



## TRANSISTOR BIPOLARES DE JUNTURA

El transistor de juntura está constituido por dos junturas *p-n*, formadas en un mismo cristal. Este dispositivo se lo denomina transistor bipolar de juntura y existen dos tipos *pnp* y *npn*. En la figura 1 y 2 se muestran las conexiones adecuadas a las baterías de polarización y los nombres de los terminales. La juntura base-emisor está polarizada en sentido directo y la juntura colector-base normalmente en inversa. Los portadores mayoritarios en el transistor *pnp* son los agujeros, mientras que en el transistor *npn* los electrones son los portadores mayoritarios.

En el transistor típico la región de base es muy delgada y poco dopada. La región de emisor es fuertemente dopada con el objeto de disminuir su resistencia, mientras que la región de colector está poco dopada con el objeto de disminuir la capacidad de la juntura colector-base.

### FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR

Para explicar el principio de funcionamiento del transistor *nnp* nos basaremos en la figura 2. Debido a la tensión aplicada por la batería  $V_{EE}$  hay una inyección de electrones ( $I_E$ ) en la región de emisor (material *n*). La juntura base-emisor que se encuentra polarizada en sentido directo actuando como un diodo y la región de base (material *p*) no interfiere con la corriente de electrones. En la región de base ocurren una pequeña cantidad de recombinaciones electrón-agujero que aparece en el circuito externo como una corriente de base  $I_B$ . Como la base es muy delgada la mayoría de los electrones inyectados en el emisor, llegan a la juntura colector-base y la traspasan debido a la influencia del potencial positivo del colector. El colector está a un potencial positivo respecto de base debido a  $V_{CC}$  y también al emisor ( $V_{CC}$  y  $V_{EE}$ ).

Para que opere efectivamente el transistor, más del 95 % de los portadores mayoritarios inyectados en el emisor deben pasar a través de la base y llegar al colector sin recombinarse. Esto indica que la corriente de colector,  $I_C$ , es muy poco menor que la corriente de emisor,  $I_E$ . La razón entre ellas se denomina  $\alpha$ .

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

Los valores típicos de  $\alpha$  en transistores comerciales está comprendido entre 0,95 y 0,99.

La corriente de emisor restante, debido a la recombinación en la región de base, aparece en el terminal externo de base y está dada por la ley de Kirchhoff,  $I_B = I_E - I_C$ .

Se define como "ganancia de corriente",  $\beta$ , a la razón de la corriente de colector y la corriente de base.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = h_{FE}$$

Note que un transistor con un  $\alpha = 0,99$  tiene un  $\beta = 99$ .

Se debe destacar que en lo anterior se ha puesto énfasis en las corrientes del transistor debido a que el mismo es esencialmente un amplificador de corriente.

Es importante tener en cuenta que si se modifica  $V_{EE}$  cambiará la corriente  $I_C$ . Dado que base-emisor está polarizado en directo incrementar  $V_{EE}$  es equivalente a aumentar la polarización del diodo y dada la gran pendiente

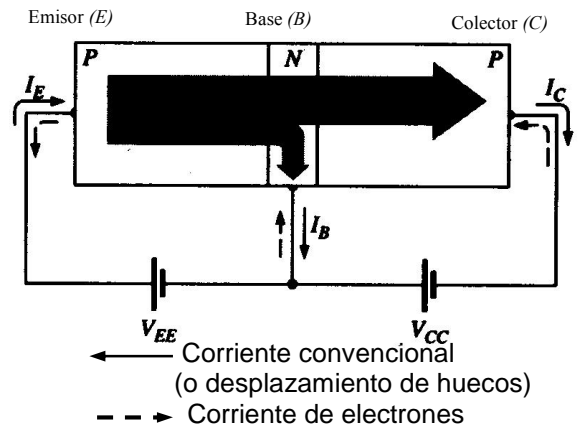


Fig. 1: Representación del funcionamiento del transistor *pnp*

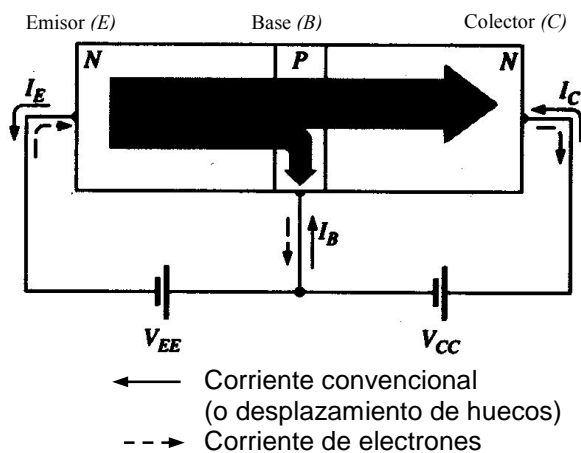


Fig. 2: Representación del funcionamiento del transistor *nnp*



de la curva característica del diodo pequeños incrementos en la tensión causan un gran aumento de la corriente que pasa por la juntura emisor-base. Este incremento de corriente de base, incrementa la corriente de colector  $I_C$ . El transistor es un dispositivo de control en el cual pequeños cambios en la tensión de base produce cambios relativamente grandes en la corriente de colector.

El transistor *pnp* opera en forma análoga, excepto que los agujeros son los portadores mayoritarios. La base, que es de material *n*, aporta los electrones que se recombinan con los agujeros.

El alumno puede explicar el comportamiento del transistor *pnp* tomando como referencia lo dicho para el *npn*.

En la figura 3 se muestran los símbolos usados en los circuitos para representar ambos tipos de transistores. Las flechas indican la dirección de la corriente convencional de base.

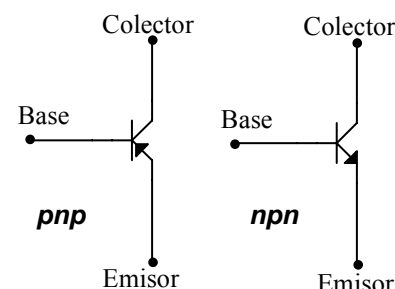


Fig. 3: Representación del transistor.

### CONFIGURACION CIRCUITAL

Siendo el transistor de juntura un dispositivo de tres terminales, si se toma uno de ellos como elemento común a la entrada y salida de señal, existen seis distintas configuraciones posibles, solo tres de ellas son de utilidad.

En la configuración base-común la señal de entrada se aplica entre los terminales de emisor y base mientras que la salida se obtiene en los terminales de colector y base. En la figura 4 se muestran las tres configuraciones: base común (BC), colector común (CC) y emisor común (EC). Las propiedades importantes de cada configuración, tales como resistencia de entrada y salida y ganancia de tensión o corriente, se dan en la tabla 1.

Cada configuración posee ciertas características importantes que son de utilidad. La elección de la configuración que se va a usar para una dada aplicación se basa en la característica particular mas importante. Por ejemplo la configuración EC es la más frecuentemente usada porque tiene tanto ganancia de tensión y corriente mayor que uno. La desventaja es que tiene relativa baja impedancia de entrada y alta impedancia de salida. Si se necesita alta impedancia de entrada se puede elegir la configuración CC pero se tendrá una ganancia de tensión menor que la unidad. Si se conecta en cascada un transistor en configuración CC seguido por otro EC se obtendrá un conjunto que tiene alta impedancia de entrada y también ganancia de tensión mayor que la unidad.

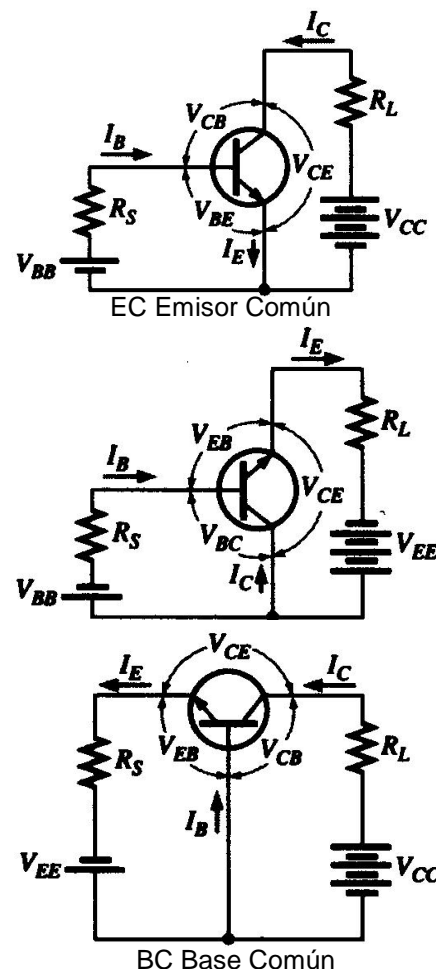


Fig. 4: Distintas configuraciones de amplificadores

PROPIEDADES DE LOS CIRCUITOS CON TRANSISTORES

	CONFIGURACION		
	BC	EC	CC
Ganancia de potencia $A_p > 1$ ?	SI	SI	SI
Ganancia de tensión $A_v > 1$ ?	SI	SI	NO
Ganancia de corriente $A_i > 1$ ?	NO	SI	SI
Resistencia de entrada (Típica)	$30 \Omega$	$3 K\Omega$	$600 K\Omega$
Resistencia de salida (Típica)	$3 M\Omega$	$200 K$	$30 \Omega$
Cambio de fase de la $V_i$	NO	SI	NO

Tabla 1

### CURVA CARACTERÍSTICA

Un mejor conocimiento cuantitativo del funcionamiento del transistor se puede obtener examinando las "curvas características" del mismo, que generalmente suministra el fabricante del transistor. Si no se poseen las curvas características, éstas se pueden obtener con el circuito de la figura 5A para el caso del EC. En la figura 5B, se muestran las curvas características de salida para un transistor *nnp* en configuración EC. Observe que pequeños cambios en  $I_B$  producen grandes cambios de  $I_C$ . Esto es lo esencial en el transistor operando en configuración EC.

