

El Transistor como "Caja Negra"

Por ENRIQUE SANZ JARAUTA
(Catedrático del Instituto "Príncipe de Viana" de Pamplona)



Premio Nobel de Física de 1956.— Los inventores del transistor: Dr. John Barden, Dr. William Shockley, Dr. Walter H. Brattain (de izquierda a derecha).

SE ha extendido en Física la denominación de caja «negra» (en el sentido de «opaca») al hablar de cualquier dispositivo o aparato que el operador utilice con provecho, pero sin conocer su constitución ni preocuparse de su funcionamiento interno.

No se trata de un nombre curioso simplemente, sino de una norma lógica para la investigación, y una actitud posibilista relacionada con ciertas teorías del conocimiento. Multitud de radioyentes usan su receptor como caja opaca; saben manejar los mandos, aunque desconocen el funcionamiento de las lámparas. Muchos obreros utilizan amperímetros y se valen de las indicaciones de la aguja, sin saber por qué se desvía. Nosotros

mismos empleamos en clase un amplificador, o un oscilógrafo, sin pensar en la función de cada condensador o resistencia.

El concepto es completamente general: la luz y el átomo fueron, y todavía son, verdaderas cajas negras que poco a poco se han ido abriendo. Este proceso continúa, porque dentro de las cajas se hallan siempre otras más negras. Los técnicos tratan de aprovecharlas, aun estando cerradas, y el investigador científico pone todo su empeño en levantar las tapas.

* * *

Se llama «cuadripolo» o «tetrapolo» a un sistema eléctrico cualquiera encerrado, real o idealmente, en una caja o chasis de donde salen cuatro bornas. Es un caso particular de caja negra. Unas veces se ignora qué elementos contiene o cómo funcionan, y otras veces se conoce todo ello, pero se trata de un sistema tan complejo que resulta imposible atender al papel que desempeña cada componente. En tales circunstancias el sistema se estudia como cuadripolo; el estudio consiste en aplicar tensiones, medir intensidades, etc., disponiendo de sus cuatro bornas, pero sin manipular dentro de la caja, que se considera cerrada y opaca. Como resultado de las mediciones se pueden calcular ciertos parámetros e idear uno o varios «circuitos equivalentes», es decir: esquemas compuestos por elementos vulgares (pilas, resistencias, etc.) que sean sencillos, pero que produzcan los mismos efectos externos que el tetrapolo en estudio. No es preciso que el circuito equivalente se pueda realmente construir; basta que se pueda imaginar de modo que su funcionamiento resulte lógico.

Un tetrapolo se llama «activo» cuando aporta energía y, por tanto, no es posible establecer su circuito equivalente sin introducir en él algún generador; en caso contrario, el tetrapolo es «pasivo». Un transformador, o un filtro de frecuencias, se reduce a un tetrapolo pasivo. Cualquier amplificador de potencia eléctrica es un tetrapolo activo; en dos de sus bornas se aplica la oscilación o «señal» de entrada, de un micrófono por ejemplo, y en las otras dos se recoge la señal amplificada de salida, que se aplica, por ejemplo, a un altavoz. El esquema de «bloques» de una emisora es una serie de cuadripolos activos o pasivos.

De los circuitos equivalentes se derivan datos y fórmulas de gran utilidad práctica. El cálculo de cuadripolos se ha sistematizado con gran elegancia matemática, pero en este artículo usaremos simplemente las leyes de Ohm y de Kirchoff.

* * *

Todo el mundo conoce hoy día el transistor, que ha revolucionado la técnica sustituyendo a las lámparas; presenta sobre ellas las ventajas de su minúsculo tamaño y pequeño consumo y la de funcionar con pilas de

pocos voltios. El Japón fabricó el año pasado cincuenta millones de receptores portátiles de seis o siete elementos.

La invención del transistor, en 1948, se debe a uno de los equipos investigadores de los «Bell Telephone Laboratories», equipo dirigido por W. Shockley, J. Barden y W. H. Brattain. El primero es autor de un libro magistral, *Electrons and Holes in Semiconductors*, en el que atribuye todo el mérito a sus compañeros; pero el premio Nóbel de 1956 se concedió a los tres conjuntamente por sus estudios y trabajos referentes a los semiconductores, estudios realizados con anterioridad al invento y que dieron origen al mismo.

Se podría decir que el transistor no fue nunca caja negra, porque estaba ya previsto como consecuencia casi necesaria de aquellas investigaciones, pero también es cierto que todavía queda algún misterio por aclarar; y en todo caso, resulta conveniente enfocar su estudio en dos aspectos: el utilitario o externo, al cual nos limitaremos, y el científico o interno que ofrece dificultad aún para quien domine las teorías cuánticas de las bandas de energía, barreras de potencial, estadística y niveles de Fermi, etc. Es bien conocida, en cambio, la teoría elemental del transistor, que ha sido muy divulgada.

