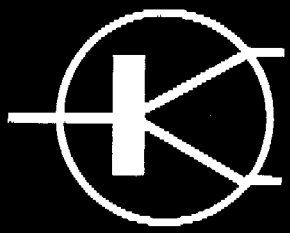
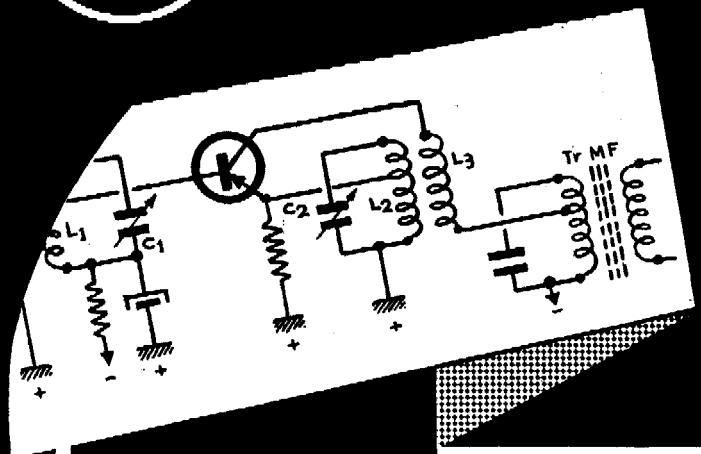
9.ª EDICIÓN

E. AISBERG






# ¿EL

Nociones fundamentales

Características esenciales

Tecnología

Montajes y aplicaciones

¡pero si es muy fácil!

# ¿La Radio?...

## ¡pero si es muy fácil!

por E. AISBERG

216 págs. 16 x 22 cm. Numerosas figuras

Es una obra completa que no precisa ni base matemática ni conocimientos previos de radioelectricidad. El lector aprende y digiere fácilmente **toda la radio.**

Es también la obra que ha hecho comprender a millones de técnicos aquellos aspectos de la radio que nunca habían llegado a explicarse por completo, gracias a las ilustraciones que lo animan.

Su autor, el famoso Aisberg, es el más grande maestro en electrónica y el más genial dominador del difícil arte de explicar con claridad. A lo largo de las conversaciones entre sus dos populares personajes, Curiosus e Ignotus, el lector ve contestadas todas sus propias preguntas y se adentra progresivamente en los misterios (¡ahora tan claros!), de la radio. El libro, de una amenidad y fuerza didáctica sin precedentes, emana constantemente la gracia y ciencia práctica que atesora Aisberg.

---

# ¿La Televisión?...

## ¡pero si es muy fácil!

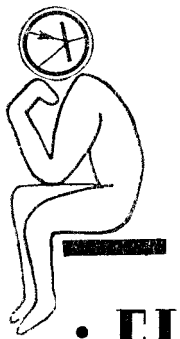
por E. AISBERG

204 págs. 16 x 22 cm. Numerosas figuras

Los técnicos, que con Aisberg dominaron la radio, se aprestan ahora para adentrarse en el campo de la televisión mediante las geniales conversaciones de los ya familiares personajes Curiosus e Ignotus.

EXTRACTO DEL INDICE:

Video Frecuencia y Radio Frecuencia. — Electrones en el vacío. — Campos magnéticos y eléctricos. — Fundamentos de las bases de tiempo. — Bases de tiempo con tubos sin gas. — Amplificación de tensiones. — El Emisor. — Impulsos y ondas. — Televisores en conserva. — La señal pequeña se hará grande. — De la R.F. al tubo de rayos catódicos. — Escamoteo y restitución. — Separación y selección de la Alimentación. — Para captar las ondas. — Dos televisores completos. — La TV en colores. — Cuando se ve grande.



# ¿EL TRANSISTOR?..

¡Pero si es muy fácil!

E. AISBERG
DIRECTOR DE
«TOUTE LA RADIO»
«ELECTRONIQUE
INDUSTRIELLE»
Y «TELEVISION»

# ¿EL TRANSISTOR?..

## ¡Pero si es muy fácil!

PRINCIPIOS FÍSICOS BÁSICOS
CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES
APLICACIONES EN DIVERSOS
MONTAJES DE RADIORRECEPTORES

Dibujos marginales de
POL FERJAC

*Traducción de la 6.ª edición francesa*
*por*
*Luis Ibáñez Morlán*

9.ª EDICIÓN ESPAÑOLA

MARCOMBO, S. A.
de Boixareu Editores
Avda. José Antonio, 594
BARCELONA - 7

Título de la obra original:
**Le Transistor?..**
**Mais c'est très simple!**
Autor: E. AISBERG
Société des Editions Radio - Paris

© MARCOMBO, S. A., 1972

Impreso en España Depósito Legal: B. 10.321 - 1972 Printed in Spain

Gráficas Casulleras — Sepúlveda, 79 — Barcelona-15

# PREFACIO

¡Qué tranquilos estábamos siguiendo la lenta y apacible evolución de la técnica radioeléctrica hasta el día de 1948 en que el advenimiento del transistor vino a transformarlo todo! Aquello fue una revolución... En pocos años los dispositivos con semiconductores conquistaron los principales campos de la electrónica. Toda una nueva técnica iba a formarse al lado de aquélla, hasta entonces clásica, familiar a los «valvulistas», los cuales han tenido que acostumbrarse forzosamente a las nuevas nociones y concepciones impuestas por los triodos a cristal.

¿Cuáles son las herramientas que sirven para tal conversión? Existen numerosas obras excelentes de alta técnica dedicadas a los transistores; pero su lectura exige conocimientos avanzados de matemáticas y de la física de los sólidos, cuyo acceso es bastante incómodo. Por el contrario, son raros los buenos libros de nivel medio destinados a los prácticos de la radio deseosos de penetrar en el mundo de los transistores, comprender los fenómenos físicos que en ellos se desarrollan y poder analizar sin dificultad la composición de los montajes modernos que utilizan estos «animales de tres patas».

Sin embargo, la necesidad de tales obras de iniciación se hace sentir intensamente. Los contactos cuotidianos con numerosos profesionales y aficionados nos han mostrado hasta qué punto desconocen en su mayoría la teoría elemental de los transistores. He aquí la razón de que nos hayamos propuesto escribir un libro dedicado a quienes poseen ya conocimientos básicos en materia de radioelectricidad (aunque no sea más que en el nivel de «¿La Radio?..., ¡pero si es muy fácil!») y quieran iniciarse sin demasiada dificultad en la técnica particular de los transistores.

La tarea no era muy fácil. El transistor plantea problemas más arduos que la válvula electrónica. La interdependencia de todos sus parámetros, su débil resistencia de entrada y los efectos del calor son otros tantos obstáculos en el camino que conduce a la comprensión de la nueva técnica. He aquí por qué inicialmente este libro debía haberse titulado «¿El transistor?..., ¡pero esto no es tan sencillo!». (Una frase del primer párrafo da, por lo demás, el enunciado.) Pero a medida que íbamos escribiendo las charlas que componen este volumen, nuestros dos personajes, Curiosus e Ignotus, han llegado a convencernos de que su manera de ver las cosas no era nada complicada. Así pues, era legítimo adoptar un título análogo al de nuestros libros dedicados a la radio y a la televisión.

¿Es esto decir que el contenido de las páginas que siguen podrá ser asimilado sin el menor esfuerzo? De ninguna manera. El lector tendrá que poner la mayor atención y no proseguir el estudio sin haber aprendido bien las nociones básicas. Que el humor y la ligereza de los dibujos marginales no creen en su espíritu una ilusión de excesiva facilidad. Estos croquis ayudan a comprender, completan el texto y procuran una amenidad, cuyo valor didáctico no se puede desestimar. Pero para adquirir conocimientos es necesario trabajar, trabajar con asiduidad, con aplicación y —sobre todo— con regularidad.

Algunos encontrarán en nuestra exposición cosas que ya conocen, tales como la construcción de la recta de carga o las condiciones óptimas de transferencia de potencia. Tanto mejor para ellos. En cambio, otros tendrán que hacer un verdadero esfuerzo de imaginación para comprender el uso de las curvas características a las cuales recurrimos a menudo.

No se busque aquí la teoría completa y rigurosa de los transistores, no se busquen tampoco planos de realización de aparatos diversos. Nuestro propósito ha sido hacer comprender. De la masa de nociones y de las montañas que forman una técnica en plena evolución nos hemos esforzado en separar lo esencial, dejando de lado lo que puede ser efímero.

Los dos personajes cuyo diálogo animado está consignado en las páginas que siguen no tienen nada de docto ni de grave. Son decididamente de la opinión de Montesquieu, que afirmaba que «la gravedad es la felicidad de los imbéciles». Así pues, esperamos que el lector, al avanzar en el estudio de estas páginas, tenga el doble placer de instruirse deleitándose. Es la gracia que le deseamos.

E. A.

# LO QUE HACE FALTA SABER antes de comenzar el estudio de este libro

## SÍMBOLOS DE LAS UNIDADES

m - metro
g - gramo
s - segundo
V - voltio
A - amperio
Ω - ohmio

W - vatio
F - faradio
H - henrio
Hz - hertzio (período - por segundo)

## SISTEMA DECIMAL

M - mega (1 000 000)
k - kilo (1 000)
m - mili (0,001)
μ - micro (0,000 001)
n - nano (0,000 000 001)
p - pico (0,000 000 000 001)

**Colocando el símbolo del prefijo decimal antes del de la unidad, se obtienen diversos múltiplos y submúltiplos, entre los cuales citamos a título de ejemplo:**

mm - milímetro
μs - microsegundo
mA - miliamperio
μA - microamperio

mV - milivoltio
μV - microvoltio
MΩ - megohmio
μF - microfaradio

pF - picofaradio
kHz - kilohertzio
MHz - megahertzio
mW - milivatio

## SENTIDO DE LA CORRIENTE

**La corriente eléctrica está formada por el desplazamiento de los electrones. Estos, en el circuito exterior, van del negativo al positivo. Tal es el sentido de la corriente adoptado en las páginas que siguen. (Este es el sentido contrario al convencional, según el cual la corriente va del positivo al negativo.)**

**Cuando la corriente atraviesa una resistencia, determina en ella una caída de tensión. El extremo de la resistencia que constituye la entrada de corriente se convierte en negativo con respecto a su salida.**

## NOTACIONES ADOPTADAS

**A medida que hagamos conocimientos con las diferentes características del transistor, utilizaremos las notaciones siguientes:**

| | |
|---|---|
| $I_e$ - **corriente del emisor** | $r_e$ - **resistencia de entrada** |
| $I_b$ - **corriente de base** | $r_s$ - **resistencia de salida** |
| $I_c$ - **corriente de colector** | $\alpha$ - **amplificación de corriente en B.C.** |
| $E_b$ - **tensión de base** | $\beta$ - **amplificación de corriente en E.C.** |
| $E_c$ - **tensión de colector** | $\gamma$ - **amplificación de corriente en C.C.** |

$\mu$ - **relación de contrarreacción interna**

**Las tensiones de las fuentes se designarán por U. $\Delta$ designará siempre una variación muy pequeña de la magnitud que precede a esta letra griega (delta).**

**Pero —tranquilícese usted— no es necesario aprender estas notaciones por anticipado.**

**Y ahora escuchemos las conversaciones de Curiosus e Ignotus...**

## LOS PERSONAJES

**Curiosus,** joven profesor de electrónica a quien antaño su tío Radiol enseñó los fundamentos de radioelectricidad; está siempre dispuesto a satisfacer la inagotable curiosidad de su amigo...

...**Ignotus,** que fue su primer alumno. Sus charlas están relatadas en dos libros («¿La Radio?... pero si es muy fácil» y «La Televisión... pero si es muy fácil»), donde se comprueba que, si bien el personaje carecía a veces de ciertos conocimientos elementales, en cambio estaba dotado de una facultad de asimilación poco común. Actualmente **Ignotus** está empleado como agente técnico en una fábrica de receptores de radio.

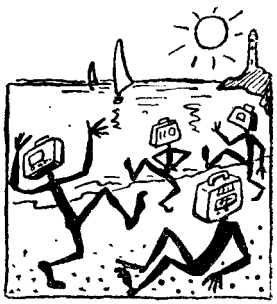
PRIMERA CHARLA

**No se puede comprender fácilmente el funcionamiento de los transistores sin haber profundizado ciertas nociones de física y de química concernientes a la composición y la asociación de los átomos. Es a esto a lo que se dedican nuestros dos amigos en la conversación que se leerá a continuación.**

**SUMARIO: Semiconductores. — Funciones y ventajas del transistor. — Acción del calor sobre los transistores. — Límites de frecuencia y de potencia. — Moléculas. — Atomos. — Protones, neutrones y electrones. — Distribución de los electrones en capas. — Ionización. — Número de valencia. — Red cristalina.**

# LA VIDA DE LOS ATOMOS

**Ignotus, víctima de los transistores.**



CURIOSUS. — Encantado de volverle a ver, querido amigo. ¿Ha pasado usted bien las vacaciones?

IGNOTUS. — No, desgraciadamente.

CUR. — ¿El tiempo fue inclemente, el cielo estuvo cubierto y la mar embravecida?

IG. — Al contraio, disfrutamos de un tiempo ideal. Pero no fue posible descansar en la playa, porque por todos lados los veraneantes hacían aullar sus receptores de transistores. Bajo los fuegos cruzados de las cantantes sin voz y de los aires de danza salvajes, mis nervios estuvieron sometidos a una dura prueba y, por añadidura, deseoso de com-

prender cómo podían hacer tantos ruidos los transistores, he intentado leer unos libros que debían revelarme la teoría y las aplicaciones... ¡No he comprendido nada de ello!

CUR. — Comprendo la amargura que le ha causado este fracaso. Pero que su amor propio no sufra por ello: créame, los transistores no son una cosa tan sencilla. Al abrir el Congreso Internacional de los Transistores que tuvo lugar en Londres en mayo de 1959, lord Hailsham dijo: «Pienso que ni en los países más industrializados hay una persona entre diez mil que sea capaz de explicar lo que es un transistor, ni siquiera lo que son los semiconductores.»

IG. — Esto me consuela, tanto más cuanto que yo creo poder decir lo que es un semiconductor.

CUR. — ¡Bravo, Ignotus! Adelante: haga la exhibición de sus conocimientos.

## Los animales de tres patas.

IG. — Pues bien, un semiconductor debe tener una resistividad infinitamente mayor que la de los conductores, pero también menor que la de los aislantes.

CUR. — Esto es cierto, aunque bastante vago. Digamos para precisar, que un semiconductor tal como el germanio (que se emplea principalmente para la fabricación de los transistores) tiene una resistividad 300 millones de veces mayor que la del cobre. Pero es un billón de veces menor que la del vidrio.

IG. — En resumen, ¿en la escala de las resistividades, se aproxima más a los conductores que a los aislantes?

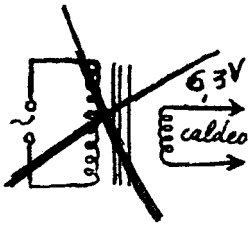
CUR. — Sí, y porque conduce las corrientes a su manera, el germanio permite fabricar los «animales de tres patas».

IG. — ¿Qué es lo que usted denomina así?

CUR. — Es el nombre que se puede dar a los transistores (o «triodos a cristal»), pues están provistos de tres hilos de conexión.

IG. — En definitiva, si he comprendido bien, el transistor reemplaza a la válvula electrónica. ¿Puede asumir todas las funciones de ésta? ¿Y cuáles son las ventajas?

CUR. — Me ha anegado usted en una lluvia de preguntas... Sí, mi querido Ignotus, como una válvula electrónica, el transistor puede amplificar o detectar señales; es capaz de engendrar oscilaciones eléctricas y puede encargarse de la conversión de frecuncia y de todas las otras funciones de los tubos de vacío. En cuanto a ventajas, las posee numerosas. Y para comenzar, la *ausencia de caldeo.*




IG. — ¡Esto es manífico! ¿Entonces no hay necesidad de una fuente de corriente especial de caldeo (filamento), como para las válvulas?

CUR. — No, y debido a ello, los transistores se ponen a funcionar instantáneamente, desde el momento en que se les somete a una tensión, mientras que las válvulas exigen una espera de varias decenas de segundo antes de que sus cátodos alcancen la temperatura necesaria para la emisión normal de los electrones.

IG. — Pienso también que la ausencia de caldeo debe determinar un mejor *rendimiento energético.* Porque en las válvulas una buena parte de la energía procurada por las fuentes de alimentación se pierde en forma de calor.

CUR. — Exacto. Los transistores no conocen este deplorable despilfarro de vatios que se van en inútiles calorías y que caracteriza a

todas las «lámparas o válvulas de radio». Allí donde un tubo electrónico consume fácilmente 2 ó 4 W, un transistor se contenta con una treintena de milivatios y, por lo tanto, con una potencia mil veces menor. Y en lugar de los 200 V aproximadamente que requieren los tubos de recepción, el transistor queda perfectamente satisfecho con una tensión de menos de 10 V.

IG. — En suma, una o dos pilas clásicas de linterna de bolsillo deberán bastar para satisfacer el módico apetito de un receptor con transistores.

CUR. — Sí, así es como son alimentados los receptores portátiles que le han hecho la vida imposible en la playa.

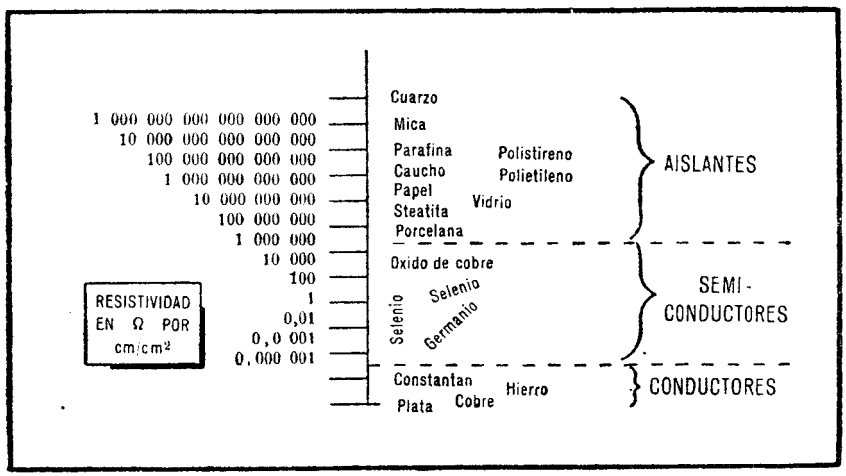



**Fig. 1. — Ordenación de los principales conductores, semiconductores y aislantes, según su resistividad. Se observará que la resistividad de los semiconductores varía en proporciones muy grandes, de modo que, en nuestra escala, ocupan espacios más o menos amplios.**

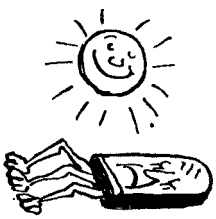
IG. — ¿Se puede pensar igualmente que los transistores son más robustos y tienen una existencia más larga que los tubos electrónicos, puesto que no tienen el frágil filamento ni el cátodo cuya emisión electrónica acaba por empobrecerse?

CUR. — Así es. El transistor se distingue por su robustez (porque se trata de un trozo de cristal de germanio o de silicio, provisto de tres conexiones y encerrado en una caja), por su poco peso y sus dimensiones muy pequeñas.

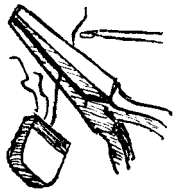
IG. — ¡Esto es magnífico? ¡Sólo ventajas y ningún defecto!

## El reverso de la medalla.

CUR. — ¡He ahí el peligro de enjuiciar las cosas apresuradamente! Desgraciadamente, el transistor tiene ciertos defectos. El más grave es que soporta muy mal el calor. A más de 55° C, su rendimiento disminuye bastante rápidamente; a más de 85° C, no recobrará sus propiedades iniciales, una vez enfriado (1). Este es al menos el caso de los



(1) Ciertos transistores de potencia soportan temperaturas que alcanzan 100° C. Se obtienen incorporando dosis relativamente elevadas de impurezas.



transistores de germanio. Los de silicio soportan fácilmente temperaturas mucho más elevadas: 150° C no les dan miedo, porque en el silicio los elementos de la capa exterior están más fuertemente ligados al núcleo, como verá usted más adelante.

IG. — Entonces le prometo no aproximar nunca mi soldador a un transistor.

CUR. — Y hará usted bien. Por lo demás, para efectuar soldaduras en las conexiones de los transistores, se deben interceptar las calorías disipadas por la punta del soldador, con el fin de que no lleguen al cuerpo del transistor.

IG. — ¿Y cómo se hace?

CUR. — Pues sencillamente, teniendo bien cogida con los alicates planos una porción del hilo de conexión entre el transistor y el punto de la soldadura... Por su parte, los fabricantes de transistores establecen las conexiones con hilo mal conductor del calor (pero, afortunadamente, buen conductor de la corriente).

IG. — ¿Hay otros reproches que usted pueda hacer al transistor?

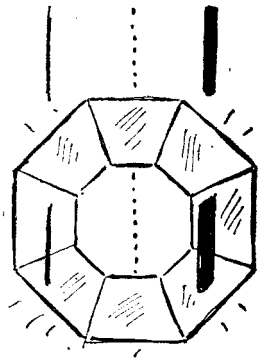
CUR. — Desgraciadamente, sí. Es su limitación de frecuencia y de potencia. No puede funcionar a más de algunos centenares de megahertzios...

IG. — Esto no es tan malo si se piensa que el magehertzio es un millón de períodos por segundo.

CUR. — Y tampoco puede funcionar a potencias elevadas, porque el calor que se disipa entonces en el cuerpo del transistor compromete el rendimiento.

IG. — ¿Piensa usted que estos defectos son prohibitivos?

CUR. — Desde luego que no. Desde que fue inventado en 1948 por tres físicos americanos, Bardeen, Brattain y Shockley (lo que les valio el premio Nobel), el transistor ha sido mejorado incesantemente. Y ahora ya reemplaza ventajosamente a la válvula en la mayoría de sus aplicaciones. Pero no pienso que por eso se llegue a renunciar completamente al empleo de las válvulas o tubos.



## Retorno a las fuentes.

IG. — Ahora que no estoy acosado por el discordante conjunto de los pequeños receptores de playa, tengo más deseo que nunca de comprender cómo funcionan los transistores y de qué manera se les puede utilizar.

CUR. — Cosa curiosa: cuanto más sencillos son los circuitos asociados a los transistores en los montajes usuales, tanto más complejos son los fenómenos que se producen en estos minúsculos triodos a cristal.

IG. — Puesto que usted habla de «triodo», supongo que en el transistor hay un cátodo, una rejilla y un ánodo.

CUR. — En efecto, existen en él regiones que, en cierto modo, desempeñan un papel análogo al de los electrodos de un triodo: emisión de un flujo de electrones, regulación de su intensidad y su captación. Y si usted quiere ir de prisa puedo exponerle brevemente el empleo de los transistores sin analizar su principio de funcionamiento. ¿Lo desea así?

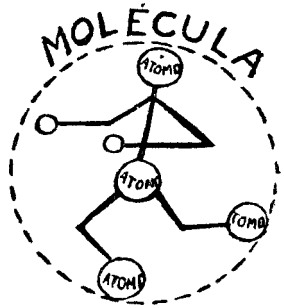
IG. — No; prefiero comprender lo que pasa en realidad. Usted me ha acostumbrado a razonar y a analizar el mecanismo de los fenómenos estudiados. Sigamos la tradición.

## Moléculas y átomos.

CUR. — Tiene usted razón. Pero, en este caso, es necesario que empecemos por el principio, es decir por la constitución de la materia.

IG. — Me parece que esto es... una materia que conocemos bien. La más pequeña partícula de una substancia que conserva todas las propiedades químicas se llama *molécula,* dice mi libro de física.

CUR. — Olvida añadir que se conocen actualmente alrededor de medio millón de diferentes moléculas resultantes de las diversas combinaciones de unos cien elementos simples.



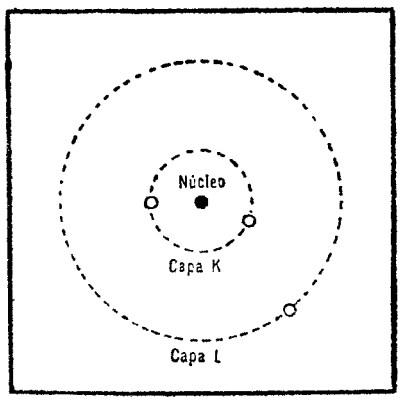
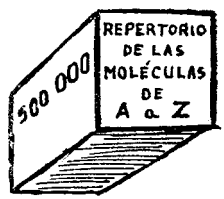
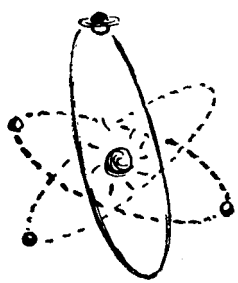




**Fig. 2. — El átomo de litio comprende dos electrones que gravitan alrededor del núcleo en la capa K y un electrón en la capa L.**




IG. — En cambio, menciona que las moléculas se hallan a una cierta distancia unas de otras (lo que explica la compresibilidad de todos los cuerpos), que son atraídas unas por otras (afortunadamente, porque de lo contrario todo acabaría en polvo) y que están animadas de un movimiento desordenado cuya velocidad aumenta con la temperatura.

CUR. — ¡Bravo, Ignotus! Cada vez merece usted menos su nombre... Rompamos ahora las moléculas, que se descomponen en *átomos,* es decir en partículas elementales de los cuerpos simples (o elementos). Usted sabe que cada átomo...



IG. — ... es un sistema solar en miniatura, con su sol central que es el núcleo compuesto de *protones* (cargas positivas elementales) y de *neutrones,* y sus planetas son los *electrones* o cargas elementales de electricidad negativa que gravitan a su alrededor.

CUR. — Habla usted como un libro. Pero no hay que fiarse de las analogías. Mientras que todos los planetas del sistema solar evolucionan *casi* en el mismo plano, los electrones tienen sus órbitas en planos diferentes. Y estas órbitas no están dispuestas arbitrariamente: no pueden ocupar sino emplazamientos determinados, a los que se designa con el nombre de «capas» K, L, M, N, O, P y Q. Estas siete capas, que se las puede representar como esferas concéntricas que tienen el núcleo por centro, tienen radios proporcionales al cuadrado de su orden.

IG. — ¡Alto, Curiosus! Esto es un poco complicado para mí.

CUR. — Nada más sencillo. La capa K es la número 1. Desde ésta, la Capa L, que lleva el número 2, tendrá un radio $2^2 = 4$ veces mayor. La capa M tendrá un radio $3^2 = 9$ veces mayor, etc.

IG. — De modo que el radio de la séptima capa, la que usted denominará Q, será $7^2 = 49$ veces mayor que el de la capa K.

CUR. — Sí por cierto. Y además la energía de que está animado cada electrón es proporcional al número (se dice al «número cuántico») de la capa en la que se encuentra.

IG. — ¿Y estas distancias cada vez más elevadas de las capas con respecto al núcleo, qué magnitud real tienen?

CUR. — La capa más cercana al núcleo dista de él 5 milmillonésimas de centímetro. Pero me temo que esto no le diga nada. Imagínese que un hada, con un golpe de su varita mágica, pueda hacer aumentar las cosas 10 veces. Si nuestra hada da entonces 14 golpes de varita a un átomo de carbono (cuyo núcleo contiene 6 protones y 6 neutrones y además 6 electrones de los cuales dos están en la capa K y cuatro en la capa L)...

IG. — Nuestro átomo se ha agrandado $10^{14}$ veces y probablemente va a ser tan grande como el globo terrestre, de modo que no sabrá donde ponerlo. ¡El hada va a estar bien fastidiada!

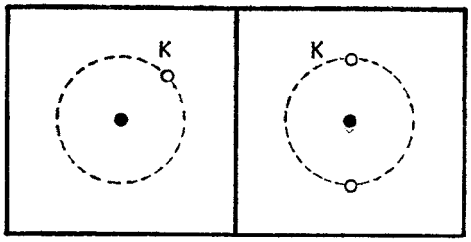
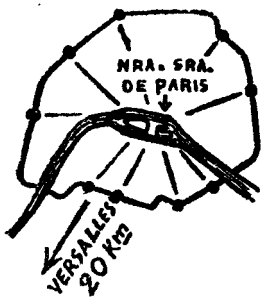



**Fig. 3. — He aquí los dos átomos más sencillos: hidrógeno (a la izquierda) y helio (a la derecha).**




CUR. — Nada de eso. Porque los protones tendrán las dimensiones de simples manzanas, mientras que los electrones (aunque su masa sea 1837 veces menor que la de los protones) serán de grandes como balones de fútbol y si el núcleo estuviese situado en el atrio de Nuestra Señora de París, los dos electrones de la capa K efectuarían su revolución a 5 kilómetros de allí, o sea a las puertas de la capital. En cuanto a los otros 4 electrones de la capa exterior, se hallarían a 20 kilómetros del núcleo, por ejemplo en Versalles.

## Ignotus tiene vértigo.

IG. — Pero, entonces ¿qué es lo que hay entre nuestras manzanas y nuestros balones de fútbol?

CUR. — ¡Nada! Vacío. Y, desde luego, fuerzas de atracción eléctricas, magnéticas y gravitacionales que mantienen todo el sistema en equilibrio. Las cargas de signos contrarios son atraídas mutuamente y los electrones no salen de sus núcleos a pesar de las fuerzas centrífugas que tienden a arrancarlos de allí.

IG. — Me da usted miedo. Así, pues, ¡el edificio del átomo comprende tanto vacío y tan poca materia!

CUR. — Pues sí, amigo mío. Y si se pudiese comprimir todos los núcleos y todos los electrones que componen el cuerpo de usted de manera que no quedase vacío entre ellos, se obtendría un corpúsculo que pesaría siempre sus 70 kilogramos, pero que apenas sería visible en el microscopio.

IG. — Me pone usted carne de gallina cada vez que me recuerda que

yo también estoy compuesto de átomos. Y ahora que me ha revelado usted el vacío que reina en mí, soy presa de un vértigo atroz.

CUR. — Entonces haremos bien en volver a átomos que no sean los de su cuerpo. Y, para representarlos con más comodidad, convendremos en dibujar cada capa en forma de una circunferencia. Vemos que el átomo más sencillo es el de hidrógeno, que se compone de un solo

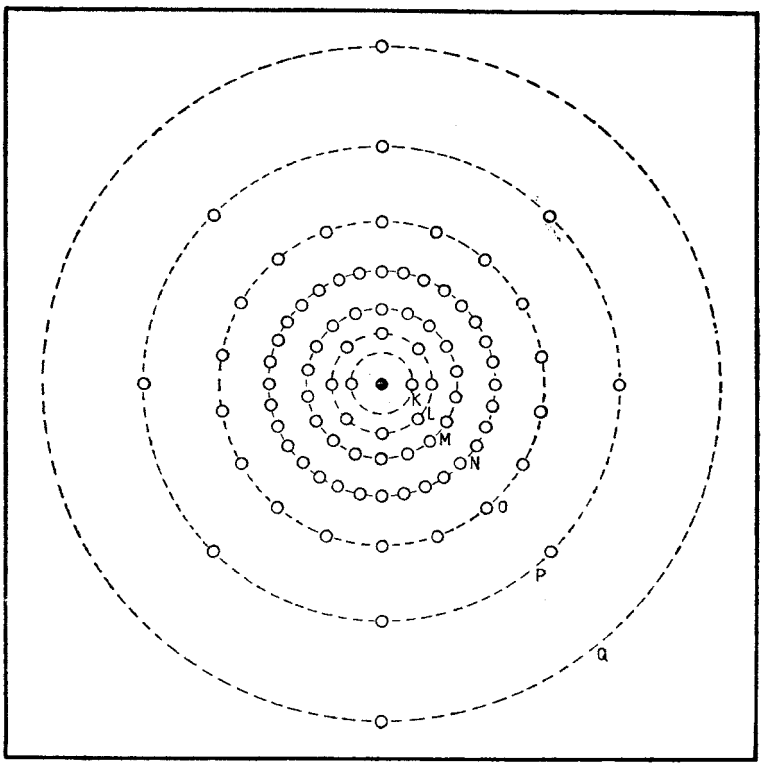



**Fig. 4. — Distribución de las capas electrónicas alrededor del núcleo y número máximo de electrones que pueden radicar en cada capa. Tal es la estructura del átomo por radio.**

protón y de un solo electrón situado en la capa K. En el helio, 2 electrones, situados en esta misma capa, gravitan alrededor de 2 protones del núcleo.

IG. — ¡Y cual será el elemento que tenga 3 electrones en la capa K?

## Número de plazas limitado.

CUR. — Ninguno. Porque esta capa no podrá contener más de dos electrones. De la misma manera, la capa L no podrá tener más de 8, la capa M más de 18, la capa N más de 32, la O más de 50, la capa P más de 72 y la capa Q más de 98.

IG. — Es extraña esta serie de números que usted recita con tanta soltura.

CUR. — No tiene ningún mérito, pues siguen una sencilla ley:

Capa K $1^2 \times 2 = 2$
Capa L $2^2 \times 2 = 8$
Capa M $3^2 \times 2 = 18$
Capa N $4^2 \times 2 = 32$
Capa O $5^2 \times 2 = 50$
Capa P $6^2 \times 2 = 72$
Capa Q $7^2 \times 2 = 98$

IG. — ¡El total suma 280! ¿Hay átomos que contienen tantos electrones?

CUR. — No, ya que si las capas K, L, M y N pueden contener efectivamente el número de electrones indicados, no se encuentran nunca más de 18 en O, más de 32 en P y más de 10 en Q.

IG. — Esto es muy bonito, pero tengo la impresión de que nos vamos a sumir en los meandros de la física atómica y nuclear.

CUR. — Al contrario, vamos a tomar inmediatamente una decisión que nos simplificará considerablemente el estudio de todas estas cuestiones. Si usted quiere, desde ahora no tendremos en cuenta más que los electrones de la capa exterior de un átomo.

IG. — ¡Estamos bien, acaba usted de revelarme con cierto sadismo la existencia de esas numerosas capas que asemejan al átomo a una especie de cebolla, y ahora me prohibe usted mondarla! ¿Es para evitarme las lágrimas...?

## Neutralidad y ionización.

CUR. — La decisión que acabamos de tomar es perfectamente legítima. ¿Qué es lo que nos interesa en fin de cuentas? Pues el estado eléctrico de los átomos. Pero, normalmente, un átomo se compone de tantos elementos como protones, de mdo que las cargas negativas de aquélls equilibran las cargas positivas de éstos. Un átomo así es neutro. Puede ocurrir que las fuerzas exteriores le arranquen uno o varios electrones. En este caso, el equilibrio queda roto: las cargas negativas de los elecra, electrones en exceso, se convierte en negativo. Supongo que entonces el átomo es positivo. Y se le llama *ión* positivo.

IG. — Y, si, por en contrario, el átomo recibe, por una razón cualquiera, electrones en exceso, se convierte en negativo. Supongo que entonces se le puede llamar ión *negativo*.

CUR. — Perfectamente. Pero estas pérdidas o estas adquisiciones de electrones (fenómenos de *ionización*) no pueden tener lugar más que en la capa exterior, es decir allí donde se ejerce la atracción del núcleo con menos fuerza.

IG. — Sí, comprendo que, en estas condiciones, sólo pueden interesarnos los electrones de esta capa.

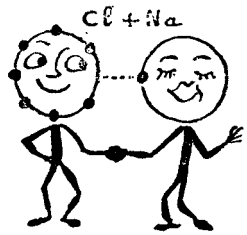
## Cuestiones matrimoniales.

CUR. — Para ello hay todavía otra razón. En efecto, es esta capa la que determina las afinidades químicas de los elementos. Un átomo no está verdaderamente satisfecho de la existencia más que cuando hay 8 electrones en su capa exterior. En estas condiciones, es perfectamente estable y no piensa en adquirir o perder electrones. Así, por ejemplo, el

neón( que posee 7 electrones en su capa exterior L, es muy feliz y no busca entrar en relación con ningún otro elemento químico. Pero el flúor, que, en esta misma capa exterior no tiene más que 7 electrones, no desea sino entrar en combinación con otro elemento capaz de cederle un electrón para completar su capa exterior hasta 8.

IG. — ¿Y cómo se efectúan estos casamientos?

CUR. — Considere el caso del cloro que no tiene más que 7 electrones en su capa exterior M, y el del sodio que tiene 2 electrones en la capa K, 8 en la L y sólo uno en la M. He aquí el ejemplo tipo de la pareja ideal. El sodio, combinándose con el coro, e cederá su único electrón de la capa exterior completando hasta 8 la del cloro. Y, de paso,



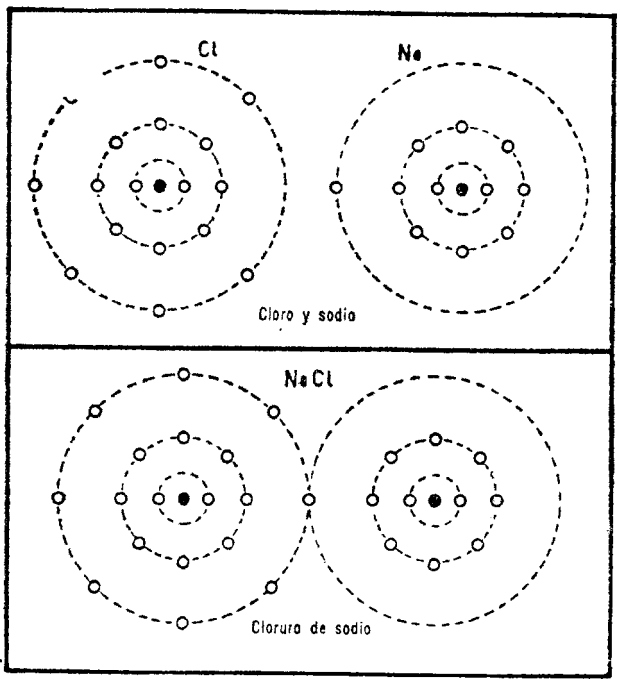




**Fig. 5. — La unión de un átomo de cloro (Cl) y de un átomo de sodio (Na, del nombre latino «natrium») da lugar a una molécula de cloruro de sodio.**

en e átomo de sodio, es la capa L la que, con sus 8 electrones, se convertirá en capa exterior, asegurándose una perfecta estabilidad.

IG. — ¿Pero, entonces, con su electrón de más, el cloro será ionizado negativamente, mientras que el sodio, que ha perdido este electrón, será oinizado positivamente?

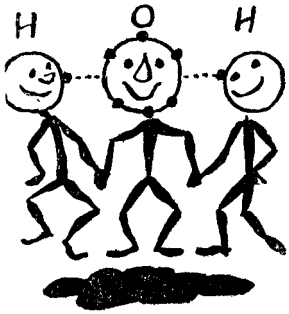
CUR. — Desde luego. Y la atracción mutua de estos 2 iones convertirá en estable el edificio de la molécula resultante de esta asociación.

IG. — ¿Y cuál es el nombre que tiene?

CUR. — Cloruro de sodio, cuando usted lo compra en la farmacia. Pero su tendero de comestibles le vende la misma substancia con el nombre de sal de cocina.

IG. — Me lo figuraba... Y supongo que de la misma manera se puedan explicar todas las otras aventuras matrimoniales de los átomos. ¿Qué ocurre, por ejemplo, con el agua?

CUR. — Muy sencillo. El átomo de oxígeno comprende 2 electrones en la capa K y 6 en la capa L. Hay, pues, en esta última, sitio para



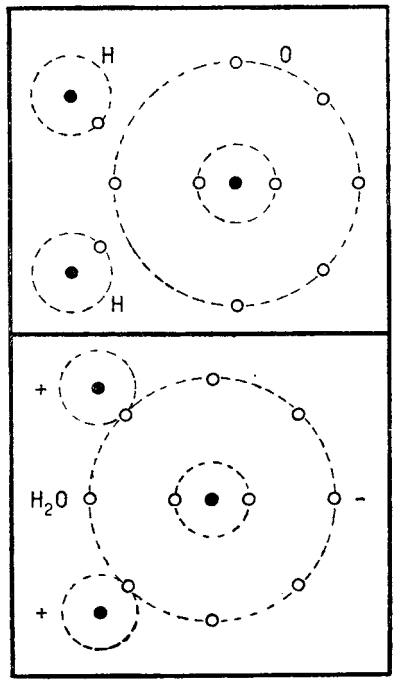
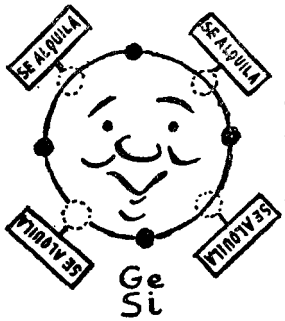




**Fig. 6. — Dos átomos de hidrógeno (H) vienen a completar en ocho el número de electrones de la capa L del oxígeno (O) formando así una molécula de óxido de hidrógeno, llamada vulgarmente... agua.**




otros 2 electrones. Y el oxígeno se los arrebata a 2 átomos de hidrógeno porque, se lo recuerdo, este último no contiene más que un electrón por átomo.

IG. — Ahora comprendo por qué se compone la molécula de agua de un átomo de oxígeno y 2 átomos de hidrógeno.

CUR. — La capa exterior es denominada a menudo «capa de valencia», porque su número de electrones indica las combinaciones de que es suceptible. Y se designa por «número de valencia» el número de electrodos que faltan a la capa para ser estable o, por el contrario, el número de los que puede ceder a otro átomo para hacerle estable.

IG. — Excúseme, pero esto no me parece muy claro.

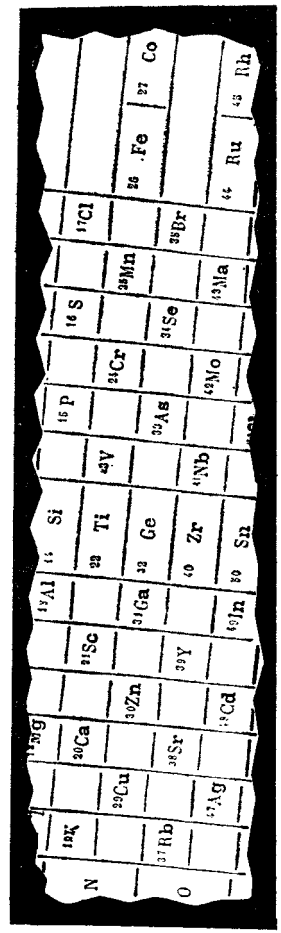
CUR. — Si la exterior contiene 6 ó 7 electrones, le faltan respectivamente 2 ó 1 para estar completa con 8. Se dice de tales átomos que son *bivalentes* o *monovalentes*. Pero si la capa exterior no tiene más que 1 ó 2 ó 3 electrones, el átomo estará propenso a cederlos. Y entonces estamos en presencia de elementos monovalentes, *bivalentes* o *trivalentes*.

IG. — ¿Y si la capa exterior tiene 4 electrones?

CUR. — En este caso, el átomo estaría muy contento entrando en relación con otro que contuviese igualmente 4 electrones en su capa exterior, para establecer con ellos enlaces de valencia. Tal átomo es por

| Número atómico | NOMBRE DEL ELEMENTO | Símbolo | Número de electrones en cada capa | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | K | L | M | N | O |
| 13 | Aluminio | Al | 2 | 8 | 3 | | |
| 14 | Silicio | Si | 2 | 8 | 4 | | |
| 31 | Galio | Ga | 2 | 8 | 18 | 3 | |
| 32 | Germanio | Ge | 2 | 8 | 18 | 4 | |
| 33 | Arsénico | As | 2 | 8 | 18 | 5 | |
| 49 | Indio | In | 2 | 8 | 18 | 18 | 3 |
| 51 | Antimonio | Sb | 2 | 8 | 18 | 18 | 5 |

**Fig. 7. — Distribución de los electrones (cuyo número total lleva el nombre de «número atómico») en las diferentes capas, en los principales elementos que entran en la composición de los transistores. Los números que determinan la valencia están indicados en negrita.**




tanto *tetravalente*. Este es particularmente el caso de los átomos de germanio y de silicio que son utilizados en los transistores; es también el caso del carbono. Finalmente, si la capa exterior tiene 5 electrones, el átomo es *pentavalente*. Y puesto que volvemos a la cuestión de los transistores, le presento algunos otros elementos químicos que entran en su composición. De una parte el aluminio, el indio y el galio cuya capa exterior no tiene más que 3 electrones, que son trivalentes; de otra parte el arsénico y el antimonio en los que la capa exterior tiene 5 electrones y son, pues, pentavalentes.

## La vida social de los átomos.

IG. — ¿Así es que vamos a pasar revista a todos los elementos químicos?

CUR. — No; tranquilícese. Ahora está usted familiarizado con todos aquellos que desempeñan un papel esencial en la tecnología de los transistores. Pero cometeríamos un error no considerando más que la sicología individual de los átomos. Lo que nos interesa es su vida social. Con excepción de feroces individualistas, tales como el neón que, con su capa completa de 8 electrones, se niega salvajemente a todo enlace, los átomos, no lo olvide, viven en sociedad. Y sus agrupaciones están más o menos bien organizadas. En los cuerpos sólidos (excepto los que, como el cristal, se asemejan a los líquidos), los átomos están dispuestos en un orden bien definido: forman unas redes cristalinas.

IG. — ¿De qué forma se asocian?

CUR. — Depende de la naturaleza de las sustancias. En algunas (como el cloruro de sodio), los electrones de un átomo están ligados a los iones positivos de otros átomos. Pero en los cuerpos que nos interesan, las uniones están aseguradas por electrones de la capa exterior (se llaman también *electrones periféricos* o *electrones de valencia*).

Tomemos como ejemplo el germanio o el silicio. Cada átomo está enlazado a otros 4 átomos mediante cada uno de sus 4 electrones periféricos. Se dibujó sólo un átomo enlazado a sus 4 vecinos. Pero cada uno de éstos lo está a su vez a 4 átomos (uno de los cuales es el que figura en el dibujo) y así sucesivamente. Es como si cada átomo tuviera 8 electrones periféricos, lo que, como hemos visto, es una condición de

estabilidad. Trate de imaginar tal reparto regular de átomos en el espacio.

IG. — ¡Una imagen muy curiosa la de estas bolas suspendidas en el vacío tendiendo cada una de ellas 4 brazos a sus vecinas como si fueran dioses hindúes! ... ¿Todos los sólidos cristalizan de esta forma?

CUR. — No, Ignotus. Por supuesto, algunos otros elementos tienen el mismo reparto de átomos, particularmente el carbono cuyos grandes cristales se llaman...

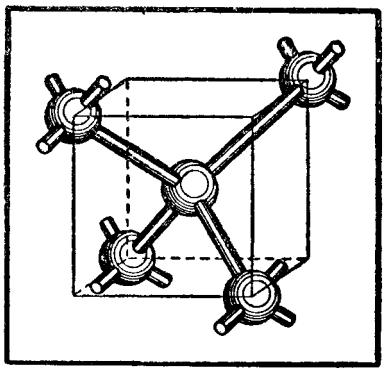
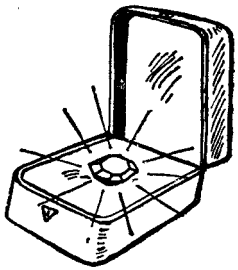


**Fig. 8. — El átomo de germanio, en el centro del cubo, está ligado por sus electrones de valencia a otros 4 átomos (el cubo está dibujado solamente para hacer más clara la disposición de los átomos en el espacio.) Los cristales de silicio y de carbono (diamante) tienen una estructura idéntica.**

IG. — ... diamantes. Esto lo sabía, amigo mío. Es una suerte que, para fabricar transistores se utilice el germanio y no el diamante, pues de lo contrario resultarían muy caros.

CUR. — En efecto, aunque sea posible hacer transistores de diamante... Asimismo, existen otros modos de cristalización que aquí no nos interesan. Por el contrario, lo que merece analizarse es el comportamiento de los electrones de la capa exterior o periféricos.



IG. — Me ha dicho que esos electrones se desprenden más fácilmente del átomo, siendo atraídos por su núcleo con menos fuerza.

CUR. — Exacto. Pero sólo ocurre cuando la capa exterior contiene pocos: 1 ó 2 ó 3. Es el caso de los metales. El oro, la plata, el cobre sólo tienen un electrón periférico. El hierro, el cinc y el magneto tienen dos y el aluminio posee tres. Estos electrones se desprenden del átomo sin dificultad, y quedan libres, formando parte del flujo de electrones que llamamos corriente eléctrica. Contrariamente, los metaloides, o no metales, tienen más en su capa exterior y estos electrones no tienen la tendencia al vagabundeo como sus semejantes situados en los átomos de los metales. Por ellos los metaloides son aislantes.

IG. — Pero el germanio, con sus 4 electrones periféricos, ¿también es aislante?

CUR. — Sí y no, querido amigo. La próxima vez le aclararé el significado de esta respuesta sibilina.

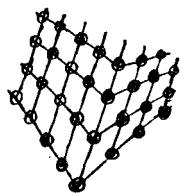
SEGUNDA CHARLA

**Las impurezas presentes en los semiconductores, aunque en cantidades ínfimas, cambian profundamente su comportamiento eléctrico. Nuestros dos amigos estudiarán aquí lo que ocurre cuando átomos extraños vienen a modificar las estructuras cristalinas regulares.**

**SUMARIO: Conductibilidad intrínseca. — Células fotorresistentes y fotoemisoras. — Impurezas. — Donadores. — Huecos o lagunas. — Aceptores. — Semiconductores tipos P y N. — Unión. — Barrera de potencial. — Tensiones directa e inversa. — Tensión de Zener. — Diodo. — Rectificación por semiconductores.**

# LAS UNIONES

## La apacible vida familiar.



IGNOTUS. — He reflexionado mucho en las redes cristalinas de usted y hasta he ido al Palacio de los Descubrimientos para examinar los modelos que representan la estructura de los diferentes cristales. Son muy lindas esas pequeñas bolas de variados colores que representan a los átomos y están unidas entre sí por varillas metálicas, a semejanza de los enlaces de valencia.

CURIOSUS. — Le felicito por emplear sus ocios tan bien. ¿Y a qué conclusión ha llegado en sus reflexiones?

IG. — A la idea de que un cristal de germanio se asemeja a un gran número de familias de las cuales cada una tiene cuatro hijos; y cada

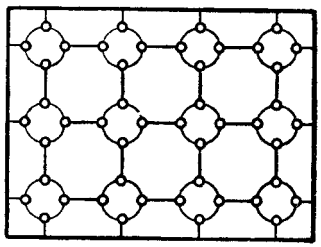
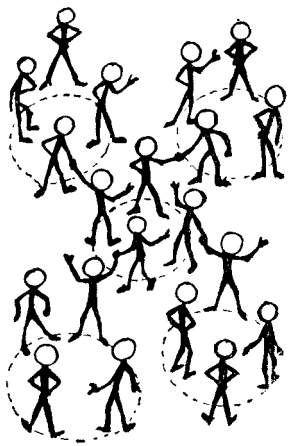


**Fig. 9. — La red cristalina del germanio puede ser representada como aquí. En realidad los enlaces de los átomos están dispuestos no en el plano, sino en el espacio. Pero nuestro dibujo esquemático tiene la ventaja de la claridad.**



uno de los hijos de una familia está casado con una hijo de otra de las restantes familias. De manera que cada familia está emparentado con otras por vínculos matrimoniales.

CUR. — No está mal del todo su imagen. Incluso me facilitará las explicaciones que le voy a dar. En efecto, en esta sociedad magníficamente equilibrada que usted evoca no podría haber normalmente grandes cambios. Quiero decir que todas las parejas deben permanecer fielmente unidas. Y en nuestro cristal de germanio todos los electrones deben permanecer unidos a sus átomos por fuertes enlaces de valencia.

IG. — Sin embargo, ¿qué hace usted con las pasiones humanas?

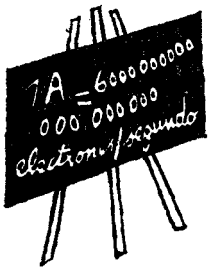
## Algunos divorcios.

CUR. — Veo que usted ha leído alguna novela rosa... Pues bien, sí. De la misma manera que los humanos están agitados por pasiones, los átomos están sometidos a la agitación térmica. Ésta llega, periódicamente, a romper los lazos que unen un electrón a su átomo y a liberarlo. Y usted sabe que cuando hay electrones libres...

IG. — ... el cuerpo se convierte en conductor de corriente. ¿Hay muchos electrones libres en el germanio a la temperatura normal?

CUR. — No, muy pocos. Apenas 2 electrones en cada 10 mil millones (o sea $10^{10}$) átomos. Es como si en una población doble de la que habita en la tierra, no hubiese más que un solo hombre libre.

IG. — ¡Qué horrible imagen! Pero si es así, ¿es que el germanio es un conductor muy malo?




CUR. — En efcto, es la razón de que se llame semiconductor. Sin embargo, observe que un grano de germanio contiene 10 mil trillones (o sea $10^{22}$) de átomos, de modo que en ellos habrá unos 2 billones de electrones libres. Esto es mejor que nada... Y lo suficiente para permitir el paso de una corriente débil.

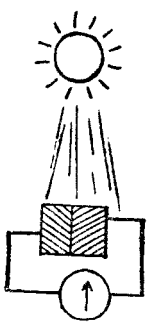
IG. — ¡Usted me habla de billones de electrones y afirma que la corriente es débil!

CUR. — Pero usted ha olvidado, Ignotus, que la intensidad de un amperio corresponde al paso de 6 trillones ($6 \times 10^{18}$) de electrones por segundo. Observe, pues, que nuestros pobres billones de electrones libres dispersados en la inmensa red cristalina del germanio, no pueden asegurar más que una débil conductibilidad. Ésta, debida a la agitación térmica (se lo recuerdo), lleva el nombre de *conductibilidad intrínseca.*

IG. — En resumen, es como si en nuestra sociedad regular hubiese algunos raros divorcios y nuevos casamientos que determinasen desplazamientos de una familia a otra.

CUR. — Así es. Y, para utilizar mejor su comparación, digamos que se puede incluir «el viento tórrido de las pasiones» (como dicen las novelas) que entonces provoca grandes trastornos.

IG. — Adivino lo que quiere usted decir. Si se aumenta la temperatura de un cristal de germanio, la agitación térmica se hace cada vez más violenta y llega a liberar un número mayor de electrones. La conductibilidad intrínseca aumenta entonces. Contrariamente a lo que ocurre en los conductores, la resistencia de los semiconductores disminuye al aumentar la temperatura.



CUR. — Bien razonado, Ignotus. Y por esto el germanio funciona mal a las temperaturas elevadas. Porque no es su conductibilidad intrínseca lo que nos interesa, ni lo que se utiliza. El silicio soporta mejor el calor, porque sus electrones de valencia, situados en la tercera capa, están más fuertemente unidos al núcleo que los del germanio, que evolucionan en la cuarta capa. Añadiré que todavía se puede provocar la liberación de electrones aportando a los átomos de germanio, no energía calorífica, sino la de la luz.

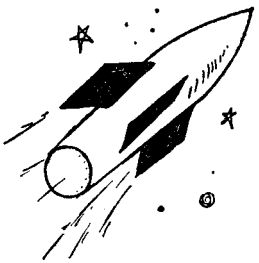
IG. — ¡Quiere usted decir que los «fotones», esos corpúsculos de luz, al «bombardear» los átomos de germanio, llegan a sustraerles electrones?

CUR. — Pues sí. Y es esto lo que permite construir células fotoeléctricas, es decir dispositivos cuya resistencia varía bajo la acción de la luz. La más antigua de las células conocidas es aquella en que se utiliza el selenio, que es igualmente un semiconductor.

IG. — Desde luego yo me sirvo de un exposímetro para sacar fotografías, equipado con una de estas células...

CUR. — La célula que usted tiene no es de selenio —que es una sustancia fotorresistente—, sino probablemente de cadmio o de silicio. Estas son materias fotoemisoras, es decir, transforman la energía luminosa en corriente eléctrica.

IG. — ¿No son estas células las que, sometidas a la luz del sol, aseguran la alimentación de corriente eléctrica en ciertos satélites artificiales?



## El escándalo de las familias numerosas.

CUR. — Sí, Ignotus, pero ahora vamos a provocar una perturbación en su sociedad tan bien organizada, introduciendo en ellas una familia de 5 hijos.

IG. — ¿Qué quiere usted decir con eso?

CUR. — Que entre los átomos de germanio más puro, se encuentran, en muy pequeña cantidad, átomos de otros elementos constituyendo

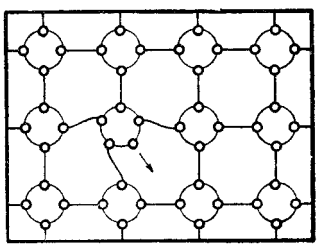


**Fig. 10. — Un átomo pentavalente de impurezas ha venido a romper la bonita disposición de la red cristalina. ¿Qué ocurrirá con el quinto electrón de este átomo?**

«impurezas». El germanio más puro contiene una proporción de ellas de uno por mil millones.

IG. — Es como si no tuviese.

CUR. — Se equivoca usted despreciando estas impurezas, porque incluso en tal débil proporción esto hace cincuenta billones de átomos extraños en un centímetro cúbico del germanio llamado «puro».

IG. — Yo no pensaba que este centímetro cúbico contuviese cincuenta mil trillones de átomos... ¿Pero qué es lo que tiene que hacer aquí la familia de cinco hijos? ¿Quiere usted decirme que se trata de un átomo con cinco electrones en la capa exterior?

CUR. — Exactamente. Un átomo pentavalente, por ejemplo el de arsénico o de antimonio, se introduce en la noble sociedad de los átomos de germanio... y se promueve el escándalo!

IG — Porque si se llegan a casar 4 hijos de esta original familia con hijos de las 4 familias vecinas, el quinto queda irremisiblemente soltero.

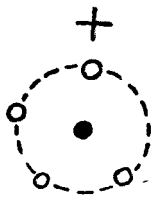
CUR. — Sí, Ignotus; habiendo formado los 4 primeros electrones enlaces de valencia con 4 átomos vecinos de la red cristiana, el quinto queda libre. Y si una voz le llama hacia uno de los extremos del cristal, franqueará las mallas de éste para dirigirse a allí.

IG. — Si yo comprendo bien, aplicando una tensión entre dos puntos de este cristal, se puede hacer pasar por él una corriente, porque los electrones libres debidos a átomos pentavalentes serán atraídos por el

polo positivo y afluirán allí, y entonces el polo positivo deja entrar en el cristal el mismo número de electrones.

CUR. — Sí; es así precisamente como ocurren las cosas en el semiconductor que contiene impurezas pentavalentes, es decir con un exceso de electrones. Se dice que el semiconductor es del *tipo N* (negativo). Y a las impurezas se las denomina a menudo *donadores* (porque dan electrones libres).

IG. — ¿Cuál es la proporción normal de las impurezas?



CUR. — Todo lo más, un átomo por cada 10 millones de átomos de germanio, o sea la proporción de 4 personas para toda la población de Francia.

IG. — Sí, y a pesar de ello esto constituye 100 veces más impurezas que en el germanio más puro. Pero ¿qué ocurre entonces con el átomo de impurezas, digamos de arsénico, cuyo electrón libre se ha separado? En mi opinión, deja de ser neutro y, contando desde entonces con menos electrones que protones, debe convertirse en positivo.

CUR. — Claro que sí. Por parodógico que parezca, en el germanio de tipo N, los átomos de las impurezas están ionizados positivamente.

## Historias de secuestro.

IG. — ¿Y qué ocurriría en nuestra sociedad cristalina si una de las familias no tuviese más que tres hijos; dicho de otra manera, si se introdujesen en el cristal semiconductor átomos que no tuviesen más que tres electrones en la capa exterior?

