



**ELECTRONICA  
DIGITAL  
5**



### TRANSISTOR

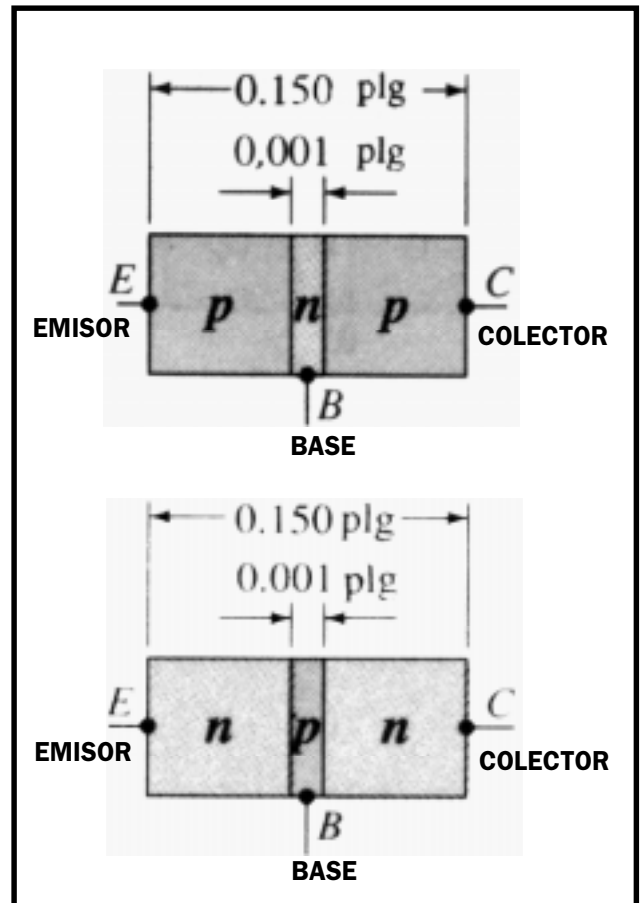
Durante el período 1904-1947, el tubo al vacío; comúnmente denominado válvula, fue el dispositivo electrónico del que hizo uso la radio y televisión; que en 1937 alcanzó una producción de 100 millones de ellos. En los años siguientes celebraron con ella grandes avances de diseño; aplicaciones de alta potencia y alta frecuencia, así como miniaturización.

Sin embargo, el 23 de setiembre de 1947 la industria electrónica atestiguó el advenimiento de una dirección de interés y desarrollo completamente nueva. En los laboratorios de la Bell Telephone, demostraron el efecto amplificador del primer transistor. De inmediato, las ventajas de este dispositivo de estado sólido, de tres terminales, sobre la válvula, fueron evidentes. Era más pequeño y liviano, no tenía filamento, no requería tiempo de calentamiento, y menor tensión de trabajo.

Por esta razón reemplazó a la válvula en todos los circuitos electrónicos.

El transistor es un dispositivo semiconductor de tres capas, compuesto ya sea de dos capas de material N y una del tipo P; o dos capas P y una de tipo N. El primero se denomina transistor NPN, en tanto que el otro PNP. La capa central es mucho más fina que la de los extremos, como referencia a la relación entre el ancho total y el de la capa central es de 150 a 1 (150:1). También el dopaje de la capa central es menor que el de las exteriores, por lo general 10 a 10 menos (10:1). Este nivel de dopaje reduce la conductividad (incrementa la resistencia) de este material al limitar el número de portadores libres.

Los terminales se denominan emisor (E) base (B) y colector (C).



## TRANSISTOR PNP

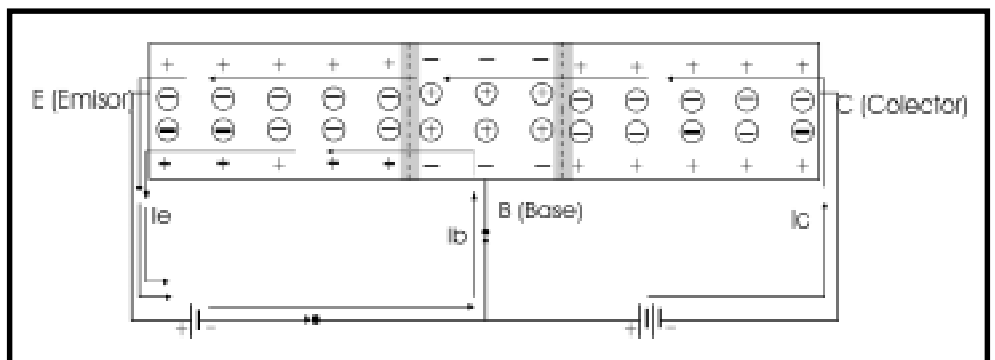
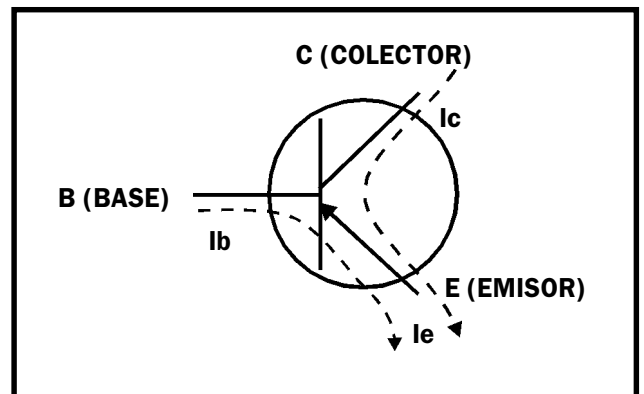
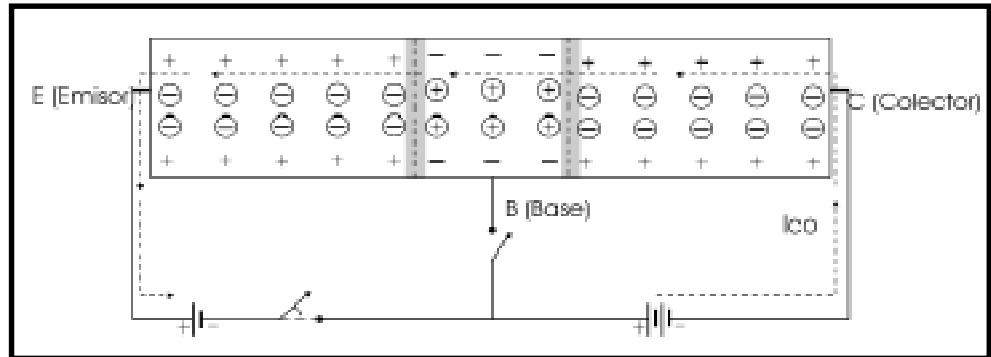
Este como hemos dicho, está compuesto por una fina capa de material N entre dos de mayor espesor del tipo P. Esto determina la aparición de dos barreras de potencial; una entre base y emisor, y la otra entre base y colector.

En efecto, si se observa los electrones libres presentes en la base, deducimos que: 1) la juntura colector-base les impide llegar al colector para combinarse con las lagunas. 2) La juntura base-emisor les impide llegar a emisor para combinarse con las lagunas.

Si cerramos la llave 1 notaremos que la tensión de la fuente refuerza la barrera de potencial base-colector y aunque se debilita la base-emisor; en una primera aproximación, podemos decir que de colector a emisor no circula corriente. Aunque se invierta la polaridad de la fuente sucederá lo mismo pues la barrera base-emisor será reforzada y debilitada la de base-colector. En definitiva, cualquiera que sea la polaridad de la fuente entre colector y emisor no circula corriente apreciable. Sin embargo, si observamos detenidamente el proceso, notaremos que por efecto de la temperatura ambiente algunas ligaduras se rompen dando lugar a la existencia de portadores adicionales, los cuales desde colector son impulsados por la fuente y obligados a cruzar hacia base. Como el diodo base-emisor está polarizado directamente, dichos electrones encuentran gran oposición para desplazarse hacia el positivo de la fuente.

A esta corriente de fugas se la denomina  $I_{CO}$  (corriente colector-emisor con base abierta) y es muy pequeña; pero puede incrementarse y destruye el transistor si no se toman medidas que la controle.

Si cerramos la llave 2, la batería que une base con emisor, polariza directamente a dicha jun-



tura; en efecto el negativo de la fuente inyecta electrones en la base, lo cual debilita la barrera con emisor; estableciendo una corriente de base a emisor denominada "corriente de base" ( $I_b$ ).

Dicha corriente es de pequeño valor, pero sin embargo, consigue debilitar también la barrera base-colector, por lo que los electrones de colector llegan a base. Debido al pequeño espesor de la base, dichos electrones cruzan la base y alcanzan a emisor llegando al polo positivo de la fuente. Esta corriente se denomina "corriente de colector" ( $I_c$ ) y es de un valor mucho mayor al de base ( $I_b$ ).

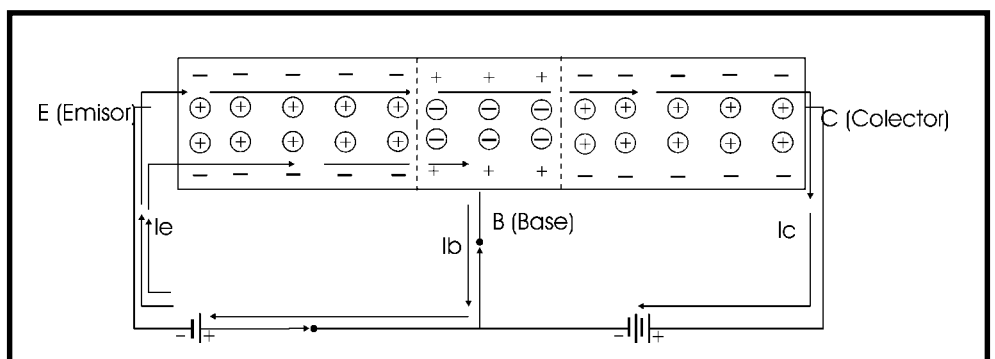
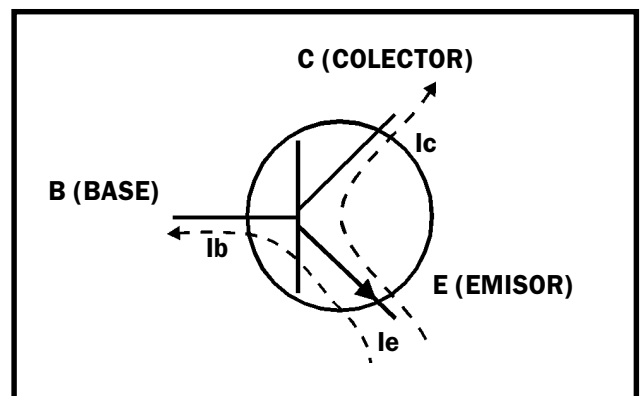
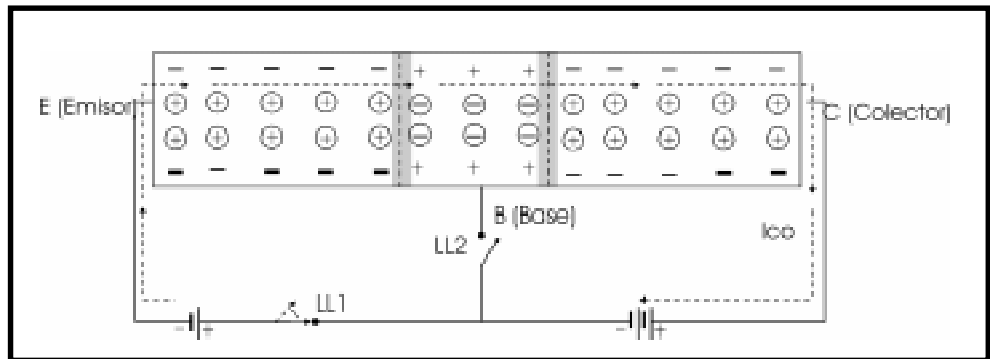
La suma de la corriente de base y colector forman la llamada corriente de emisor ( $I_e$ ); o sea,  $I_e = I_c + I_b$ . A pesar del bajo valor de la  $I_b$ , esta tiene un efecto regulador sobre la corriente total del transistor. En efecto, un pequeño incremento de la corriente de base a emisor, determina un mayor debilitamiento de la barrera base-colector y por lo tanto, esto produce un gran incremento en la  $I_c$ .

