

TEMA 5: TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO. JFET Y MOSFET

1. INTRODUCCIÓN

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

Hay dos tipos:

- El FET de Unión o JFET (*Junction-Effect Transistor*).
- El FET de puerta aislada conocido vulgarmente como MOSFET (*Metal-oxide semi-conductor field-effect transistor*).

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

2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL FET FRENTE A LOS BJT

2.1 VENTAJAS

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

2.2 INCONVENIENTES

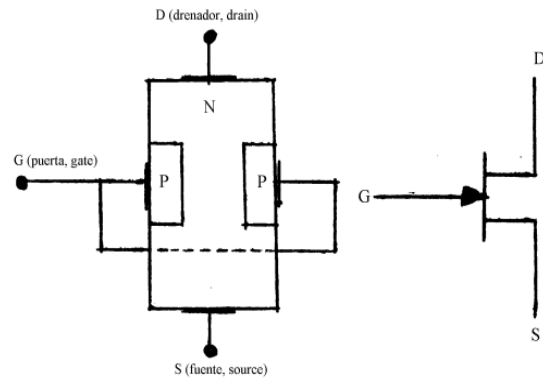
- Mala respuesta a alta frecuencia (BW pequeño).
- Utilización para pequeña potencia.

3. JFET

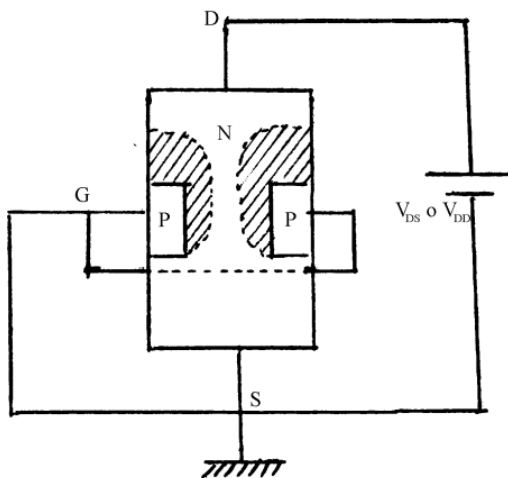
Existen dos grupos: el de canal N y canal P.

3.1 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 .

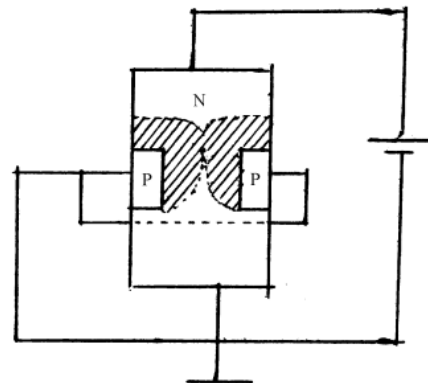


Se denomina canal a la región de material tipo N, en este caso, que queda entre las dos regiones de puerta. La dirección de la flecha en la puerta indica la dirección en la cual circularía la corriente de puerta si ésta estuviera polarizada directamente con el canal.

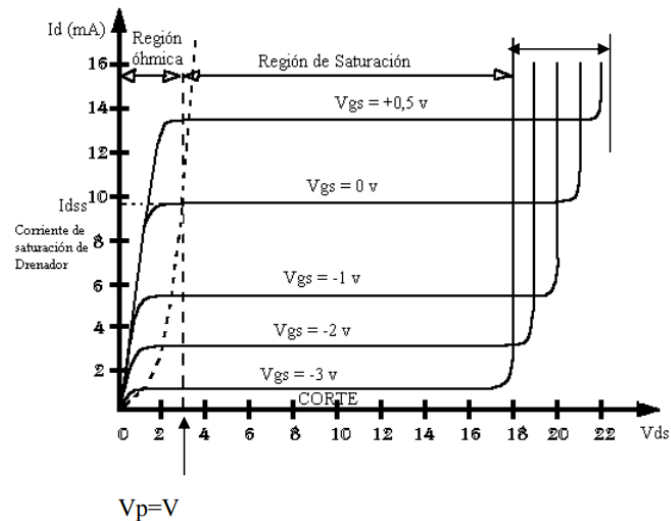


La Unión P-N, formada entre la puerta y el Drenador, queda polarizada inversamente apareciendo una zona de Transición que como está libre de portadores, hará disminuir la anchura del canal aumentando la resistencia entre D y S. Si V_{DS} ó V_{DD} aumentan, entonces I_{DS} aumenta e igualmente lo hace 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 estrangulación 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} .