CUR. — El escándalo provocado no será menor que en el caso de las familias demasiado numerosas. Este átomo trivalente forma enlaces de valencia con tres átomos vecinos, pero el cuarto queda vacante. Hay

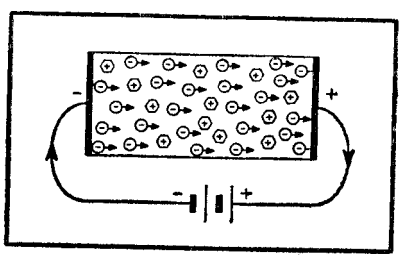


**Fig. 11. — Conducción en un semiconductor del tipo N. Los electrones libres (marcados con —) se sueltan de los átomos pentavalentes que, a consecuencia de ello, son ionizados positivamente (marcados con +).**

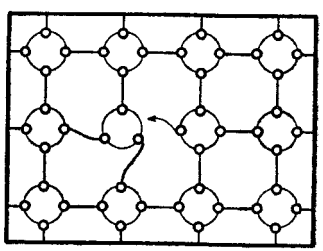


**Fig. 12. — Aquí la red cristalina del semiconductor contiene un átomo trivalente de impureza que atraerá a un electrón de un átomo próximo.**

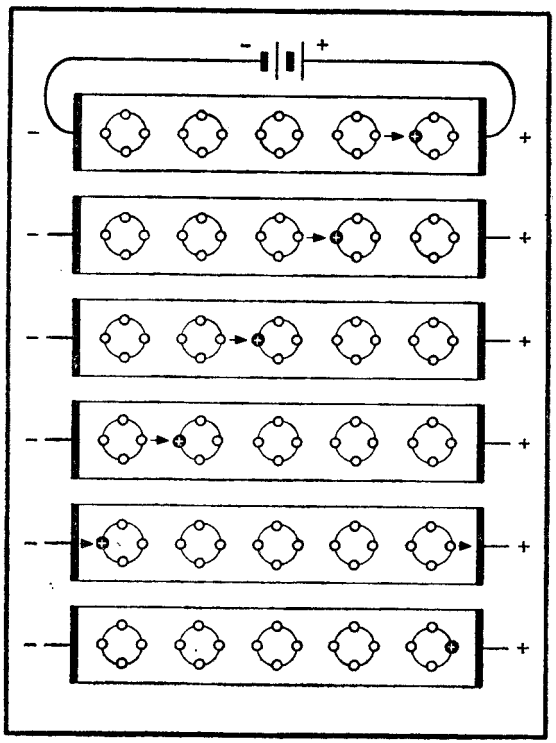
allí un «hueco» o una laguna, que un electrón de un átomo vecino podría muy bien llenar.

IG. — En suma, esta familia de tres hijos no pide más que adoptar un cuarto hijo, para seguir la tradición de la tribu o, más bien, para adaptarse a su organización general. Pero si «rapta» este hijo de una familia próxima, ésta, a su vez, presentará una laguna.

CUR. — Por supuesto. Y este movimiento de secuestros o de raptos de hijos puede incluso propagarse desde un extremo al otro.

IG. — ¿Aplicándole una tensión, supongo?

CUR. — Evidentemente. Pero siga usted atentamente lo que ocurre entonces. Viniendo de la dirección en la cual se encuentra el polo negativo, un electrón viene a llenar el «hueco» del átomo trivalente. El electrón se ha aproximado entonces al polo positivo, mientras se ha formado un nuevo «hueco» en el átomo vecino, más próximo al polo negativo. Después se reproduce el mismo fenómeno. A su vez el «hueco» es ocupado por un electrón que viene del polo positivo, mientras se ha formado así un «hueco» aún más cerca del polo negativo. Y cuando, a consecuencia de este tránsito, un electrón alcanza el polo positivo (desde donde es dirigido hacia la fuente de tensión), un «hueco» alcanza el polo negativo y aquí es ocupado por un electrón que emana de la fuente.



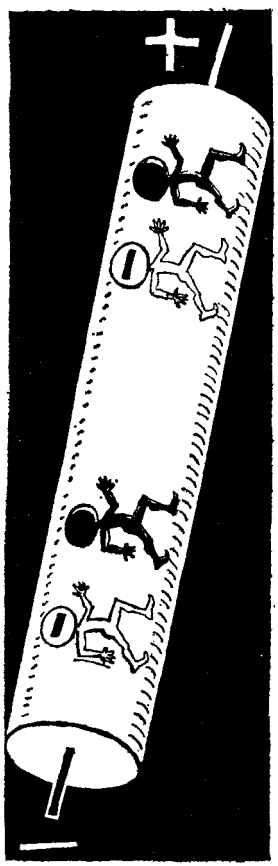
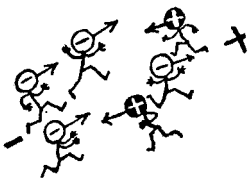




**Fig. 13. — En un semiconductor del tipo P, el «hueco» de una impureza trivalente es ocupado por un electrón que viene del lado negativo; esto crea un nuevo hueco, que, a su vez, es ocupado por un electrón que viene de un átomo próximo, y así sucesivamente. El dibujo muestra las fases sucesivas de esta conducción en la que el hueco (que constituye una carga positiva) se desplaza desde el polo positivo al polo negativo. En la última fase, un electrón que viene de la fuente de corriente ocupa el hueco más próximo del polo negativo: al mismo tiempo, otro electrón sale del átomo más próximo del polo positivo creando en él un nuevo «hueco», ¡Y todo recomienza....**

## Los dos «fluídos».



Ig. — En resumen, mientras los electrones se dirigen, como deben, hacia el polo positivo que les atrae, los «huecos» se desplazan hacia el polo negativo, como si fuesen cargas positivas.

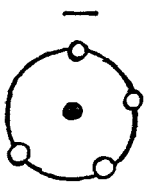
Cur. — En efecto, así es y todo ocurre como si en un semiconductor con impurezas trivalentes se propagasen cargas positivas desde el polo positivo al polo negativo, lo contrario de los electrones.

Ig. — Así que los «huecos» siguen la dirección convencional de la corriente eléctrica, desde el polo positivo al negativo, mientras que los electrones van en sentido inverso. ¿Pero se puede decir que aquí se tiene una corriente formada por cargas positivas?

Cur. — ¿Por qué no? Antaño, un físico llamado Syoner enunció la hipótesis de que la corriente estaba formada por dos «fluidos» que iban en sentido contrario. Sin embargo, no hay que olvidar que el «hueco» no es más que un sitio vacante ofrecido a un electrón.

Ig. — Supongo que el semiconductor que tenga impurezas trivalentes debe pertenecer al *tipo P* (positivo).

Cur. — Así es como se le designa. Y, puesto que usted está razonando correctamente, ¿puede decirme lo que ocurre con los átomos de las impurezas cuando los electrones vienen a llenar sus huecos desde los átomos contiguos.



Ig. — Se convierten en negativos, ionización debida al hecho de que el número de sus electrones se hace mayor que el de sus protones... Es muy curioso que en el *tipo N* las impurezas se ionicen positivamente,

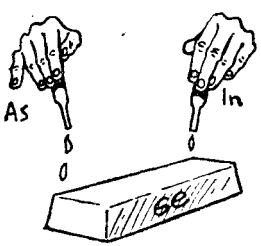
Cur. — Yo añadiría que estos átomos de impurezas del tipo P, tales y en el *tipo P* negativamente.

como los del aluminio, del galio o del indio, son denominadas frecuentemente *aceptores*, porque son ellos los que reciben electrones, mientras que los del tipo N los donan.

Ig. — Comienzo a tener la sensación de que se está formando una ensalada en mi cerebro con todos estos donadores y aceptores.

Cur. — Pues le voy a usted a dar una pequeña regla nemotécnica: en *donador* hay N y en *aceptor* hay P.

Ig. — Gracias. Así será más fácil.



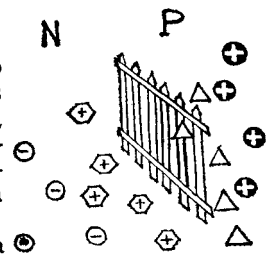

## Una unión que es una barrera.

Cur. — Y puesto que usted conoce ahora las costumbres de estas sociedades cristalinas cuya quietud es perturbada por las estravagantes familias de donadores y aceptores, examinemos a lo que conducirá la asociación de un semiconductor del tipo N con otro del tipo P. Imagínese que consigo adherir un trozo de germanio de un tipo con otro de tipo opuesto. O mejor aún que, tomando una barra de germanio puro, yo «enveneno» una mitad de ella introduciendo átomos donadores (por ejemplo de arsénico), mientras que la otra mitad estará contaminada por átomos aceptores (los de indio, si lo prefiere). La zona límite entre estos dos tipos de semiconductores lleva el nombre de *unión N-P*. Su espesor es de orden de 0,3 mm, pero esta delgadez no le impide desempeñar un papel prodigioso.

Ig. — No veo que esto tenga nada de particular. En cada mitad de nuestra barra, los electrones continuarán sus pequeños paseos, ignorando lo que ocurre en la otra mitad.

CUR. — ¡Error! La agitación térmica normal irá ahora acompañada de otro fenómeno. Los átomos de la región P, ionizados negativamente, van a repeler lejos de la unión a los electrones libres de la región N.

IG. — Es verdad, no había pensado en esta repulsión de las cargas del mismo nombre... Pero, en este caso, los átomos ionizados positivamente de la región N deben, por su parte, repeler lejos de la unión los huecos de la región P.




CUR. — Es cierto que estos huecos (que se les puede considerar como cargas positivas elementales) son repelidos así. En realidad, los iones positivos de la región N atraen electrones de la región P hacia la unión, haciéndoles ocupar los huecos inmediatos. Y los electrones así substraídos dejan huecos en los átomos alejados de la unión. Pero todo sucede como si los huecos hubiesen emigrado hacia el extremo de la zona P.

IG. — Y en la parte próxima de la unión todas las impurezas de la zona P serán llenadas, o dicho de otra manera, ionizadas negativamente. De la misma manera, en la zona N todos los átomos pentavalentes próximos a la unión habrán perdido un electrón, lo que les convertirá en positivos. Muy curioso todo esto: esta unión viene a ser una especie de barrera entre las dos zonas, de las cuales una está a un potencial negativo y la otra a un potencial positivo.

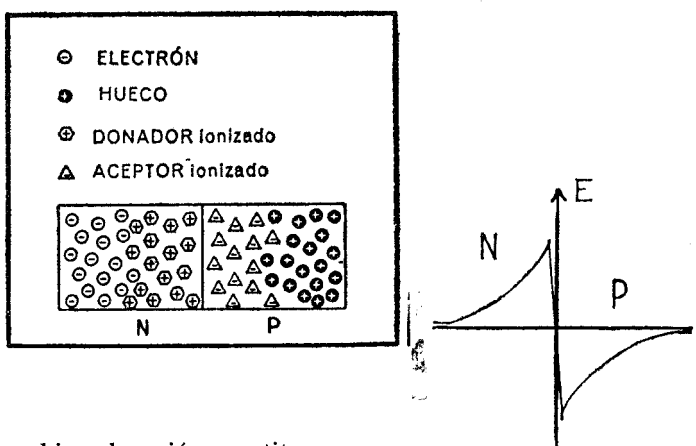



**Fig. 14. — Unión N-P. Los huecos de la zona P son ocupados cerca de la unión, pero no lo son en la parte más alejada. De la misma manera, los electrones libres de la zona N son rechazados y alejados de la unión; emanan de los átomos de impurezas que están próximos a ellos. (Obsérvense los 4 símbolos que serán utilizados en los dibujos que siguen).**

CUR. — Sí, ha razonado usted muy bien: la unión constituye una verdadera *barrera de potencial.* En esta delgada película de semiconductor, el potencial de los átomos ionizados pasa bruscamente desde un valor positivo (en la zona N, no lo olvide) a un valor negativo (en la zona P). Pero la carga total es nula porque en cada región las cargas positivas y negativas se equilibran y se anulan. Adhiriendo el semiconductor P al semiconductor N, hemos provocado sencillamente un desplazamiento de estas cargas hacia los dos extremos de cada región, mientras que anteriormente estaban repartidas casi uniformemente.

IG. — Todo esto me parece muy claro, ¿pero cuál es la utilidad de nuestra unión con su barrera de potencial?

CUR. — La va usted a encontrar en seguida, si aplica una tensión entre los dos extremos de nuestra barrera.

## Electrones y huecos de paseo.

IG. — Supongo que habremos formado una corriente, de una parte, por los electrones libres de la región N, y, de otra parte, por los huecos de la región P, yendo los unos en sentido contrario al de los otros.

CUR. — Lo que usted dice puede ser verdad, pero va usted un poco demasiado de prisa en la cuestión. En efecto, conviene examinar lo que

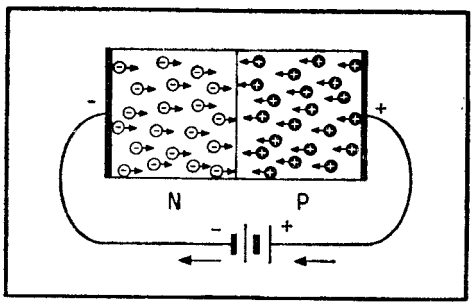



**Fig. 15.— Paso de la corriente por una unión N-P. En el dibujo no hemos representado más que los portadores de las cargas: electrones (marcadas con —) y huecos (marcados con +), omitiendo, para mayor claridad, los donadores de la zona N y los aceptores de la zona P.**

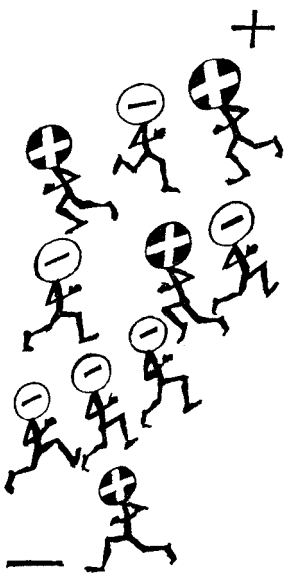
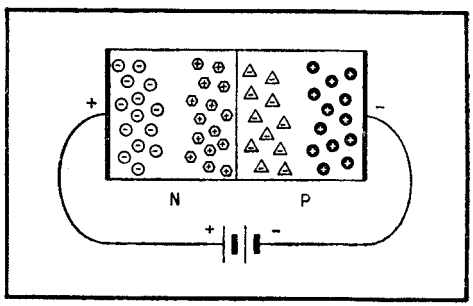


**Fig. 16. — Aplicando a la unión N-P una tensión inversa, se tropieza con la «barrera de potencial» que impide el paso de la corriente. La tensión en la unión aumenta.**




sucede según la polaridad de los potenciales aplicados. Admitamos primero que el polo positivo de la fuente de tensión esté unido a la zona P y el polo negativo a la zona N.

IG. — Pues bien, en la zona N los electrones libres del semiconductor serán rechazados hacia la unión por aquellos que vienen de la fuente. Atravesarán la unión y ocuparán los huecos que el potencial positivo de la fuente habrá desplazado hacia esta unión.

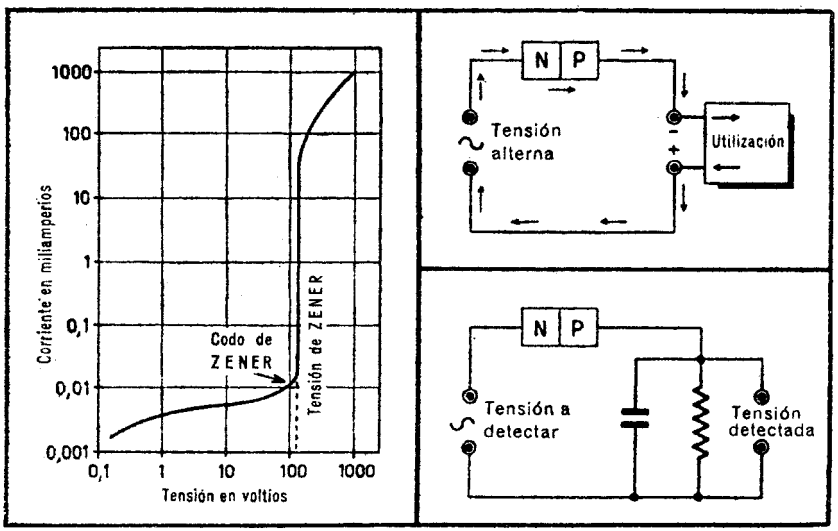
CUR. — Digamos para ser más precisos, que el polo positivo de la fuente atraerá un electrón cada vez que otro electrón haya franqueado la unión saltando desde la zona N hacia la zona P. Y el electrón atraído por la fuente creará un hueco que, llenado por un electrón más próximo de la unión, dejará allí, a su vez, una laguna, y, así sucesivamente, desplazándose el hueco hacia la unión donde lo ocupará un electrón procedente de la zona N.

IG. — Por consiguiente, yo tenía toda la razón diciendo que se establecía una corriente formada por electrones y huecos que van en sentidos contrarios.

CUR. — Sí, esto es exacto cuando se aplica, como acabamos de hacerlo, una tensión directa, es decir, el polo positivo de la fuente a la zona P y el polo negativo a la zona N. Pero si se aplica una tensión inversa, las cosas ya no marcharán tan bien.

IG. — ¿Por qué no? Los electrones del polo negativo de la fuente van a atraer los huecos de la zona P que estén más cerca del extremo de la barra. Y en el otro extremo, el potencial positivo de la fuente va a atraer cada vez más electrones libres. ¡Diablo!... ¡Esto no hará más que reforzar la barrera de potencial... y no se podrá establecer corriente alguna!

CUR. — Yo no se lo hago decir. Vea usted, pues, que la corriente no se establece más que con la condición de aplicar la tensión directa, es



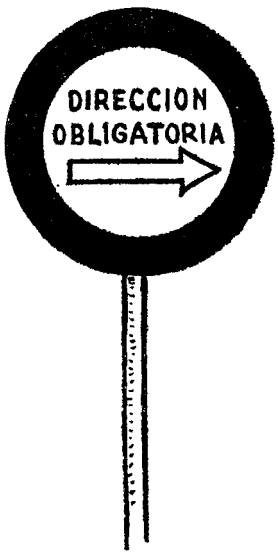




**Fig. 17 (arriba). — Intensidad de la corriente inversa de una unión en función de la tensión aplicada. Atención: las escalas no son lineales, sino logarítmicas.**

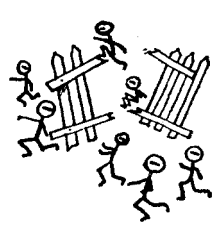
**Fig. 18 (arriba a la derecha). — La unión N-P puede servir como rectificador de corriente por lo mismo que la válvula de vacío y, además, sin exigir una tensión de caldeo. Nuestro dibujo muestra el esquema de rectificación de una alternancia.**

**Fig. 19 (abajo, a la derecha). — El diodo de unión N-P sirve como detector. La tensión detectada se recibe en una resistencia y es integrada por medio de un condensador.**

decir, el polo positivo a la zona P y el polo negativo a la zona N. Pero si usted invierte las polaridades, ya no habrá allí corriente, o al menos se tendrá una *corriente inversa* extraordinariamente débil.

IG. — ¿También si se aplica una tensión elevada?

CUR. — Incluso en este caso, pero solamente hasta un cierto límite. Si usted lo rebasa, la barrera de potencial se rompe, y los electrones se precipitan en avalancha; de golpe, la corriente se hace intensa. Este fenómeno ha sido descrito por Zener, y la tensión inversa con la que se produce lleva el nombre de *tensión de Zener*. Si bien se utiliza este fenómeno en ciertas aplicaciones electrónicas, por nuestra parte no tendremos que recurrir a él. Y, para nosotros, la unión permanecerá conductora en el sentido directo y prácticamente aislante en el sentido inverso.



**Dirección única obligatoria.**

IG. — Pero entonces, ¿esta unión, que es conductora en una dirección o sentido único, constituye un verdadero rectificador?

CUR. — Pues sí, desde luego, mi querido Ignotus. Porque si usted le aplica una tensión alterna, la corriente pasará en la alternancia directa, pero no pasará en la alternancia inversa.

IG. — ¿Cómo en cualquier diodo?

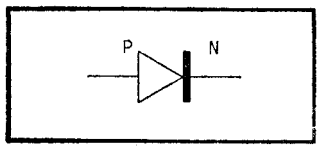
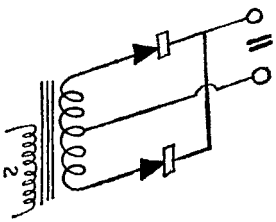



**Fig. 20. — El símbolo del diodo de unión adopta muy desacertadamente el sentido convencional de la corriente: en efecto, según la flecha pasa desde el positivo al negativo, lo que es contrario al verdadero sentido de la circulación de los electrones.**



CUR. — Perfectamente. Y es esta la razón por la cual se llama también a la unión P-N *diodo semiconductor*. Como todo diodo, puede servir de detector. Y se presta perfectamente a esta función, incluso mejor que los diodos de válvula, cuando se trata de corrientes de frecuencias muy elevadas.

IG. — ¿Y se pueden utilizar igualmente las uniones para la rectificación de corriente relativamente intensa, por ejemplo en lugar de las válvulas para la tensión anódica?

CUR. — Esto es lo que se hace corrientemente. Los rectificadores de silicio, de óxido de cobre o de selenio sustituyen ventajosamente a las válvulas de vacío. Son más robustos y tienen una duración útil mucho más larga.

IG. — Si es así no vacilo en exclamar: «¡Vivan los semiconductores!»

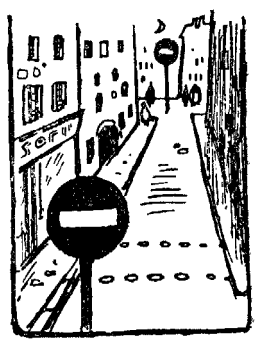
TERCERA CHARLA

**Después de haber examinado en la última charla las propiedades de las uniones, nuestros dos amigos abordan aquí el estudio del transistor, que, desde este primer contacto, revela profundas analogías y no menos profundas diferencias con la válvula o tubo de vacío. Curiosus e Ignotus desmontan el mecanismo de la amplificación del transistor y hacen interesantes corroboraciones a propósito de sus impedancias de entrada y de salida.**

**SUMARIO: Transistores P-N-P y N-P-N. — Corriente de reposo. — Corriente de base. — Efecto de transistor. — Amplificación de corriente. — Analogía válvula-transistor. — Resistencia de entrada y de salida. — Amplificación de tensión. — Alimentación del transistor.**

# ¡BUENOS DIAS, TRANSISTOR!

## Una broma estúpida.



CURIOSUS. — Buenos días, Ignotus. ¿Por qué llega usted tarde y por añadidura con este aire furibundo?

IGNOTUS. — Hay motivo para ello... ¿Sabe usted que su calle es ahora inaccesible para los automóviles?

CUR. — Tienen dirección única. Pero basta entrar en la dirección correcta para...

IG. — ¡No hay dirección correcta! Los gamberros, que se consideran sin duda muy graciosos, han colocado en el otro extremo un indicador de dirección prohibida, de forma, que ahora, la entrada de su calle está prohibida por los dos extremos.

CUR. — Después de todo, es posible que esta broma haya sido motivada por el hecho de que alguien se haya sentido abrumado por el ruido que hacen los coches. Así estaremos tranquilos, lo que nos permitirá examinar el principio del transistor.

IG. — Estoy ansioso por saber cómo se hace este «animal de tres patas».

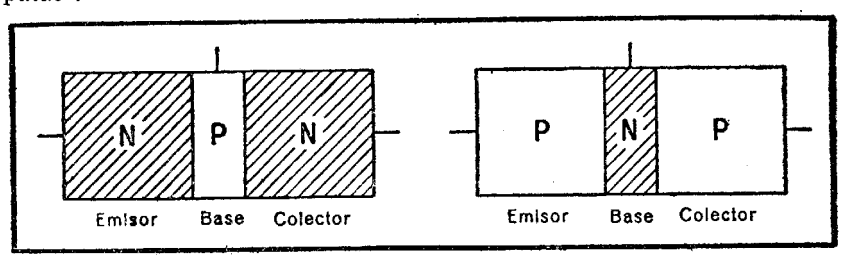



**Fig. 21 — Dos tipos fundamentales de transistores: N-P-N y P-N-P.**

CUR. — Pues bien, esto no tiene nada de complicado. Un transistor se compone de dos uniones, puestas en oposición. Por ejemplo, se puede tomar una unión N-P y una P-N, y, haciendo común su parte P, se obtiene un transistor del tipo N-P-N.

IG. — De la misma manera, pienso yo, una conjunción... de uniones P-N y N-P daría lugar a transistor P-N-P.

NP + PN = NPN

PN + NP = PNP

CUR. — Evidentemente. Añadiré que una de las zonas exteriores lleva el nombre de *emisor* y la otra el de *colector*, mientras que la zona media, que debe ser muy delgada (ya lo dije antes) se denomina *base*.

IG. — En resumen, un transistor es una especie de sandwich donde, entre dos gruesas rebanadas de pan, hay una delgada lonja de jamón.

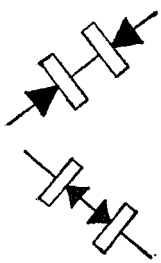
CUR. — Como usted quiera.

IG. — Pues bien, permítame decirle que su sandwich no es más comestible que accesible es su calle.

## Un sandwich impenetrable.

CUR. — ¿Qué quiere usted insinuar?

IG. — Sencillamente que dos uniones puestas en oposición impiden el paso de la corriente en los dos extremos, por la misma razón que los dos discos de «dirección prohibida» impiden entrar en su calle, cualquiera que sea el exttremo por el cual se intente hacerlo.



CUR. — No está mal del todo su razonamiento. Acabará usted por suponer que soy yo el autor de esta estúpida broma y que la he hecho con el único fin de que usted comprenda con más facilidad el transistor... El hecho es que, si se aplica una tensión a un transistor entre emisor y colector, cualquiera que sea su polaridad habrá siempre una de las dos uniones situada en el «buen sentido» y no impedirá el paso de la corriente; pero la otra estará en el «mal sentido» y se opondrá a su paso.

IG. — Por ejemplo, si aplicamos en el extremo izquierdo de un transistor N-P-N el negativo y en el extremo derecho el positivo, la primera unión (N-P) dejará pasar bien los electrones de izquierda a derecha.

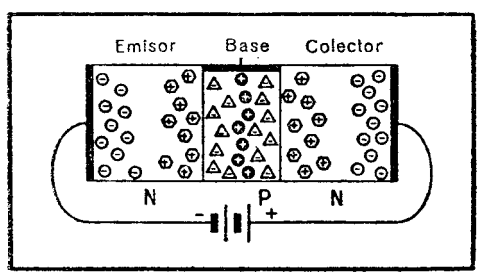



**Fig. 22. — Barreras de potencial que rectifican, en un transistor, los electrones, las lagunas y los iones positivos (los de los donadores) y negativos (los de los aceptores).**

Pero la segunda (P-N) les impedirá resueltamente circular. ¿No habrá sin embargo algunos electrones audaces y astutos que, a pesar de todo, llegarán a circular?

CUR. — Sí, siempre los hay. Se franquean el camino aprovechándose de la agitación térmica, que les permite pasar la barrera de potencial de la unión P-N. Esta circulación de electrones forma lo que se llama *corriente inicial* o *corriente de saturación.*

IG. — ¿Por qué esta última denominación? ¿Tan intensa será?

CUR. — Al contrario: es muy débil. Pero no depende apenas del valor de la tensión aplicada. Si ésta aumenta, la corriente será prácticamente la misma. Por «saturación» se entiende que la totalidad de los electrones libres, capaces de franquear la barrera de potencial a la temperatura dada, participan en la corriente así designada.

IG. — Pero si aumenta la temperatura...

CUR. — ... La intensidad de la corriente de saturación aumenta también. Además puede ocurrir que, a una tensión elevada, esta corriente alcance un valor tal que provoque el calentamiento de las uniones, lo que hace aumentar su intensidad...

IG. — ... Lo que, a su vez, aumenta el calentamiento, y así sucesivamente.

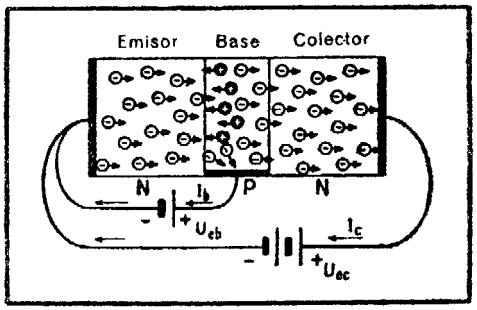


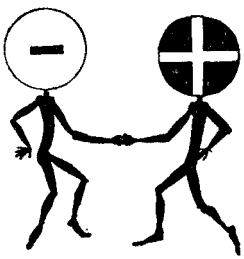

**Fig. 23. — Al atraer los electrones del emisor hacia la base, la fuente de tensión $U_{eb}$ les ha abierto el camino del colector.**

CUR. — Sí. Entonces se dice que el transistor se «embala». Y este fenómeno puede motivar su destrucción. Además conviene no aplicarle tensiones excesivas y facilitar la evacuación del calor.

IG. — Le prometo instalar ventiladores en mis transistores... Pero, por lo demás, no veo la utilidad de estos semiconductores en forma de sandwiches.

## En la base de todo... la base.

CUR. — Esto es porque usted no ha tocado aún el jamón... Quiero decir la zona central delgada, comprendida entre dos uniones que nosotros hemos llamado base. Apliquemos ahora una débil tensión, en sentido directo, entre el emisor y la base.



IG. — ¿Quiere usted decir que, por ejemplo, en el caso de un transistor N-P-N hacemos al emisor negativo con respecto a la base?

CUR. — Exactamente. ¿Qué le parece a usted que se producirá entonces?

IG. — Nada de particular. Puesto que la tensión es aplicada en el «buen sentido», se establecerá una corriente a través de la unión entre emisor y base. Esto es todo.

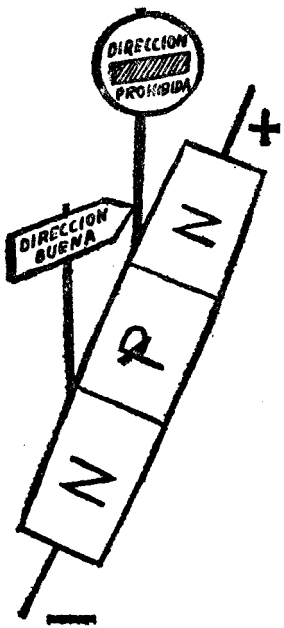
CUR. — No, no es esto todo. Porque esta corriente introducirá en la base P electrones libres que vienen del emisor, que es del tipo N. Y, como la base es muy delgada, sólo una cantidad muy pequeña de estos electrones vendrá a ocupar los huecos diseminados en la zona P, creando así una *corriente de base* $I_b$, según el mecanismo que hemos estudiado la última vez, al examinar la unión N-P. Sin embargo, la mayor parte de estos electrones penetran en la base y prosiguiendo su camino penetrarán en el colector, de donde los expulsará inmediatamente el poten-

cial positivo de la fuente de tensión $U_{cc}$. Franquearán por lo tanto la barrera de potencial de la segunda unión y, atravesando el colector, volverá al emisor a través de la fuente de tensión $U_{cc}$.

IG. — ¡Formidabe! Lo comprendo bien, basta aplicar una pequeña tensión entre base y emisor para hacer franquear a los electrones esta segunda unión base-colector que, normalmente, se presenta ante ellos en el «mal sentido».

CUR. — Pues, sí Ignotus. *Y es el establecimiento de la corriente inversa a través de la segunda unión lo que constituye el principio del efecto transistor.*

IG. — Pienso que las cosas serán más claras para mí si usted me fija el orden de magnitud de las tensiones y de las corrientes puestas en juego.




## Microamperios de la base y miliamperios del colector.

CUR. — Entre base y emisor se aplica en los transistores ordinarios una tensión del orden de 0,1 a 0,2 V. Esta determina una corriente de base de 50 a 200 μA. En cuanto a la tensión aplicada entre colector y emisor, puede variar entre 4,5 y 9 V. Y la corriente de colector es del orden de 2 a 10 mA.

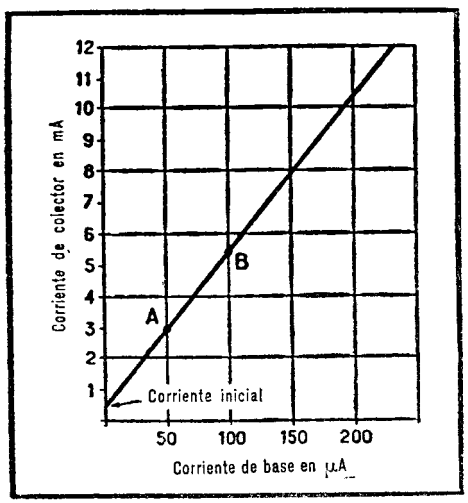
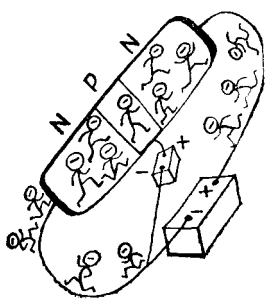



**Fig. 24. — Variación de la corriente de colector $I_c$ (en miliamperios) en función de la corriente de base $I_b$ (en microamperios). Entre los puntos A y B la corriente de base pasa de 50 a 100 μA, o sea un crecimiento de 50 μA o 0,05 mA. Entre estos dos primeros puntos la corriente de colector pasa de 3 a 5,5 mA, o sea un crecimiento de 2,5 mA. La ganancia de corriente del transistor es, pues, igual a 2,5 : 0,05 = 50.**




IG. — Resumiendo, el emisor hace entrar en la base un cierto número de electrones, de los cuales en seguida retorna una pequeña parte a través de la fuente de tensión $U_{cb}$ hacia el emisor. Son estos los electrones que, durante su corto trayecto en la base, han tenido la mala suerte de encontrar un hueco. Pero la mayoría prosiguen su camino atravesando la segunda unión y, una vez introducidos en el colector, retornan al emisor a través de la fuente de tensión $U_{cc}$. Preveo ya que el efecto amplificador del transistor consiste en que la corriente del colector es muy superior a la de la base.

CUR. — Va usted demasiado de prisa, pero no se equivoca. El hecho es que la corriente de colector depende esencialmente de la corriente de base y varía proporcionalmente a ella; es varias decenas de veces mayor. He aquí, por ejemplo, una curva que muestra cómo varía la corriente de colector en función de la corriente de base, en un cierto modelo de transistor. ¡Atención, Ignotus! La corriente de base está re-

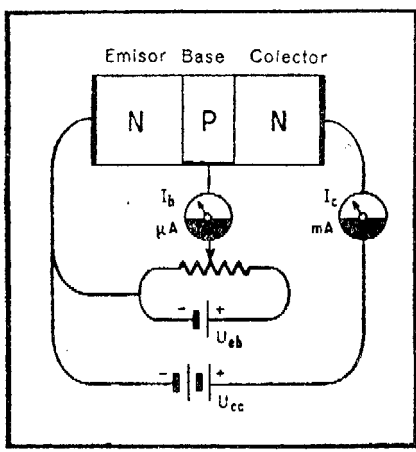



**Fig. 25. — Montaje que ha permitido trazar la curva de la figura 24. Para cada posición del potenciómetro se obtienen los valores de las corrientes de base y de colector.**

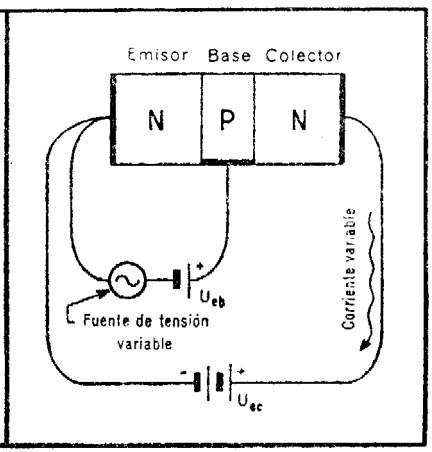
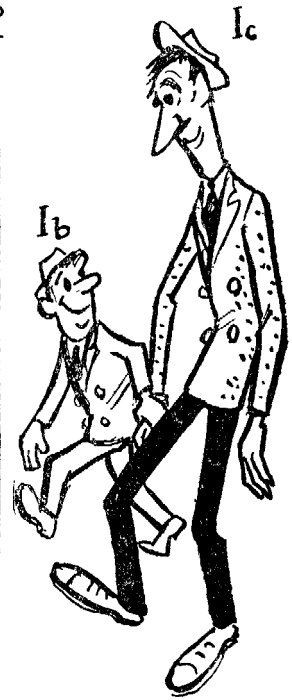



**Fig. 26. — He aquí una tensión variable aplicada entre base y emisor. La corriente de colector se hace variable.**

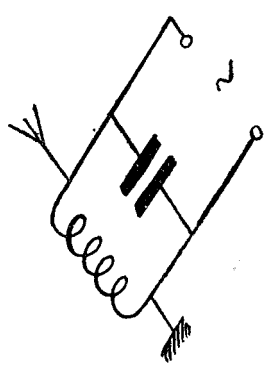



presentada aquí en *microamperios*, mientras que la del colector lo está en *miliamperios*. Observe usted que aquí la corriente de colector es siempre 50 veces mayor que la de base (haciendo abstracción de la débil corriente inicial que existe en ausencia de corriente de base). Entonces se dice que la *amplificación de corriente* es aquí igual a 50.

IG. — ¿Y cómo se traza una curva así?

CUR. — Tomando como variable la tensión aplicada entre base y emisor con ayuda, por ejemplo, de un divisor de tensión, llamado vulgarmente potenciómetro. De esta manera se mide la corriente de base por medio de un microamperímetro, y la de colector por medio de un miliamperímetro.

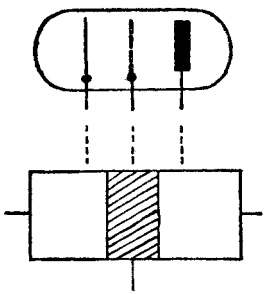
IG. — Tengo una idea, Curiosus. Si en lugar de girar el botón de un potenciómetro, se hiciese variar la tensión entre emisor y base, aplicando en serie con la fuente de tensión continua una señal variable, por ejemplo, la tensión de alta frecuencia provinente de un colector de ondas o bien la tensión de baja frecuencia obtenida después de la detección... Sometiendo así a débiles variaciones la corriente de base, se obtendrían fuertes variaciones de la corriente de colector.



## Analogías y diferencias.

CUR. — ¡Bravo, Ignotus! Usted quema las etapas de mis explicaciones, ¿cómo ha tenido esta idea luminosa?

IG. — Porque desde hace un momento entreveo la analogía entre el transistor y la válvula o tubo electrónico. Esta base se asemeja atrozmente a la rejilla. Y, lo mismo que ella, está interpuesta entre emisor y colector, o sea entre cátodo (que es también emisor de electrones) y ánodo (que también es colector de electrones). Y, como fuertes variaciones de potencial en la rejilla provocan fuertes variaciones de la corriente anódica, aquí, débiles variaciones del potencial de la base determinan fuertes variaciones de la corriente de colector. ¡Eureka! He comprendido el transistor. ¿No es verdad que soy formidable?



CUR. — Su triunfo es modesto. A riesgo de echar una ducha fría sobre su juvenil entusiasmo, tengo que decirle que la analogía válvula-transistor, que facilita mucho la comprensión de ciertas cosas, tiene límites que no se deben rebasar.

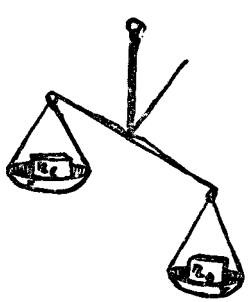
IG. — No veo diferencia esencial alguna.

CUR. — Para comenzar, hay una importante: es la existencia de la corriente de base. ¡Recuerde usted! Cuando utilizamos válvulas, evitamos cuidadosamente tener una corriente de rejilla.

IG. — Esto es cierto. Polarizamos negativamente la rejilla para impedir que se convierta en positiva con las crestas de las alternancias positivas de la señal, lo que la pondría en competencia con el ánodo, haciéndola captar electrones.

CUR. — Por consiguiente, la señal de entrada de una válvula es una tensión que no ha de crear ninguna corriente, y por lo tanto no debe consumir ninguna potencia. Pero, en el caso del transistor, la señal de entrada es una tensión que origina una corriente de base. Hay pues aquí implicada una potencia puesta en juego.

IG. — ¿Debo deducir de ello que la *resistencia de entrada* del transistor, es decir, la resistencia emisor-base, es débil?



CUR. — Evidentemente. No es más que de algunos centenares de ohmios, mientras que en una válvula, entre el cátodo y la rejilla, es infinita. Y en los transistores de potencia esta resistencia no es más que de algunos ohmios o decenas de ohmios. En cambio, la resistencia de salida es bastante elevada y puede llegar a varias decenas de millares de ohmios (1).

---

(1) Las resistencias de las cuales habla Curiosus se calculan dividiendo una débil variación de una tensión por la variación de la corriente correspondiente que determina. Así, la *resistencia de entrada*

$$r_e = \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b}$$

donde $\Delta E_b$ es una pequeña variación de la tensión entre emisor y base, e $\Delta I_b$ es la variación de la corriente de base resultante. De la misma manera, la resistencia de salida

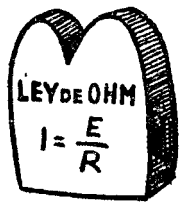
$$r_s = \frac{\Delta E_c}{\Delta I_c}$$

donde $\Delta E_c$ es una pequeña variación de la tensión aplicada entre colector y emisor, mientras que $\Delta I_c$ es la variación correspondiente de la corriente de colector. La medición se puede hacer con corriente de base constante o con tensión constante.

IG. — Esto es normal, puesto que las tensiones son aplicadas en el sentido directo para la unión emisor-base, lo que reduce la resistencia, pero en sentido inverso para la unión base-colector, lo que hace su resistencia muy grande. Aquí, sin embargo, los órdenes de magnitud son los de ciertas válvulas, en que la resistencia de salida es relativamente pequeña, sobre todo en los triodos.

CUR. — Ya ve usted, Ignotus, que no se puede recurrir, sin una cierta reserva, a la analogía válvula-transistor. Y puesto que hemos abordado la cuestión fundamental de las resistencias (o, mejor, impedancias) de entrada y de salida, comprenderá usted fácilmente como efectúa el transistor la amplificación de tensión.

## Amplificación de tensión.

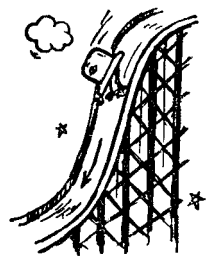



IG. — Supongo que una débil tensión alterna aplicada entre base y emisor determinará variaciones de la corriente de base, como ya hemos dicho.

CUR. — Y estas variaciones serán tanto más importantes cuanto más pequeña sea la resistencia de entrada (suponiendo que la fuente de tensión tenga una pequeña resistencia interna).

IG. — Comprendo esto, porque tengo siempre presente la ley de Ohm que dice que la intensidad de la corriente es tanto mayor cuanto más pequeña es la resistencia.

CUR. — Pero la corriente del colector varía proporcionalmente a la corriente de base. De ello resultan, pues, fuertes variaciones de esta corriente. Y, como la resistencia de salida del transistor es elevada, podemos hacer pasar sin inconveniente alguno esta corriente por una resistencia de carga de fuerte valor...



IG. — ...en la que vamos así a recoger tensiones alternas muy amplificadas. Si no me falla la memoria, en las válvulas electrónicas, la relación entre una pequeña variación de la corriente anódica y la variación de la tensión de rejilla que ha producido lleva el nombre de *pendiente*, ¿se puede aplicar en el reino de los transistores la misma noción? Entonces la pendiente será la relación entre la variación de la corriente de colector y la variación de la tensión de base.

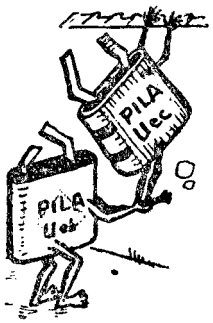
CUR. — Pues, sí, Ignotus. Se habla corrientemente de la pendiente de un transistor. Y tendremos ocasión de examinar esta noción con más detenimiento. Desde ahora puedo decirle que una pendiente de 30 mA/V (para una corriente de colector de 1 mA, porque su valor varía con la de esta corriente) no tiene nada de sorprendente.

IG. — ¡Pero, esto es magnífico! Se deben obtener amplificaciones enormes con tal pendiente.

CUR. — Desgraciadamente, no. Porque, usted lo va a ver muy pronto, la pequeña resistencia de entrada nos hace perder una parte del beneficio de esas pendientes elevadas. Por otra parte, ya comprenderá que es necesario limitar la amplitud de las tensiones alternas así puestas en juego.

IG. — En las válvulas se debe evitar que la rejilla se haga positiva. Aquí, yo pienso que es necesario evitar que las crestas de las alternancias positivas hagan positivo al emisor con respecto a la base.

CUR. — Todavía más, hay que evitar que las crestas de las alternancias negativas de la resistencia de carga excedan la tensión positiva aplicada al colector y le conviertan en negativo.




IG. — Para evitar estos peligros, ¿no se podría aumentar el valor de las dos tensiones de alimentación?

CUR. — Esto sería imprudente en ciertos casos porque, para cada modelo de transistor, hay valores de tensiones continuas que no se deben rebasar. Y en esta ocasión le señalo que las dos fuentes de tensión pueden ser puestas en serie ventajosamente, puesto que se trata de

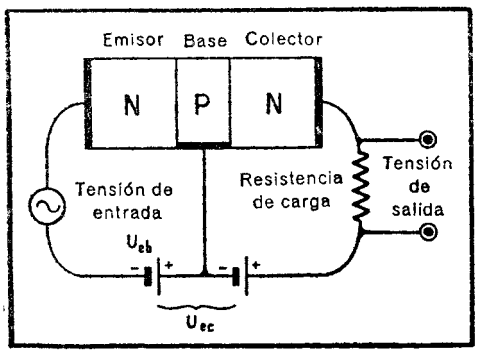
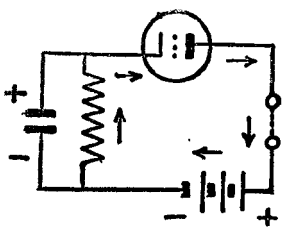



**Fig. 27. — Las dos fuentes de tensión, la de la base y la del colector, pueden ser reemplazadas por una sola que tenga una toma (como aquí) o bien un divisor de tensión. Nuestro dibujo muestra también el emplazamiento de la resistencia de carga en la que se han tomado las tensiones de salida.**

hacer que el colector tenga una tensión aún mas positiva que la de la base con respecto al emisor.

IG. — Ya lo veo, la pila $U_{eb}$ refuerza a la pila $U_{ec}$.



CUR. — En realidad, se prescinde completamente de la primera de estas pilas y se obtiene la polarización de la base provocándose una caída de tensión en una resistencia por la corriente emisor-colector que pasa por ella.

IG. — Como se hace en los montajes con válvulas, en que la resistencia de polarización de rejilla está recorrida por la corriente anódica.

CUR. — Sí, pero examinaremos esta cuestión más adelante. Entre tanto y a título de ejercicio, le pido que de aquí a nuestra próxima entrevista reflexione en la manera de comportarse el segundo tipo de transistores, el P-N-P, que es el que más se emplea.

IG. — ¡Qué de noches blancas en perspectiva, pobre de mi!

CUARTA CHARLA

**En el curso de sus tres primeras conversaciones, Curiosus e Ignotus han examinado las bases físicas de los transistores. Con este fin, han explorado la estructura íntima del átomo y después su comportamiento social en las redes cristalinas. Han visto que en estas sociedades de átomos se producen algunas perturbaciones por la intrusión de las impurezas. Y, por último, reuniendo semiconductores conteniendo impurezas de propiedades opuestas, nuestros amigos han obtenido diodos y transistores.**

**Todo esto, para ser bien asimilado, merece un repaso. Este será el objeto de la charla que se va a leer.**

**SUMARIO: Movimiento de las cargas. — Portadores mayoritarios. — Funcionamiento del transistor P-N-P. — Combinaciones intermetálicas. — Referencia de las conexiones. — Símbolos del transistor. — Resumen de las nociones fundamentales.**

# LA FISICA DE LOS TRANSISTORES

## Cuatro clases de partículas cargadas.

IGNOTUS. — Sus semiconductores me hacen pasar noches de insomnio Curiosus. Esto es apasionante... pero extremadamente complicado.

CURIOSUS. — ¿Debo recomendarle somníferos o prefiere usted que le aclare los puntos que le parecen más oscuros?

IG. — Prefiero tener respuesta a las cuestiones que me atormentan. Mire usted, lo que embrolla, para mí, el aspecto de ciertos fenómenos, es la presencia de cuatro especies de partículas cargadas en los semiconductores:

1) Los *átomos ionizados de los donadores,* que, después de haber perdido el quinto electrón de su capa exterior, se convierten en *positivos.*

2) Los *electrones* así liberados que, desde luego, son *negativos.*

3) Los *átomos ionizados de los aceptores,* que, habiendo acaparado un electrón de un átomo vecino, para completar su capa exterior de cuatro, se convierten por ello en *negativos.*

4) Finalmente, estos *huecos* o *lagunas,* debidos a tales acaparamientos y a la carencia de un electrón equivalente a una carga *positiva.*

CUR. — Ha resumido usted muy bien la situación que existe en el seno de un semiconductor. ¿Qué es, pues, lo que le inquieta?

IG. — Pues la cuestión del movimiento de las cargas. Usted me ha dicho que la corriente eléctrica es debida, en el semiconductor, a la vez, al flujo de electrones que van desde el polo negativo al polo positivo y al desplazamiento de los «huecos» que van en sentido inverso desde el polo positivo al polo negativo. En esto los semiconductores difieren de los metales, en que la conducción es debida únicamente al movimiento de los electrones.

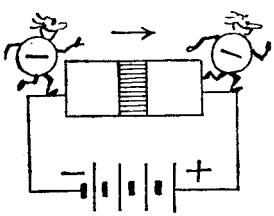
CUR. — Perfectamente, aunque el movimiento de los «huecos» sea también en último extremo debido al desplazamiento de los electrones.

IG. — Pero no comprendo la razón de que los átomos ionizados, tanto los de los donadores como los de los aceptores, no participen también en el movimiento de las cargas eléctricas.

CUR. — Ya veo lo que le atormenta. Y tiene usted razón en plantear la cuestión. A pesar de ello es sencilla: estos átomos no pueden desplazarse porque forman parte de una red cristalina y, a consecuencia de esto, están fuerte y rígidamente fijados en sus sitios. Mientras un cuerpo esté en estado sólido, sus átomos permanecen prisioneros de esos lazos invisibles que les mantienen en su puesto. Por el contrario, en los líquidos, los átomos ionizados se desplazan libremente, y la corriente se propaga por conducción iónica, dando lugar a fenómenos de electrólisis, de los cuales ha oído usted hablar en su curso de física.

IG. — Me gusta lo que me dice usted. Así, pues, en lo sucesivo podré hacer abstracción de los átomos ionizados en mis razonamientos y no ocuparme más que de los electrones y de los huecos.

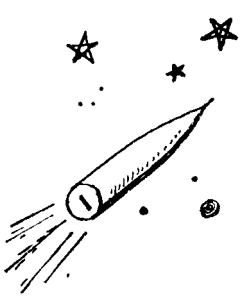
CUR. — Esto será perfectamente legítimo. Y yo añadiría que es afortunado que los iones no se desplacen en los semiconductores. De lo contrario la materia conductora se agotaría poco a poco, lo que acortaría la vida de los transistores. En cambio, la provisión de electrones se renueva constantemente, puesto que la fuente de tensión los inyecta en un lado y los absorbe en el otro (lo que origina nuevos «huecos»). Esto es decirle que no hay nada que limite la longevidad de los transistores.



**Einstein tenía razón.**

IG. — Esto es maravilloso... Pero no soltemos a nuestros electrones y lagunas. Quisiera saber cómo existen sin neutralizarse nunca. Puesto que las cargas de nombres contrarios se atraen mutuamente...

CUR. — Piense, Ignotus, en las enormes distancias que (en la escala atómica, desde luego) separan la mayor parte de estas partículas. Un electrón llega a recorrer trayectos de una longitud igual a varios centenares de veces la distancia que separa los átomos entre sí. Esta, en la escala humana, no es más que una diez milésima de milímetros como promedio. Pero para el electrón es una aventura tan loca como el viaje interestelar de un futuro cohete espacial. Conciba usted que, en estas condiciones, las probabilidades que ha de encontrar una laguna no son enormes. En efecto, los electrones y las lagunas coexisten siempre.



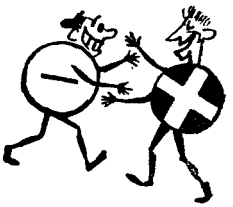
IG. — Sí, me ha explicado usted que, incluso a la temperatura normal, hay cierta agitación térmica que arrebata electrones a numerosos átomos, para proyectarlos en el espacio interatómico.

CUR. — En un centímetro cúbico de germanio «puro» hay siempre unos veinticinco billones de electrones libres y, evidentemente, otros tantos «huecos», porque el espacio dejado por la partida de un electrón es un «hueco». Estos pares de portadores de cargas se recombinan después de una cierta duración de vida, pero se crean otros pares, de modo que se mantiene allí un equilibrio estático.

IG. — ¿Y si el germanio no es «puro»? ¿Si introducimos allí impurezas del tipo N, por ejemplo?

CUR. — Entonces habrá aún más electrones libres que huecos. Y estos huecos constituirán *portadores de cargas mayoritarios.*

IG. — Vislumbro que en un semiconductor del tipo P las lagunas son más numerosas y, a consecuencia de esto, deben ser consideradas como portadores mayoritarios... Decididamente, Einstein tenía razón. Todo es relativo y todo es sólo cuestión de proporciones.



## El mecanismo del P-N-P.

CUR. — Ahora que he satisfecho su curiosidad, ¿podría usted, a su vez, responder a la pregunta que le hice al final de nuestra última charla: como funciona el transistor P-N-P?

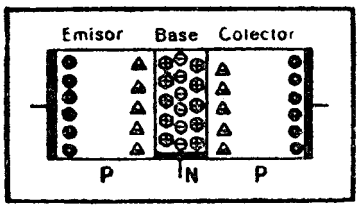
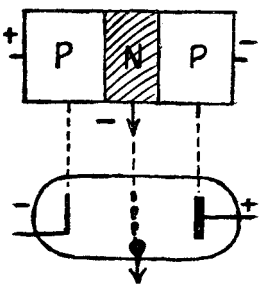



**Fig. 28. — Distribución de los portadores de cargas (electrones y huecos) y de los átomos ionizados en un transistor P-N-P antes de la aplicación de las tensiones de alimentación. Se ven las barreras de potencial formadas por iones de signos opuestos.**




IG. — He reflexionado en ello y creo que puedo contestar. En tal transistor, contrariamente a lo que se hace para el N-P-N, el colector deberá ser hecho negativo con respecto al emisor. Le confieso que esto me resulta muy desagradable.

CUR. — ¿Por qué?

IG. — Porque siempre tengo tendencia a comparar el transistor con un triodo. Y la idea de un ánodo hecho negativo con respecto al cátodo —porque tales son los papeles respectivos del colector y del emisor— me desconcierta un poco. En cambio, saber que la base debe ser también negativa con respecto al emisor alegra mi corazón, porque pienso, naturalmente en la rejilla.

CUR. — Desconfíe usted, Ignotus, de estas comparaciones, ya se lo he dicho.

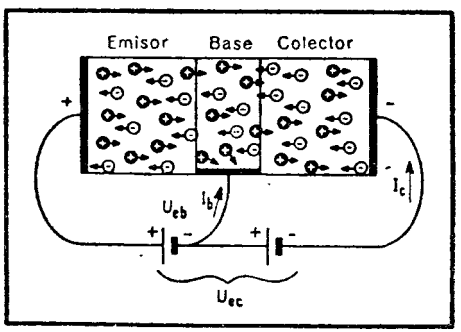
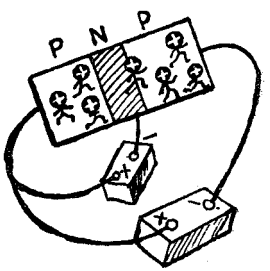



**Fig. 29. — Movimiento de los portadores de cargas en un transistor P-N-P en funcionamiento. Para mayor claridad no se han representado los iones en este dibujo.**

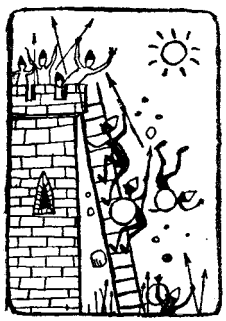



CUR. — Como quiera que sea, con tensiones así repartidas la unión emisor-base está alimentada en el «buen sentido». Es decir, que, rechazados por el polo positivo de la fuente de alimentación, los «huecos» del emisor se precipitarán impetuosamente a través de la unión P-N, hacia la base. Y, a causa del pequeño espesor de ésta, la mayoría continuarán su camino y penetrarán en el colector sin responder a la llamada del polo negativo de la batería $U_{eb}$ unida a la base.

CUR. — Todo ello es exacto. Sin embargo, ¿qué ocurre con los raros «huecos» que, como usted dice, responden a la llamada del polo negativo de la batería $U_{eb}$?

IG. — Esos son neutralizados, recombinándose con los electrones que emanan de ese polo. Y dan así lugar a una débil corriente $I_b$ que circula desde la base al emisor (en el sentido electrónico, desde luego).

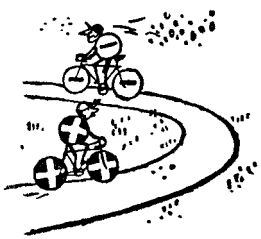
CUR. — ¿Y cuál es la suerte de la mayoría de las lagunas que hayan alcanzado el colector?



IG. — En esto se produce el mismo fenómeno: son neutralizadas por los electrones que emanan del polo negativo de la batería $U_{ec}$, que les llama imperiosamente. Y, cada vez que un electrón haya penetrado así en el colector desde la batería para combinarse con un «hueco», otro electrón abandonará una de los átomos del emisor para ser aspirado por el polo positivo de esta batería; claro está que, abandonando su átomo, el electrón en cuestión origina un nuevo «hueco». Y de esta manera, la corriente es mantenida por la doble circulación de los «huecos» (o lagunas) del emisor hacia el colector, y de los electrones en sentido inverso. ¿Es cierto?

CUR. — Estoy encantado de comprobar que usted ha captado perfectamente el mecanismo del transistor. En efecto, todo ocurre como cuando un ejército emprende el asalto de una fortaleza. Los combatientes alcanzan el glacis y lo franquean en un irresistible impulso, forzando la fila de los defensores que intentan contenerles.

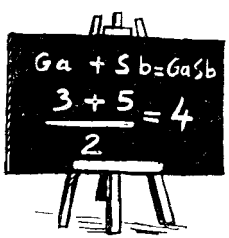
IG. — Su analogía, en que el glacis representa la base y la fortaleza el colector, sería más convincente si la guarnición situada intentase un contraataque simbolizando el movimiento de los electrones que van al encuentro de los «huecos» asaltantes, cuya carga... es positiva e irresistible. Y, a propósito, ¿están animados los electrones y las lagunas de la misma velocidad?



## Algunas combinaciones futuristas.

CUR. — No, Ignotus. En el germanio puro, bajo la acción de un campo eléctrico de un voltio por centímetro, los electrones recorren 40 metros por segundo, mientras que las lagunas se desplazan dos veces más lentamente. En el sicilio, la velocidad de los electrones en las mismas condiciones es de doce metros por segundo, y la de los huecos solamente de dos metros y medio por segundo. En cambio, en ciertas combinaciones *intermetálicas* los electrones alcanzan velocidades de más de medio kilómetro por segundo.

IG. — ¿Qué son esas combinaciones intermetálicas que usted me presenta de repente?




CUR. — Son semiconductores obtenidos por una combinación de elementos trivalentes y pentavalentes...

IG. — ... lo que hace, como promedio, entre tres y cinco, elementos de valencia cuatro, es decir tan tetravalentes como el germanio y el silicio, ¿puede usted citarme alguno?

CUR. — Sí; por ejemplo, la combinación del galio trivalente y del antimonio pentavalente, que permite realizar transistores. O bien el indio trivalente, combinado con fósforo pentavalente, forma un semiconductor utilizado en ciertos diodos. Incluso se ha logrado aprovechar una combinación de cadmio (valencia dos) y de selenio (valencia seis) para hacer células fotoeléctricas. El campo de los semiconductores interme-

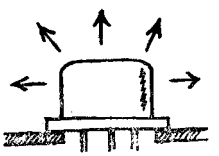
tálicos es objeto de activas investigaciones y promete interesantes perspectivas.

IG. — Habla usted como un libro, querido amigo, pero volvamos al presente y a nuestros corderos... de tres patas. Quisiera saber lo que diferencia a un emisor de un colector. En un transistor P-N-P, ambos son del tipo P (como en un N-P-N, ambos son del tipo N). Pues siendo así, ¿no son intercambiables?

CUR. — No, querido amigo. Y usted lo comprenderá fácilmente. Si la corriente que va del emisor hasta la base y después desde ésta al colector es sensiblemente la misma, las tensiones son bastantes diferentes. Débil entre base y emisor, la tensión es mucho más elevada entre colector y base.

IG. — ¡Ya caigo! Como el producto de una corriente por una tensión es una potencia, la disipada en el lado del colector es varias veces mayor que la que se encuentra entre emisor y base.

CUR. — Tiene usted mil veces razón. He aquí porque el colector debe poder evacuar más fácilmente el calor que se desarrolla en él. Su superficie es mayor que la del emisor. Y en los transistores de potencia el colector está soldado a la caja metálica, lo que permite irradiar el calor y transmitirlo al chasis por conducción.