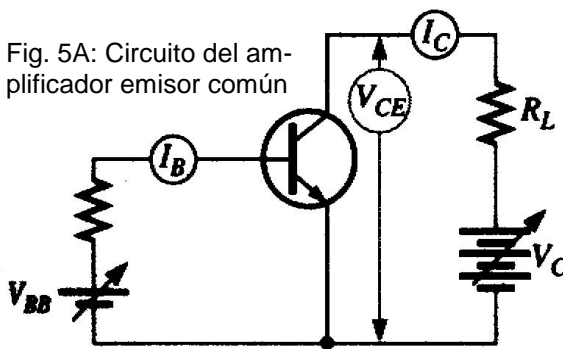


Fig. 5A: Circuito del amplificador emisor común

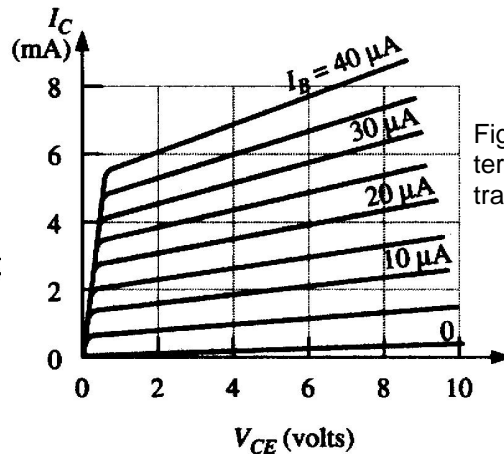


Fig. 5B: Curvas características de salida del transistor *nnp*

En la configuración EC, la señal de entrada se inserta en serie con  $E_{BB}$  para producir cambios en  $I_B$ . La señal de entrada debe ser pequeña comparada con la tensión de polarización en caso contrario, la señal de salida no mantendrá la forma de la señal de entrada.

En particular si el semiciclo negativo de la señal de c.a. de entrada es mayor que  $E_{BB}$  el diodo base-emisor se polarizará en sentido inverso y el transistor no conducirá ( $I_B = 0$ ) y pasará al "corte" por lo que parte del semiciclo negativo se recortará. En contraposición si el semiciclo de entrada es grande como además se le suma la tensión  $E_{BB}$  la corriente de colector  $I_C$  crece mucho llevando al transistor a "saturación" condición en la cual la corriente está limitada por el resistor  $R_L$  y la tensión de salida  $V_{CE}$  es muy pequeña.

La corriente de base  $I_B$  cuando no se aplica señal de entrada debe seleccionarse apropiadamente con el objeto de evitar los recortes de los picos de la señal de entrada cuando esta se aplica. Ese particular valor de corriente se denomina "corriente de polarización" y su ubicación en la curva característica "punto de polarización".

Las curvas características de las otras configuraciones se pueden obtener en forma similar.

### AMPLIFICADOR EMISOR – COMUN

Consideremos el amplificador emisor-común de la figura 6. Es de notar que las baterías de polarización usadas en los circuitos anteriores han sido reemplazadas por una única fuente de c.c.,  $V_{CC}$ , pero el transistor sigue correctamente polarizado ya que la tensión de colector es mayor que la tensión de base y ambas positivas con respecto a emisor (dichos potenciales están determinados además de por  $V_{CC}$  por la elección adecuada de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_C$  y  $R_E$  para un dado transistor).

Si acoplamos una señal de entrada de c.a.,  $\Delta V_B$ , capacitivamente a la base por medio de  $C_1$  mediremos a la salida una señal alterna  $\Delta V_C$  de salida en el terminal de  $C_2$  como se muestra en el amplificador emisor-común de la figura 7 ( $C_1$  y  $C_2$  se utilizan para bloquear la c.c.).

A continuación haremos un análisis del amplificador EC con el objeto de comprender el comportamiento cuantitativo del mismo.

La juntura base-emisor actúa como un diodo polarizado directamente por lo tanto hay una caída de tensión entre dichos terminales de aproximadamente 0,6 V. En otras palabras

$$V_E = V_B - 0,6V$$

Una variación de la señal de base produce una variación igual sobre la tensión de emisor (ya que su diferencia se mantiene en 0,6 V), por lo tanto

$$\Delta v_E = \Delta v_B$$

dividiendo ambos miembros por  $R_E$

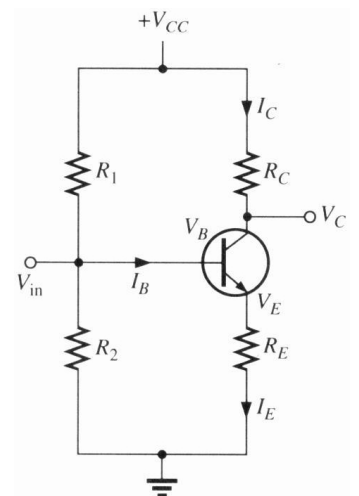


Fig. 6: Amplificador emisor común

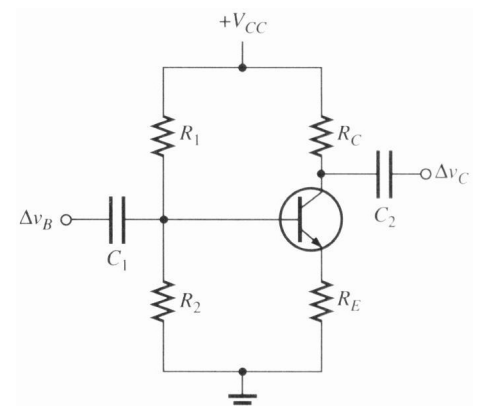


Fig. 7: Amplificador emisor común acoplado capacitivamente



$$\frac{\Delta v_E}{R_E} = \frac{\Delta v_B}{R_E} \quad \text{ó} \quad \Delta i_E = \frac{\Delta v_B}{R_E} \quad (\text{a})$$

Recordemos que:

$$i_C = \beta i_B \quad \text{y} \quad i_E = i_C + i_B$$

para grandes valores de  $\beta$  tenemos:

$$i_E \approx i_C$$

luego

$$\Delta i_E \approx \Delta i_C$$

Sustituyendo en (a) y teniendo en cuenta que  $\Delta v_C = -\Delta i_C R_C$  tenemos

$$\Delta v_B / R_E = -\Delta v_C / R_C$$

o la ganancia de tensión 
$$= \frac{\Delta v_C}{\Delta v_B} = -\frac{R_C}{R_E}$$

Para valores  $R_C > R_E$  el emisor común es un amplificador de tensión. El signo negativo indica que hay un desfase de  $180^\circ$  de la señal de salida con respecto de la de entrada. Esto lo podemos explicar teniendo en cuenta que un incremento en la señal de entrada produce un aumento de la corriente de colector; por lo que aumenta la caída de potencial en  $R_L$  y como la tensión de salida es igual a la tensión de alimentación  $V_{CC}$  menos la caída de tensión en  $R_L$  la salida disminuye.

### IMPEDANCIA DE ENTRADA Y DE SALIDA

NOTA: Ante todo debe tenerse en cuenta que cuando determinamos los parámetros del comportamiento del transistor lo hacemos para pequeñas señales, donde su comportamiento es lineal, y a frecuencias relativamente bajas donde no tienen influencia las capacidades y las inductancias parásitas. Es decir el comportamiento es en c.a. y para encontrar sus valores se puede suponer que dada la baja resistencia interna de las fuentes de alimentación estas son un corto circuito para c.a.

En el circuito de la figura 8 podemos determinar la impedancia de entrada que presenta la base del transistor. Por definición la impedancia es el cociente entre la tensión y la corriente, por ello:

$$R_{in} = v_B / i_B$$

como la tensión en emisor difiere en 0,64 V de la de base, podemos escribir:

$$R_{in} = v_E / i_B$$

ó

$$R_{in} = i_E \frac{R_E}{i_B}$$

Para grandes valores de  $\beta$  podemos obtener

$$R_{in} = \beta R_E$$

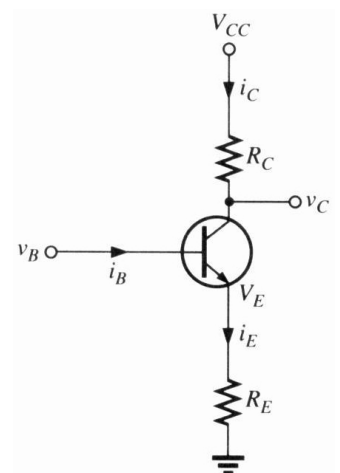


Fig. 8: Amplificador emisor común



que es la impedancia de entrada del circuito de la figura 8.