El transistor primitivo (figura 1) fue el de «puntas» o de contactos puntuales. Consta de un pequeño cristal de germanio sobre el cual se apoyan, con ligera presión, dos finos alambres de tungsteno o bronce fosforoso, de puntas afiladas y separadas entre sí unos 0,05 mm. El germanio no ha de tener defectos en la red cristalina (monocristal) y su pureza sería superior a la espectroscópica, pero se impurifica a propósito, añadiendo átomos pentavalentes, por ejemplo de arsénico, o átomos trivalentes de indio, boro, etc. La proporción viene a ser de un átomo de impureza por cada 10 ó 100 millones de átomos de germanio. Estas impurezas entran a formar parte de la red, sustituyendo a otros tantos germanios y, si son pentavalentes, emplearán cuatro de sus electrones más externos en formar las covalencias con los germanios próximos, y el electrón sobrante quedará semilibre o libre (en un nivel energético especial próximo a la banda de conducción a la cual podrá pasar fácilmente). Los electrones, desligados de las covalencias, pueden moverse entre ellas y hacen al cristal débilmente conductor. Estos cristales se llaman negativos o de tipo N. El átomo de la impureza pentavalente es el «donante» del electrón libre y queda inmovilizado en la red con un protón en exceso; es, por tanto, un ión positivo inmóvil. Con impurezas trivalentes resultan los cristales positivos o de tipo P. Estas impurezas son «acceptantes», ya que para formar las covalencias necesitan un electrón más y lo toman de otra covalencia próxima, con lo cual se crea un «hueco» o «agujero», y mientras el átomo aceptante queda como ión negativo inmovilizado, el hueco se comporta como carga positiva móvil que también hace al cristal algo conductor. El

hueco es móvil porque un electrón de otra covalencia puede saltar a él y llenarlo, de tal modo que desaparece dicho hueco, pero aparece otro en el lugar que ocupaba el electrón que saltó. (El nivel energético del electrón que crea un hueco está próximo a la banda ocupada o banda de valencia.)

En realidad, el hueco es un ente ficticio y su movimiento una apariencia. Los que realmente se mueven son siempre los electrones, pero en el cristal N pasan libremente entre las covalencias sin detenerse en ellas, y, en cambio, en el P saltan de covalencia en covalencia mientras el hueco se desplaza en sentido contrario. La figura 1 presenta el conocido símil del garaje de dos pisos; el primero (banda de valencia) está lleno de coches y no es posible el tráfico, y el superior (banda de conducción) está vacío. Esto es lo que sucede en el germanio puro, pero la impureza dominante pone en el piso superior un coche con libertad de movimiento y la aceptante quita un coche del piso inferior, dejando un hueco que podrá desplazarse hacia la derecha si los coches avanzan de uno en uno hacia la izquierda.

Los transistores de puntas se fabrican generalmente con cristales de tipo N soldados por una cara a un soporte metálico. De la envolvente que protege al conjunto salen tres alambres que se llaman emisor (E), colector (C) y base (B). Estos transistores se someten a un proceso de «formación» de los contactos mediante descargas cortas, pero intensas.

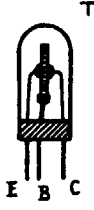
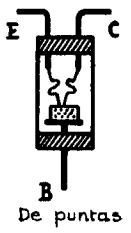
El transistor de «uniones» fue posterior al de puntas, pero lo ha desplazado casi por completo. Llamarle de «uniones» es completamente impropio y sería mejor decir «de superficies o de zonas», porque no está constituido por cristales yuxtapuestos o soldados, sino por un solo monocristal de tres regiones; la central, muy estrecha, puede ser de tipo P, con las dos laterales de tipo N, y éste es el transistor N-P-N, o bien lo contrario, y entonces resulta el P-N-P. También tiene tres electrodos que salen de las tres zonas y reciben los mismos nombres que en los de puntas.

Los más usados hoy día son los P-N-P, que se fabrican con una lamina de germanio N unida por su borde al electrodo base, mientras los otros dos alambres se sueldan en el centro de las caras con dos gotas de metal indio fundido. Manteniendo después cierta temperatura, durante cierto tiempo, algunos átomos de indio penetran en el germanio y forman las dos zonas de tipo P. Todo ello se realiza en atmósfera inerte.