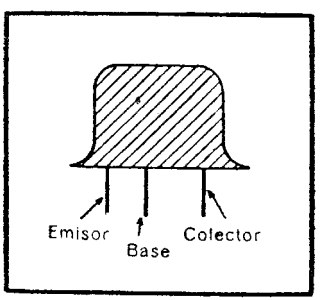
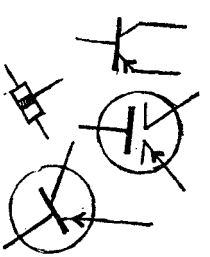



**Fig. 30. — Disposición de las «tres patas» de un transistor que permite distinguir fácilmente el emisor, la base y (más separado) el colector.**

IG. — Comprendo ahora cómo se diferencian los «electrodos» del transistor. ¿Pero cómo se les reconoce? ¿Cómo se sabe que tal conexión del transistor va a su emisor y que tal otra coresponde a su base o a su colector?

## Patas y puntas.

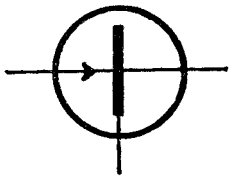


CUR. — La referencia es muy fácil. Los tres hilos (porque el minúsculo transistor no tiene casquillo) están dispuestos en línea. Dos hilos están más cerca uno de otro, son el emisor y la base. El tercero, más alejado, es el del colector. (Este se puede marcar también con un punto de color).

IG. — En efecto, esto es a la vez sencillo y lógico, así como ese símbolo del transistor que en su dibujo es la barrita dividida en tres zonas.

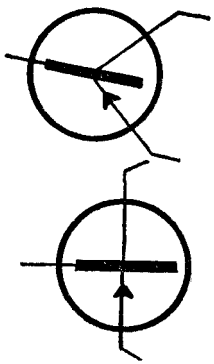
CUR. — No, Ignotus; este símbolo, efectivamente, es lógico y corresponde a la veradera estructura del transistor, pero no es el que se emplea habitualmente en los esquemas.

IG. — ¿Y cuál es entonces el signo gráfico «oficial» que representa al transistor?



CUR. — No hay símbolo adoptado universalmente, los signos varían de un país a otro e incluso de un autor a otro. Pero la mayoría tienen esta forma: un trazo con otros dos que le tocan en el centro. El trazo en cuestión es la base. El que le toca en el centro y que está provisto de una flecha es el emisor. El otro es el colector. Y —retenga bien esto— cuando la flecha está orientada *hacia* la base, el tipo es P-N-P. Si *parte* de la base es un N-P-N.

IG. — Entonces, ¿por qué se ha adoptado un signo que está tan poco de acuerdo con la verdadera arquitectura del transistor, en que el emisor y el colector están a uno y otro lado de la base?



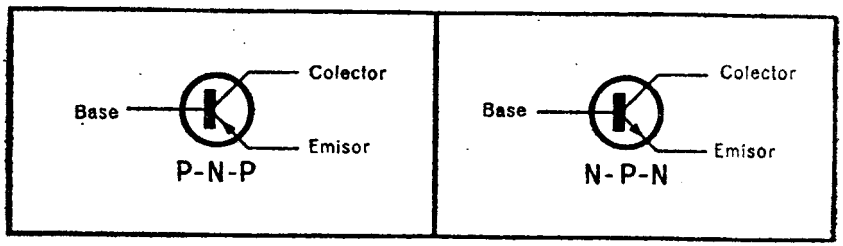
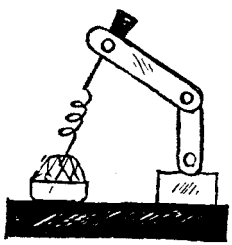



**Fig. 31. — Símbolo frecuentemente utilizado para los transistores de los tipos P-N-P y N-P-N.**



CUR. — Esto es el vestigio de la época prehistórica que remonta a 1948. Los primeros transistores que hicieron su entrada en el mundo eran del tipo de «puntas». Estaban formados por un cristal de germanio del tipo N, desempeñando el papel de base, sobre el cual se apoyaban puntas metálicas, muy cerca una de otra.

IG. — Pero, Curiosus, ¿no era esto volver al viejo detector de galena?

CUR.— Casi. Pero en lugar de un sólo buscador, tenía dos. Y se alimentaba este transistor como un modelo N-P-N actual. El defecto del transistor de puntas es su falta de estabilidad, lo mismo que su ante-

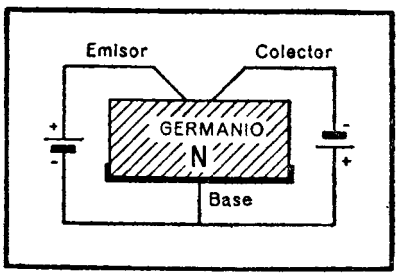
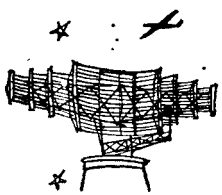



**Fig. 32. — Composición del transistor de puntas.**



pasado, el detector de galena. Por añadidura, no permite poner en acción potencias que sean algo importantes. He aquí por qué apenas se utiliza (mientras que el diodo de punta sigue siendo utilizado, en particular en el campo de las frecuencias muy elevadas, como las puestas en juego en el radar, porque la capacidad muy pequeña que presenta es muy apreciada allí).

IG. — En resumen, ¿el símbolo actual es un vestigio de una época periclitada?

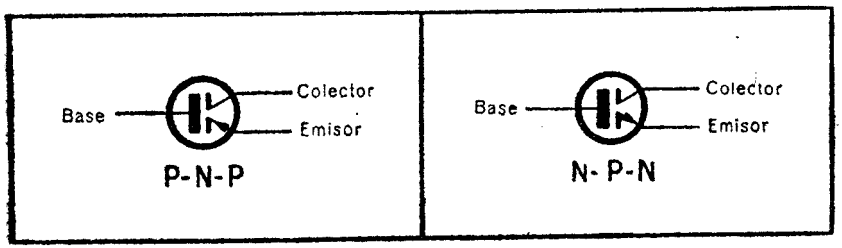



**Fig. 33. — Símbolos que pueden designar más especialmente los transistores de unión.**

CUR. — Exactamente. Sin embargo observe que, con el fin de distinguir el transistor de puntas del modelo actual de unión, numerosos autores utilizan para este último un símbolo especial.

IG. — Antes de proseguir, Curiosus, le ruego que resuma brevemente para mí, de preferencia por escrito, lo que me ha enseñado usted hasta ahora y que necesitaré para comprender la continuación de sus explicaciones. Esto me permitirá asimilarlo mejor antes de nuestra próxima reunión.

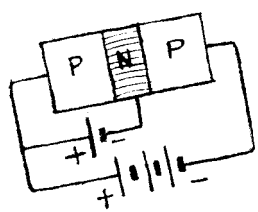
CUR. — Con mucho gusto voy a redactar para usted este resumen y se lo enviaré por correo. Entre tanto, buenas noches, Ignotus.

## *CARTA DE CURIOSUS A IGNOTUS*

*He aquí, mi querido amigo, las cosas que usted debe grabar en su memoria:*

* *Un transistor se compone de tres zonas llamadas emisor, base y colector. Contienen impurezas que confieren al emisor y al colector propiedades eléctricas (positivas P o negativas N) opuestas a las de la base.*

* *Existen, pues, dos categorías de transistores: P-N-P y N-P-N. La primera es la más difundida, al menos en el caso del germanio. (Por razones tecnológicas, la mayor parte de los transistores de silicio son del tipo N-P-N.)*

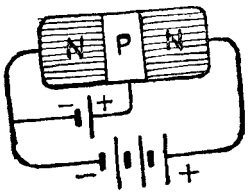



* *En el modelo N-P-N, la base debe ser negativa con respecto al emisor, y el colector debe ser aún más negativo que la base.*

* *En el modelo N-P-N, la base es más positiva que el emisor y el colector aún más positivo que la base.*

* *Se observa que, en los dos casos, las tensiones aplicadas alimentan la unión emisor-base en el sentido de la conducción.*

* *La corriente de base es muy débil (microamperios). La del colector es mucho más intensa (miliamperios).*




* *Una pequeña variación de la corriente de base determina una variación grande de la corriente de colector. La relación entre esta última y la primera se denomina amplificación de corriente.*

* *La entrada del transistor (base-emisor) presenta una resistencia relativamente pequeña. Además, las señales aplicadas a la entrada deben disipar una cierta potencia.*

* *La salida del transistor (colector-emisor) presenta una resistencia elevada.*

* *Una variación de tensión aplicada entre base y emisor determina una variación de la corriente de base; ésta provoca una variación mayor de la corriente de colector. Y si una resistencia de carga está intercalada en el circuito del colector, se pueden recoger en ella variaciones de tensión amplificadas.*

* *He aquí en pocas palabras mi querido Ignotus, las conclusiones a las cuales hemos llegado.*

* *Su buen amigo*

CURIOSUS

QUINTA CHARLA

**Desde luego, Ignotus no podrá fabricar por sí mismo transistores. Esto no impide que tenga el máximo interés en conocer los procedimientos, bastantes particulares, que permiten realizar nuestros "animales de tres patas". De paso comprobará que existen varias variedades de ellos concebidas para asumir mejor las diversas tareas que se les puede asignar. Así es cómo los problemas de frecuencias y de potencias siempre más elevadas han conducido a los técnicos a adoptar ciertas soluciones particulares.**

**SUMARIO: Purificación por fusión de zonas. — Calentamiento electrónico. — Estiraje de un monocristal. — Su corte. — Método de las uniones «estiradas». — Transistores de aleación. — El problema de los transistores de potencia. — Procedimiento de difusión. — Tiempos de transferencia. — Misión de la capacidad emisor-colector. — Transistor-tetrodo. — Transistores de capa de barrera. — Método de doble difusión. — Transistor «drift», — tipo P-N-I-P. — Transistor mesa. — Dispositivos de efecto de campo.**

# UN POCO DE TECNOLOGIA

## Purificación inicial.

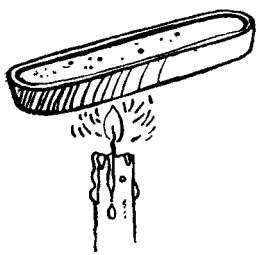
IGNOTUS. — Usted sabe, Curiosus, que yo nunca he intentado fabricar válvulas electrónicas. La necesidad de producir en la ampolla un alto grado de vacío ha sido siempre para mí un obstáculo invencible, porque mi bomba de bicicleta no parece que sea el utensilio adecuado... En cambio, pienso poder fabricar sin dificultad algunos transistores para mi propio uso. ¿Cree usted que encontraré en la farmacia los ingredientes de los que tendré necesidad: germanio puro, antimonio para la zona N e indio para la P?

CURIOSUS. — Mi pobre amigo, ¿habla usted en serio?

IG. — Claro que sí. ¿Es esto tan difícil?

CUR. — ¡Y tanto!... Ante todo, es necesario purificar suficientemente el germanio, porque el que se vende en el comercio con el calificativo de «puro», no lo es suficientemente para nosotros. Luego, es necesario conferirle la estructura cristalina regular transformándole en un cristal único o *monocristal*. Después, es necesario introducir las impurezas de los tipos P y N creando las dos uniones que separan las tres zonas del transistor. Por último, es necesario establecer conexiones con estas tres zonas, montar el conjunto rígidamente y protegerlo encerrándole en una envoltura hermética. Sólo las grandes fábricas perfectamente equipadas consiguen realizar correctamente estas diversas operaciones.

IG. — Me desanima usted. ¿Verdaderamente es tan difícil purificar el germanio?

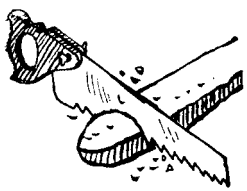


CUR. — No olvide que tenemos necesidad de un germanio realmente puro en que, para mil millones de átomos, no debe haber más que diez átomos de impurezas y hasta menos en ciertos casos.

IG. — Supongo que se emplean procedimientos químicos para desembarazar así al germanio de los cuerpos extraños que lo contaminen.

CUR. — La química hace lo que puede. Pero esto es insuficiente. Además se recurre ulteriormente a un procedimiento físico llamado *fusión de zonas* en que interviene la electrónica. Se pone germanio a purificar en un largo crisol muy limpio, de cuarzo o de grafito, y, en una atmósfera de hidrógeno o de nitrógeno (para evitar toda oxidación), se calienta una zona estrecha de germanio haciéndola fundir y esta zona de fusión es lentamente desplazada desde un extremo hasta el otro del crisol.

IG. — Supongo que de esta manera las impurezas se queman.



CUR. — Se equivoca usted. El procedimiento se funda en el hecho de que las impurezas tienden a quedar en la zona licuada, dejando así las partes del germanio que, al enfriarse, comienzan a solidificarse. Así se las hace pasar poco a poco desde un extremo al otro de la masa del germanio, y después de haber comenzado de nuevo la operación varias veces, se corta el extremo del germanio hacia el que han sido desplazadas las impurezas.

IG. — ¿Y se las arroja, se las desecha?

CUR. — No. Porque el germanio cuesta muy caro. Se las vuelve a utilizar en otro horno para purificarlas.

IG. — Bien, esto me hace pensar que ayer nosotros hemos hecho sufrir a Gora la fusión de zonas...

CUR. — ¿Quién es Gora y cuàl es la tontería que va usted a contarme?

IG. — Gora es nuestra gata (la llamamos así porque es mitad angora). Generalmente muy limpia, ha debido tener algunas malas relaciones, que le han costado atrapar pulgas. Al pasarle varias veces un peine desde la cabeza hasta la cola, la hemos desembarazado de sus impurezas...¿Pero cómo está constituido el peine para el germanio? Quiero decir ¿de qué manera se consigue no fundir más que una zona estrecha?

## Calentamiento electrónico.

CUR. — Utilizando el calentamiento por inducción a alta frecuencia. Una bobina de algunas espiras rodea la zona de fusión. Está recorrida por una corriente intensa de alta frecuencia que induce en la masa del germanio corrientes que producen un calentamiento suficiente para fundirla.

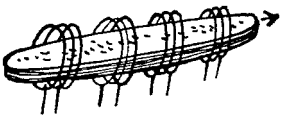
IG. — Pero esto es exactamente lo que le han hecho al tío Julio.

CUR. — ¿Qué tiene que hacer aquí su tío? ¿Es que tuvo pulgas también?

IG. — Lo que tuvo fue un derrame de sinovia a consecuencia de una desventurada caída. También le han aplicado diatermia de alta frecuencia.

CUR. — Sí, ya veo. Se coloca su rodilla entre dos electrodos bien aislados a los cuales se aplican tensiones de alta frecuencia. El campo eléctrico así creado desarrolla calor por pérdidas en el dieléctrico en el interior de órgano enfermo. Pero en el calentamiento por inducción utilizado para la fusión de zona, el campo magnético engendrado por

las corrientes que induce otras corrientes en la masa del semiconductor. Lo más notable en la acción del calentamiento R.F., ya se trate de campos eléctricos (utilizados para los aislantes) o de campos magnéticos (que sirven para calentar los conductores), es que el calor se desarrolla *en toda la masa* del cuerpo y no penetrando en ella por con-



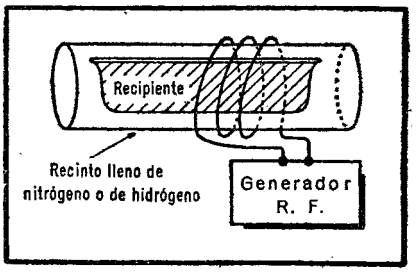



**Fig. 34. — Se realiza la fusión de zona calentando el germanio contenido en el crisol por medio de corriente R.F. que recorre la bobina la cual se desplaza lentamente desde un extremo del crisol al otro.**

ducción térmica, desde la superficie hacia el interior, como es lo indicado para hacer un buen asado...

IG. — En resumidas cuentas, para volver a nuestro germanio, la bobina pasa lentamente de un extremo del crisol al otro...

CUR. — ... a menos que no sea el crisol el que se desplace lentamente a lo largo del eje de una bobina fija, lo que viene a ser lo mismo. En realidad, se disponen varias bobinas espaciadas, de modo que se obtenga con una sola pasada varias zonas de fusión alternando con zonas de solidificación. Es como si se hubiese hecho pasar varias veces una sola zona de fusión a lo largo del crisol. Además el movimiento es muy lento: un milímetro por minuto.

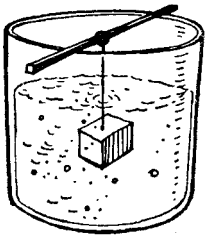
IG. — ¿Y qué se hace para el silicio?

CUR. — Pues lo mismo, pero a una temperatura más elevada porque, si el germanio funde a 940° C, el silicio requiere 1.420° C.

## Después de purificación, cristalización.

IG. — ¿Y por qué no se puede utilizar directamente el semiconductor así purificado para la fabricación de los transistores? ¿No está cristalizado?

CUR. — Lo está. Pero no como deseamos. Se trata de un conjunto de cristales dispuestos desordenadamente. Pero nos hace falta una red cristalina perfectamente regular y cuya orientación se conozca. La obtenemos formando alrededor de un pequeño cristal llamado «germen», una red cristalina única que se llama *monocristal.*



IG. — Yo me divertía así haciendo bellos cristales y poniendo en un vaso sal común disuelta en agua y luego introduciendo un hilo en el extremo del cual pegaba un minúsculo cristal de sal. En ocho días se formaba a su alrededor un bonito cubo transparente. ¿Es así cómo se procede para los semiconductores?

CUR. — El principio es el mismo. Pero, en lugar de una solución, se utiliza la materia en estado de fusión. Se sumerge en ella el germen fijado en el extremo inferior de una varilla. Esta gira alrededor de sus eje y, al mismo tiempo, asciende muy lentamente. Así se ordenan los

átomos de germanio (o de silicio) alrededor del germen, según la estructura de la red cristalina. La materia se solidifica en derredor del germen y en fin de cuentas en algunas horas se obtiene una barra de varios centímetros de diámetro y de 20 a 30 cm de longitud que pesa algunos kilogramos con la cual se haràn millares de transistores.

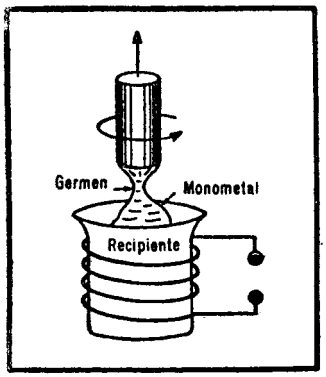
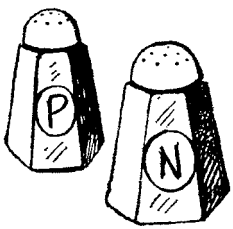



**Fig. 35. — Estiraje del monocristal. La masa del semiconductor contenida en el recipiente alcanza el punto de fusión por calentamiento R.F. de inducción.**




IG. — En resumen, este monocristal es un semiconductor de gran pureza.

CUR. — No, omití decirle que, en la masa en fusión que sirve para el estiraje del monocristal, se añaden impurezas del tipo P o N, según que la base deba ser de uno o de otro de estos tipos. Porque es la base la que, generalmente, en las fases ulteriores de la fabricación conserva el carácter del monocristal.

## Y ahora un poco de mecánica.

IG. — Me decía usted que de un sólo monocristal se obtienían millares de transistores. Debo suponer que se le fracciona en pequeños trozos.

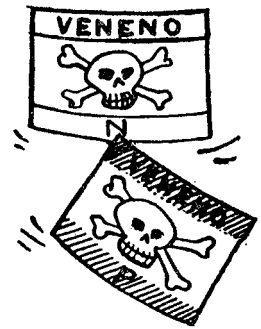
CUR. — Desde luego. Para comenzar, a la manera de un vulgar salchichón, es cortada en rodajas o laminillas delgadas que miden de 0,1 a 2 mm de espesor. Este trabajo de presión se hace con sierras circulares que tienen puntas de diamante. También se utilizan «sierra de cinta» constituidas por hilos de tungsteno provistos de un revestimiento abrasivo. Después, cada laminilla es cortada a su vez en pequeños cuadrados cada uno de los cuales tiene algunos milímetros de lado. Tales plaquitas miden 2 x 2 — mm y 0,5 mm de espesor y no pesan más que una centésima de gramo. Con esto le digo que, teóricamente, un monocristal de 5 Kg permite hacer medio millón de ellas. En realidad, hay pédidas en la fabricación, y el desperdicio reduce la cantidad de piezas finalmente obtenidas.

## Método de venenos alternados.

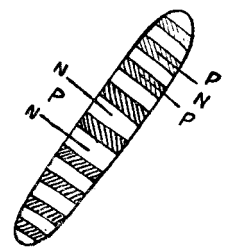
IG. — Al fin y al cabo no está tan mal aunque se pierda la mitad... ¿Pero cómo, a base de esto, se llega a construir transistores completos?

CUR. — «Envenenando» sus dos caras con impurezas del tipo contrario al de la plaquita. Por ejemplo, si ésta es del tipo N, se introducen impurezas del tipo P en los dos lados, de manera que se forme un emisor y un colector de un transistor P-N-P.

IG. — Tengo una idea, Curiosus. ¿Por qué no fabricar transistores «todo cocido» en el curso del tiraje del monocristal? Por ejemplo, al principio del estiraje, se podría echar en la masa fundida del semiconductor impurezas del tipo P, que fuesen de indio. Después, estando así formada una zona P y emergida de la masa, se echaría en ella impurezas N, por ejemplo de arsénico. Y se obtendría una zona N. Encima se añadiría bastante indio para que los aceptores se convirtiesen en portadores mayoritarios, lo que nos daría una nueva zona P y así sucesivamente. En resumen, obtendríamos una barrita de germanio en que las zonas P y N alternarían. Bastaría cortar esta barrita en rodajas, por el centro de las zonas C, para tener transistores P-N-P, o por el centro de las zonas N si se desea tener N-P-N. Reconozca, Curiosus, que a veces tengo ideas geniales.




CUR. — Lo que yo admiro principalmente en usted es la modestia... Desafortunadamente, amigo, su idea no tiene nada de inédito. Esta fabricación se llama de las *uniones estiradas*. El método no es económico, por que así se obtienen zonas bastantes gruesas. Además, a fuerza



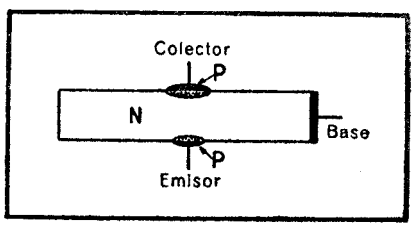
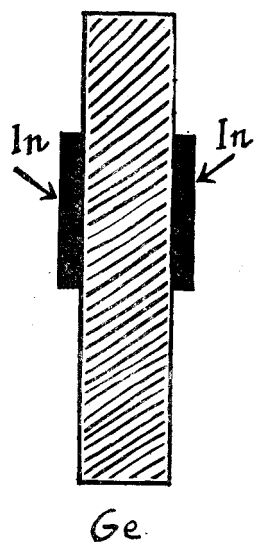




**Fig. 36. — Vista en corte de un transistor P-N-P formado por aleación (o fusión).**

de añadir cada vez impurezas, tanto de una especie como de otra, se llega a aumentar desmesuradamente la dosis en las zonas así formadas sucesivamente, lo que no deja de tener inconvenientes. Sin embargo, el método de las uniones estiradas se emplea aún en nuestros días, sobre todo para el silicio.

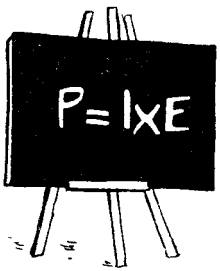
IG. — Una vez más, compruebo que he nacido demasiado tarde... Volvamos a nuestras pequeñas pastillas y explíqueme cómo se forma en ellas el emisor y el colector.




## Transistores de aleación.

CUR. — Se emplean diversos procedimientos para este fin, según el modelo de transistor que se desee obtener. Se trata sobre todo de «dopar» o «contaminar» el material de la base con impurezas del otro tipo. El procedimiento más sencillo y el empleado más a menudo consiste en depositar en las dos caras de una base del tipo N pastillas de indio y calentarlas rápidamente a unos 600° C. El indio funde a esta temperatura y sus átomos se introducen en el germanio que, no fundiendo a 940° C, gracias a la agitación térmica incrementada, no es penetrable a los átomos de impurezas. Así se obtiene un transistor P-N-P. Observará usted que la pastilla que forma el colector es más grande que la

del emisor, puesto que, ya hemos hablado de ello, es en el colector donde se disipa la mayor potencia. Cuando la operación es conducida dosificando convenientemente la temperatura y el tiempo de calentamiento se llega a hacer penetrar las impurezas de manera que se reduzca el espesor restante de la base a un veinteavo de milímetro. Los transistores así obtenidos *por aleación* (o *por fusión*) convienen para la mayoría de las aplicaciones, salvo para frecuencias elevadas.




IG. — Una vez más me habla usted de estas dos dificultades que constituyen en el campo de los semiconductores los valores elevados de potencia y de frecuencia. Me gustaría tener algunas aclaraciones a este respecto.

## Un procedimiento vaporoso y difuso.

CUR. — Comencemos por la cuestión de potencia. Quien dice vatios, dice calorías. Para proporcionar potencias suficientes con estas débiles tensiones que se emplean en los semiconductores, es necesario disponer de corrientes de intensidades elevadas.

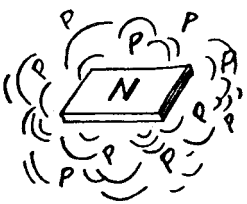
IG. — Evidentemente; puesto que *potencia* = *tensión* × *intensidad.*

CUR. — ¡Bravo! Pero estas corrientes pasan por uniones bastantes resistentes y disipan en ellas calor y usted sabe lo mal que los semiconductores soportan una elevación de temperatura.

IG. — ¿Qué remedio preconiza usted entonces?

CUR. — Lo primero de todo aumentar la sección del semiconductor, y por lo tanto tener transistores de superficie relativamente grande para reducir su resistencia. Luego, facilitar la evacuación del calor montando el colector sobre una gran placa metálica que sirve de radiador de calor. El cobre, que es un excelente conductor térmico, está muy indicado para este uso.

IG. — De forma que el empleo racional de los transistores necesita la aplicación de las reglas de la termodinámica. Me parece que aún tendré que ponerme a estudiar esta ciencia, ¡pobre de mí!




CUR. — Tranquilícese, Ignotus, en el cálculo de la propagación del calor se pueden aplicar las reglas que rigen las corrientes en los circuitos eléctricos, y se obtienen resultados completamente satisfactorios... Pero volviendo a los transistores de potencia, le señalo que suelen ser realizados por un procedimiento de *difusión.* Se calientan las pastillas de semiconductores hasta una temperatura próxima a la de su punto de fusión colocándolas en una atmósfera de gas que contenga vapores de impurezas destinadas a formar el emisor y el colector. Los átomos de las impurezas penetran progresivamente en el semiconductor. La operación dura varias horas. Es decir que, dosificando el contenido de impurezas del gas y regulando la duración de la difusión, se logra determinar con precisión la profundidad de la penetración de los átomos extraños, y por lo tanto el espesor de la base. Además, este procedimiento se presta muy bien a la obtención de grandes superficies de emisor y de colector para los transistores de potencia.

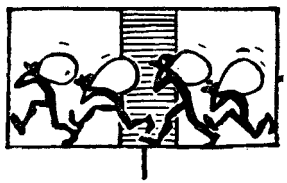
IG. — Tanto mejor. ¿Pero entonces, qué es lo que se opone al funcionamiento de los transistores en frecuencias elevadas?

**Los dos obstáculos.**

CUR. — Dos factores: el tiempo de transferencia y la capacidad.

IG. — ¿De qué transferencia se trata?

CUR. — Del paso de los portadores de cargas, a través de la base, desde el emisor hasta el colector. Este tiempo no es despreciable, puesto que, ya lo dijimos, electrones y lagunas están animados de velocidades bastante limitadas. Tomemos el caso de los electrones recorriendo 40 metros por segundo. Admitamos que se llegue a reducir el espesor de la base a 1/10 milímetros. Para atravesarlo, un electrón requerirá 2,5 microsegundos.



IG. — Esto no es gran cosa.

CUR. — No impide que para una señal de un megahertzio (no olvide que 1 MHz = 1.000.000 Hz) sea demasiado, porque cada período no dura más que un sólo microsegundo y que, mientras nuestro torpe electrón camina cachazudamente a través de la base, habrá tenido más de dos

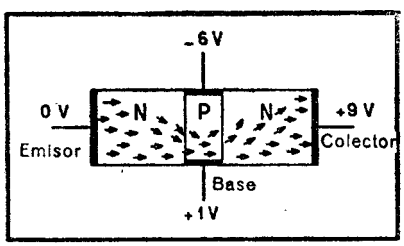
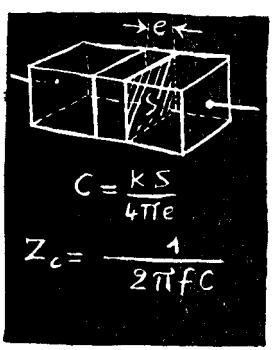



**Fig. 37. — Principio del transistor-tetrodo. La armadura situada enfrente de la conexión de la base está a un potencial de — 6 V y repele los electrones, reduciendo la sección efectiva de la base.**




veces que cambiar de marcha. He aquí, pues, un transistor incapaz de amplificar la corriente de frecuencias que excedan de algunos centenares de kilohertzios.

IG. — ¡Qué trágica situación! No veo más que una salida. Reducir el espesor de la base. ¿Es esto posible?

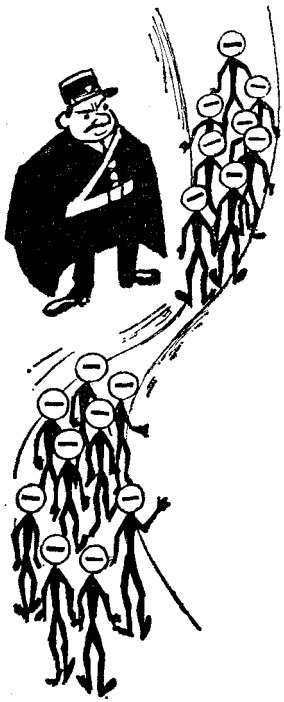
CUR. — Sí, y le indicaré los medios. Pero entonces acentuaremos el otro factor peligroso: la capacidad entre el emisor y el colector. Porque usted los aproxima haciendo la base más delgada.

IG. — ¿Y en qué nos molesta esta capacidad?

CUR. — No se acuerda usted ya de todas las fechorías que cometen las capacidades parásitas en los montajes con válvulas (aquí presentan los mismos inconvenientes). La capacidad (o reactancias capacitivas) que oponen al paso de las corrientes, es tanto menor cuanto más elevada es la frecuencia de las corrientes. De modo que las corrientes de alta frecuencia se fugan por las capacidades parásitas en lugar de seguir los caminos que le están asignados.

IG. — En efecto, estas capacidades son como la malla de un cedazo. Este es capaz de retener nueces gruesas. Pero si se pone en él cosas pequeñas, pasarán a su través... ¿Qué hacer entonces para sortear el terrible dilema? De una parte se reduce el espesor de la base para disminuir el tiempo de transferencia, lo que aumenta la capacidad emisor-base. Y, de otra parte, es necesario que esta capacidad sea todo lo pequeña posible.

## Un tetrodo que no lo es.



CUR. — Le dejo el cuidado de encontrar por sí mismo la solución. Veamos, Ignotus, ¿de qué depende la capacidad además de la distancia entre las armaduras de un condensador?

IG. — ¡Ya caigo! Es necesario reducir la superficie de estas armaduras. Luego, para que nuestros transistores funcionen a frecuencias elevadas, es necesario que las superficies del emisor y del colector sean muy pequeñas.

CUR. — Está bien esto. Observe de paso que hay un medio indirecto de reducir la capacidad eficaz sin disminuir por ello excesivamente la superficie de las uniones (lo que limitaría demasiado la potencia disipada). Esto es lo que se realiza en el *transistor-tetrodo*. Me apresuro a decir que su funcionamiento no ofrece ninguna analogía con el del

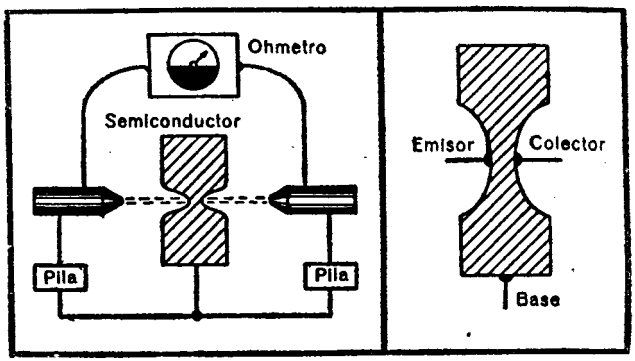
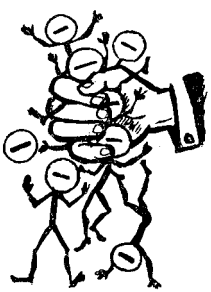



**Fig. 38. — Procedimiento de fabricación del transistor con barrera superficial y vista en corte del transistor.**

tetrodo de vacío... Aquí, el cuarto electrodo está situado sobre la base en el lado opuesto a la conexión de base normal, y su potencial es de signo contrario al de la conexión de base. En estas condiciones, sólo la porción de la base próxima a su conexión normal está a un potencial capaz de favorecer la circulación de los portadores de cargas. Así, la sección efectiva del transistor resulta considerablemente reducida.

## Adelgazamiento de la base.



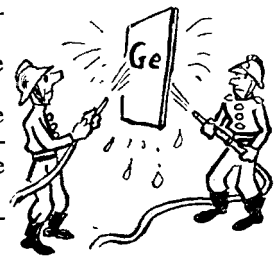
IG. — No está mal del todo esta manera de estrangular el flujo de los electrones o de los huecos. ¿Pero de qué manera se llega a reducir el espesor de la base en los transistores «clásicos»?

CUR. — Se hace excavando una especie de cráter en cada cara de la base. Los vértices de los cráteres están entonces separados una distancia del orden de 0,002 mm. Luego se deposita en los dos cráteres un poco de indio.

IG. — A su entender, esto es muy sencillo, pero yo pongo en duda la precisión de las herramientas que deben ser empleadas.

CUR. — Estas herramientas, Ignotus, son chorros de líquido muy finos que conducen corriente continua a través del germanio. Y es el

fenómeno de la electrólisis la que, átomo a átomo, extrae la materia del semiconductor. Al final de la operación, el sentido de la corriente es invertido y el electrólito deposita sus átomos de indio en los cráteres que acaban de ser ahuecados.




IG. — ¡Formidable! ¿Pero cómo se sabe el momento preciso en que la base es suficientemente delgada?

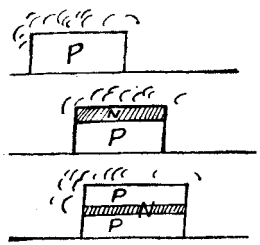
CUR. — Midiendo la resistencia eléctrica entre los dos chorros de líquido. Los transistores así fabricados pueden ser utilizados a frecuencias que alcanzan 100 MHz (lo que corresponde a una longitud de onda de 3 m). Se les llama transistores de *capa de barrera.*

IG. — En todo caso, no forman barrera para las frecuencias elevadas.

CUR. — Otro medio de reducir el espesor de la base es el método de *doble difusión.* Para hacer un transistor del tipo P-N-P, se toma una plaquita de semiconductor del tipo P...

IG. — Se equivoca usted, Curiosus.

CUR. — No del todo. Va usted a ver cómo ocurren las cosas. No se somete a las acciones de los vapores más que una sola cara de la plaquita. Y los vapores contienen impurezas de los dos tipos a la vez, pero con donadores que tengan una velocidad de penetración ligeramente superior a la de los aceptores, siendo estos últimos en cambio más numerosos. De ello resultará la formación de una delgada capa N antes de una capa P. Obtenemos, pues, un transistor P-N-P, cuya base no tiene más que una milésima de milímetro de espesor, lo que permite utilizarlo a frecuencias que llegan a 400 MHz, o sea, $\lambda = 75$ cm.




IG. — Esto es verdaderamente ingenioso.

CUR. — Y no lo es menos el transistor «drift», del tipo N-P-N que, en la capa de la base más próxima al emisor tiene mayor proporción de impurezas (aceptores, en este caso), de forma que se aumente la conducción. De este modo, los electrones que penetran en la base son considerablemente acelerados, lo que permite alejar hasta 1000 MHz ($\lambda = 30$ cm) el límite de las frecuencias.

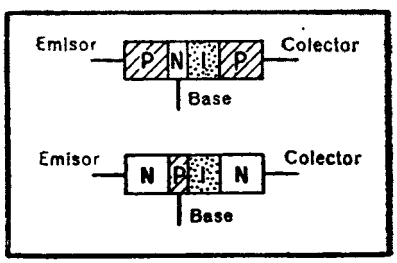



**Fig. 39. — Dos tipos posibles de transistores conteniendo una zona intrínseca entre base y colector: P-N-I-P y N-P-I-N.**

IG. — ¡Mejor que mejor! Pero en este orden de ideas, ¿no se podría alejar estos dos electrodos entre sí y, por lo tanto, aumentar el espesor de la base, para reducir la capacidad emisor-colector?

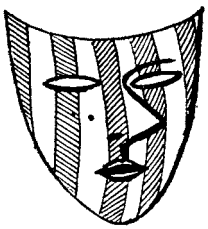
## Alejamiento de la base.

CUR. — ¿Y qué medio preconiza usted para ello?

IG. — Yo interpondría entre base y colector una capa de germanio neutro, ni P, ni N, pero que sirviese para asegurar la conducción y la separación a la vez.

CUR. — Pues no está esto mal del todo, amigo mío. Y además existe con el nombre de transistor P-N-I-P, en que la letra I designa la capa de germanio intrínseca.

IG. — ¡Vaya! Una vez más se me han adelantado.



## Lo que será cuestión de montañas.

CUR. — Lo siento, Ignotus... Y, para terminar, le señalo aún un modelo de transistor para altas frecuencias obtenido por doble difusión. Se toma semiconductor tipo P que servirá de colector y se difunde en él una delgada capa de impurezas N que va a constituir la base. Después, siempre en el mismo lado, se hacen penetrar por difusión impurezas del tipo P, que reducido aún el espesor de la base a unos 0,002 mm, formarán el emisor. El artificio consiste en efectuar esta última difusión a través de una mascarilla, de manera que no se actúe más que a lo largo de estrechas bandas en la superficie de la lámina. Ésta presenta entonces, alteranativamente, bandas del tipo P (emisor) y N base. Se deposita sobre esta superficie gotas de cera que cubran a la vez una parte P y una parte N. El diámetro de la gota no pasa de un cuarto de milímetro. Y se sumerge la lámina en una solución que ataca las partes de la superficie no protegidas por la cera. El grabado químico así efectuado deja intactas las pequeñas superficies protegidas reduciendo al mismo tiempo el espesor de las otras. Y la lámina se encuentra cubierta de minúsculos montículos, uno de los cuales una vez desembarazados de la cera, ofrece la posibilidad de establecer las conexiones de base y de emisor. Éstas se realizan con hilo de oro de 0,025 mm de diámetro.

IG. — ¿Cómo se pueden manejar hilos tan finos?

CUR. — Con un microscopio binocular. Pero previamente se corta la lámina grabada en tantos trozos como montículos haya, formando cada uno un transistor. Se les llama «mesa», nombre que se da en América del Sur a las planicies montañosas caracterizadas por sus paredes abruptas. Y estas mesas rebasan valientemente frecuencias de 600 MHz, es decir descienden por debajo de longitudes de onda de 50 cm. Los modelos más recientes (planar, epitaxial) alcanzan frecuencias todavía más elevadas.

IG. — ¡Qué de cuidados, qué de minucias exige la fabricación de estas microscópicas montañas!

## Las fases finales de la fabricación.

CUR. — Y no crea usted, Ignotus, que el trabajo se haya acabado cuando se han formado el emisor, la base y el colector, ya sea por aleacción, por elecrólisis o por difusión. Observe de paso que estos tres procedimientos recurren respectivamente a agentes sólidos, líquidos o gaseosos.

IG. — ¿Qué queda aún por hacer para que el transistor esté por fin en condiciones de afrontar las vicisitudes de la existencia?

CUR. — Tratar su superficie por un lavado con ácido y conferirle su notable longevidad montándole con toda la rigidez necesaria para resistir los choques y las vibraciones. Después, encerrarlo en una caja hermética y opaca con el fin de protegerlo de la luz y de la humedad, enemiga mortal de los semiconductores.

IG. — ¿Por qué de la luz?

CUR. — Porque, ya se lo dije, los rayos luminosos pueden modificar la conductividad de los semiconductores o provocar una emisión electrónica. Estos fenómenos se aprovechan en los fotodiodos y fototransistores, pero un transistor normal debe estar protegido de la luz. Por lo

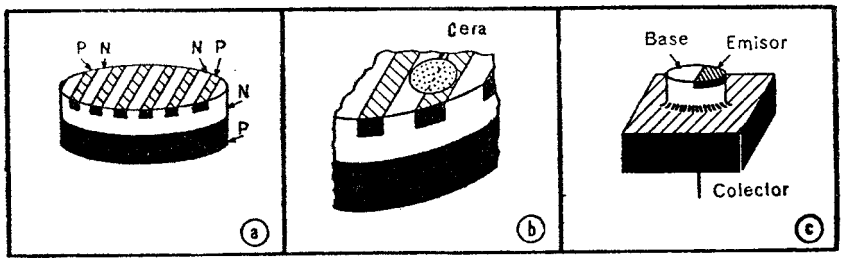
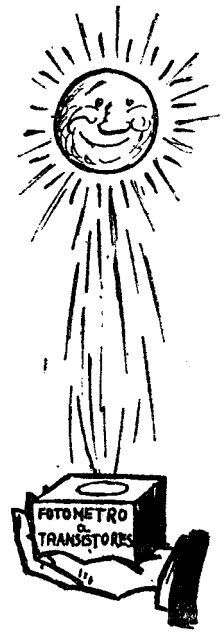



**Fig. 40. — Fases consecutivas de la fabricación de un transistor mesa.**




tanto se le encierra en una cápsula de materia plástica o en una caja metálica donde se practica el vacío o se introduce un gas neutro tal como el nitrógeno. El establecimiento de las conexiones plantea a menudo problemas árduos, porque hay que asegurar los contactos puramente óhmicos entre las tres zonas del transistor y los hilos correspondientes, evitando así a toda costa la formación de uniones parásitas.

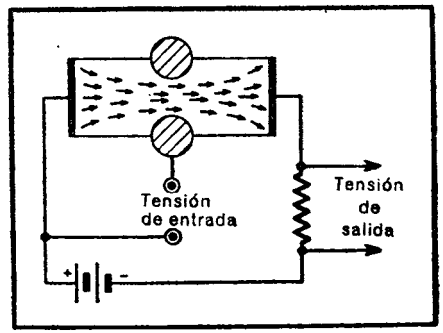



**Fig. 41. — Transistor de efecto de campo.**

IG. — En resumen, veo que para fabricar transistores, es necesario conocer a la vez la física, la química y la mecánica, esto es demasiado. Prefiero comprarlos. A menos que...

## Trabajos de campo.

CUR. — ¿Qué idea absurda me va a exponer?

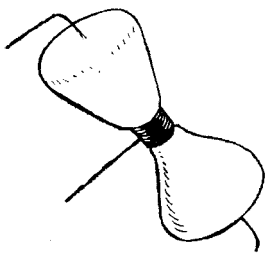
IG. — Creo que habría un medio de fabricar un transistor sin base, ni emisor ni colector. ¿Por qué no tomar una simple barrita de germanio o de silicio y rodearla, en el centro, de un anillo al cual se aplicarían las tensiones a amplificar? El campo eléctrico así creado estrangularía más o menos el flujo de los portadores de las cargas que circulan

desde un extremo al otro de la barrita. Y la corriente sería modulada en ella exactamente como lo es en un triodo de vacío bajo la acción del potencial de la rejilla.

CUR. — ¡Mi pobre Ignotus...!

IG. — ¿Qué es lo que no está bien en mi razonamiento?

CUR. — Todo va tan bien, que el dispositivo que acaba usted de inventar existe desde hace mucho tiempo. Se le llama transistor de *efecto de campo* o F.E.T. (del inglés *Field Effect Transistor*). Se le puede comparar igualmente al *tecnotrón* inventado por el ingeniero francés S. Teszner y que reúne todas las ventajas de los transistores y de las válvulas de vacío.

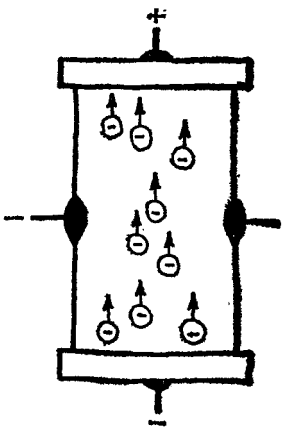


IG. — Efectivamente, nuestro F.E.T. se parece tanto a un triodo, que me dan ganas de llamar cátodo al extremo por donde entra la corriente, ánodo a aquél por donde ésta sale y rejilla al anillo central al que se aplican las tensiones a amplificar.

CUR. — Nada le impide emplear tales denominaciones, aunque los términos más corrientes son *surtidor* para el cátodo, *drenador* para el ánodo y *puerta* para la rejilla. Esta está formada por una capa o por dos zonas de semiconductor de polaridad contraria a la de la pastilla. Estas zonas se obtienen por aleación o difusión y se disponen en el centro a un lado y otro de la pastilla. Si ésta es del tipo N, la puerta está formada por zonas de tipo P. Las tensiones a amplificar se aplican entre puerta y surtidor, haciéndose más o menos negativa la puerta con relación al surtidor...

IG. — Lo mismo que la rejilla con respecto al cátodo. En este caso no circulará corriente alguna desde la puerta P hacia la masa N de la pastilla ya que forman un diodo en polarización inversa para estas tensiones. En estas condiciones, la impedancia de entrada de nuestro F.E.T. debe ser muy elevada, contrariamente a los transistores ordinarios.

CUR. — Exactamente, mi querido Ignotus. Ya ve usted hasta qué punto es profunda su analogía con el triodo de vacío, aunque según las



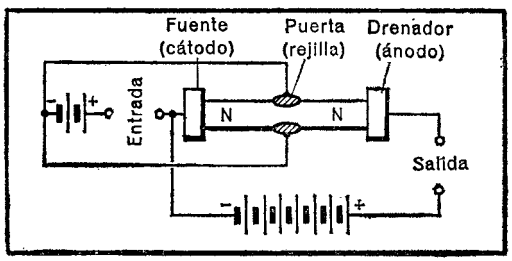



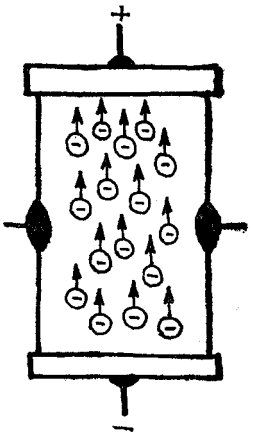

**Fig. 41 bis. Constitución de un transistor de efecto de campo con las fuentes de alimentación.**

polaridades aplicadas podrá circular corriente en un sentido o en otro. Y los campos eléctricos negativos creados por la puerta en la masa de la pastilla estrangulan más o menos el haz de electrones que van del surtidor hacia el drenador conectado al polo positivo de la fuente de alta tensión, la cual puede alcanzar los 60 voltios.

IG. — En resumen, aquí tenemos amplificación de tensión, pero no de corriente. Y supongo que se la puede expresar en valores de pendiente, midiendo en miliamperios la variación de la corriente fuente-drenador cuando la tensión correspondiente varía 1 voltio.

CUR. — Tiene usted razón. Y tengo que decirle que en ciertos F.E.T. la pendiente llega a 10 mA/V, e incluso más. Veo con satisfacción que el efecto de campo le es beneficioso y estimula sus facultades de raciocinio... Para completar, añadiré que existe una variedad particular de estos transistores, designada por la sigla M.O.S. (del inglés *Metal Oxide Silicon*). En ellos las zonas que forman la puerta están recubiertas de una delgada capa aislante (bióxido de silicio) sobre la cual está depositada una capa metálica. Las señales a amplificar son aplicadas a esta capa, que constituye una de las placas de un condensador del cual la otra placa está formada por las zonas de la puerta. En el M.O.S.-F.E.T. la impedancia de entrada es prácticamente infinita.

IG. — Éste no es el caso de mi resistencia a la fatiga. Detengámonos aquí para que mi pobre cerebro ponga en orden todos estos nuevos conceptos.



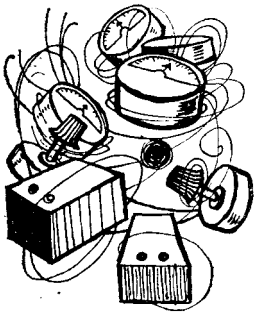
SEXTA CHARLA

**Para utilizar los triodos a cristal, es necesario conocer las características esenciales. Estas pueden ser expresadas, lo mismo que para las válvulas, por los valores numéricos de los parámetros fundamentales o por curvas que muestren cómo varían ciertas magnitudes en función de otra. Pero, en el caso de los transistores, la representación gráfica es particularmente valiosa, teniendo en cuenta la influencia que cada variable ejerce sobre la mayoría de las otras. He aquí por qué nuestros dos amigos realizarán una tarea muy útil examinando las diversas características numéricas y gráficas de los transistores.**

**SUMARIO: Montaje para determinar las características. — Curvas $I_b = f(E_b)$ e $I_c$ — $f(E_b)$. — Pendiente. — Amplificación de corriente. — Resistencia de entrada. — Relación entre la pendiente, la resistencia interna y la amplificación de corriente. — Saturación. — Familias de curvas. — Analogía con el pentodo. — Potencia límite. — Resistencia de salida. — Determinación de los parámetros mediante redes de curvas.**

# EL REINO DE LAS CURVAS

**Una iniciativa de Ignotus.**



CURIOSUS. — ¡Caramba! Qué es lo que veo? ¿Qué es esta inverosímil acumulación de instrumentos de medida, de pilas y de potenciómetros en su mesa?

IGNOTUS. — Evidentemente, usted no ve lo principal. Y con razón. Porque al lado de mis voltímetros y miliamperímetros, el transistor parece muy pequeño. Y a pesar de ello es el héroe de la fiesta.

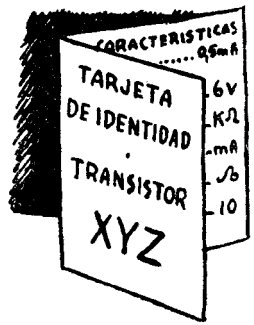
CUR. — ¿Pero qué finalidad tiene todo este despliegue de aparatos?

IG. — Usted recuerda cómo hace poco obteníamos juntos las curvas características de las válvulas electrónicas: las variaciones de la corriente anódica en función de la tensión de rejilla o de la tensión de placa. Pues bien, querría deducir las analogías para mi transistor.

CUR. — Loable tentativa. ¿Y lo consigue?

IG. — Sí y no... Esto no es una respuesta categórica. Pero lo que me perturba es que con las válvulas teníamos que tomar en consideración tres magnitudes, mientras que con el transistor hay que considerar cuatro:

| TUBO ELECTRÓNICO | TRANSISTOR |
|---|---|
| Intensidad de corriente anódica $I_a$. | Intensidad de corriente de colector $I_c$. |
| Tensión ánodo-cátodo $E_a$. | Tensión base-emisor $E_c$. |
| Tensión rejilla-cátodo $E_g$. | Tensión base-emisor $E_b$. |
| | Intensidad de corriente de la base $I_b$. |




CUR. — Así es. En efecto, salvo casos excepcionales, las válvulas o tubos funcionan sin corriente de rejilla. En cambio, la corriente de base desempeña un papel fundamental en el funcionamiento del transistor.

## Un montaje racional.

IG. — He aquí, pues, el esquema de montaje que he imaginado para obtener los valores de estas cuatro magnitudes.

CUR. — Sí, veo aquí el potenciómetro $P_1$ que permite variar a voluntad la tensión entre base y emisor, tensión medida con el voltímetro $E_b$. Por otra parte, usted tiene un potenciómetro $P_2$, que sirve para variar la tensión colector-emisor medida con el voltímetro $E_c$. Y obtiene usted el valor de la corriente de base con ayuda del microamperímetro $I_b$,

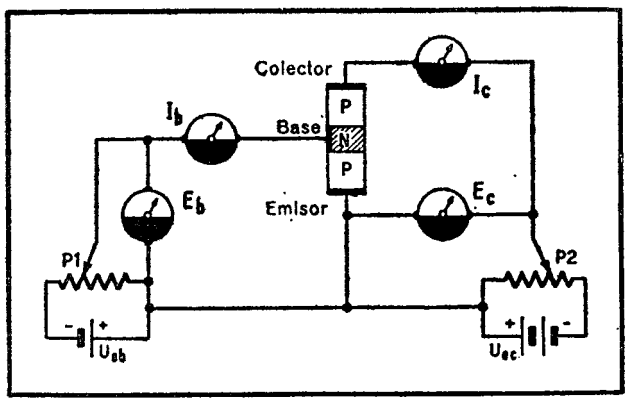
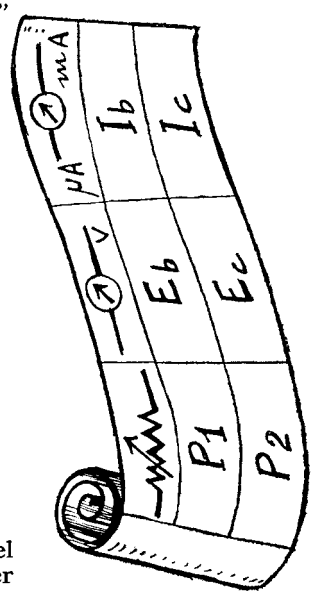



**Fig. 42. — Montaje que sirve para la deducción de las características del transistor.**




mientras que la intensidad de la corriente de colector se mide con el miliamperímetro $I_c$. Le felicito, Ignotus: con su montaje, se puede hacer un buen trabajo. ¿Qué es lo que le molesta?

IG. — Tengo la impresión de ser víctima de la jugarreta que, siendo niño, hice a nuestra buena cocinera Melania.

CUR. — ¿Qué tiene que hacer esta mártir de su precoz crueldad en el dominio de los semiconductores?

IG. — Una tarde ensarté en un hilo delgado todas las cacerolas, de modo que, cuando Melania quiso tomar una, toda la batería de cocina rodó pieza por pieza sobre su cabeza.

CUR. — Esto hace honor a su imaginación..., aunque no a su buen gusto. Pero no veo...

IG. — Sin embargo, es evidente. Tengo la impresión de que las agujas de mis instrumentos están unidas por hilos invisibles como las cacerolas de Melania. Basta que una de ellas oscile para que otras dos se

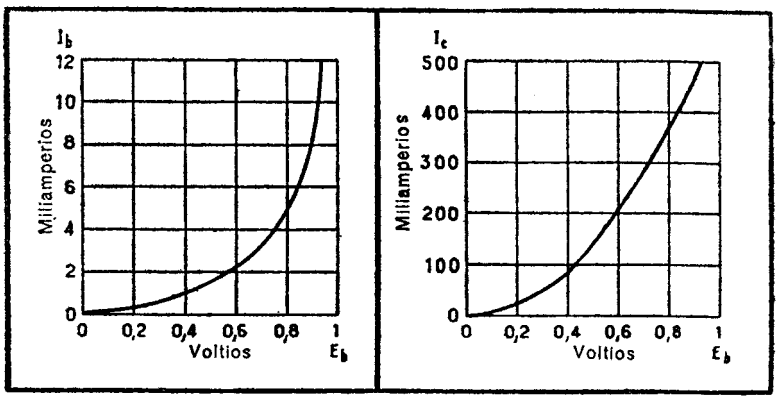
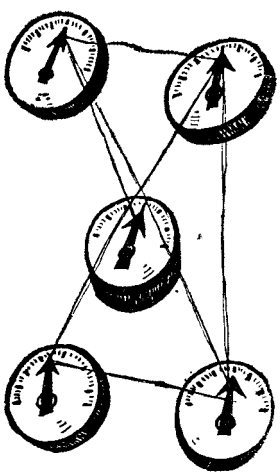



**Fig. 43. — Corriente de base $I_b$ en función de la tensión base-emisor $E_b$. En esta figura, como en todas las que representan las curvas características, las polaridades de las tensiones de base y emisor no están precisadas. Es positiva para los transistores N-P-N y negativa para los P-N-P.**

**Fig. 44. — Variación de la corriente $I_c$ en función de la tensión base-emisor $E_b$. Estas curvas, relativas a un transistor de media potencia, se han obtenido manteniendo constante la tensión en el colector.**



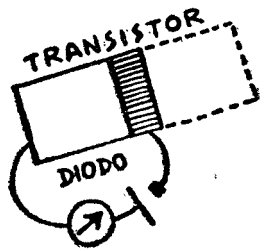
pongan también en movimiento. Por ejemplo, cuando giro el potenciómetro $P_1$, cambiando así la tensión $E_b$ de la base, la corriente $I_b$ de base cambia al mismo tiempo que la corriente $I_c$ de colector.

## Dos primeras curvas.

CUR. — ¿No es esto absolutamente normal? Es el principio mismo de funcionamiento del transistor lo que usted pone así en evidencia. Aplicando entre base y emisor una tensión creciente, aumenta la intensidad de la corriente que va desde el emisor a la base y en consecuencia intensifica la corriente que va desde el emisor al colector a través de la base.

IG. — Desde luego. Todo esto es análogo a la influencia de la rejilla sobre la corriente anódica en las válvulas. Por otra parte, he aquí las dos curvas que he obtenido regulando $P_1$ y anotando para cada valor de la tensión $E_b$ la intensidad $I_b$ y la intensidad $I_c$.

CUR. — Esto está muy bien, Ignotus. Veo que se trata de un transistor de media potencia, puesto que la corriente de colector alcanza el respetable valor de medio amperio... Su primera curva, en que las cosas ocurren únicamente entre emisor y base y donde se ve variar la corriente de base en función de su potencial con respecto al emisor, es sencillamente la característica del diodo formado por el emisor y la base.




IG. — Es verdad. En una palabra, la corriente se ceba lentamente, después aumenta cada vez más rápidamente. Veo que esta curva no ofrece gran interés. En cambio, ésta en que se ve variar la corriente de colector bajo la acción de la intensidad de base, me parece de la mayor importancia.

## Ignotus se lanza en una pendiente fatal.

CUR. — No nos embalemos, amigo. Esta segunda curva es, efectivamente, muy instructiva. Muestra principalmente que la pendiente del transistor, lejos de ser constante, varía según los valores de la tensión de base.

IG. — ¿Cómo? ¿En los transistores se habla también de pendiente? En las válvulas es la relación entre una pequeña variación de la corriente anódica y la pequeña variación de la corriente de rejilla que la ha causado.

CUR. — Pues bien, aquí, por analogía, vamos a definir la pendiente como relación entre una pequeña variación $\Delta I_c$ y la pequeña variación $\Delta E_b$ de la tensión que la ha determinado. Si se designa la pendiente por S, esto da:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

y se expresa, lo mismo que para las válvulas, en miliamperios por voltio.

IG. — Compruebo, en efecto, que la pendiente de nuestro transistor aumenta cuando la tensión de base crece. Entre 0,2 y 0,4 V, la corriente no aumenta más que 50 mA, mientras que al pasar de 0,6 a 0,8 V, la tensión de base la hace aumentar 180 mA aproximadamente. Por lo tanto, la pendiente en el primer caso es de 50 : (0,4 — 0,2) = 250 mA/V y, en el segundo, de 180 : (0,8 — 0,6) = 900 mA/V. ¡Esto es formidable! Jamás una válvula o tubo permite alcanzar tales valores de pendiente.

CUR. — Sin embargo, no deduzca de ello demasiado pronto que la amplificación del transistor sea también formidable. La misión de la pendiente aquí resulta anulada, porque lo que cuenta, en definitiva, es la influencia de la corriente de base sobre la corriente de colector.

## ¡Peligro! Potencia limitada.

IG. — Le he puesto en evidencia obteniendo los valores de la corriente de colector $I_c$ en función de la corriente de base $I_b$ para los valores de la tensión $E_c$ en el colector: 2 V y 10 V.

CUR. — ¿Y por qué una parte de la curva para esta última tensión $E_c$ = 10 V está dibujada con línea de trazos?

IG. — Porque la he dibujado «por poner algo». En efecto, no me he aventurado a pasar de una corriente de colector igual a 35 mA, ya que mi transistor está limitado en potencia a 350 mW (la advertencia del fabricante a este respecto es muy explícita). Mis 35 mA multiplicados por

los 10 V dan precisamente esta potencia límite. Y no quisiera excederla con riesgo de provocar esta avalancha de huecos y de electrones que caracteriza a un transistor «embalado»... y ver así deteriorado el fruto de mis economías.

CUR. — Ha obrado usted prudentemente, y le felicito por ello. Observe que, lo más a menudo, las curvas muestran la variación de $I_c$ bajo la acción $I_b$ aproximándose a la recta. Por otra parte, hemos tenido ya ocasión de examinar una en la figura 24.

IG. — En efecto. Y recuerdo que estas curvas permiten determinar el coeficiente de amplificación en corriente, ß. Indica cuántas veces la corriente de colector varía más rápidamente que la de la base.

