

## TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO

Anteriormente hemos visto, el BJT que depende su funcionamiento de distintos tipos de portadores de carga: Huecos y Electrones.

A diferencia el FET (*field-effect transistor*) depende del transporte de un solo tipo de portadores, bien sean huecos o electrones, pero no de ambos.

Por esta razón los FET son dispositivos *UNIPOLARES*.

En los BJT, la  $I_C$  depende de las polarizaciones de las uniones ( $J_E$  y  $J_C$ ).

Los FET, utilizan el campo eléctrico  $E$ , de la unión P-N, polarizada en inverso, para controlar la resistencia de una canal, y de este modo regular la corriente de salida.

Hay dos tipos:

- 1º) El FET de Unión o JFET (Junction-Effect Transistor).
- 2º) El FET de puerta aislada o IGFET (Insulated Gate field-effect transistor) conocido vulgarmente como MOSFET (Metal-oxide semiconductor field-effect transistor).

Ambos tipos se subdividen en dos grupos de *CANAL N* y *CANAL P*.

La recta de carga permite el análisis gráfico de muchos circuitos complicados con el diodo de unión. El circuito normalmente se reduce a poner en serie con el diodo una fuente de alimentación en continua  $V_{CC}$  y una resistencia de carga  $R_L$ , que aplicando las leyes de Kirchhoff nos queda:

## VENTAJAS DEL FET FRENTE A LOS BIPOLARES BJT

- 1º) Alta impedancia de entrada.
- 2º) Bajo nivel de ruido.
- 3º) Inmunidad a la radiación.
- 4º) Pequeño consumo unido a una gran estabilidad térmica.
- 5º) Fáciles de fabricar y ocupan menos área para su integración.

### Inconvenientes:

- 1º) Mala respuesta a alta frecuencia (BW pequeño).
- 2º) Utilización para pequeña potencia.

## ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN JFET (FET DE UNIÓN)

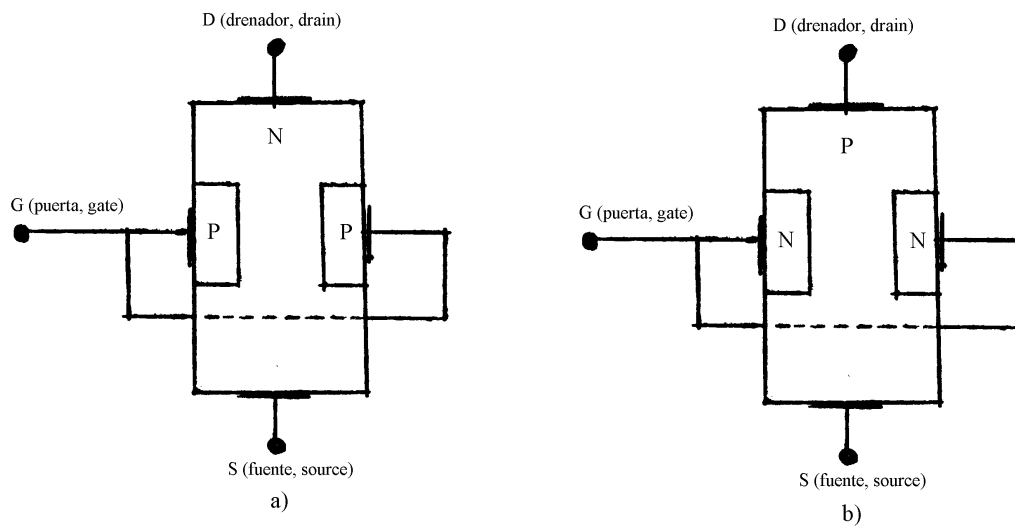
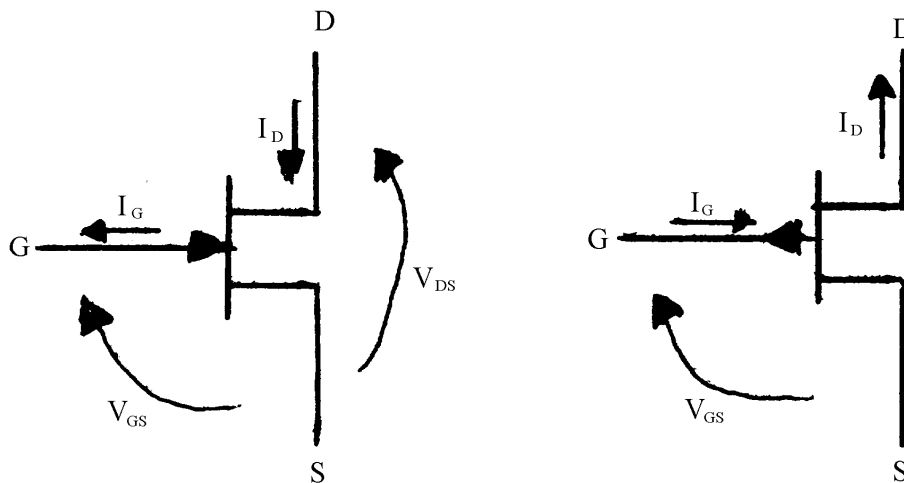


Figura 1

En la fig. 1a, se muestra, un fet de Unión de Canal N, donde se han difundido en ambas caras, una pequeña zona de material tipo P.

### Símbolos:



Las dos zonas P van unidas entre sí, constituyendo el terminal G, denominado puerta (Gate).

## TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO: JFET

En los transistores bipolares su funcionamiento era con dos portadores de carga ( $h^+$  y  $e^-$ ).

Ahora los FET son dispositivos unipolares que solo dependen de un tipo de portadores ( $h^+$  o  $e^-$ ).