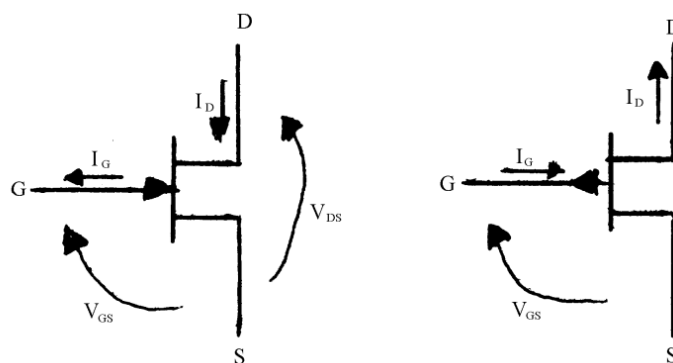


Análogamente para un valor dado de $V_{DS} > 0$ si vamos haciendo la puerta cada vez más negativa, se llegará a un valor de $V_{GS} = V_T$ denominado voltaje de cierre o estrangulamiento del canal $V_T < 0$. La gráfica de un JFET es la siguiente:



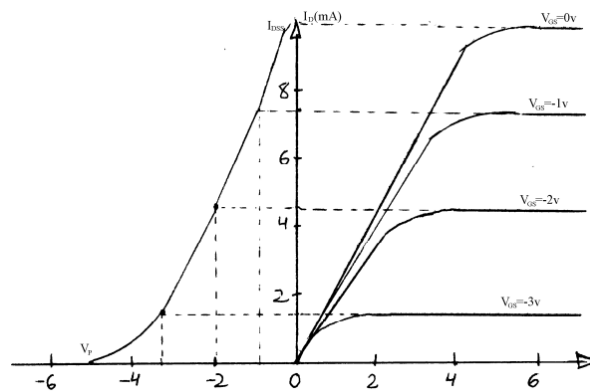
Para pequeños valores de V_{DS} , el FET actúa como una resistencia (r_{DS}), cuyo valor se controla mediante V_{GS} . I_D depende fuertemente de V_{DS} . Esta región se denomina región óhmica o lineal y en ella el FET se comporta como VCR (resistencia variable con la tensión). Es decir, la sección del canal es independiente de V_{DS} .

La única diferencia con respecto al canal P es que es inverso, es decir, donde ahora tenemos P vamos a tener N y viceversa. La diferencia en los símbolos es la siguiente, donde la de la izquierda es el canal N y la de la derecha el canal P.



La intensidad de Shokley es:

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



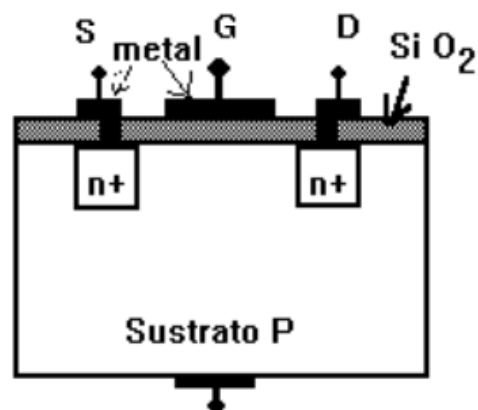
Cuando I_{DSS} y V_P se conocen, a partir de la relación de $I_D = f(V_{GS})$, podremos construir la curva de transferencia $I_D = f(V_{GS})$.

4. MOSFET

Existen dos tipos constructivos de MOSFET: De Enriquecimiento o ensanchamiento y de Agotamiento o estrechamiento (funcionamiento similar al JFET).