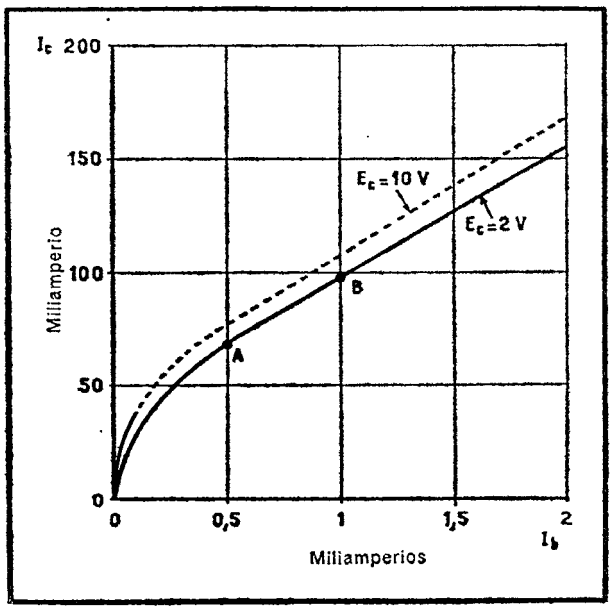



**Fig. 45. — Variación de la corriente de colector $I_c$ en función de la corriente de base $I_b$ para dos valores de la tensión de colector $E_c$.**

CUR. — ¿Se la podría deducir, por ejemplo, de la curva $E_c = 2$ V?

IG. — Es muy fácil. Cuando hacemos pasar la corriente de base, por ejemplo, de 0,5 a 1 mA (puntos A y B), la corriente de colector pasa de 70 a 97,5 mA. Luego una variación de 0,5 mA de la corriente de base implica un aumento de 27,5 mA de la corriente de colector. La amplificación de corriente es pues ß = 27,5 : 0,5 = 55.

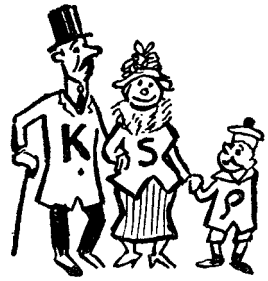
CR.U — ¡Bravo! Y de manera más general, se puede decir que

$$ß = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

donde $\Delta I_c$ e $\Delta I_b$ son respectivamente pequeñas variaciones de la corriente de base.

## Una resistencia desmandada.

IG. — ¡Alto, alto, alto! Todas estas pequeñas variaciones de intensidades y tensiones me recuerdan algo así como un aire de mi lejana juventud. Después de la pendiente y el coeficiente de amplificación falta aún la resistencia interna... y nos volvemos a encontrar con la misma familia de parámetros fundamentales que con las válvulas.




CUR. — ¡Despacio, amigo! Desconfíe usted, una vez más, de analogías apresuradas. El coeficiente de amplificación de las válvulas es una relación de dos tensiones; para los transistores, es el cociente de dos corrientes. De la misma manera, cuando se habla de la resistencia interna de las válvulas, es la de salida. Pero, en el campo de los transistores, hemos tenido ya la ocasión de hablar de su *resistencia de entrada* o resistencia emisor-base, y, como toda resistencia, ésta es una relación entre una tensión y una intensidad, como diría el genial físico Ohm.

IG. — O, para hablar con el mismo rigor que usted, es la relación entre una pequeña variación de la tensión de base y la pequeña variación que determina en la corriente de base. Y, empleando como usted estas «deltas» para designar las pequeñas variaciones, escribiré que esta resistencia de entrada es

$$r_e = \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b}$$

permaneciendo constante la tensión de colector.

CUR. — Ignotus, ¿se ha comido usted hoy un lenguado gigante para tener el cerebro cargado de fósforo hasta este punto? Puesto que está tan inspirado, ¿podría deducir el valor de la resistencia de entrada de su transistor de una de sus curvas?

IG. — Nada más fácil. Vuelvo a la curva de la figura 43 que muestra cómo varía $I_b$ en función de $E_b$ y compruebo que al pasar de 0,5 a 0,6 V, la corriente varía aproximadamente 1 mA. Obtengo así $r_e$ dividiendo 0,1 por 1, lo que me da 0,1 ohmios.

CUR. — ¿No le da a usted vergüenza, Ignotus, confundir, a su edad, miliamperios y amperios?

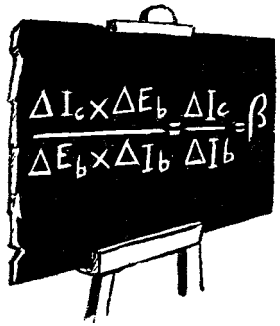
IG. — ¡Mil excusas! En efecto, debo dividir 0,1 V por 0,001 A, lo que me da $r_e = 100\ \Omega$.

## Una relación muy útil.

CUR. — Prefiero eso. Y para castigarle por este horrible error, le inflingiré un pequeño problema de cálculo: multiplicar la pendiente por la resistencia interna utilizando las definiciones de estas magnitudes.

IG. — Esto es fácil:

$$S \times r_e = \frac{\Delta I_c}{\Delta E_b} \times \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$




Ponía muy en duda que llegase a obtener alguna cosa de este género. Así, pues, *la amplificación de corriente es igual al producto de la pendiente por la resistencia de entrada.* Esto me recuerda la relación establecida para las válvulas: $K = S \times \rho$, donde, sin embargo, $\rho$ designa la resistencia de salida.

CUR. — ¿Podría usted comprobar que esta igualdad se aplica perfectamente a los parámetros que ha calculado para su transistor?

IG. — En las proximidades de 0,5 V, la pendiente, según la curva de

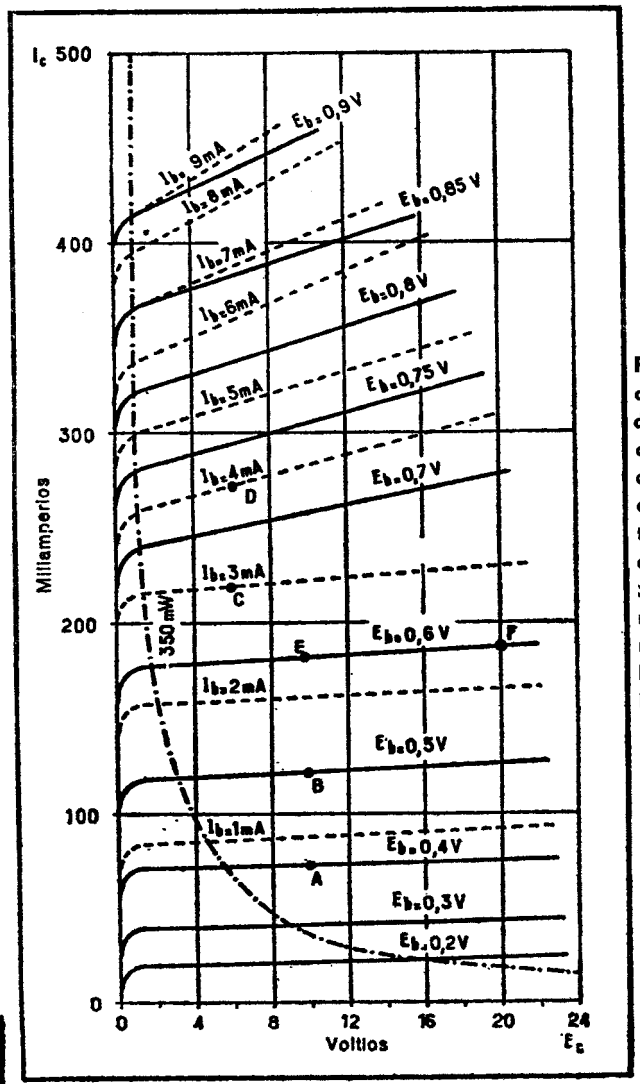
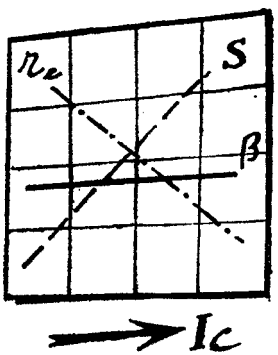



**Fig. 46. — Variación de la corriente de colector $I_c$ en función de la tensión de colector $E_c$ para diversos valores de la tensión $E_b$ y de la corriente $I_b$ de base. Se trata siempre del mismo transistor de media potencia que ha permitido obtener las curvas de las figuras 43 a 45.**

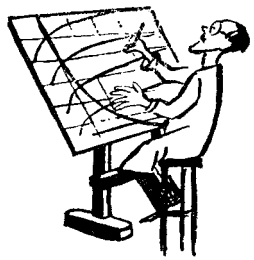



la figura 44, será de 500 ó 600 mA/V, o sea una media de 0,55 A/V. Si la multiplico por la resistencia interna, que, en el mismo punto, es de 100 Ω, obtengo 55, que es la amplificación de corriente que hemos hallado.

CUR. — Así todo va bien en el mejor de los mundos. Observe, de paso, Ignotus, que generalmente el coeficiente de amplificación no varía mucho cuando la corriente del colector aumenta. Por el contrario, ya lo hemos visto, la pendiente aumenta con $I_c$.

IG. — De donde se saca la conclusión de que, para que nuestra relación $S \times r_e = \beta$ sea válida, la resistencia de entrada debe disminuir cuando la corriente de colector aumenta.

## Todas las curvas en un gráfico.



CUR. — La verdad sale de la boca de los niños... Ahora es necesario decirle, querido amigo, que las diversas informaciones que encontramos desperdigadas en las curvas que usted ha trazado son más fácilmente utilizables si se toma el trabajo de establecer, de acuerdo con sus mediciones, un gráfico que muestre cómo varía la corriente de colector cuando se cambia la tensión de este mismo colector.

IG. — Se trata, lo comprendo bien, de curvas anólogas a las de la corriente anódica en función de la tensión anódica.

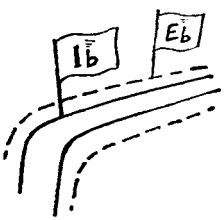
CUR. — Así es.

IG. — ¿Pero para qué valor de la tensión aplicada a la base debo trazar tal curva?

CUR. — Trazará usted una serie de curvas para toda una serie de valores de $E_b$. Comience, por ejemplo, por ajustar ésta a 0,2 V. Luego, aumente progresivamente la tensión en el colector a partir de cero y anote las intensidades $I_c$ correspondientes.

IG. — Esto es muy curioso. La corriente, partiendo de cero, alcanza el valor de 20 mA para menos de 2 V, y a partir de este punto no aumenta mucho, ni siquiera si elevo hasta 24 V la tensión en el colector. ¿A qué se debe esto?

CUR. — Está usted en presencia de un fenómeno de saturación. Cuando todos los portadores de cargas suscitados por la tensión aplicada entre la base y el emisor participen en la formación de la corriente de colector, tiene usted que aumentar mucho la tensión de colector.




IG. — La más bella muchacha del mundo no puede dar más de lo que tiene.

CUR. — Ahora que ha trazado la curva para $E_b = 0{,}2$ V, puede usted trazar otras para $E_b = 0{,}3$ V y así sucesivamente. Por lo demás, usted puede fijar, no tal o tal valor de la tensión de base, sino (lo que viene a ser lo mismo) toda una serie de valores de coriente de base $I_b$. Vea usted que obtenemos así dos familias de curvas que expresan la variación de la coriente de colector en función de la tensión de colector para diversos valores de la tensión o de la corriente de base. Se dice que estos últimos valores, que son fijos para cada una de las curvas, son sus parámetros.

## Analogías y diferencias.

IG. — Estas nobles familias se parecen mucho a las que, para las válvulas, muestran cómo varía la corriente en función de la tensión anódica con la tensión de rejilla como parámetros.

CUR. — Sin embargo, observará usted dos diferencias esenciales. Por una parte, las curvas de un pentodo parecen emanar de un sólo punto, divergiendo inmediatamente...

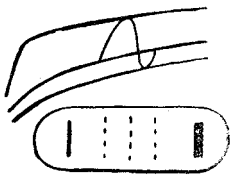
IG. — A la manera de los fuegos artificiales.

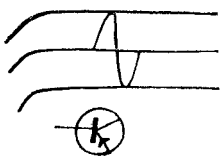
CUR. — Sea, si usted lo quiere así. En cuanto a las curvas de los transistores, ascienden muy rápidamente, para, después de un codo, permanecer luego casi horizontal. Lo observará usted mejor examinando las curvas de un transistor de poca potencia. Por otra parte, las curvas de un pentodo están muy juntas para pequeños valores de la tensión de rejilla (quiero decir cuando la rejilla está fuertemente polarizada). Después, la distancia entre las curvas próximas aumenta. Pero en el caso del

transistor, las curvas son sensiblemente equidistantes para diversas corrientes de base (en líneas de puntos). Y ésta es toda la ventaja que tiene nuestro buen triodo a cristal.

IG. — ¿Por qué?

CUR. — ¿No ve usted que es capaz de amplificar más fielmente que el pentodo, sobre todo con señales de gran amplitud? La misma variación de la corriente de base en el sentido positivo y en el sentido negativo determinará en ellos variaciones iguales de la corriente de colector.





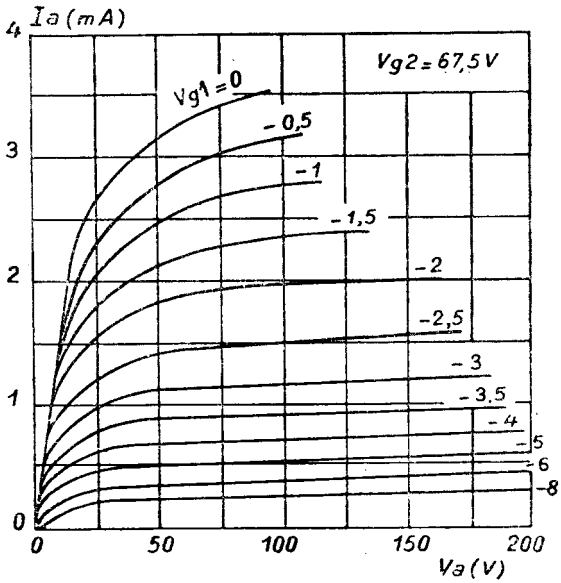
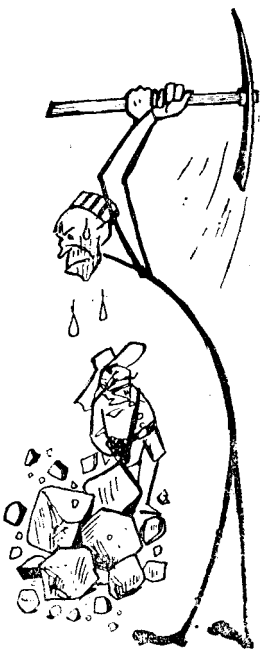



**Fig. 47. — Variación de la corriente anódica de un pentodo en función de su tensión anódica para diversos valores de la polarización de rejilla.**



Mientras que en un pentodo las alternancias positivas y negativas de la tensión de rejilla determinan variaciones desiguales de la corriente anódica.

IG. — Y esto se manifiesta por esta horrible deformación que se llama distorsión no lineal. Así, pues, los transistores tienen sobre los pentodos la ventaja de una mejor linealidad. ¡Viva el transistor!

## Utilización de las curvas.

CUR. — Desearía volver a nuestras familias de curvas de la figura 46 para hacerle comprender hasta qué punto dan una idea completa de las principales propiedades del transistor. Puede deducir de ellas su pendiente en un punto cualquiera de la tensión de base.

IG. — En efecto, si paso, por ejemplo, de 0,4 a 0,5 V (desde el punto A hasta el punto B), la corriente pasa de 75 a 125 mA, o sea un aumento de 50 mA. Y la pendiente es 50 : 0,1 = 500 mA/V.

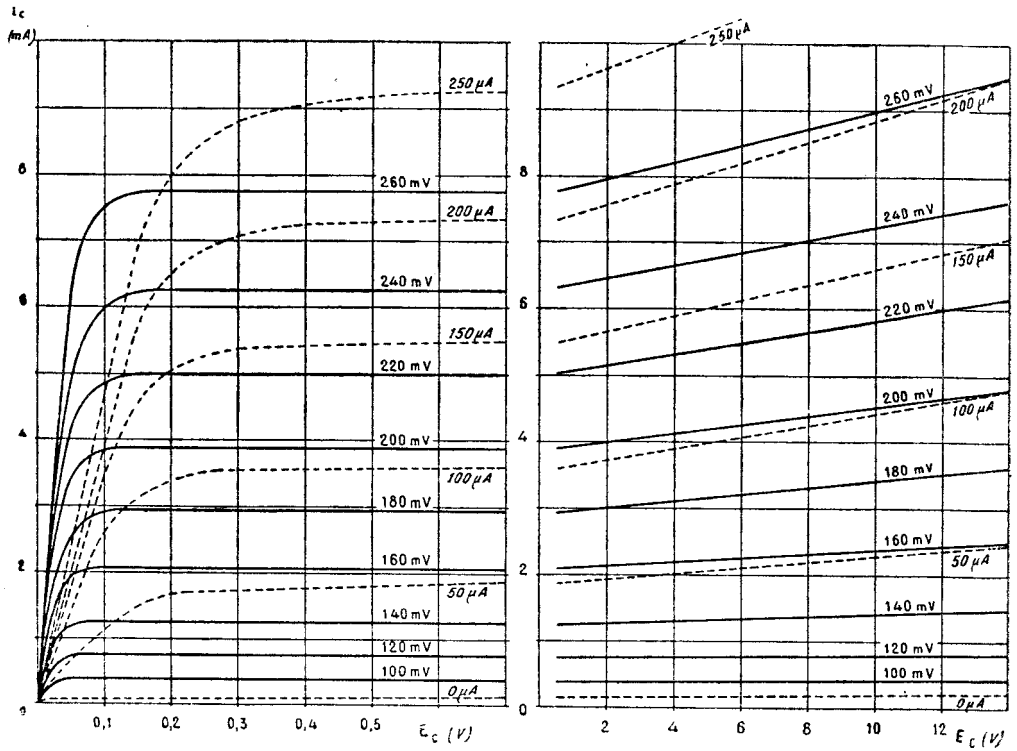
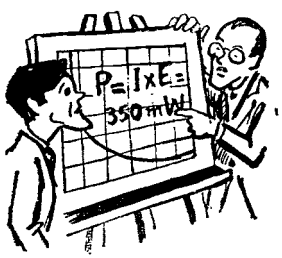



**Fig. 48. — Curvas $I_c/E_c$ de un transistor de poca potencia. A la izquierda, la escala de las tensiones de colector $E_c$ está ensanchada de manera que indique más claramente lo que ocurre en la región comprendida entre 0 y 0,7 V. Así se observa que para valores pequeños de la tensión de colector, la corriente de base ya no es proporcional a la tensión de base.**

CUR. — Con la misma facilidad puede usted deducir de nuestro gráfico la amplificación de corriente.

IG. — A este fin yo pienso que es necesario pasar de una curva de $I_b$ a otra. Tomemos, por ejemplo, los puntos C y D para los cuales la corriente de base difiere 1 mA, mientras que la de colector pasa de 220 a 275 mA, o sea un incremento de 55 mA. Y he aquí, pues, nuestra amplificación de corriente: $\beta = 55 : 1 = 55$. No hay más complicación... ¿Pero qué es esta extraña curva que desciende de izquierda a derecha y que usted ha marcado 350 mW?




CUR. — Indica la potencia límite del transistor. Para cada uno de estos puntos, el producto de la tensión de colector por su corriente es igual a 350.

IG. — En efecto, para 10 V tenemos 35 mA, lo mismo que para 5 V tenemos 70 mA. ¿Es éste entonces el límite que no hay que exceder?

## Retorno de las deltas.

CUR. — Sí. Esta curva es una hipérbola. Pero todavía tendremos ocasión de volver a ella. Entretanto, quisiera que usted se familiarizase con

una característica altamente útil del transistor: su *resistencia de salida.* ¿Adivina usted de qué se trata?

IG. — Con el poco fósforo que me queda, lo intentaré. Supongo que se trata de la resistencia que impone su comportamiento a la corriente de colector cuando se la hace variar cambiando la tensión de este mismo colector. ¿Está bien esto?

CUR. — Muy bien, Ignotus. Añada que durante estas variaciones, la base permanece a un potencial fijo. Y continúe pensando en nuestro santo Ohm.

IG. — ¡Ya entiendo! Esta resistencia de salida es la relación entre la tensión de colector y su corriente, tal como debe ser.

CUR. — Todavía no es esta la definición buena. Faltan en ella algunos pequeños detalles.

IG. — Imposible equivocarme con una pértiga tan solícitamente tendida. He aquí, pues, una definición que haría palidecer a mi viejo profesor de matemáticas. Se llama resistencia de salida de un transistor a la relación entre una pequeña variación de tensión de colector y la pequeña variación de la corriente de colector que ha determinado, suponiendo que se mantenga constante la tensión de base. Y esto se escribe:

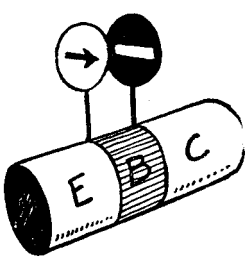
$$r_s = \frac{\Delta E_c}{\Delta I_c}$$

(lo que corresponde a $\frac{\Delta E_s}{\Delta I_c} = \rho$ de las válvulas o tubos).

CUR. — Su aire triunfal está justificado. El lenguado gigante continúa ejerciendo sobre su intelecto su benéfica acción ... ¿Podría usted entonces, fundándose siempre en el gráfico de la figura 46, determinar la resistencia de salida de nuestro transistor para, digamos, $E_b = 0{,}6$ V?

IG. — Muy fácil... Tomo dos puntos E y F, correspondientes a las tensiones de 10 y de 20 en el colector, o sea una diferencia de 10 V, y veo que la corriente de colector pasa de 180 a algo así como 182 mA, o sea un incremento de 2 mA o 0,002 A. Por consiguiente, la resistencia de salida es igual a 10 : 0,002 = 5000 Ω.

CUR. — Está perfectamente. Si usted lo hubiese calculado para valores más grandes de las corrientes, habría encontrado un valor aún más pequeño. Pero no lo olvide, estamos en presencia de un transistor de media potencia. Si toma usted un modelo de poca potencia, tal como aquél del cual están representadas las curvas en la figura 48, encontrará resistencias de salida mucho mayores. En efecto, estas curvas son casi horizontales. E incluso un gran aumento de $E_c$ no implica en ellas más que un insignificante aumento de $I_s$. Es decir, que su cociente se expresa en decenas de millares de ohmios.




IG. — ¡Qué extravagante animal este transistor cuya resistencia de entrada es pequeña y la de salida elevada! Se diría que lo hace expresamente para burlarse de las válvulas... Por otra parte no se puede admitir que la resistencia de entrada es pequeña porque es la de la unión emisor-base atravesada por la coriente continua. Mientras la unión base-colector es penosamente franqueada por la corriente en el «mal sentido», lo que determina una gran resistencia de salida.

CUR. — Esta manera de verlo es completamente legítima. Pero me temo que por hoy su provisión de fósforo toca a su fin... y su resistencia de entrada se hace enorme.

SÉPTIMA CHARLA

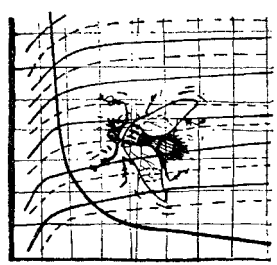
**En el curso de su última conversación, Curiosus e Ignotus han pasado revista a las principales características de los transistores. Estas, según se ha visto, pueden ser expresadas por valores numéricos de diferentes relaciones o, mejor, por redes de curvas que muestan cómo varían ciertas magnitudes bajo la acción de ciertas otras. El modo de representación gráfica da una imagen más completa de las propiedades de un transistor que las características numéricas, las cuales no son válidas más que en condiciones bien determinadas. Porque en los transistores, no dudamos en decirlo, todo depende de todo...**

**En la charla que se va a leer, nuestros dos amigos sabrán inferir de las familias de las curvas preciosas informaciones sobre el funcionamiento real del transistor como amplificador conteniendo una impedancia de carga. De paso estudiarán el problema de la polarización y sus soluciones prácticas.**

**SUMARIO: Características estáticas y dinámicas. — Trazado de la recta de carga. — Punto de trabajo. Amplificación de corriente, de tensión y de potencia. — Valores máximos de la componente alterna. — Tensión residual. — Elección de la impedancia de carga. — Pendiente dinámica. — Polarización de la base.**

# RECTAS Y CURVAS

**El transistor no está solo en el mundo.**



Desde nuestra última entrevista tengo atroces pesadillas. Sueño que soy una mosca atrapada en una tela de araña gigante construida por las redes de las curvas de los transistores. Me debato en ella desesperadamente sin poder escapar... ¿No es esto horrible?

CURIOSUS. — Lamento haber perturbado sus noches... ¿Quiere usted que renuncie desde ahora a hablar de esas famosas curvas?

IG. — Por el contrario. Quisiera que me explicase usted la manera de servirse de ellas en las condiciones reales de empleo de los transistores.

CUR. — ¿Qué entiende usted por eso?

IG. — Usted ha trazado estas curvas variando la tensión $E_c$ aplicada entre colector y emisor. Y esto lo ha hecho para diversos valores de corriente de base $I_b$ (o, lo que viene a ser lo mismo, para diversos valores de la tensión de base $E_b$). Pero, en realidad, nuestro transistor no vive como un egoísta, aislado del mundo entero y haciendo variar sus tensiones y corrientes por puro placer... Está encargado de proporcionar tensiones o corrientes a otro transistor que equipa al paso siguiente. O bien, si es el último de la fila, debe procurar vatios a un altavoz. De todas maneras, debe tener una impedancia de carga en su circuito de colector. Así, en el caso en que esté seguido de otro paso am-

plificador y que el acoplamiento entre ellos sea por resistencia y capacidad, debe haber en él una resistencia R entre colector y la batería $U_{cc}$.

CUR. — Esto es del todo exacto. ¿Pero qué es lo que le molesta en todo ello?

## Todavía la batería de cocina.

IG. — Es que mis tensiones en el colector van a depender ahora de la intensidad de la corriente de colector. En efecto, la verdadera tensión $E_c$ entre colector y emisor es más débil que la de la pila $U_{cc}$, puesto que es necesario restar de ésta la caída de tensión que produce la corriente $I_c$, en la resistencia de carga R. Así, pues, si una variación de la corriente de base determina un aumento de la corriente de colector, la caída de tensión en R será mayor, en detrimento de la tensión que va a quedar en el colector.

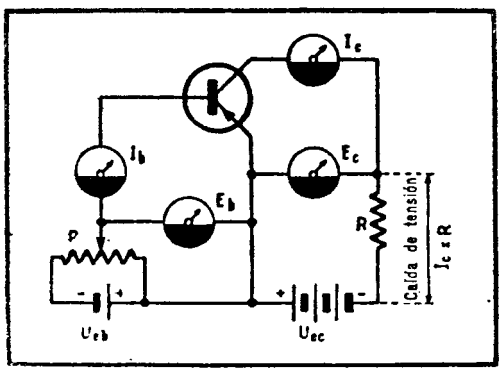
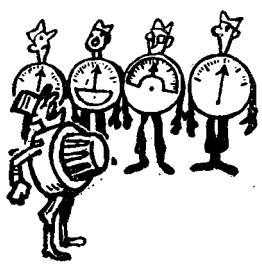



**Fig. 49. — Para obtener las características de funcionamiento real de un transistor conviene completar el dispositivo de la figura 42 con una resistencia de carga R intercalada en el circuito de colector. (A partir de ahora, el transistor será representado en los esquemas por su símbolo convencional.)**

CUR. — ¡Está bien razonado, Ignotus! Y comprendo lo que le desorienta: nuestras redes de curvas no dan aparentemente cuenta de estos fenómenos.

IG. — Pienso cada vez más en mi batería de cocina de la que yo había ensartado todas las cacerolas... A consecuencia de la presencia de esta resistencia de carga, todo está ligado en nuestras corrientes y tensiones. Varíe el potenciómetro P, y verá usted inclinarse las agujas de nuestros cuatro instrumentos de medida en un movimiento unánime, como soldados maniobrando a las órdenes de un oficial...



## Una recta entre las curvas.

CUR. — Tratemos de poner un poco de orden en todo esto. Tomemos el caso de un transistor de débil potencia, digamos de 75 mW, del cual tenemos aquí las curvas, comprendiendo en ellas, en trazo interrumpido grueso, el límite de potencia que no se debe exceder. Supongamos que la pila $U_{cc}$ que alimenta el colector sea de 9 V. Dígame, ¿en qué condiciones se producirá esta tensión en el colector?

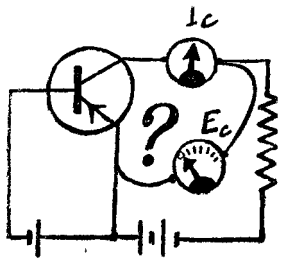
IG. — Cuando no se produzca caída alguna de tensión en R. Es decir, si la corriente $I_c$ es nula.

CUR. — Y he aquí un primer punto A que vamos a marcar en nuestro gráfico para $E_c = 9$ V e $I_c = 0$. Admitamos ahora que nuestra resistencia

R sea de 275 Ω. ¿Puede usted calcular para qué valor de la corriente de colector no quedará tensión en dicho colector?

IG. — Desde luego, aplicando la ley de Ohm puedo hallar la intensidad $I_c$ que, en una resistencia R de 275 Ω, determinará una caída de tensión E de 9 V de modo que se anule la tensión de la pila $U_{cc}$:

$$I_c = \frac{E}{R} = \frac{9}{275} = 0{,}0327 \text{ A} = 32{,}7 \text{ mA}$$




CUR. — ¡Perfecto! Esto nos permite marcar nuestro segundo punto B para $E_c$ = O e $I_c$ = 32,7 mA. No queda más que tomar una regla y unir

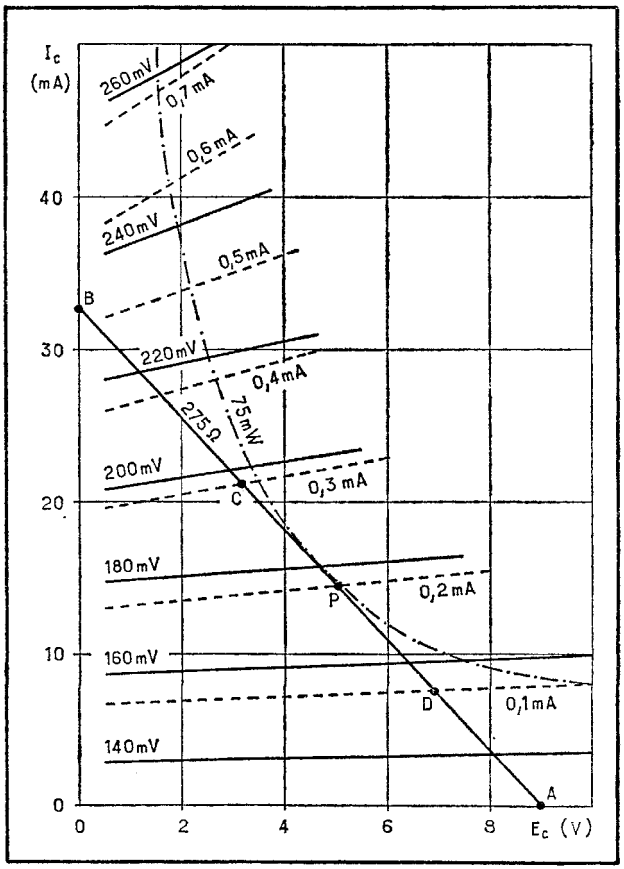
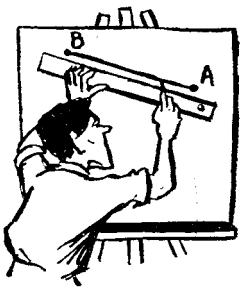



**Fig. 50. — Curvas de un transistor de poca potencia.**




nuestros puntos A y B por una bonita recta, que es la *recta de carga* para 275 Ω.

IG. — ¡Me parece que no hemos adelantado nada! Porque no veo a qué corresponde esta «recta de carga». Y, para comenzar, ¿cómo quiere usted que la corriente de colector alcance estos 32,7 mA si en ese instante no hay tensión alguna en el colector?

CUR. — Su confusión se debe a que usted no establece una diferencia entre las *características estáticas* y las *características dinámicas*. Las

primeras indican cómo varían las tensiones y las corrientes que nos interesan en ausencia de una carga en el circuito de colector. Es lo que hemos examinado en nuestra charla precedente. Hoy queremos ver lo que ocurre cuando se coloca una carga en el circuito de colector y —es lo que hemos omitido precisar hasta aquí— cuando se aplica una tensión alterna $v_b$ a la entrada, es decir, entre la base y el emisor. Entonces son las características dinámicas las que dan cuenta del funcionamiento del transistor; y la recta de carga que acabamos de trazar es una de ellas.

## Las dos componentes.

IG. — En su esquema veo que la tensión alterna de entrada $v_b$ da lugar a la tensión alterna de salida $v_c$. Y comienzo a entrever la verdad. Aquí ocurre en el circuito de colector la misma cosa que en el circuito anódico de las válvulas electrónicas: la coexistencia pacífica de dos corrientes. Hay por una parte una componente continua, esta corriente media que está determinada por el punto de funcionamiento (en este

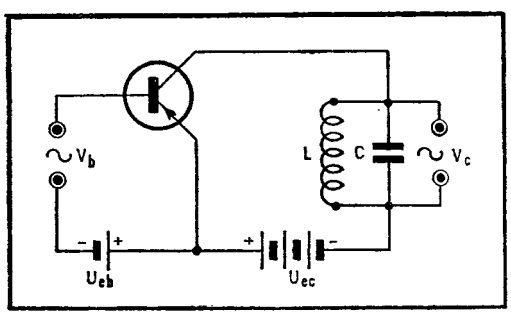
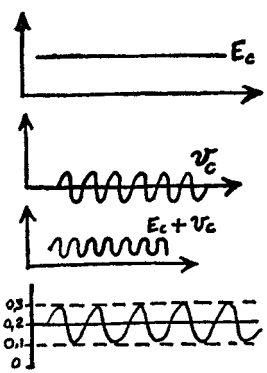



**Fig. 51. — En la entrada de un paso equipado con un transistor, se tiene una tensión alterna $v_b$ aplicada entre base y emisor. En la salida se recoge en la resistencia de carga R una tensión alterna $v_c$.**




caso, la polarización de la rejilla). Y después, hay la componente alterna, debida a las variaciones de potencial de la rejilla con respecto al cátodo. Y sus alternancias unas veces se suman a la componente continua (cuando las dos van en el mismo sentido) y otras se restan.

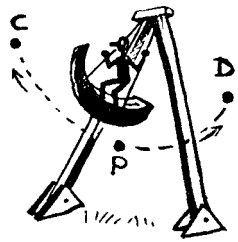
CUR. — Esto comienza a ir mejor, Ignotus... Efectivamente, tenemos lo mismo en el transistor. La pila $U_{eb}$ fija el punto de funcionamiento. Hay interés en situarlo de tal manera que las crestas de tensión variable $v_c$ desarrollada a la salida puedan tener la mayor amplitud posible.

IG. — En este caso debemos arreglárnoslas para que la tensión media $E_c$ que queda en el colector sea igual a la mitad de su tensión de alimentación $U_{ec}$. En nuestro caso, esto será la mitad de 9 V, o sea 4,5 V.

CUR. — Por lo tanto coloco un punto P sobre nuestra recta de carga, en $E_c = 5$ V. Está casi en el punto medio de nuestra recta. Verá usted en seguida que se puede adoptar un valor ligeramente mayor que la mitad de $U_{ec}$. Entonces, si una variación de la tensión base-emisor (o sea, una variación de la corriente de base) determina variaciones de la corriente $I_c$ y de la tensión $E_c$ de colector, estas dos magnitudes estarán siempre ligadas por la relación que expresa nuestra recta.

IG. — Esto es muy filosófico, pero yo preferiría un ejemplo concreto.

## Juegos de columpio.




CUR. — Pues bien, admita que aplica usted entre base y emisor una tensión alterna de una amplitud de aproximadamente 20 mV, que origina variaciones de la corriente de base de una amplitud de 0,1 mA a una parte y otra de la corriente media que, en el punto P, es de 0,2 mA.

IG. — De forma que la corriente de base oscilará entre

$$0{,}2 + 0{,}1 = 0{,}3 \text{ mA y } 0{,}2 - 0{,}1 = 0{,}1 \text{ mA}$$

CUR. — Muy exactamente. Para el primer valor alcanzaremos en la recta de carga el punto C (donde corta a la curva $I_b = 0{,}3$ mA). Y para el segundo, pasaremos al punto D (crecimiento con la curva $I_c = 0{,}1$ mA).

IG. — ¿De modo que los valores instantáneos de $E_c$ e $I_c$ oscilarán entre estos dos puntos C y D a lo largo de la recta de carga, como si se columpiasen alrededor del punto de equilibrio P?

CUR. — Esto es. Vea que la tensión de colector oscila entre 3,2 V y 6,8 V alrededor del punto P que está a 5 V.

IG. — Esta es una amplitud de 1,8 V. Y, como también corresponde a una amplitud de 20 mV = 0,02 V en la base, ¿puedo deducir de ello que tenemos una amplificación de tensión de 1,8 : 0,02 = 90?

CUR. — Yo no se lo impediré. ¿Y para la amplificación en intensidad?

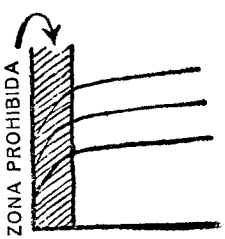
IG. — Tampoco es difícil. Entre los puntos C y P de una parte, y P y D de otra, la corriente $I_c$ de colector varía 7 mA. Esta variación está provocada por una variación de 0,1 mA de la corriente de base. Por consiguiente, la amplificación en intensidad es 7 : 0,1 = 70.

CUR. — Comienzo a creer que ha vuelto usted a cargar su cerebro de fósforo, haciendo destrozos en una pescadería... Ahora, vea usted que la potencia —que es el producto de la tensión por la intensidad— ha sido amplificada...

IG. — ... 90 × 70 = 6300. ¡Esto es prodigioso!

## ¡Cuidado con las distorsiones!

CUR. — Nada más normal. Pero lo que yo quisiera hacerle comprender es que no debemos exceder de una amplitud de 4,5 V para la tensión alterna $v_c$ en el colector. Con esta amplitud, los valores de $E_c$ e $I_c$ se pasearán a lo largo de la recta de carga, de A a B. En efecto, admitiendo que el punto de funcionamiento o de trabajo esté situado en el punto medio exacto de AB, una de las alternancias alcanzará uno de estos puntos y la otra alternancia llegará al otro punto.




IG. — En resumen, ¿son éstos los límites de los valores instantáneos de la tensión $E_c$ de colector?

CUR. — Sí. Y, en efecto, es necesario que no caiga a cero al llegar al punto B. Porque las curvas características de la red dejan de ser rectas allí. Ha visto usted en la figura 46 y aún mejor en la 48 cómo se inflexionan en los valores pequeños de $E_c$. He aquí porque queda una zona de algunas decenas de voltios, llamada *tensión residual,* que está prohibida so pena de distorsiones.

IG. — Por lo tanto, ¿se puede fijar el punto P, no en el punto medio de la tensión de la pila $U_{ec}$, sino en un valor un poco más elevado?

CUR. — Ciertamente, si se quiere ser riguroso. Y he aquí por qué (1) lo hemos situado en 5 V.

IG. — Tengo la impresión que no es por pura casualidad por lo que usted ha tomado un valor de 275 Ω para una resistencia de carga R. ¿Qué habría dado una valor diferente?

## Haz de rectas.

CUR. — He aquí algunas rectas de carga para valores superiores o inferiores. Para 1000 Ω obtenemos potencias más débiles y disponemos de menor amplitud de las variaciones de las corrientes y de las tensiones,

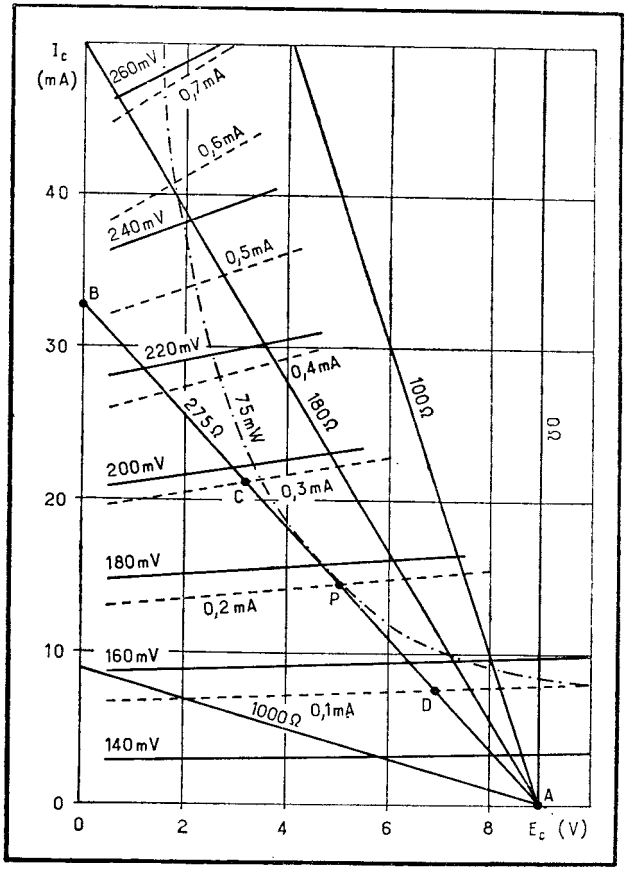



**Fig. 52. — Rectas de carga para diferentes valores de R. Su inclinación es tanto mayor cuanto más pequeña sea R. Para R nula, la recta se eleva verticalmente.**

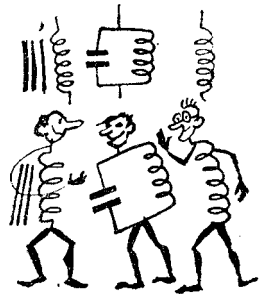
tanto en la entrada (base) como en la salida (colector). Por el contrario, para valores inferiores a 275 Ω, las amplitudes y las potencias aumentan... pero entramos en el terreno prohibido de las potencias mayores de 75 mW.

(1) Curiosus hace algo de martingala: si ha situado P en 5 V, es principalmente para tener este punto en la curva Ib = 0,2 mA, lo que facilita la lectura de los diversos valores de las tensiones y de las corrientes. *(Nota del autor.)*

IG. — Usted es un vivo, he aquí porque ha elegido este valor de 275 Ω que le permite tener una recta de carga tangente a la hipérbola que marca la potencia límite... Veo que incluso ha trazado usted la recta de carga para R nula.

CUR. — Sí, Ignotus. Y esta bonita recta, perfectamente vertical, es, entre todas nuestras características dinámicas, la única característica estática. En ausencia de resistencia de carga, ¿la tensión en el colector no permanece constante e inmutable?

IG. — Es evidente. ¿Pero no hemos estudiado ya otras impedancias de carga que no sean una vulgar resistencia óhmica? Todavía tengo presente en la imaginación esta bella familia de impedancias que usted me hizo conocer y que comprende inductancias y circuitos resonantes.



CUR. — Tiene usted toda la razón al hablarme de ello. Desde luego, para esta clase de impedancias, se puede hacer abstracción de su resistencia óhmica en corriente continua. En estas condiciones, el punto de funcionamiento del colector está a la misma tensión de su batería de alimentación $U_{ec}$. Entonces, sin riesgo de invertir la polaridad del colector, se pueden desarrollar en nuestra impedancia tensiones cuya amplitud puede alcanzar el valor de la tensión $U_{ec}$. Y el punto A (o la

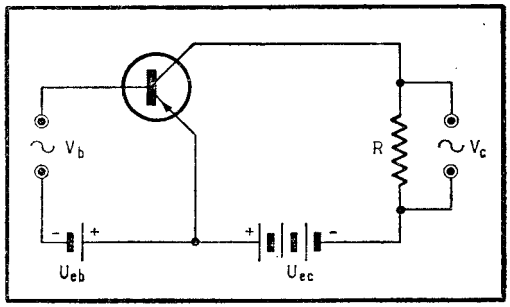
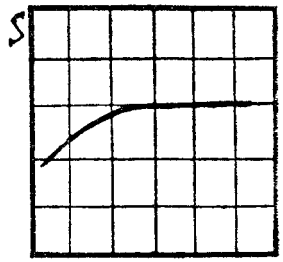



**Fig. 53. — La carga puede estar constituida por una impedancia que no sea una resistencia óhmica. Aquí está representada por un circuito sintonizado a la frecuencia de la señal.**

recta de carga que corta al eje horizontal $E_c$) puede estar situado en un valor doble de la tensión de la batería $U_{ec}$. Así, en el caso de que ésta sea de 9 V, el punto A estará situado en 18 V.

IG. — En resumen, para trazar una recta de carga, fijo el punto A sobre el eje horizontal en $U_{ec}$ o 2 $U_{ec}$ según la impedoancia sea óhmica o no, y marco el punto B sobre el eje vertical en su valor $U_{ec}$ : R o I = = 2 $U_{ec}$ : Z según la clase de impedancia.

CUR. — Ha formulado usted perfectamente la regla y, así lo espero, sabrá trazar rectas de carga sin la menor dificultad. Y también sabrá deducir de ello una multitud de datos. Nada más fácil, por ejemplo, que trazar, partiendo de aquélla, la curva que muestra como varía la corriente de colector $I_c$ en función de la tensión $E_b$. Basta marcar en la recta de carga los valores de $I_c$ para todos los puntos en que corta a las curvas $E_b$ y llevarlos a un gráfico. Vea usted que en el caso actual tenemos una recta. Esto muestra que las variaciones de la pendiente son débiles cuando se trata de valores elevados de la corriente de colector. El transistor amplifica entonces de una manera suficientemente lineal.



IG. — Y observo que la pendiente es aquí de 300 mA/V.

CUR. — Sí. Es la *pendiente dinámica*. Con la misma facilidad hubiera usted podido trazar la curva que muestra la variación de $I_c$ en función de $I_b$.

## Una sola batería — todas las tensiones.

IG. — Seguramente. Pero, lo mismo que una mosca cogida en una tela de araña, me he apresurado a salir de estas redes de curvas que, en estado de vigilia, me hacen vivir mis pesadillas nocturnas... Desde hace un momento, tengo una pregunta en la punta de la lengua. En todos sus

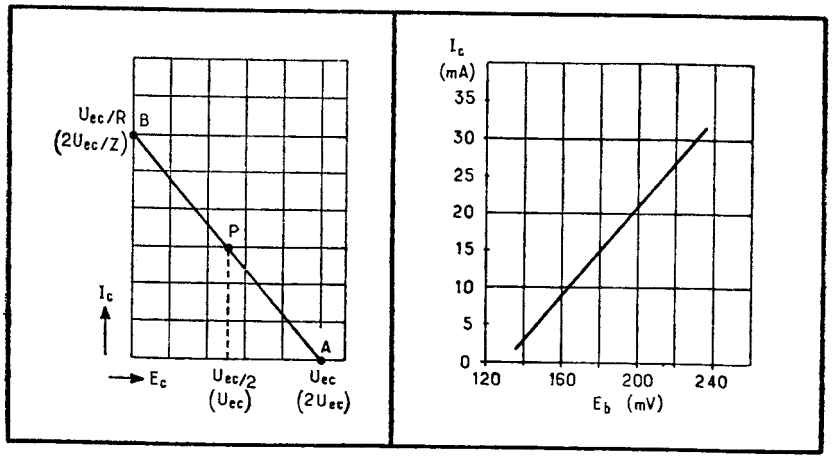


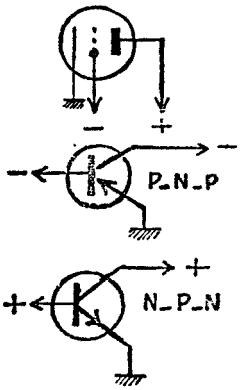

**Fig. 54. — Regla general para el establecimiento de las rectas de carga. Los valores indicados entre paréntesis corresponden al caso de impedancias Z de pequeña resistencia óhmica.**

**Fig. 55. — Esta curva muestra la variación de la corriente de colector $I_c$ en función de la base $E_b$ y está establecida de acuerdo con los valores de estas dos magnitudes deducidas de la recta de carga de la figura 50.**

esquemas ha hecho usted figurar dos baterías: $U_{ec}$ que da la tensión del colector y $U_{eb}$ que sirve para polarizar convenientemente la base. Pero yo he hecho la autopsia a todos los receptores con transistores de mis amigos y he observado que no contenían más que una sola batería, sea la de 4,5 V, de 6 o de 9 V. Es evidentemente la que alimenta al colector. ¿De dónde viene entonces la tensión de polarización para la base?

CUR. — De esta misma batería. ¿No ocurre lo mismo con las válvulas?

IG. — En efecto, es la fuente de la corriente anódica la que crea la tensión de polarización de rejilla; la corriente anódica provoca una caída de tensión en una resistencia colocada entre el retorno de rejilla y el cátodo, haciendo a este último positivo con respecto a la rejilla o, en otros términos, haciendo a la rejilla negativa con respecto al cátodo... ¿Se hace lo mismo en el transistor creando una caída de tensión en una resistencia dispuesta en el trayecto de la corriente de colector?

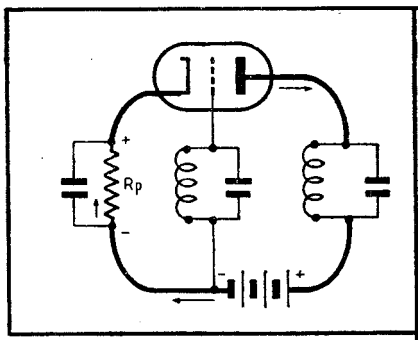


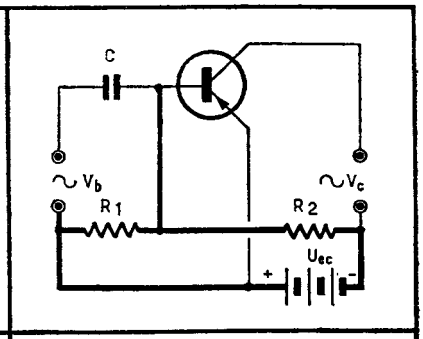

CUR. — No, Ignotus. En el transistor las cosas son esta vez más sencillas que con la válvula. En ésta el ánodo debe ser positivo y la rejilla negativa con respecto al cátodo. En cambio, en un transistor P-N-P, el colector y la base deben ser negativos con respecto al emisor.

IG. — De la misma manera que en un modelo N-P-N, colector y base deberán ser ambos positivos con respecto al emisor. Adivino, pues, que

basta colocar en los bornes de nuestra batería un divisor de tensión constituido por dos resistencias $R_1$ y $R_2$ para procurar a la base la tensión que necesita.

CUR. — Exactamente. Y para aplicar a la base las tensiones alternas de entrada se utiliza un condensador de acoplo C. Sin embargo, se puede obtener la polarización de la base todavía con más sencillez, por medio de una sola resistencia $R_p$, uniéndola al polo de la batería que



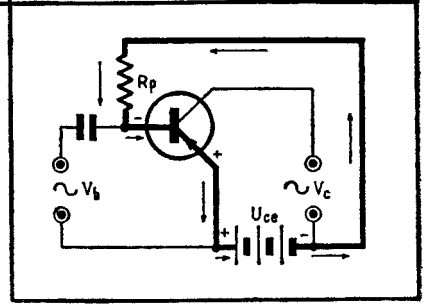




**Fig. 56 (arriba, a la izquierda). — Así es cómo, en un paso con válvula electrónica, se obtiene la polarización de rejilla por la caída de tensión que origina la corriente anódica en la resistencia $R_p$.**

**Fig. 57 (arriba, a la derecha). — Modo de polarización de la base por medio de un divisor de tensión.**

**Fig. 58 (abajo). — La polarización se suele obtener por una resistencia $R_p$ en serie con la unión base-emisor.**

alimenta al colector, polo negativo en el caso del transistor P-N-P, o positivo para el N-P-N.

IG. — Ya veo lo que ocurre. Usted hace pasar a través de $R_p$ una corriente que vaya desde la base hasta el emisor.

CUR. — Y esta corriente, Ignotus, es denominada *corriente de polarización*. Es precisamente esta corriente la que fija el punto de funcionamiento. Así, en el caso del punto P de la figura 50, se trata de una corriente de 0,2 mA o 0,0002 A. Con una pila de 9 V y despreciando la resistencia de la unión base-emisor (que es pequeña en el sentido de la conducción), ¿cuál deberá ser el valor de $R_p$?

IG. — Si se debe creer en la ley de Ohm, obtendremos $R_p$ dividiendo 9 por 0,0002, lo que da 45000 Ω.

CUR. — Ya ve usted que todos nuestros cálculos no tienen más dificultad que la que podría tener una simple multiplicación o división...

IG. — Esto no impide que tenga la sensación de que mi cabeza está rellena de curvas, de rectas y de una pasta de magnitudes eléctricas. Siempre que esto se asiente de aquí a nuestra próxima entrevista...

## OCTAVA CHARLA

**En los montajes con válvulas electrónicas se recurre a la contrarreacción con el fin de reducir las distorsiones y atenuar la influencia de las fluctuaciones de las tensiones de alimentación. Cuando se trata de montajes con transistores, la contrarreacción puede prestar los mismos servicios. Y, por añadidura, puede neutralizar, en una cierta medida, la acción de las variaciones de temperatura, a las cuales, como se sabe, son muy sensibles los semiconductores.**

**Examinando estas diversas aplicaciones de la contrarreacción, nuestros jóvenes amigos comprobarán al mismo tiempo que, por su propia naturaleza, el transistor está dotado de una cierta contrarreacción interna. Lo que prueba más que nunca que en él todo depende de todo...**

**SUMARIO: Los beneficios de la contrarreacción. — Contrarreacción de intensidad y de tensión. — Montajes con válvulas y con transistores. — Acción de la contrarreacción sobre las resistencias de entrada y de salida. — Distorsión de fase introducida por los transistores. — Contrarreacción interna. — Efectos de la temperatura sobre la distorsión. — Su compensación por la contrarreacción. — Empleo de las termistancias.**

# CHOQUES DE RETROCESO

**La realidad va más allá que la ficción.**

CURIOSUS. — ¿Qué veo, Ignotus? ¡Se dispone a quemar un montón de libros! ¿Qué significa este auto de fe?

IGNOTUS. — Hago morir a mi biblioteca de ciencia-ficción. ¿Para qué guardar estas obras de ciencia-ficción, puesto que la realidad ha rebasado con mucho la imaginación de sus autores? Y, por cierto, quería hacerle una pregunta a propósito de estos inmensos globos que, a la altura de 35 000 kilómetros, giran alrededor de la tierra, a la velocidad de una vuelta cada 24 horas, de modo que permanecen siempre encima del mismo punto de nuestro planeta.

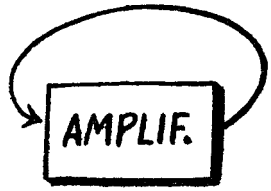
CUR. — Usted sabe bien que permiten establecer comunicaciones radioeléctricas a larga distancia por reflexión de las ondas en su envoltura metalizada, y que así se pueden realizar comunicaciones de largo alcance para la televisión.

IG. — Eso ya lo sabía. Pero lo que me intriga en la historia de estos satélites artificiales es el hecho de que los balones no sean hinchados más que una vez situados en su órbita, lo que, imagino, complica las cosas.

CUR. — ¡Vamos, Ignotus! ¿No comprende usted que un balón de tal diámetro sería absolutamente incapaz de moverse a una velocidad de más de 11 kilómetros por segundo a través de la atmósfera terrestre?

Por el contrario, en el vacío que reina a la altitud donde evoluciona, nada opone resistencia a su avance.

IG. — Confieso que esto salta a la vista. Y estoy avergonzado por no haberlo pensado. Y, no obstante, conozco bien esta antigua ley de Newton, según la cual cada acción provoca una acción en sentido contrario y del mismo valor. Es, en una palabra, la contrarreacción que estudiamos en radio.




## Cuestiones de correción.

CUR. — No del todo, amigo. Ciertamente, la contrarreacción supone una acción en sentido inverso que viene a oponerse a una acción dada (dicho de otra manera, una oposición de fase). Pero no hay que olvidar que, tal como la consideramos, se realiza reinyectando en la entrada de un amplificador una parte de la energía tomada de su salida. Hay pues...

IG. — ... una especie de choque de retroceso. Es algo de lo que me ocurre cuando cometo una tontería y que, para corregirme, me dan ganas de darme patadas en alguna parte...

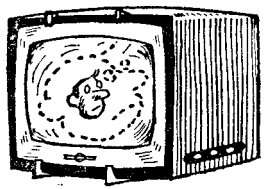
CUR. — La palabra «corregir» es muy apropiada. En efecto, le recuerdo que la contrarreacción es una especie de panacea; reduce todas las distorsiones: las lineales (en función de la frecuencia), las no lineales (las cuales dependen de la amplitud e introducen armónicos indeseables) y, finalmente, las distorsiones de fase.

IG. — Me acuerdo. Todo esto es atenuado debido a que la tensión de salida que se reinyecta en la entrada en oposición de fase contiene precisamente todas estas distorsiones. Vienen, pues, en sentido contrario, anulando en fin de cuentas todas las alteraciones que se originan en el amplificador.

CUR. — ¡Bravo, Ignotus! No ha olvidado usted nada. ¿Sabía usted que, además, la contrarreacción palía las perturbaciones que pueden ser debidas a las variaciones de las tensiones de alimentación?

IG. — Esto es muy interesante. Será necesario que añada circuitos de contrarreacción en todos los pasos del televisor instalado en nuestra casa de campo. El sector eléctrico es muy inestable allí. Y a consecuencia de ello la imagen experimenta fluctuaciones muy curiosas: tan pronto es demasiado oscura como demasiado luminosa. Además, incluso sus dimensiones varían y veo la cabeza de los personajes dilatarse o contraerse en la pantalla... lo que no deja de ser chocante.

CUR. — Pues la contrarreacción es un buen remedio para este estado de cosas, puesto que toda perturbación que se manifiesta a la salida por una deformación cualquiera se corrige reinyectando la señal deformada en la entrada. Sin embargo, en su caso, estaría más indicado un estabilizador de tensión colocado entre el sector y el televisor.

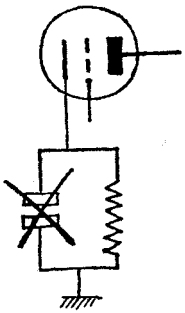


IG. — ¿Por qué? ¡Puesto que la contrarreacción no tiene más que ventajas!

## Vuelta a las válvulas.

CUR. — Usted es aún joven, amigo, No sabe todavía que aquí abajo todo se paga. Si la contrarreacción reduce las distorsiones, hace igualmente disminuir la ganancia de los amplificadores. He aquí porque su aplicación no es posible más que cuando se dispone de un margen de

ganancia suficiente... Puesto que hablamos de ello, ¿podría usted trazar los esquemas de los principales modos de contrarreacción empleados en los amplificadores con válvulas?



IG. — Se puede obtener contrarreacción intercalando una resistencia $R_r$ sin condensador de desacoplo entre el cátodo y el negativo de la fuente de tensión anódica. Este es casi el mismo esquema que el de la polarización por resistencia en el circuito del cátodo que yo dibujé en nuestra primera charla (fig. 56). Pero este «pequeño detalle» cambia todo. Ahora cuando una tensión hace a la rejilla más positiva, la co-

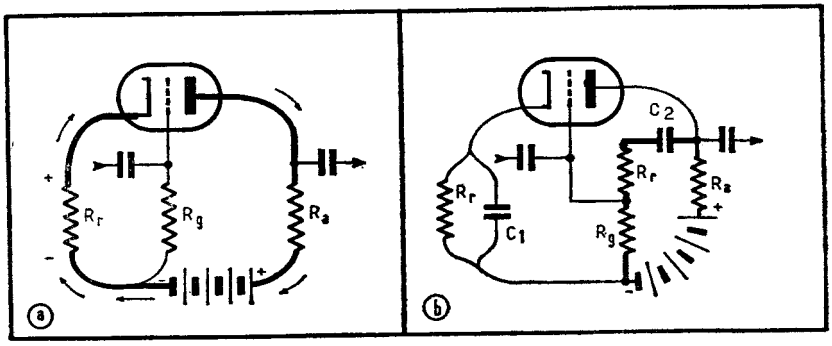
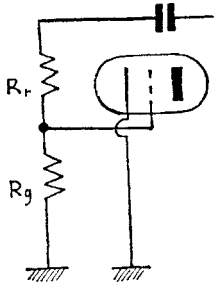



**Fig. 59. — Contrarreacción en un paso con válvula electrónica; en a, la contrarreacción de corriente determinada por la presencia de una resistencia común $R_r$ en los circuitos de rejilla y de ánodo. — En b, contrarreacción de tensión obtenida aplicando en la rejilla una fracción de la tensión alterna desarrollada en la resistencia de carga $R_a$ y tomada, a través de $C_2$, por el divisor de tensión $R_r$-$R_g$. — Esta manera de presentar los esquemas no es habitual. Sin embargo, tiene la ventaja de ser clara y poner en evidencia el mecanismo de la contrarreacción.**

rriente anódica aumenta y, al recorrer $R_r$, aumenta la caída de tensión, lo que hace a la rejilla más negativa, es decir tiende a oponerse a la acción inicial de la señal.