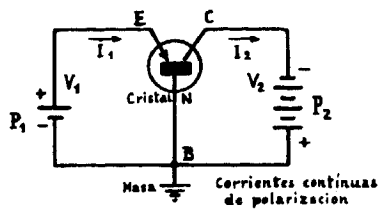
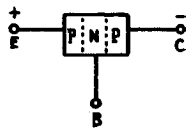
Los contactos puntuales, o las superficies que separan las zonas, son rectificantes y se han de polarizar siempre en el sentido de «paso fácil» de la corriente por el emisor y «difícil» por el colector. Para ello, en los transistores de puntas con cristal N, y en los de zonas P-N-P, el emisor ha de ser positivo y el colector negativo respecto a la base; en los N-P-N es al contrario. Esta polarización la producen las pilas P_1 y P_2 (basta una en los aparatos usuales), que hacen pasar corrientes continuas muy dé-

a

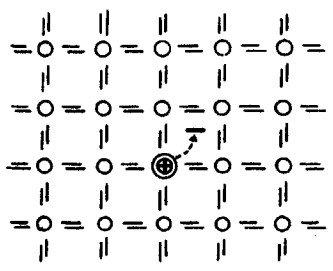
Figura 1



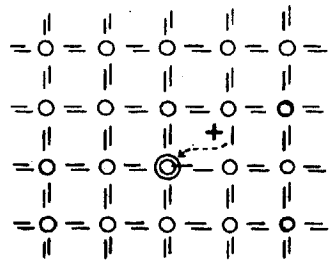
Transistores



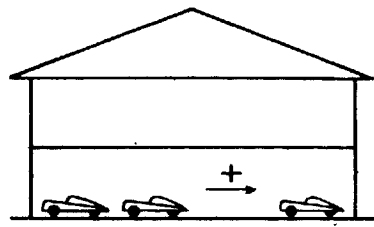
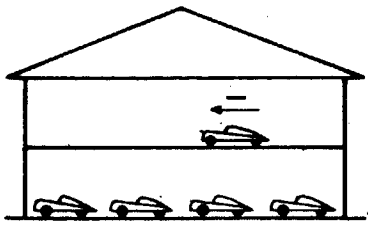
Red del germanio (supuesta plana)



Impurezas pentavalentes (donantes)
Conducción por electrones

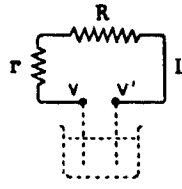
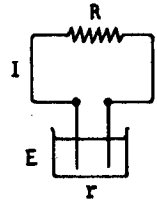


Impurezas trivalentes (aceptantes)
Conducción por "huecos"



b

Fuerza electromotriz
 $E = 9 \text{ volt.}$



Generador de tensión
 $v - v' = 9 \text{ volt.}$

biles; del orden del miliamperio o menos todavía. En los P-N-P y en los ordinarios de puntas pasa la corriente del emisor al cristal y sale otra por el colector, mientras la diferencia circula por la base. El emisor, la base y el colector se corresponden con el cátodo, la rejilla y la placa de una lámpara.

Si se intercala un micrófono entre emisor y base, por ejemplo, además de la pila, se obtienen en el circuito colector las mismas oscilaciones eléctricas, pero con potencia amplificada. Las teorías antes mencionadas, relativas al mecanismo íntimo, persiguen como fin primordial la explicación de esta propiedad fundamental de los transistores.

* * *

Cualquier clase de transistor triodo presenta, pues, al exterior tres electrodos: E, C y B; pero uno de ellos se puede considerar doble y con esto resulta un cuadripolo, que es activo puesto que amplifica la energía.

Las fábricas de transistores tienen laboratorios de control que estudian los diversos tipos que producen. El estudio completo comienza por la determinación de las características estáticas. Mediante pilas y potenciómetros se aplican tensiones continuas crecientes V_1 entre emisor y base, y otras V_2 entre colector y base, ambas de polaridad conveniente según el tipo de transistor. Se miden estas tensiones y las intensidades correspondientes I_1 e I_2 , y resulta que para cada par de valores de las intensidades hay un valor único de cada tensión. Como a veces puede haber valores dobles de las intensidades, es más práctico tomar éstas como variables independientes, y no a la inversa como es costumbre en las lámparas. Las funciones serán:

$$V_1 = f_1(I_1, I_2)$$

$$V_2 = f_2(I_1, I_2)$$

Con todos los valores obtenidos se dibujan cuatro familias de curvas acotadas, a valor constante de una de las variables, y en estas gráficas (bastan dos generalmente) se puede escoger el punto de funcionamiento P_0 más conveniente para el fin a que se destine el transistor en cada caso; se puede elegir la recta de carga, etc. (véase el cuadro formulario).

Sigue ahora el estudio del transistor desempeñando su función, es decir, su estudio dinámico. En los ensayos de laboratorio se emplea como generador de «señal de entrada» (sustituyendo al micrófono antes citado) un oscilador que produzca una corriente alterna de muy pequeña amplitud y de baja frecuencia (unos 1.000 hertz). Este oscilador se conecta entre emisor y base, juntamente con la pila P_1 , y la tensión alterna se superpone a la continua de la pila. En lugar de altavoz se coloca entre colector y

base una resistencia de «carga» R_L en la cual actuará la corriente alterna de salida superpuesta a la de la pila P_2 . Esta forma de montaje en que el electrodo base es común a los dos circuitos de entrada y de salida se llama montaje con «base común». La «masa» o chasis suele unirse al punto común, pero esto no es forzoso y la designación «base a masa» es impropia e induce a confusiones. En los esquemas, cuando sólo interesa el funcionamiento dinámico, no se dibujan las pilas. Los generadores de señal se consideran y se dibujan con su resistencia interna aparte (*).