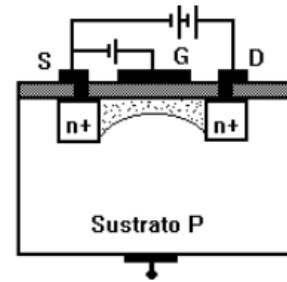
4.1 MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

Se parte de un sustrato P de alta resistividad (poco dopado) sobre el que se disponen dos zonas de material tipo N altamente dopado. Posteriormente la superficie externa se cubre con una capa de SiO_2 . A continuación, se abren unas ventanas en el SiO_2 para hacer contacto con las zonas tipo N, se deposita entonces metal sobre las ventanas, para formar los terminales, drenador y fuente y también entre la zona D y S, pero separado de estos, para formar la puerta. De este modo se obtiene una puerta aislada, del D y S, mediante la capa de dióxido de silicio. Este electrodo de puerta (metálico) conjuntamente con la capa de SiO_2 , aislante como dieléctrico y el canal semiconductor, forman un condensador de placas paralelas.

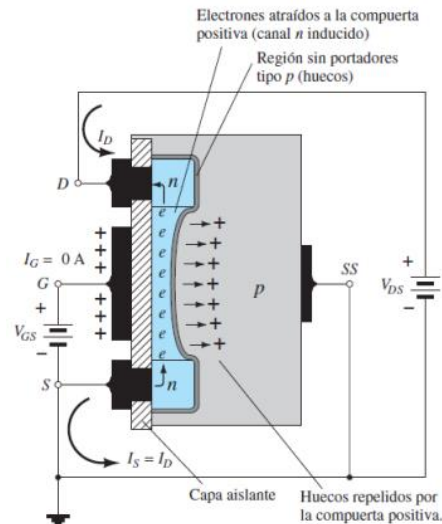


Al aplicar a esta configuración, una tensión positiva al D y negativa a la fuente, dejando la puerta aislada, se conseguirá únicamente que el sustrato tipo P, actúe como elemento resistivo permitiendo una circulación muy débil debido a la alta resistividad del sustrato. Estos portadores de carga inducidos son portadores minoritarios (electrones) dentro del sustrato P. Es decir, se produce una redistribución de carga debido a la unión Metal - Aislante (oxido) - semiconductor.

Se forma así un canal N, debajo de la puerta debido a que esta tiene potencial positivo, y que desde D a S y que hará circular una corriente de Drenador cuya magnitud depende del n° de portadores de carga inducidos por la puerta positiva \Rightarrow que el potencial de puerta controla, de este modo la corriente de Drenador (I_D).



De forma visual, el MOSFET de enriquecimiento es así:



Las características de drenador y transferencia del MOSFET de enriquecimiento es la siguiente:

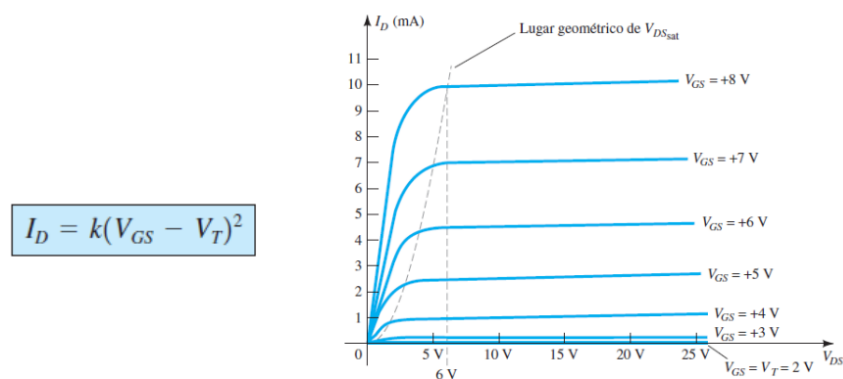
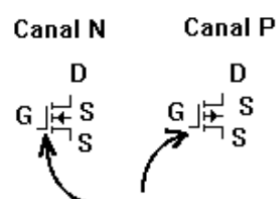


FIG. 6.38
Características de drenaje de un MOSFET tipo enriquecimiento de canal n con $V_T = 2 \text{ V}$ y $k = 0.278 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$.