Si por el contrario, la  $I_b$  disminuye, aumenta la barrera base-colector y la  $I_c$  disminuye en forma importante. Este efecto regulador que posee la base es la que permite que el transistor pueda utilizarse como amplificador.

Como ejemplo ilustrativo, indicamos que la corriente de base es aproximadamente como máximo, un 5 % de la corriente total del transistor; por lo tanto el 95 % restante corresponde a la  $I_c$ .

## TRANSISTOR NPN

Las consideraciones para el funcionamiento de este tipo de transis-





tura; pues ella provoca cambios, tales como la ganancia de corriente  $\beta$  y la corriente de fugas  $I_{ceo}$  o  $I_{co}$ , este efecto se conoce como corrida térmica. El sistema de polarización debe proporcionar un grado de estabilización de la temperatura de modo que estos resulten mínimos y no se modifique el punto de trabajo. Para conseguir esto, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- 1) La juntura base-emisor debe polarizarse directamente con una diferencia de potencial de aproximadamente 0,1 V a 0,2 V en transistores de germanio y 0,5 V a 0,7 V en transistores de silicio.
- 2) La juntura base-colector polarizado inversamente, estando dicho valor de tensión dentro de los límites permitidos. El funcionamiento en las regiones de corte, saturación y lineal del transistor se obtienen de acuerdo con lo siguiente:

### **Operación en la región lineal**

Juntura base-emisor con polarización directa.

Juntura base-colector con polarización inversa.

### **Operación en la región de corte**

Juntura base-emisor con polarización nula o inversa.

### **Operación en la región de saturación**

Juntura base-emisor con polarización directa.

Juntura base-colector con polarización directa.

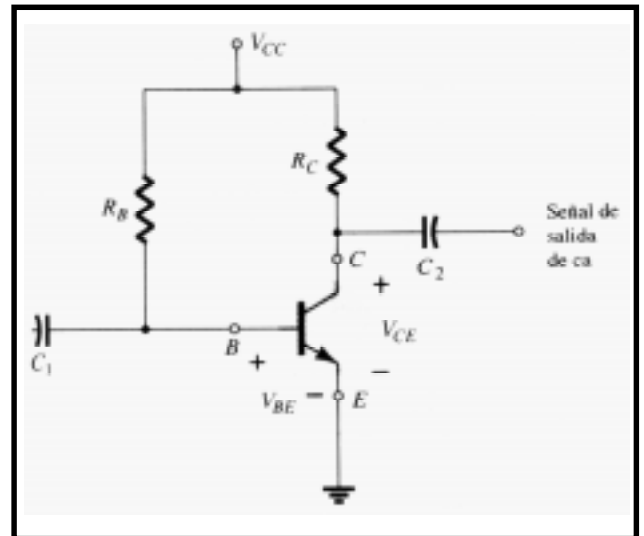
## TIPOS DE POLARIZACIÓN

Existen tres sistemas de polarización a saber: polarización fija, auto polarización o estabilizada de emisor y polarización universal o con divisor de tensión.

### Polarización fija

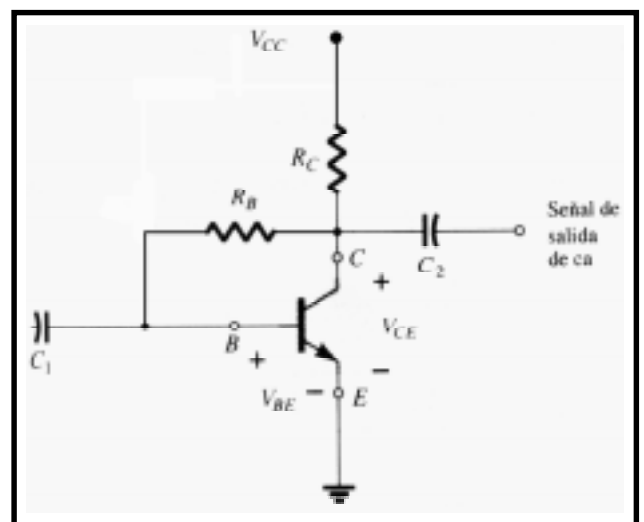
En este sistema, se polariza perfectamente el transistor para que conduzca y amplifique; mediante  $R_B$  se polariza a base respecto a emisor y por medio de  $R_C$  a colector. Por lo tanto el transistor está en condiciones de operar. Sin embargo este sistema adolece del defecto de que no tiene protección contra la  $I_{co}$ , pues si ella se incrementa por efecto de la temperatura el circuito no tiene ninguna posibilidad de limitarla.

Todos los sistemas de estabilización de la temperatura se basan en controlar la  $I_B$  de acuerdo con la  $I_C$ . Una variante al circuito como la que se muestra en la figura permite que, si por causa de las fugas aumenta la  $I_C$ , al bajar su tensión por



mayor caída en  $R_C$  baja automáticamente la polarización de la base. La consecuencia de esto es una disminución de la  $I_B$  y con ello se logra hacer que la  $I_C$  vuelva a su estado anterior normal.

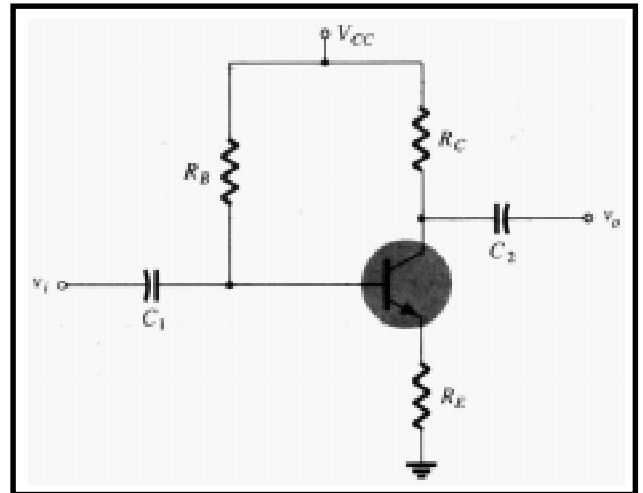
Este sistema, si bien actúa en forma efectiva sobre la corrida térmica, afecta la ganancia de la etapa pues introduce realimentación negativa de colector a base.



## Polarización estabilizada de emisor

En este sistema se agregó una resistencia en emisor para mejorar el nivel de estabilidad respecto a la polarización fija. Con el agregado de esta resistencia se puede controlar en forma bastante eficiente la  $I_{co}$ ; pues si esta aumenta producirá una mayor caída de tensión en  $R_E$  (resistencia de emisor), por lo que la diferencia de potencial con base va a disminuir.

Esto determinará una menor  $I_b$  por lo que la  $I_c$  disminuirá en la misma proporción que había aumentado la  $I_{co}$ . Para que en corriente alterna no aparezca realimentación negativa puede agregarse un capacitor en paralelo con  $R_E$ , cuyo valor dependerá de la frecuencia de trabajo de la etapa; acción que será explicada oportunamente.

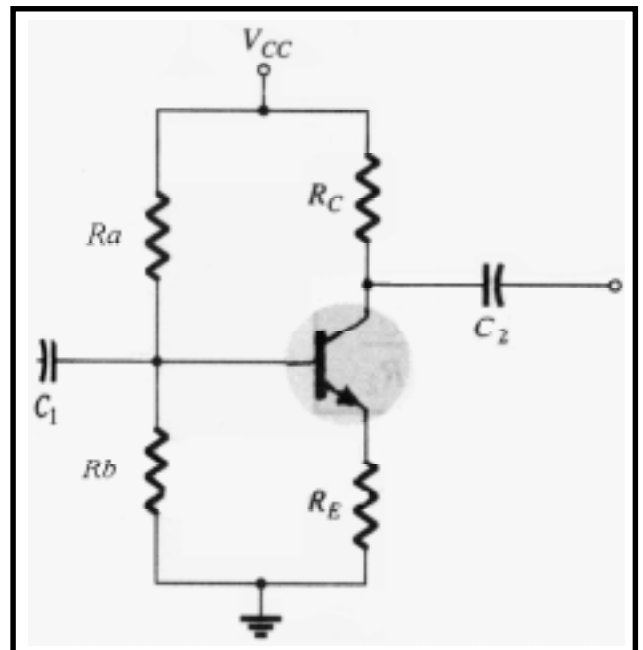


## Polarización con divisor de tensión

En este sistema se emplean tres resistencias para la polarización, dos de ellas forman un divisor de tensión con el  $+V_{CC}$ ; la otra está conectada entre el emisor y el chasis. La serie  $R_a$ - $R_b$  (resistencia de alimentación-Resistencia de base) permite circulación de corriente; en la  $R_b$  se produce una caída de tensión que hace a base positiva respecto a chasis.

Si base es positiva, el transistor conduce; la le produce en  $R_E$  una caída de tensión que hace a emisor positivo respecto a chasis. Cuando base es positiva y también lo es emisor, se consigue la polarización haciendo a base más positiva que emisor.

Este sistema independiza el circuito del transistor utilizado, ya que la tensión de base es independiente de la corriente de base, pues está determinada por los valores de  $R_a$  y  $R_b$ .





## EL TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR

Una de las ventajas del transistor es la de amplificar. Supongamos un transistor que tiene una polarización de base de 0,2 V y una  $I_b$  de 200 microamperes ( $\mu A$ ), con  $I_c$  de 20 mA;  $R_c$  de  $300 \Omega$  y fuente de 12 V, la  $E_c$  resultante será:

$$E_{RC} = I_c \times R_c = 0,02 \times 300 \Omega = 6 \text{ V}$$

$$E_c = E_f - E_{RC} = 12 \text{ V} - 6 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Si aplicamos en base una señal de 0,1 V de pico positivo, la  $E_b$  varía de 0,2 V a 0,1 V, lo que determina una variación de  $I_b$  de 200 a 100 microamper ( $\mu A$ ). Esta variación de  $I_b$  trae como consecuencia que al  $I_c$  disminuya de 20 mA a 10 mA; por lo que la  $E_c$  será:

$$E_{RC} = I_c \times R_c = 10 \text{ mA} \times 300 \text{ ohm} = 3 \text{ V}$$

$$E_c = E_f - E_{RC} = 12 \text{ V} - 3 \text{ V} = 9 \text{ V}$$

En el semiciclo negativo, la tensión de señal se suma a la  $E_b$ , por lo tanto la  $E_b$  será de 0,3 V; la  $I_b$  aumenta de 200  $\mu A$  a 300  $\mu A$ , por consiguiente la  $I_c$  aumenta de 20 mA a 30 mA; la  $E_{RC}$  será:

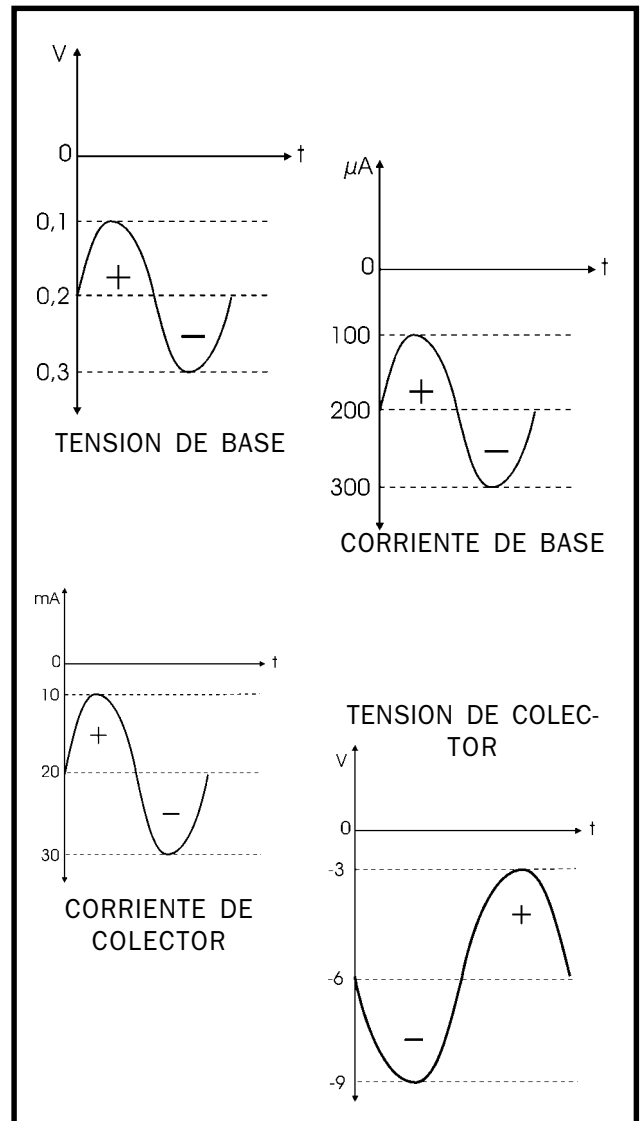
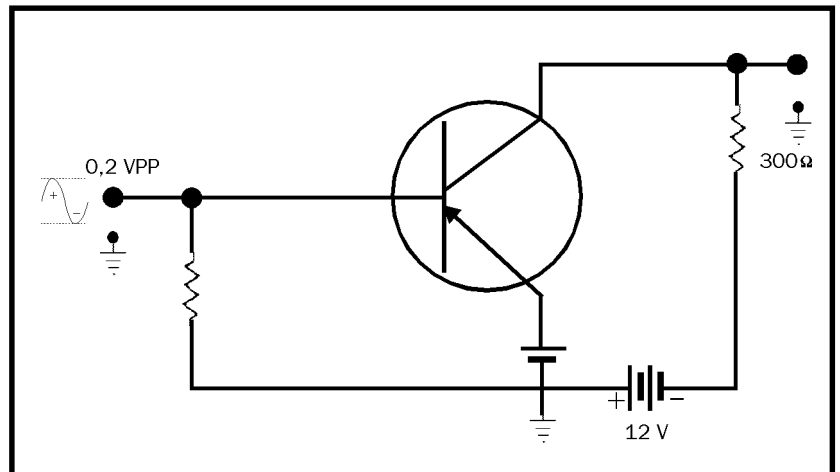
$$E_{RC} = I_c \times R_c = 30 \text{ mA} \times 300 \Omega = 9 \text{ V}$$

$$E_c = E_f - E_{RC} = 12 \text{ V} - 9 \text{ V} = 3 \text{ V}$$

Quiere decir que la variación de 0,2 VP.P. (Volt pico a pico) produce una variación de 6 V pico a pico en colector; por lo que la variación de tensión a la salida es 30 veces mayor que la de entrada, lo cual significa que el transistor amplifica.

$$\text{Amplificación de Tensión} = \Delta E_c / \Delta E_b = 6 / 0,2 = 30 \text{ veces}$$

Además si observamos la relación de corriente existente entre el circuito de salida y la entrada, vemos que mientras que la  $I_c$  varía 20 mA la  $I_b$  varía 200  $\mu A$ , esto significa que la corriente de



salida es 100 veces mayor que la corriente de entrada.

Amplificación de Corriente =  $\Delta I_c / \Delta I_b = 20 \text{ mA} / 200 \mu\text{A} = 100$  veces

Como vimos anteriormente la principal característica del transistor es la de amplificar; en esas condiciones lo podemos encontrar conectado en tres configuraciones circuitales que son: base a masa o común, colector a masa o común y emisor a masa o común.

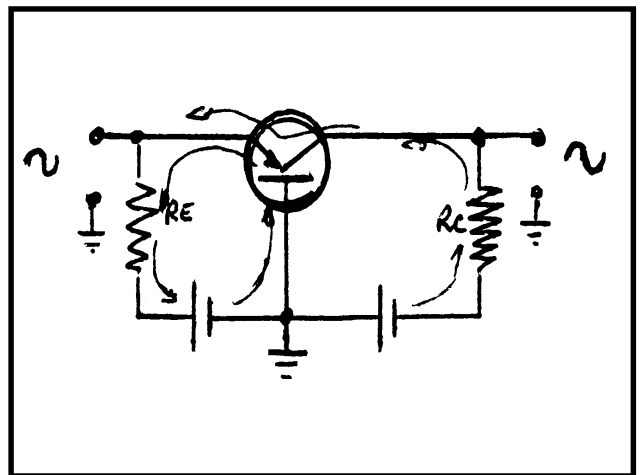
Cada una de estas configuraciones presentan distintas condicionantes para el transistor, como ser; base a masa, impedancia de entrada muy baja, impedancia de salida alta. Emisor a masa, impedancia de entrada relativamente baja y de salida moderada. Colector a masa, impedancia de entrada alta, salida muy baja.

### CONFIGURACIÓN BASE A MASA O CHASIS

El circuito de entrada lo constituye el emisor y el de salida colector, siendo la base el electrodo común a ambos en lo que a señal respecta. La  $R_E$  de entrada debe ser necesariamente pequeña por hallarse la juntura base-emisor polarizada directamente y en estas condiciones la tensión es baja y la corriente alta; en cambio la salida  $R_C$  debe ser de un valor más elevado por ser un circuito de mayor impedancia. Cabe aclarar que la caída de tensión en  $R_C$  no influye mayormente sobre la  $I_c$  ya que la misma depende de la polarización de base y no de la tensión de colector. Puede observarse que la  $I_E$  está formada por la  $I_b$  e  $I_c$  o sea,  $I_E = I_c + I_b$  y que la  $I_c$  es la deducción de  $I_b$  e  $I_E$  o sea,  $I_c = I_E - I_b$ .

Por esta sencilla ecuación se señala que la corriente de salida es menor que la de entrada. La relación entre  $I_c$  sobre  $I_E$  recibe el nombre de  $\alpha$  (alfa) y señala la magnitud de amplificación de corriente en esta configuración.  $\alpha = I_c / I_E = H_{fb}$ .

Al hacerse presente el semiciclo positivo de la señal sobre emisor; se produce un aumento de potencial de la polarización, incrementándose la corriente a través de  $R_C$ , determinando



una mayor caída de tensión sobre  $R_C$ , por lo tanto la señal adquiere un valor máximo positivo.

Aplicando el semiciclo negativo, disminuye la polarización del emisor; reduciéndose a su vez la circulación de corriente a través de  $R_C$ , por lo cual la caída de tensión sobre  $R_C$  disminuye y la señal de salida adquiere su valor máximo negativo.

## CONFIGURACIÓN COLECTOR A MASA O A CHASIS

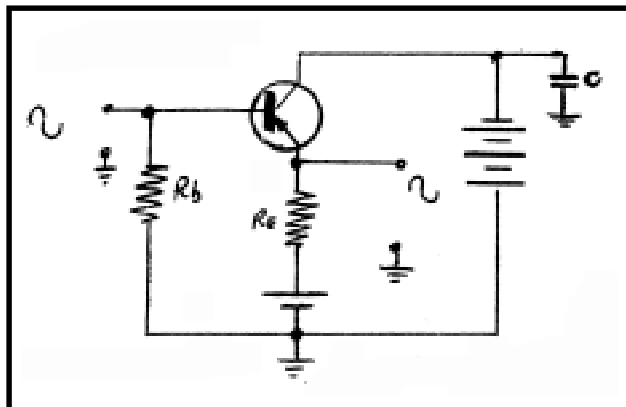
La señal de entrada se aplica sobre  $R_b$  y se recoge sobre  $R_e$ . Debido a que  $R_b$  es mucho mayor que  $R_e$ , es evidente que la ganancia de tensión será menor que 1.

Debemos recordar que la juntura base-colector es de alta  $R$  por su baja corriente, mientras que la de colector emisor es mucho menor por existir una circulación de corriente mayor. Por esta misma razón, la ganancia de corriente en esta configuración es relativamente elevada y se la denomina  $\gamma$  ( $\delta$ ).

$$\delta = I_e / I_b.$$

Este tipo de configuración es aplicada generalmente como adaptadora de alta a baja impedancia; el condensador  $C$  en el circuito de colector debe tener baja reactancia capacitiva a las frecuencias de trabajo para desacoplar efectivamente el colector y dejarlo a masa.

En esta configuración la señal de salida está en fase con la de entrada, ya que durante el semiciclo positivo disminuye la corriente de emisor, lo cual hace a este menos negativo, mientras que durante el semiciclo negativo aumenta la  $I_e$  y éste se hace más negativo.



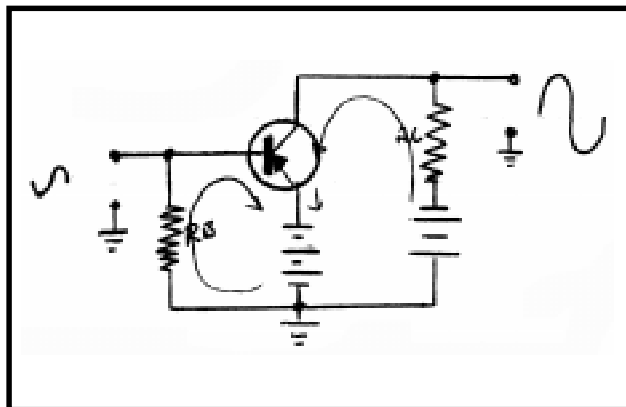
## CONFIGURACIÓN EMISOR A MASA O A CHASIS

Este tipo de montaje resulta el más usual en transistores, debido a que se logra amplificación de tensión y corriente, permitiendo elevadas ganancias.

La entrada por base determina una impedancia más elevada, siendo la relación entre las resistencias de entrada y salida menor, pero debido a que la ganancia de corriente es grande se produce una ganancia de tensión elevada. El factor de amplificación se denomina  $\beta$  ( $\beta$ ).

$$\beta = I_c / I_b = HFE.$$

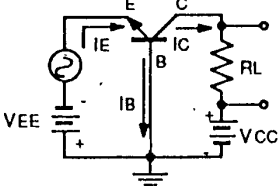
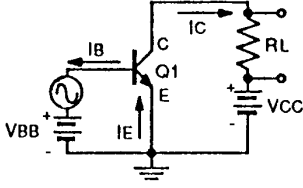
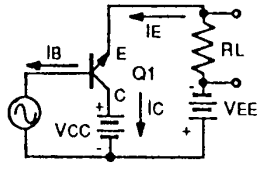
Con respecto a la relación de fase entre las señales de entrada y salida, las mismas están desfasadas  $180^\circ$ . Al hacerse presente el semiciclo positivo, su tensión queda en oposición con la polaridad de la batería que polariza base-



emisor; en consecuencia el potencial base-emisor es menor reduciéndose la  $I_c$  y la caída de tensión en  $R_c$ . De esta manera se obtiene el semiciclo negativo de la señal de salida.

Aplicando el semiciclo negativo a la entrada, su tensión se sumará a la polarización directa base-emisor y en consecuencia aumenta la  $I_c$  y la caída de tensión sobre  $R_c$  lo cual determina la aparición del semiciclo positivo de salida.

## COMPARACION DE CONFIGURACIONES AMPLIFICADORAS BASICAS CON TRANSISTORES BIPOLARES

Parámetros	Base común	Emisor común	Colector común
Configuración básica			
Ganancia de voltaje	Mayor de 1	Mayor de 1	Menor de 1
Ganancia de corriente	Menor de 1 ( $\alpha = 0,92$ a $0,98$ )	Mayor de 1 ( $\beta = 10$ a $400$ )	Mayor de 1 ( $\beta = 10$ a $400$ )
Ganancia de Potencia	Mayor de 1	Mayor de 1	Mayor de 1
Impedancia de entrada	Muy baja ( $30 \Omega$ - $40 \Omega$ )	Moderada ( $1k \Omega$ - $10 K\Omega$ )	Muy alta ( más de $100 K \Omega$ )
Impedancia de salida	Muy alta ( $1 M \Omega$ - $2M \Omega$ )	Moderada ( $10 k \Omega$ - $50 K\Omega$ )	Muy baja ( menos de $100 \Omega$ )
Aplicación típica	Amplificación de Altas Frecuencias	Amplificación de Bajas Frecuencias	Acoplamiento de Impedancias

# TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO

## TEC DE JUNTURA O JFET

El transistor de efecto de campo (*FET = Field-Effect Transistor*) es un dispositivo de tres terminales que se emplea para una amplia variedad de aplicaciones que coinciden, en gran parte, con aquellas correspondientes al transistor BJT. Aunque existen diferencias importantes entre los dos tipos de dispositivos, también hay muchas semejanzas que se indicarán en las secciones que sigue.