Existen dos tipos:

- JFET (*TRT FET DE UNIÓN*).
- MOSFET o IGFET (*TRT FET DE PUERTA AISLADA o METAL OXIDO SEMICONDUCTOR*).

Frente a los Bipolares:

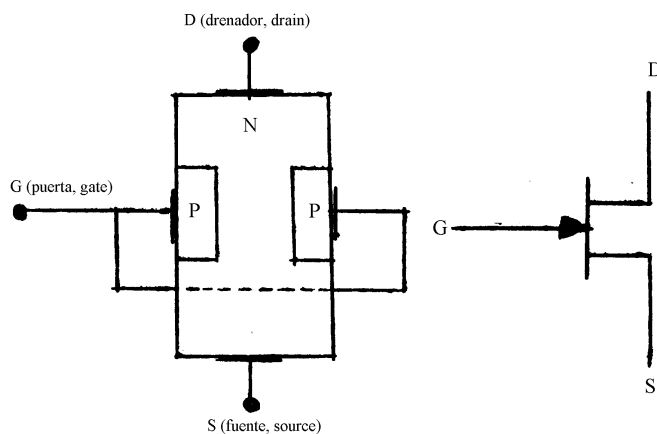
- Fáciles de fabricar.
- Estabilidad Térmica.
- Ocupan menos área para su integración.
- Impedancia de entrada muy elevada.
- Menos ruidoso.
- Inmunidad a la radiación.

Desventaja: La transconductancia  $g$  es mucho menor que en los TRT BIPOLARES.

- Pequeña anchura de banda.
- Utilización para pequeña potencia.

## JFET

Existen dos grupos: el de canal N y canal P.

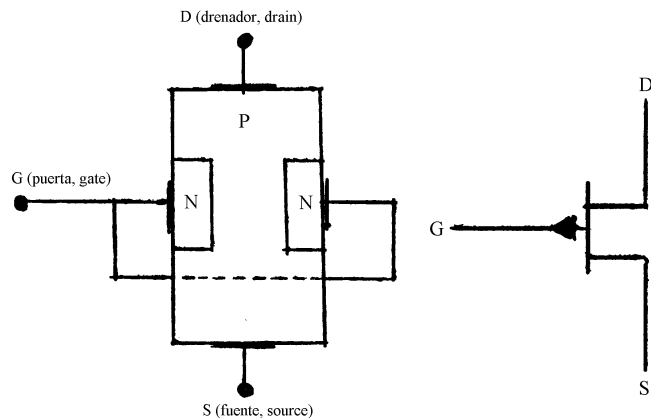


### CANAL N

Consta de una capa delgada de tipo N con dos contactos óhmicos, el surtidor S en la parte inferior y drenador D, en la parte superior. Por S entran los mayoritarios y salen por D. La corriente irá de D a S. A la vez lleva unos contactos laterales de tipo P llamados puertas.

Si estos contactos están internamente puenteados se les denomina de una sola puerta G; si por el contrario existen dos terminales se le denomina de doble puerta  $G_1$  y  $G_2$ .

Se denomina canal a la región de material tipo N, en este caso, que queda entre las dos regiones de puerta.



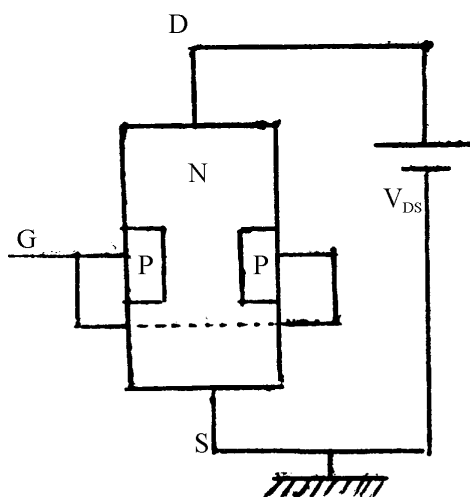
La dirección de la flecha en la puerta indica la dirección en la cual circularía la corriente de puerta si ésta estuviera polarizada directamente con el canal.

El TRT BJT la  $I_C$  se controla con la  $I_B$ , lo que hace que este dispositivo sea controlado por "Corriente" y el FET está controlado por Tensión: la  $I_D$  depende de la

tensión  $V_{DS}$ .

## FUNCIONAMIENTO

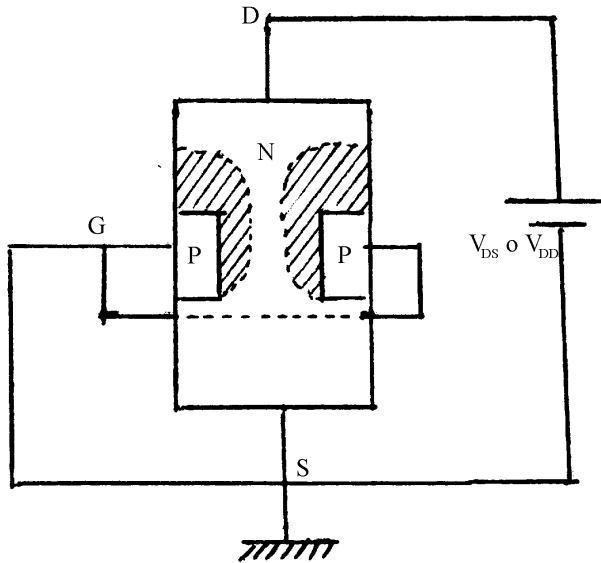
Si lo conectamos: S - masa  
G - libre  
D - tensión  $V_{DS}$



entonces se obtiene como resultado una circulación de corriente de D a S, a través del canal que será función de la resistencia del canal, es decir, de la resistividad del material tipo N, anchura, longitud y espesor del canal.

