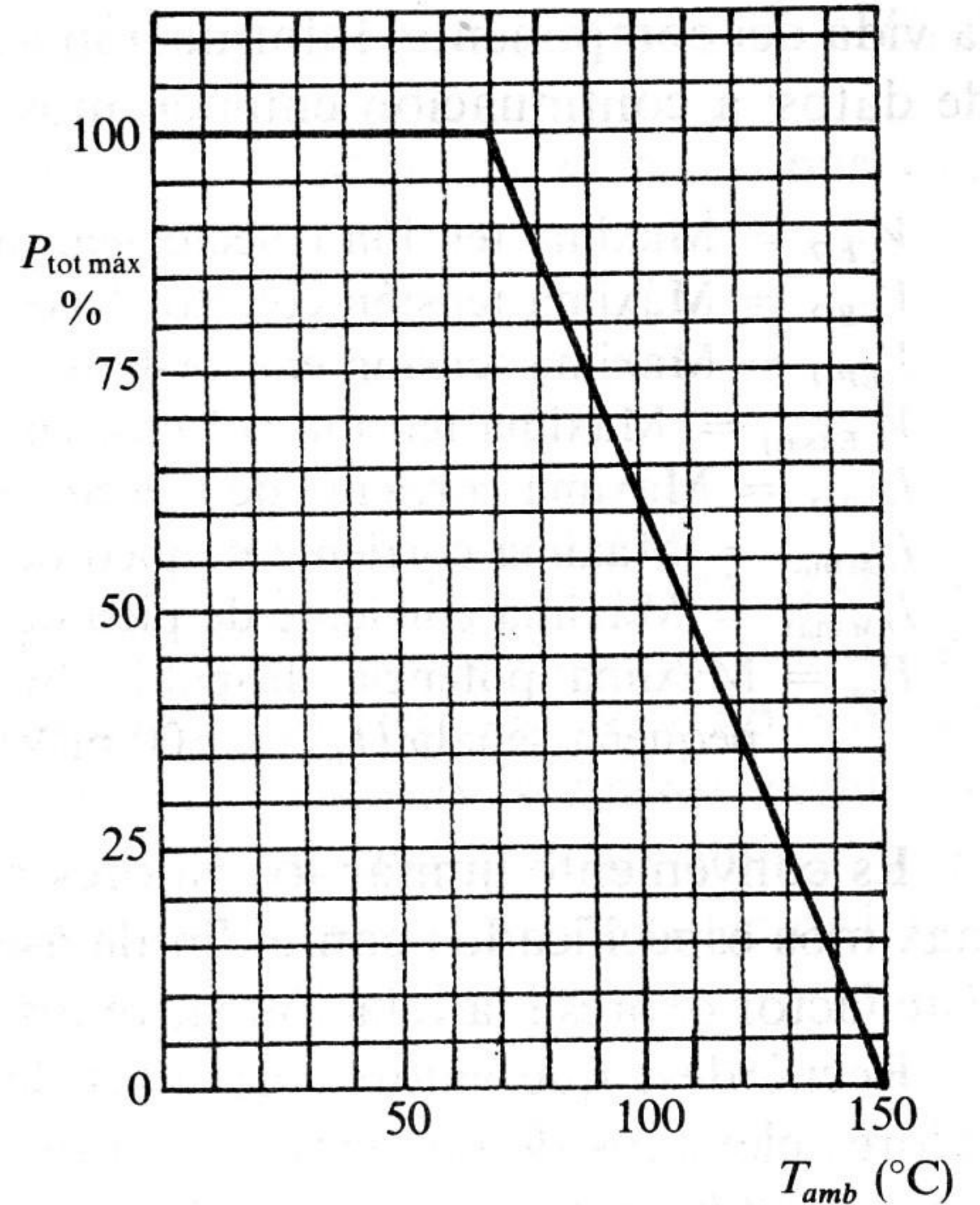
Para hacer una primera comprobación del estado del transistor, vale lo expuesto en la Práctica 1 sobre la verificación de diodos, teniendo en cuenta la naturaleza del transistor (*NPN* o *PNP*) y la existencia de dos diodos entre sus terminales.

Una forma más de comprobar el estado del transistor es la llamada «prueba del dedo»:



I Área permitida para funcionamiento en c.c.
 II Extensión permisible para funcionamiento por pulsos.

Gráfica 7.2. Curva de máxima potencia.