La impedancia de entrada del amplificador de emisor común de la figura 7. (sin tener en cuenta el capacitor) es el paralelo de  $R_1$ ,  $R_2$  y  $\beta R_E$ , ó

$$Z_{in} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\beta R_E} \right)^{-1}$$

El capacitor deja pasar las altas frecuencias y bloquea la c.c. y las bajas frecuencias de la señal. Es decir  $C_1$  y  $Z_{in}$  constituyen un filtro pasa-alto. El valor de  $C_1$  se determina teniendo en cuenta la componente de frecuencia de la señal de entrada que interesa amplificar.

La impedancia de salida es simplemente  $R_C$  ya que la impedancia de salida que está en paralelo con la del transistor es muy alta y puede ser despreciada. Las mismas consideraciones que hicimos para  $C_1$  pueden ser extendidas a  $C_2$ .

### **POLARIZACION DE BASE**

Para elegir los valores que forman el divisor de tensión que polariza la base de  $R_1$  y  $R_2$  (figura 7) se deben seguir dos reglas. La primera es que la corriente que circula por  $R_1$  y  $R_2$  debe ser significativamente mayor que la que fluye por base,  $I_B$ . Al dar cumplimiento a esta regla se debe tener cuidado que la impedancia de entrada a la señal,  $R_{in}$ , no sea muy baja.

La segunda regla establece que la variación de tensión de salida  $V_C \pm \Delta v_C$  debe estar dentro de los límites dados por la tensión de alimentación.

Cuando no se aplica señal de entrada, la tensión de colector es  $V_C$  o "tensión de polarización de colector".

Para obtener la máxima variación de la tensión de salida sin que la señal se recorte  $R_1$  y  $R_2$  se deben elegir para que la tensión de polarización sea  $\frac{1}{2}V_{CC}$ .

Una regla práctica es que  $R_1$  sea 10 ó 20 veces mayor que  $R_E$ .

### **COLECTOR COMUN O SEGUIDOR EMISOR**

Frecuentemente se desea tener un dispositivo de baja impedancia de salida para activar un dispositivo tal como un voltímetro. Por otra parte, suele ser necesario contar con un dispositivo con alta impedancia de entrada con el objeto de no distorsionar la señal suministrada por un sensor. Estos dos requerimientos los reúne el transistor en configuración de colector común. Otro nombre con que se conoce esta configuración es el de "seguidor de emisor".

En la figura 9 se muestra el circuito de un seguidor de emisor. La tensión de salida que se toma entre emisor y tierra,  $V_E$ , es igual a la tensión de base,  $V_B$ , menor en 0,6 V que es la caída en la juntura base emisor .

$$V_E \approx V_B - 0,6V$$

Aparentemente si la tensión de salida es prácticamente igual a la de entrada, el circuito no presenta ninguna utilidad. La ventaja se verá al analizar las impedancias de entrada y salida del seguidor de emisor. En esencia, el seguidor de emisor es un amplificador de corriente que no modifica la tensión de la señal.

Calcularemos la impedancia de entrada que por definición es:

$$R_i = \frac{v_B}{i_B}$$

pero como

$$v_B = v_E$$

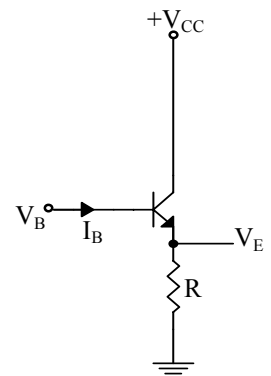


Fig. 9: Amplificador seguidor común



ya que  $V_E = V_B - 0,6$  las variaciones de tensión de base son iguales a las variaciones de la tensión de emisor (de allí el nombre de “seguidor”).  
Dividiendo por R, tenemos:

$$v_B / R = v_E / R = i_E$$

Como ya vimos  $i_E = i_B + i_C$  que la podemos escribir como:

$$i_E = i_B + \beta i_B = i_B (1 + \beta)$$

combinando estas ecuaciones tenemos:

$$v_B / R = i_B (1 + \beta)$$

luego

$$R_{in} = v_B / i_B = R(1 + \beta) \approx \beta R$$

Como  $\beta$  es grande fácilmente se pueden obtener impedancias de entrada del orden del megohm.  
La impedancia de salida del seguidor de emisor (vista desde el terminal de emisor) es:

$$R_{out} = R_S / \beta$$

donde  $R_S$  es la resistencia del generador de señal conectado a la base y dado que  $\beta$  es “grande”  $R_{out}$  es pequeña.

Es de hacer notar que en lo anterior se ha asumido que la señal de entrada aplicada a la base en el circuito de la figura 9 varía entre 0,6 V y  $V_{CC}$ . Toda señal aparecerá a la salida cuando sea mayor de 0,6 Volt como se muestra en la figura 10 en caso contrario la señal de salida permanecerá en 0 volt. Para solucionar el problema anterior se debe modificar el sistema de polarización del circuito de la figura 9 recurriendo a fuentes de tensión positivas y negativas.

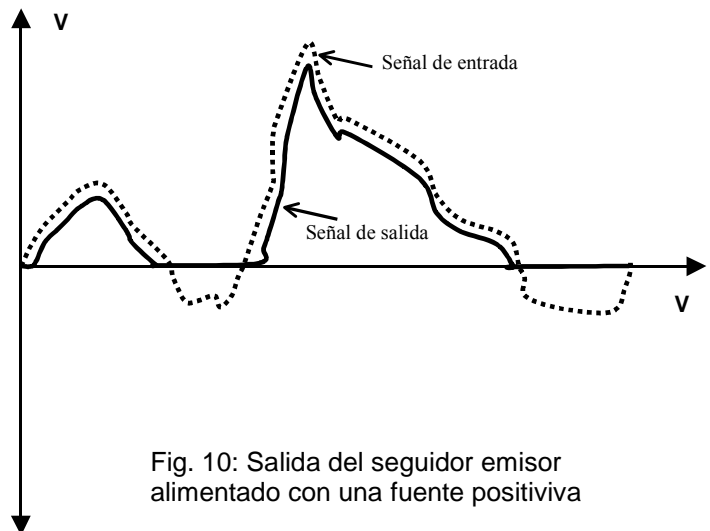


Fig. 10: Salida del seguidor emisor alimentado con una fuente positiva

## FUENTE DE CORRIENTE CON TRANSISTOR

Las fuentes de corriente son tan importantes y tan útiles como las fuentes de tensión.

Son útiles para polarizar transistores y son inigualables como cargas activas para etapas amplificadoras de alta y como fuente de emisor para amplificadores diferenciales.

## FUENTES DE TENSIÓN MÁS UN RESISTOR

Una aproximación simple a una fuente de corriente constante se muestra en la figura 11. Mientras  $R_C \ll R$  (o lo que es lo mismo  $V_C \ll V$ ) la corriente es aproximadamente constante y vale:

$$I = \frac{V}{R}$$

La carga no debe ser necesariamente resistiva. Si la carga de la fuente de corriente es un capacitor, este se cargará a velocidad constante, mientras  $V_{Cap} \ll V$ , esta es justamente la primera parte de la curva de carga de un circuito RC.

En esta fuente de corriente existen varios problemas. Para obtener una buena aproximación a una fuente de corriente, se deben usar grandes tensiones, con una gran disipación de potencias en el resistor R, además es difícilmente *programmable* (por ejemplo: controlable por una tensión externa)

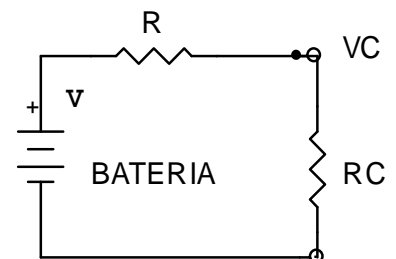


Fig. 11: Fuente de corriente simple



## TRANSISTOR COMO FUENTE DE CORRIENTE

Es posible construir una buena fuente de corriente con un transistor como se muestra en la figura 12. Aplicando  $V_B$  a la base, con  $V_B > 0,6V$ , se asegura que el emisor está siempre conduciendo.

$$V_E = V_B - 0,6V$$

luego

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{(V_B - 0,6V)}{R_E}$$

Pero como  $I_E \approx I_C$  para valores de  $h_{FE}$  grandes

$$I_C \approx \frac{V_B - 0,6V}{R_E}$$

Vemos que  $I_C$  es independiente de la carga, mientras que el transistor no está saturado ( $V_C > V_E + 0,2V$ )

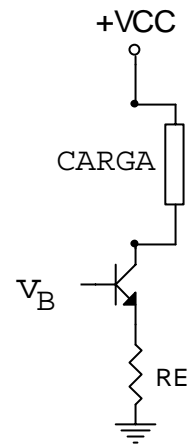


Fig. 12: Fuente de corriente básica con transistor.