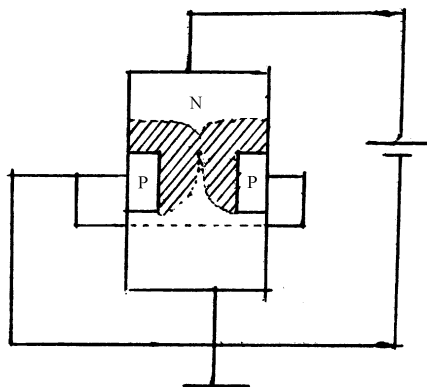
El material se comporta como una resistencia.

Si ahora unimos a masa también G...



La Unión P-N, formada entre la puerta y el Drenador, queda polarizada inversamente apareciendo una zona de Transición que como está libre de portadores, hará disminuir la anchura del canal aumentando la resistencia entre D y S.

Si  $V_{DS}$  ó  $V_{DD}$  aumentan, entonces  $I_{DS}$  aumenta y igualmente lo hace la Z.T. que hará que las dos zonas se toquen, produciéndose el bloqueo del canal.



A esta tensión, con  $V_{GS} = 0$  entonces  $V_{DS}$  ó  $V_{DD} = V_P$  (tensión de saturación  $V_{dsat}$ , tensión de estricción o de estrangulamiento  $V_P$ ).

Para esta tensión aunque D y S quedan separados por una región de carga especial, sigue existiendo corriente  $I_{DS}$  debido a la inyección de portadores que el canal inyecta en la Z.T., pero si  $V_{DS}$  aumenta,  $I_{DS} = \text{constante}$ .

Ahora polarizamos la puerta con tensiones negativas  $V_{GS} < 0$  con lo que aumenta la Z.T. y disminuye  $I_{DS}$  para los mismos valores

de  $V_{DS}$ .

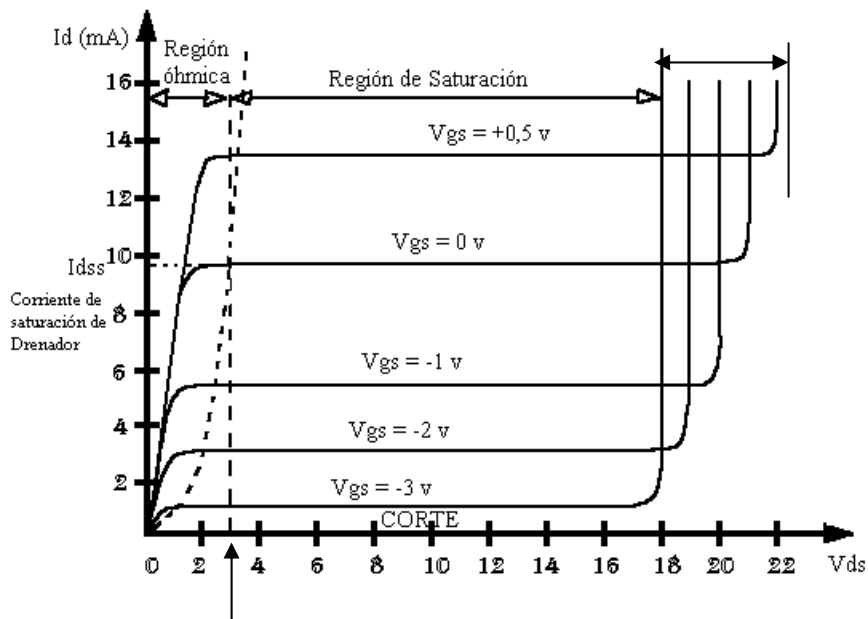
De tal manera que el bloqueo del canal se produce con tensiones  $V_{DS}$  más pequeñas, como vemos en el gráfico.

$$\text{Ahora la nueva } V_{DSsat}' = V_{dsat} + V_{GS}$$

$$V_P$$

$$\text{a la antigua con } V_{GS} = 0$$

Es evidente que al aplicar una tensión de puerta  $V_{GS} < 0$  se reduce el voltaje del drenador  $V_{DS}$  necesario para llegar a la saturación en,  $|V_{GS}|$ .

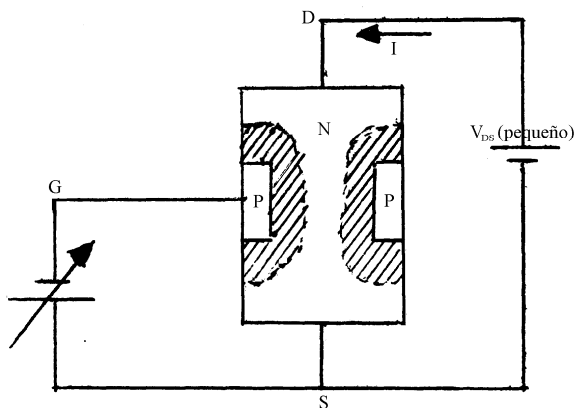


$$V_p = V$$

Análogamente para un valor dado de  $V_{DS} > 0$  si vamos haciendo la puerta cada vez más negativa, se llegará a un valor de  $V_{GS} = V_T$  denominado voltaje de cierre o estrangulamiento del canal  $V_T < 0$ .