CUR. — Es maravilloso, Ignotus. Comienza usted a explicarse tan claramente como mi querido tío Radiol, que antaño me inculcó los principios elementales de la radio... En efecto, su primer montaje asegura la contrarreacción bajo la acción de la corriente anódica. He aquí porque se le llama *contrarreacción serie de intensidad.*

IG. — En este caso, habrá que llamar *contrarreacción shunt* de tensión a la que se produce en mi segundo montaje. Porque aquí reinyecto hacia la rejilla las tensiones alternas desarrolladas en la resistencia de salida $R_a$. Lo hago con la ayuda de una resistencia $R_r$ y, desde luego, separo las tensiones continuas por el condensador $C_2$.

CUR. — Esto es justo. ¿Aplica usted a la rejilla la totalidad de la tensión de salida?

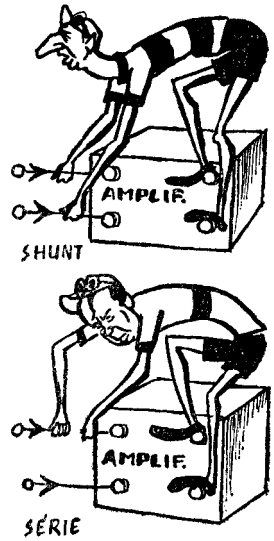
IG. — No. Esto sería excesivo. En efecto, las resistencias $R_r$ y $R_g$ constituyen un divisor de tensión que permite no aplicar a la rejilla más que la fracción de la tensión de salida que queda en $R_g$. Y, como se

toma $R_r$ de valor mucho más elevado que $R_g$, la rejilla no recibe sino una pequeña parte de la tensión de salida (1).

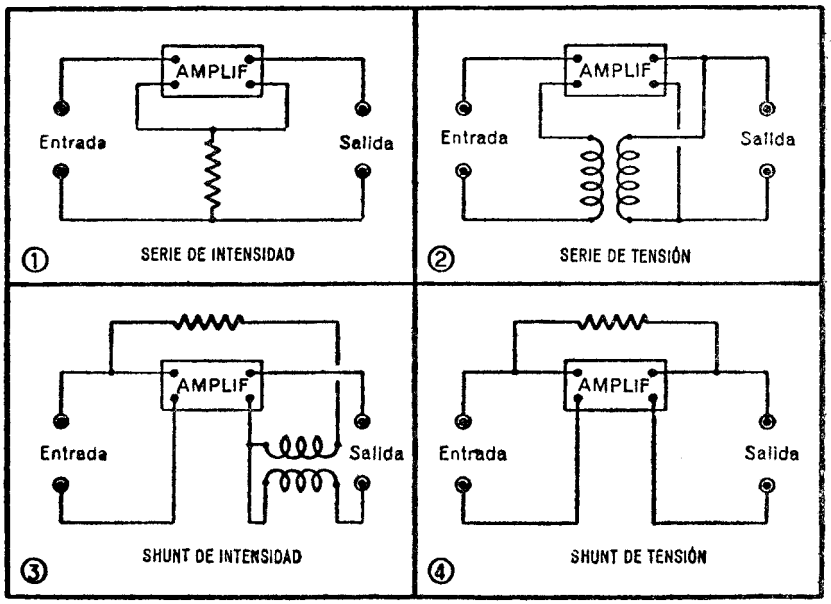
## Pasando al transistor.

CUR. — Con sus luminosas explicaciones me ha simplificado usted considerablemente la tarea. Porque —la casualidad hace las cosas verdaderamente bien— yo iba precisamente a hablarle de la contrarreacción en los transistores. He aquí, pues, los esquemas de contrarreacción de intensidad y de contrarreacción de tensión aplicados a los triodos a cristal. Se les designa también por los términos de *contrarreacción serie y paralelo* (o *shunt*).

IG. — Déjeme reconocerlos. En su primer esquema veo una resistencia $R_r$ que es común a los circuitos de base y de colector. Es exactamente lo mismo que en mi esquema con válvulas, en que la resistencia de contrarreacción era común a los circuitos de rejilla y de ánodo; su acción debe ser por lo tanto idéntica. Sin embargo, si usted me lo permite, voy a recurrir a nuestro método probado de las polaridades.




(1) En efecto, se pueden distinguir cuatro modos de contrarreacción esquematizados en nuestros dibujos. La contrarreacción puede ser aplicada en la entrada del amplificador, sea en serie, sea en paralelo (shunt) con la señal inicial. Puede ser engendrada por la corriente de salida (contrarreacción de intensidad) o por la tensión que se desarrolla en la impedancia de salida. Los modos 1 y 4 son los que se




emplean más corrientemente en el caso de un solo paso. Se encuentran los modos 2 y 3 en los pasos que atacan a un transformador y cuando se aplica la contrarreacción en dos pasos (ver, por ejemplo, la figura 61), en que se utiliza una contrarreacción serie de tensión.

CUR. — Se lo ruego encarecidamente.

IG. — Admitamos que una alternancia de la señal en la entrada hace a la base más negativa. La corriente del colector será aumentada. Y, debido a la caída de tensión en $R_r$, el emisor será más negativo con relación a la base, o, lo que viene a ser lo mismo, la base será más positiva con respecto al emisor. Todavía sigue siendo esto una contrarreacción, puesto que el choque de retroceso se produce en el sentido opuesto al choque inicial.

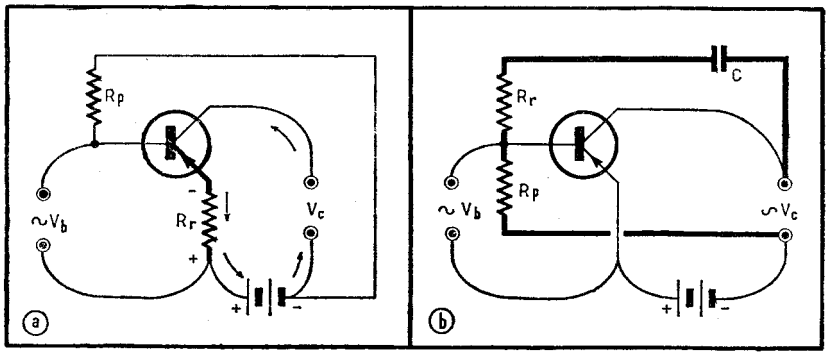
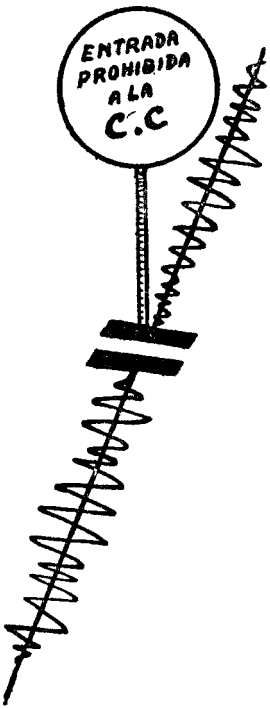



**Fig. 60. — Transposición en el campo de los transistores de los métodos de contrarreacción de la figura 59. — En a, la contrarreacción de intensidad (o montaje serie) con resistencia $R_r$ común a los circuitos de base y de colector. En b, contrarreacción de tensión (paralelo) en que una fracción de la tensión de colector es reinyectada en la base a través de C alimentando al divisor de tensión $R_r$-$R_p$.**




CUR. — Ha analizado usted perfectamente la situación. Pasemos ahora al segundo esquema.

IG. — Aquí la analogía con el montaje equipado con una válvula se hace evidente. Usted ha utilizado hábilmente la resistencia de polarización de la base $R_p$ para formar con la resistencia $R_r$ un divisor de tensión en derivación con la impedancia de salida. De este modo, una fracción de la tensión de salida de $v_c$ es aplicada entre base y emisor, es decir, reinyectándola en la entrada del transistor y, desde luego, en oposición de fase. Además, el condensador C, sin perjuicio de que deje pasar tensiones alternas, separa las continuas; así el potencial continuo de la base no depende más que de la resistencia $R_p$.

CUR. — Perfectamente. Observe también que, si la capacidad del condensador es insuficiente, dejan pasar menos fácilmente las frecuencias bajas, las cuales experimentarán el efecto de contrarreacción en menor grado que las frecuencias altas.

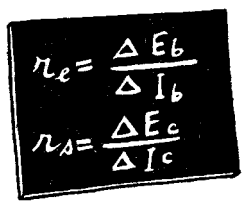
IG. — Dicho de otra manera, la ganancia será menos reducida para las notas graves, lo que las favorecerá. Este es un medio de acción sobre la tonalidad, no muy leal, en mi opinión, porque las distorsiones quedan así menos neutralizadas. Pero, para hacer que los receptores portátiles tengan más sonoridad, se puede utilizar este modo de variación de tonalidad.

CUR. — Veo que los acumuladores de su cerebro están bien cargados de fósforo. Por eso no dudo en rogarle que haga un pequeño esfuerzo para decirme lo que ocurre con las resistencias de entrada y de salida de un transistor, cuando se aplica la contrarreacción serie.

## Todavía algunas «deltas».

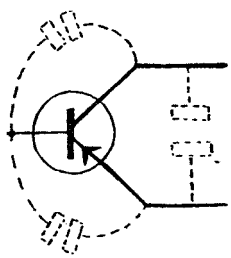
IG. — Volvamos a nuestras «deltas». La resistencia de entrada es la relación entre una pequeña variación de la tensión y la pequeña variación de la corriente de base que implica. Aquí, a consecuencia de la contrarreacción, las mismas variaciones de la tensión en la entrada tendrán menos efecto sobre la corriente de base. Dicho de otro modo, para una misma $\Delta E_b$, tendremos una $\Delta I_b$ más pequeña. Por consiguiente, su cociente, que es la resistencia de entrada, va a aumentar.

CUR. — Bien razonado. No quisiera agotar sus acumuladores mentales, por lo que le diré que analizando de la misma manera el comportamiento de la resistencia de salida hubiera usted visto que aumenta a causa de la contrarreacción. En cuanto a la contrarreacción en paralelo, ésta implica una disminución de la resistencia de entrada y también una ligera disminución de la resistencia de salida.




IG. — Cada vez estoy más admirado por la semejanza que el transistor ofrece con mi batería de cocina ensartada. En cuanto se toca alguna cosa, todo se pone en movimiento. ¿Es verdaderamente necesario aplicar la contrarreacción para embrollar aún más las cosas?

CUR. — No crea, Ignotus, que se hace únicamente para complicarle a usted la vida. La contrarreacción reduce las distorsiones, que en los transistores son tan peligrosas como en las válvulas, e incluso más en lo que concierne a las distorsiones de fase. Porque en los transistores utilizados para la amplificación en baja frecuencia, las capacidades entre emisor, base y colector son valores relativamente elevados. Es decir, que la fase de las señales amplificadas resulta afectada. Por otra parte, cuando la tensión de las pilas que alimentan los montajes con transistores comienza a disminuir, la contrarreacción, gracias a su efecto regulador, permite utilizarlas aún, al menos hasta un cierto límite.



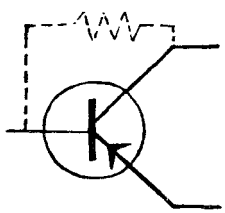
## Todavía una contrarreacción.

IG. — Esto es evidentemente muy útil y constituye una seria fuente de economía.

CUR. — Veo que esas consideraciones bajamente financieras le reconcilian con la contrarreacción. Observe de paso que, aunque usted no lo quiera, estará obligado a sufrirla presente e invisible.

IG. — ¿Qué misterio es ese?

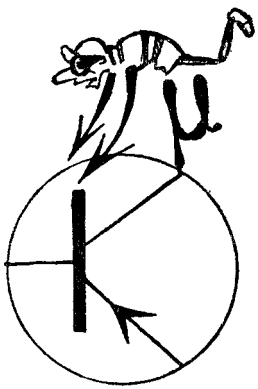
CUR. — El transistor presenta un fenómeno de contrarreacción interna, casi ausente en las válvulas. Es debido a la existencia de la resistencia interna de la unión base-colector, y cuyo valor es de algunos centenares de kilohmios.



IG. — ¿Cómo se manifiesta, pues, esta contrarreacción?

CUR. — Transmitiendo a la base una pequeña fracción de las tensiones alternas de salida. Se la puede medir haciendo variar la tensión de colector (en ausencia de carga) y midiendo la variación que esto produ-

ce en la tensión de base. En general, la variación de $E_b$ no representa más que algunas diezmilésimas de la variación de $E_c$. En otras palabras, el porcentaje de *contrarreacción interna* es del orden de 0,05 % como promedio. Se le designa por la letra $\mu$ («mu» griega).



IG. — Tengo la vaga impresión de que usted me ha dispensado caritativamente de la definición $\mu = \Delta E_b : \Delta E_c$, lo que agradezco... Pero, puesto que esta $\mu$ es tan pequeña, la contrarreacción no ejerce más que una influencia despreciable.

CUR. — Sí, a condición de que la resistencia de carga sea débil con relación a la resistencia de salida, lo que es el caso más frecuente.

## Cuestiones de fase.

IG. — Curiosus, usted adivina que me acucia el deseo de pasar al estudio de las realizaciones prácticas. Por otra parte, había prometido a mi

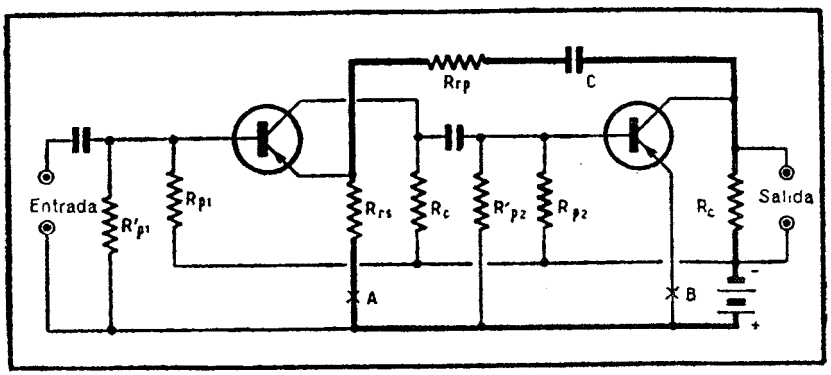



**Fig. 61. — Contrarreacción mixta serie-paralelo, en dos pasos de un amplificador B.F.**

tío Julio montarle un receptor con transistores perfeccionado, para que pueda llevárselo con él a Dakar, donde quiere cuidar al sol sus reumatismos. Proyecto poner allí un amplificador B.F. con dos pasos. ¿Puedo establecer una contrarreacción global en estos dos pasos, reinyentando en ellos la tensión de salida en la entrada?

CUR. — Sí. Sin embargo, con los transistores no se debe aplicar la contrarreacción en más de dos pasos. Porque, debido a estas capacidades internas de las que le hablé oportunamente, la fase gira en cada paso. Y, con más de dos pasos, no se sabe dónde está.

IG. — Dicho de otra manera, nos exponemos a producir reacción en lugar de contrarreacción.

CUR. — Esto no es muy imposible... Pero he aquí un esquema que le gustará. Son justamente dos pasos B.F. con acoplo por resistencias y capacidades. Y tomamos la tensión de salida para, a través del condensador C y por medio de las resistencias $R_{rp}$ y $R_{rs}$, aplicar una fracción de aquélla al emisor del primer transistor.

IG. — ¿Y por qué no a la base, como lo ha hecho usted para un paso?

CUR. — Porque cada paso determina una inversión de fase. Según esto, después de dos pasos, volvemos a tener la misma fase de las tensiones aplicadas a la entrada. Por lo tanto no se trata de inyectar las tensiones de salida en la base (lo que produciría reacción y por lo tanto una terrible oscilación o enganche). En cambio, se las aplica al emisor y así producimos una buena contrarreacción. Y, por añadidura, la resistencia $R_{rs}$ tendrá todavía por su parte un efecto de contrarreacción serie en el primer paso.

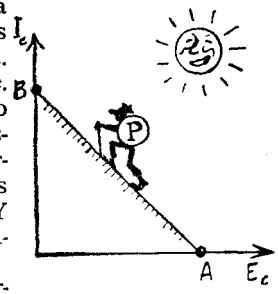
IG. — ¡Esto es magnífico! He aquí un montaje que hará las delicias de mi tío.

**Esto comienza a caldearse.**

CUR. — Temo que no. Porque mientras los rayos del sol tropical serán benéficos para él, serán nefastos para el receptor.

IG. — ¡Ah!, sí: la acción de la temperatura sobre los semiconductores. ¿Será necesario poner una bolsa de hielo encima del receptor? Y, lo primero, ¿en qué afecta al funcionamiento de un receptor el aumento de la intensidad de corriente debido a la elevación de la temperatura?

CUR. — Me había propuesto no hablarle hoy de las curvas, de las que parecía usted estar medianamente saturado. Pero piense sencillamente que la corriente de colector se duplica cada vez que la temperatura aumenta 8° C; de modo que, cuando se pasa de 0 a + 40° C, la corriente inicial aumenta 32 veces. Por consiguiente, un aumento general de la corriente de colector, tal como el que supone el calentamiento de los transistores, desplazará todas nuestras curvas desde $I_c$ hacia arriba. Entre 20 y 40° C, la corriente de colector puede duplicarse fácilmente. Además, el punto de funcionamiento (que está, se lo recuerdo, definido por la intersección de la recta de carga con una de las curvas correspondientes a una tensión o intensidad dada de base) en lugar de hallarse en el punto medio de la recta de carga, se desplazará más o menos hacia la izquierda, a consecuencia de la subida general de las curvas. Y entonces acaba nuestra bella simetría. Compromiso, ¡la perfecta linealidad de la amplificación!...




IG. — ¡Qué desastre! Me ha aterrado usted... pero no demasiado. Porque ya conozco su método: primero me sume en la más profunda aflicción para, inmediatamente, lo mismo que un prestidigitador sacando un conejo de un sombrero de copa, mostrarme el remedio que lo arregla todo. Vamos, ¿sáqueme un conejo!

CUR. — Ya lo conoce usted. Porque sigue siendo la contrarreacción la que nos va a sacar de dificultades. Eficaz para combatir la distorsión, lo es también para remediar las lentas fluctuaciones producidas por las variaciones de temperatura.

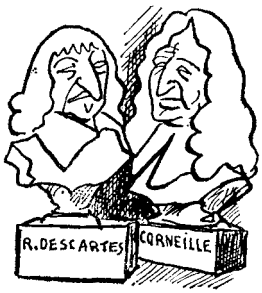
IG. — Por consiguiente, ¿los montajes de contrarreacción que hemos examinado sirven al mismo tiempo para compensar los efectos de la temperatura?

CUR. — Sí, en cierto modo, y cuando actúan igualmente en corriente continua (lo que no es el caso de la figura 60 b y 61). Pero, en general, a este fin es necesario una contrarreacción más enérgica.

IG. — Será entonces mucho más fuerte para nuestras señales a amplificar y reducirá con exceso la ganancia del montaje. ¿Cómo salir de esta situación corneliana?

CUR. — Adoptando el método cartesiano de separación de las dificultades y de las funciones. Demos de lado a las resistencias de contra-

rreacción que corrigen las señales a amplificar y ocupémonos de las que compensarán los efectos de temperatura. Entonces se puede utilizar la contrarreacción serie...




## Todavía un «pequeño detalle».

IG. — Pero no veo diferencia con el esquema de contrarreacción serie para tensiones alternas, aparte de la presencia del condensador C.

CUR. — Es precisamente ese «pequeño detalle» el que lo cambia todo. Porque es un condensador de gran capacidad (generalmente del

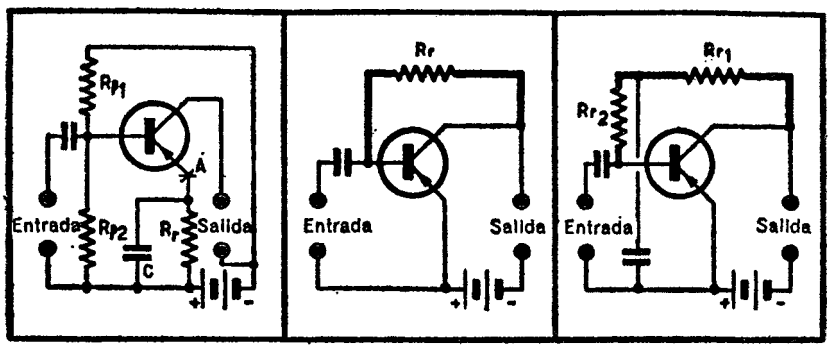
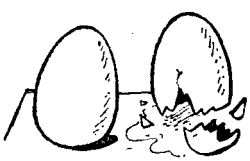



**Fig. 62. — Compensación de temperatura por contrarreacción serie. La tensión de la base es estabilizada por el divisor de tensión $R_{p1}$-$R_{p2}$.**

**Fig. 63. — Compensación de temperatura por contrarreacción paralelo.**

**Fig. 64. — Aquí sólo una parte de la resistencia de contrarreacción actúa sobre la componente alterna.**



tipo electrolítico) que ofrece a las corrientes alternas una impedancia muy inferior a la resistencia $R_r$. Esta última no será, pues, recorrida más que por la componente continua de la corriente y sólo ejercerá sobre ésta el efecto de contrarreacción.

IG. — Esto es sencillo e ingenioso como el huevo de Colón. ¿Pero qué hacer si, al mismo tiempo, deseamos tener una contrarreacción en alternativa?

CUR. — Nada nos impide entonces intercalar en el punto A, en serie con $R_r$, otra resistencia de contrarreacción, pero no desacoplada.

IG. — Esto es evidente. ¿Se puede aplicar todavía el principio de contrarreacción paralela de tensión?

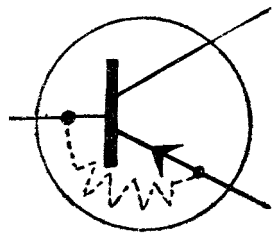
CUR. — Desde luego. Pero entonces se suprime el condensador que servía precisamente para no dejar pasar la componente continua. Así se aplica a la base una fracción de las tensiones continuas y alternas del colector.

IG. — Pues no veo el otro brazo del divisor de tensión que sirva para este fin.

CUR. — Y con motivo. Porque está constituido por la resistencia base-emisor del transistor. Ahora, si quiere proceder con esmero —y tendrá usted razón para hacerlo— es posible, con la ayuda de un condensador de desacoplo C, suprimir la componente alterna de una parte de la resistencia de contrarreacción constituyéndola con dos resistencias $R_{r1}$ y $R_{r2}$ en serie.

IG. — Para volver a mi pobre tío, si yo he comprendido bien, podré compensar los efectos de temperatura intercalando resistencias en los puntos A y B (fig. 61).

CUR. — Seguramente, a condición de desacoplar la primera por un condensador de gran capacidad para que no refuerce desmesuradamente la contrarreacción, pero todavía no le he hablado de un procedimiento muy elegante de solventar los inconvenientes del comportamiento térmico de los semiconductores. Consiste en ponerlos a contribución para combatirlo.



## Utilización de los defectos.

IG. — ¿Es esto serio? ¿Se trata de alguna cosa del género de la homeopatía, en que se cura el mal con el propio mal?

CUR. — Es así como hay que interpretarlo. Puesto que el calentamiento aumenta la intensidad de la corriente en los semiconductores,

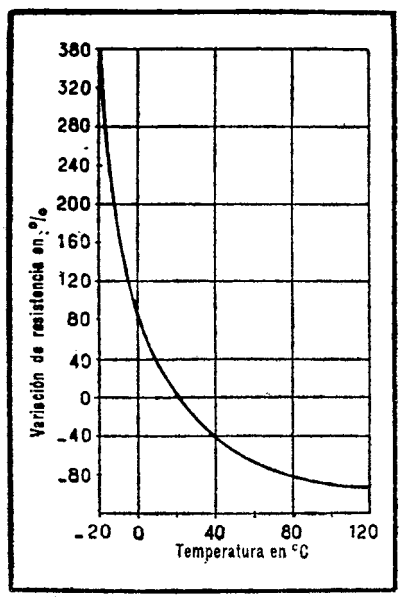
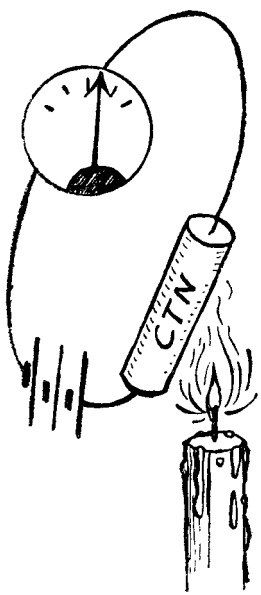



**Fig. 65. — Variación (en %) de la resistencia de una termistancia en función de la temperatura con relación al valor que tiene a la temperatura ambiente de 20° C.**




su resistencia disminuye cuando su temperatura aumenta. Por lo tanto, se pueden fabricar resistencias compuestas de semiconductores, del tipo P o N, cuya resistencia disminuye muy rápidamente con el aumento de la temperatura. Aquí está la curva de una de estas resistencias: llamadas *termistancias* o resistencias con coeficiente negativo de temperatura (en abreviatura C.T.N.). Vea usted que cuando la temperatura

pasa de 20 a 40° C, la resistencia de la termistancia disminuye un 45 % aproximadamente. Y, a 60° C, disminuye más de la mitad.

IG. — Aquí tenemos una resistencia que soporta muy mal el calor. Me pregunto cómo la va usted a utilizar para, precisamente, neutralizar los estragos del calor.

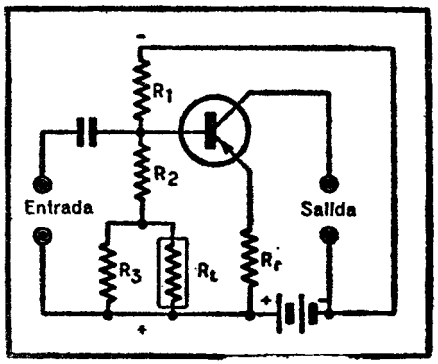
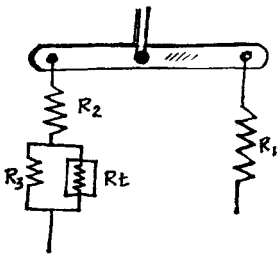



**Fig. 66. — Compensación de los efectos de temperatura por medio de una termistancia $R_t$ que gobierna al potencial de la base.**

CUR. — Muy sencillamente, colocándola en el divisor de tensión que fija la polarización de la base. Uno de los brazos de la balanza, que es lo que viene a ser todo divisor de tensión, es la resistencia $R_1$. En cuanto al otro, su composición es más compleja: está constituido por la termistancia $R_t$ con $R_3$ en paralelo, y $R_2$ en serie con las dos. ¿Qué ocurrirá entonces cuando aumente la temperatura?

IG. — La resistencia de la termistancia disminuye, lo que hace disminuir la resistencia de todo el brazo compuesto de $R_2$, $R_3$ y $R_t$. Como la resistencia de $R_1$ no disminuye (e incluso aumenta ligeramente con la temperatura), el potencial de la base se hará menos negativo. Y esto producirá una disminución de la corriente de colector. ¡Estupendo!




CUR. — Usted ve que el arte supremo en la vida es cambiar los defectos de las cosas (o de los seres) en cualidades buenas. Es lo que hemos realizado aquí.

IG. — ¿Pero por qué ha complicado usted el esquema con estas resistencias $R_2$ y $R_3$?

CUR. — Para que se efectúe la compensación con precisión. Es necesario que los valores de estas resistencias sean calculados de manera adecuada. A veces se puede omitir una u otra si la característica de la termistancia responde exactamente a nuestros deseos.

IG. — Tengo la sensación de que mi propia resistencia disminuye porque mi cerebro está demasiado caldeado.

CUR. — Entonces dejémosle descansar.

NOVENA CHARLA

**En el curso de sus precedentes conversaciones, Curiosus e Ignotus han adquirido un sólido conocimiento del comportamiento de los transistores utilizados, así como de los amplificadores. A este fin han analizado el montaje más corrientemente utilizado en que las señales amplificadas son aplicadas entre base y emisor, y recogidas, después de la amplificación, entre colector y emisor. Esto corresponde al montaje clásico de las válvulas electrónicas. Sin embargo, y con el mismo fin que para estas últimas, en ciertos casos se pueden emplear ventajosamente otros esquemas. Es muy útil examinar la estructura y el funcionamiento de ellos antes de pasar al estudio de los montajes prácticos que nuestros amigos van a emprender en sus próximas charlas.**

**SUMARIO: Montajes de las válvulas con cátodo, rejilla o ánodo a masa. — Montaje de los transistores con emisor común, con base común o con colector común. — Amplificación de corriente y tensión de los tres montajes fundamentales. — Sus resistencias de entrada y de salida. — Cuadro sinóptico de las características.**

# E.C. - B.C. - C.C.

## La casualidad en la historia de los inventos.

IGNOTUS. — ¿Cómo es que el transistor ha sido inventado más de 40 años después que la válvula electrónica? Sin embargo, a primera vista es más sencillo introducir impurezas en un semiconductor que practicar el vacío en una ampolla de vidrio y calentar en ella un cátodo que proyecte electrones hacia el ánodo a través de una rejilla.

CURIOSUS. — En la historia de los inventos, la casualidad desempeña un cierto papel. Y el transistor hubiera podido ser inventado antes que la válvula electrónica. Por lo demás, experimentando detectores de cristales de cincita, en 1922 un técnico ruso, llamado Lossev, consiguió engendrar y amplificar oscilaciones eléctricas. Su montaje (llamado «cristadyne») no tuvo trascendencia. Pero si el transistor hubiese sido inventado antes que la lámpara, se hubiera acogido la aparición de la válvula como un gran perfeccionamiento... y se hubiera aplicado a los triodos electrónicos los diversos esquemas fundamentales empleados para los triodos a cristal. Así se hubieran hallado los montajes con cátodo a masa, rejilla a masa y ánodo a masa.

IG. — ¿Qué son estos paseos a masa?

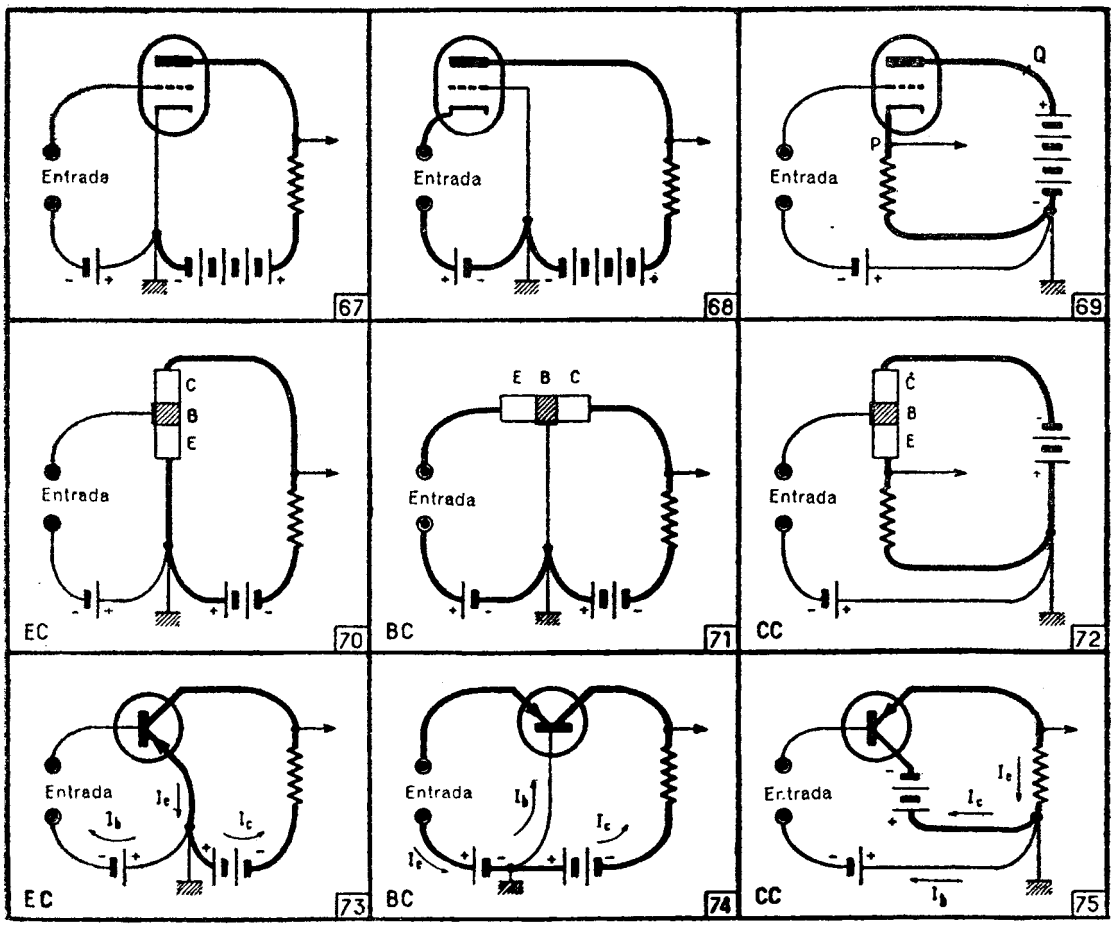
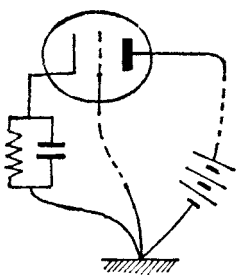



**Fig. 67. — Montaje con cátodo a masa, el más clásico de todos.**
**Fig. 68. — Montaje con rejilla a masa.**
**Fig. 69. — Montaje con ánodo a masa o catodino.**
**Fig. 70. — Montaje con emisor común, el más empleado de todos.**
**Fig. 71. — Montaje con emisor común, el más antiguo de todos.**
**Fig. 72. — Montaje con colector común.**
**Figs. 73, 74 y 75. — Los tres montajes fundamentales con transistores representados de manera que indiquen bien que, en el punto común, la corriente del emisor $I_e$ se divide en dos: la corriente de base $I_b$ y la corriente de colector $I_c$.**



## Los tres montajes fundamentales para válvulas.

CUR. — Usted sabe, Ignotus, que, por «masa», entendemos el punto de potencial fijo. En un esquema con válvulas es el punto en que convergen los circuitos de rejilla y de ánodo.

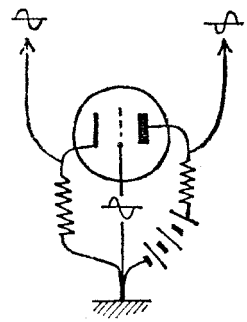
IG. — Me parece que es siempre al cátodo a donde van a parar los retornos de estos dos circuitos.

CUR. — Esto es en el caso del montaje más conocido, que se designa con el nombre de «cátodo a masa» (aunque entre el cátodo y masa haya una resistencia de polarización, puesto que ésta es prácticamente cortocircuitada por un condensador para las tensiones alternas). Sin embargo, ¿ha olvidado usted el montaje con rejilla a masa?

IG. — En efecto, lo hemos encontrado cuando estudiábamos la modulación de frecuencia. Utlizado para la amplificación de señales de frecuencias elevadas, permite separar mejor el circuito de entrada respecto al de salida, desempeñando la rejilla la misión de pantalla de protección. Y lo que sirve de electrodo de mando es el cátodo.

CUR. — Queda aún una tercera posibilidad: fijar el potencial del ánodo conectándolo a masa (a través de la fuente de alta tensión, desde luego), aplicar la señal de entrada entre la rejilla y la masa, y recoger la tensión amplificada en una resistencia de carga intercalada entre el cátodo y la masa.

IG. — Extraño montaje. Verdad es que aquí también la resistencia de carga está recorrida por la corriente anódica, de modo que se vuelve a encontrar allí la tensión amplificada.



CUR. — He hecho mal en emplear este último término. En efecto, la ganancia de nuestro montaje, llamado *catodino*, es inferior a la unidad. Porque la resistencia de carga ejerce un efecto de contrarreacción tal que en lugar de amplificación lo que se obtiene es una atenuación.

IG. — ¿Entonces este montaje no tiene interés?

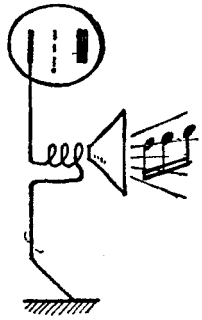
CUR. — Muy al contrario. Observe ante todo que las tensiones que aparecen en la resistencia de carga, en el punto P, están en fase con las aplicaciones a la rejilla.

IG. — Y por esta misma razón se tiene esta violenta contrarreacción.

CUR. — Seguramente. Pero si usted intercala una segunda resistencia de carga en el punto Q, es decir según el modo clásico del montaje con cátodo a masa...

IG. — ... tendré en este punto tensiones en oposición de fase con las de la entrada. Así, pues, la misma válvula permite obtener a la salida tensiones en concordancia y en oposición de fase. ¡Qué montaje tan práctico para atacar dos válvulas en push-pull (contrafase).

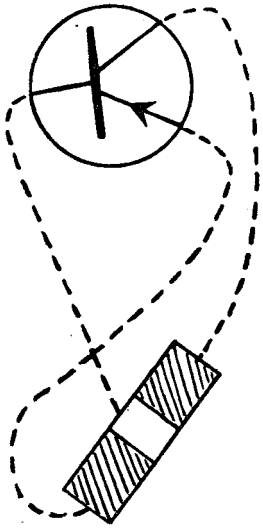
CUR. — Es uno de los usos del catodino. Pero se utiliza también en el caso en que haya necesidad de una resistencia débil de salida. Porque sin duda, la resistencia de carga situada en el cátodo debe tener un valor muy inferior a los que se emplean en el circuito anódico. De esta manera se puede hacer que una válvula de salida ataque directamente la bobina móvil del altavoz sin pasar por un transformador intermedio adaptador de impedancia, eliminando así una causa de distorsiones no despreciable.



IG. — Me ha conquistado usted definitivamente con su catodino. Pero, yo le conozco y le veo venir con sus artificios, Curiosus. Si usted me habla con tanto interés de estos tres montajes fundamentales con válvulas, es sin duda para analizar esquemas equivalentes con transistores.

## Versión transistores.

CUR. — No se le puede ocultar a usted nada. Efectivamente, a cada uno de estos tres montajes correspode un modo particular de utiliza-



ción de los transistores. Para mayor claridad le dibujo los esquemas correspondientes de dos maneras. Por un lado, represento el transistor por una barrita, como lo hacíamos al principio; así se ve mejor el camino de la corriente entre las tres regiones del transistor, y a veces lamento que no se haya adoptado este símbolo universalmente. Por otro lado, dibujo los mismos esquemas con el símbolo habitual. Pero entonces, en vez de cuidar la presentación del esquema trazando rectas horizontales y verticales, lo que hago es esforzarme en poner bien en evidencia los circuitos de base y de colector. Y —para mayor claridad aún— he destacado en *trazos gruesos* los circuitos *anódicos* de las válvulas y los circuitos de *colector* de los transistores.

IG. — En efcto, sus dibujos no se parecen mucho a ninguno de los que he visto en otros sitios. Pero por lo menos parecen sencillos. Veo que todavía tenemos tres posibilidades: emisor a masa, base a masa o colector a masa.

CUR. — En efecto. Pero la presencia de la masa es facultativa y a estos tres esquemas se les llama *montaje de emisor común, montaje de base común y montaje de colector común.*

IG. — El hecho es que, en cada uno de estos montajes, es una de estas tres zonas del transistor la que es común a los circuitos de entrada y de salida... Y me ocurre como al hidalgo campesino, M. Jourdain, que no sabía que hablaba en prosa, puesto que al examinar con usted el montaje de emisor común, yo no sabía que se le llama así.

CUR. — En efecto. Nos hemos extendido largamente sobre este montaje porque es el que más se emplea.

IG. — Por la misma razón que, con las válvulas, el clásico esquema de cátodo común.

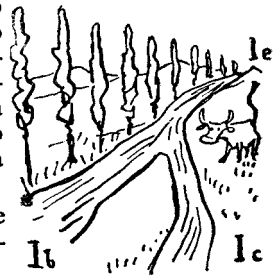
CUR. — Así es. Correctamente empleado, este montaje puede procurar una excelente ganacia, tanto en corriente como en tensión y, por consiguiente, también en potencia. Le recuerdo que la tensión de salida en este montaje de emisor común (o E.C.) está en oposición de fase con respecto a la de la entrada, y que la resistencia de entrada es de algunos centenares de ohmios, mientras que la resistencia de salida es de algunas decenas de kilohmios.

## ¿Es esto un amplificador?

IG. — Todo eso se ha grabado bien en mi memoria. ¿Puedo aventurarme en el campo de lo desconocido, tratando de analizar el montaje de base común (o, sin duda, B.C. en abreviatura)? Allí las tensiones de entrada son aplicadas igualmente entre emisor y base. Pero, esta vez, es el emisor el que desempeña el papel de electrodo de mando, permaneciendo pasiva la base. Si la señal de entrada hace al emisor más positivo, la coriente de base aumenta y también la del colector; entonces aumenta a su vez la caída de tensión en la resistencia de carga, y el potencial de salida se hace más positivo. No hay duda: la tensión de salida está aquí en fase con la de entrada.

CUR. — Su análisis de la situación es absolutamente correcto, pero incompleto. Porque usted no ha examinado cuál es aquí la amplificación de corriente.

IG. — Bueno, hay alguna cosa que no veo clara. En el circuito de entrada tengo la corriente del emisor $I_e$, mientras que en el circuito de salida no tengo más que la corriente de colector $I_c$, que es ligeramente menor, porque la corriente del emisor se divide (el dibujo lo muestra bien) en dos corrientes: la de base $I_b$ y la de colector $I_c$. Y lo que es cierto para las corientes, lo es también para sus débiles variaciones. Por consiguiente, la amplificación de corriente, es decir la relación entre una pequeña variación de la corriente de salida $\Delta I_c$ y una pequeña variación de la entrada $\Delta I_e$, será menor que la unidad, puesto que $I_e$ es mayor que $I_c$. En lugar de ganancia lo que tendremos será una atenuación (1).




CUR. — Sí. Se la designa por la letra $\alpha$ mientras que, para el montaje de emisor común, la amplificación de corriente se simboliza por la letra $\beta$.

IG. — No es lógico emplear la primera letra del alfabeto griego en un montaje que es el que menos se utiliza.

CUR. — Para ello hay una razón histórica. En los primeros tiempos de los transistores no se conocía más que el modelo de puntas. Y sólo el montaje de base común permitió utilizarlo de manera estable. Por lo tanto es el primero cronológicamente, y, por esta razón, los fabricantes indican a menudo las características para esta clase —a pesar de estar periclitada— de empleo de los triodos a cristal.

IG. — En resumen, abstracción hecha del piadoso respeto debido a las cosas de antaño, el montaje de base común no presenta ningún interés, puesto que en lugar de amplificar, atenúa.

## Algo más que una curiosidad histórica.

CUR. — He aquí el peligro de las conclusiones tan apresuradas como definitivas que caracterizan la nueva generación... El montaje B.C. es en muchos casos muy interesante. Permite alcanzar frecuencias más elevadas que los otros montajes. Y por otra parte es capaz de asegurar una excelente amplificación.

---

(1) Se puede expresar fácilmente esta "ganancia", que se designa por $\alpha$ indicando que:

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c + \Delta I_b}$$

puesto que $\Delta I_e = \Delta I_c + \Delta I_b$.

Dividiendo en la relación anterior el numerador y el denominador por $\Delta I_b$ se tiene:

$$\alpha = \frac{\Delta I_c/\Delta I_b}{\Delta I_c/\Delta I_b + 1}$$

Se ve que $\alpha$ es menor de la unidad. Por otra parte, $\Delta I_c/\Delta I_b$ es, como se sabe, la amplificación de corriente en el montaje de emisor común, que designamos por $\beta$.
Por consiguiente:

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

Para los transistores que tengan un coeficiente $\beta$ de valor elevado, se aproxima sensiblemente a la unidad; dicho de otro modo, la corriente experimenta en la salida sensiblemente las mismas variaciones que en la entrada.

IG. — ¿Es que quiere usted tomarme el pelo? ¿Ha llamado amplificación a una ganancia inferior a 1?

CUR. — Se trata de la ganancia de intensidad. Pero lo que le puede interesar aún más, según el caso, es la ganancia de tensión y sobre todo de potencia. En cuanto a esto, la situación es más satisfactoria. Para que usted se de cuenta, es necesario decirle que la resistencia de entrada del montaje B.C. es muy débil; según el modelo, varía de 30 a 500 Ω.

IG. — No tiene nada de asombroso puesto que es la relación entre una pequeña variación de la tensión en la entrada y la variación de la corriente que provoca. Ahora bien, aquí es la corriente del emisor la que está en juego. Y varía mucho. Por lo tanto, la relación tiene un valor muy bajo.

CUR. — Bien razonado. En cambio, la resistencia de salida pueda alcanzar valores muy elevados, del orden del megohomio.

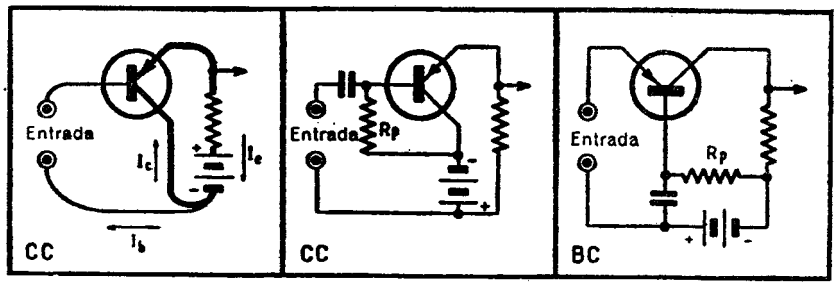



**Fig. 76. — Variante posible del montaje con colector común, no difiriendo del de la figura 75 más que por la posición de la fuente de tensión del colector.**

**Fig. 77. — Modo de polarización del montaje de la figura 75.**

**Fig. 78. — Modo de polarización del montaje de la figura 74.**

IG. — ¡Torpe de mí! Ahora comprendo que una variación de la corriente de salida, sensiblemente igual a la de la corriente de entrada, debe hacer aparecer en esta elevada resistencia de salida tensiones tan fuertes como las que se originan en la entrada. Entonces debemos tener una ganancia elevada de tensión... Efectivamente.

CUR. — Sí. Puede ser de varios millares. Y por esto se pueden obtener también una buena ganacia de potencia. Desafortunadamente, no se la puede aprovechar convenientemente.

IG. — Me somete a una verdadera ducha escosesa, Curiosus. Después que ha conseguido rehabilitar a duras penas a la B.C. en mi opinión, se pone usted a desacreditarla. ¿Por qué?

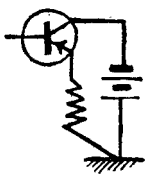
CUR. — Porque nuestro paso B.C. puede ir seguido de otros pasos cuya impedancia de entrada, mucho menor que la de la B.C. nos hará perder el beneficio de la ganacia procurada gracias a esta resistencia de salida elevada.

## El tercer montaje.

IG. — ¡Esta vez, esto está acabado definitivamente! No quiero oír hablar más de este dichoso montaje de base común. Y espero que el

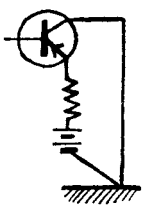
montaje de colector común (designado sin duda por las iniciativas C.C.) será menos decepcionante.

CUR. — Antes de emprender el análisis, le haré observar que existen dos variantes, según que la batería de tensión de colector esté colocada entre masa y colector o entre resistencia de carga y masa. Esto viene a ser lo mismo. Pero, en la segunda variante, la base es polarizada automáticamente con respecto al emisor.



IG. — Pero entonces, en la primera variante, ¿es enecesario una pila especial para la polarización?

CUR. — De ninguna manera, una sencilla resistencia de polarización $R_p$, colocada entre la base y el negativo de la pila, sirve perfectamente, lo mismo que ocurría en el caso del montaje E.C. Y, a propósito, le doy el montaje práctico de polarización en el caso de B.C.



IG. — Prefiero esto a las dos baterías que figuran en sus esquemas teóricos, para la mayor alegría de los fabricantes de pilas... Pero, volviendo a nuestro montaje C.C., no veo que haya en él inversión de fase a la salida. En efecto, un potencial más negativo en la base hace aumentar la intensidad de la corriente del emisor, que determina una caída de tensión más fuerte, haciendo al emisor menos positivo, o sea más negativo.

CUR. — Pues sí, Ignotus. De nuestros tres montajes, el único que puede invertir la fase de las señales es el E.C. Veamos ahora donde está en él la amplificación de corriente.

IG. — Aquí, en la entrada, tenemos la corriente de base, que es siempre muy débil. Por el contrario, en la salida, tenemos la más intensa de nuestras corrientes, la del emisor. Por consiguiente, debemos tener aquí una amplificación de corriente aún mayor que en el montaje E.C. ¿Tendría usted inconveniente en que, continuando con el uso del alfabeto griego, la llame $\gamma$ (gamma) (1)?

CUR. — No pienso que los griegos se opongan a ello. Y ya le veo a usted encantado de conocer este montaje que amplifica también. ¿Tendrá que verter agua fría en su entusiasmo juvenil?

IG. — Me parece que me va usted a propinar un mal golpe anunciándome que aquí las resistencias internas son tales que nuestra hermosa amplificación de corriente no nos va a servir para nada, lo contrario de lo que ocurre en el montaje B.C.

CUR. — No le oculto que ésta es la triste verdad. Aquí, como en el montaje catodino, del cual éste es la réplica con transistores, la resistencia de entrada puede llegar a 1 MΩ, mientras que la de salida es muy pequeña: entre 50 y 500 Ω.

IG. — ¡Todo lo contrario que en B.C.! ¿De modo que no ganamos nada en tensión ni en potencia?

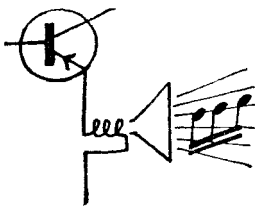
CUR. — Nada o casi nada, Ignotus. Por otra parte, usted podría haberse dado cuenta de ello observando que la resistencia de carga intro-

(1) La amplificación de corriente en C.C. es:

$$\gamma = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c + \Delta I_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} + \frac{\Delta I_b}{\Delta I_b} = \beta + 1$$

Se ve que en C.C. la ganancia de corriente es algo más elevada que en el montaje E.C. Entre las expresiones de ganancia de estos tres montajes fundamentales se puede establecer una relación muy sencilla:

$$\alpha \times \gamma = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \times \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_b}{\Delta I_c} = \beta$$

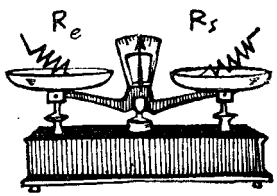


ducida aquí tiene una contrarreacción muy fuerte. Cuando una alternancia de la señal tiende a hacer la base más negativa con relación al emisor, aumentando la corriente de éste, el aumento de corriente hace al emisor más negativo, lo que se opone a la acción de la señal de entrada.

IG. — ¿Para qué sirve, pues, este montaje, incapaz de procurarnos una ganancia, por poco interesante que sea, de tensión o de potencia?

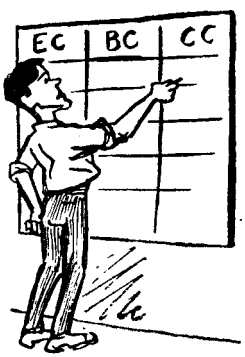
CUR. — Se le emplea en ciertos casos cuando hay necesidad de una corriente intensa para atacar un transistor de potencia o bien cuando una pequeña resistencia de salida permite obtener mejor adaptación de impedancias como, por ejemplo, el ataque directo de la bobina móvil de un altavoz.

IG. — Observo una vez más que se verifica la vieja máxima «en el medio está la virtud». En los transistores, este justo medio es indudablemente el montaje de emisor común en que las resistencias de entrada y de salida tienen valores medios, lo que permite obtener ganancias convenientes, tanto en intensidad como en tensión y en potencia.




CUR. — Tiene usted razón, Ignotus. Los valores de las resistencias de entrada y de salida son como los dos platillos de una balanza. Sensiblemente al mismo nivel en E.C., el platillo $R_e$ baja en B.C. y sube en C.C. con respecto al platillo $R_s$. Y si usted me promete no decirlo a nadie, le voy a confiar un secreto. Para un transistor dado, el producto $R_e \times R_s$ de la resistencia de entrada por la resistencia de salida, permanece invariable en los tres montajes fundamentales.

IG. — Así, por ejemplo, si en E.C. se tiene $R_e = 500\ \Omega$ y $R_s = 20.000\ \Omega$, el producto es de 10.000.000. El mismo transistor montado en B.C., tendrá, digamos $R_e = 50\ \Omega$; en este caso, para que el producto permanezca constante es necesario que $R_s = 200.000\ \Omega$. Y, si en C.C. es $R_e$ el que tiene 200.000 Ω, $R_s$ debe tener 50 Ω... Si lo permite, voy a resumir en una tabla las principales características de nuestros tres montajes, de modo que se las pueda comparar mejor.




CUR. — Excelente idea, que nos permite poner punto final agradablemente a nuestra muy útil charla de hoy (1).

(1) En la nota precedente hemos establecido una relación muy sencilla entre los coeficientes de amplificación y de corriente de los tres montajes fundamentales:

$$\beta = \alpha \times \gamma \text{ o } \alpha = \frac{\beta}{\gamma}$$

La tabla que sigue permite expresar cada uno de estos coeficientes en función de cada uno de los otros dos:

| MONTAJE | EC | BC | CC |
|---|---|---|---|
| EC | $\beta$ | $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ | $\beta = \gamma - 1$ |
| BC | $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$ | $\alpha$ | $\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$ |
| CC | $\gamma = 1 + \beta$ | $\gamma = \frac{1}{1 - \alpha}$ | $\gamma$ |

| MONTAJE | EMISOR COMÚN | BASE COMÚN | COLECTOR COMÚN |
|---|---|---|---|
| ESQUEMA | | | |
| **Resistencia de entrada** $r_e$. | $\Delta E_b / \Delta I_b$ 200 a 2 000 Ω | $\Delta E_e / \Delta I_e$ 30 a 1 500 Ω | $\Delta E_b / \Delta I_b$ 0,2 a 1 MΩ |
| **Resistencia de salida** $r_s$. | $\Delta E_c / \Delta I_c$ 10 a 100 kΩ | $\Delta E_c / \Delta I_c$ 0,6 a 2 MΩ | $\Delta E_e / \Delta I_e$ 50 a 500 Ω |
| **Amplificación de corriente.** | $\beta = \Delta I_c / \Delta I_b$ De 20 a 200 | $\alpha = \Delta I_c / \Delta I_e$ menos de 1 | $\gamma = \Delta I_e / \Delta I_b$ De 20 a 200 |
| **Amplificación de tensión.** | varios centenares | varios centenares o millares | 1 aproximadamente |
| **Amplificación de potencia.** | varios millares | varios centenares | varias decenas |
| **Fase de la tensión de salida con referencia a la tensión de entrada.** | Oposición | En fase | En fase |
| **UTILIZACION** | Universal. Amplificador y desfasador | En M. A. F. Para atacar una impedancia elevada | Para atacar una impedancia débil |

**Fig. 79. — Tabla en que se resumen las principales características de los tres montajes fundamentales de los transistores.**

DOS CARTAS

**Tanto (y posiblemente más) como en el campo de las válvulas, el problema de la adaptación de las impedancias desempeña un papel primordial en la concepción de los montajes con transistores.**

**Sin embargo, Ignotus tiene alguna dificultad en comprender bien este problema debido a la insuficiencia de sus nociones básicas de electricidad. Por esto Curiosus se ve obligado a remediarlo exponiendo a su amigo estas nociones elementales que, bien considerado, hay técnicos que no las han asimilado completamente... (Desde luego, el lector que sabe lo que quiere decir adaptación de impedancias está dispensado de leer el diálogo epistolar de nuestros amigos.)**

**SUMARIO: La fuente y la utilización. — Fuerza electromotriz y resistencia interna. — Tensión en los bornes. — Mando por tensión. — Mando por corriente. — Condiciones óptimas de la transferencia de energía. — Adaptación de las impedancias. — Empleo del transformador. — Relación de transformación óptima.**

# CUESTIONES DE ADAPTACIÓN

## IGNOTUS ESCRIBE A CURIOSUS

*Mi querido Curiosus:*

*Si bien esta estúpida gripe me priva del placer de entrevistarme con usted, no me impide reflexionar en todo lo que me ha explicado desde nuestra primera charla.*

*Así he comprobado que usted daba una gran importancia a la cuestión de las resistencias de entrada y de salida. Sus valores cambian según el montaje adoptado. Y ha insistido usted varias veces en la cuestión de adaptación (?) de las resistencias.*

*Confieso no haber comprendido muy bien esta parte de su exposición. Me ocurre lo que a un semiconductor del tipo P: ¡Tengo lagunas!*

*¿Podría usted llenarlas? Se lo agradezco por anticipado.*

*Su amigo Ignotus.*

## CURIOSUS CONTESTA A IGNOTUS

«Mi pobre Ignotus:

¡Todas las calamidades a la vez! La gripe y las lagunas...

Su médico se encargará de la primera. Yo me esforzaré en hacer desaparecer las segundas.

Sí, el problema de la adaptación de las resistencias (o, más generalmente, de las impedancias) es muy importante y quiero que usted lo asimile bien.

En todos los montajes que debemos examinar, se trata de encaminar la energía eléctri-

ca de un órgano a otro, con el mínimo de pérdidas, sin despilfarros. Dicho de otra manera, con el mayor rendimiento.

Hay siempre un órgano o componente de partida, y uno de llegada. El primero es, en lo que concierne al segundo, la *fuente de energía*. Y en lo que respecta a esta fuente, el segundo componente al cual entrega su energía, es la *utilización*. En resumen, proveedor y cliente.

Excúseme. Ignotus, de proferir así verdades evidentes, confiriéndoles un cariz filosófico. En efecto, usted siempre tiene que ocuparse de estas fuentes y estos órganos de utilización. La pila de la lámpara de bolsillo es una fuente, y el filamento de la bombilla que alimenta es la utilización. Los alternadores de una central eléctrica son la fuente, y todos los motores, todos los aparatos de alumbrado y de calefacción conectados a la red de distribución son la utilización.

Pero también el circuito de antena de un receptor es una fuente, y el circuito de entrada de la válvula preamplificadora R.F., que aquél ataca, es la utilización. De la misma manera, la válvula de potencia es la fuente, y el altavoz, la utilización.

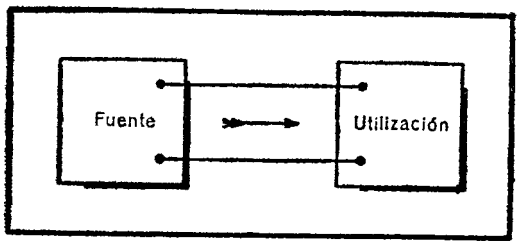



**Fig. 80. — He aquí cómo, en la forma más general, se presenta el problema de transferencia de la energía de la fuente a la utilización.**

En el caso de los montajes con transistores, la salida de cada transistor constituye igualmente la fuente para la entrada del paso siguiente, que es su utilización.

Pero, ¿para qué prodigar más los ejemplos? En cambio, lo que es necesario comprender bien, es que una fuente está caracterizada por dos magnitudes:

1) *Su fuerza electromotriz.* Es la tensión máxima que aquélla es capaz de hacer aparecer en sus bornes; esto es, si usted quiere, su vitalidad... La tenemos en los bornes de la fuente cuando ésta no está suministrando corriente.