## POLARIZACIÓN DE LA FUENTE DE CORRIENTE

La tensión de base puede ser implementada de muchas maneras. Un divisor de tensión es suficiente, mientras que sea constante la tensión que alimenta al divisor y la tensión de base como el mostrado en la figura 13A. El criterio es que la impedancia en c.c. vista desde la base debe ser mucho menor que la impedancia ( $h_{FE}R_E$ ).

También se pueden usar un diodo zener alimentado desde  $V_{CC}$  y también algunos diodos en serie polarizados en directa para fijar la tensión de base como se ve en figura 13B y C.

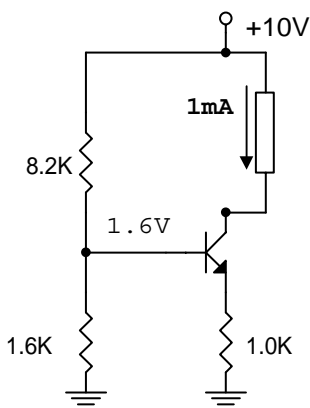


Fig. 13A: Sumidero de corriente con transistor **npn**

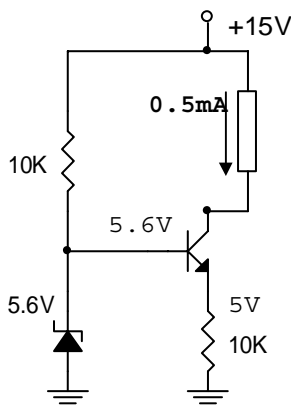


Fig. 13B: Sumidero de corriente polarizando el transistor con un zener

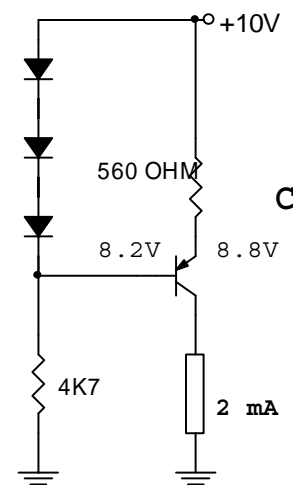


Fig. 13C: Fuente de corriente con transistor **pnP**

En el ejemplo de la figura 13C el transistor **pnP** actúa como **fuentes** de corriente de la carga conectada a tierra. Los otros ejemplos que usan un transistor **npn**, que también mantienen la corriente constante en la carga, se llaman mas apropiadamente **sumideros** de corriente. Los términos **sumideros** y **fuentes** de corriente se refieren a la dirección de la corriente: si el circuito suministra corriente a la carga (positiva) es una **fuentes** y viceversa.

## COMPLIANCIA

Una fuente de corriente puede proveer una corriente constante a la carga solo sobre un rango de tensión finito. Si no fuera así, debería ser capaz de poder entregar potencia infinita.



El rango de variación de la tensión de salida  $V_{out}$  sobre el cual la fuente de corriente se comporte como tal es llamado *compliance* de salida.

Para los ejemplos de fuentes anteriores con transistor, la *compliance* se establece por los requerimientos para que los transistores trabajen en la región activa. Así en el primer circuito, figura 13ª,  $V_C$  puede caer hasta que el transistor esté poco menos que saturado, aproximadamente a + 1,2 V en el colector y su *compliance* es  $10 - 1,2 = 7,8$  V. El segundo con  $V_E$  mayor (5,2V) la tensión puede  $V_C$  disminuir hasta cerca de 5,4V por lo que la *compliance* es de 9,6V. Determine la *compliance* para el tercer circuito.

Una fuente de corriente no debe necesariamente tener una tensión fija en la base. Variando  $V_B$  podemos tener una “fuente de corriente” de tensión *programable*.

La variación de la señal de entrada  $v_{in}$  debe mantenerse lo suficientemente pequeña tal que la tensión  $V_E$  nunca caiga a 0, si es que la corriente  $I_{out}$  debe reflejar las variaciones de  $V_{IN}$ . El que se obtendrá será una fuente de corriente con variación de la  $I_{out}$  proporcional a la variación en  $V_{IN}$ .

$$I_{out} = \frac{V_{IN}}{R_E}$$

## EL TRANSISTOR COMO LLAVE

Anteriormente hemos visto el comportamiento del transistor como un elemento lineal pero también tiene una importante aplicación como llave.

En la figura 14 se muestra el circuito del transistor usado como llave. Cuando la llave mecánica está abierta, no circula corriente de base y por lo tanto no hay corriente de colector. Si no circula corriente por colector, no la hay a través de la carga y la caída de tensión en  $R_L$  es cero, o  $V_{out} = V_{CC}$

Si se cierra el interruptor circula corriente de base y está dada por:

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B}$$

y fluiría corriente por la carga dada por:

$$I_C = \beta I_B = \frac{\beta V_{CC}}{R_B}$$

La caída de tensión en la carga

$$V_{RL} = I_C R_L = \beta I_B R_L$$

En la medida en que crezca  $I_B$  aumentará la caída en la carga. Claro que la caída no puede ser mayor que  $V_{CC}$ ; pero cuando  $V_{RL}$  es muy próximo a  $V_{CC}$  decimos que el transistor está “saturado”. Esto es equivalente a que el transistor se comporte como un cortocircuito ya que  $V_C$  es prácticamente cero (en la práctica aproximadamente unas fracciones de volt).

En resumen, cuando el interruptor está cerrado, y se suministra suficiente corriente a la base, el transistor actúa como un cortocircuito o llave cerrada (en estas condiciones decimos que el transistor está *saturado*) cuando el interruptor está abierto, no circula corriente por el transistor actúa como una llave abierta (decimos que el transistor está *al corte*).

El resistor de base es un componente absolutamente necesario del circuito ya que limita la corriente de la misma a un valor suficientemente grande para saturar el transistor y que no sea tan grande como para destruirlo (cada transistor posee una corriente máxima admisible de base). Para el cálculo de  $R_B$  es necesario conocer el valor de la carga, con ello se determina  $I_C$ . Conocido el  $\beta$  del transistor podemos encontrar  $I_B$  que se lo afectamos por un coeficiente de seguridad A para garantizar que el transistor se saturará. Dada la tensión de alimentación  $V_{CC}$ , y como la tensión de base  $V_E = 0,6$  V ya que el emisor está conectado a tierra conocemos la caída de tensión en  $R_B$ , luego:

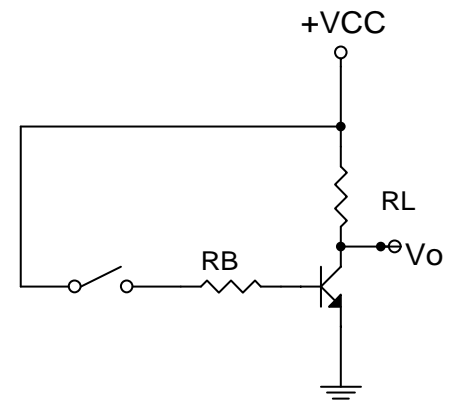


Fig. 14: Transistor actuando como llave





$$R_B = \frac{V_{CC} - 0,6}{A \left( I_C / \beta \right)}$$

En resumen, usando el transistor como llave con pequeñas corrientes podemos operar dispositivos que requieren gran corriente o, en forma más general, con pequeñas potencias podemos controlar grandes potencias. La fuente de tensión que provee la corriente de base no necesariamente tiene que ser igual a  $V_{CC}$  puede provenir de otros dispositivos tales como amplificadores operacionales, compuertas lógicas etc. La carga no debe ser necesariamente un resistor, puede ser cualquier otro componente de corriente continua como se ilustra en las figuras.15A; 15B y 15C.

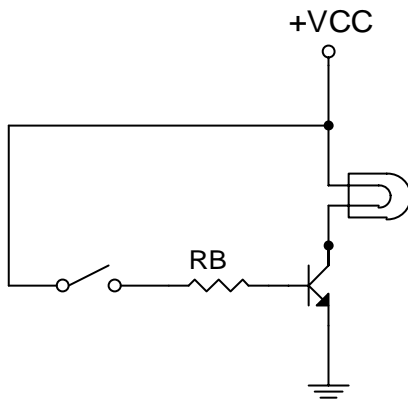


Fig. 15A: Transistor enciende y apaga lámpara.

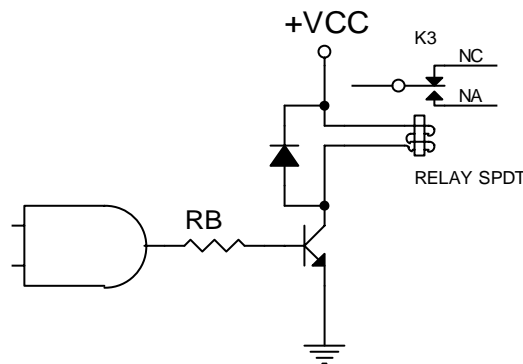


Fig. 15B: Transistor actúa un rele

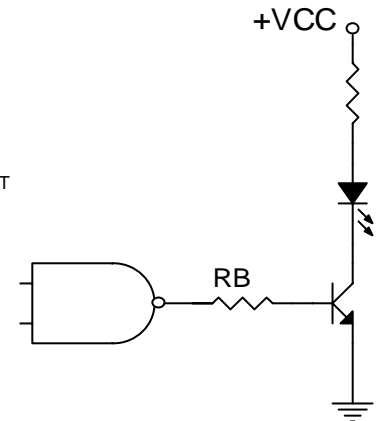


Fig. 15C: Transistor activa un LED

### LA CONFIGURACION DARLINGTON

En la figura 16 se muestra una forma particular de interconectar en forma directa un par de transistores que se conoce como amplificador Darlington.