### OPERACIÓN CON $V_{DS}$ PEQUEÑA

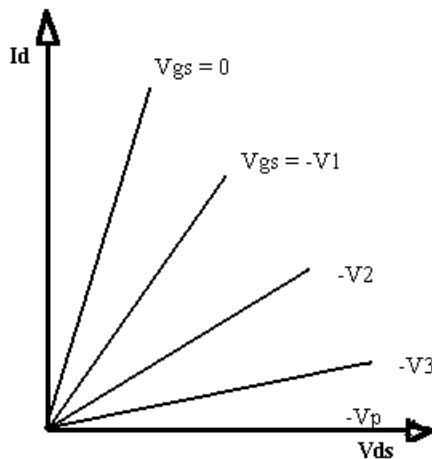
$V_{DS}$  es pequeña y  $V_{GS} = 0$ . Entonces, la Z.T. será estrecha y la  $I_D$  será determinada por la  $V_{DS}$  y la resistencia del canal.



Cuando  $V_{GS}$  se va haciendo negativo la región de agotamiento se ensancha y el canal se estrecha, al ser  $V_{DS}$  pequeño, el voltaje de polarización inversa será aproximadamente el mismo en ambos extremos y el ancho del canal será uniforme.

El estrechamiento del canal será uniforme y hará que aumente la resistencia, y la característica ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) permanece como una línea recta, pero

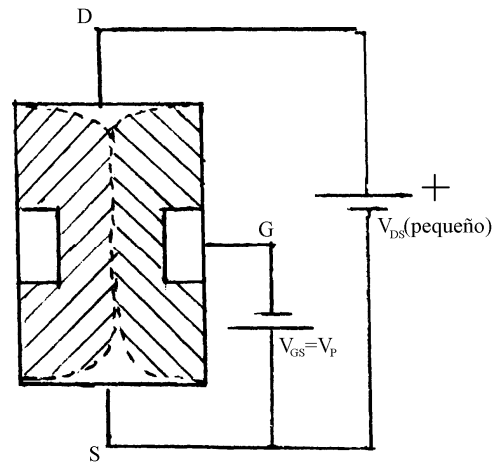
con una pendiente más pequeña.



Si se incrementa  $|V_{GS}|$  se llegará a un punto en que la Z.T. ocupe todo el ancho del canal. Entonces el canal quedará completamente agotado de portadores de carga (para tipo N serán  $e^-$ ). A esta condición se le llama activación y al voltaje que lo consigue, el voltaje de activación, que se representa por  $V_P$ .

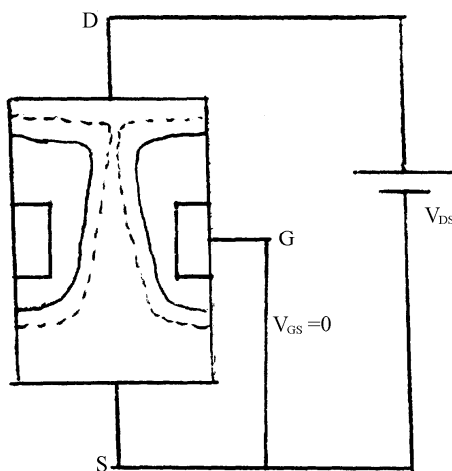
$$V_P = V_{GS}|_{I_d=0, V_{ds} \text{ (pequeño)}}$$

De esta manera para un dispositivo de canal N  $V_P$  es un número negativo. Sea la línea horizontal de nivel cero en la figura (a), donde se ve también que para  $V_{DS}$  pequeño, el JFET actúa como una resistencia lineal, cuyo valor se controla mediante el voltaje  $V_{GS}$ , que se llama VCR (resistencia controlada por voltaje), que aquí no es útil para amplificaciones lineales.



### OPERACIÓN CUANDO SE INCREMENTA $V_{DS}$

Si  $V_{GS} = 0 = \text{cte}$ , la unión tendrá 0v en la zona de la fuente y aumentando en D. El voltaje  $V_{DG}$  de polarización inversa será igual en magnitud a  $V_{DS}$ . La Z.T. tendrá la forma piramidal y el canal será más estrecho en la zona de D.



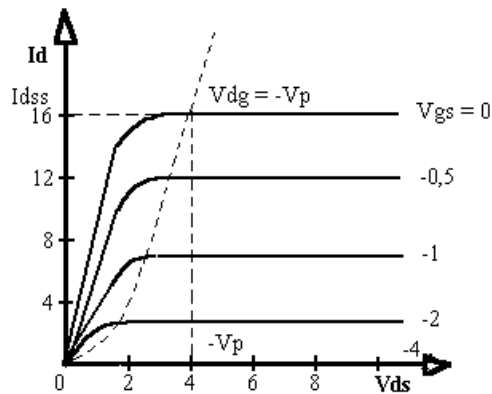
Si  $V_{DS}$  aumenta, la característica  $I_D - V_{DS}$  se volverá lineal.

Si se mantiene el aumento de  $V_{DS}$ , se alcanzará un valor en el que el canal experimenta estricción en el extremo de D. Esto ocurre al valor que resulta en el voltaje de polarización inversa en el extremo del drenaje, cuando es igual al voltaje de estricción.

$V_{DG} = -V_P$  (recordar que  $V_P$  es un número negativo)

Como citamos en el caso de  $V_{GS} = 0$ , la estricción será para  $V_{DS} = -V_P$

Cualquier incremento de  $V_{DS}$  no alterará la forma del canal y la  $I_D$  se mantendrá constante en el valor alcanzado para  $V_{DS} = -V_P$ . Esta corriente saturada  $I_{DSS}$  se especifica en los datos técnicos del JFET.



$$I_{DSS} = I_D|_{V_{GS}=0, V_{DG}=-V_P}$$

Es importante hacer notar, la diferencia en el caso de que la estricción en el canal es máxima y el caso cuando ocurre la estricción sólo en el extremo del drenaje.