La diferencia principal entre las dos clases de transistores es el hecho de que el transistor BJT es un dispositivo *controlado por corriente*, como se ilustra en la figura, mientras que el transistor JFET es un dispositivo *controlado por voltaje*.

En otras palabras, la corriente  $I_c$  en la figura es una función directa del nivel de  $I_b$ .

Para el FET la corriente  $I_d$  será una función del voltaje  $V_{gs}$  aplicado a la entrada del circuito, como se ilustra en la figura. En cada caso la corriente de la salida del circuito se controla por un parámetro

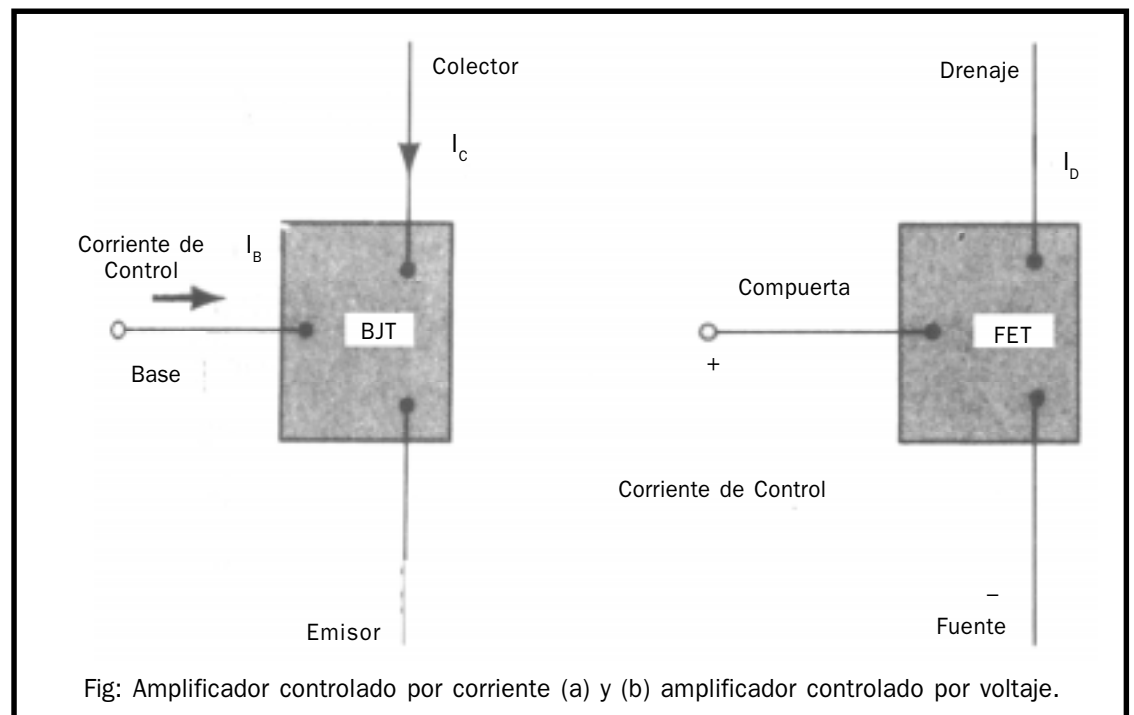
del circuito de entrada, en un caso un nivel de corriente y en otro un voltaje aplicado.

Así como hay transistores bipolares *nnp* y *pnp*, existen transistores de efecto de campo de *canal-n* y *canal-p*. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el transistor BJT es un dispositivo *bipolar* (el prefijo *bi-* revela que el nivel de conducción es una función de dos portadores de carga, electrones y huecos). El FET es un dispositivo *unipolar* que depende únicamente ya sea de la conducción por electrones (*canal-n*) o por huecos (*canal-p*).

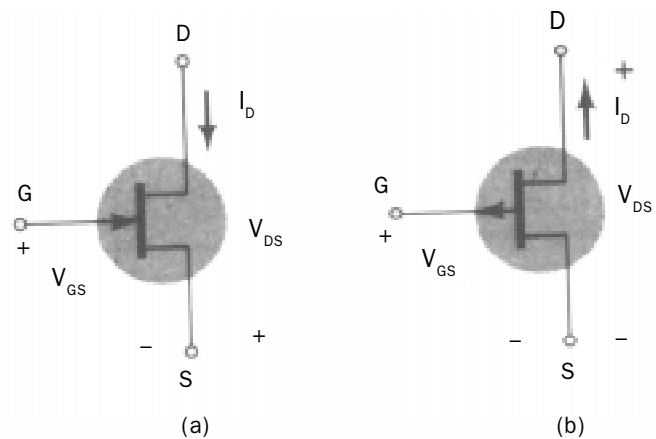
El término «efecto de campo» en el nombre elegido amerita una explicación. Todos estamos familiarizados con la habilidad de un imán permanente de atraer limaduras de metal sin necesidad de un contacto físico directo.

El campo magnético de un imán permanente actúa sobre las limaduras y las atrae hacia el imán a través de un esfuerzo por parte de las líneas de flujo magnético, para mantenerlas a tan corta distancia como sea posible.

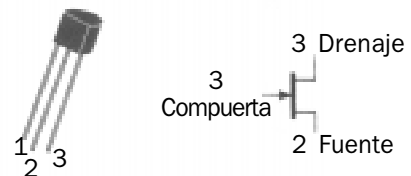
Para el FET se establece un *campo eléctrico* por medio de las cargas presentes que controlarán la trayectoria de conducción del circuito de salida, sin necesidad de un contacto directo entre la cantidad que controla y la que es controlada.



Cuando se introduce un segundo dispositivo con un rango de aplicaciones semejante a otro presentado con anterioridad, existe una tendencia natural a comparar algunas de las características generales de uno contra el otro. Una de las características más importantes del FET es su alta impedancia de entrada. En un nivel de 1 hasta varios cientos de megaohms, este dispositivo excederá con mucho los niveles típicos de resistencia de entrada de las configuraciones con transistores BJT, una característica muy importante en el diseño de sistemas amplificadores lineales de ca. Por otro lado el transistor BJT tiene una sensibilidad mucho mayor a los cambios de la señal aplicada. En otras palabras, la variación en la corriente de salida es por lo general mucho mayor para los BJT que para los FET, con el mismo cambio en el voltaje. Por esta razón las ganancias típicas de voltaje de ca para amplificadores de BJT son mucho mayores que para FET. En general los FET son más estables con relación a la temperatura que los BJT, y los FET son normalmente más pequeños en construcción que los BJT haciéndolos particularmente útiles en los circuitos integrados (CI). Sin embargo las características de construcción de algunos FET pueden hacerlos más sensibles al manejo que los BJT.



**2N5457**  
**ENCAPSULADO 2904,**  
**ESTILOS TO-18 (TO-226AA)**



**JFET**  
**DE PROPOSITO GENERAL**

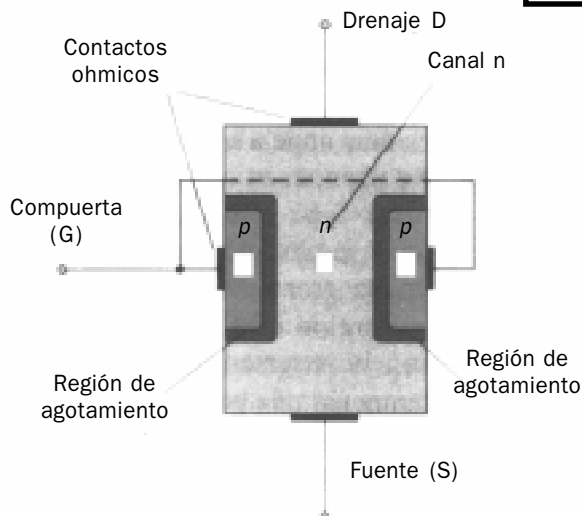


Fig1: JFET en la región de  $V_{GS} = 0V$  y  $V_{DS} / 0V$ .

## CONSTRUCCIÓN Y CARACTERÍSTICA DE LOS JFET

La construcción básica del JFET del canal-n se muestra en la figura; obsérvese que la mayor parte de la estructura es el material tipo n que forma el canal entre las dos capas difundidas en material tipo p.

El extremo superior del canal tipo n se conecta mediante contacto ohmnico al terminal denominado drenaje (D), mientras que el extremo inferior del mismo material se conecta mediante contacto ohmnico al terminal llamado fuente (S). Los materiales tipo p se encuentra conectados juntos y al mismo tiempo hacia el terminal de compuerta (G). Por tanto, esencialmente el drenaje y la fuente se conectan a la canal tipo n y la

Corriente de Control

compuerta, a las dos capas del material tipo p. En ausencia de cualquiera de los potenciales aplicados; el JFET tiene dos uniones p-n bajo condiciones sin polarización. El resultado es una región de agotamiento en cada unión, como muestra la figura que se parece a la misma región de un iodo bajo condiciones sin polarización. Recuérdese también que una región de agotamiento es aquella región de portadores libre y por lo tanto incapáz de permitir la conducción a través de la región.

En la siguiente figura 2 se ha aplicado un voltaje positivo  $V_{ds}$  a través del canal y la compuerta se ha conectado en forma directa a la fuente para establecer la condición  $V_{gs} = 0$  Volts.

El resultado es que los terminales de compuerta y fuente se hallan al mismo potencial y hay una región de agotamiento en el extremo inferior de cada material p, semejante a la distribución de la condiciones sin polarización de la figura anterior.

En el instante que la tensión  $V_{dd}$  (igual  $V_{ds}$ ) se aplica, los electrones serán traídos hacia el terminal de drenaje, estableciéndose una corriente  $I_d$  con la dirección mostrada en la figura 3. La trayectoria del flujo de carga revela con claridad que las corrientes fuente y drenaje son equivalentes ( $I_d = I_s$ ). Bajo las condiciones que aparecen en la figura el flujo de carga es relativamente permitido y limitado únicamente por la resistencia del canal-n entre drenaje y fuente.

Es importante observar que la región de agotamiento es más ancha cerca del extremo superior de ambos materiales tipo p. La razón para el cambio de la anchura de la región se puede describir mejor con la ayuda de la siguiente figura. Suponiendo una resistencia uniforme en el canal-n, la resistencia del canal puede dividirse en las partes que aparecen en la figura. La corriente  $I_d$  establecerá los niveles de tensión a través del canal como se indica en la misma. El resultado es que la región superior del material tipo p estará inversamente polarizada alrededor de los 1,5 Volts, con la región inferior inversamente polarizada solo a 0,5 Volts.

Recuérdese la forma de funcionamiento del iodo, que cuanto mayor sea la polarización inversa aplicada, mayor será el ancho de la región de agotamiento, de aquí la distribución de la región de agotamiento que se muestra en esta figura. El hecho de que la unión p-n esté inversamente polarizada en la longitud del canal da por resultado una corriente de compuerta 0 Amper, como se muestra en esta figura y que es una de las importantes características  $I_g = 0$  A de los JFET.