Los valores máximos (o bien los eficaces) de las corrientes alternas se pueden considerar como pequeños incrementos de las corrientes continuas de las pilas. Tales incrementos desplazan el punto figurativo de las gráficas dentro de una pequeña región en torno al punto P_0 de funcionamiento estático. Dentro de esta región, las curvas son casi rectas y las funciones se pueden establecer como lineales, con derivadas parciales constantes; luego sus diferenciales (tomados como incrementos) serán de la forma:

$$\Delta V_1 = r_{11}\Delta I_1 + r_{12}\Delta I_2$$

$$\Delta V_2 = r_{21}\Delta I_1 + r_{22}\Delta I_2$$

Y como los incrementos son los valores de las señales alternas, resulta natural simplificar la escritura empleando letras minúsculas; en lugar de escribir, por ejemplo, ΔV_1 (incremento de la tensión continua) se escribe simplemente v_1 (valor de la tensión alterna), y de este modo queda:

$$v_1 = r_{11}i_1 + r_{12}i_2 \quad [2]$$

$$v_2 = r_{21}i_1 + r_{22}i_2$$

Los cuatro coeficientes son los parámetros del cuadripolo, que son constantes para pequeña señal y para un punto de funcionamiento determinado (aunque cambie algo este punto se pueden usar los mismos parámetros en cálculos aproximados). Por sus dimensiones se miden en ohmios y son resistencias puras para baja frecuencia. En alta frecuencia representan impedancias, porque influyen las capacidades internas del transistor, aunque suelen ser pequeñas.

(*) Esto constituye una abstracción muy usada en Electrónica. Una pila (o generador cualquiera) de fuerza electromotriz $E = 9$ voltios, por ejemplo, y de resistencia interna r (figura 1—b) se concibe más bien como el vaso punteado dentro del cual no hay resistencia, y que establece los mismos 9 voltios, pero como diferencia de potencial $V - V'$ constante; la resistencia r se considera fuera del vaso. Naturalmente, la intensidad calculada es la misma con ambos puntos de vista, pero el segundo resulta más cómodo para las transformaciones de los circuitos. Más adelante se verá una aplicación. Así se han dibujado tanto el generador de señal como los generadores ficticios. Con arreglo a este criterio, escribiremos v_g (en lugar de e_g) para designar la fuerza electromotriz del generador de señal; en la figura 2-a, por ejemplo, la tensión entre E y B será: $v_g = v_g - R_x \cdot i$.

Cuando se dispone de las familias de curvas se pueden hallar los parámetros gráficamente, puesto que son las cuatro pendientes medidas en el punto P_o , pero también se pueden medir sin utilizar las gráficas.

Para medir r_{11} se pone la salida abierta para la corriente alterna, aunque se deja cerrada para la continua. Esto se consigue, por lo menos en principio, intercalando una gran autoinducción en serie con la pila (realmente se usan otros procedimientos), y entonces, como $i_2 = 0$, resulta de la primera función que:

$$r_{11} = \frac{v_1}{i_1} \quad (\text{para } i_2 = 0) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Resistencia de entrada con salida abierta.} \end{array} \right.$$

Basta, pues, medir v_1 e i_1 en estas condiciones. Análogamente:

$$r_{12} = \frac{v_1}{i_2} \quad (\text{para } i_1 = 0) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Transresistencia inversa con entrada abierta.} \end{array} \right.$$

$$r_{21} = \frac{v_2}{i_1} \quad (\text{para } i_2 = 0) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Transresistencia directa con salida abierta.} \end{array} \right.$$

$$r_{22} = \frac{v_2}{i_2} \quad (\text{para } i_1 = 0) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Resistencia de salida con entrada abierta.} \end{array} \right.$$

Otro coeficiente importante es la ganancia de intensidad con salida en cortocircuito para alterna, es decir, con un gran condensador en paralelo. Es, por definición:

$$\alpha_o = - \frac{i_2}{i_1} = - \frac{r_{21}}{r_{22}} \quad (\text{para } v_2 = 0) \quad [3]$$

Y otro es la ganancia de tensión con salida abierta

$$\beta_o = \frac{v_2}{v_1} = \frac{r_{21}}{r_{11}} \quad (\text{para } i_2 = 0) \quad [4]$$

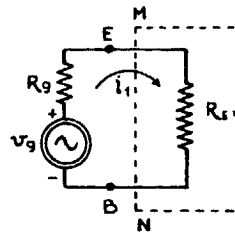
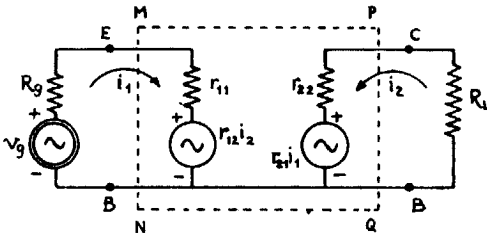
• • •

Uno de los circuitos equivalentes al transistor es el de forma « π » (figura 2-a) que se considera fundamental. Como la ganancia de energía de la señal alterna procede en realidad de las pilas y se prescinde mentalmente de ellas, es preciso imaginar este circuito equivalente como si dentro de la caja opaca hubiese entre E y B una resistencia igual al parámetro r_{11} .