En el primer caso, el canal se encuentra agotado de portadores de carga, o sea,  $I_D=0$ .

En el segundo caso, la corriente continua fluye a través del canal y serán arrastrados a través de la región de estricción

del D y alcanzarán el terminal.

Ahora  $V_{GS}=-V$  donde  $V$  es un número positivo menor que  $|V_P|$ .

Teníamos que para  $V_{DS}$  pequeño el ancho de canal era uniforme, ya que el voltaje de polarización inversa en el D es casi igual al extremo de la fuente.

Si  $V_{DS}$  aumenta, el voltaje de polarización inversa se mantiene cte. en el extremo S y aumenta en el extremo del D.(aumenta a lo largo de todo el canal, pero la mayor magnitud está en el extremo del D.), entonces la Z.T. tendrá forma piramidal y quedará estrangulado para un valor de  $V_{DG} = -V_P$ .

Ya que en este caso  $V_{GS} = -V$ , se deduce que la estricción ocurrirá cuando:

$$V_{DS} = V_{DG} + V_{GS} = -V_P - V$$

$$V_{DS} = V_{GS} - V_P$$

ya que el canal es más estrecho de lo que era cuando  $V_{GS} = 0$ . Por lo que el valor saturado de la corriente de drenaje será menor que  $I_{DSS}$ .

Continuando de esta manera para otros valores de  $V_{GS} = V_P$  se obtiene la familia completa de  $I_D - V_{DS}$  que se encuentra en la figura.

Señalaremos que para el Canal N,  $V_{DS}>0$ ,  $V_{GS}<0$ ,  $V_P<0$  y para el Canal P  $V_{DS}<0$ ,  $V_{GS}>0$ ,  $V_P>0$ .



## CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

La razón de llamarlas “estáticas” es porque estas curvas se miden en c.d. o en baja frecuencia. De esta manera los efectos de las capacidades internas son mínimos.

Hemos visto que en el margen de pequeños valores de  $V_{DS}$ , el FET actúa como una resistencia ( $r_{DS}$ ), cuyo valor se controla mediante  $V_{GS}$ .

$I_D$  depende fuertemente de  $V_{DS}$ . Esta región se denomina *REGIÓN ÓHMICA LINEAL* y en ella el FET se comporta como VCR (Resistencia variable a la tensión).

Es decir, la sección del canal es independiente de  $V_{DS}$ .

La corriente en esta región viene dada por:

$$I_D = I_{DSS} \frac{2V_{DS}}{V_P} \left( \frac{V_{GS}}{V_P} - \frac{V_{DS}}{2V_P} - 1 \right) \quad (1)$$

incluso para  $V_{DS}$  se puede aproximar:

$$I_D = I_{DSS} \left[ 2 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \frac{V_{DS}}{-V_P} - \left( \frac{V_{DS}}{V_P} \right)^2 \right]$$

para valores pequeños de  $V_{DS}$  se puede aproximar:

$$I_D = \frac{2I_{DSS}}{-V_P} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) V_{DS}$$

que es una representación lineal, cerca del origen.

La resistencia  $r_{DS}$  se obtiene por tanto:

$$r_{DS} = \frac{V_{DS}}{i_D} \Big|_{V_{DS} \text{ pequeña}} = \left[ \frac{2I_{DSS}}{-V_P} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \right]^{-1}$$

## FRONTERA ENTRE LA REGIÓN ÓHMICA Y DE ESTRICCIÓN (SATURACIÓN)

La estricción se alcanza, cuando el voltaje de polarización inverso en el extremo del drenaje es igual al voltaje de estricción.

$$V_{DG} = -V_P$$

Esta ecuación ya hemos visto que se puede escribir:

$$V_{DS} = V_{GS} - V_P \quad (\text{lugar geométrico de la línea de puntos})$$

sustituyendo en (1) obtenemos:

$$I_D = I_{DSS} \left( \frac{V_{DS}}{V_P} \right)^2 \quad \text{que es la ecuación de la frontera por lo que para operar}$$

con:

*ÓHMICA (LINEAL)*

*SATURACIÓN (ESTRICCIÓN)*

$$|V_{DS}| < |V_{GS} - V_P| \text{ o } V_{DG} < -V_P$$

$$|V_{DS}| > |V_{GS} - V_P| \text{ o } V_{DG} > -V_P$$

## REGIÓN DE SATURACIÓN

En esta región, que es la utilizada en amplificación (por eso se le llama región activa) debido a sus características cuasilineales, y cuyas alturas se determinan mediante  $V_{GS}$ ; luego  $I_D = f(V_{GS})$  y prácticamente independiente de  $V_{DS}$ .

Es decir, se comporta como una fuente de corriente cte., con el valor de la corriente controlada mediante  $V_{GS}$ .

La  $I_D = f(V_{GS})$  se denomina “*CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA DEL FET*”. La obtenemos experimentalmente manteniendo constante  $V_{DS}$  y variando  $V_{DG}$ ; para cada valor de  $V_{GS}$  se mide  $I_D$  y se representa  $I_D = f(V_{GS})$ .

Para el TRT, BJT, la corriente de salida  $I_C$  y la corriente controladora  $I_B$ , estaban relacionadas por el factor  $B$ , el cual se consideraba constante:  $I_C = B I_B$ , luego existe una relación lineal entre  $I_B$  e  $I_C$ .