En la figura 17 se muestra un seguidor que usa como elemento activo la configuración Darlington. En el se puede ver que la impedancia del segundo transistor actúa como resistencia de emisor del primero. Toda la corriente de emisor de  $Q_1$  circula por la base de  $Q_2$ . La ganancia de los dos transistores es esencialmente el producto de las ganancias individuales

$$\beta_{total} = \beta_1 \beta_2$$

Cuando la ganancia de un solo transistor es insuficiente la configuración Darlington puede ser la solución.

Una buena aproximación de la impedancia de entrada del amplificador de la figura 11 es:

$$R_{in} = \beta_1 \beta_2 R_E$$

por ello es fácil obtener resistencia de entrada de varios megohms.

La resistencia de salida está dada aproximadamente por:

$$R_{out} = \frac{R_s}{\beta_1 \beta_2}$$

por lo tanto la resistencia de salida es muy baja.

La configuración Darlington la podemos ver como un único transistor que tiene alta ganancia, de hecho se lo puede obtener en el comercio encapsulado como un componente de tres terminales.

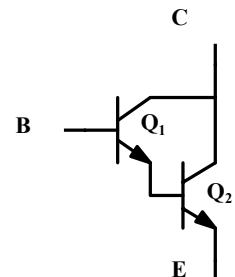


Fig. 16: Transistor Darlington

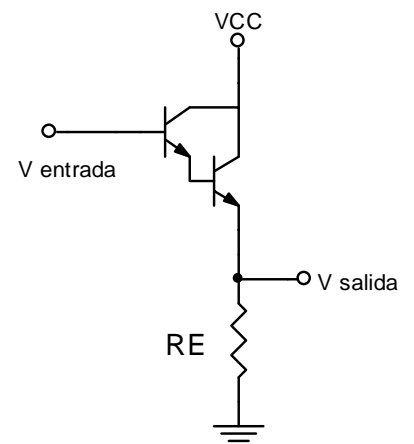


Fig. 17: Seguidor emisor con Darlington



## TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO

Uno de los puntos débiles del transistor bipolar es su baja impedancia de entrada, debido a la polarización directa de la juntura base-emisor. Con el objeto de superar esta deficiencia, se puede usar la configuración de emisor común, pero en algunos casos aún no es suficientemente alta la impedancia de entrada. Una solución es el empleo de un transistor de juntura de efecto de campo FET o JFET (Field Effect Transistor).

Existen dos tipos de transistor Efecto de Campo de canal  $n$  y de canal  $p$ . En la figura 1 se muestra esquemáticamente la estructura física de un FET de Canal  $n$ . La puerta o Gate (G) constituida por las dos porciones rayadas, están conectadas entre sí. La barra es de material tipo  $n$  y actúa como un resistor entre el drenaje (D) y la fuente (S). La puerta G es material del tipo  $p$ .

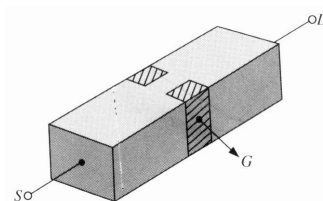


Fig. 1: Esquema de un transistor JFET

La corriente principal a controlar ( $I_D$ ) circula entre la fuente y el colector por el denominado canal; como todo es del mismo material (no existe juntura en este camino) la conducción, solo se debe a los portadores mayoritarios, por lo cual el FET suele recibir el nombre de "unipolar" en contraposición con el transistor "bipolar" estudiado anteriormente (donde los portadores son electrones y lagunas).

En el FET el terminal de control es la puerta y opera con la juntura puerta-fuente polarizada en forma inversa por lo que la impedancia de entrada es muy alta.

Cuando la juntura no está polarizada  $V_{GS} = 0$  existe una zona vacía de portadores en el "canal" por donde circula la corriente  $I_C$ . La sección del canal o lo que es lo mismo el grado de depleción depende de la magnitud de la polarización inversa como se representa en la figura 2.

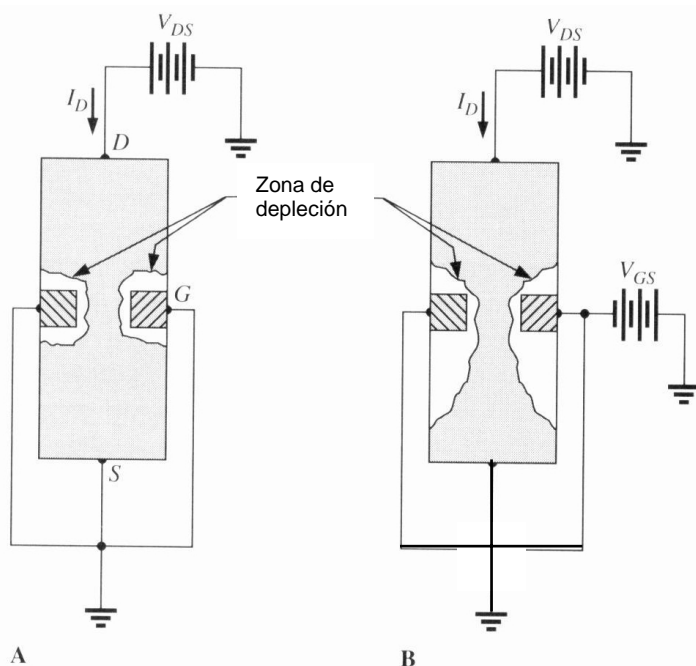


Fig. 2: Funcionamiento de un JFET canal N  
A) con  $V_{GS} = 0$

Para un dado valor de  $V_{ES}$  (tensión entre la puerta y la fuente), la corriente del drenador,  $I_D$ , crece linealmente con el aumento de  $V_{DS}$  (tensión entre el drenador y la fuente) hasta que el canal se agota. A partir de este punto incrementos de  $V_{DS}$  no hacen cambiar esencialmente  $I_D$ .

Las curvas características ( $I_D$  vs.  $V_{DS}$ ) para un dado FET se muestran en la Figura 16 para una familia de valores de  $V_{GS}$ . El valor de tensión  $V_{DS}$  a partir del cual no se incrementa la corriente se conoce como tensión *pellizcamiento* (pinch)  $V_p$ . En la Figura 3 se muestra en línea punteada los valores de  $V_p$  y  $I_D$  es

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \left( \frac{V_{GS}}{V_p} \right) \right)^2 \quad (a)$$

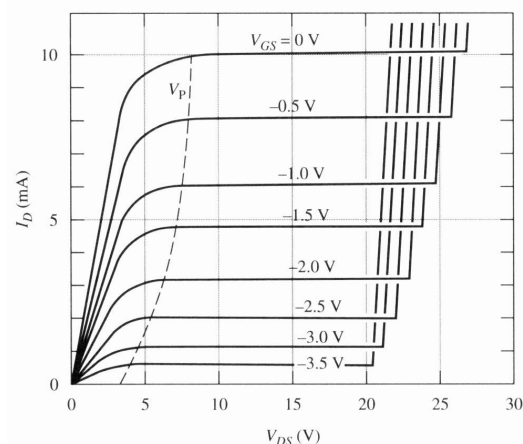


Fig. 3: Curvas características de salida de un JFET canal N en fuente común.



donde  $i_{DSS}$  es la corriente drenador-fuente para  $V_{GS} = 0$  (cortocircuito), que es un parámetro del transistor dado por el fabricante del transistor.

La región a la izquierda de la línea punteada que representa  $V_p$  es la llamada “región ohmica”, ya que allí la relación entre la corriente y la tensión en el FET es lineal, como en un resistor. Dado que las pendientes de las rectas (en esta región) varían con la tensión  $V_{GS}$  el FET se comporta como un resistor controlado por tensión. Hay ocasiones en que este comportamiento es útil y que no es posible obtener con transistores bipolares.

A la derecha de la línea punteada (Figura 3) las curvas corriente-tensión son planas. Esta región es conocida como activa, de corriente constante o región de saturación. En ella el FET se comporta como un generador de corriente controlado por tensión cuya magnitud depende de la tensión de la puerta  $V_{GS}$ .

La curva de transferencia para el FET se muestra en la Figura 4 y se puede ver la relación entre la corriente de drenaje,  $i_D$ , versus la tensión puerta-fuente  $V_{GS}$ , para un valor fijo de drenador-fuente,  $V_{DS}$ . Esta curva se puede obtener a partir de las curvas características de salida. La pendiente de la curva de transferencia es una medida directa de la habilidad del FET como amplificador de transconductancia. La curva es cada vez menos lineal con el incremento negativo de  $V_{GS}$ . Si se extra-pola la parte lineal de la curva para  $i_D = i_{DSS}$  la intersección con el eje  $i_D = 0$  obten-dremos el valor  $\frac{1}{2} V_p$  como se muestra en la Figura 4.