FIGURA 2

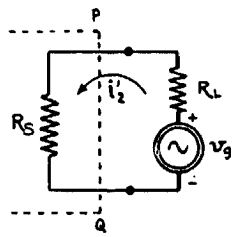
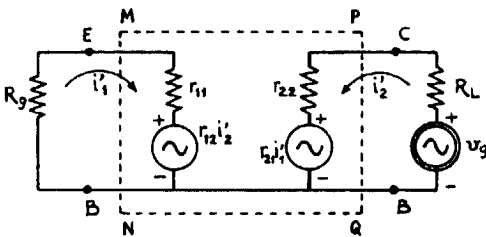
Circuito equivalente "T"

Resistencia de entrada

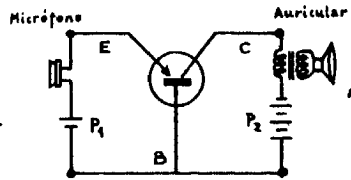
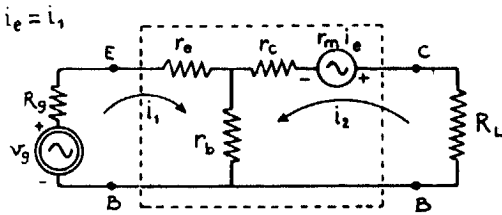


Cambiando la señal

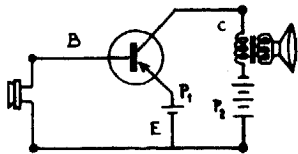
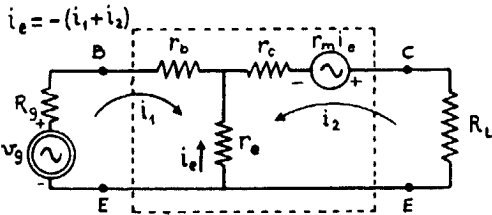
Resistencia de salida



Circuito equivalente "T" — Montaje con base común



Circuito equivalente "T" — Montaje con emisor común



en serie con un generador de tensión alterna. No sería fácil construir este generador, y no sólo por su pequeñísimo tamaño, sino porque habría de cumplir la condición de establecer en la entrada una tensión que en cada instante fuese proporcional a la intensidad de la corriente de salida, con una constante de proporcionalidad igual al parámetro r_{12} ; del mismo modo, en la salida se supone una resistencia r_{22} con una tensión $r_{21} \cdot i_1$. Todo esto es pura fantasía, pero no es un absurdo; se podría conseguir si uno de aquellos diablillos de Maxwell estuviese presente dentro de la caja regulando, con toda rapidez, unos potenciómetros microscópicos. Los dos generadores ficticios representan la influencia que la entrada ejerce sobre la salida y la de la salida sobre la entrada. Esta última influencia es característica del transistor y no se da normalmente en una lámpara.

Es evidente que este circuito funcionaría exactamente igual que el cuadripolo transistor, ya que se cumplirían las ecuaciones [2] como expresión ahora de la ley de Ohm, aplicada entre E y B y entre C y B por dentro de la caja. La primera, por ejemplo, se interpretaría así: Tensión v_1 entre E y B menos tensión del generador ficticio $r_{12} \cdot i_2$ igual a resistencia r_{11} por intensidad i_1 . Todos los problemas se pueden plantear con el circuito equivalente y los resultados serán válidos en el transistor. He aquí algunos ejemplos, con la indicación del camino más rápido para el cálculo:

1.º *Calcular las intensidades* de entrada y salida para determinada resistencia de carga R_L y con un determinado generador de señal R_g, v_g (figura 2-a). Aplicaremos la ley de Kirchoff a los dos circuitos completos, con el convenio arbitrario de signos que expresa la figura; los signos + y - indican la polaridad de las tensiones alternas en un instante dado. Se tiene:

$$\begin{aligned} v_g - r_{12}i_2 &= (R_g + r_{11}) \cdot i_1 \\ 0 - r_{21}i_1 &= (R_L + r_{22}) \cdot i_2 \end{aligned} \quad [1]$$

Se resuelve este sistema (fácilmente por la regla de Cramer) y resultan las fórmulas (5) del cuadro formulario. La magnitud Δ se llama determinante del circuito (12).