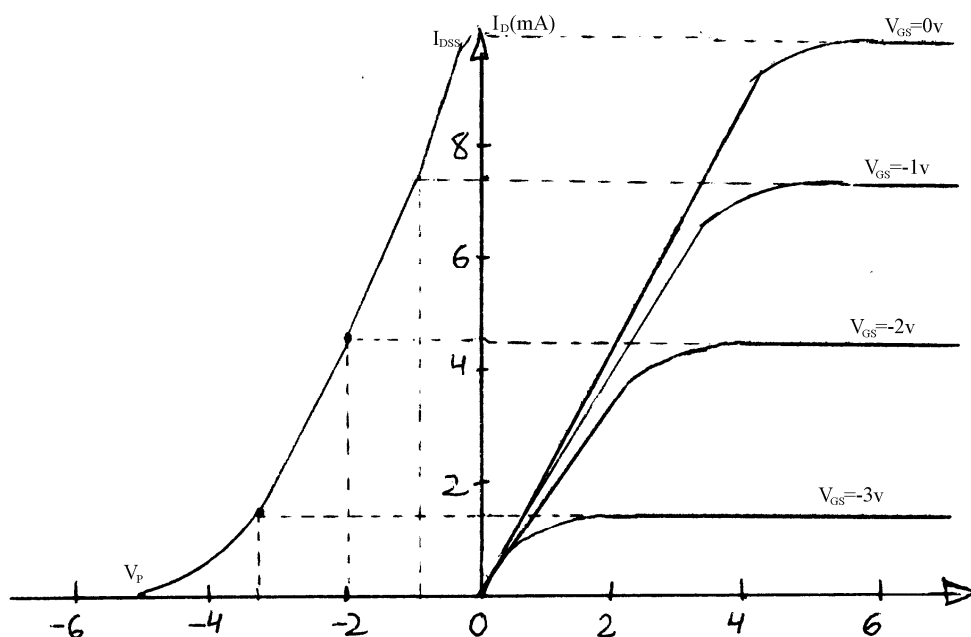
Desgraciadamente esta relación lineal no existe para las magnitudes de entrada y salida de un JFET ya que la relación entre  $I_D$  y  $V_{GS}$  se definen por la relación de Shokley:

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

donde  $I_{DSS}$ ,  $V_P$  son constantes y  $V_{GS}$  es el control variable. Vemos como el término cuadrado de la ecuación dará como resultado una relación no lineal entre  $I_D$  y  $V_{GS}$ .

Esta curva puede expresarse analíticamente por la ecuación

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



Cuando  $I_{DSS}$  y  $V_P$  se conocen, a partir de la relación de  $I_D = f(V_{GS})$ , podremos construir la curva de transferencia  $I_D = f(V_{GS})$ .

En la práctica debido a que los valores de  $I_{DSS}$  y  $V_P$  no pueden especificarse con precisión por el constructor, no existe una única característica de transferencia, por ello lo que hace el diseñador de circuitos es tomar los valores máximos y mínimos de  $I_{DSS}$  y  $V_P$  y construir dos curvas límites de transferencia: una máxima y otra mínima.

Otro aspecto a tratar en el estudio del FET, es la magnitud de la corriente de puerta  $I_G$ . Esta corriente no es más que la correspondiente a la saturación de la unión P-N formada por la puerta y el canal y como consecuencia representa un valor muy pequeño.

El fabricante suele proporcionar su valor en las hojas características, cuando el Drenador, se cortocircuita a la fuente y se aplica una cierta tensión a la puerta.

## HOJAS DE CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DEL JFET

En la fig. 6 se muestra una hoja de características de un JFET con canal N, se trata del tipo 2N 5248, al cual nos referiremos en este epígrafe para comentar los datos que suministra el fabricante.

### a) CORRIENTE DE SATURACIÓN Y TENSIÓN DE ESTRICCIÓN

La corriente de saturación drenador-fuente  $I_{DSS}$  y la tensión de estrangulación  $V_P$  (pinch-off voltage) se han definido en el epígrafe 6.2.2. La corriente  $I_{DSS}$  se denomina a veces corriente de estrangulación (pinch-off) o también corriente en el drenador con la

puerta a masa (zero-gate-voltage drain current), es decir el valor de  $I_D$   $V_{GS} = 0V$ . Otra denominación empleada por los fabricantes para definir la tensión de estricción  $V_P$  es la tensión de corte de puerta (gate cutoff voltage)  $V_{GS(off)}$ . Para el JFET tipo 2N 5248 cuyas características se dan en la fig. 6 se observa que  $I_{DSS(min)} = 4 \text{ mA}$  y  $I_{DSS(max)} = 20 \text{ mA}$ . También se observa que  $V_P$  definida como  $V_{GS(off)}$  tiene un nivel mínimo de  $-1V$  y un máximo de  $-8V$ .

*b) RESISTENCIA DEL DRENADOR*

La resistencia del drenador ( $r_D$ ) es la resistencia en c.a. entre los terminales del drenador y fuente cuando el FET trabaja en la región de saturación. Corresponde a la pendiente de la curva característica de drenador en la región de saturación. Como quiere que esta característica es muy plana, es difícil de calcular directamente por las curvas;  $r_D$  se designa algunas veces por el símbolo  $r_{DS}$  y se mide en  $k\Omega$  ó  $M\Omega$ ;  $r_D$  representa la resistencia de salida del FET y puede expresarse como una admitancia de salida  $Y_{OS} = 1/r_D$ , que es el valor que suministra el fabricante. Es decir:

$$r_D = \left[ \frac{\text{Incr. } V_{DS}}{\text{Incr. } I_D} \right]_{V_{GS}}$$

para el FET 2N5248, el valor de  $Y_{OS}$  es de  $50 \mu\text{mho}$  (máx) que corresponde a una magnitud mínima para  $r_D$  de  $20 k\Omega$ .