Gráfica 7.3. Curva de degradación de potencia.

Se conectan las puntas de prueba de un polímetro analógico, función ohmios $\times 1$, entre emisor y colector polarizándolo a través de la pila interna del óhmetro (punta positiva al colector para transistores *NPN*). A continuación se toca con un dedo la base y con otro el colector; la corriente proporcionada a la base a través de la resistencia interna de la mano, debe provocar una corriente de colector que hará que la aguja se desvíe a las proximidades del fondo de escala. Si ésta no se moviera o se desviara menos de media escala el transistor estará defectuoso.

Verificación mucho más fiable es la realizada con un transistómetro, instrumento de laboratorio diseñado para tal fin, ofreciendo mayor información sobre el estado «de salud» del transistor.

7.5. PROCESO OPERATIVO

1. Identificar los terminales del transistor utilizado en la práctica y comprobar su estado mediante el óhmetro y mediante la prueba del dedo.
2. Conectar el circuito de la Figura 7.8.
3. Ajustar $V_{CC} = 0$. Abrir S_1 y cerrar S_2 . Variar V_{CC} hasta conseguir sucesivamente los valores de V_{CE} indicados en la Tabla 7.1 y anotar las lecturas correspondientes de I_C .

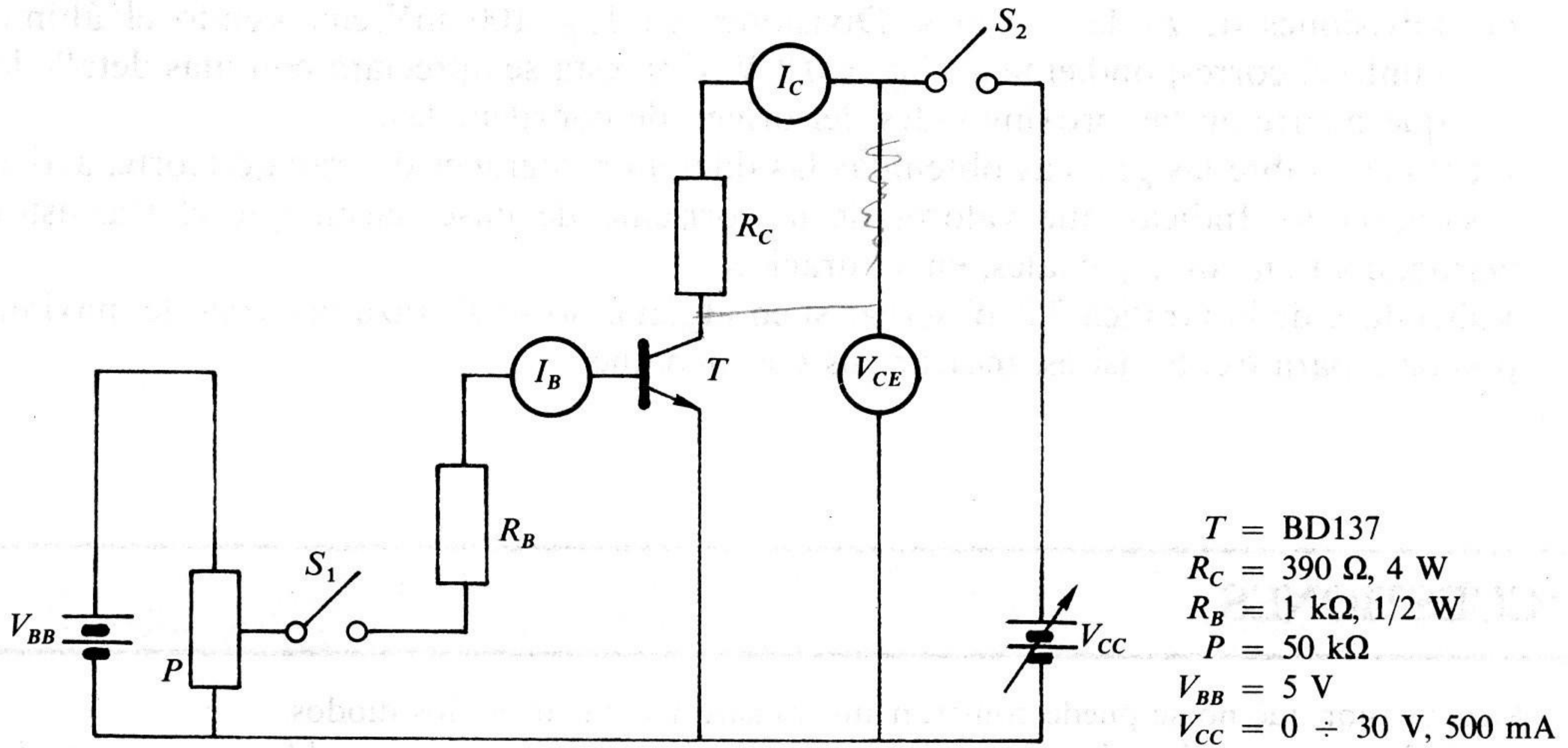


Figura 7.8. Circuito experimental para la obtención de curvas de colector.

Tabla 7.1.

		(V)										
		V_{CE}										
I_B	V_{CE}	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,4	0,8	4	8	12	16
0	I_C											
50												
125												
200												
275												
350												
425												
500												
1 mA												
4 mA												

4. Abrir S_2 y cerrar S_1 . Ajustar P hasta conseguir una lectura de $50 \mu\text{A}$ en I_B . Ajustar V_{CC} a cero y cerrar S_2 .
5. Ir variando V_{CC} para conseguir los valores de V_{CE} indicados en la misma tabla. Anotar los valores correspondientes de I_C .
6. Repetir los puntos 3 a 5 para los restantes valores de I_B .
7. Con los datos de la tabla, dibujar dos familias de curvas sobre papel milimetrado y de la siguiente forma:
 - a) Divisiones de I_C : 5 mA/cm . Divisiones de V_{CE} : 2 V/cm . Esta gráfica dará una visión de conjunto.

- b) Divisiones de I_C , las mismas. Divisiones de V_{CE} : 100 mV/cm, siendo el último punto el correspondiente a $V_{CE} = 0,8$ V. Con ésta se apreciará con más detalle lo que ocurre en las proximidades del origen de coordenadas.