2.º *Ganancia de intensidad* α es la relación $-i_2/i_1$, y al dividir las (5) del cuadro resulta:

$$\alpha = \frac{r_{21}}{r_{22} + R_L}$$

Su valor numérico resulta a veces menor que la unidad, y entonces no hay ganancia, sino atenuación; otras veces resulta negativo y esto indica un cambio de fase. Esta ganancia se reduce a la (3) cuando $R_L = 0$ (colector en cortocircuito).

3.º *Ganancia de tensión β .*—Relación entre la tensión alterna de salida y la del generador de señal. La primera vale $-R_L i_2$, y sustituyendo la intensidad y dividiendo por v_g :

$$\beta = \frac{r_{21} R_L}{\Delta}$$

Para $R_L = \infty$, y si R_g es pequeña, coincide con (4), que es el valor a colector abierto.

4.º *Resistencia de entrada R_E* es la equivalente al conjunto del cuadripolo con la resistencia de carga R_L , es decir, a todo lo que queda a la derecha de la línea M-N (figura 2-a). Si se aplicase el mismo generador a esta resistencia única R_E , como indica la figura 2-b, había de pasar la misma intensidad i_1 , que en esta figura vale:

$$i_1 = \frac{v_g}{R_g + R_E}$$

Igualando este valor con el de (5) resulta la fórmula (6) del cuadro.

5.º *Resistencia de salida R_S* , equivalente a todo lo que queda a la izquierda de la línea P-Q. Se calcula mediante un artificio que consiste en tomar la salida por entrada, y viceversa, cambiando de posición el generador de señal; se entiende que se cambia su tensión v_g , pero se deja en la entrada (que ahora es salida) su resistencia R_g . De este modo se tiene la figura 2-c, y sustituyendo todo lo anterior a la línea P-Q por la resistencia única R_S queda el esquema reducido (2-d). En la figura 2-c se cumplen las mismas leyes de Kirchoff (I) con sólo permutar v_g y cero en sus primeros miembros, y escribir las intensidades con acentos, ya que ahora serán distintas. Se despeja el valor de i'_2 , que es el siguiente:

$$i'_2 = \frac{v_g (R_g + r_{11})}{\Delta}$$

En el esquema reducido esta intensidad valdría:

$$i'_2 = \frac{v_g}{R_L + R_S}$$

Igualando se obtiene la (7).

6.º *Potencia de entrada P_E* es la que el generador cede al cuadripolo con su carga, es decir, a la resistencia equivalente de entrada. Valdrá:

$$P_E = R_E i_1^2 = R_E \left(\frac{v_g}{R_E + R_g} \right)^2$$

Como ocurre en todo generador, esta potencia es máxima cuando las resistencias están equilibradas, o sea, cuando $R_E = R_p$ (se demostraría derivando respecto a R_E), y entonces dicha potencia máxima cedida por el generador toma el valor dado por la fórmula (8).

7.º *Potencia de salida* P_S desarrollada por la corriente i_2 en la resistencia de carga.

$$P_S = R_L i_2^2$$

Sustituyendo el valor (5) resulta la fórmula (9) del cuadro.

8.º *Ganancia de potencia* G_p .—Se define como relación entre la potencia de salida P y la máxima potencia que puede proporcionar el generador utilizado; viene dada por la (10) como cociente de dividir (9) entre (8).

En los transistores puede haber atenuación de intensidad, pero, en cambio, suele ser muy grande la ganancia de tensión y, en definitiva, hay ganancia de potencia (20 hasta 50 decibelios en ciertos montajes).

9.º *Máxima ganancia de potencia* G_p (Máx.).—En las aplicaciones de los transistores ocurre muchas veces que el generador de señal o la carga no se pueden elegir libremente, porque ya vienen impuestos por condiciones de carácter práctico. En general, se procura aprovechar bien la energía, pero esto no es lo más importante en muchos montajes. En todo caso, y aunque sólo sirva de criterio orientador, resulta conveniente conocer qué valores deberían tener la resistencia del generador y la de carga para conseguir la máxima ganancia de potencia con un transistor dado. Sean R'_g y R'_L estos valores óptimos en cuanto al aprovechamiento de energía. Con este generador y esta carga las resistencias de entrada y salida tomarán, según (6) y (7), unos valores particulares R_E y R'_S , y es casi evidente (según lo dicho en la cuestión 6.ª) que la ganancia de potencia será máxima si estas cuatro resistencias están dos a dos equilibradas, esto es, si se cumple que $R'_g = R'_E$ y $R'_L = R'_S$. Para demostrarlo con rigor basta anular las derivadas parciales de G_p (fórmula 10). Resultan así dos condiciones:

$$\Delta = R'_g \cdot 2(r_{22} + R'_L)$$

$$\Delta = R'_L \cdot 2(r_{11} + R'_g)$$

[II]

Despejando R'_g de la primera y R'_L de la segunda (teniendo en cuenta que también entran en Δ) resultan dos expresiones idénticas a las (6) y (7), lo cual demuestra el equilibrio de resistencias. Estas fórmulas nos darán, pues, los valores óptimos, pero cada uno en función del otro; si se elimina uno de ellos queda el otro en función de los cuatro parámetros solamente, y para simplificar la escritura se introduce el número δ (cuyo significado veremos después) con lo cual resultan las fórmulas (13) y (14).