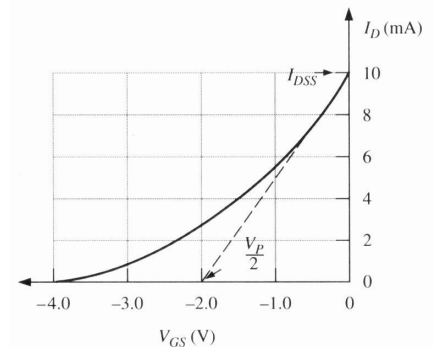


Fig. 4: Características de transferencia de un JFET canal N

Los símbolos de los FET canal  $n$  y canal  $p$  se muestran en la Figura 5. El sentido de la flecha indica el de la corriente en la juntura compuerta-fuente si estuviese polarizada en directo. Es frecuente encontrar una representación del FET encerrado dentro de un círculo.

### EL FET COMO AMPLIFICADOR

La configuración usada más frecuentemente del FET es como amplificador de fuente común; es decir, la fuente es común a ambos la entrada y la salida. El circuito se muestra en la Figura 6. Se puede obtener el valor de la tensión de polarización  $V_{GS}$  necesaria de las curvas características o por medio de la ecuación (a), antes dada, si se conocen los restantes parámetros.

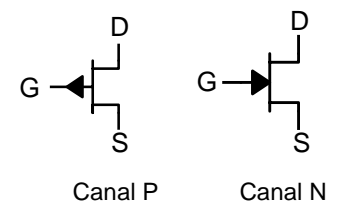


Fig. 5: Símbolos del JFET

Debido a la construcción del FET, la corriente de puerta es extremadamente baja. De ello podemos sacar las siguientes conclusiones: primero, la corriente de la fuente es esencialmente igual a la del drenador,  $i_D$ ; segundo la tensión en la fuente (Figura 6)  $V_S = -V_{GS}$ . Decir que la puerta es negativa (polarizada inversa) con respecto a la fuente es exactamente lo mismo que decir que la fuente es positiva respecto de la puerta. La magnitud de  $V_S$  es igual que  $V_{GS}$  debido a que en la malla formada por la puerta,  $R_S$ ,  $R_G$  no circula corriente; no hay caída en  $R_G$  y sus dos extremos están al mismo potencial.

En la Figura 6 la polarización de la puerta se obtiene entonces debido a la corriente que pasa a través de  $i_D$

$$V_S = i_D R_S = -V_{GS}$$

Este método se denomina *autopolarización*. Este tipo de polarización no se puede usar en los transistores bipolares debido a que existe corriente de base.

La ecuación anterior la podemos usar para calcular el valor de  $R_S$  si conocemos los valores de  $i_D$  y  $V_{GS}$ .

El valor de  $R_D$  se puede calcular usando la siguiente ecuación

$$R_D = \frac{(V_{DD} - V_{DS})}{i_D} - R_S$$

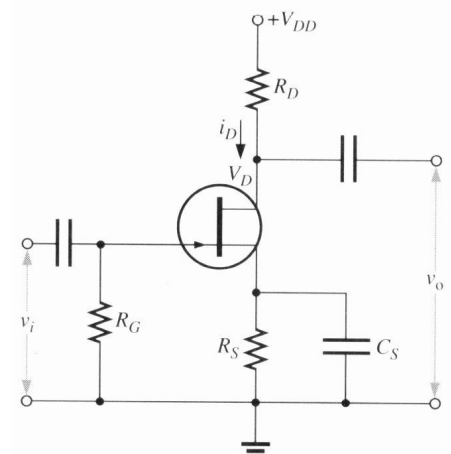


Fig. 6: Amplificador fuente común típico con JFET.



En cuanto al valor de  $R_G$ , no es crítico usualmente se usa un resistor en el rango de 1 a 10 megahom. Se debe cumplir:

$$i_G R_G \ll V_S = i_D R_S$$

Como  $i_G$  está en el orden de los nanoamperes se pueden usar altos valores de  $R_G$  para obtener alta impedancia de entrada a los componentes de frecuencia de la señal con el objeto de que no varíe la polarización de puerta. Es similar al capacitor de "paso"  $R_E$  en el amplificador emisor común. Un criterio para seleccionar  $C_S$  es que su impedancia sea mucho menor que la de  $R_E$

$$C_S = 10 / (2\pi f R_S)$$

donde  $f$  es la frecuencia mínima a la cual operará el amplificador.

La transconductancia,  $gm$ , se define como la razón entre los cambios de la corriente de salida y los cambios de la tensión de entrada, para variaciones en un pequeño rango. Para el FET tenemos:

$$gm = \Delta i_D / \Delta v_{GS}$$

Con ello podemos determinar la ganancia del amplificador fuente común.

$$A_v = \Delta v_D / \Delta v_{GS} = -R_D i_D / \Delta v_{GS} = -gm R_D$$

Lamentablemente,  $gm$ , en el FET es función de la corriente de drenaje y varía para diferentes valores de  $i_D$ ; con lo cual la ganancia no es lineal para grandes variaciones de la señal de entrada.

### EL FET COMO SEGUIDOR

Dado que el FET tiene muy alta impedancia de entrada es el componente natural para usarlo como seguidor de tensión de alta impedancia, el circuito se muestra en la Figura 7.

Los cambios en la tensión de salida está dado por:

$$\Delta V_{out} = R_L \Delta i_D$$

$$\text{Como } gm = \Delta i_D / \Delta V_{GS} \quad \text{ó} \quad \Delta i_D = gm \Delta V_{GS} = gm(V_{in} - V_{out})$$

Reemplazando en la anterior y resolviendo:

$$\Delta V_{out} = \Delta v_i \frac{gm R_L}{1 + gm R_L}$$

Si el producto  $gm R_L$  se elige mayor que la unidad, la anterior se reduce a:

$$\Delta V_{out} = \Delta v_i$$

lo que justifica el nombre de seguidor de tensión al circuito de la figura 7. El circuito permite la medida de tensiones sin "cargar" el dispositivo es de utilidad, como ser, para determinar la tensión de un pequeño capacitor cargado o de la salida de un micrófono capacitivo.

### TRANSISTOR DE PUERTA AISLADA DE EFECTO DE CAMPO

El transistor de efecto de campo de puerta aislada IGFET, usualmente conocido como MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) es otro dispositivo de amplificación con muy alta impedancia de entrada. La resistencia típica de entrada de un MOSFET varía en el rango de  $10^9$  a  $10^{14}$  ohms.

Conociendo como es la estructura del MOSFET se comprenderá mejor su funcionamiento. Para aislar la puerta, se deposita una capa de dióxido de silicio sobre el

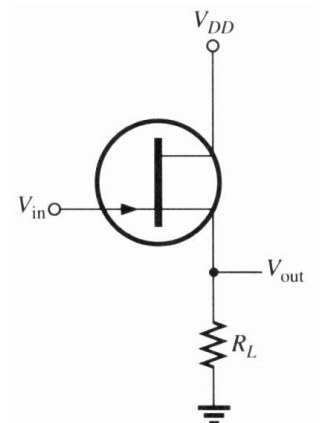


Fig. 7: JFET como seguidor

FET básico, como se muestra en la Figura 8. Se cubre posteriormente con una capa protectora de nitrato de silicio obteniéndose con ello una impedancia de entrada del orden de  $10^{14}$  ohms. Luego por ataque químico de estas capas, se comen dos huecos para los contactos del drenador y la fuente de material  $n$ . Luego se deposita un metal a través de una máscara para que cubra las zonas deseadas y se sueldan los terminales a los distintos electrodos.

Hay distintos tipos de MOSFET, cada uno de los cuales opera en el "modo de enriquecimiento" o en el "modo de depleción", o en algunos casos en una combinación de ambos.

El modo de enriquecimiento está ilustrado en la Figura 9. Al aplicar una tensión positiva a la puerta esta tendrá un exceso de cargas positivas las que inducirán cargas negativas en el canal entre el drenador y la fuente, posibilitando que pueda fluir corriente de drenaje. En la medida en que se aumente el potencial positivo de la puerta se enriquece de portadores el canal y aumenta la corriente. La curva característica de transferencia ( $I_D$  versus  $V_{GS}$ ) se muestra en la Figura 10 y la curva característica de salida en B. Los símbolos que representan los MOSFET de canal  $n$  y canal  $p$  están indicados en la Figura 11, en ella se muestra una conexión externa al sustrato que usualmente se conecta a la fuente o al punto de potencial más negativo del circuito. Esto cuando la conexión está disponible externamente en el transistor.