*c) TRANSCONDUCTANCIA*

La transconductancia es simplemente la pendiente de la característica de transferencia del FET. Como quiera que la pendiente varía con el punto de trabajo considerado (ver parte izquierda de la fig. 5), cuando se indica el valor de la transconductancia se especifica el valor de  $V_{GS}$  al cual se ha medido.

La transconductancia se representa con el símbolo  $g_m$  y se mide en  $\mu\text{S}$  (siemens) ( $\mu\text{ mhos}$ ). Algunos fabricantes la denominan también admitancia de transferencia  $V_{FS}$  (forward transfer admittance). El cálculo de  $g_m$  a partir de la característica de transferencia es:

$$g_m = \left[ \frac{\text{Incr. } I_D}{\text{Incr. } V_{GS}} \right]_{V_{DS}}$$

La transconductancia es una magnitud importante del FET y será utilizada para representar el modelo de pequeña señal de este dispositivo en su comportamiento como amplificador. Para el transistor 2N5248 (Fig. 6) para  $V_{DS}=15V$ ,  $V_{GS}=0$  el valor de  $g_m$  está comprendido entre  $3,5$  y  $6,5 \text{ m mho}$  ( $\text{m siemens}$ ).

*d) CORRIENTE DE CORTE DE PUERTA Y RESISTENCIA DE ENTRADA*

Como quiera que en un FET la unión puerta-canal está polarizada inversamente habrá una circulación de portadores minoritarios. Esta es la corriente de corte de puerta

$I_{GSS}$  (gate-source cutoff current) que también se denomina corriente inversa de puerta. Para el FET 2N 5248  $I_{GSS} = -5\text{mA}$  a  $25^\circ\text{C}$  y  $-1,5 \mu\text{A}$  a  $100^\circ\text{C}$ .

La resistencia de entrada al dispositivo  $R_{GS}$  es la resistencia de las uniones puerta-canal polarizadas inversamente y es inversamente proporcional a  $I_{GSS}$ . Valores típicos de  $R_{GS}$  para un JFET son  $10^9 \Omega$  a  $25^\circ\text{C}$  y  $10^7 \Omega$  a  $100^\circ\text{C}$ .

*e) TENSIÓN DE RUPTURA*

Generalmente los constructores suministran el valor de la tensión de ruptura de la unión puerta-fuente, que se designa  $BV_{GSS}$  o bien  $V_{(BR) GSS}$  (gate-source breakdown voltage).

Para el transistor 2N 5248 el valor anterior es de  $-30\text{V}$ . El catálogo también suministra el valor de la tensión máxima entre el drenador y la puerta que en el caso que nos ocupa es también de  $30\text{V}$ .

*f) DISIPACIÓN MÁXIMA DE POTENCIA*

Todos los dispositivos electrónicos tienen una limitación de la potencia que pueden disipar que es función de la temperatura ambiente. El valor de esta potencia  $P_D$  se especifica generalmente a  $25^\circ\text{C}$  con un factor reductor cuando el dispositivo trabaja a altas temperaturas. En el caso de FET 2N 5248 el valor de  $P_D$  a  $25^\circ$  es de  $360 \text{ mW}$ , reduciéndose linealmente hasta  $150^\circ\text{C}$  a razón de  $2,88 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ .

## DEPENDENCIA DE LOS PARÁMETROS JFET CON LA TEMPERATURA

Como se ha visto en los epígrafes anteriores, los parámetros que caracterizan al FET se reducen a  $I_{DSS}$ ,  $V_P$  e  $I_{GSS}$ , siendo este último el de menor importancia dada su pequeña magnitud, siendo despreciable su efecto en los circuitos de polarización.

Al ser la corriente del drenador una corriente de arrastre de mayoritarios, estará directamente relacionada con la movilidad de los mismos y por tanto, con su dependencia con la temperatura. La ecuación que relaciona los valores de  $I_{DSS}$  con la temperatura es de la forma

$$I_{DSS}(T) = I_{DSS}(T_0) \left( \frac{T_0}{T} \right)^n \quad (4)$$

donde  $T$  representa valores de temperatura absoluta ( $^\circ\text{K}$ ). Se observa en la expresión (4) que la corriente disminuye con el aumento de la temperatura;  $n$  es una constante que depende del tipo de portador y del material base. La variación de  $V_P$  aumenta con  $T$  de acuerdo con la expresión:

$$V_P(T) = V_P(T_0) + K_1(T - T_0) \quad (5)$$
$$K_1 \cong 2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

en el caso de la corriente de puerta  $I_{GSS}$ , al ser ésta una corriente inversa de saturación de una unión, variará exponencialmente con la temperatura de la forma:

$$I_{GSS}(T) = I_{GSS}(T_0)e^{k(T-T_0)} \quad (6)$$

La constante  $k$  en la ecuación (6) está comprendida entre 0,07 y 0,1.

Observando la ecuación (4) vemos que en un FET, la corriente disminuye con el aumento de la temperatura y por consiguiente no existirán problemas de escape térmico como sucedía con el transistor bipolar lo que se traducirá en una gran estabilidad del punto de reposo frente a las variaciones de temperatura.

### EJEMPLO DE APLICACIÓN N° 1

Para el transistor de efecto de campo JFET de canal N tipo 2N 5248 cuyas características se muestran en la fig. 6. Determinar: a) Curvas características de transferencia máxima y mínima. b) Valor de la transconductancia  $g_m$  para  $V_{GS} = -4V$ , utilizando la característica de transferencia máxima.