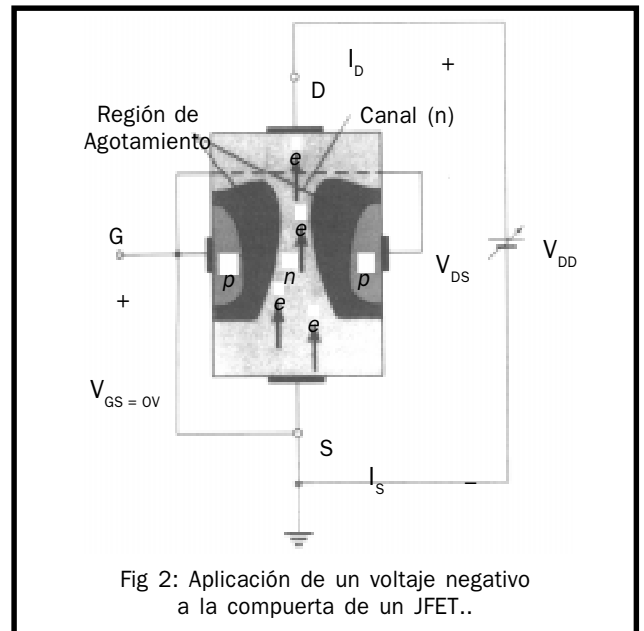


Fig 2: Aplicación de un voltaje negativo a la compuerta de un JFET..

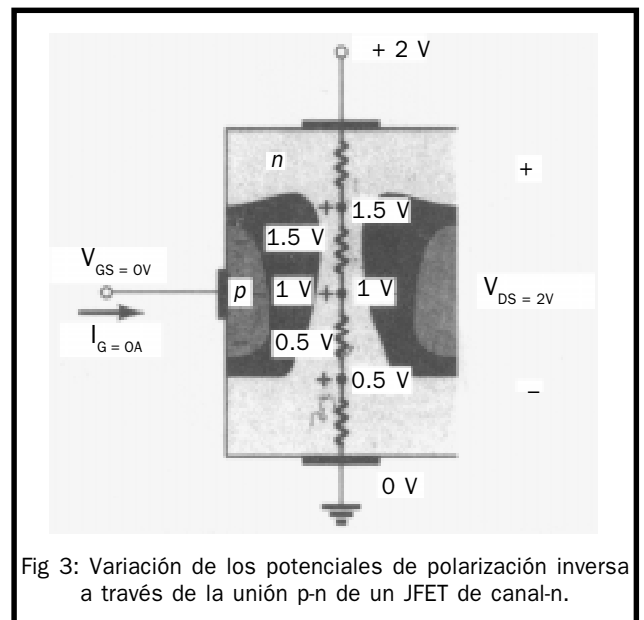


Fig 3: Variación de los potenciales de polarización inversa a través de la unión p-n de un JFET de canal-n.

En cuanto la tensión  $V_{ds}$  se incrementa de 0 a unos cuantos volts, la corriente aumentará según se determina por Ley de Ohm, y la gráfica  $I_d$  contra  $V_{ds}$  aparecerá como lo indica la siguiente gráfica. La relativa linealidad de la gráfica revela que para la región de valores inferiores de  $V_{ds}$ , la resistencia es esencialmente una constante. A medida que  $V_{ds}$  se incrementa y se aproxima a un nivel denominado  $V_p$  las regiones de agotamiento se ampliarán, ocasionando

una notable reducción del ancho del canal. La reducida trayectoria de conducción causa que la resistencia se incremente, y provoca la curva de la gráfica mostrada. Cuanto más horizontal sea la curva, más grande será la resistencia, lo que sugiere que la resistencia se aproxima a «infinitos» ohms en la región horizontal. Si  $V_{ds}$  se incrementa hasta un nivel donde parezca que las regiones de agotamiento se tocarían figura 4 se tendría una condición denominada como estrechamiento (pinch-off). El nivel de  $V_{ds}$  que establece esta condición se conoce como tensión de estrechamiento y se indica como  $V_p$  en la gráfica (fig. 5).

Los JFET de canal- p se construye exactamente de la misma manera que los canal-n pero invirtiendo los materiales tipo p y tipo n como muestra la figura 5.11, en la que notamos las corrientes invertidas así como las polaridades.

En resumen: en ambos casos, una delgada capa de canal debajo de la compuerta establece un camino de conducción entre los electrodos F y D con tensión de polarización nula. En la superficie de contacto entre el canal y el material de compuerta se forma una juntura p-n. Cuando dicha juntura se polariza inversa, el flujo de corriente entre fuente y drenaje queda controlada por la tensión de polarización, que puede llegar a bloquearlo totalmente si es lo suficientemente elevada.

En cambio si se polariza la juntura en forma directa la resistencia de entrada (entre compuerta y canal) disminuye y aparece una corriente de compuerta apreciable. En estas condiciones la compuerta carga la fuente de señal y disminuye la potencia; otro defecto es la corriente de fugas de compuerta cuando esta está polarizada inversamente, varía mucho con los cambios de temperatura ambiente; lo que complica ciertos circuitos.

Son útiles en amplificación de pequeñas señales y muestreadores (chopper).

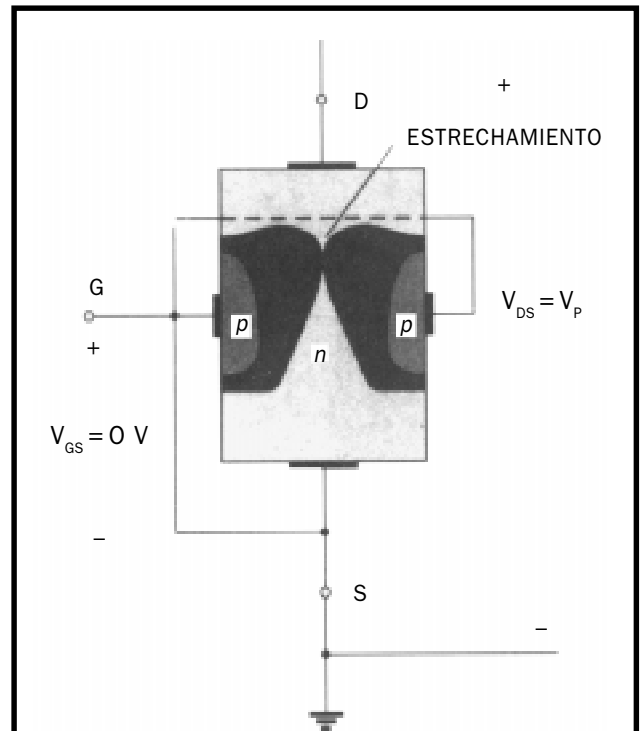


Fig 4: Estrechamiento ( $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ,  $V_{DS} = V_p$ ).

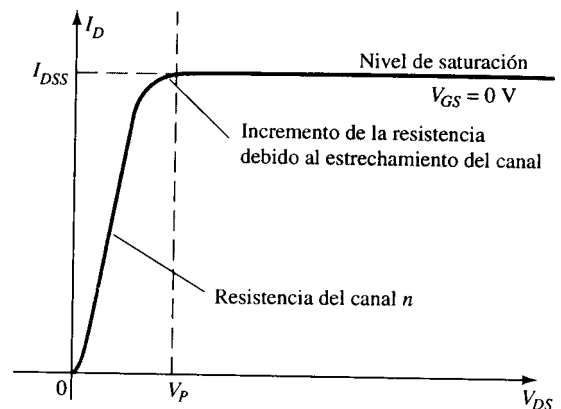


Fig 5:  $I_D$  contra  $V_{DS}$  para  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ .



## TEC DE TIPO MOS (TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO DE METAL-OXIDO-SEMICONDUCTOR)

El transistor MOSFET se ha convertido en uno de los dispositivos más importantes empleados en el diseño y construcción de circuitos integrados para computadoras digitales. Su estabilidad térmica y otras características generales lo han hecho extremadamente popular en el diseño el circuito de diseños de computadoras. Sin embargo, ya que es un elemento discreto en un típico encapsulado cilíndrico, debe manejarse con cuidado (como se indicará posteriormente).

En estos la compuerta es metálica aislada del canal mediante una delgada capa de silicio; de allí deriva el nombre de Mos, también se lo llama de compuerta aislada (IGFET). Al estar aislada la compuerta del resto se tiene una resistencia de entrada muy elevada; la compuerta metálica y el canal forman un capacitor en el cual la caja de óxido forma el dieléctrico.

Los MOSFET se dividen en tipo **decremental o estrechamiento** e **incremental o ensanchamiento**.

### MOSFET decremental o estrechamiento

En la figura se muestra un MOSFET de tipo decremental de canal-n; una plancha de material tipo n, se forma en una base de silicio y se lo denomina sustrato. Es el cimiento sobre el cual se construirá el dispositivo. En algunos casos el sustrato de conecta internamente con el terminal fuente. Sin embargo, muchos dispositivos discretos suministran un terminal adicional denominado SS, resultando un dispositivo de cuatro terminales como el mostrado en la figura. Los terminales de fuente y drenaje se conectan a través de contactos metálicos a los regiones con dopados tipo n, unidas mediante un canal-n, la compuerta también se conecta a una superficie de contacto metálico pero permanece aislada del canal-n por una capa muy delgada de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). El  $\text{SiO}_2$  es un tipo particular de aislante conocido como dieléctrico, que establece una oposición de campos eléctricos dentro del dieléctrico, cuando este se expone a un campo externamente aplicado. El hecho de que la capa de  $\text{SiO}_2$  sea una capa aislante revela el hecho siguiente: **no hay ninguna conexión eléctrica directa entre el terminal de compuerta y el canal para una MOSFET.**

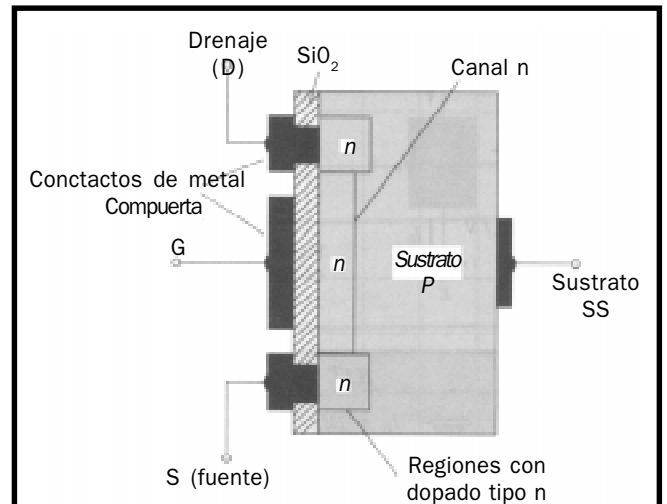
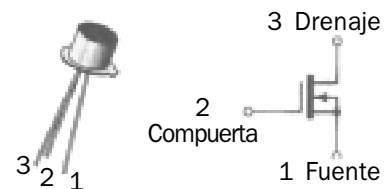


Fig 6: MOSFET de tipo decremental de canal n.

**2N3797**  
**ENCAPSULADO 22-03,**  
**ESTILO 2 TO-18 (TO-206AA)**



**MOSFET DE BAJA POTENCIA**  
**DE AUDIO**  
**DECREMENTAL - CANAL N**

Fig 7: Símbolos gráficos para (a) MOSFET de tipo decremental de canal n y (b) MOSFET de tipo decremental de canal p.

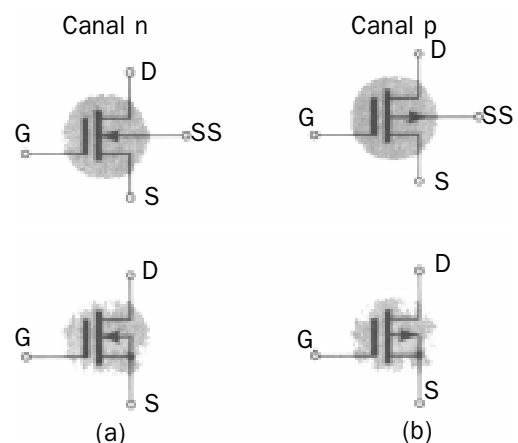


Fig 8: MOSFET de tipo decremental de canal n Motorola 2N3797.