Por otra parte, sustituyendo en (10) simultáneamente ambos valores [II] del determinante, se obtiene la fórmula provisional (11) y de ella, mediante (13) y (14) se llega a la (16), que es la expresión simplificada de la máxima ganancia de potencia.

10.º *Resistencias negativas-Estabilidad.*—Las resistencias de entrada y salida de los transistores de puntas, calculadas por (6) y (7), pueden resultar negativas para algunos valores de R_o y R_L . Cuando esto ocurre, el funcionamiento del transistor es inestable y puede entrar en oscilación espontáneamente, es decir, sin los acoplamientos externos que se emplean cuando se quiere montar un oscilador. La inestabilidad se producirá más fácilmente, según indican dichas fórmulas, si $R_o = 0$, o si $R_L = 0$ (emisor o colector en cortocircuito) y, en estas circunstancias, la resistencia de entrada R_E , o la de salida R_S , tomarán valores positivos si $r_{11} \cdot r_{22}$ es mayor que $r_{12} \cdot r_{21}$, de donde resulta que la constante δ tiene un significado importante, pues es un índice de la estabilidad en cortocircuito; si $\delta < 1$ el funcionamiento es estable.

* * *

Se pueden adoptar otros circuitos equivalentes más representativos del mecanismo interno del transistor, como el circuito «T» de la figura 2-e, que sólo tiene un generador ficticio. La tensión de este generador habría de ser proporcional a la intensidad i_e que entre por el emisor en cada instante. La constante de proporcionalidad r_m es un nuevo parámetro con carácter de transresistencia, y los otros tres nuevos parámetros son resistencias, también ficticias, que se llaman resistencias de emisor, de base y de colector y que se designan r_e , r_b y r_c , respectivamente.

Las relaciones que ligan estos parámetros con los anteriores se deducen escribiendo las ecuaciones de las dos ramas con los nuevos parámetros:

$$v_o - 0 = (R_o + r_e + r_b)i_1 + r_b \cdot i_2$$

$$0 - r_m \cdot i_e = r_b \cdot i_1 + (r_b + r_c + R_L)i_2$$

Comparando estas ecuaciones con las [I], e igualando los coeficientes de las intensidades i_1 e i_2 (sin olvidar que en este montaje $i_e = i_1$) se obtienen las relaciones (17) con las cuales se pueden transformar todas las fórmulas del cuadro para adaptarlas al circuito «T».

* * *

Todo lo que antecede se refiere al transistor conectado con base común. Se utilizan también los montajes con emisor común (figura 2-f) y con colector común. En el de emisor común, que es el más frecuente, se conecta el generador de señal entre B y E, y la carga entre C y E. Este montaje es análogo al ordinario de una lámpara. El de colector común corresponde

al de «cátodo seguidor». Desde luego, la polarización del transistor se dispone en cualquier montaje lo mismo que en el de base común; únicamente varían las conexiones del generador de señal y de la carga.

Los parámetros de subíndices numéricos conservan el mismo significado en todos los montajes; pero, naturalmente, toman valores distintos. Las relaciones que los ligan a los parámetros de subíndice literal son diferentes en cada caso, pero se obtienen con facilidad por el método de igualación de coeficientes, teniendo en cuenta siempre que la tensión del generador fleticio es, en todos los montajes, proporcional a la intensidad i_p de la corriente alterna que entra por el emisor al cristal; en el montaje de base común $i_p = i_1$, en el de emisor común $i_p = -(i_1 + i_2)$ y en el de colector común $i_p = i_2$.

Se pueden medir los primeros parámetros y calcular los segundos. También se usan otros parámetros llamados «híbridos», dos de los cuales representan impedancias y los otros dos admitancias.

• • •

Al emplear los transistores conviene conocer algunos datos que las fábricas proporcionan; por ejemplo, la máxima disipación de energía tolerable en el colector y por encima de la cual el transistor se estropea. Esta disipación vale en funcionamiento estático $V_c \cdot I_c$ (corriente continua) y debe ser menor que un límite K . La función $V_c \cdot I_c = K$ representa una hipérbola en la gráfica inferior derecha del cuadro. La recta de carga no debe atravesar esta hipérbola.