#### SOLUCIÓN

a) De la fig. 6 obtenemos:

$$V_P = V_{GS(off)} = 1V \text{ (mín. abs.); } 8V \text{ (máx.)}$$

$$I_{DSS} = 4 \text{ mA (mín), } 20 \text{ mA (máx.)}$$

Para dibujar la característica de transferencia mínima, deberemos sustituir los valores mínimos anteriores en la ecuación (3) resultando:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = 4 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{1} \right)^2$$

dando valores a  $V_{GS}$  se obtiene la tabla de valores n° 1. Repitiendo el proceso tomando los valores máximos de  $I_{DS}$  y  $V_P$  resulta la ecuación :

PUNTO	$V_{GS}$ (v)	$I_D$ (mA)
1	0	4
2	0,25	2,25
3	0,5	1
4	0,75	0,25
5	1	0

TABLA N° 1

PUNTO	$V_{GS}$ (v)	$I_D$ (mA)
6	0	20
7	2	11,25
8	4	5
9	6	1,25
10	8	0

TABLA N° 2

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = 20 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{8} \right)^2$$

que dando valores a  $V_{GS}$  entre 0 y 8V da lugar a la tabla n°2. En la fig. 7 se muestran estas características de transferencia.

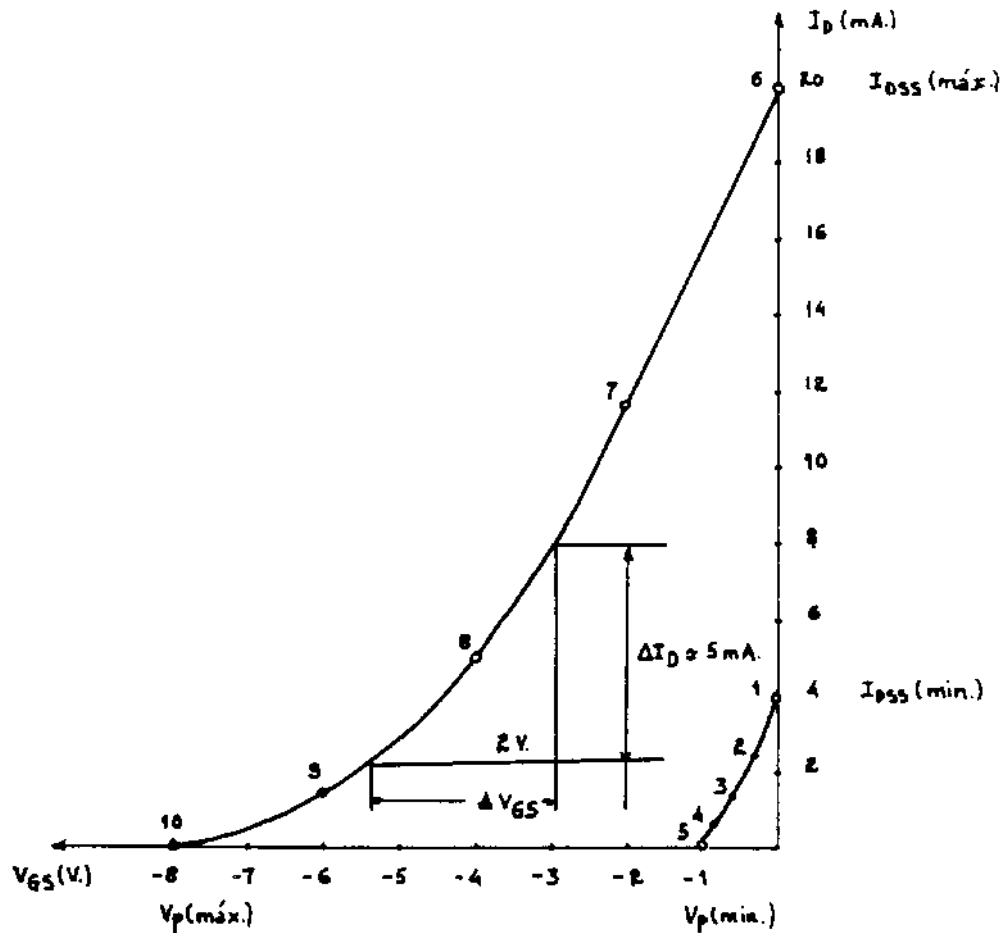


Figura 7

b) Para calcular la transconductancia  $g_m$  cuando  $V_{GS} = -4$  V, debe tenerse en cuenta que de acuerdo con (3) se cumple:

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

y teniendo en cuenta la definición de  $g_m$ :

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 + \frac{V_{GS}^2}{V_P^2} - 2 \frac{V_{GS}}{V_P} \right) = I_{DSS} + I_{DSS} \frac{V_{GS}^2}{V_P^2} - 2 I_{DSS} \frac{V_{GS}}{V_P}$$

$$g_m = -\frac{2 I_{DSS}}{V_P} - 2 \frac{I_{DSS}}{V_P^2} V_{GS}$$

$$g_m = -\frac{2 I_{DSS}}{V_P} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

y denominando  $g_{mo} = \frac{2 I_{DSS}}{|V_P|}$  resulta:

$$g_m = g_{mo} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$



En la fig. 7 se muestra una solución gráfica para determinar  $g_m$ . Para ello se ha trazado una tangente a la curva de transferencia máxima en el punto 8 correspondiente a  $V_{GS} = -4v$ . Al aplicar la definición “incremental” de  $g_m$  resulta:

$$g_m = \left[ \frac{Incr. I_D}{Incr. V_{GS}} \right]_{V_{DS}} = \frac{5mA}{2v} = 2,5 \text{ m siemens}$$

que coincide con la solución analítica demostrada anteriormente.