Los símbolos para el MOSFET con canal N y canal P son los siguientes:



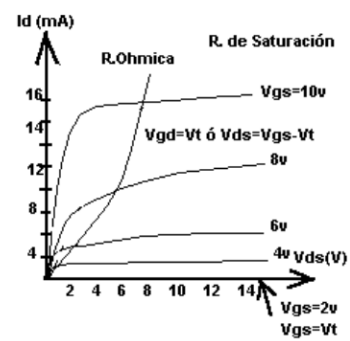
Si V_{GS} es constante, entonces la I_{DS} aumenta aumentando V_{DS} . Si I_{DS} o I_D crece linealmente con V_{DS} que estará en la región óhmica, el dispositivo se comporta como una resistencia.

La $V_{GS} > 0$ (positivo) hará que se acumulen electrones en la superficie y por debajo de la capa de dióxido. Para atraer los suficientes electrones para crear el canal, estaremos en la tensión umbral $V_{GS} = V_T$ o V_P . Es decir, no fluirá una corriente apreciable I_{DS} hasta que $V_{GS} = V_T$. La conductancia del canal depende de V_{GS} .

Considérese ahora el caso en donde V_{DS} es pequeño, e incrementará a V_{GS} por encima de V_T , entonces $V_{GS} > V_T$. Hará que el canal creado se ensanche y su resistencia decrecerá, la I_D irá aumentando y estará en la región dinámica.

Consideramos ahora que ocurrirá si se mantiene a $V_{GS} = \text{cte.}$ a $V_{GS} = V_T + V$, donde V es un voltaje positivo y se incrementa V_{DS} , entonces, el canal se mantendrá con un ancho cte. en el extremo de la fuente, ya que V_{GS} es cte. Sin embargo, ya que aumenta V_{DS} entonces V_{DG} aumenta ó en forma equivalente V_{GD} disminuye y esto hará que el canal se vuelva más estrecho en el extremo de Drenaje.

La V_{DS} hace que esta unión D(N)- Sustr(P) se polariza inversamente por lo que la Z.T. de esta unión, debilita el canal en las proximidades de la zona N de drenador y llega un momento en que se produce el estrangulamiento del canal, es decir la conductancia del canal disminuye e I_D crece, pero más lentamente, es decir, nos acercamos a la zona de saturación. Esta condición de estricción o estrangulación o de saturación se alcanzará cuando $V_{GD} \leq V_T$.



En la región saturada la $I_D = \text{cte.}$ para un valor dado de V_{GS} :

$$I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2$$

Donde $V_{GD} \geq V_T$ y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$. Cuando $V_{GS} = 0$, entonces $I_D \approx 0$; y para que el dispositivo conduzca V_{GS} , tiene que exceder al voltaje de umbral V_T .

La estricción ó estrangulamiento ocurre cuando: $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ que sustituyendo en la ecuación anterior da como resultado la ecuación de la línea de la frontera:

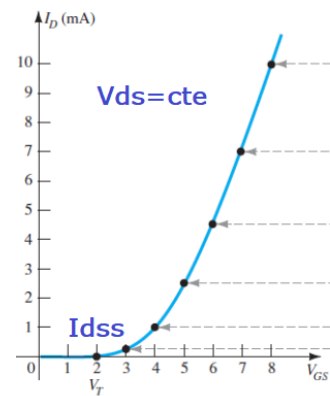
$$I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{DS})^2$$

Para la terminología moderna de MOS al voltaje umbral V_T , que es un número positivo para los dispositivos del canal N, es de 1 ó 3 voltios.

4.1.1 Característica de transferencia

Tal característica estará trazada evidentemente como puede deducirse de la característica de salida a una $V_{DS} = \text{cte.}$; se observa la tensión umbral V_T por debajo de la cual, la corriente es prácticamente nula.

Sobre esta tensión umbral, vemos de las características del MOSFET, que V_{DS} no tiene prácticamente ninguna influencia. Una vez separada la tensión umbral I_D crece lentamente al principio y después con mayor rapidez. El valor de la corriente para V_T es muy pequeño como hemos dicho y se llama I_{DSS} .