Además:

**La capa aislante de SiO<sub>2</sub> en la construcción del MOSFET es la que cuenta para la muy conveniente alta impedancia de entrada del dispositivo.**

De hecho, la resistencia de entrada de un MOSFET es con frecuencia la del JFET típico, aún cuando la impedancia de entrada de la mayoría de los JFET sea suficientemente alta para la mayor parte de las aplicaciones. La muy alta impedancia de entrada continúa para soportar el hecho de que la corriente de compuerta ( $I_g$ ) es esencialmente de 0 amper para las configuraciones polarizadas de cd.

Estos presentan un canal «normalmente cerrado», vale decir, que en condiciones de polarización de compuerta nula existe un delgado canal debajo de la capa de óxido que establece un camino conductivo entre fuente y drenaje.

Cuando la compuerta se polariza inversamente (negativa con respecto a fuente en los canal-n y positiva para los canal-p) se produce una zona desierta de portadores de carga que estrecha efectivamente la sección conductiva del canal y si es de suficiente magnitud puede cortar la conducción. Una particularidad exclusiva de los MOS es que ; con una polarización directa de compuerta pueden inducirse portadores de carga adicionales en el canal y aumentar efectivamente su área conductiva, sin flujo de corriente por la compuerta y sin cargar el circuito de entrada a diferencia de lo que ocurre con los de juntura.

En estos dispositivos la capa aislante entre compuerta y canal impide el flujo de corriente con cualquier sentido de polarización de la compuerta.

## MOSFET DE TIPO INCREMENTAL O ENSANCHAMIENTO

La construcción de un MOSFET de tipo incremental o ensanchamiento es similar a los de tipo decremental excepto por la ausencia de un canal entre los terminales de drenaje y fuente como la muestra la figura. Estos se caracterizan por un canal «normalmente abierto» es decir que para polarización de compuerta nula o inversa, no hay conductividad entre fuente y drenaje. Por lo tanto es ideal para aplicaciones digitales y de conmutación. La compuerta debe polarizarse en sentido directo con respecto a la fuente, para producir en el canal los portadores activos necesarios para la conducción.

En el canal-n por ejemplo, cuando la tensión de compuerta es suficientemente positiva respecto a

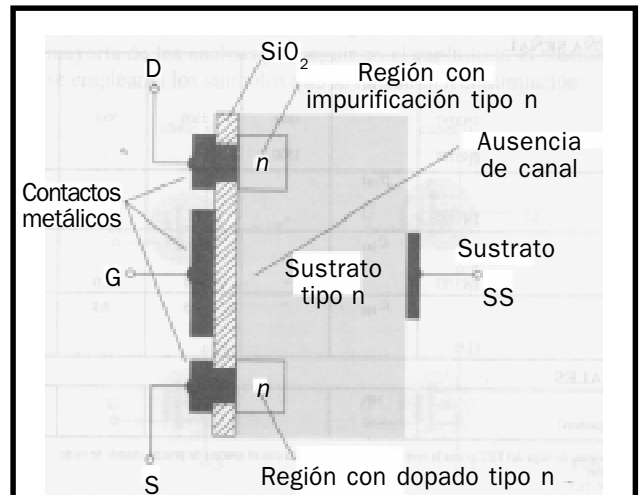


Fig 9: MOSFET de tipo incremental de canal n.

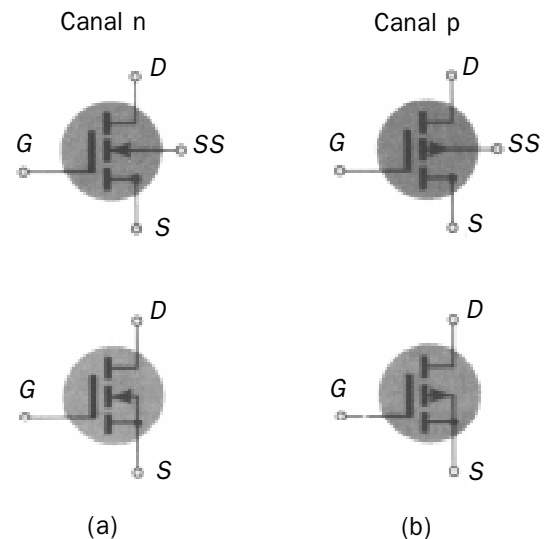


Fig. 10: Símbolos para (a) MOSFET de tipo incremental de canal n y (b) MOSFET de tipo incremental de canal p.

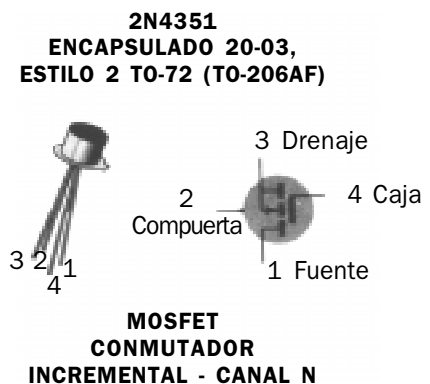


Fig 11.

fuerza se desarrolla debajo de la compuerta un canal conductivo n que establece la conducción entre fuente y drenaje. La misma situación se produce en los canal-p cuando la compuerta se hace suficientemente negativa, pero en este caso el canal generado es de tipo p por inducción de lagunas en el sustrato tipo n.

## TEC TIPO MOS DE DOBLE COMPUERTA

La pastilla tiene tres regiones terminales (tipo N difundidas) conectadas por dos canales conductivos, cada uno de los cuales se controla mediante un electrodo c independiente.

Para facilitar la explicación se le considera dividido en dos unidades. La número 1 está formada por la fuente, el canal N° 1 y la C N° 1 y la región central, que funciona como drenaje N° 1. Estos elementos funcionan como un TEC de estrechamiento convencional, para el cual la unidad N° 2, la C n°2 es un R de drenaje.

El N° 2 está formada por la región central, que funciona como F N° 2, el canal N°2, la C N° 2 y el drenaje, la unidad N° 1 funciona como R de F. El flujo de I puede cortarse si cualquiera de ambas C tiene una polarización inversa suficiente.

Cuando una de ellas se polariza al corte, un cambio en la E de control de la otra sólo representa cambio de valor en un R en serie con un transistor al corte y no tiene influencia.

El par de C independientes lo hacen muy utilizable en amp. de RF amp. de ganancia controlada, mezcladores y demoduladores. En amp. de ganancia controlada la señal se aplica a C n°1 y la ganancia se controla mediante una E.C.C. aplicada a la C N°2. Se recomienda esta disposición porque la Gm directa obtenida con la C N°1 es mayor que con la N° 2; además la C n°2 permite aislar en forma bastante efectiva los circuitos de D y C N°1 en grado suficiente para permitir el funcionamiento en FME sin necesidad de neutralización.

Para los TEC de doble C se han desarrollado sistema de protección que pueden incorporarse a la estructura formando parte del transistor. Para ello se difunden en la misma pastilla dos pares de diodos enfrentados, que se conectan entre cada compuerta y fuente ( la pequeña capacidad de juntura de estos diodos) representan un pequeño incremento de las capacitancias totales de C del dispositivo.

Los diodos enfrentados no conducen hasta que la E

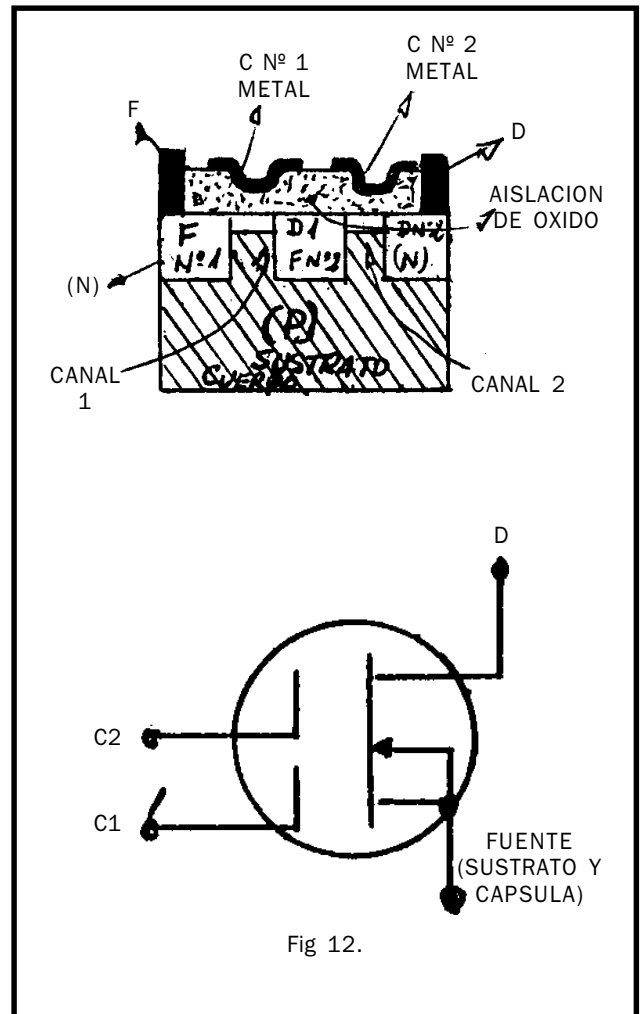
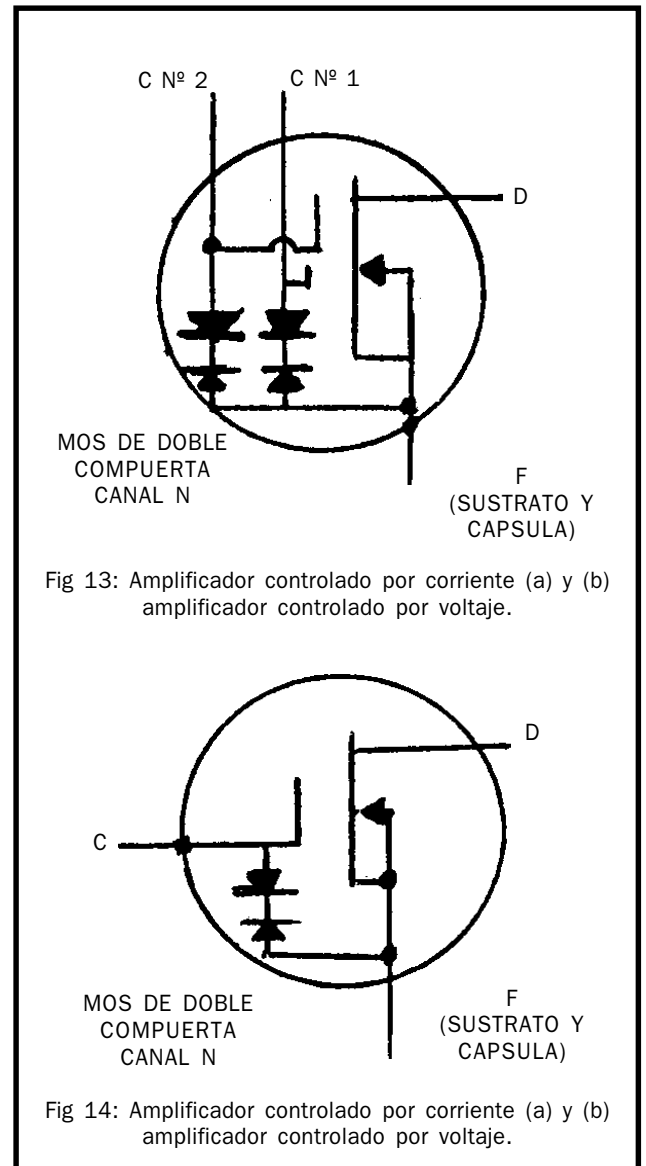


Fig 12.

de C a F no excede un valor aprox.  $\pm 10V$ . Por lo tanto el transistor puede manejar un amplio rango de señales sin carga de la entrada (las pérdidas de los diodos son muy bajas) Si el potencial de cualquiera de las C excede 10 V., el diodo superior del par asociado a dicha C conduce en sentido directo y el diodo inferior en sentido inverso por efecto Zener, de esta manera el par de diodos cortocircuita cualquier exceso de E en la C. Si el potencial de cualquiera de las C es menor que 10 V. el diodo inferior conduce en sentido directo y el superior en inverso protegiendo las C de E inversas excesivas. Este sistema protege contra eventuales transitorios circuitales. La experiencia ha demostrado que es más fácil dañarse al manipularlo que conectado al circuito. (No debe tocarse con las manos sino con pinzas o de lo contrario hacer masa con la muñeca por ejemplo) y cortocircuitar todos sus electrodos y luego de soldado recién se quita y el corto (carga estática). En aplicaciones de RF, las descargas estáticas en la antena deben atravesar un circuito de entrada que normalmente introduce una gran atenuación antes que aparezcan en la C del transistor.