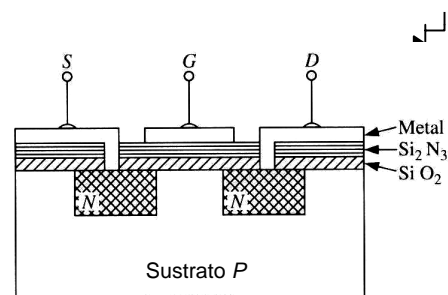


Fig. 8: Representación de un MOSFET

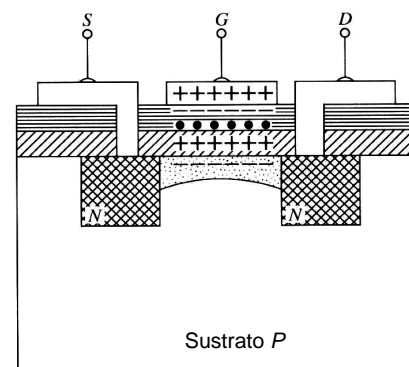


Fig. 9: Representación de un MOSFET de enriquecimiento

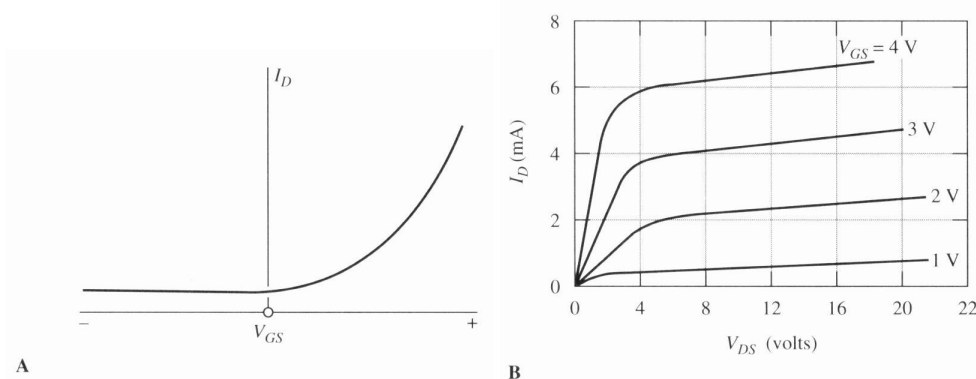


Fig. 10: Curvas de enriquecimiento:

- A) de transferencia
- B) de salida

El MOSFET de depleción opera de modo diferente debido a que posee otra estructura, figura 12. Las regiones de drenador y fuente están fuertemente dopadas (mostrada como  $N_+$ ) mientras que el canal de material  $n$  se ha difundido mucho menos impurezas. Todo ello se ha construido sobre un sustrato tipo  $p$ . Cuando la compuerta se hace negativa se inducen cargas positivas en el canal (produciendo una depleción de portadores que disminuyen la corriente drenador-fuente. Incrementando la tensión negativa de puerta decrece la corriente del drenador. La curva de transferencia se muestra en la Figura 13; en ella se puede ver que a este tipo de MOSFET se le puede aplicar tanto señal positiva como negativa en la puerta. Cuando la puerta es positiva funciona el mecanismo de enriquecimiento descrito anteriormente.

La gran diferencia desde el punto de vista de su comportamiento entre los dos tipos de MOSFET está dada por la corriente que circula cuando la tensión de puerta es cero. Para el enriquecimiento no hay corriente cuando  $V_{GS} = 0$  para el depleción sí. En la Figura 14 se muestran los símbolos usados para los MOSFET de depleción (frecuentemente se representan también en el interior de un círculo).

Con los MOSFET se pueden construir amplificadores de la misma manera que se hizo con el JFET solo sustituyendo este por un MOSFET de depleción se obtendría un ejemplo de amplificadores. En el caso de enriquecimiento se debe modificar la forma de polarizarlo. Es poco frecuente usar MOSFET individuales como amplificadores; su uso está muy exten-

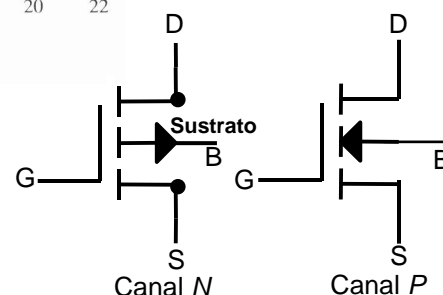


Fig. 11: Símbolos de los MOSFET de enriquecimiento.

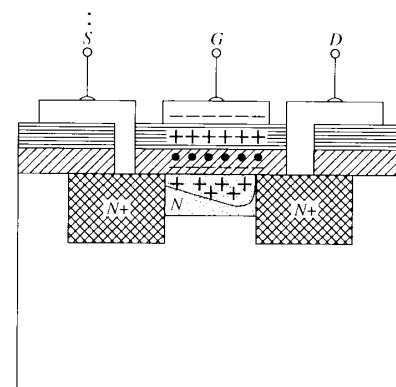


Fig. 12: Representación de un MOSFET de depleción.

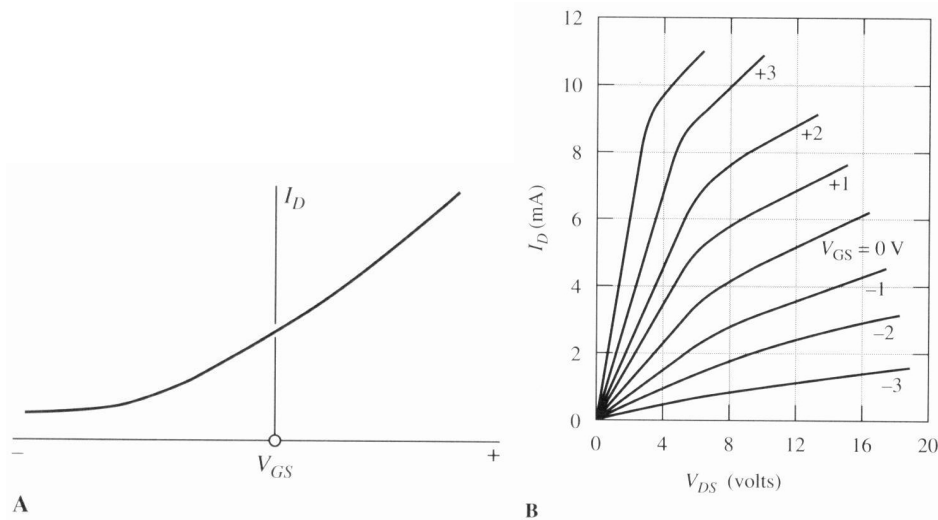


Fig. 13: MOSFET de depleción  
A) curva de transferencia  
B) característica de salida

dido en circuitos integrados.

Debido a que los MOSFET tienen una impedancia extremadamente alta se debe tener mucho cuidado al usarlos. Las descargas electrostáticas comunes asociadas a los ambientes con aire seco, generalmente destruyen el transistor, por lo cual hay que tomar precauciones tales como cortocircuitar los terminales hasta des-

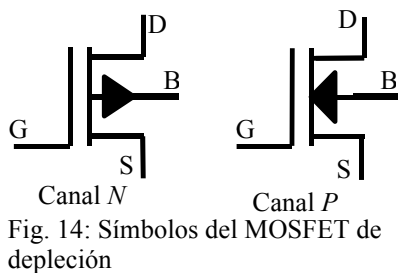


Fig. 14: Símbolos del MOSFET de depleción

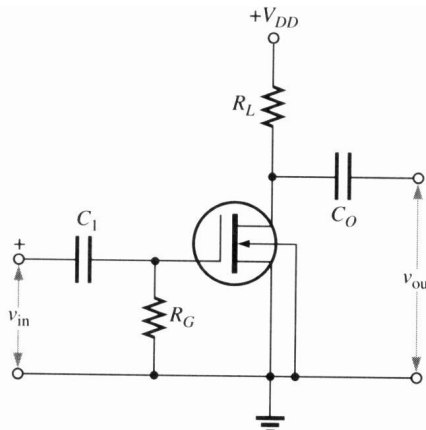


Fig. 15: Amplificador con MOSFET

pués de soldado el componente en el circuito donde debe ir.

## EL JFET COMO FUENTE DE CORRIENTE

El JFET puede ser usado como fuente de corriente constante y su uso es frecuente en circuitos integrados particularmente en amplificadores operaciones. La más simple de las fuentes de corriente con JFET se muestra en la figura. El JFET al ser un dispositivo de depleción no necesita polarización de base. En las curvas características de salida el FET (Figura 3) se puede ver que la corriente de drenaje se mantiene razonablemente constante para grandes variaciones de  $V_{DS}$ . No obstante debido a que  $I_{DSS}$  tiene gran dispersión, es impredecible cuál será el valor de la corriente. Por ejemplo, para un JFET de canal  $n$  típico (2N5484) el fabricante especifica  $I_{DSS}$  de 1 mA a 5 mA. A pesar de ello el circuito es atractivo por su simplicidad al brindar una fuente de corriente constante de dos terminales.

Una variante del circuito de la Figura 16 se muestra en la Figura 17 el FET está autopolarizado. Variando  $R$  se puede ajustar la corriente de la fuente.

El resistor  $R$  autopolariza la puerta a una tensión  $-I_D R$  pudiéndose ajustar la corriente a valores menores de  $I_{DSS}$ . Este circuito brinda una mejor fuente de corriente (mayor impedancia) dado que el resistor en la fuente provee un sensor de realimentación de corriente que ayuda a disminuir las variaciones de la misma. Una mayor corriente tiende a disminuir la tensión de puerta que procura disminuir la corriente  $I_D$ .