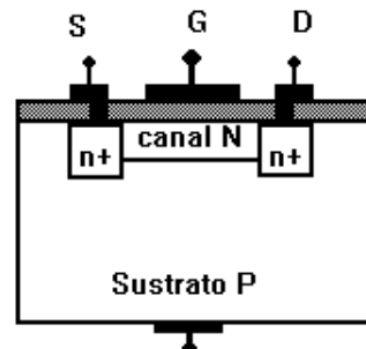


El MOSFET que hemos estudiado es de canal N y se llama también NMOS. También existen de canal P, y se llaman PMOS son idénticos al N, pero intercambiando las zonas N y de sustrato P.

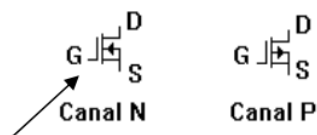
4.2 MOSFET DE EMPOBRECIMIENTO

Su construcción es similar, a la del tipo de enriquecimiento, pero ahora se introduce un canal tipo N, ligeramente dopado, entre dos zonas fuertemente dopadas que forman el drenador y la fuente.

Mientras el JFET, se controla por la unión P-N de puerta a canal, tal unión no existe en el MOSFET, la capa de dióxido actúa como un aislador, que ocasiona que la corriente de puerta sea despreciable. Este hecho le da al transistor MOS su resistencia de entrada extremadamente alta bajo cualquier condición.



Los símbolos son:



Este espacio constituye la capa de dióxido de aislante. Con el JFET, el terminal de puerta se dibuja más cerca de la fuente que del drenaje y la flecha sobre el sustrato apunta en sentido directo de la unión P-N (indica el tipo ó polaridad del dispositivo, N o P). Ya que el voltaje de drenaje será positivo, respecto de la fuente, la unión sustrato a canal, tendrá siempre polarización inversa, y la corriente de sustrato será casi cero, en adelante se ignorará el papel del sustrato en la descripción de la operación del MOSFET. El símbolo simplificado del MOSFET de canal N:



La polaridad del dispositivo se indica mediante la dirección de la punta de flecha sobre la línea de fuente, esta flecha apunta en la dirección normal del flujo de la corriente en la conexión de la fuente.

4.2.1 Comparación entre PMOS y NMOS

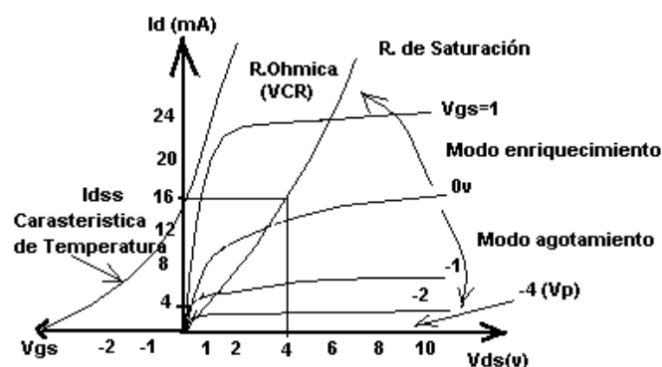
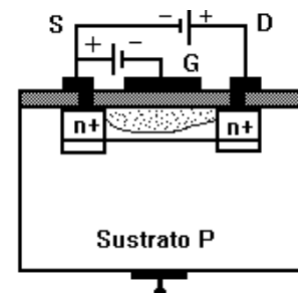
Cronológicamente se emplearon los transistores de canal P, por ser de fabricación más fácil, tener mejor rendimiento y ser más fiable que los de canal N. Hoy, las mejoras en la fabricación han hecho imponerse a los NMOS y salvo CMOS, los dispositivos PMOS han quedado obsoletos por la movilidad de los huecos en el silicio con campos eléctricos, normales, es menor que la de los electrones $1.300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{seg}$, en dispositivos de iguales dimensiones, por lo que la corriente en un transistor PMOS es menor de la mitad de un NMOS, y la resistencia ON de un MOSFET de canal P es casi tres veces la de un N. La superficie de los PMOS es al menos tres veces mayor que la de los NMOS.