2) *Su resistencia interna.* Porque toda fuente opone al paso de la corriente que la recorre una resistencia y, más generalmente, una cierta *impedancia de la fuente.*

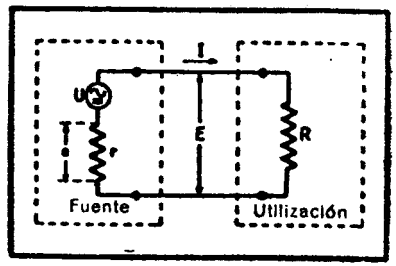



**Fig. 81. — La fuerza electromotriz U continua o alterna de la fuente crea una corriente I a través de su resistencia interna r (en la cual se produce una caída de tensión e) y la resistencia de utilización R (en la cual aparece la tensión E).**

En esta resistencia interna *r*, la corriente entregada por la fuente determina, desde luego, una caída de tensión, en detrimento de la tensión E que aparece en los bornes de la fuente, y que es aplicada a la resistencia de utilización R. Así, la tensión E permanece inferior a la fuerza electromotriz U, y esto tanto más cuanto mayor es la corriente I. Evidentemente, si no hay corriente, en los bornes de la fuente habrá una tensión igual a su fuerza electromotriz. Entonces se dice que la fuente está en *circuito abierto* o que la utilización tiene una *resistencia infinita:*

A riesgo de hacer subir su fiebre, le propongo examinar estos tres cálculos elementales. La resistencia total del circuito es $r + R$. Por consiguiente, según la ley de Ohm, la intensidad de la corriente es:

$$I = \frac{U}{r + R}$$

En la resistencia interna *r*, esta corriente determina una caída de tensión:

$$e = \frac{Ur}{r + R}$$

Y en la resistencia de utilización R, la caída de tensión es:

$$E = \frac{UR}{r + R}$$

Si aún conserva la fuerza suficiente para coger un lápiz, sume estas dos tensiones y hallará que:

$$e + E = U$$

lo que era de esperar. Ya ve usted que la fuerza electromotriz se reparte en dos tensiones: *e*, que es la caída de tensión interna, y E, que es la tensión aplicada a la utilización, es decir la que aparece en los bornes de la fuente. Este reparto se efectúa proporcionalmente a los valores de la resistencia de la fuente y de la utilización.

Si la resistencia interna de la fuente es muy pequeña en comparación con la de la utilización, la caída de tensión que se produce en el interior es también muy pequeña. Y la tensión en los bornes E permanece casi tan grande como la fuerza electromotriz U. En estas condiciones, una fuerza electromotriz variable se manifiesta en la resistencia de utilización por una tensión variable y estamos en presencia de un *mando por tensión.*

Tome ahora el caso opuesto: la resistencia interna *r* de la fuente es mucho mayor que la de la utilización. La caída de tensión que se produce en el interior de la fuente es entonces considerable. Y, la tensión E que queda disponible en sus bornes, y que es aplicada a la resistencia de utilización, es mucho menor que la fuerza electromotriz U. Entonces lo que cuenta es el hecho de que la intensidad I de la corriente varía proporcionalmente a U no dependiendo apenas del valor de R. Y se considera que, en este caso, se tienen un *mando por corriente.*

Con los transistores pueden ocurrir estos dos casos extremos. Pero, en general, aquí también es preferible el justo medio.

En los acoplamientos entre válvulas procuramos aplicar a la entrada de cada paso la máxima tensión. Y luego Dios arregla muy bien las cosas. Porque la entrada rejilla-cátodo de una válvula presenta generalmente una impedancia infinita. Así, todo la fuerza electromotriz se encuentra aquí aplicada. Es el caso típico de mando por tensión.

Pero, mi querido Ignotus, con los transistores las cosas cambian de aspecto: ya no se trata de una simple tensión, sino una potencia que es necesario proporcionar al circuito de entrada, puesto que cualquiera que sea el montaje aparece allí una corriente. Hablando vulgarmente, las válvulas se contentan con voltios. Pero los transistores, a los que se aplican voltios, absorben al mismo tiempo amperios. Pero, voltios por amperios, son vatios.

Y el problema de la transferencia de potencia no es tan sencillo. Juzgue usted mismo.

Lo que intentamos es proporcionar al órgano de utilización la máxima potencia, es decir la mayor intensidad, a la tensión más elevada. ¿Quiere usted que estudiemos cuál debe ser la resistencia de utilización que da el mejor resultado?

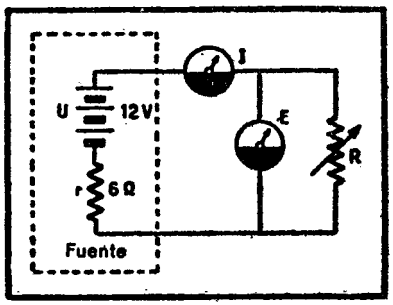



**Fig. 82. — Montaje experimental que ha permitido trazar las curvas de la figura 83. La resistencia interna r de la fuente está representada separada del símbolo de la batería; en realidad, está en el interior de la batería. Para no introducir perturbaciones en las corrientes y tensiones, es necesario utilizar un amperímetro I de resistencia muy débil y un voltímetro E de resistencia muy elevada.**

Si es débil con relación a la de la fuente, la intensidad de la corriente será mayor. ¡Tanto mejor! Pero, la tensión en esta resistencia de utilización será menor, debido a la caída de tensión elevada en el interior de la fuente. ¡Tanto peor!

Hagamos, pues, lo contrario. Tomemos una resistencia de utilización mucho mayor que la de la fuente. Entonces (lo mismo que en el caso de las válvulas), tendremos casi toda la fuerza electromotriz en la utilización. ¡Tan-

to mejor! Pero la tensión en esta resistencia será pequeña. ¡Tanto peor!...

Ya adivina usted, Ignotus, que, todavía la solución es «nuestro justo medio»: resistencia de utilización ni más grande que la de la fuente, ni tampoco más pequeña. Dicho de otro modo, *la transferencia de la energía se efectúa en las mejores condiciones cuando la resistencia de la utilización es igual a la de la fuente.* Cuando se cumple esta condición, se dice que las resistencias (o, más generalmente, las impedancias) están adaptadas.

Para convencerle aún más, me he tomado el trabajo de establecer los gráficos de variación de la potencia transmitida P, de la intensidad de corriente I y de la tensión en los bornes E, para una fuente de fuerza electromotriz U = 12 voltios, que tiene una resistencia interna *r*, de 6 Ω, en función de las variaciones de la resistencia de utilización R. Observará usted que a medida que R aumenta, I disminuye y E aumenta. Su producto P alcanza rápidamente el máximo para R = r = = 6 Ω y después decrece lentamente. ¿No es esto convincente?

Sin embargo, no crea que las consideraciones de transferencia óptima de energía imponen siempre la perfecta adaptación de las impedancias. Otros requisitos, como los de buena linealidad, pueden conducir a una elección de valores que se aparten de los de adaptación perfecta.

Pero presiento que surge una pregunta en su mente: ¿cómo hacer colaborar dos órganos cuyas impedancias son muy diferentes, sin demasiado despilfarro de energía?

En efecto, ¿cómo atacar un transistor con resistencia de entrada pequeña por otro de resistencia de salida elevada? ¿Cómo transferir la potencia de una válvula de gran resistencia interna a la bobina móvil de un altavoz? ¿Cómo, con un fonocaptor electrodinámico de poca impedancia, se puede atacar una válvula amplificadora, cuya resistencia de entrada es infinita?...

Ya usted adivina la respuesta: es nuestro antiguo conocido, el transformador, el que servirá de *adaptador de impedancia.* Y, desde luego, a este fin se actúa sobre la relación entre el primario y el secundario. Evidentemente es necesario que la impedancia del primario esté adaptada, y por lo tanto que sea igual a la de la fuente. Y la impedancia del secundario debe ser igual a la de la utilización. De hecho, basta que sean proporcionales.

Como usted sabe, la impedancia de un arrollamiento es igual a su autoinducción multiplicada por 2 πf = ω. Por lo tanto, si se designa la autoinducción del primario y del secundario por $L_1$ y $L_2$, debemos tener:

$$\frac{r}{R} = \frac{\omega L_1}{\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

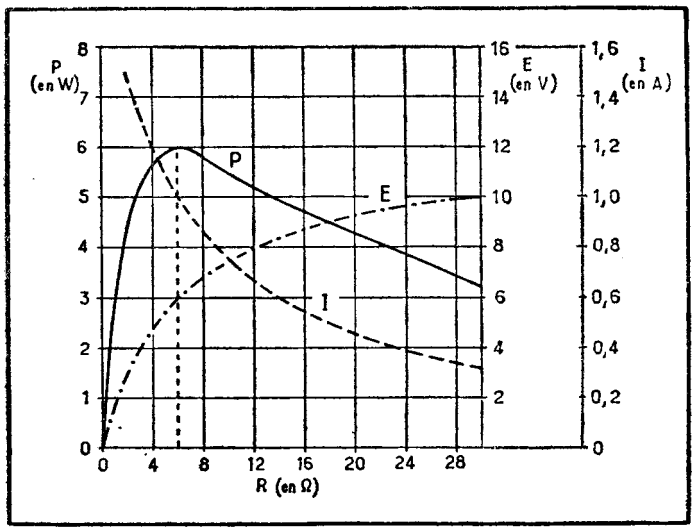



**Fig. 83. — Curvas de la potencia P transmitida a la resistencia R, de la tensión E aplicada a sus bornes y de la corriente I que la atraviesa, en función del valor de esta resistencia R. Atención: las escalas de P, de E y de I son diferentes.**

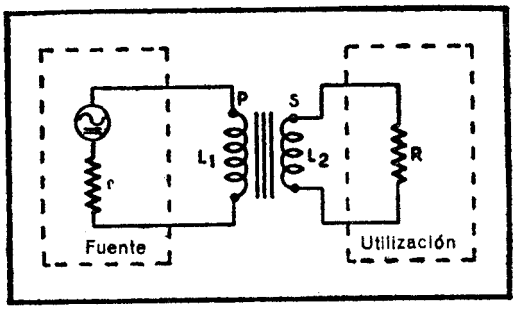



**Fig. 84. — Para adaptar impedancias de fuente y de utilización diferentes, se emplea un transformador de relación apropiada.**

Ahora le recuerdo que, por su parte, la autoinducción es proporcional al cuadrado del número de espiras. Si designamos por $N_1$ y $N_2$ los números de espiras del primario y del secundario, podemos escribir:

$$\frac{r}{R} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

Pero, Ignotus, ¿en qué consiste este $N_1/N_2$? Recuerde que esta relación de los números de espiras es denominada *relación de transformación n*. Se puede, pues, decir que:

$$\frac{r}{R} = n^2 \text{ o bien } n = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

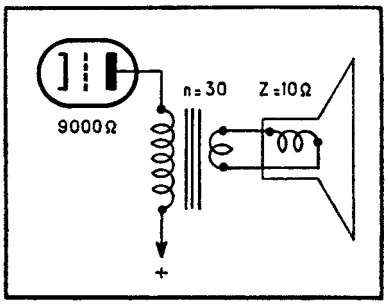



**Fig. 85. — El transformador reductor permite adaptar la pequeña impedancia de la bobina móvil del altavoz a la elevada resistencia interna de la válvula de salida.**

Este resultado es muy importante. Tome una válvula de potencia que requiera una resistencia de carga de 9.000 Ω. Si debe atacar a un altavoz cuya bobina móvil tiene una impedancia de 10 Ω, es necesario poner entre los dos un transformador de relación:

$$n = \sqrt{\frac{9.000}{10}} = \sqrt{900} = 30.$$

Pero me detengo aquí. Porque no quiero contrariar la bienhechora acción de la aspirina.

Deseo que mejore su salud.

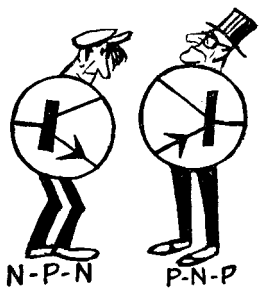
Su amigo Curiosus.»

DÉCIMA CHARLA

**En el curso de sus charlas anteriores, Curiosus e Ignotus han estudiado el comportamiento individual del transistor. Ahora quieren examinar su vida en sociedad. Las relaciones entre los diversos transistores que cooperan en un aparato están aseguradas por circuitos de acoplo. Estos deben transmitir a cada transmisor siguiente la energía recogida en la salida del que le precede. Se verá que, además de los circuitos de acoplamiento clásicos en la técnica de las válvulas, aquí se puede emplear un número de combinaciones ingeniosas propias del transistor y, que, después de haberle sorprendido, despertarán el entusiasmo del Ignotus...**

**SUMARIO: Los montajes fundamentales con transistores N-P-N. — Ventajas e inconvenientes del acoplamiento por transformador. — Ajuste de la intensidad sonora. — Acoplamiento por resistencia y capacidad. — Valor del condensador de acoplo. — Montaje de acoplo directo. — Amplificador de corriente continua. — Montajes de simetría complementaria. — Transistores en tandem.**

# ACOPLAMIENTOS DE TODAS LAS CLASES




IGNOTUS. — Curiosus, en este último tiempo usted no me ha hablado más que de los transitores P-N-P, tratando a los N-P-N como parientes pobres.

CURIOSUS. — Hay dos razones para ello. La primera es que el modelo P-N-P es el más se emplea. Y la segunda es que todo lo que decíamos del P-N-P puede ser aplicado igualmente al N-P-N, invirtiendo sencillamente las polaridades de las fuentes y, eventualmente, de los condensadores electrolíticos.

IG. — A esto es a lo que me he dedicado, adaptando a los transistores N-P-N los tres montajes fundamentales que hemos examinado la última vez. He hecho estos dibujos en mi cama de sufrimientos.

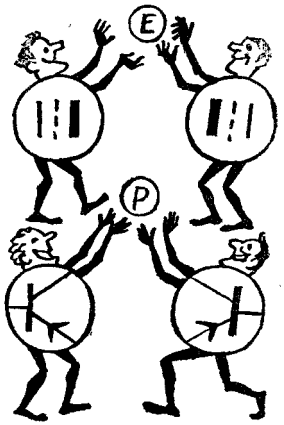
CUR. — ¡No exageremos, eh! A juzgar por la correción —que me place en reconocer perfecta— de sus esquemas, esta gripe no ha afectado gravemente a su potencia intelectual.

IG. — Espero que no, porque me he apresurado a pasar al estudio de los montajes completos de amplificadores y de receptores. Por otra parte, pienso que todo lo que se hace con las válvulas puede ser aplicado igualmente a los transistores, teniendo en cuenta, naturalmente, los valores de sus resistencias internas de entrada y de salida.

## Una diferencia fundamental.

CUR. — Sí y no, Ignotus. No se sorprenda por esta respuesta de normando. Evidentemente, todos los circuitos de acoplo empleados en los

montajes con válvulas, son igualmente utilizables para los transistores, pero entre los dos hay una diferencia fundamental: en los montajes con válvulas, cada paso aplica al siguiente una *tensión* amplificada. El único que debe entregar potencia es el paso de salida, que también está controlado (lo más a menudo) por una tensión. En cambio, en un aparato con transistores, cada paso transmite al siguiente una cierta potencia, que él ha amplificado y que el siguiente amplificará a su vez. Es decir que un receptor con transistores constituye una cadena de pasos en que la potencia aumenta progresivamente.



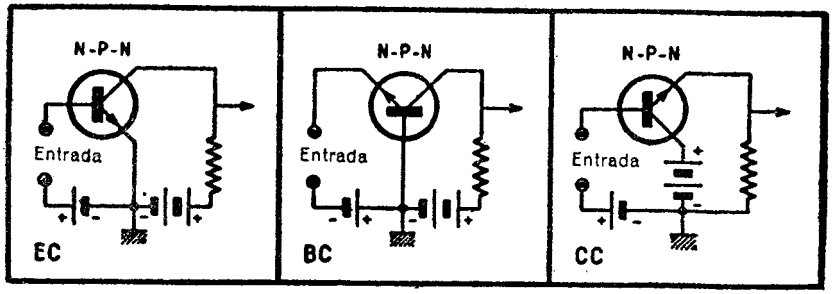
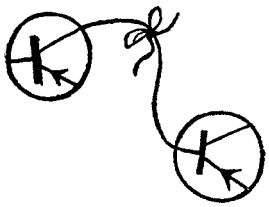




**Fig. 86. — Los tres montajes fundamentales realizados con transistores del tipo N-P-N. Obsérvese las polaridades de las baterías.**

IG. — Reconozco que esto cambia mucho el aspecto de las cosas. En su carta me explicó usted claramente que, si se desea aplicar la máxima tensión a la resistencia de utilización, hay interés en tomarla de valor elevado. Es esto justamente lo que se procura hacer en los acoplos de válvulas. Y es muy adecuado, puesto que la resistencia de entrada de las válvulas es infinita. Pero, con nuestros transistores, lo que buscamos es transmitir la máxima potencia. Para ello es necesario tener una resistencia de utilización del mismo valor que la resistencia de la fuente. Ahora bien, en los tres montajes que hemos examinado, la resistencia de salida y la resistencia de entrada tienen valores muy diferentes. En consecuencia, con mi lógica férrea, concluyo que es indispensable asegurar la adaptación de las impedancias con ayuda de un transformador. Por consiguiente, el único medio de acoplo aplicable a los transistores es el transformador.

CUR. — ¡Oh impetuosa juventud que busca lo absoluto! Lamento tener que decepcionarle, pero en el campo de los transistores el acoplo por resistencias y, de una manera más general, por impedancias, tiene igualmente derechos de ciudadanía. Se puede incluso, ya lo verá usted, prescindir de todo órgano de acoplo, uniendo directamente la salida de un paso a la entrada del siguiente.

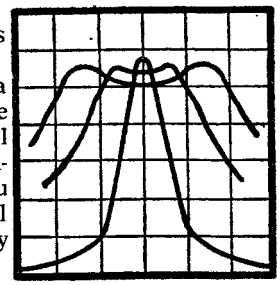


IG. — ¿Cómo? ¿Por un simple cabo de hilo?

## Las cualidades y los defectos del transformador.

CUR. — Pues, sí. Sin embargo procedamos por orden. Y, puesto que usted manifiesta tanta simpatía por el transformador, comencemos por él. Ha mencionado una de sus cualidades: permite adaptar perfectamente la impedancia de salida de un paso a la de entrada del siguien-

te. Así se obtiene la transferencia óptima de potencia. Pero está dotado de otras virtudes. La pequeña resistencia óhmica de sus arrollamientos determina caídas de tensión suficientemente débiles para que se puedan utilizar fuentes de alimentación de tensión poco elevadas. Y, sobre todo, no lo olvide, sintonizando el primario o el secundario, o los dos simultáneamente, se asegura la selectividad deseada en los pasos R.F. y F.I. en los que, además, actuando sobre el grado de acoplamiento de los dos circuitos, se llega a obtener la anchura deseada de la banda de paso de frecuencias.

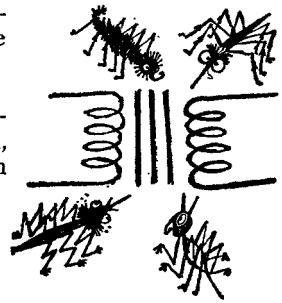


IG. — Ya ve usted que el transformador no tiene más que buenas propiedades. No veo porque...

CUR. — Bueno, pues es necesario que le muestre el reverso de la medalla. Lo primero de todo, cualesquiera que sean los progresos de la miniaturización, el transformador ocupa un volumen mayor que el de los órganos de acoplo por resistencia y capacidad, al menos en el campo de la B.F., porque en R.F. y en F.I., ningún otro acoplo le disputa su puesto. En la competencia que se plantea en el campo de la B.F., el transformador resulta, por otra parte, más costoso que la resistencia y los condensadores de acoplo.

IG. — En suma, se le sacrifica por mezquinas consideraciones de espacio y dinero.

CUR. — Los constructores de los aparatos con transistores no son filántropos y, como se les piden aparatos cada vez más pequeños, realizan una doble economía renunciando al transformador. Éste presenta además otro inconveniente adicional cuando se le emplea a la entrada de un amplificador de ganancia elevada.

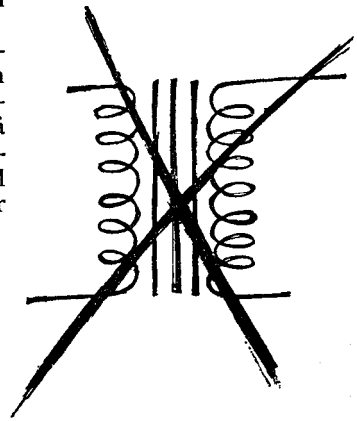


IG. — ¿Cual, Dios mío?

CUR. — Las inducciones de los parásitos captados por sus arrollamientos y que, una vez amplificadas, pueden ser otra causa de perturbación, es lo que excluye el empleo de los transformadores allí donde existan campos parásitos internos.

## He aquí algunos esquemas prácticos.

IG. — ¡He ahí pues a mi pobre transformador abrumado por tantos pecados! Sin embargo, ¿podría saber cómo se utiliza, cuando las consideraciones de economía y la presencia de los parásitos no prohiben su empleo?

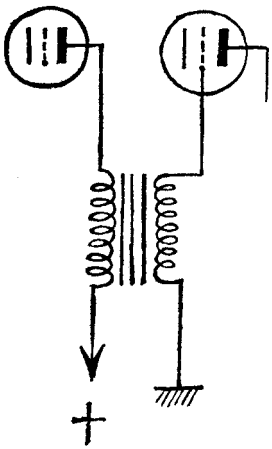


CUR. — El esquema no difiere sensiblemente del montaje con válvulas. Como usted ve, le presento aquí dos transistores montados en E.C. El transistor TR1 sirve para atacar el primero y el TR2 asegura el acoplamiento entre los dos. Este útlimo transformador tendrá muchas menos espiras en el secundario que en el primario. Si la resistencia de salida del primer transistor es de 20.000 Ω y la de entrada del segundo de 250 Ω, la relación de transformación para asegurar la mejor adaptación debe ser:

$$n = \sqrt{\frac{r_s}{r_e}} = \sqrt{\frac{20.000}{250}} = \sqrt{80} = 9 \text{ aproximadamente.}$$

Tendremos en el secundario una corriente nueve veces más intensa que en primario.

IG. — Veo que las tensiones de base están fijadas por divisores de tensión $R_1$ — $R_2$ y $R_3$ — $R_4$, desacoplados por condensadores. Observo igualmente que usted ha previsto en el circuito de los emisores resistencias $R_5$ y $R_6$ que sirven para compensar los efectos de las variaciones de tem-



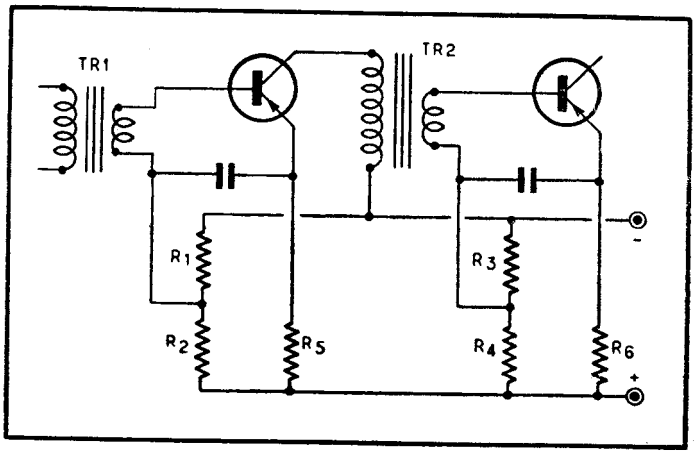




**Fig. 87. — Acoplamiento por transformador de dos pasos montados en E.C. — El primer paso es atacado también por medio de un transformador.**

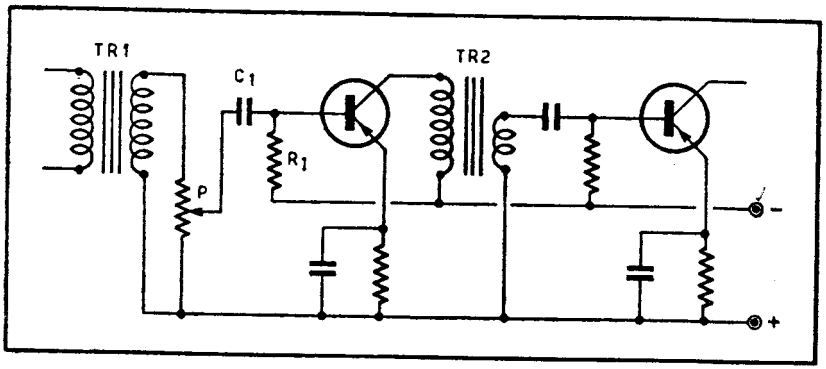



**Fig. 88. — Acoplamiento híbrido (mixto) por transformador y resistencia-capacidad con ajuste de la ganancia por el potenciómetro P.**

peratura. También están desacopladas por condensadores con el fin de no ejercer una contrarreacción que redunde en detrimento de la ganancia.

CUR. — ¡Bravo, Ignotus! Su gripe no ha alterado en nada su excelente memoria.

IG. — Al examinar su montaje me pregunto cómo consigue hacer en él el ajuste de la intensidad sonora, o del «volumen» como se acostumbra a decir.

CUR. — En efecto, se trata de un ajuste de ganancia. Se le podría hacer aplicándole una contrarreacción, cuyo porcentaje sería regulable.

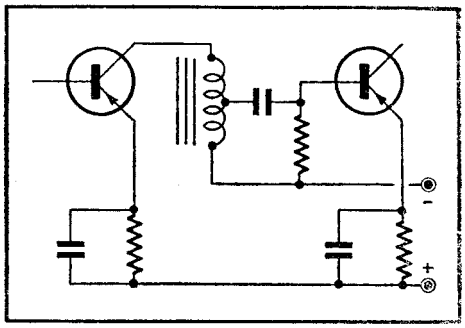
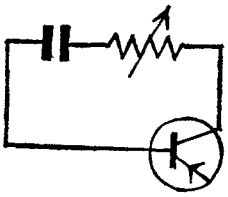



**Fig. 89. — Acoplamiento por autotransformador.**



Personalmente encuentro este método detestable. Primero porque no permite reducir la ganancia a cero para alcanzar el silencio total. Y además, al mismo tiempo que se modifica la intensidad del sonido, se varía el porcentaje de distorsión, precisamente el que alcanza el máximo, para la mayor fuerza de audición.

IG. — Es decir cuando las deformaciones son más difíciles de soportar. ¿Qué es lo que se propone usted entonces?

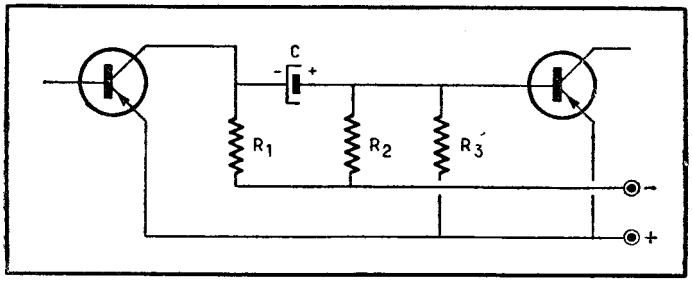
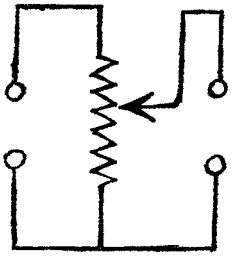



**Fig. 90. — Acoplamiento por resistencia y capacidad.**



CUR. — Si el ajuste de la ganancia no se ha previsto en la entrada del amplificador, ¿por qué no hacer uso de un potenciómetro P, para tomar a voluntad una fracción mayor o menor de la tensión que aparece en el secundario del primer transformador? De esta manera se puede dosificar fácilmente la intensidad del sonido. El cursor está conectado a la base del primer transistor, a través de un condensador de acoplo $C_1$, y la polaridad de la base está asegurada por la resistencia $R_1$. La misma disposición se adopta para el acoplo entre los dos transistores (fig. 88).

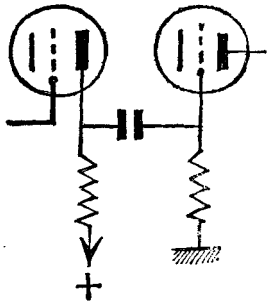
IG. — Su segundo esquema me da la impresión de un centauro: como este ser mitológico, medio hombre, medio caballo, su amplificador es mitad con transformadores y mitad con resistencias y capacidad.

CUR. — Reconozco que en este montaje perdemos la simplicidad del esquema con transformador «puro». Puede ser que le satisfaga a usted más éste que se deriva de él lógicamente: el acoplo por autotransformador. Este será generalmente un reductor, de manera que adapte la resistencia elevada de salida del transformador precedente a la más pequeña, en la entrada del siguiente, suponiendo que los dos sean del tipo E. C.

IG. — Es siempre medio carne y medio pescado.

## El montaje 100 % R-C.

CUR. — Puesto que los montajes híbridos le repugnan, pasemos decididamente al amplificador con resistencias y capacidad, en su forma más pura, que representa el esquema que le muestro (fig. 90).



IG. — ¡Pero, esto es la réplica más fiel del mismo montaje con válvulas! La resistencia de carga $R_1$ del colector corresponde a la del circuito anódico. Las resistencias $R_2$ y $R_3$ determinan el potencial de la base y son las hermanas menores de la resistencia de rejilla. En cuanto al condensador de acoplo... estoy sorprendido al ver que es del tipo electrolítico. ¿No se puede utilizar un buen condensador de papel de unos cincuenta nanofaradios o, si usted prefiere, de 0,05 μF, tal como se le emplea en los amplificadores con válvulas, donde desempeña perfectamente esta misión?

CUR. — Esto sería desastroso en nuestro caso. Cuando se trata de válvulas, está asociado a una resistencia de escape de rejilla, que tiene el valor clásico de 0,5 MΩ. Aquí, el conjunto de las resistencias $R_2$ y $R_3$,

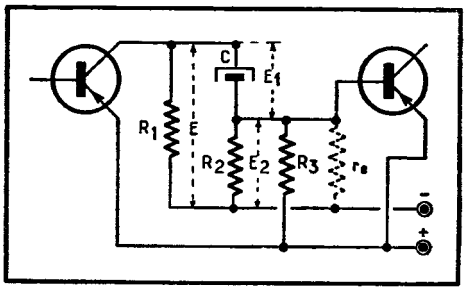
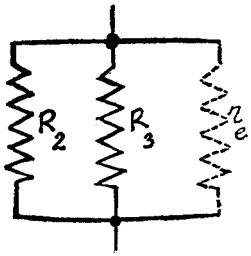



**Fig. 91. — Mismo esquema que el de la figura precedente, pero presentado de modo que se pone en evidencia el divisor de tensión constituido por el condensador de acoplo C y las resistencias $R_2$ y $r_e$ en paralelo. La resistencia de la fuente es despreciable.**

en paralelo, tiene un valor del orden de 1000 Ω y está, por añadidura, conectado en derivación a la resistencia de entrada $r_e$ del segundo transformador. Esta resistencia invisible, pero presente, es del mismo orden de magnitud que $R_2$ con $R_3$, digamos todavía de 1000 Ω.




IG. — Entonces las tres forman una resistencia de 500 Ω. Pero yo no veo en que...

CUR. — ¡Paciencia! Podemos volver a dibujar nuestro esquema de una manera algo diferente que muestre que el condensador C, con las resistencias $R_2$, $R_3$ y $r_e$, constituye un verdadero divisor para la tensión E que aparece en la resistencia de carga $R_1$ ¿Cuál será entonces su resistencia capacitiva?

IG. — Depende de las frecuencias de las corrientes y disminuye cuando ésta aumenta.

CUR. — Evidentemente. Pues, bien, si usted toma su condensador de 0,005 μF, al que es tan aficionado, y tiene además una corriente de 50

hertzios (este término es preferible al de «periodos por segundo»), la capacitancia o reactancia capacitiva $Z_c$ de C es de unos 65000 Ω, o sea 130 veces mayor que las resistencias $R_2$, $R_3$ y $r_c$ en paralelo.

IG. — ¡Qué desastre! Como las tensiones $E_1$ y $E_2$ se reparten proporcionalmente a los valores de las resistencias, $E_2$ no es más que la ciento-treintaava parte de la tensión E. No transmitimos entonces al segundo transistor más que esta íntima fracción (1).

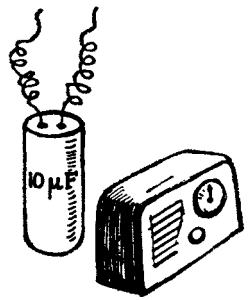
$$Z_c = \frac{1}{2\pi fc} = \frac{1}{2 \times 3{,}14 \times 50 \times 0{,}00005} \cong 65000\ \Omega$$

CUR. — He aquí porque, para evitar un estúpido derroche, es necesario utilizar un condensador de gran capacidad. Con uno electrolítico de 10 μF, la capacitancia, a 50 Hz, no será más que de 325 Ω y será transmitida más de la mitad de la tensión. Para frecuencias más elevadas, la reactancia capacitiva $Z_c$ será aún más pequeña y las cosas se presentarán aún mejor, pero una capacitancia insuficiente implicaría una deplorable atenuación de las notas graves.

## Cuidado con las polaridades.

IG. — Si comprendo bien, en los circuitos de transistores, en que los valores de la resistencia son generalmente muy inferiores a los que se emplean con las válvulas, haremos a menudo uso de los condensadores electrolíticos. ¿No será prohibitivo el espacio que ocupan?

CUR. — De ninguna manera. Porque los modelos destinados a ser utilizados con pequeñas tensiones (como es el caso con los transistores) son de un volumen muy reducido y pueden ser alojados fácilmente en el cableado de los receptores de bolsillo... Incorporándoles en los circuitos, es necesario tener mucho cuidado para respetar las polaridades correctas.




IG. — Observo que usted ha colocado el negativo del condensador en el lado del colector, debiendo estar éste a un potencial más negativo que el de la base. Supongamos que, si se tratase de transistores del tipo N-P-N, usted hubiera hecho lo contrario.

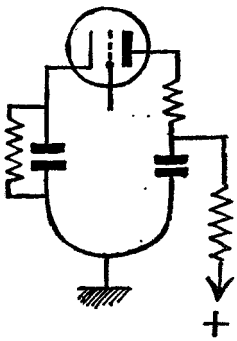
CUR. — Y no se equivoca. Para mostrarle cuáles son las polaridades de los condensadores electrolíticos según su sitio en el montaje, le doy aquí el esquema de un amplificador para micrófono. Vea usted que el ajuste de la intensidad se hace, a la entrada del primer transistor, con ayuda del potenciómetro P.

IG. — Y éste ataca la base a través del condensador $C_1$ del que, esta vez es el negativo el que está unido a la base. Esto es lo contrario de lo que se hace para el condensador de acoplo $C_2$, que, unido a un colector aún más negativo que la base, presenta su cara positiva hacia la base... Observo que los dos transistores están provistos de resistencia $R_3$ y $R_7$ de compensación de temperatura; los condensadores $C_6$ y $C_4$ que las desacoplan tienen, desde luego, su positivo... conectado al positivo de alique se hace para el condensador de acoplo $C_2$, que, unido a un colector en serie con la resistencia de carga $R_4$ del primer transistor? Veo que está desacoplada por electrolítico $C_6$ el cual tiene su positivo conectado al polo «más» de la batería.

(1) Un análisis más detenido, teniendo en cuenta principalmente la resistencia de salida del primer transistor, mostraría que la situación es en realidad menos catastrófica. Pero el razonamiento anterior es válido en una primera aproximación.

CUR. — ¿No identifica usted un antiguo conocido, empleado a menudo en los montajes con válvulas?

IG. — ¡Caramba! Pero, si es nuestro amigo desacoplo del circuito anódico... perdón, aquí le tenemos en el circuito del colector. ¿Sirve igualmente para evitar acoplamientos parásitos por impedancia común de la fuente, capaces de provocar oscilaciones espontáneas?



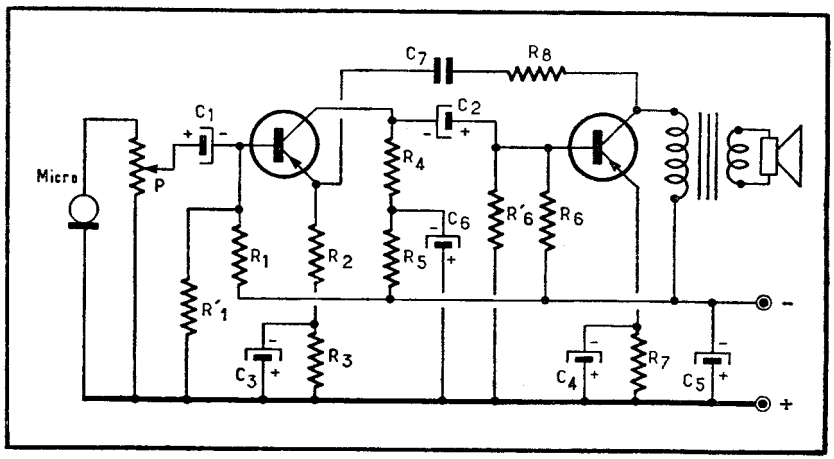
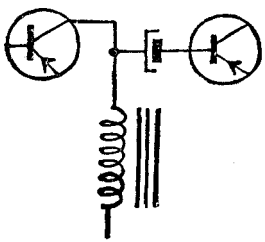




**Fig. 92. — Esquema completo de un amplificador microfónico. De todos los condensadores utilizados en el circuito de contrarreacción, el único que no será del tipo electrolítico es $C_7$, sendo su capacidad del orden de 0,05 μF.**

CUR. — Exactamente. La resistencia interna de la fuente puede originar peligrosas reacciones. Asimismo, para ofrecer a las componentes alternas de las corrientes un camino fácil, es buena política conectar en los bornes de la batería un condensador $C_6$ de capacidad suficiente.

IG. — En su esquema, para acumular todos los perfeccionamientos, hace usted figurar igualmente una contrarreacción mixta, en la que una parte de la tensión de salida está aplicada a una resistencia $R_2$, a través de $R_8$ y $C_7$, estando colocada dicha resistencia en el circuito del emisor del primer transistor. En definitiva, éste es el dispositivo que hemos estudiado ya en la figura 61.



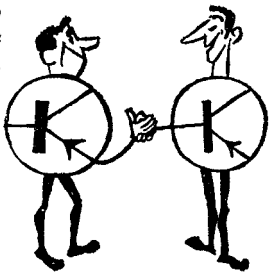
## La vía directa.

CUR. — A pesar de la edad, su memoria se conserva buena, Ignotus... Por lo demás no voy a insistir más sobre el acoplo a resistencias, o, más generalmente a impedancias. Porque usted puede también utilizar, en lugar de la resistencia de carga, una resistencia más cara y voluminosa, pero de resistencia óhmica débil... Y, para recompensarle por su paciencia, le voy a presentar un primer esquema de acoplamiento directo. Vea

usted en él un primer transistor, montado en colector común cuyo emisor está directamente unido a la base del segundo, el cual está montado en emisor común.

IG. — Reconozco que este montaje es muy económico. Pero me pregunto cómo se puede suprimir el condensador de acoplo con tanta desenvoltura.

CUR. — Si se tratase de un montaje con válvulas, no se hubiese podido hacer esto sino a costa de serias complicaciones, porque un ánodo debe estar a un potencial positivo elevado, mientras que la rejilla de la válvula



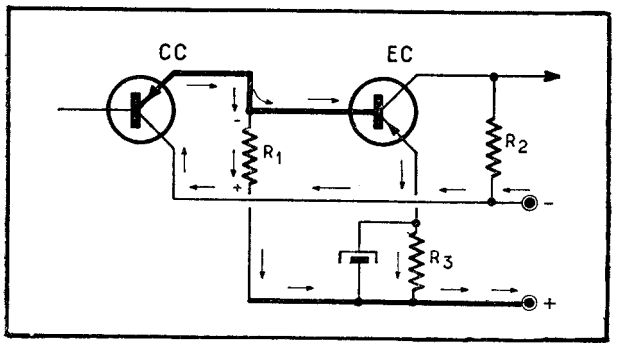
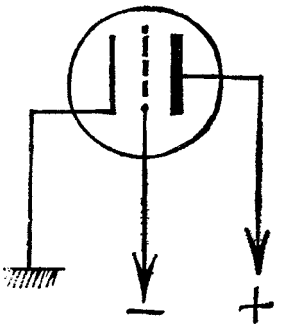



**Fig. 93. — Montaje con acoplamiento directo. Las flechas indican el sentido de la corriente electrónica que produce en $R_1$ la caída de tensión cuyas polaridades están indicadas.**




siguiente debe, por el contrario, estar polarizada negativamente. Pero con los transistores, las cosas se arreglan infinitamente mejor. Las diferencias de potencial son débiles y, por añadidura, los potenciales de la base y del colector deben ser del mismo signo con respecto al emisor. En cambio, en una válvula la rejilla debe ser negativa mientras que el ánodo es positivo. Así es que, en los montajes con transistores, se llega sin dificultad a comunicar a cada «electrodo» el potencial necesario, produciendo las caídas de tensión en resistencias apropiadas.

IG. — Voy a tratar de analizar su esquema. Valiéndome de flechas, jalono el recorrido de la corriente de alimentación, partiendo del polo negativo de la fuente. Los electrones entran en el primer transistor por el colector, saliendo de él por el emisor, y aquí la corriente se bifurca. Una parte de los electrones atraviesa la resistencia de carga $R_1$ haciendo el extremo conectado a la base del segundo transistor negativo con respecto al polo positivo de la fuente. Los otros electrones irán, de la base del segundo transistor, a su emisor. Es la corriente media de base... Sí, tiene usted razón: en el primer transistor el emisor es positivo con respecto al colector. Y en el segundo, la base es negativa con respecto al emisor. Todas las cosas están en orden. Y se ha economizado un condensador electrolítico y una resistencia.

CUR. — No se limitan a esto las ventajas del acoplamiento directo. Piense que un condensador no transmite jamás de una manera igual todas las frecuencias. Incluso con una capacidad de gran valor, no se puede hacer pasar muy lentas variaciones de tensión. Aquí, por el contrario, hemos realizado un verdadero *amplificador de corriente continua.*

IG. — ¡Vamos, Curiosus! ¿Cómo se puede hablar de la amplificación de alguna cosa que es constante?

CUR. — Reconozco que el término no está muy afortunadamente elegido. En efecto, se llaman así los amplificadores destinados a las señales de frecuencias muy bajas, aquellas de algunos períodos por segundo e incluso aquellas cuyo período pueden durar varios segundos. Además se puede hacer extensivo a tensiones o corrientes no periódicas que varíen lentamente. Este es principalmente el caso en el campo de la biología. Los amplificadores de corriente continua son entonces los únicos que se pueden emplear.

IG. — Veo otro uso en que serán precisos: la amplificación de las señales video en televisión, donde es muy importante conservar esta componente continua, a la cual un condensador de acoplo impide el paso.

## Primer recurso a la simetría.

CUR. — Imagínese que se haya pensado en ello antes que nosotros. Y para consolarle de la decepción que experimenta sin duda una vez más

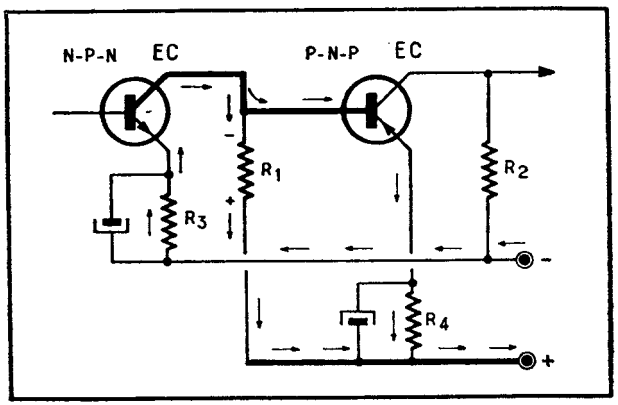
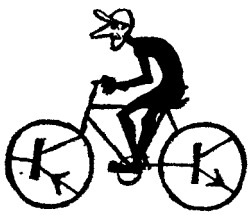



**Fig. 94. — Otra opsibilidad de realizar un acoplamiento directo en virtud de la simetría complementaria de los transistores de tipos opuestos.**



observando que se le roban sus ideas... antes de que nazcan, le presento otro montaje con acoplamiento directo, en que los dos transistores están montados en E.C. Pero se les toma de tipos opuestos: un N-P-N y un P-N-P. Y se aprovechan sus propiedades de *simetría complementaria.*

IG. — Siguiendo, por las flechas, el trayecto de los electrones, observo sin dificultad que también aquí todo sucede de una manera perfecta. El colector del primer transistor es hecho positivo con respecto a su emisor, como debe ser para un N-P-N. Mientras que en el segundo transistor,

que es un P-N-P, la base es negativa con respecto al emisor. ¿Que se puede desear más?... ¿No hay medio de suprimir sus resistencias de estabilización $R_5$ y $R_4$, con sus condensadores de desacoplo, para extremar aún más la economía?

CUR. — Si el valor absoluto de la componente continua no tiene que ser mantenido constante, usted puede omitir estos elementos, pero se privará del sistema de compensación de temperatura.

IG.—Lástima, porque no le oculto la simpatía que me inspiran estos montajes.

## Tandems en serie.

CUR. — Observe, querido amigo, que existen otros montajes de acoplo directo, mucho más estables en función de la temperatura. Por ejemplo, el montaje *en tandem* de los transistores del paso preamplificador y del final.

IG. — ¿Qué es lo que tiene que hacer aquí esta especie de bicicleta?

CUR. — Se llama tandems a pares de transistores alimentados en serie. Con ellos la componente continua de la corriente atraviesa sucesivamen-

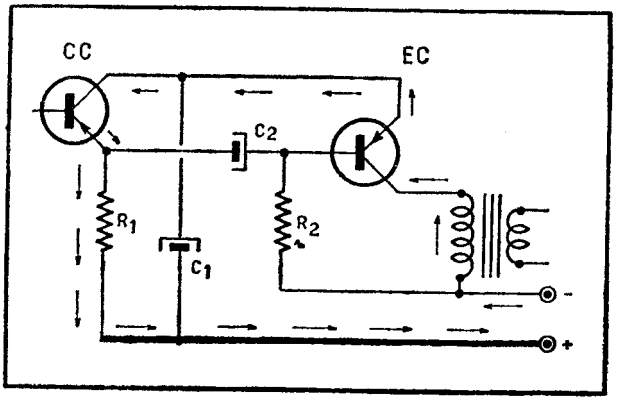



**Fig. 95. — Tandem de dos transistores alimentados en serie. Las flechas indican siempre el sentido de la corriente electrónica.**

te los dos transistores, lo que determina una excelente estabilización. He aquí un montaje en que el primer transistor está montado en colector común, y el segundo en emisor común. ¿Ve usted de qué manera funciona esto?

IG. — Una vez más, sigamos al guía. Quiero decir a las flechas. Esto me transporta al tiempo en que siendo boy-scout participé en aquellos juegos en que hacía falta seguir el camino jalonado por flechas... Aquí también partamos del negativo de la fuente. Después de haber atravesado el primario del transformador de salida, nuestros bravos electrones entran en el segundo transistor por el colector, y salen de él por el emisor, para precipitarse en el colector del primer transistor, del que salen

por el emisor. Después de esta brillante exploración, sólo les queda atravesar la resistencia de carga, para volver al redil, quiero decir, al polo positivo de la fuente.

CUR. — Pues ya ve usted que es la misma corriente la que pasa sucesivamente a través de los dos transistores, estando el colector del primero unido directamente al emisor del segundo, y estando su punto común desacoplado por el condensador $C_1$ con el fin de apartar de él las variaciones de potencia que hubiera podido engendrar la componente alterna.

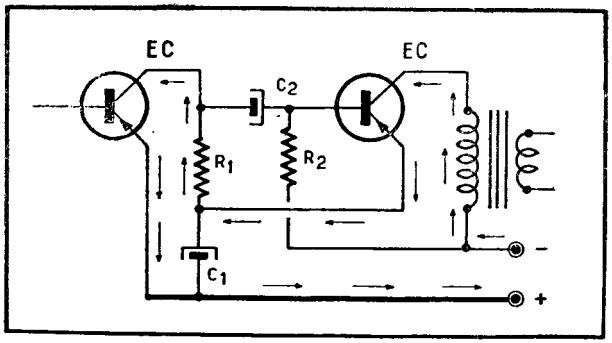



**Fig. 96. — Otro tandem compuesto por dos transistores montados en EC y alimentados en serie.**

IG. — Reconozco que este esquema no carece de elegancia. ¿Se podría aplicar el mismo principio a dos transistores en E.C.?

CUR. — Claro que sí. Y tal tandem procura, generalmente, una ganancia mayor que la del precedente. Siga el trayecto de las flechas. Vea usted aquí que es la misma corriente todavía la que atraviesa sucesivamente los dos transistores. Para la componente continua están pues montados en serie. En cambio, para las señales amplificadas, es el más clásico de los acoplos por resistencia y capacidad.

IG. — Estas astucias de montaje me recuerdan los ejercicios de alta acrobacia y me dan vértigo.

CUR. — En este caso le dejo descansar. ¡Buenas noches!

ONCEAVA CHARLA

**Al pasar revista a los diferentes modos de acoplamiento entre pasos, nuestros dos amigos han revisado principalmente la amplificación de baja frecuencia. Si bien han estudiado los principales esquemas de ella, el problema del paso de salida no ha sido incluido. Pero, cuando se trata de entregar una cierta potencia, se recurre a montajes y a regiones de funcionamiento particulares que serán el objeto de la presente charla.**

**SUMARIO: Elección del punto de funcionamiento (o de trabajo). — Montaje economizador con tensión variable. — Push-pull (contrafase) clase B. — Desfase por transformador. — Inversor de fase. — Catodino con transistores. — Push-pull de simetría complementaria. — Esquema práctico del paso de salida.**

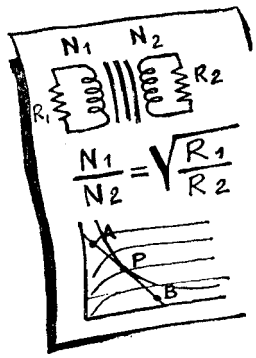
# ECONOMIA Y POTENCIA

**Ignotus incurre en pecado de orgullo.**

IGNOTUS. — Con los conocimientos que he adquirido en el campo de la B.F. creo poder calcular todos los elementos de amplificadores con transistores.

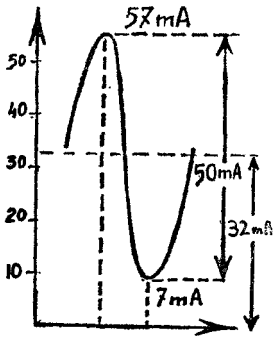
CURIOSUS. — Siempre he admirado su modestia...

IG. — No ironice. En este campo las cosas son sencillas y claras. Si se trata de un acoplamiento por transformador, calculo la relación que proporciona la mejor adaptación. Y créame, la extracción de la raíz cuadrada no me da miedo... En cuanto al acoplo por resistencias y capacidad, ¿no me ha enseñado usted a trazar la recta de carga? La situaré de manera que, estando tangente a la hipérbola de potencia límite, permita obtener la mayor amplitud de las señales de entrada estando el punto de trabajo en el centro.




CUR. — A riesgo de decepcionarle, le tengo que decir que las cosas distan de ser tan sencillas. Tiene usted razón en una primera aproximación. Pero, en la elección de valores es necesario tener también en cuenta la potencia disponible en la entrada, la anchura de la banda de frecuencias a transmitir, la misión de la contrarreacción, porcentajes de distorsión máxima tolerada y, ¡qué sé yo cuántas cosas más!...

IG. — ¡Me doy por vencido! Reconozco haber pecado por exceso de cándido orgullo. Sin embargo, las cosas parecen presentarse claramente cuando se recurre a la red de las curvas y a la recta de carga. Nuestra señal de entrada (se puede considerar lo mismo la tensión que la intensidad de la corriente de base), tiene derecho a ocupar la porción de la recta de carga, limitada por dos puntos: de una parte, A, en que las curvas comienzan a acusar un codo; de otra parte, B, en que la corriente de base se aproxima a cero.

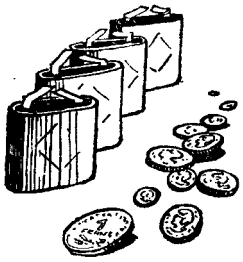



CUR. — Lo que, usted ya lo sabe, es una causa de distorsiones no lineales.

IG. — Cierto. Además se debe elegir el punto de funcionamiento P a igual distancia de A y de B. La amplitud máxima de la señal de entrada es entonces PA o PB, o, más exactamente, la diferencia entre los valores correspondientes de $I_b$ o de $E_b$. En mi dibujo esta amplitud es del orden de 275 mV. Hace variar la corriente de colector entre 7 y 57 mA, con el valor medio de 32 mA, y por tanto con una amplitud de 25 mA.

CUR. — Esto es perfecto, Ignotus. Espero que esté usted completamente satisfecho del funcionamiento de su transistor.

## ¡Nada de despilfarros!



IG. — De ninguna manera. Aunque las cosas van bien cuando la señal es fuerte, estoy preocupado por el despilfarro de energía en ausencia de modulación o en el caso de señales débiles. Cualquiera que sea la amplitud, siempre tenemos el mismo consumo de corriente correspondiente al punto P. Pero, con señales débiles, se hubiera podido situar el punto de trabajo más abajo, en una recta de carga correspondiente a corrientes más débiles, en P' por ejemplo. De esta manera el consumo será menor y economizaríamos pilas, que son bastante costosas.

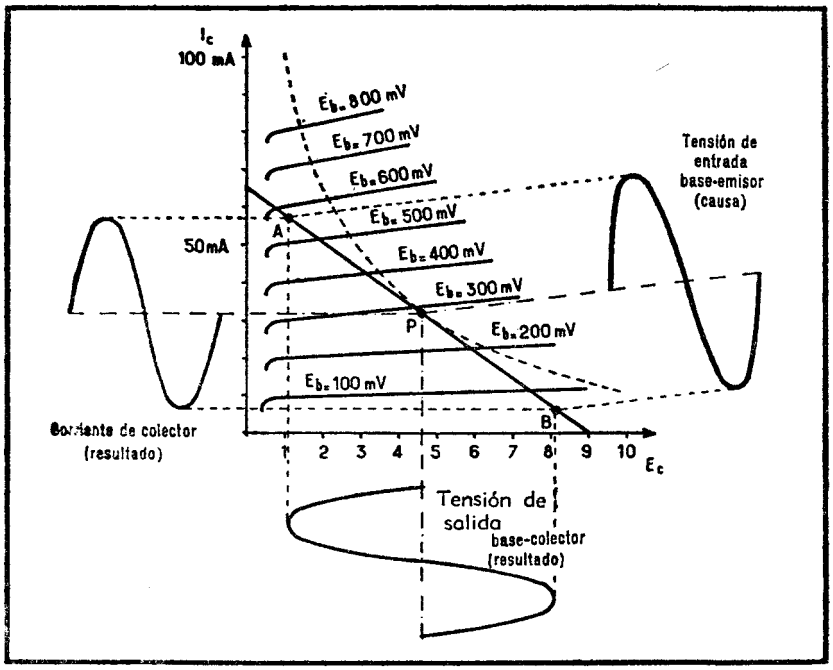
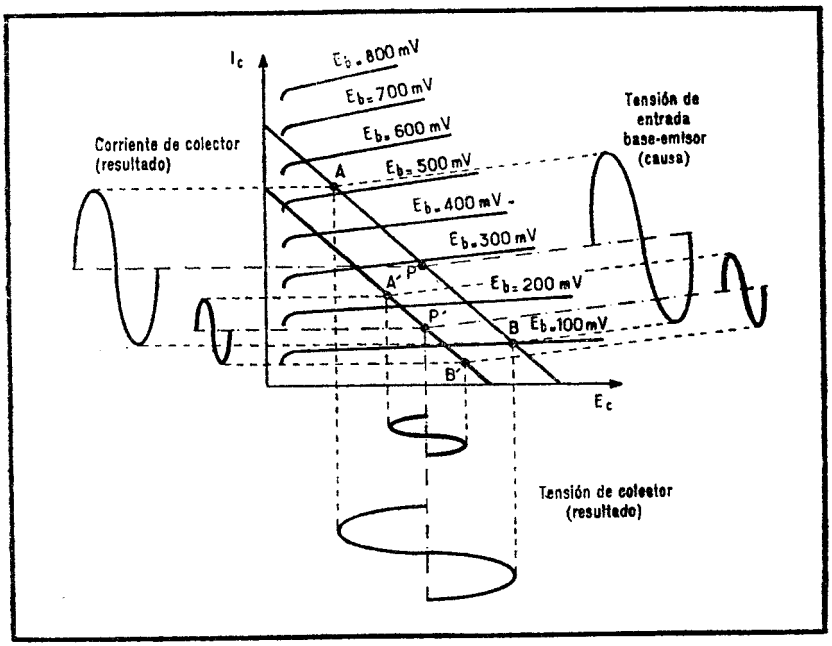



**Fig. 97. — En este gráfico se ve cómo varía la corriente y la tensión de colector bajo la acción de una señal aplicada a la entrada. Esta tiene la amplitud máxima admisible.**



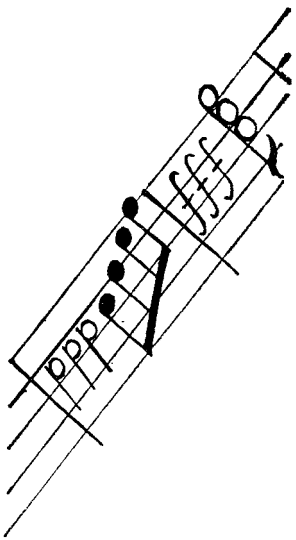



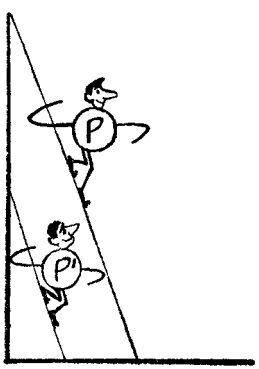
**Fig. 98. — Es más lógico desplazar el punto de funcionamiento desde P a P', cuando la amplitud de las señales disminuye.**

CUR. — ¿Quiere arruinar a los fabricantes?

IG. — No. Pero considero que, escuchando una sinfonía, no es racional gastar durante los *pianissimi* tanta potencia como la que exige un gran fragor orquestal. Lo que no veo es el medio por el cual se podría obligar al punto de trabajo a desplazarse a una recta de carga más baja, de manera que se consuma precisamente la potencia necesaria, para reproducir, sin distorsión, las señales de diversas intensidades.

CUR. — Esta preocupación por evitar el despilfarro es loable. Así, yo le voy a indicar con mucho gusto el medio apropiado. Para que su punto pueda pasearse de una recta de carga a otra, es necesario hacer que la polarización sea variable (1). Su valor debe aumentar con la amplitud de la señal. Basta, pues, mandarla por esta misma señal.

IG. — ¿Cómo, puesto que la señal es alterna, mientras que la polarización es continua?




(1) Aquí, modificando la polarización, desplazamos la recta de carga paralelamente a sí misma. Conserva su inclinación, la cual corresponde a la impedancia de carga dada. Esta posee una resistencia óhmica despreciable (es el primario del transformador de salida), de modo que la tensión media E en el colector no depende de la polarización. El punto de trabajo pasa así de P a P', deslizando a lo largo de una misma vertical. La presencia de una resistencia óhmica lo desplazaría horizontalmente.

CUR. — Usted conoce perfectamente el medio de transformar una corriente alterna en continua: la rectificación. Pues es lo que se hace para obtener la polarización variable.

He aquí un esquema práctico del economizador del cual se pueden derivar muchas otras variantes. Vea usted que un arrollamiento adicional del transformador de salida permite tomar señales amplificadas las cuales, con la ayuda de un diodo semiconductor D, son rectificadas, creando en los bornes de la resistencia $R_1$ una caída de tensión que hace al punto X más o menos negativo. El condensador C sirve para igualar la tensión obtenida, para que no siga las variaciones rápidas de la señal, sino que corresponda a su valor medio.

IG. — Sí, es el volante regulador, como el condensador que, con una resistencia, sirve para introducir una constante de tiempo en el regulador antifading.

CUR. — Comparación tanto mejor cuanto que nuestro dispositivo recuerda en más de un detalle al antifading, pero un «antifading» que funcionase a la «inversa». Aquí también, las variaciones de amplitud de las tensiones amplificadas son utilizadas después de la rectificación para mandar la polarización en la entrada. En efecto, las tensiones variables del punto P son aplicadas al punto común de las resistencias $R_2$ y $R_3$

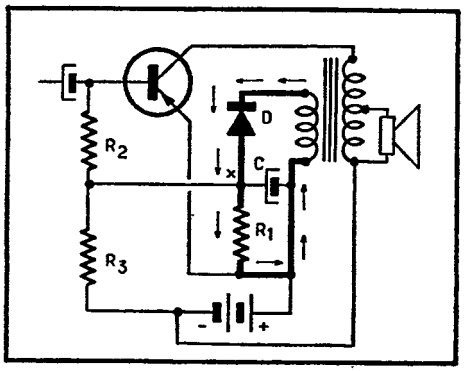
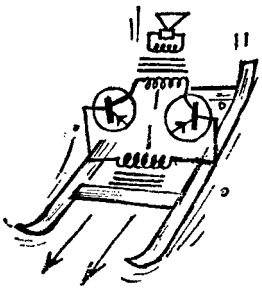



**Fig. 99. — Paso de salida con circuito economizador dibujado en trazo grueso y que permite aumentar la tensión de polarización cuando la amplitud de las señales aumenta.**

que conectan la base al polo negativo de la fuente. Otra elección adecuada de los valores de las tres resistencias permite hacer que la polarizicón sea proporcional a la amplitud de las señales. De esta manera, la base se hace aquí tanto más negativa cuanto más fuertes son las señales.