8. Identificar sobre las gráficas obtenidas las diferentes regiones de trabajo (corte, activa y saturación). Indicar qué valores de la corriente de base hacen que el transistor permanezca en corte y cuáles, en saturación.
 9. Valiéndose de la Gráfica 7.2, observar si en algún caso se alcanza la curva de máxima potencia para c.c. Si así es, indicar sus coordenadas.

CUESTIONES

1. Razonar por qué no se puede construir un transistor a partir de dos diodos.
2. ¿Qué efecto provoca la polarización directa de la unión base-emisor sobre el funcionamiento del transistor?
3. Indicar qué significan V_{CEO} y V_{EBO} .
4. Razonar el hecho de que, con el circuito de base abierto, circule alguna corriente por el colector. ¿Qué nombre recibe?
5. Justificar, a la vista de las curvas, que β no es constante.

CONCLUSIONES

- El transistor está constituido por dos uniones PN , valiéndose de un cristal común muy estrecho, llamado base.
- Existen transistores PNP y NPN , según la disposición de los cristales.
- La polarización directa de la unión base-emisor inyecta portadores en la base, la mayoría de ellos son capturados por el colector debido a la acción del campo eléctrico proporcionado por la tensión de polarización de la unión base-colector.
- Las relaciones entre las corrientes del transistor son

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{I_C}{I_B}$$

- Según las diferentes polarizaciones de las uniones, se distinguen tres regiones de trabajo:
 - *Saturación*: El transistor se comporta como un cortocircuito entre emisor y colector.
 - *Activa o lineal*: Es capaz de amplificar variaciones de corriente, ya que un pequeño incremento de la corriente de base implica un gran aumento de la corriente de colector.
 - *Corte*: La corriente de colector es prácticamente nula y el circuito colector-emisor es comparable a un circuito abierto.
- Se debe procurar que el transistor no alcance jamás valores de magnitudes eléctricas iguales a las especificaciones máximas dadas por el fabricante.

INFORMACION ADICIONAL

Tabla 7.2. Transistor BD137

Material	Tipo	Cápsula	V_{CEO}	V_{CBO}	V_{EBO}	I_C	I_{CM}	P_{tot}	H_{FE}	$V_{CE(sat)}$
Silicio	NPN	TO-126	60 V máx	60 V máx	5 V máx	1,5 A máx	2 A máx	8 W a 70 °C	40-250	0,5 V máx a $I_C=0,5 A$

L31