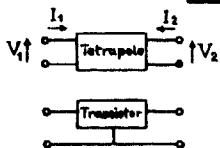
• • •

Basta lo expuesto para apreciar el amplio campo de estudio que ofrece el transistor como caja opaca. Pero es mucho más interesante, aunque también más difícil, abrir esta caja y estudiarla por dentro.

R E F E R E N C I A S

- Electrons and Holes in semiconductors.*—W. Shockley D. Van Nostrand C., Inc. New-York.
- Fundamentals of Transistors.*—L. M. Krugman... (Signal Corps Engineering Laboratories). J. F. Rider Publisher, Inc. New-York.
- Proceedings of the I. R. E.* (Institute of Radio Engineers), Inc. November 1952. New-York.
- Transistor Electronics.*—Arthur W. Lo. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. N. J.
- Revista Electronics.* Once artículos de A. Coblenz y H. L. Owens en los números de marzo de 1953 a enero de 1954.

FORMULARIO



1

$$r_{11} = \frac{V_1}{I_1} \quad i_2 = 0$$

$$r_{12} = \frac{V_1}{I_2} \quad i_1 = 0$$

$$r_{21} = \frac{V_2}{I_1} \quad i_2 = 0$$

$$r_{22} = \frac{V_2}{I_2} \quad i_1 = 0$$

$$V_1 = r_{11} i_1 + r_{12} i_2$$

$$V_2 = r_{21} i_1 + r_{22} i_2$$

2

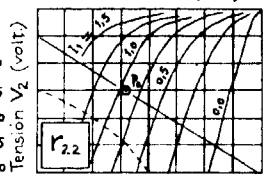
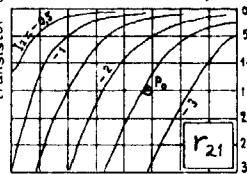
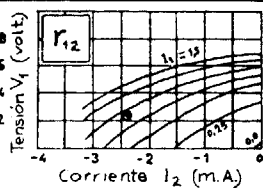
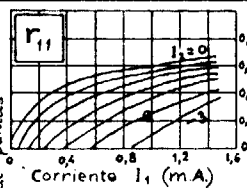
3

$$\alpha_o = - \frac{i_2}{i_1} = \frac{r_{21}}{r_{11}} \quad (\text{para } i_2 = 0)$$

4

$$\beta_o = \frac{V_2}{V_1} = \frac{r_{21}}{r_{11}} \quad (\text{para } i_2 = 0)$$

Características estáticas de un transistor de puntas



5

Intensidades $i_1 = \frac{V_g(R_{22} + R_L)}{\Delta}$ $i_2 = \frac{-V_g r_{21}}{\Delta}$ siendo $\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} + R_g & r_{21} \\ r_{12} & r_{22} + R_L \end{vmatrix} = (r_{11} + R_g)(r_{22} + R_L) - r_{12} r_{21}$

12

6

Resistencias de entrada y de salida $R_E = r_{11} - \frac{r_{12} r_{21}}{r_{22} + R_L}$ $R_S = r_{22} - \frac{r_{12} r_{21}}{r_{11} + R_g}$

7

8

Máxima potencia utilizable del generador de señal $P_E (\text{máx}) = \frac{V_g^2}{4 R_g}$

Potencia en salida $P_S = \frac{R_L V_g^2 r_{21}^2}{\Delta^2}$

9

10

Ganancia de potencia $G_p = \frac{P_S}{P_E (\text{máx})} = \frac{4 R_g R_L r_{21}^2}{\Delta^2}$

11

Máxima ganancia de potencia $G_p (\text{máx}) = \frac{r_{21}^2}{(r_{11} + R'_g)(r_{22} + R'_L)}$ cuando R'_g y R'_L son los valores óptimos (equilibrados) de las resistencias de entrada y salida, que valen:

13 14

$R'_g = R'_E = r_{11} \sqrt{1 - \delta}$ $R'_L = R'_S = r_{22} \sqrt{1 - \delta}$ siendo $\delta = \frac{r_{12} r_{21}}{r_{11} r_{22}}$

15

16

Sustituyendo $G_p (\text{máx}) = \frac{r_{21}^2}{r_{11} r_{22} [1 + \sqrt{1 - \delta}]^2} = \frac{\alpha_o \beta_o}{[1 + \sqrt{1 - \delta}]^2}$

Circuito equivalente "T"

17

Con base común

$$r_{11} = r_e + r_b$$

$$r_{12} = r_b$$

$$r_{21} = r_m + r_b$$

$$r_{22} = r_c + r_b$$

18

Con emisor común

$$r_{11} = r_e + r_b$$

$$r_{12} = r_e$$

$$r_{21} = r_e - r_m$$

$$r_{22} = r_c + r_e - r_m$$

19

Valores típicos de los transistores P-N-P (base común)

| | |
|----------|---------------|
| r_{11} | = 550 ohmios |
| r_{12} | = 500 " |
| r_{21} | = 1900000 " |
| r_{22} | = 2.000.000 " |