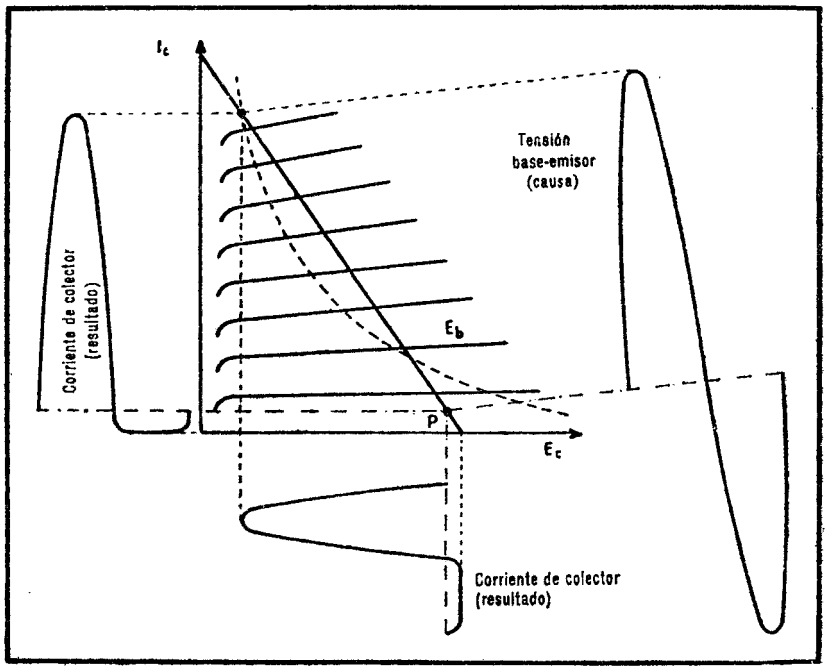
## ¡Viva la clase B!

IG. — Su montaje economizador me gusta mucho. Cuando monte mi receptor con transistores tendrá en la salida un buen push-pull, con este dispositivo de *tensión variable* de polarización.

CUR. — En un push-pull, mi querido Ignotus, hay algo mejor que hacer. Usted puede aplicar en él una polarización fija, suficientemente débil para que la corriente sea casi nula en reposo.

IG. — ¿No quiere usted hablar del régimen de amplificación en clase B? En los montajes con válvulas, esto corresponde al funcionamiento en el codo inferior de la característica de la corriente anódica en función de la tensión de rejilla.

CUR. — Sí, es de la clase B de lo que le voy a hablar. Coloca usted



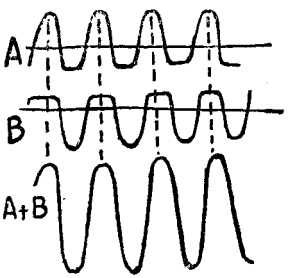
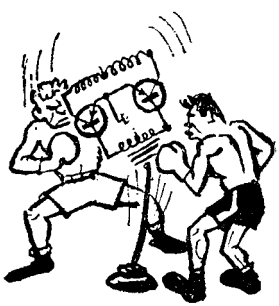




**Fig. 100. — En el régimen en clase B, el punto de funcionamiento se toma más cerca del extremo inferior de la recta de carga, lo que permite aplicar señales de amplitud doble que en clase A. La corriente de salida está, como se ve, muy deformada.**

allí el punto de funcionamiento en un valor muy débil de la corriente de colector, pero no nula. Porque si usted va más lejos, las señales débiles se encontrarán en la parte no lineal de la característica.

IG. — Veo que aquí las alternancias que aumentan la tensión de base producen un gran aumento de la corriente de colector, mientras que las que van en sentido opuesto no la modifican mucho. ¡La distorsión es horrible!

CUR. — Por lo tanto no permitiría emplear un solo transistor en clase B. Pero si usted monta dos en push-pull repartirá entre ellos muy equitativamente el trabajo: uno se encarga de las alternancias positivas y el otro de las negativas. Y la simetría de montaje hace que las deformaciones introducidas por cada transistor sean neutralizadas por las del otro.



IG. — En resumen, este push-pull clase B, se asemeja a un «punching ball», que utilizasen simultáneamente dos boxeadores para su entrenamiento colocados en ambos lados, le asestarían golpes que le harían desviar alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda.

CUR. — Así es efectivamente. Y, a ambos lados, le imprimirían una amplitud de oscilación más fuerte que la que podría obtener un solo boxeador.

IG. — En efecto, estando situado el punto de funcionamiento cerca de un extremo de la recta de carga, disponemos para la señal de entrada

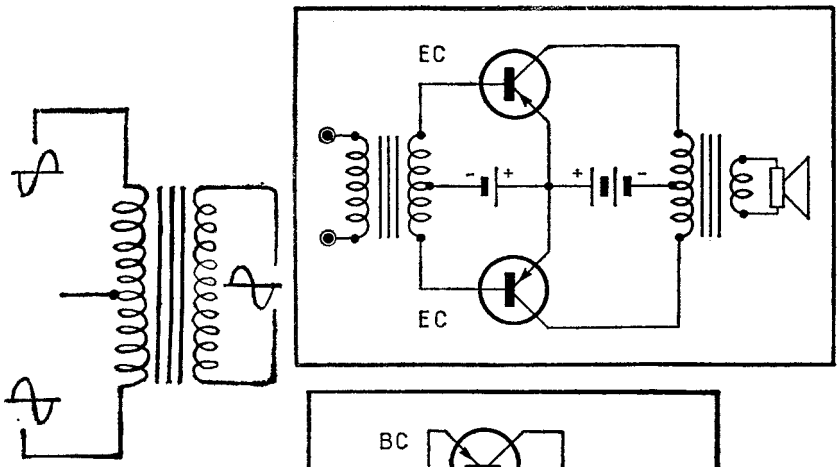



**Fig. 101. — Push-pull con desfase por transformador. Los transistores están montados en emisor común.**

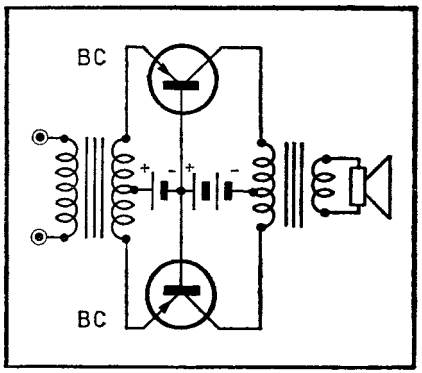
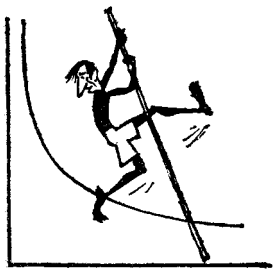



**Fig. 102. — Siempre con desfase por transformador, los transistores están montados aquí en base común.**



de una extensión doble que la correspondiente a la disponible en el caso de la clase A, en que el punto de trabajo está en la mitad de la recta de carga.

CUR. — Usted ve que la clase B admite amplitudes dobles que las de la clase A. El consumo, muy pequeño en ausencia de modulación, crece proporcionalmente a la amplitud de las señales y —todavía no se lo he revelado— la clase B permite franquear audazmente los límites impuestos por la hipérbola de potencia máxima.

IG. — ¿Quiere usted decir que la recta de carga puede pasar a la región situada fuera de esta hipérbola?

CUR. — Pues, sí. Y sin peligro para el transistor. Porque la potencia entregada sólo excederá este límite instantáneamente. En reposo y con amplitudes medias, será inferior a él. En cambio, hay otra característica del transistor, indicada en los datos de los fabricantes, la cual hay que tener aquí en cuenta: el valor límite de la corriente de colector ($I_{c\ máx.}$) que no se debe exceder.

IG. — Le prometo no transgredir nunca este valor. En virtud de esta promesa puede usted, sin temor, iniciarme en todos los arcanos del push-pull con transistores.

## El reino de la simetría.

CUR. — Antes de nada, sepa, Ignotus, que todos los esquemas que examinaremos se aplican tanto al régimen en clase B como al funcionamien-

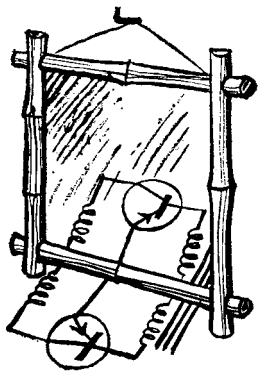
to en clase A. Sólo difiere el valor de la polarización. El montaje que más se emplea es el emisor común, que procura la máxima ganancia. Sin embargo, cuando se desea reducir las distorsiones al mínimo puede ser preferible el montaje de base común. Por último, si la resistencia de entrada debe ser elevada y la de salida, débil...

IG. — ... se adopta el montaje de colector común. Me lo figuraba. En cuando al desfase, pienso que se le obtiene fácilmente con ayuda de un transformador que tenga una toma central en el secundario. De la misma manera, una toma en el primario del transformador de salida debe permitir aplicar la tensión apropiada a la salida.

CUR. — En efecto. Y he aquí los esquemas de los dos montajes push-pull: el primero, con emisor común; y el segundo, de base común (fig. 101 y 102). Usted apreciará en ellos su bella simetría.

IG. — ¿Se debe utilizar pilas para la polarización, tal como usted lo ha dibujado?

CUR. — No. Esta está asegurada por los métodos clásicos, por medio de una resistencia en serie o de un divisor de tensión, conectado a la



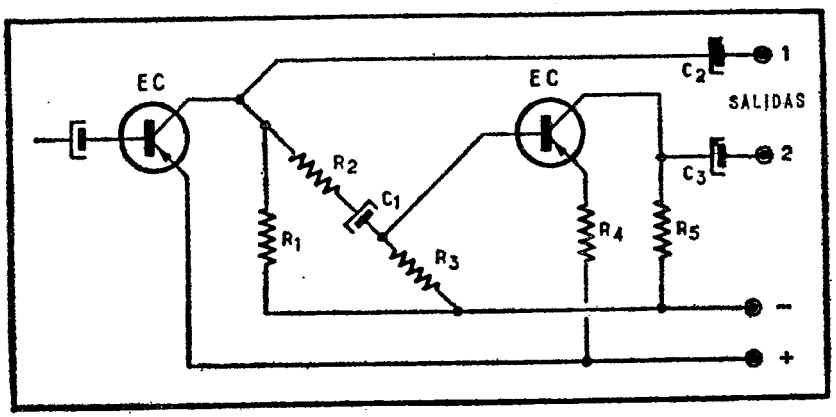
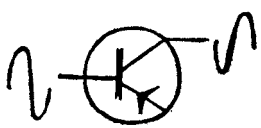



**Fig. 103. — Desfase por transistor montado en emisor común con una ganancia reducida a 1.**

pila única. No he representado estos circuitos (que usted conoce ahora muy bien) para no comprometer la claridad del dibujo.

## Mil y uno desfasadores.

IG. — En los amplificadores con válvulas se llega a producir el desfase de las tensiones para el push-hull, prescindiendo del costoso y voluminoso transformador. Pienso que esto es igualmente posible con los transformadores.



CUR. — Naturalmente. Usted sabe que en el montaje E.C. la tensión de salida está en oposición de fase con la de entrada. Luego, se pueden montar los pasos sucesivos en E.C. Sus tensiones de salida estarán en oposición de fase.

IG. — ¡Es muy extraño su esquema!... El acoplo entre los dos transistores no tiene un aspecto muy católico.

CUR. — Las resistencias $R_2$ y $R_3$, en serie con el condensador de acoplo $C_1$, constituyen un divisor de tensión destinado a no transmitir al segundo transistor más que una fracción de la tensión que el primero hace aparecer en su resistencia de carga $R_1$. Además, observe usted la presencia de una resistencia de contrarreacción $R_4$ en el circuito del emisor del segundo transistor.

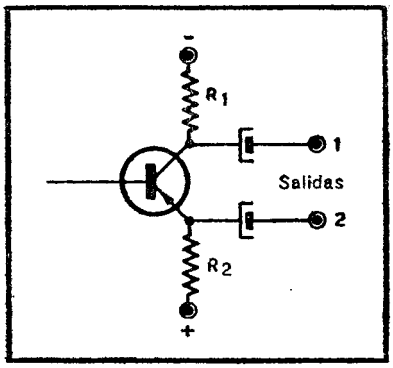
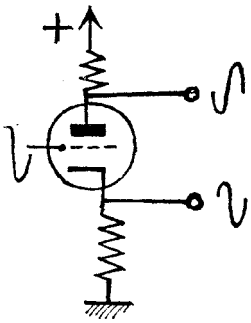



**Fig. 104. — Desfasador constituido por un transistor que tiene resistencia de carga en el circuito de emisor y en el de colector.**




IG. — ¡Pobre! Usted reduce así su ganancia de dos maneras.

CUR. — Es lo que le hace falta. Porque, para que las dos tensiones de salida estén equilibradas, la ganancia del segundo transistor debe ser igual a 1. No debe amplificar ni atenuar.

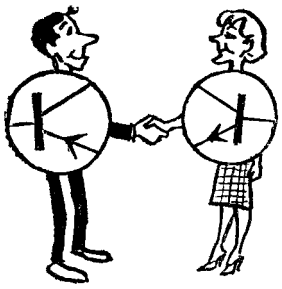
IG. — ¿Su misión es, pues, estrictamente invertir la fase?

CUR. — Esto es, en efecto, todo lo que se le pide. Hay otro medio de obtener las dos tensiones desfasadas, con ayuda de un sólo transistor. Es emplear un montaje mixto E.C.-C.C., colocando resistencias de carga $R_1$ y $R_2$ tanto en el circuito de colector como en el circuito del emisor. La señal, en la salida 1, estará desfasada con respecto a la de entrada mientras que en la salida 2, estará en fase con ella.

IG. — Pero esto es la fiel réplica del desfasador catodino con válvulas, en que hay resistencias de carga intercaladas en serie con el ánodo y el cátodo.

CUR. — Usted lo ha reconocido bien, en su aspecto «transistorizado».

IG. — Todos estos montajes que usted me ha presentado son antiguos conocidos míos, puesto que existen los mismos desfasadores en los amplificadores con válvulas electrónicas.



## El push-pull milagroso.

CUR. — Por el contrario, con las válvulas no puede usted realizar un push-pull *sin desfasador*.

IG. — Creo que, a menos que haya un milagro, tampoco será esto posible con los transistores.

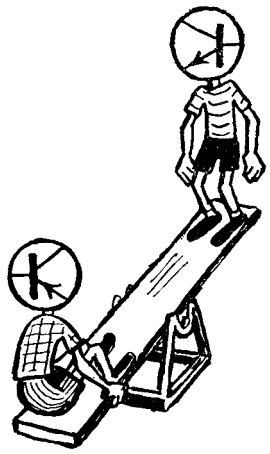
CUR. — A pesar de ello, lo es. Y el milagro es todavía la simetría complementaria de los transistores de los tipos P-N-P y N-P-N. Analice atentamente este esquema en que he montado dos de ellos en E.C.

IG. — Procedamos por el método habitual... Admitamos que una primera alternancia de la señal de entrada haga más negativas a las dos

bases. En este caso, el P-N-P amplificará la señal. Por el contrario, el N-P-N quedará bloqueado. En la alternancia siguiente, la cual hará a las bases más positivas, es el P-N-P el que no actuará, y el N-P-N dejará pasar una corriente de colector. ¡Admirable! ¡Ingenioso! ¡Astuto!

CUR. — Modere su entusiasmo, amigo. Este montaje necesita el empleo de dos pilas (o al menos de una pila con toma intermedia), lo que complica algo las cosas. Todavía es más complicada la alimentación del montaje fundada en el mismo principio de simetría complementaria, pero con transistores en B.C.

IG. — En efecto, debe funcionar tan bien como el precedente. Aquí el P-N-P actúa en las alternancias positivas aplicadas a su emisor y el N-P-N entra en acción con las alternancias negativas. Pero temo que no sea fácil utilizar estas dos pilas para la alimentación de los otros transistores que puedan formar parte del montaje.



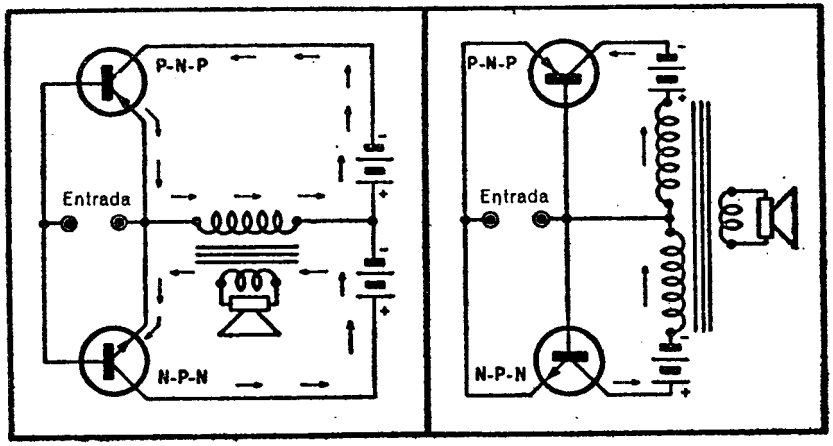


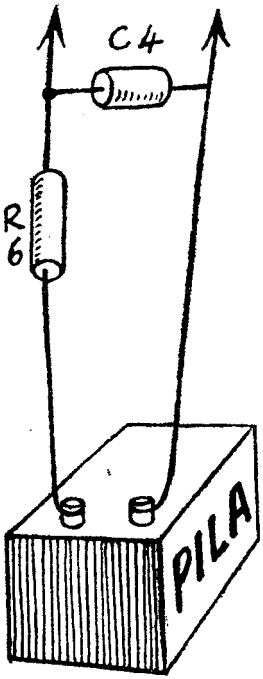

**Fig. 105. — Push-pull sin desfasador equipado con transistores P-N-P y N-P-N montados en EC.**

**Fig. 106. — Otro push-pull sin desfasador, pero con montaje en BC.**

IG. — Ahora, ¿puedo pedirle un favor? Quisiera montar un amplificador con transistores para mí tocadiscos portátil. ¿Podría usted trazarme el esquema práctico de su paso de salida? Deseo tener un buen push-pull, clase B, bastante potente, para hacer bailar a nuestra pandilla de amigos.

CUR. — Aquí tiene el esquema que pide, Ignotus. ¿Le parece completamente claro?

IG. — A primera vista todo es clásico en él. Desfase por transformador... Contrarreacción paralelo en cada transistor, por los grupos $R_1$-$C_1$ y $R_2$-$C_2$ de resistencias y condensadores en serie, entre colector y base. Polarización determinada por el divisor de tensión. $R_3$-$R_4$... Estabilización por la resistencia $R_5$, con el fin de compensar los efectos de temperatu-



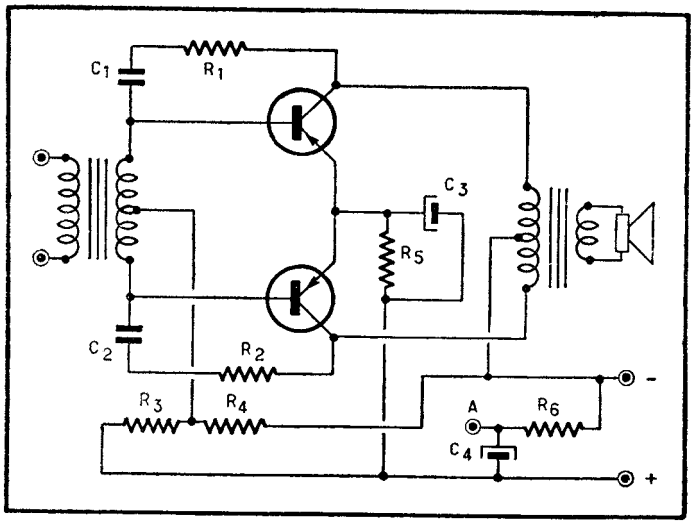




**Fig. 107. — Esquema práctico de un paso push-pull con contrarreacción, compensación de temperatura y alimentación desacoplada.**

ra; la resistencia está desacoplada por el condensador $C_3$... Todo esto es para mí ya pura rutina. Sin embargo, ¿cuál es la misión de la resistencia $R_6$, desacoplada por el condensador $C_4$?

CUR. — Habida cuenta de las fuertes variaciones del consumo de la fuente que determina el funcionamiento de los transistores de potencia en clase B, es preferible desacoplar esta fuente, para evitar reacciones en los otros circuitos. Tal es la misión de $R_6$ y $C_4$ que, en el punto A, procuran la corriente a los pasos que preceden al push-pull de salida. ¿Está usted satisfecho?

IG. — Sí. Y tengo prisa por ponerme a trabajar. Así es que me despido de usted por hoy.

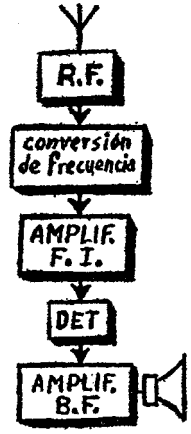
DOCEAVA CHARLA

**El análisis detallado de la amplificación de baja frecuencia, que ha sido objeto de las dos charlas precedentes, facilitará mucho la tarea de Curiosus. Ahora va a explicar a Ignotus los métodos de amplificación de alta frecuencia. Le mostrará en qué se asemejan a los montajes correspondientes aquellos en que se utilizan válvulas, y en qué difieren.**

**Finalmente, examinará los dispositivos de mando automático de la ganancia y regulador antifading, empleados en los amplificadores F.I. con transistores.**

**SUMARIO: Frecuencia de corte. — Acoplo por circuitos sintonizados. — Efecto del amortiguamiento. — Pasos R.F. y F.I. — Capacidad colector-base. — Neutrodino. — Regulador antifading. — Variación de las capacidades y resistencias internas. — Antifading reforzado.**

# EN EL CAMPO DE LA R.F.




## El dedo en el engranaje.

IGNOTUS. — Aquí me tiene usted, Curiosus, contento y entusiasmado a la vez. Contento por haber conseguido con éxito mi primer montaje con transistores y entusiasmado por tener montado en mi maleta tocadiscos, este minúsculo amplificador que, con un apetito más que módico, procura audición potente y pura.

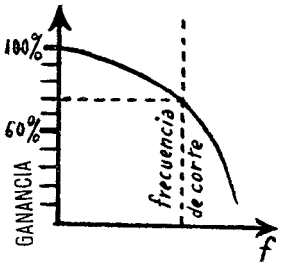
CURIOSUS. — Me alegra mucho ver con qué éxito ha aplicado usted en la práctica los conocimientos que le he podido inculcar. Está usted, pues, completamente satisfecho.

IG. — A decir verdad, no del todo. Porque hubiera querido utilizar mi amplificador, no sólo con el pick-up, sino también como parte B.F. de un receptor de radio. Pero no sé como establecer los pasos que preceden a la B.F.

CUR. — Y he aquí cómo, habiendo puesto el dedo en el engranaje, tengo que hablarle de los pasos R.F. y F.I. así como del conversor de frecuencia y del detector. Porque un receptor con transistores tiene sensiblemente la misma anatomía que un receptor con válvulas. Comencemos por la amplificación de alta frecuencia.

## Los transistores en R.F.

IG. — Sé que este es el punto débil de los transistores, puesto que su ganancia, según me ha dicho usted, baja con la frecuencia.



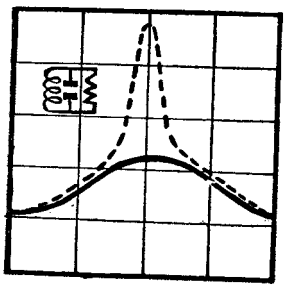

CUR. — En efecto. Los fabricantes indican en sus características el valor de la *frecuencia de corte*. Es la frecuencia para la cual la ganancia en intensidad y la pendiente disminuyen al 70 % del valor que tienen en baja frecuencia. Pero esto no impide utilizar los transistores en frecuencias mucho más elevadas, resignándonos a una cierta reducción de la ganancia. El límite de la frecuencia utilizable se aleja sin cesar, gracias al progreso de la tecnología. En nuestros días, la amplificación de estas corrientes, con frecuencia de varios centenares de megahertzios, correspondientes a las ondas métricas utilizadas para la modulación de frecuencia y ondas decimétricas TV en banda U. H. F. no plantea ya ningún problema.

IG. — ¿Dónde está entonces la dificultad? Pienso que no queda sino adoptar para los transistores los mismos montajes que para las válvulas.

CUR. — Esto no se podrá hacer sin tener en cuenta los valores relativamente pequeños de la resistencia de salida y, sobre todo, de entrada de los transistores.

IG. — ¿En qué son aquí estos valores más desfavorables que en B.F.? Supongo que basta utilizar en los circuitos de acoplo transformadores reductores de relación apropiada, para realizar la adaptación de las impedancias, como hemos visto en el campo de la B.F.

## Doble objetivo.



CUR. — Olvida usted, Ignotus, que la amplificación R.F. tiene por objeto, no sólo reforzar las débiles señales captadas por la antena, sino también hacer la tría, separando el grano bueno de la cizaña. Dicho de otra manera, tanto en R.F. como en F.I. hay un doble imperativo: amplificación y selectividad. Los transistores se encargan de la amplificación...

IG. — ...y los circuitos sintonizados, que establecen los acoplamientos, aseguran la estabilidad.

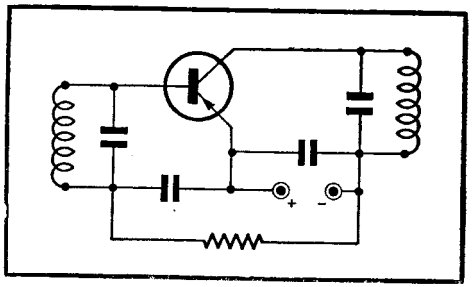



**Fig. 108. — Circuitos sintonizados en la entrada y en la salida de un paso R.F. con transistor.**

CUR. — Es precisamente lo que le quería decir. Pero, tome usted un paso en que, tanto a la entrada como a la salida, haya un circuito sintonizado. El de la entrada está conectado entre base y emisor, y por tanto en derivación con la resistencia de entrada, que mide entre 200 y 2000 Ω. Esta resistencia lo amortiguará fuertemente, aplanando su curva de resonancia. Las cosas son menos desastrosas para el circuito de salida conectado en derivación con la resistencia colector-emisor, y que mide varias decenas de kilohmios. Pero incluso aquí se hará sentir el efecto de amortiguamiento.

IG. — ¿Qué hacer entonces para adaptar las impedancias y evitar el amortiguamiento excesivo? Esto es la historia de la cabra y la col...

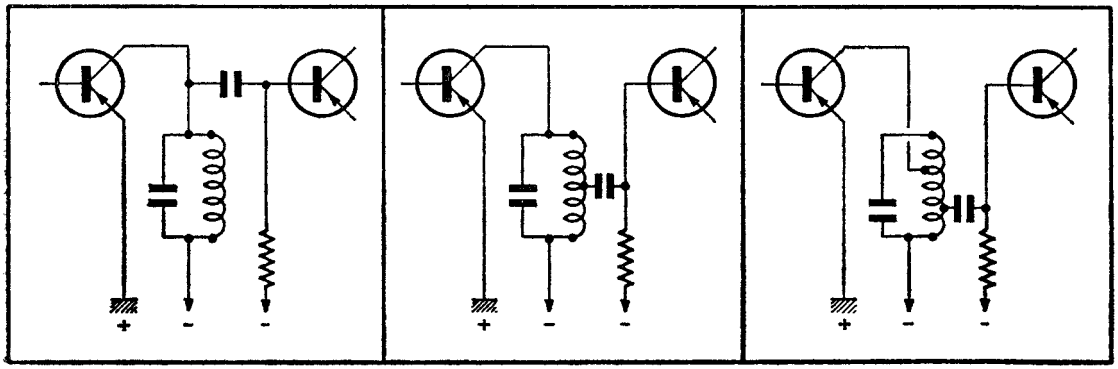



**Fig. 109. — A la izquierda, acoplo por «circuito tapón» o antirresonante. (En este esquema así como en los dos que siguen, el polo positivo de la fuente está representado por el símbolo de «masa»; esto corresponde a la práctica corriente en los montajes equipados con transistores P-N-P y en los que el polo positivo de la pila está conectado a la masa del chasis.)**

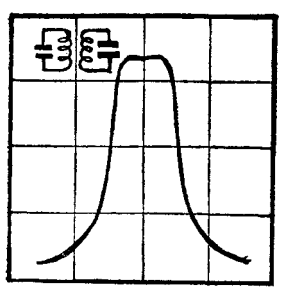
**Fig. 110. — En el centro, acoplamiento por autotransformador reductor con primario sintonizado. Aquí las impedancias están mejor adaptadas que en el esquema precedente.**

**Fig. 111. — A la derecha, para reducir el amortiguamiento debido a la resistencia de salida del transistor, ésta se conecta a una sección del arrollamiento del circuito sintonizado.**

CUR. — Se consigue conciliarios, actuando, en cada circuito sintonizado, sobre la relación entre la autoinducción y su capacidad, y conectando en la entrada y en la salida, no la totalidad de los arrollamientos, sino sólo una parte del número de espiras, de manera que se reduzca el efecto del amortiguamiento. Y, desde luego, procurando equilibrar las impedancias mediante una relación apropiada de los transformadores.

IG. — ¿Por qué debe establecerse siempre el acoplamiento con ayuda de un transformador?

CUR. — No es obligatorio. Lo más a menudo, se emplea un simple circuito tapón. Es el mismo tipo de acoplamiento por impedancia y capacidad. También se puede recurrir al autotransformador con primario sintonizado, conectado eventualmente por medio de una toma a la salida del transistor precedente.



El modo de acoplamiento que asegura la máxima selectividad y musicalidad es el transformador con primario sintonizado o con primario y secundario ambos sintonizados. Esta última solución es adoptada a menudo en los pasos F.I., en que tales transformadores, gracias al grado apropiado de acoplamiento entre sus arrollamientos (acoplamiento crítico), constituyen filtros de banda.

IG. — Es decir que dejan pasar toda la banda de frecuencias de modulación pero atenúan muy considerablemente todas las frecuencias que no caigan en esta banda.

CUR. — Sí, Igontus. No ha olvidado usted que es el mejor medio para asegurar la coexistencia pacífica de la selectividad y de la fidelidad musicales.

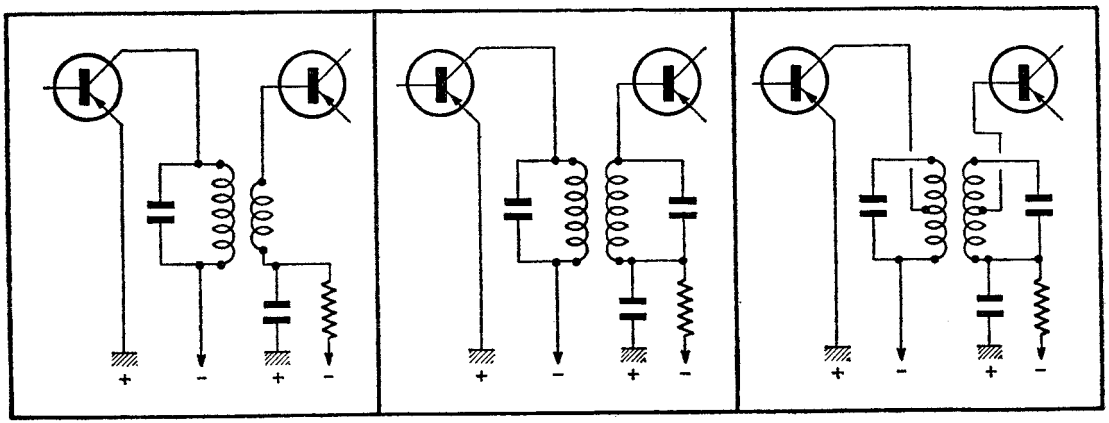
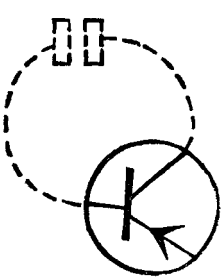



**Fig. 112. — (A la izquierda) Acoplamiento por transformador con primario sintonizado.**

**Fig. 113. — (En el centro) Acoplamiento por transformador con primario y secundario sintonizados.**

**Fig. 114. — (A la derecha) Mismo montaje que el de la figura precedente, pero que proporciona mejor selectividad. Gracias a las tomas en los arrollamientos, la salida del primer transistor y la entrada del segundo amortiguan los circuitos sintonizados.**

## El peligro invisible.

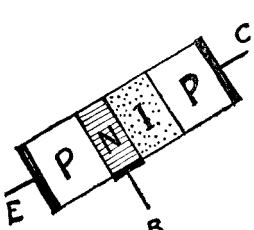


IG. — Observo que si los fabricantes de las bobinas hacen correctamente su trabajo, no debe tener ninguna dificultad en la realización de mis pasos R.F. y F.I.

CUR. — Lamento tener que echar una ducha fría en su beatífico optimismo. En efecto, en el transistor hay un peligro oculto que le acecha y le puede causar muchos sinsabores.

IG. — ¡Vaya! Prefiero combatir a cara descubierta. ¿Cuál es esta nueva emboscada?

CUR. — Es la capacidad interna entre colector y base. Si usted tiene, tanto a la entrada como a la salida, circuitos sintonizados a la misma frecuencia, esta capacidad (que puede ser del orden de algunas decenas de microfaradios) basta para establecer entre estos circuitos un acoplamiento que va a transformar a un pacífico transistor en una fuente de oscilación R.F.




IG. — Recuerdo que para evitar tales «enganches», debidos a la capacidad entre ánodo y rejilla en las válvulas tríodo, se intercala entre estos dos electrodos una rejilla pantalla a la que se aplica un potencial. Supongo que se procede de la misma manera en los transistores.

CUR. — Así es, en efecto, como están constituidos los transistores P-N-P, de los que ya hemos hablado. La capa de semiconductor intrínseca I desempeña en cierto modo el papel de pantalla que reduce la capacidad de base-colector. Los modelos «drift» tienen igualmente una zona que separa el colector de la base. Pero con los transistores ordinarios, para prevenir la generación de oscilaciones espontáneas, se ha

recurrido a un método que fue propuesto hacia 1920 por el americano Hazeltine para los montajes R.F. con triodos, antes de la invención del tetrodo, que fue la solución definitiva del problema. El método consiste en neutralizar la acción de la capacidad parásita aplicando al electrodo de mando tensiones de la misma amplitud, pero de fase opuesta. El montaje *neutrodino* con los triodos empleaba entonces un pequeño condensador que transmitía a la rejilla una fracción de las tensiones amplificadas, tomadas en oposición de fase.

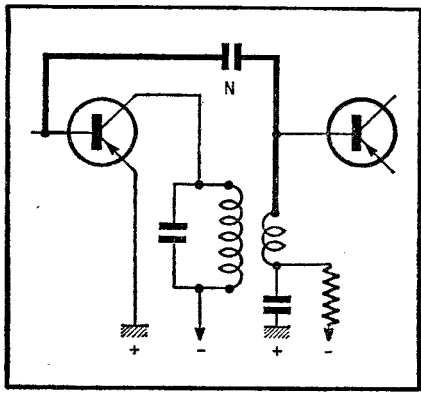



**Fig. 115. — El condensador N sirve para neutrodinar la acción de la capacidad interna colector-base. En algunos montajes está montada en serie una resistencia con este condensador. Su utilidad es a menudo dudosa.**

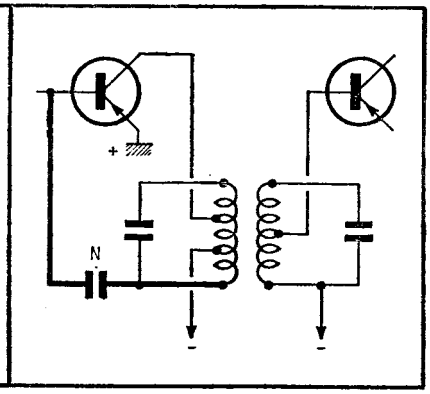
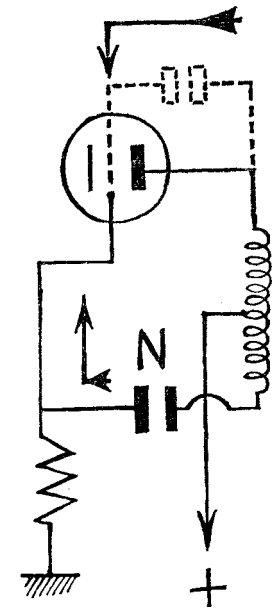
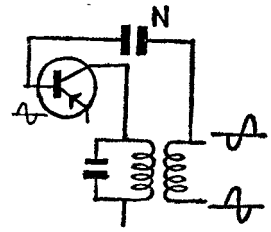



**Fig. 116. — Montaje neutrodino preconizado en el caso de acoplamiento por transformador con primario y secundario sintonizados.**

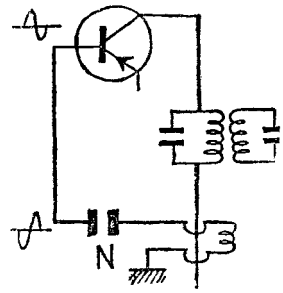



IG. — Esto, en mi opinión, no es más que una especie de contrarreacción, que se aplica en R.F. Y, en los transistores, se debe aplicar a la base. ¿Cómo hacerlo para que la condición de oposición de fase sea respetada? ¿Es necesario recurrir a un paso inversor de fase?

CUR. — ¿Para qué buscar tales complicaciones? Siempre hay medio de encontrar un punto de fase opuesta a la de las tensiones en el colector. En el caso de un transformador con secundario no sintonizado, uno de los extremos de dicho secundario constituye el punto en cuestión.

IG. — Se le une, pues, pura y simplemente, a la base, por un condensador N de un valor tal que las tensiones tengan la misma amplitud que las que pasan por la capacidad colector-base. ¿Por qué no aplicar este mismo procedimiento en el caso de los transformadores, cuyo secundario está igualmente sintonizado? ¿No están allí también las tensiones en oposición de fase en uno de los extremos, y en fase en el otro?



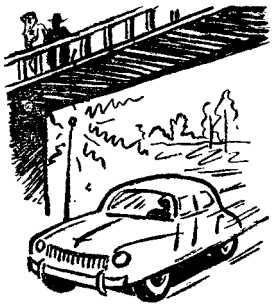

CUR. — No, desgraciadamente. Porque allí, las tensiones están desfasadas solamente un cuarto de período, en adelanto en un extremo y en retardo en el otro. Esto complica un poco las cosas. Entonces para obtener la tensión de neutralización se puede utilizar un pequeño arrollamiento auxiliar. Sin embargo, es más sencillo practicar en el primario una toma para la conexión que va al negativo de la fuente. Entonces el

extremo de este arrollamiento que, con respecto a esta toma, está al otro lado de la parte unida al colector, tendrá tensiones de fase opuesta a las del colector. Ya no queda más que tomar estas tensiones y, a través de un condensador N, aplicarlas a la base.

IG. — ¿Siempre es obligaado neutrodinar los pasos R.F. y F.I.?

CUR. — No. A menudo el amortiguamiento debido a las pequeñas resistencias de los transistores basta para suprimir toda veleidad de enganches espontáneos. Y, con los P-N-I-P y los «drift» no es necesario el neutrodinaje...

Por otra parte, observe que aunque no los he hecho figurar en los esquemas con el fin de hacer éstos más claros, se emplean igualmente en R.F. y F.I. todos los dispositivos de compensación de los efectos de temperatura (contrarreacción por resistencia desacoplada en el emisor) y de estabilización de la polarización de base.



## Regulación automática.

IG. — ¿Se puede realizar en los transistores el control automático de ganancia (C.A.G.), en función de la intensidad de las señales recibidas? Me refiero al regulador antifading, puesto que sirve para remediar todas las fluctuaciones del campo en la recepción, ya sean debidas al fading propiamente dicho o a que un receptor instalado en un coche esté pasando por debajo de un puente metálico.

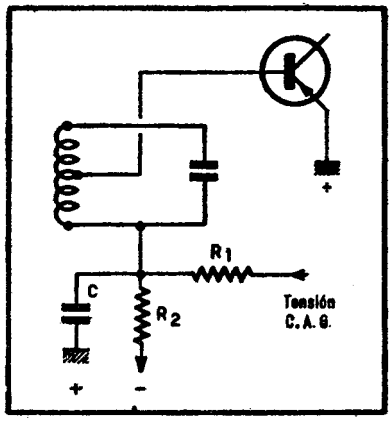
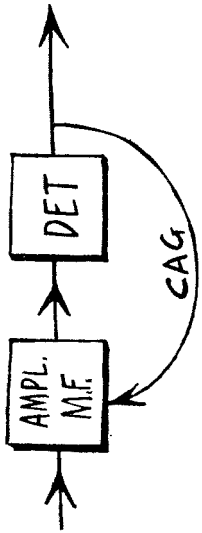



**Fig. 117. — Paso amplificador R.F. o F.I. sometido a la acción de la tensión de control automático de ganancia.**




CUR. — En los montajes con transistores, el C.A.G. se realiza según el mismo principio que en los receptores con válvulas. Usted sabe que la ganancia de potencia de un transistor depende de su pendiente, la cual por su parte varía con la corriente de emisor. Por consiguiente, modificando la polarización de la base se puede modificar la ganancia. Si se trata, como es generalmente el caso, de un transistor del tipo P-N-P, se reduce la corriente del emisor, y por tanto la ganancia, haciendo a la base menos negativa.

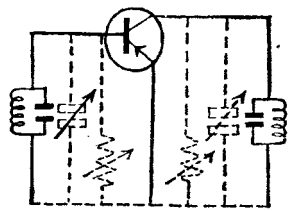
IG. — Y, ya lo adivino, se utiliza a este fin una tensión tomada después de la detección e igualada por una resistencia desacoplada por medio de una capacidad.

CUR. — Exactamente. Sin embargo aquí tampoco hay que perder de vista que el mando de un transistor necesita algo más de una tensión: la potencia. Esto conduce a menudo a tomar la tensión de regulación

después de haber amplificado la componente continua de la señal detectada. Más tarde veremos que esto no tiene nada de complicado.

IG. — Mientras tanto veo el paso R.F. o F.I. supeditado a la C.A.G. en una forma bastante sencilla. Esta tensión, que debe ser tanto más positiva cuando más fuerte es la señal, se aplica a base por mediación de una resistencia $R_1$, y a través del circuito. Otra resistencia $R_2$, conectada al negativo de la fuente, constituye con $R_1$ un divisor de tensión. Así, el potencial medio de la base va a variar: para señales débiles, será más negativo, lo que aumentará la ganancia; será menos negativo para señales fuertes, lo que dará una ganancia más reducida. Y así, como diría el doctor Pangloss dirigiéndose a Cándido, todo será inmejorable en el mejor de los mundos.

## Una dificultad imprevista.



CUR. — Una vez más me veo obligado a desempeñar el papel de aguafiestas: su optimismo no está justificado. No olvide que en el transistor todo cambio de una de las magnitudes altera a todas las demás. En el caso en cuestión, las capacidades de entrada y de salida varían al mismo tiempo y en el mismo sentido que la intensidad de la corriente del emisor.

IG. — ¿De modo que la tensión de regulación provoca, por sus cambios, el desacuerdo de los circuitos oscilantes conectados en derivación en la entrada y en la salida del transistor?

CUR. — Pues claro, Ignotus. No se limitan los daños a esto. Porque las resistencias de entrada y de salida varían igualmente en función de la corriente del emisor, pero en sentido opuesto a estas variaciones.

IG. — ¿Y esto es grave? Todo lo más que podrá ocurrir será que al aumentar estas resistencias, amortiguarán menos los circuitos sintonizados de entrada y de salida. Y el receptor será más selectivo...

CUR. — ... y, a consecuencia de ello, menos musical, porque la banda de paso será más estrecha, en detrimento de las notas agudas.

IG. — En todo el tiempo que le conozco. Curiosus, he comprobado que su método consiste en acumular las peores dificultades para, inmediatamente, con un golpe de varita mágica, hacerlas desaparecer. Tenga, pues, la amabilidad de dar ese golpe de varita.

CUR. — A decir verdad, será necesario contentarse con un compromiso, porque no es fácil eliminar todos los inconvenientes que acabo de señalar. A este fin se puede reforzar la acción del regulador, actuando al mismo tiempo sobre el amortiguamiento de un circuito sintonizado, de manera que se aumenta aquél cuando las señales se hagan más fuertes. He aquí un esquema ingenioso que permite hacerlo. Encontrará en él el mismo procedimiento de mando de la ganancia por la tensión de las señales detectadas, aplicado a la base del transistor. Pero, además, observará usted la presencia insólita de un diodo entre uno de los extremos de un circuito de entrada y un extremo de la resistencia de carga $R_5$, en el circuito de salida. Intente analizar su misión.

IG. — Pues bien, admitamos que las señales recibidas se hacen más fuertes. La tensión aplicada, a través de $R_1$, a la base del segundo transistor, se hace entonces menos negativa y su corriente de emisor disminuye. La corriente de colector disminuye igualmente. La caída de tensión que determina en $R_5$ se hace más fuerte, de modo que el punto A se hace menos negativo. Entonces la corriente que deja pasar el diodo D

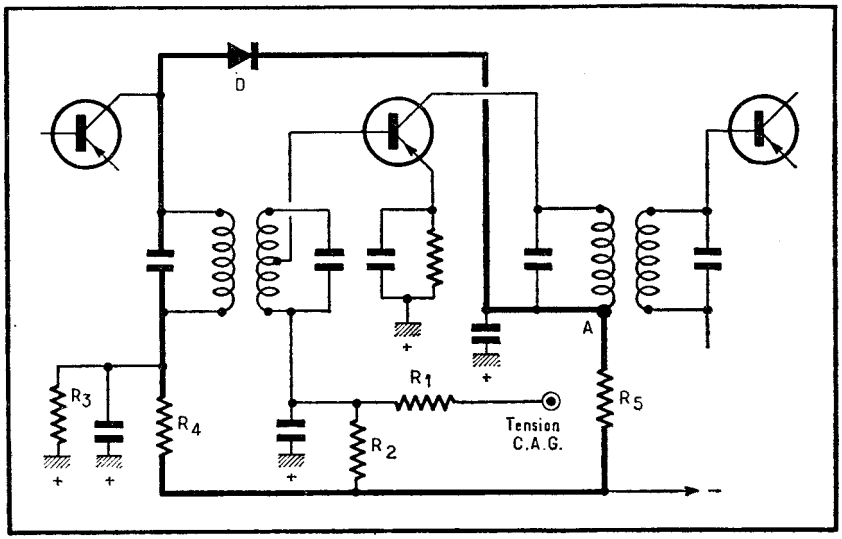



**Fig. 118. — Dispositivo de C.A.G. reforzado en que el diodo D determina un amortiguamiento variable del primer circuito sintonizado.**

se hace más intensa puesto que la diferencia de potencial que se le aplica es más elevado. Esto es todo...

CUR. — No, no es esto todo, porque el circuito del cual forma parte el diodo (y que he trazado en líneas gruesas), está, como usted ve, conectado en derivación a nuestro primer circuito sintonizado. El hecho de que la corriente sea en él más intensa significa que su resistencia se ha rebajado. Por lo tanto es que amortigua más el circuito sintonizado y consume más energía de él.

IG. — Ya comprendo. Así, para las señales fuertes en que aumentan las resistencias internas de los transistores ha introducido usted, artificialmente, una resistencia que disminuye. Y así compensamos una de las variaciones con la otra. Por añadidura, el mayor amortiguamiento del circuito reduce la ganancia y refuerza la acción del C.A.G.

CUR. — Ignotus, tengo la impresión de que pronto será usted el que va a enseñarme a mí la teoría y la práctica de los transistores...

TRECEAVA CHARLA

**Ignotus sabe ahora cómo los transistores permiten amplificar las señales en R.F., F.I. y B.F. Pero ignora la manera de pasar de una de estas frecuencias a la otra. Así Curiosus le va a revelar aquí los misterios de la detección y del cambio o conversión de frecuencias. Al mismo tiempo pasará revista a un cierto número de oscilaciones con transistores.**

**SUMARIO: Detección por diodo. — Umbral de detección. — Montajes prácticos. — Detección por transistor. — Detector a reacción. — Montajes osciladores. — Conversión de frecuencia con o sin oscilador separado.**

# DE LA R.F. A LA F.I., DESPUES A LA B.F.

## Las últimas zonas blancas.

IGNOTUS. — En una época en que la selenografía (1) no tiene secretos para nosotros, pienso irresistiblemente en esos mapas, que, con sus zonas blancas de «tierras desconocidas» hacían las delicias de nuestros abuelos y dejaban toda latitud a la imaginación de Julio Verne y sus émulos.

CURIOSUS. — Veo muy bien a donde quiere ir usted a parar. En la cadena de los pasos que componen un receptor, quedan para usted dos zonas blancas: la detección y la conversión de frecuencias. Vamos a llenarlas tanto más fácilmente, cuanto que aquí no hay ninguna trampa y que, prácticamente, usted sabe cómo se efectúa la detección por medio de un diodo.

IG. — En efecto, ya examinamos antaño la manera según la cual el diodo rectifica la señal R.F.; después de lo cual, las alternancias unilaterales, igualadas por medio de una capacidad, crean una tensión B.F. en una resistencia de carga.

## Detección = rectificación.

CUR. — He aquí un esquema que para usted no tiene nada misterioso. Utilizamos un diodo de punta D, que rectifica las corrientes que

(1) Geografía (si se puede decir así) de la Luna.

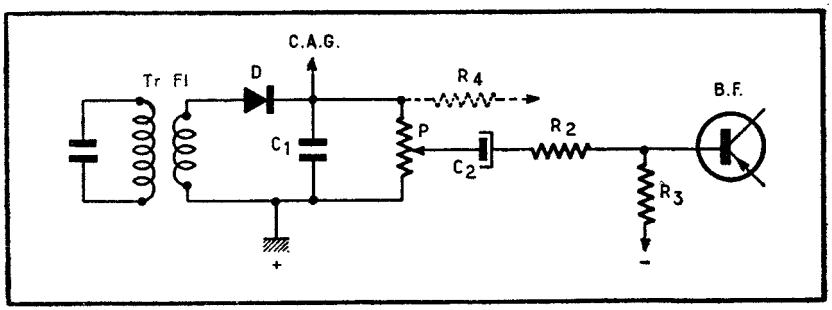
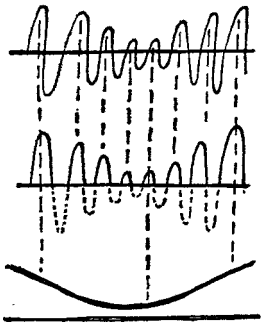


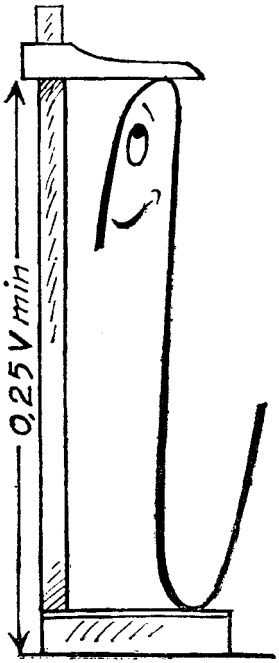

**Fig. 119. — Circuito de detección por diodo colocado entre el último transformador F.I. y el primer transistor B.F.**



emanan del último transformador F.I. y crea así en los extremos de la resistencia P tensiones que igualan la acción del condensador $C_1$ para poner en evidencia su componente de B.F. Se toma de ellas una fracción mayor o menor, desplazando el curso del potenciómetro P (ajuste de la intensidad sonora) y, a través del condensador electrolítico (aquí estamos en B.F.), se la aplica a la base del primer transistor B.F.

IG. — ¿Para qué sirve la resistencia $R_2$?

CUR. — Para evitar un amortiguamiento excesivo del transformador F.I., acusado por la insuficiente resistencia de entrada del transistor B.F. Observe todavía que el diodo de punta no comienza a dejar pasar la



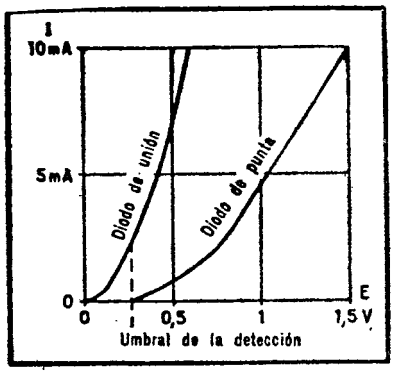




**Fig. 120. — Curvas que muestran la variación de la corriente que pasa por un diodo en función de la tensión que se le aplica. Se observa que el diodo de punta no «arranca» sino a partir de una tensión del orden de 0,25 V.**

corriente en el «buen sentido» mas que cuando las tensiones a rectificar excedan de un cierto valor, que es el «umbral» de la detección. También, para poder detectar señales inferiores a este umbral (que es del orden de 0,25 V) y no deformar aquellas que, aún excediendo, son débiles, es preferible polarizar el diodo en el valor del umbral. Esta es la razón de ser de la resistencia $R_4$ que, de valor muy superior a P, forma con P un divisor de tensión que hace al diodo conductor incluso con señales débiles.

IG. — Veo que usted toma la totalidad de la tensión detectada para el C.A.G.

CUR. — Y no estoy seguro de que esto baste siempre para asegurar una regulación suficiente. No obstante, antes de hablar del antifading amplificado, dejo a su cuidado el análisis lógico de un esquema de detección diodo más «refinado».

IG. — Esto no me da miedo. Comparado con el precedente, difiere de él por la célula de filtraje $C_8$—$R_7$—$C_4$, verdadero filtrito de paso bajo, destinado a eliminar todo residuo de la componente F.I. en la tensión que aparece en P. Por otra parte, usted crea la tensión de regulación en una resistencia de carga distinta $R_5$, desacoplada por $R_6$ y $C_5$. La polarización se obtiene gracias a la resistencia $R_4$. En resumen, aquí se ha separado el circuito B.F. del de C.A.G. Sin embargo, quisiera saber cómo realiza usted el *antifading amplificado.*

CUR. — Muy sencillamente, detectando por medio de un transistor, o para ser más preciso, por medio de la unión emisor-base, que constituye, en efecto, un diodo. Su umbral es mucho menor que el de los diodos de punta, de modo que una polarización negativa muy pequeña, obtenida por el divisor de tensión $R_1$ — $R_2$, basta para permitir una detección de las señales de débil amplitud. Observe bien que esta polarización no debe exceder de 0,1 V; de lo contrario, en lugar de detectar, el transistor se pondrá a amplificar en F.I., lo que no deseamos de ninguna manera... No respondiendo más que a las alternancias que hacen a la base más negativa, el transistor no dejará que pasen al colector más que las corrientes correspondientes a estas alternancias.

IG. — ¡Pero, esto es exactamente igual al funcionamiento de la detección por la curvatura de la característica anódica en el campo de las

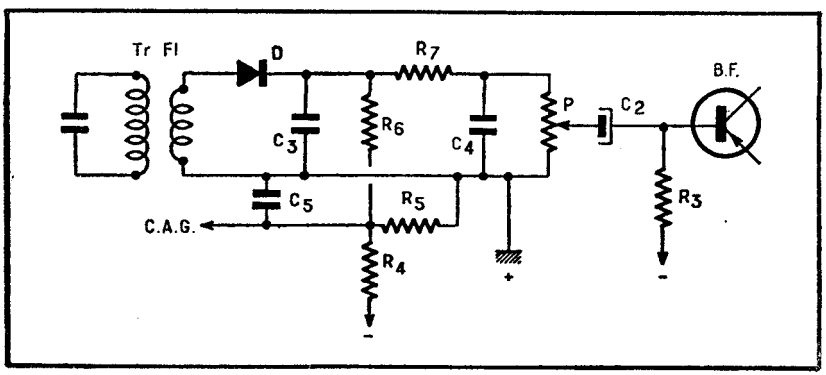
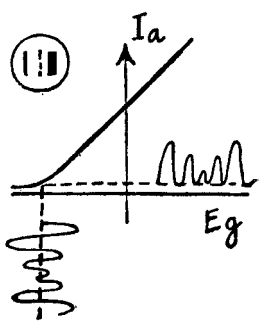



**Fig. 121. — Esquema de un paso detector en que la tensión de regulación se desarrolla en una resistencia de carga distinta y en que la corriente detectada es filtrada por célula con resistencia y capacidades.**




válvulas! Veo perfectamente lo que pasa entonces. Nuestros impulsos unilaterales de la corriente de colector desarrollan en la resistencia de carga $R_3$ tensiones de B.F., amplificadas gracias a la ganancia del transistor. Filtradas por $C_1$—$R_4$—$C_2$ son en seguida dosificadas por el potenciómetro P, antes de proseguir su camino a los pasos de B.F.

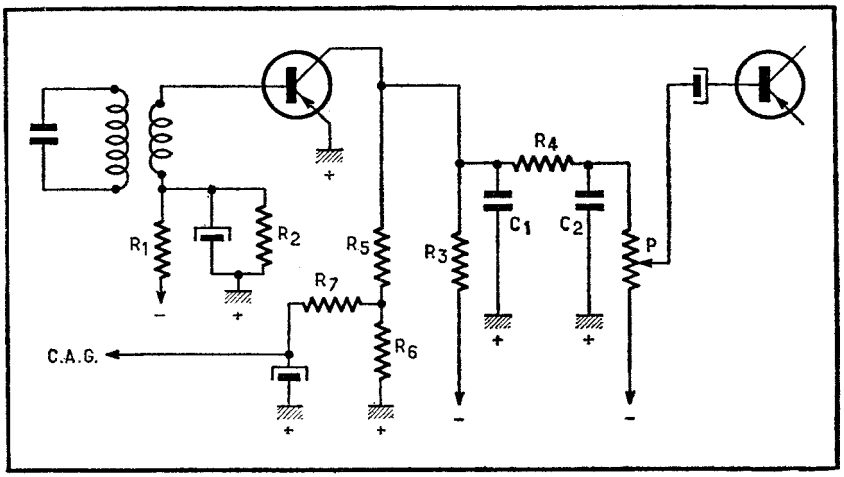
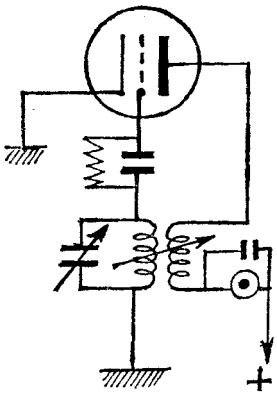



**Fig. 122. — Detección por transistor, que proporciona una tensión de C.A.G. amplificada.**



CUR. — Exacto. Observe usted además la presencia de otra resistencia de carga $R_6$, que forma con $R_5$ un divisor de tensión para, a través de $R_7$, aplicar una polarización conveniente a las bases de los transistores sometidos al C.A.G.

## Lo contrario de la contrarreacción.

IG. — Y esta tensión de regulación, ya lo veo, es aquí amplificada efectivamente. Y, puesto que hablamos de detección, quisiera preguntarle si, con los transistores, se puede realizar un detector a reacción, este montaje que siempre me ha maravillado por su extraordinaria sensibilidad.

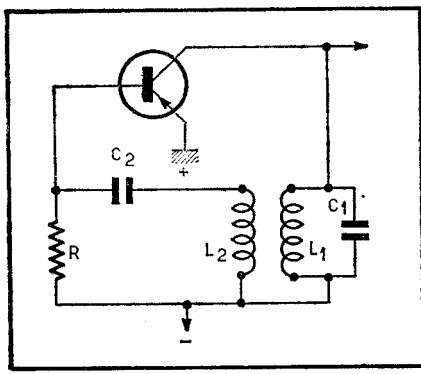
CUR. — Desde luego. A este fin basta reinyectar en el circuito de entrada una parte de la enegía amplificada, que se toma en el circuito de salida. Naturalmente, es necesario que...

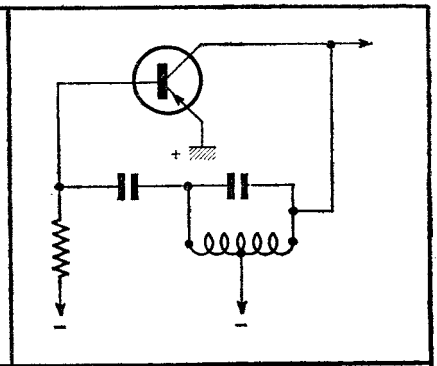
IG. — ... las tensiones reinyectadas estén en fase con las del circuito de entrada. De lo contrario, tendremos contrarreacción y en lugar de aumentar la ganancia, la reduciremos.

CUR. — Debe ser respetada otra condición: el acoplamiento entre los circuitos de entrada y de salida no debe pasar de un cierto límite... sin lo cual...

IG. — ... nuestro detector a reacción se transformará en oscilador de R.F. y sus emisiones intempestivas originarán débiles silbidos de interferencia en los receptores de la vecindad.