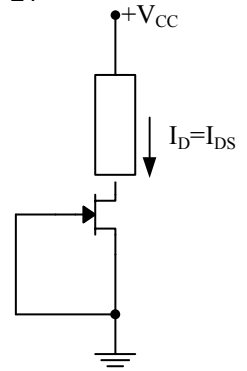


Fig. 16: Fuente de corriente constante con JFET

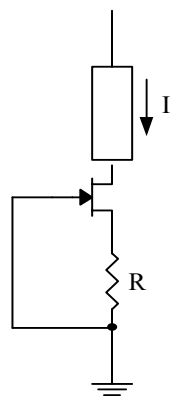


Fig. 17: Fuente de  $I=cte$  con FET autopolarizado



## MOSFET COMO LLAVE

En la Figura 18 se muestra un MOSFET actuando como llave. El circuito es muy simple ya que al no circular corriente de puerta, la polarización es muy simple. Con la llave en la posición mostrada en la figura el transistor se encuentra en plena conducción y presenta una pequeña resistencia comparada con la de la carga y tensión del drenador es muy próxima a la de tierra. El valor de resistencia del FET a plena conducción se lo conoce como  $R_{ON}$  cuyo valor varía entre algunos cientos de ohms para transistores de baja potencia a algunas décimas de ohm para las de potencia. Conmutando la llave a la otra posición la fuente y la puerta están al mismo potencial, el transistor se comporta como una llave abierta y no conduce ya que se trata de un dispositivo de enriquecimiento.

En la Figura 19 se muestra una aplicación del MOSFET como llave "Analógica" – función que no puede realizar el transistor bipolar -. Con un potencial de cero volt aplicado a la puerta, el transistor este no conduce y se comporta como un circuito abierto. Una tensión positiva polariza la puerta y el transistor conduce dejando pasar la señal de entrada a la carga.

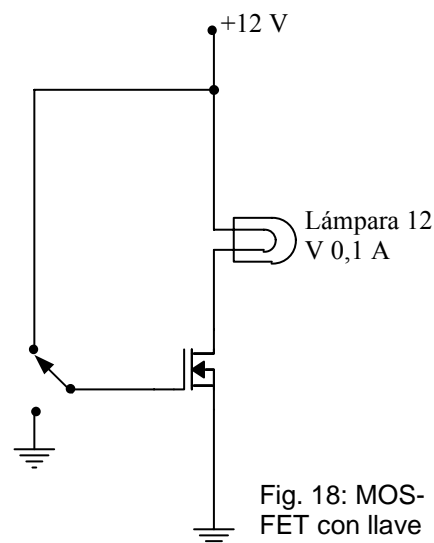


Fig. 18: MOSFET con llave

En general la tensión de la puerta debe ser más negativa que el valor más negativo de señal de entrada para que la llave esté abierta y más positiva que el máximo valor de la señal de entrada para que el MOSFET se comporte como llave cerrada.

Una llave analógica ideal se comporta como un interruptor mecánico perfecto: en el estado ON pasa la señal sin atenuación ni distorsión lineal; en el estado OFF es un circuito abierto. Debe tener baja capacidad (parásita) respecto de tierra y un acoplamiento capacitivo entre la señal y las tensiones de control aplicadas a la puerta nulo.

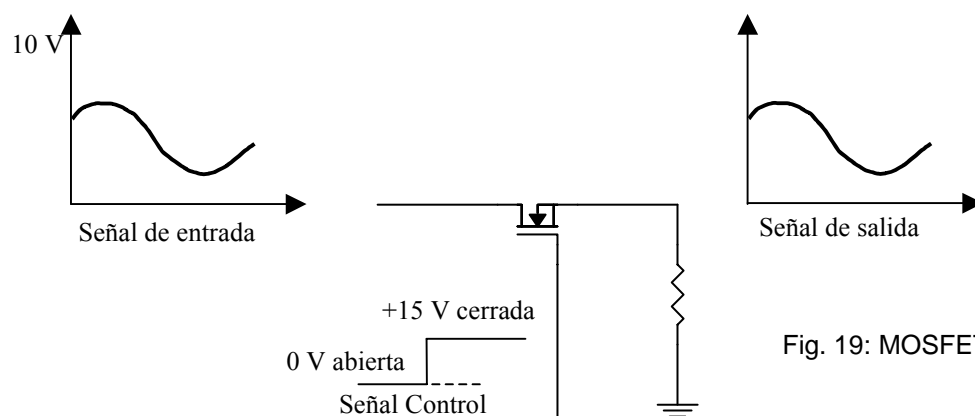


Fig. 19: MOSFET como llave analógica

Refiriéndonos a la figura 19, cuando la puerta está a tierra o a un valor negativo, la resistencia entre drenador – fuente ( $R_{OFF}$ ) tiene un valor de  $10.000\text{ M}\Omega$  (Típico) y no pasa señal pero a alta frecuencia la capacidad drenador – fuente es una vía de acoplamiento entre la señal y la carga.

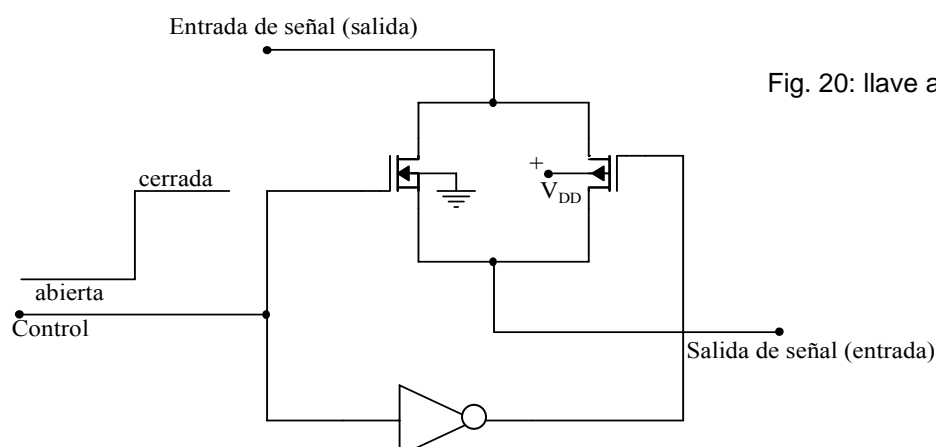


Fig. 20: llave analógica CMOS



Aplicando una tensión a la puerta de +15 Volt, el canal drenador–fuente conduce ( $R_{ON}$  típica de los transistores usados como llave es  $100\ \Omega$ ). El nivel de señal no es crítico mientras la puerta se mantenga algunos volts más positivos que la misma. Si se controla la puerta con tensiones, por ejemplo  $\pm 15\text{ V}$ , la señal de entrada puede ser bipolar.

Si el nivel de la señal se aproxima a la tensión (aumenta su resistencia) con lo cual parte de la tensión de la señal cae en el transistor. Como la caída depende del valor de la tensión aplicada, la señal sufre una distorsión por la linealidad.

Como es frecuente necesitar conmutar señales que fluctúen hasta cerca de las tensiones de alimentación el problema se soluciona usando en paralelo llaves con MOSFET complementarios, uno canal  $n$  y otro  $p$ , (CMOS) como se muestra en la figura 20

El símbolo triangular es un inversor digital. Un nivel de entrada “alto” se invierte y la salida está en “bajo” y viceversa.

Cuando el control está en alto,  $Q_1$  se mantiene en ON para señales de algunos volt menor que  $V_{DD}$ . Asimismo  $Q_2$  está en ON (la puerta está a tierra) su resistencia es  $R_{ON}$  para señales próximas a  $V_{DD}$  pero aumenta rápidamente cuando la señal se aproxima a tierra como se muestra en la figura 21. La señal pasa a través de las resistencias paralelo de  $Q_1$  y  $Q_2$  cuando están en conducción y se puede ver es pequeña y casi constante para distintos valores de la señal de entrada.

Debe notarse que la llave analógica es un dispositivo bidireccional y el símbolo usado se muestra en la figura. 22

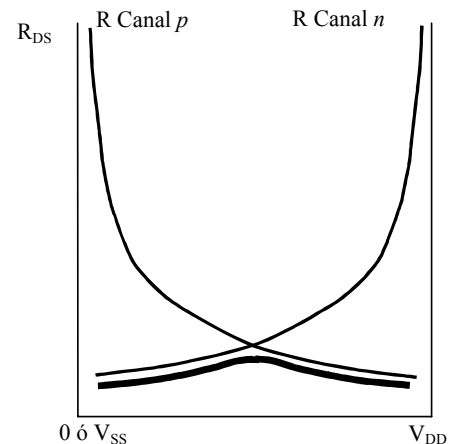


Fig. 21: Resistencia de la llave CMOS

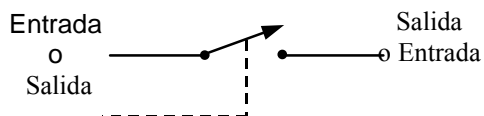


Fig. 22: Símbolo de una llave CMOS.