Un dispositivo ideal de protección de C es básicamente un limitador de señal, que deja pasar una señal sin recorte ni distorsión, pero limitada la amplitud de cualquier transistor que exceda el nivel de seguridad.



**CIRCUITO PARA ELIMINAR LA CARGA  
DEL CIRCUITO DE ENTRADA EN  
AMPLIFICADORES DE RF**

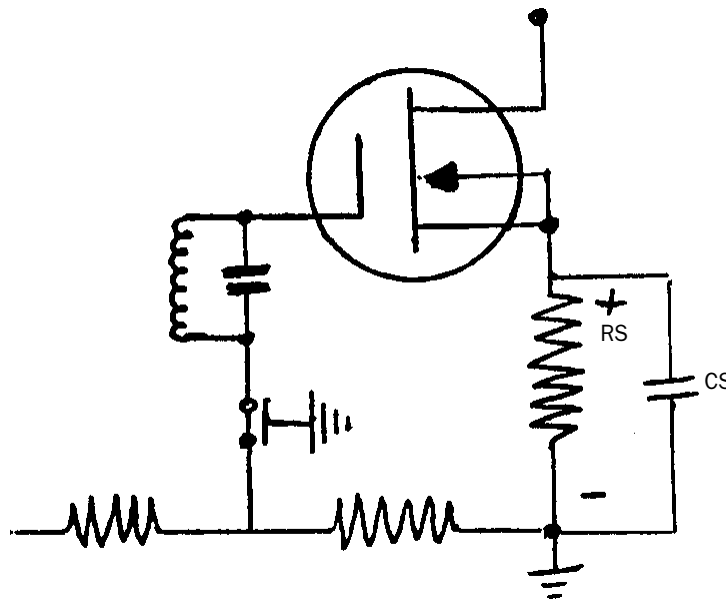


Fig. 15.

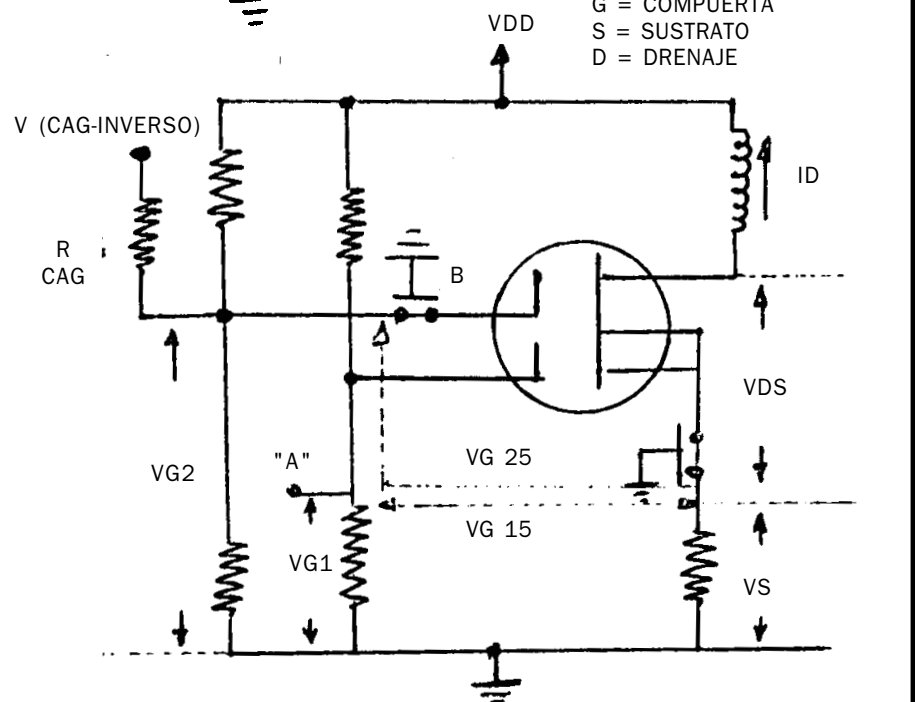


Fig. 16.

## CIRCUITO DE POLARIZACION TIPICO PARA MOS DE DOBLE COMPUERTA (G)

La G N°2 opera al potencial de masa para RF (con adecuado desacople) y se la polariza con una E.C.C. fija. Este circuito se utiliza como amp. de RF.

En este caso la tensión de señal se aplica en el punto «a» a través de una adecuada red de entrada. Si no se emplea la capacidad de control ganancial del dispositivo (como en el caso de los mezcladores) se desconecta RCAG. En un mezclador, el punto «b» permite la inyección de la señal del oscilador.

## CARACTERISTICAS TECNICAS

Presentan características técnicas con ventajas únicas en aplicaciones como: mezcladores, detectores, circuitos de control remoto de ganancia.

moduladores balanceados, muestreadores, recortadores y amplificadores gatillados.

1º) Elevada R de entrada y baja capacidad de salida, los MOS prácticamente no cargan la fuente de C.A., ya que no requiere W de entrada.

2º) Elevado rango dinámico pues los transistores MOS pueden admitir de señal positivas y negativas sin cargar el circuito de entrada.

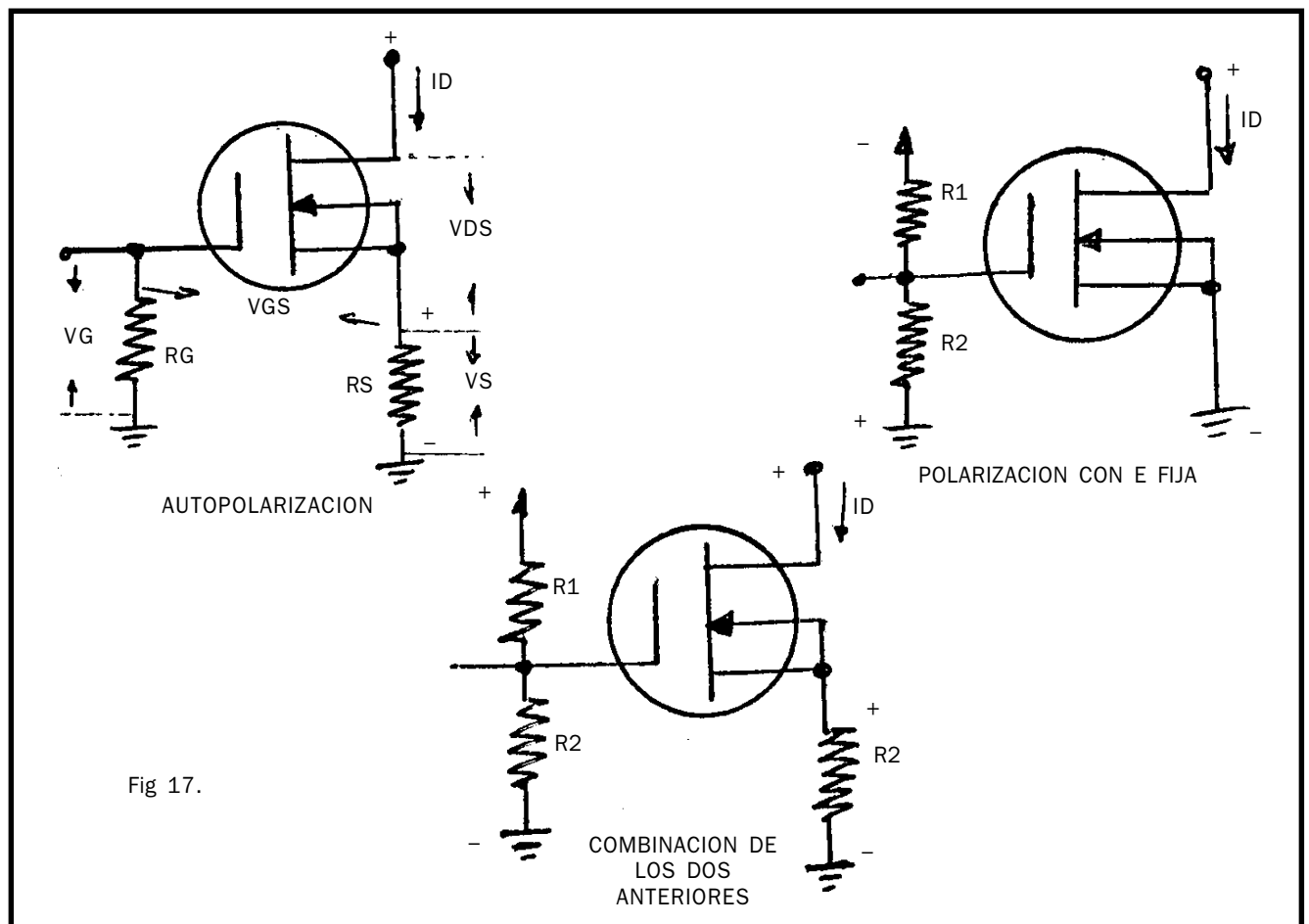
3º) Los efectos de la modulación cruzada y oscilaciones son considerablemente menores que en otros tipos de dispositivos.

4º) Transconductancia directa excepcionalmente elevada.

5º) Coeficiente de temperatura negativo de la  $I_d$ , es imposible por lo tanto la corrida térmica.

6º) En circuitos mezcladores de doble compuerta, muy bajo acomplamiento de la señal de oscilador.

7º) Los MOS de doble G pueden trabajar FME sin neutralización.



## FOTOTRANSISTORES

El comportamiento fundamental de los dispositivos fotoeléctricos se presentó antes con la descripción del fotodiodo.

Este análisis se ampliará ahora para incluir el fototransistor, que tiene una unión  $p-n$  de colector de base fotosensible. La corriente inducida por efectos fotoeléctricos es la corriente de base del transistor. Si asignamos la notación  $I_{\lambda}$  para la corriente de base fotoinducida, la corriente de colector resultante, en una base aproximada es:

$$I_c \cong h_{fe} I_{\lambda}$$

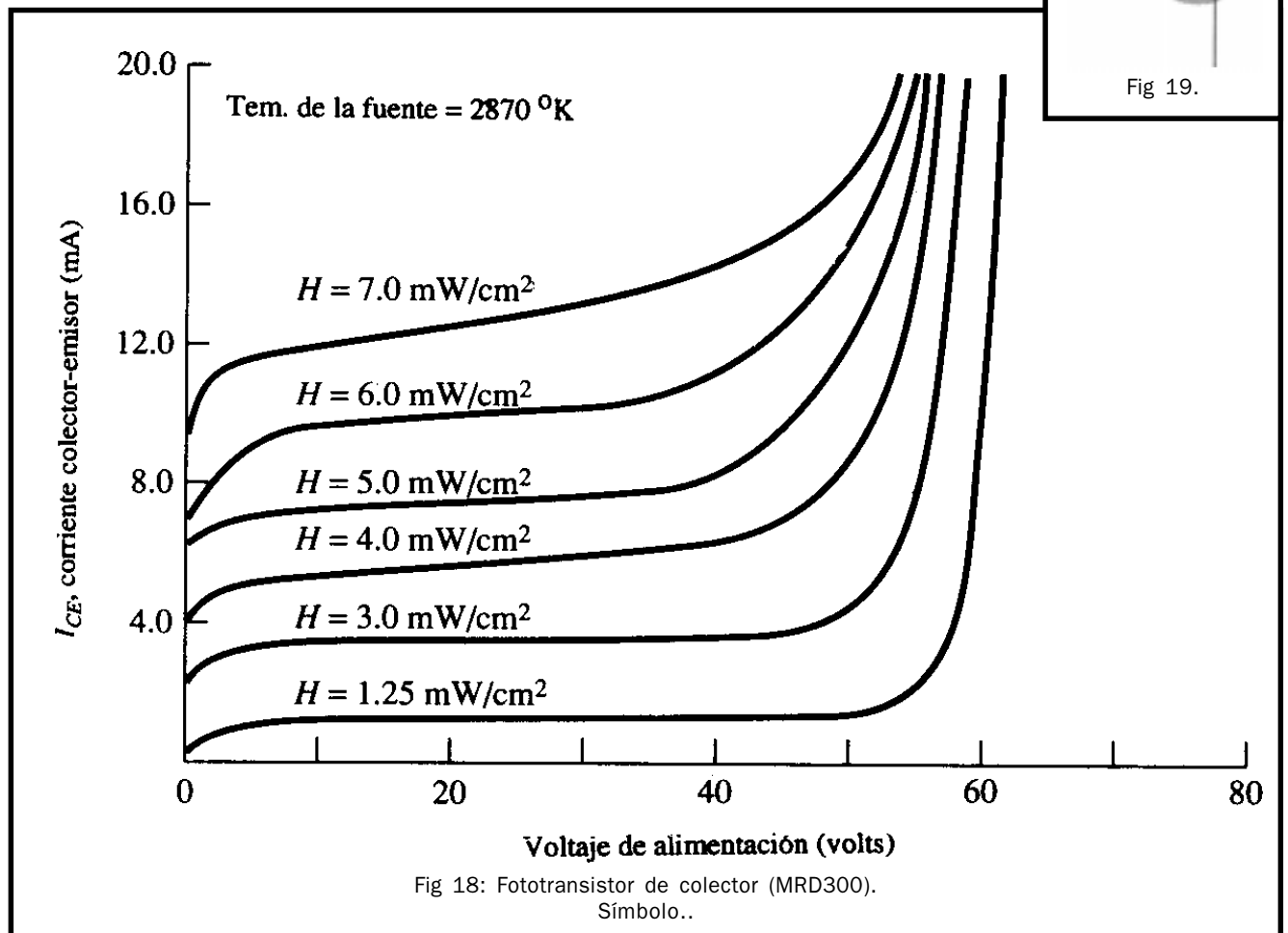
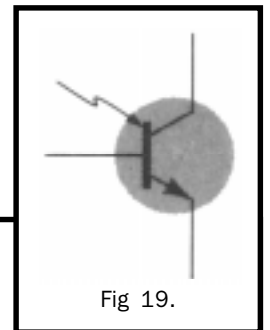
En la figura 18 se presenta un conjunto

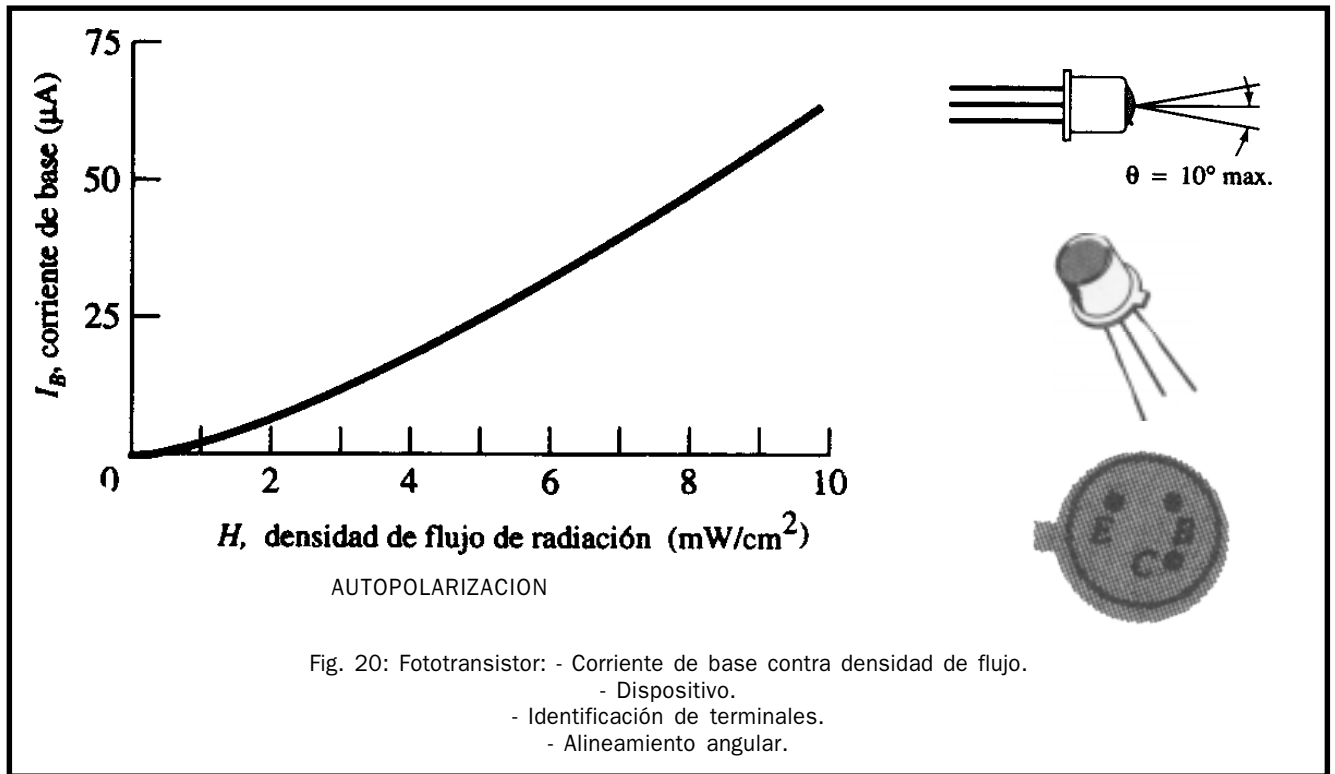
representativo de características para un fototransistor con la representación simbólica del dispositivo. Nótese las similitudes entre estas curvas y las de un transistor bipolar típico.

Como es de esperarse, un incremento en la intensidad luminosa corresponde a un aumento en la corriente de colector.

Para obtener un mayor grado de familiaridad con la unidad de medida de intensidad luminosa, miliwatts por centímetro cuadrado, en la figura 19. parece una curva en la corriente de base contra la densidad de flujo.

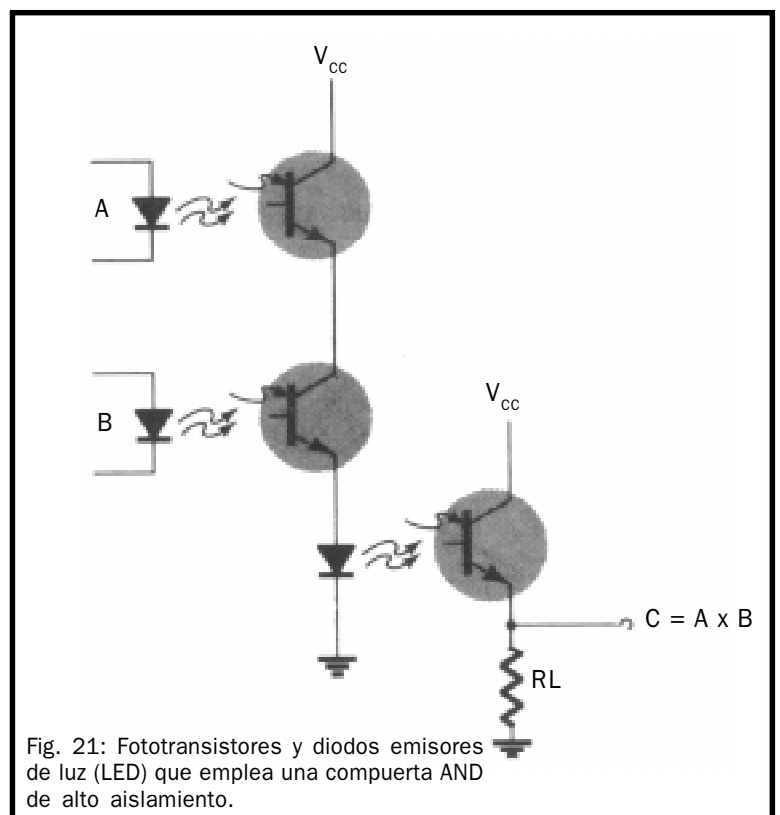
En la misma figura se presenta un dibujo del fototransistor con la identificación de terminales y el alineamiento angular.





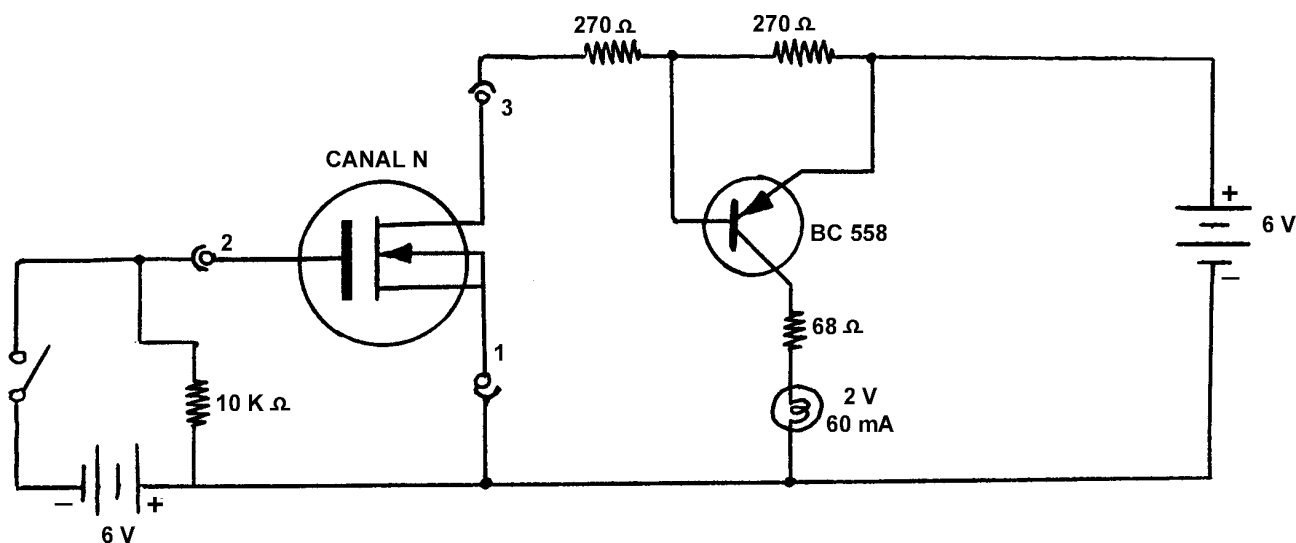
Algunas de las áreas de aplicación del fototransistor incluyen las lecturas de tarjetas de perforadas, los circuitos lógicos de computadora, control luminoso (en carreteras, etc.), indicación de nivel, relevadores y sistemas de conteo.

En la figura 21, se muestra una compuerta AND de alto aislamiento que emplea tres fototransistores y tres LED (diodos emisores de luz). Los LED son dispositivos semiconductores que emiten luz a una intensidad determinada por la corriente directa a través del dispositivo. Con la ayuda del análisis que se realizó en el capítulo 1, el comportamiento del circuito debe ser relativamente fácil de entender. La terminología relativa a "alto aislamiento" se refiere simplemente a la falta de una conexión eléctrica entre los circuitos de entrada y de salida.





## PROBADOR DE TRANSISTORES FET-MOS



### Método de operación del probador:

- 1-** La lámpara enciende cuando se abre la llave y no lo hace cuando la llave está cerrada.
- 2-** Si la lámpara enciende con cualquier posición de la llave, debemos interpretar que el transistor en cuestión se encuentra en cortocircuito.
- 3-** Si la lámpara no enciende con ninguna de las dos posiciones de la llave, es porque el transistor está abierto.

**NOTA:** Para los transistores de ensanchamiento de canal P, se obtienen indicaciones opuestas.