CUR. — Esto se produce cuando la aportación de energía debida a la reacción es superior a la fracción de energía disipada en el circuito de entrada, a causa de las diversas pérdidas naturales. Usted sabe que un oscilador de R.F. no siempre es causa de discordia con los vecinos. Co-



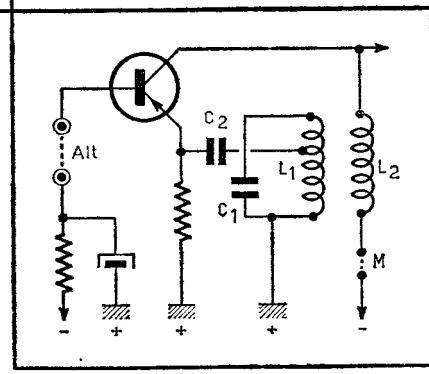




**Fig. 123. (Arriba, a la izquierda). Oscilador que contiene un circuito sintonizado en el colector y un arrollamiento acoplado en la base, y que sirve para la reinyección de la energía amplificada.**

**Fig. 124. (Arriba, a la derecha). — En el oscilador Hartley basta una sola bobina con toma central para la sintonía y la reacción. Remplazando la toma de la bobina por un «punto medio eléctrico» realizado por medio de dos condensadores en serie, se obtendrá el oscilador Colpitts.**

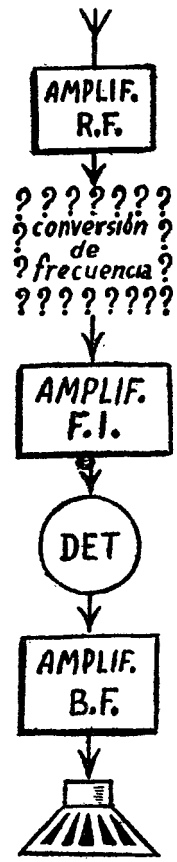



**Fig. 125. (Abajo). Oscilador del tipo más corriente, comprendiendo un circuito sintonizado del emisor, acoplado por inducción al arrollamiento de reacción intercalado en el circuito del colector. La significación de las letras R y M está explicada en el texto.**

rrectamente empleado, es el que permite realizar la conversión de frecuencia.

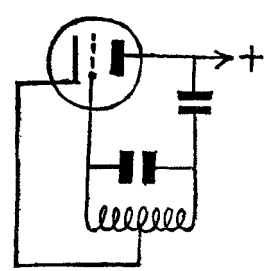
IG. — Me encanta verle abordar esta última «tierra incógnita» de mis cartas geográficas. Supongo que con la versatilidad que les caracteriza, los transistores permiten realizar un gran número de esquemas diversos de osciladores.

CUR. — No se equivoca usted. En efecto, se puede actuar sobre varios factores: en la entrada, se puede atacar sea la base, sea el emisor. Además se puede sintonizar el circuito de base o el de colector. Por último se puede realizar un oscilador con una sola bobina que sirva a la vez para la sintonía y para la reacción.

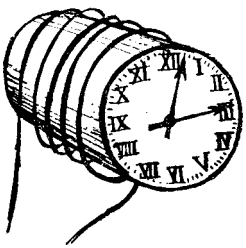
IG. — Si usted me lo permite, voy a intentar combinar uno muy sencillo. Coloco el circuito sintonizado en el del colector y acoplo su arrollamiento $L_1$ con otro $L_2$, el cual ataca, a través de $C_3$, la base del transistor, polarizado por medio de R. ¿Va a oscilar mi montaje?

CUR. — Sin duda alguna, si usted determina convenientemente el sentido de los arrollamientos.

IG. — ¿Cómo se sabe *a priori* que se cumple esta condición?



CUR. — Piense siempre en el montaje Hartley, del cual he aquí la versión «transistorizada». Vea usted que, yendo desde el colector hacia la base, la corriente recorre siempre las espiras en el mismo sentido. Aplique esta misma regla al montaje de la figura 123 y, si en $L_1$, la corriente recorre las espiras en el sentido de las agujas de un reloj yendo desde el colector al negativo, procure que en las espiras de $L_2$ la corriente circule de la misma manera yendo desde el negativo hacia la base.



IG. — Pues, si en lugar de la base, atacamos el emisor, sin duda será necesario invertir el sentido de los arrollamientos.

CUR. — Ciertamente. Mire este esquema en que el circuito sintonizado $L_1 - C_1$ ataca el emisor a través de $C_2$. Aquí la bobina de reacción intercalada en el circuito del colector debe ser orientada en el sentido contrario al del arrollamiento $L_1$, puesto que las tensiones que se aplican al emisor son de fase opuesta a las aplicadas a la base.

## Triodos en todas las salsas.

IG. — Me parece que seré absolutamente capaz de trazar una decena por lo menos de esquemas de osciladores. Pero, si usted me habla de ellos, estoy seguro de que es para abordar el problema de la conversión de frecuencias. En esto me siento perplejo. ¿Cómo se puede hacer

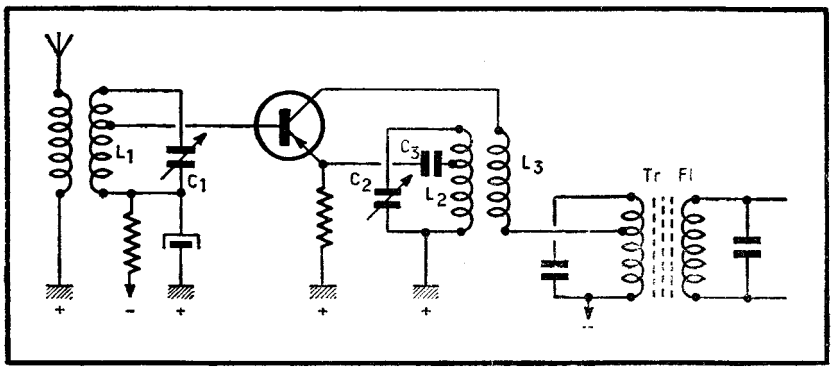
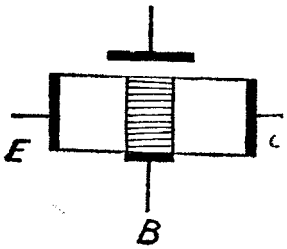



**Fig. 126. — Montaje conversor de frecuencia inmediatamente deducido del oscilador de la figura precedente.**

un oscilador-modulador con estos transistores, que no son sino triodos a cristal? ¿No hay medio de hacer hexodos, pentodos y octodos con semiconductores?




CUR. — Hasta ahora no se ha hecho. Posiblemente se podrán realizar semiconductores con dos electrodos de mando, actuando sobre la corriente, a la vez por el potencial de la base y por un electrodo cuyo campo eléctrico sirva para desviar del camino recto a los portadores de carga. Pero entretanto hemos de contentarnos con nuestros triodos. ¿No se realizaron los primeros superheterodinos en una época en que no se conocía más que la válvula o tubo de tres electrodos?

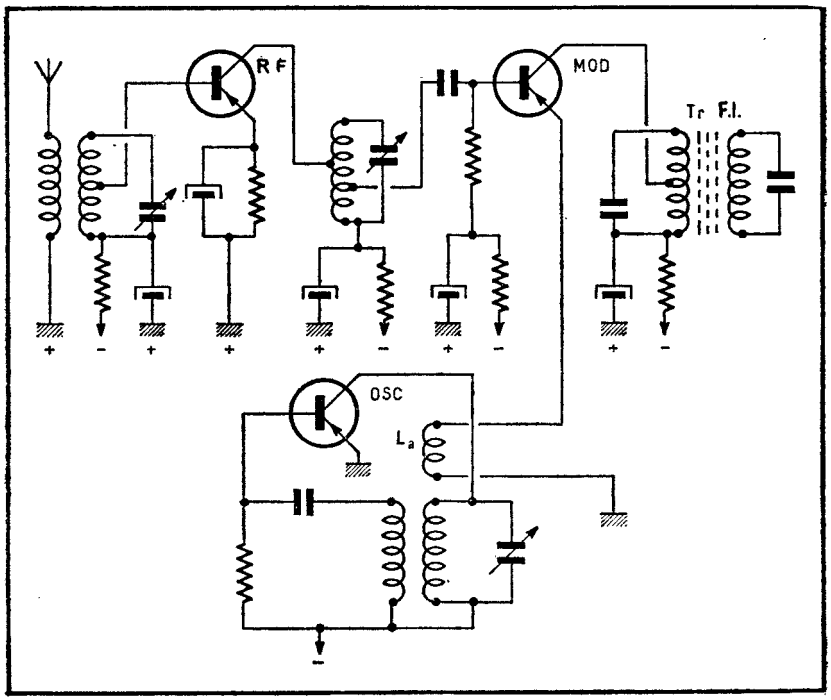


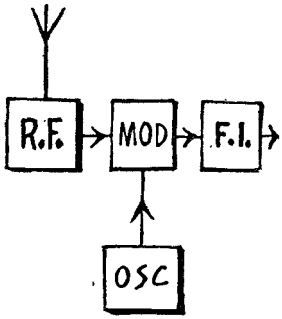

**Fig. 127. — Precedido de un amplificador R.F., el modulador conversor de frecuencia comprende un oscilador separado.**

IG. — ¿Cómo va usted a engendrar las oscilaciones locales con el mismo transistor, superponerlas a la corriente R.F. de antena y detectar todo, para hacer aparecer la componente F.I. resultante de los batidos?

CUR. — Muy sencillamente, Ignotus. Tome el oscilador de la figura 125 e intercale en H el circuito sintonizado a la señal de antena; después intercale en M el primero de un transformador F.I. Y llegará usted al esquema de la figura 126. Si el circuito $C_2$—$L_2$ del oscilador está sintonizado a una frecuencia que se diferencie de la correspondiente a la señal captada en el valor de la F.I., la conversión de frecuencia se efectuará sin dificultad.

IG. — En efecto, usted aplica la señal a la base, crea la oscilación entre emisor y colector y se aprovecha, seguramente, de la no linealidad de la característica del transistor, convenientemente polarizado a este fin, para detectar los batidos. Lo que no empece para que esta manera de explotar al pobre transistor haciéndole cumplir tantos cometido diversos me parezca retroceder a las peores épocas de la esclavitud.

CUR. — Sin embargo el transistor la sobrelleva bien. Pero, si usted tiene que separar netamente las funciones de oscilación y de modulación —y esto puede ser preferible para la recepción de ondas cortas— puede usted recurrir al empleo de un oscilador distinto. A título de ejem-




plo, le presento el esquema de un paso preamplificador R.F., seguido de un modulador con oscilador separado. Como ve usted, las oscilaciones son aplicadas al emisor del modulador por intermedio de un arrollamiento $L_a$, acoplado con las bobinas del oscilador.

IG. — Esto me parece muy simpático. Y observo, con alegría, que ya no me quedan zonas blancas en el mapa del maravilloso país de los transistores.

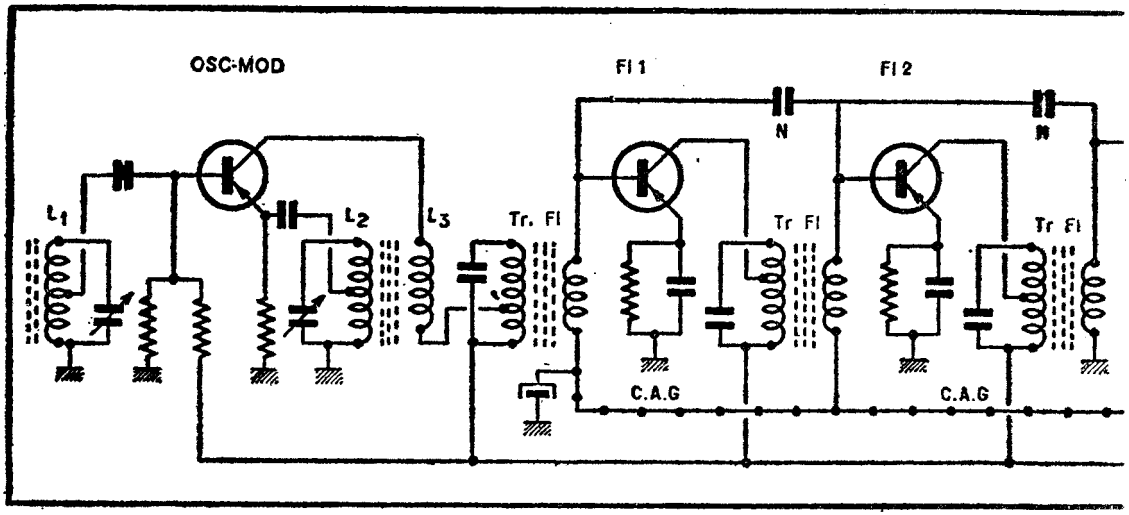



**Fig. 128. — Esquema tipo de un receptor portátil con transistores compuesto de los elementos precedente estudiados.**

CATORCEAVA CHARLA

**¿Será porque con la presente charla se va a terminar el viaje que nuestros jóvenes amigos han emprendido al bello país de los transistores, por lo que se hablará de trenes?... Esta última entrevista permitirá a Curiosus y a Ignotus aplicar los conocimientos adquiridos al estudio de los esquemas de conjunto. Después de haber hecho así uso de las nociones asimiladas en el pasado, nuestros amigos echarán una mirada a las maravillosas perspectivas del porvenir que se abre ante los triodos a cristal.**

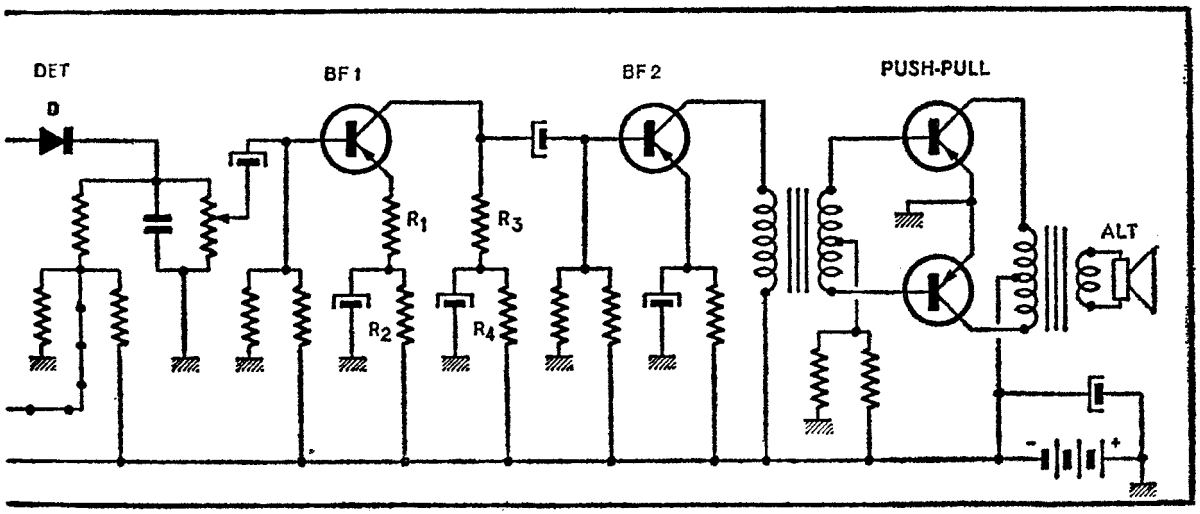
**SUMARIO: Esquema de receptor completo. — Cuadro sobre ferrita. — Aplicaciones diversas de los transistores. — Conversor de corriente continua. — El porvenir de los transistores.**

# VAGONES Y TRENES

**Diversión de los mayores, tranquilidad de los niños.**

IGNOTUS. — No se sorprenda, Curiosus, de verme jugar con un tren eléctrico. Está destinado a mi sobrinito. Y estoy comprobando el buen funcionamiento del telemando y de las agujas.

CURIOSUS. — Sí. Esto es lo que dicen los padres al ofrecer un tren eléctrico a sus hijos, puesto que no se atreven a confesar cuánto les di-

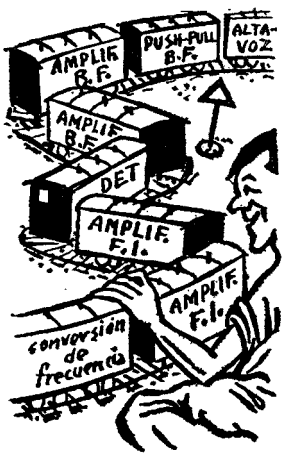



**No se da ningún valor de los elementos, porque estos dependen de los modelos de transistores utilizados.**

vertió esto a ellos mismos... Pues mima usted mucho a su sobino. ¡Qué variedad de vagones! Viajeros de todas las clases, coche cama, vagón restaurante, vagones frigoríficos, cisterna, plataformas. ¡Qué sé yo!...

IG. — Esto permite combinar hasta el infinito la posición de los convoyes.

CUR. — De la misma manera que los diversos montajes con transistores que hemos estudiado permiten componer una infinidad de receptores de todas las clases. Sería vano querer pasar revista a todas. Pero si usted quiere, a título de ejemplo, construiremos un esquema compuesto de vagones... quiero decir de los montajes siguientes:




— Conversor de frecuencia de la figura 126;
— Dos pasos amplificadores F.I. de la figura 115 (pero con tomas en los primarios, para reducir el amortiguamiento);
— Detector de la figura 119;
— Dos pasos B.F. con resistencias y capacidades de la figura 90;
— Un paso final push-pull de la figura 101.

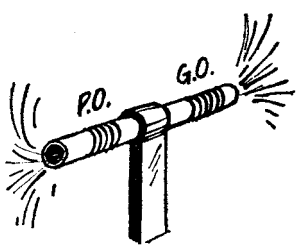
Le ruego que examine atentamente este esquema, que es, casi hasta en los detalles, el de la mayoría de esos receptores portátiles que turbaron sus horas estivales en la playa. ¿Ve usted en ellos alguna cosa que le intrigue?

## El cuadro miniatura.

IG. — Lo que me intriga es precisamente lo que no veo en ellos: la antena.

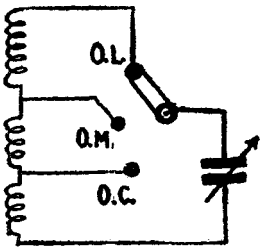
CUR. — El receptor no tiene antena. La bobina de entrada $L_1$ está arrollada sobre una larga barrita de ferrita y capta las ondas haciendo las funciones de cuadro.

IG. — ¿No tiene que ser grande el diámetro de tal arrollamiento, para conferirle el suficiente poder captador?




CUR. — No, porque la ferrita es una cerámica magnética de alta permeabilidad. Esto es decir que aspira, en cierto modo, todos los campos magnéticos que estén en su vecindad. Y así la pequeña bobina, cuyo diámetro no excede mucho de dos centímetros, puede tener el mismo poder colector que un gran cuadro a aire. Tiene igualmente su poder directivo, lo que obliga a orientar conveniente los receptores portátiles y aumenta su selectividad, atenuando al mismo tiempo los parásitos que emanan de otras direcciones. Observe, Ignotus, que en lugar del arrollamiento único $L_1$ (lo mismo que en lugar de los arrollamientos del oscilador $L_2$ y $L_3$) hay normalmente varios arrollamientos puestos en circuito por un conmutador y corresponden cada uno a una gama de ondas. Hay dos de ellos en los receptores que sirven para las ondas largas y medias. Y si hay que recibir ondas cortas, se le añade una tercera bobina conectada a una pequeña antena, porque la recepción de las O.C. en cuadro es difícil. ¿Ve usted otros puntos que le parezcan oscuros?

**Todo está claro.**




IG. — Palabra que no. Observo que la polarización de todas las bases es fija, con ayuda de divisores de tensión.

CUR. — Hay incluso interés en hacer estos regulables empleando a este fin, en cada par de resistencias, una ajustable. La elección correcta del punto de funcionamiento es extremadamente importante.

IG. — Supongo que de esta manera los dos transistores de potencia que forman el push-pull final están polarizados de modo que funcionen en clase B, lo que economizará el consumo de la batería.

CUR. — ¿Para comprobar sus conocimientos, puedo preguntarle cuál es la misión de las resistencias $R_1$, $R_2$, $R_3$ y $R_4$?

IG. — $R_1$, que no está desacoplada, es una resistencia de contrarreacción serie. Reduce el porcentaje de las distorsiones. Y, además, su acción se suma a la de $R_2$, que sirve para estabilizar el paso compensando la acción de los cambios de temperatura. En cuanto a $R_3$, es la clásica resistencia de carga. Por último, $R_4$, con su condensador, sirve para desacoplar el circuito de colector evitando acoplamientos parásitos.

**¡Larga vida al transistor!**

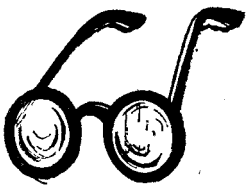
CUR. — ¡Bravo! Ignotus. Tengo la agradable impresión de no haber perdido el tiempo exponiéndole el funcionamiento de los transistores y sus aplicaciones en los amplificadores y receptores de radio.

IG. — Porque, seguramente no se limitan a esto los usos de los «animalitos de tres patas».

CUR. — Imagínese, querido amigo, qué entusiasmo han causado en todos los técnicos electrónicos estos maravillosos triodos a cristal con su volumen y peso ínfimos, su módico apetito (comparado con el de las válvulas, las cuales necesitan una corriente de caldeo), y cuya longevidad es notable. Diez años después de la creación del primer transistor. gentes muy serias afirman ya que los transistores podrían funcionar durante cien mil hora por lo menos. Lo más chocante de la historia es que los diez años en cuestión no contienen más que noventa y siete mil seiscientas cuarenta y ocho horas en total, y esto teniendo en cuenta los años bisiestos... A pesar de ello, parece que la extrapolación a la que tuvieron que recurrir, aunque audaz, resultó exacta y posiblemente por debajo de la verdad.

IG. — Sé que las máquinas de calcular hacen un gran consumo de transistores. Algunas contienen unos diez mil.

CUR. — Comprenda usted qué ventaja ofrecen en este caso su pequeño volumen y, prácticamente, la ausencia de todo desprendimiento de calor.



IG. — Este mismo pequeño volumen ha permitido, así lo he leído, realizar aparatos de prótesis auditiva, es decir amplificadores para «oídos duros», que están contenidos en las varillas de las gafas lo que les hace perfectamente invisibles.

CUR. — Esto es exacto. Adivinará usted también lo apreciadas que son las propiedades de los transistores en los artefactos espaciales, en que cada gramo, cada centímetro cúbico, cada milivatio de fuentes de alimentación, tiene una enorme importancia.

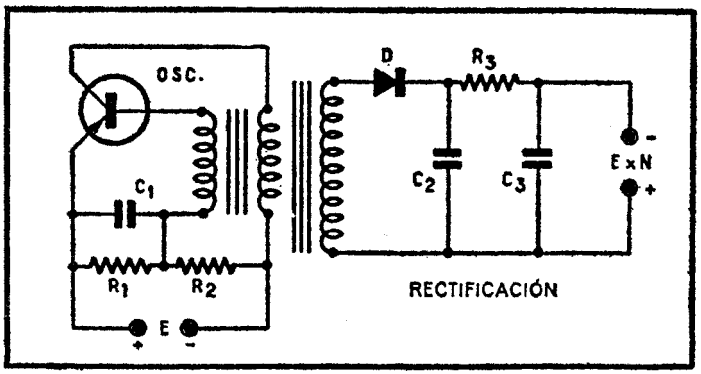
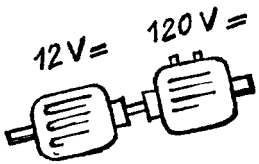



**Fig. 129. — Convertidor de corriente continua que permite elevar N veces la tensión E de la fuente. El divisor de tensión $R_1$ — $R_2$ sirve para polarizar convenientemente la base.**

IG. — En suma, en todos los campos, el transistor es capaz de reemplazar ventajosamente a las válvulas de vacío.

CUR. — Esto se dice muy pronto. Hasta nueva orden hay aplicaciones en que las válvulas son insustituibles, como, por ejemplo, los emisores de potencia. Pero, en cambio, hay problemas que sólo el transistor permite resolver. Esto es decirle que las válvulas y semiconductores pueden llevar una coexistencia pacífica, siendo cada uno empleado con entero conocimiento.




Sin duda tendremos otra ocasión de hablar de los empleos del transistor como conmutador, como multivibrador, como báscula... todas las clases de vagones que usted no conoce aún y que se emplean para componer diversos trenes electrónicos, con los cuales podremos divertirnos. Y esperándolo así, le expondré un pequeño ejemplo: el convertidor de corriente continua, que es más sencillo de realizar con transistores que con válvulas.

## Un convertidor silencioso.

IG. — ¿A qué llama usted convertidor de corriente continua?

CUR. — A un dispositivo que permite elevar la tensión de una fuente de corriente continua, que, alimentado, por ejemplo, mediante una batería de doce voltios, hacía girar una generatriz de corriente contiuna, procurando, digamos, ciento veinte voltios.

IG. — ¡Qué complicación y, seguramente, qué poco rendimiento!

CUR. — Además, por medio de un transistor, se puede asegurar la operación sin ruido, sin movimiento y con mejor rendimiento. A este efecto, se transforma la corriente continua de la fuente de tensión E en corriente alterna. Esto se realiza por medio de un transistor montado como oscilador B.F. bloqueado. Le recuerdo que se llama así a los osciladores con arrollamientos fuertemente acoplados, y que dan osci-

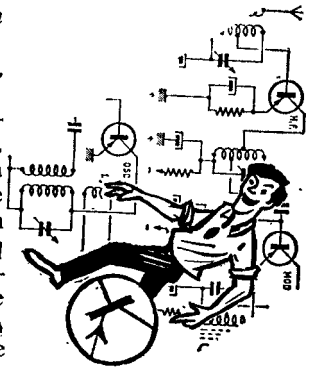
laciones que no son sinusoidales ni mucho menos, lo que, en este caso, importa poco.

IG. — Ya adivino lo que sigue. Un tercer arrollamiento, colocado en el mismo núcleo y que tiene muchas más espiras, permite elevar la tensión de la corriente alterna. Entonces no queda más que rectificar por medio del diodo y filtrarla por medio de la resistencia $R_3$ asociada a los condensadores $C_2$ y $C_3$ para obtener una tensión continua elevada *n* veces.

CUR. — Una vez más, Ignotus, demuestra usted una notable agudeza, por lo que le felicito.

Creo que ha asimilado usted bien mis enseñanzas y que no tendrá dificultad en el dédalo de los esquemas con transistores. Sin embargo, dice usted bien, que la técnica de semiconductores está todavía en plena evolución y que se dispone a conquistar nuevos campos (incluso el de la televisión), ya que los progresos de la tecnología nos reservan, sin duda, muchas sorpresas. Así, debo darle un buen consejo: no se deje pasar por estos progresos. Sígalos atentamente, lea los estudios publicados en la prensa técnica. Tenga siempre presente este pensamiento de Francis Bacon: «Lo que no se renueva, se destruye, porque la marcha inexorable del tiempo transforma todas las cosas». Por último, no vacile en someter a la práctica sus conocimientos, experimentando usted mismo montajes con transistores. Entonces se dará cuenta mejor de que...

IG. — ... ¿El transistor?... Pero, ¡si es muy fácil!



# MICROELECTRONICA

(Curiosus escribe a Ignotus)

Mi querido Ignotus:

Como le prometí en nuestra conversación telefónica de esta mañana, voy a tratar de resumir aquí los progresos realizados en el dominio de los semiconductores desde nuestra última entrevista.

El advenimiento del transistor ha abierto la vía hacia la miniaturización de los equipos electrónicos. El pequeño espacio que ocupa el triodo a cristal y la ausencia, prácticamente, de disipación de calor (salvo en los transistores de potencia) han permitido reducir considerablemente las dimensiones de todos los montajes electrónicos.

Pero actualmente se ha franqueado una nueva etapa: la de microelectrónica. Para examinar la estructura de los dispositivos actualmente realizados a base de semiconductores, es necesario recurrir al microscopio. Y la densidad de los componentes alcanzada en los circuitos integrados es del orden de millares por centímetro cúbico.

¿Cómo se ha conseguido tal reducción de las dimensiones? Voy a procurar explicarlo.

## Procedimientos tecnológicos.

Existen en gran número nuevos dispositivos *microminiaturizados* y todos los años se crean otros. Por eso no es posible estudiar todos.

Por el contrario, será útil exponer los principales procedimientos tecnológicos empleados para la realización de estos diversos dispositivos, que comprenden desde el simple transistor *planar* hasta los *circuitos integrados* LSI. (No se impaciente, querido amigo: le explicaré luego el significado de estos términos.) He aquí los procedimientos esenciales actualmente aplicados:

AISLAMIENTO. — Puede ser formada una capa aislante en la superficie del silicio (principal semiconductor empleado en microelectrónica) por oxidación de éste. Para ello se calienta el silicio hasta una temperatura comprendida entre 800 y 1.300° C, y esto en una atmósfera de oxígeno o de vapor de agua.

Así se cubre su superficie con una delgada capa de bióxido de silicio, que es un aislante perfecto, más conocido bajo el nombre de cuarzo. Su espesor es inferior a un micrón, o sea, un micrometro (milésima de milímetro).

EPITAXIA. — La resistividad del silicio dopado es a menudo muy pequeña lo cual, en ciertos casos, presenta un inconveniente que se remedia formando en la superficie una capa epitaxial en que las moléculas están ordenadas en una estructura cristalina perfecta. La propia etimología del término lo indica. *Epi* quiere decir, en griego, «encima» (de lo que se deriva también la palabra «epidermis»), y *taxis* significa «orden». De este modo el silicio situado debajo de la capa epitaxial sirve de soporte mecánico.

Para formar esta capa, cuyo espesor puede ser de 5 a 15 micrones, se calienta el silicio hasta 1.300° C en una atmósfera de hidrógeno. Después se reduce ligeramente la temperatura hasta 1.180° C introduciendo en el recinto caliente tetracloruro de silicio. Este se descompone en gas clorhídrico y en átomos de silicio que se depositan en perfecto orden sobre la superficie del semiconductor.

FOTOGRABADO. — Los fabricantes de los dispositivos a semiconductores han recurrido a las técnicas empleadas para la obtención de los clisés que sirven para la reproducción de dibujos en la impresión tipográfica ¿los conoce Vd., Ignotus?

En pocas palabras, para hacer un clisé cuyo relieve reproduce un dibujo y que, recubierto de tinta, lo imprimirá sobre el papel, se comienza por fotografiar el dibujo en cuestión sobre una película fotosensible. Al hacer esto se le puede agrandar o reducir en la relación que se desee. A continuación se coloca la película sobre una placa de zinc recubierta previamente de un barniz que, bajo el efecto de la luz, se hace muy sólida y no se disuelve en un líquido en que normalmente es soluble. Se proyecta una luz intensa sobre el zinc recubierto de la película que reproduce el dibujo en negativo, después se somete la placa así aislada a la acción del líquido solvente, con lo que se consigue que el barniz desaparezca en todos los puntos de la superficie salvo en los correspondientes al dibujo. Entonces se atacan por medio de un ácido las partes del zinc no protegidas y se obtiene el clisé en el cual aparece el dibujo en relieve.

Esta es la técnica que corrientemente se emplea en microelectrónica. Reduciendo mucho el dibujo, se le fotografía sobre una placa de vidrio o de otro soporte transparente; así se obtiene una «máscara» en que el dibujo está formado por superficies opacas de cromo; esta máscara es aplicada a la superficie del semiconductor recubierta previamente con un barniz fotosensible cuyo espesor es inferior a un micrón y que es endurecida por cocción a 90° C.

Una intensa luz proyectada sobre el barniz a través de la máscara convierte en insolubles las partes no ocultas por el dibujo en cromo. Y luego basta introducir la placa de semiconductor en un solvente apropiado para que no quede barniz más que en la superficies que estaban protegidas. Aún se le endurecerá más por una cocción a 150° C.

Y ya tenemos nuestro semiconductor en disposición de ser atacado por líquidos capaces de socavar su superficie, ya sea por vapores que sirven para difundir impurezas de los tipos P o N, o bien para ser recubiertos por partículas de aluminio o de otro metal que establezca la conducción entre sus diversos puntos tal como se desee.

Para completar, hay que añadir que para obtener el aislamiento se tiende cada vez más al empleo de los rayos ultravioletas en vez de la luz visible. Adivino la expresión de asombro en su mirada, querido amigo. Pues bien, para ello hay dos razones. En efecto, la acción química de los rayos ultravioleta es más enérgica que la de la luz visible. (Usted no ha perdido aún su bronceado por el sol de la alta montaña, rico en ultravioleta.) Pero el recurrir a estas ondas muy cortas está también motivado por el hecho de que las otras son... demasiado largas. Sí, querido amigo, en la escala de la microelectrónica los rayos cuya longitud de onda está comprendida entre 0,38 micron (violeta) y 0,78 micron (rojo) son demasiado largos.

Desde luego, el barniz se elimina al final de las operaciones en que ha sido necesario cubrir la superficie de la placa del semiconductor para producir «ventanas», es decir partes expuestas a toda clase de tratamientos.

## Ataque químico.

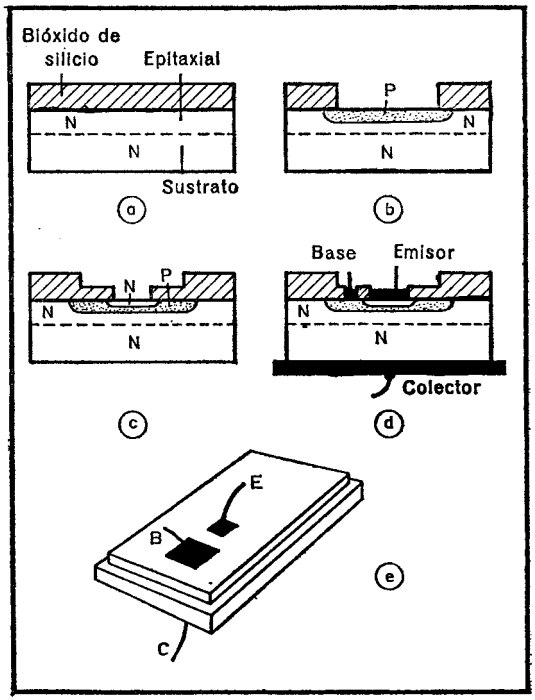
Una de las operaciones que más se emplean después del establecimiento de las «ventanas» es la supresión de la capa aislante de bióxido de silicio que cubre parcialmente la superficie de semiconductor. A este fin se introduce éste en un baño de fluoruro de amonio y de ácido fluorhídrico que disuelve todas las partes no protegidas por el bióxido.

DIFUSIÓN. — Estas mismas partes del semiconductor pueden ser dopadas con una cierta cantidad de impurezas de los tipos P o N calentando la placa en una atmósfera que contiene vapores de las substancias apropiadas. Las substancias dopantes pueden ser igualmente depositadas sobre la placa calentada a la temperatura necesaria para que las impurezas penetren por las «ventanas», formando zonas P o N según su naturaleza.

## Transistor epitaxial planar.

Ahora que hemos analizado las principales fases de fabricación vamos a estudiar, a título de ejemplo, la manera de obtener una de las variedades más empleadas de los transistores: el epitaxial planar.

Sé que no ha olvidado lo que aprendió del *mesa*. Se puede decir que el planar es su descendiente directo. Como su nombre indica, no presenta ese relieve que caracteriza al mesa. Además está constituido por una delgada capa epitaxial y protegido en su mayor parte por bióxido de silicio. Sus dimensiones son mucho más pequeñas que las de su antecesor, el transistor mesa, y, desde luego, se fabrican simultáneamente sobre la misma plaquita de sustrato (se designa así la delgada oblea de silicio), varias decenas e incluso centenares de transistores.




He aquí las fases sucesivas de la fabricación de un transistor N-P-N:

1. La placa de sustrato (silicio del tipo N) es limpiada y pulida.

2. Como antes le he descrito, está recubierta con una capa epitaial de un espesor que no excede de 15 micrones y también dopada con impurezas del tipo N.

3. Por encima de la capa epitaxial hay depositada una capa aislante de bióxido de silicio (fig. *a*).

4. Empleando una máscara apropiada, se abre en la capa aislante una «ventana» por el procedimiento de fotograbado con ataque químico.

5. A través de la «ventana» se difunden impurezas del tipo P (generalmente de boro) que formarán una zona que sirve de base en el futuro transistor (fig. *b*).

6. Nuevamente se recubre el conjunto con una capa aislante de bióxido de silicio.

7. Una segunda operación de fotograbado por ataque químico permite abrir en ella una «ventana» en la parte central de la zona P.

8. A través de esta abertura, se difunden impurezas del tipo N (de fósforo, por ejemplo) que formarán así la parte de emisor del transistor (fig. *c*).

9. Por tercera vez se recubre el conjunto con bióxido de silicio.

10. Y, también por tercera vez, se recubre el fotograbado para horadar dos minúsculas aberturas: una en la zona de emisor y otra en la de base.

11. A través de estas aberturas, se depositan capas de metal (frecuentemente se emplea el aluminio) que servirán para establecer las conexiones.

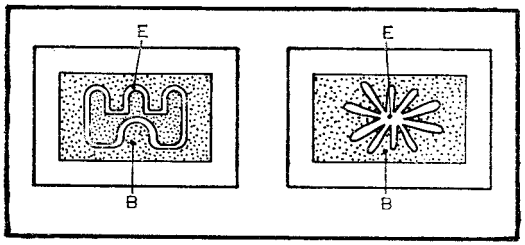
12. Se sueldan hilos en las pequeñas superficies metálicas para establecer las conexiones con el emisor y la base; en cuanto a la conexión del conector constituida por la parte de la capa epitaxial no sometida a las precedentes operaciones de difusión (5 y 8), se obtienen colocando la pastilla de sustrato sobre un soporte de chapa (figuras *d* y *e*).

Sólo falta colocar en una caja el transistor así obtenido. Y creerá usted , querido amigo, que las doce operaciones que he descrito deben hacer subir el coste de fabricación a un nivel que hace prohibitivo el precio del planar. Nada de eso, porque —no lo olvide— formamos simultáneamente decenas, cuando no centenas, de ellos sobre la misma plaquita de sustrato.

## Intensidad y capacidad.

Si la corriente que circula del emisor, a través de la base, al colector, es intensa, es necesario aumentar en el planar la superficie de la unión emisor-base. Entonces también

aumenta la capacidad entre estas dos zonas. Y ya sabemos todos los inconvenientes que de ello se derivan; en primer lugar, la limitación de la frecuencia.




Ahora bien, se pueden admitir densidades de corriente relativamente elevadas (que pueden alcanzar varios centenares de miliamperios e incluso varios amperios por milímetro cuadrado), lo que permite no aumentar la superficie de la unión; esto se consigue alargando la línea de contacto entre las zonas de emisor y base. A este efecto, por medio de máscaras apropiadas se confiere al emisor una forma más o menos caprichosa. En lugar de un rectángulo o de un círculo, será una línea quebrada, en forma de una estrella o de cualquier otra figura más o menos complicada, (figura de arriba).

Se consigue aumentar el límite superior de las frecuencias en los planares R.F. formando el emisor con varias pequeñas zonas conectadas en paralelo y uniendo los puntos de soldadura de las conexiones que parten del emisor y de la base con las partes del conjunto relativamente alejadas de estas dos zonas.

Tenga en cuenta, mi querido Ignotus, que todo esto se realiza en pastillas de sustrato cuyas dimensiones exteriores no exceden en ciertos casos de un tercio de milímetro. Y piense en las estructuras tan complicadas en un volumen tan reducido...

## Circuitos integrados.

Ya comienza Vd. a comprender lo que significa este término de microelectrónica. Pero aún no ha llegado al límite de su asombro en vista de la facilidad con que se han conseguido realizar este conjunto que constituye un transistor planar en la minúscula plaquita de silicio. Los técnicos han dado un nuevo paso formando, en el interior de un mismo trozo de semiconductor, un conjunto de dos transistores P-N-C y N-P-N complementarios, tal como el empleado en ciertos montajes amplificadores de B.F.

Con la misma facilidad han conseguido crear en un trocito de silicio varios diodos e incluso transistores de efecto de campo (T.E.C., que es la abreviatura equivalente en español y en francés a la sigla anglasajona F.E.T.), diodos de zener, etc.

Y —lo que es importante— estos diversos elementos están unidos entre sí por conexiones establecidas según el procedimiento de deposición de metal que ya le he explicado. Es decir, que no se forman los circuitos con componentes discretos (en la acepción matemática, esto quiere decir «distintos») sino que se obtienen circuitos integrados.

Estos pueden comprender igualmente componentes pasivos formados como sigue:

RESISTENCIAS. — Pueden estar formadas por caminos o trayectos en que las impurezas están dosificadas en el semiconductor de modo que presenten la resistividad deseada. Pero también se las puede realizar depositando sobre la superficie aislada (bióxido de silicio) entre los puntos de conexión una delgada capa de substancia resistente cuya resistividad y cuya longitud y sección se determinan para obtener el valor deseado. A menudo se utiliza a este fin aleación níquel-cromo y se alarga lo que convenga el trazado en los más variados dibujos.

CAPACIDADES. — Su realización es más delicada. Para obtener capacidades de pequeños valores, se constituyen simplemente con diodos conectados en el sentido inverso, que no dejan pasar corriente y en cambio presentan una cierta capacidad.

Pero también se pueden construir verdaderos condensadores depositando sobre el semiconductor una delgada capa de bióxido de silicio que sirve de dieléctrico, y recubriendo ésta con un depósito metálico que constituye la segunda placa del condensador.

De cualquier modo, los valores de las capacidades obtenidas en los circuitos integrados son bastantes pequeños.

AUTOINDUCCIONES. — La limitación de valor que le he señalado en lo que concierne a las

capacidades, es aún más rigurosa para las autoinducciones.

Ciertamente, se puede depositar en la superficie de un semiconductor una capa conductora en forma de espiral, que tenga muy poca autoinducción. Esto es lo que se hace cuando se trata de circuitos destinados a la región de las hiperfrecuencias, pero, por regla general, se procura evitar el empleo de autoinducciones en los circuitos integrados.

Sepa, Ignotus, que también se procura que un circuito integrado se componga principalmente de transistores y diodos. Con un poco de ingenio se logra conferir a los conjuntos así formados las funciones más variadas: amplificación en todas las regiones de frecuencias, producción de oscilaciones de formas y frecuencias variadas, conmutación (cierre o apertura, y por esto a tal circuito se le llama «puerta», para no decir «gate» en inglés), etcétera.

## Tecnología de los C.I.

Ya ha adivinado, mi buen amigo, que esta sigla C.I. designa los circuitos integrados. Esta denominación cubre una vasta gama de conjuntos variados en cuya fabricación se emplean los procedimientos tecnológicos que ya hemos estudiado: aislamientos, empleo de máscaras, fotograbado, difusión, metalización, etc. Pero si la realización del transistor planar que hemos analizado a título de ejemplo, requiere una docena de operaciones, su número es en general mucho más elevado para los C.I.

Estos se fabrican generalmente por decenas e incluso centenares, y a la vez, sobre la misma placa de sustrato, que tiene tres centímetros de diámetro y 0,25 mm de espesor.

Se pueden distinguir dos clases de C.I.:

A) *Circuitos integrados monolíticos* conteniendo todos los componentes activos y pasivos.

B) *Circuitos integrados híbridos* en que están conectados ciertos componentes discretos.

Según la complejidad del circuito realizado, en la primera categoría se distinguen los M.S.I. (*medium size integration*, es decir integración a escala media) y L.S.I. (*large scale integration*, integración a gran escala).

En cuanto a los *circuitos hídridos*, generalmente realizados sobre soporte aislante, según el procedimiento de fabricación se tienen *circuitos de capa delgada* obtenidos por evaporación en el vacío o por bombardeo catódico y *circuitos de capa gruesa* realizados por depósito de materias adecuadas según dibujos preestablecidos.

Los circuitos integrados ocupan un volumen ínfimo, pero se les tienen que unir, por medio de hilos de oro (que se suelda empleando un microscopio binocular), a los contactos de las cajas en las que están encerrados. Y éste es el drama: el volumen de la caja, que puede ser la quinta parte de un centímetro cúbico, es mil veces mayor que la del C.I. propiamente dicho. ¿No se parece esto a una araña cuyas patas ocupan mucho más sitio que el cuerpo?... añadiré que lo que más encarece el coste de producción es el establecimiento de las conexiones y la adaptación de la caja.

Sin embargo, mi querido Ignotus, no desdeñemos los C.I. que son una hermosa victoria del ingenio humano en el dominio de la tecnología. Ofrecen numerosas ventajas además de su extraordinaria compacidad.

En primer lugar hay que mencionar su alta fiabilidad. Este término designa la confianza que se puede tener en un dispositivo. En efecto, la probabilidad de fallos es muy pequeña en un C.I., puesto que está constituido por un bloque de cuerpo sólido. Nada de soldaduras, nada de contactos más o menos seguros..., es macizo y se puede confiar en él.

Fabricados en grandes cantidades, los C.I. son más baratos que los montajes equivalentes realizados con componentes discretos.

El empleo de los C.I. permite reducir considerablemente el coste de la mano de obra.

Finalmente, sus pequeñas dimensiones presentan otra ventaja en la que no siempre se piensa: su tiempo de transferencia es muy corto. En los ordenadores electrónicos actuales ciertas operaciones se efectúan en un tiempo medio de nanosegundos, es decir en una millonésima de segundo; pero, ¿cuál es la distancia que la luz o bien la corriente eléctrica (en un conductor perfecto) recorren en un segundo? Trate de responder a esta pregunta sin leer lo que sigue de mi carta y sin hacer cálculos teniendo en cuenta la velocidad de 300 km/s.

Apuesto, Ignotus, a que su respuesta está lejos de la verdad. Esta es que el trayecto recorrido por la luz o la corriente en un nanosegundo es 30 centímetros. Es decir, que en los ordenadores, en los que hay millares de circuitos, es necesario situar éstos suficientemente próximos entre sí para que el tiempo que tardan las corrientes en circular no retarde las operaciones efectuadas.

## Una nueva filosofía.

El advenimiento de los C.I. implica una nueva filosofía en la concepción de los aparatos electrónicos. Antes era necesario establecer esquemas de montaje de los componentes, pero ahora el ingeniero se limita simplemente a concebir la cadena de las funciones asumidas por un C.I.:

Estos no dejan de evolucionar y sus aplicaciones son cada vez más variadas. Los ordenadores hacen un gran consumo de los circuitos llamados *binarios* porque son biestables, es decir presentan uno de dos estados: abierto al paso de la corriente o cerrado. Ya le he dicho que también se les llama «puertas».

Otros circuitos son denominados *lineales* cuando su tensión de salida varía progresivamente con la de entrada.

Nada detiene el progreso en este campo, mi querido amigo. Si Vd. vuelve a leer esta carta dentro de algunos años, le hará sonreír, porque muchas cosas habrán cambiado. Sin embargo, una permanecerá intacta. Es la amistad entre nosotros.

CURIOSUS

# INDICE

**Prefacio** ... ... ... ... ... ... ... ... ... 5

**Introducción** ... ... ... ... ... ... ... ... 7

**Primera charla: LA VIDA DE LOS ÁTOMOS** ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... 9

Semiconductores. - Funciones y ventajas del transistor. - Acción del calor sobre los transistores. - Límites de frecuencia y de potencia. - Moléculas. - Átomos. - Protones, neutrones y electrones. - Distribución de los electrones en capas. - Ionización. - Número de valencia. - Red cristalina.

**Segunda charla: LAS UNIONES** ... ... ... 21

Conductibilidad intrínseca. - Células fotorresistentes y fotoemisoras. - Impurezas. - Donadores. - Huecos o lagunas. - Aceptores. - Semiconductores tipos P y N. Unión. - Barrera de potencial. - Tensiones directa e inversa. - Tensión de Zener. - Diodo. - Rectificación por semiconductores.

**Tercera charla: BUENOS DIAS, TRANSISTOR** ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... 31

Transistores P-N-P y N-P-N. - Corriente de reposo. - Corriente de base. - Efecto de transistor. - Amplificación de corriente. - Analogía válvula-transistor. - Resistencia de entrada y de salida. - Amplificación de tensión. - Alimentación del transistor.

**Cuarta charla: LA FÍSICA DE LOS TRANSISTORES** ... ... ... ... ... ... ... ... ... 39

Movimiento de las cargas. - Portadores mayoritarios. - Funcionamiento del transistor P-N-P. - Combinaciones intermetálicas. - Referencia de las conexiones. - Símbolos del transistor. - Resumen de las nociones fundamentales.

**Quinta charla: UN POCO DE TECNOLOGÍA** 47

Purificación por fusión de zonas. - Calentamiento electrónico. - Estiraje de un monocristal. - Su corte. - Método de las uniones «estiradas». - Transistores de aleación. - El problema de los transistores de potencia. - Procedimiento de difusión. Tiempos de transferencia. - Misión de la capacidad emisor-colector. - Transistor tetrodo. - Transistor de capa de barrera. - Método de doble difusión. - Transistor «drift», tipo P-N-I-P. - Transistor mesa. - Dispositivos de efecto de campo.

**Sexta charla: EL REINO DE LAS CURVAS.** 60

Montaje para determinar las características. - Curvas $I_b = f(E_b)$ e $I_c = f(E_b)$. - Pendiente. - Amplificación de corriente. - Resistencia de entrada. - Relación entre la pendiente, la resistencia interna y la amplificación de corriente. - Saturación. - Familias de curvas. - Analogía con el pentodo. - Potencia límite. - Resistencia de salida. - Determinación de los parámetros mediante redes de curvas.

**Séptima charla: RECTAS Y CURVAS** ... ... 71

Características estáticas y dinámicas. - Trazado de la recta de carga. - Punto de trabajo. - Amplificación de corriente, de tensión y de potencia. - Valores máximos de la componente alterna. - Tensión residual. - Elección de la impedancia de carga. - Pendiente dinámica. - Polarización de la base.

**Octava charla: CHOQUES DE RETROCESO.** 80

Los beneficios de la contrarreacción. - Contrarreacción de intensidad y de tensón. - Montajes con válvulas y con transistores. - Acción de la contrarreacción sobre la resistencia de entrada y de salida. - Distorsión de fase introducida por los transistores. - Contrarreacción interna. - Efectos de la temperatura sobre la distorsión. - Su compensación por la contrarreacción. - Empleo de las termistancias.

**Novena charla: E.C. - B.C. - C.C.** ... ... ... 91

Montajes de las válvulas con cátodo, rejilla o ánodo a masa. - Montaje de los transistores con emisor común, con base común o con colector común. - Amplificación de corriente y de tensión de los tres montajes fundamentales. - Sus resistencias de entrada y de salida. - Cuadro sinóptico de las características.

**Dos cartas: CUESTIONES DE ADAPTACIÓN** 100

La fuente y la utilización - Fuerza electromotriz y resistencia interna. - Tensión en los bornes. - Mando por tensión. - Mando por corriente. - Condiciones óptimas de la transferencia de energía. - Adaptacón de las impedancias. - Empleo del transformador. - Relación de transformación óptima.

**Décima charla: ACOPLAMIENTOS DE TODAS LAS CLASES** ... ... ... ... ... ... ... 105

Los montajes fundamentales con transistores N-P-N. - Ventajas e inconvenientes del acoplamiento por transformador. - Ajuste de la intensidad sonora. - Acoplamiento por resistencia y capacidad. - Valor del condensador de acoplo. - Montaje de acoplo directo. - Amplificador de corriente continua. - Montajes de simetría complementaria. - Transistores en tándem.

**Onceava charla: ECONOMÍA Y POTENCIA.** 117

Elección del punto de funcionamiento (o de trabajo). - Montaje economizador con tensión variable. - Push-pull (contrafase) clase B. - Desfase por transformador. - Inversor de fase. - Push-pull de simetría complementaria. - Esquema práctico del paso de salida. - Catodino con transistores.

**Doceava charla: EN EL CAMPO DE LA R.F.** 127

Frecuencia de corte. - Acoplo por circuitos sintonizados. - Efecto del amortiguamiento. - Pasos R.F. y F.I. - Capacidad colector-base. - Neutrodino. - Regulador antifading. - Variación de las capacidades y resistencias internas. - Antifading reforzado.

**Treceava charla: DE LA R.F. A LA F.I., DESPUÉS A LA B.F.** ... ... ... ... ... ... 135

Detección por diodo. - Umbral de detección. - Montajes prácticos. - Detección por transistor. - Detector a reacción. - Montajes osciladores. - Conversión de frecuencia con o sin oscilador separado.

**Catorceava charla: VAGONES Y TRENES** ... 143

Esquema de receptor completo. - Cuadro sobre ferrita. - Aplicaciones diversas de los transistores. - Conversor de corriente continua. - El porvenir de los transistores.

**Microelectrónica** ... ... ... ... ... ... ... 148

Enviando sus señas a

EDICIONES TÉCNICAS MARCOMBO, S. A.
Avda. José Antonio, 594 (frente Universidad)
Barcelona - 7

recibirá periódicamente información **gratuita** sobre las últimas novedades

Nuestras obras versan sobre

ELECTRÓNICA
ELECTROTECNIA
AUTOMÁTICA
MECÁNICA
AUTOMÓVILES
MATEMÁTICAS
ACONDICIONAMIENTO
ECONOMÍA, etc.

# FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE CIRCUITOS DE TRANSISTOR

## por Henry C. Veatch

368 páginas 202 figuras 14 x 22 cm.

He aquí una obra que sin perder su rigor científico describe con gran claridad y amenidad los principios del funcionamiento del transistor, así como de los circuitos transistorizados básicos.
Para su lectura sólo se precisa un conocimiento general de la electricidad y alguna de sus leyes básicas, principalmente la ley de Ohm. Gradualmente, el autor conduce al lector a conocer a la perfección este elemento semiconductor, base de la moderna electrónica, y sus grandes aplicaciones como componente de infinidad de circuitos.

EXTRACTO DEL ÍNDICE:

Materiales semiconductores. El diodo PN. El transistor de unión. Curvas características. Circuitos de transistor. Circuito de emisor común. Circuito de colector común. Circuito de base común. Método de análisis de c.c. Análisis gráfico. Características de temperatura. Análisis de un circuito lineal. Ejemplos de circuito lineal. Osciladores con transistores. Fuentes de alimentación. Tipos de transistores.

---

# 110 MONTAJES CON SEMICONDUCTORES

## por R. M. Marston

164 páginas 110 figuras 14 x 22 cm.

Debido a la rapidez en el progreso de la tecnología de los semiconductores, muchos técnicos y la mayoría de los aficionados no han podido ponerse al día sobre los dispositivos más modernos ante la carencia de información adecuada. Este libro familiarizará al lector con los semiconductores de reciente creación, tales como el transistor de efecto de campo, el transistor de unión, el tiristor, los transistores de silicio y los circuitos integrados.

EXTRACTO DEL ÍNDICE:

**30 Montajes con transistores de silicio:** Amplificadores sencillos con emisor común. — Circuitos para la activación de relés. — Circuitos estabilizadores de tensión y de corriente. — Interruptores accionados por luz y por agua. — Interruptor accionado por sonido. — Circuitos multivibradores. — **15 Montajes con transistores de efecto de campo:** Amplificadores simples en configuración de fuente común. — Amplificador compuesto. — Voltímetros electrónicos. — Multivibrador astable de muy baja frecuencia. — Circuitos temporizadores. — Amplificador de volumen constante. — Convertidor c.c./c.a. — **20 Montajes con transistores de unión única:** Generador de impulsos. — Convertidores analógico-digitales. — Circuitos retardadores para relés. — **15 Montajes con SCR:** Interruptores electrónicos de c.c. — Interruptores electrónicos repetitivos (intermitentes). — Circuitos reguladores de potencia. — **30 Montajes con circuitos integrados:** Circuitos inversores y manipuladores de impulsos. — Circuitos lógicos. — Circuitos multivibradores. — Circuitos derivados de la báscula Schmitt. — Generadores de formas de onda. — Circuitos mezcladores. — Amplificadores con emisor común.

# Una útil colección para su biblioteca técnica

# ELECTRONICA PRACTICA

**TITULOS APARECIDOS:**

N.º 1/2 **DE LA GALENA AL TRANSISTOR,** por Herbert G. Mende
132 páginas. - 94 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 3 **EXPERIMENTOS ELECTRONICOS,** por Gustav Büscher
84 páginas. - 86 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 4/5 **INSTRUMENTOS DE MEDIDA Y SU USO,** por Werner M. Köhler
128 páginas. - 86 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 6/7 **RECEPTORES PORTATILES CON TRANSISTORES,** por Hans Sutaner
136 páginas. - 116 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 8/9 **MICROFONOS MONOFONICOS, ESTEREOFONICOS Y A TRANSISTORES,** por Fritz Kühne
128 páginas. - 71 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 10 **EMISORAS CON TRANSISTORES PARA MANDO A DISTANCIA,** por Helmut Bruss
68 páginas. - 51 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 11/12 **CIRCUITOS TRANSISTORIZADOS PARA MODELOS TELEDIRIGIDOS,** por Helmut Bruss
132 páginas. - 102 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 13 **LOCALIZACION METODICA DE AVERIAS EN RADIORECEPTORES,** por el Dr. A. Renardy
72 páginas. - 20 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 14 **EL WOBULADOR. FUNDAMENTOS Y APLICACIONES,** por Hans Sutaner
72 páginas. - 40 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 15/16 **CIRCUITOS IMPRESOS (fabricación),** por H. Sutaner
128 páginas. - 49 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 17/18 **A.B.C. DE LA ELECTROACUSTICA,** por Gustav Büscher
152 páginas. - 131 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 19/21 **RECEPTORES DE AUTOMOVIL,** por Eckhard-Heinz Manzke
224 páginas. - 149 figuras. - 12 x 17 um.

N.º 22/23 **TECNICA DE LA ACUSTICA,** por H. H. Klinger
132 páginas. - 75 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 24/25 **MONTAJES ELECTRONICOS CON CELULAS FOTOELECTRICAS,** por Wilhem Hennig
176 páginas. - 112 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 26 **TRUCOS Y RECURSOS EN RADIOTECNIA (Tomo I),** por Fritz Kühne
68 páginas. - 56 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 27 **EL OSCILOSCOPIO Y SU USO** por Hans Sutaner
80 páginas. - 87 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 28/29 **CONVERTIDORES DE TENSION CONTINUA TRANSISTORIZADOS,** por Helmut Schweitzer
152 páginas. - 66 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 30/32 **GENERADORES DE PRUEBA, ONDAMETROS Y MULTIVIBRADORES,** por Hans Sutaner
156 páginas. - 125 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 33/34 **AMPLIFICADORES BF CON VALVULAS Y TRANSISTORES,** por Fritz Kühne
144 páginas. - 100 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 35/36 **DIPMETER CON TUBOS, TRANSISTORES Y DIODOS TUNEL,** por J. Reithofer
120 páginas. - 92 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 37/38 **EQUIPOS A TRANSISTORES DE AFICIONADOS PARA LA BANDA DE 2 M,** por J. Reithofer
116 páginas. - 112 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 39/40 **ALTAVOCES Y CAJAS DE RESONANCIA PARA HI-FI,** por H. H. Klinger
156 páginas. - 125 figuras. - 12 x 17 cm.

N.º 41 **TRUCOS Y RECURSOS EN RADIOTECNIA (Tomo II),** por Fritz Kühne
80 páginas. - 57 figuras. - 12 x 17 cm.

---

Si desea recibir periódicamente folletos gratuitos sobre las últimas novedades técnicas relativas a Electrónica, Electrotecnia, Economía, Mecánica, Automovilismo, etcétera, **remita sus señas a:**

**MARCOMBO, S. A. Ediciones Técnicas**

**de Boixareu Editores**

**Avda. José Antonio, 594 - BARCELONA - 7**

# ELEMENTOS DE RADIO REPARACION

por Marcus y Levy

6.ª edición, 440 páginas, 410 figuras y numerosas tablas.
19 x 24 cm.

Muchos manuales y textos sobre radio reparación están concebidos con la premisa de que no pueden establecerse sus fundamentos sin una previa y abundante exposición de principios teóricos, y descuidan lo referente a su aplicación práctica, contribuyendo con ello a que el aprendizaje sea lento y laborioso.

En este libro se ha procurado que la exposición de los principios básicos de radio reparación sean lo más didáctico posibles, para que sean de aplicación inmediata en la práctica y ayuden a trabajar con destreza.

El éxito obtenido en las ediciones anteriores demuestra a los autores que sus métodos pedagógicos tienen una base sólida. Se trata sin duda de la mejor obra publicada en español sobre la materia. Indispensable para reparadores y radiotécnicos. Contiene numerosos ejer-

Cuando un técnico, en España o América, tiene necesidad de un buen libro solicita nuestro Catálogo que se envía *gratis* inmediatamente. Cuando ha elegido *su* libro lo pide a *su*

LIBRERO

Todos los libreros poseen libros de

MARCOMBO

o saben cómo obtenerlos rápidamente ya que MARCOMBO mantiene relación constante con todos y en todas las ciudades tiene depósitos.
Pida, pues, libros de MARCOMBO en la seguridad de que le serán servidos. De no encontrarlos se los enviará MARCOMBO.