4.2.2 Funcionamiento

Este MOSFET de agotamiento opera como el JFET con la diferencia fundamental de que en el JFET el canal se agota por la unión de puerta a canal, de polarización inversa, y en el MOSFET en ancho del canal se efectúa mediante un campo eléctrico, creado por el voltaje en la puerta.

Cuando el D se hace positivo respecto de S, fluirá una corriente de D (I_D), aunque la puerta se encuentre a potencial cero. Con $V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS}$ entre D y S. Si la G se hace negativa respecto al sustrato se inducirán portadores de carga positivos en el canal tipo N, que absorberán portadores negativos, haciendo aumentar la resistencia del canal. La corriente de drenador se reduce y el efecto que se produce es similar al JFET de canal N.

Si aplicamos a la puerta un potencial positivo, en el canal N, se inducirán portadores de carga adicionales tipo N, lo que provocará una reducción de la resistencia del canal y un posterior aumento de la corriente de Drenador, es decir, el MOSFET de agotamiento puede funcionar también en modo de enriquecimiento.



Se encuentra en la región óhmica si:

- Si V_{DS} es pequeño, mientras que V_{GS} es negativo o positivo.
- Si V_{GS} negativo, se atraerán n^+ o se repelerán e^- , se crea la región de agotamiento por debajo de la capa de óxido, canal más estrecho y el canal tiene un ancho uniforme ya que $V_{GS} \approx V_{GD} \Rightarrow$ el canal más estrecho $\Rightarrow \uparrow R_{DS}$.

Cuando V_{GS} se hace más negativa, se alcanzará en que el canal queda completamente agotado de portadores de carga, el valor de V_{GS} en que esto ocurre se llama voltaje de estricción ó estrangulamiento V_P .

$$V_P = V_{GS} \mid I_D = 0, V_{DS} = \text{pequeño}$$

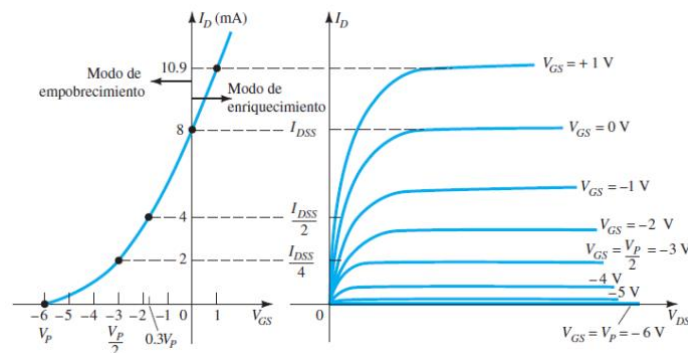
Obviamente, para un dispositivo de canal N, V_P es un número negativo. A diferencia con el JFET, V_{GS} se puede hacer positivo, el canal se vuelve más ancho y su resistencia disminuye.

Si ahora $\uparrow V_{DS}$ y $V_{GS} = \text{cte.}$, la región de agotamiento tendrá un ancho cte. en el extremo de la fuente, pero se hará progresivamente más ancha cuando se mueva hacia el Drenaje, de esta manera el canal tendrá una forma piramidal, y su ancho será el más estrecho en el extremo del Drenaje dando lugar a una curva $I_D - V_{DS}$, no lineal.

Finalmente, si V_{DS} se incrementa al valor en el que $V_{GD} = V_P$, el canal quedará estrangulado en el extremo del Drenaje.

Cualquier incremento adicional en V_{DS} no altera la forma del canal, y por lo tanto la corriente en él se mantiene cte. en el valor alcanzado por $V_{GD} = V_P$.

Su curva de transferencia sería la siguiente:



Viendo las curvas características, en saturación ó estricción, el dispositivo actúa como una fuente Ideal de corriente cte.

Los MOSFET reales, sin embargo, tiene una resistencia finita, de salida, con el resultado que las curvas tienen en saturación, tienen una pendientes finitas distintas de cero. Más aún la resistencia de salida, descenderá según aumenta el nivel de corriente en el dispositivo.

De forma visual, el MOSFET de empobrecimiento es así:

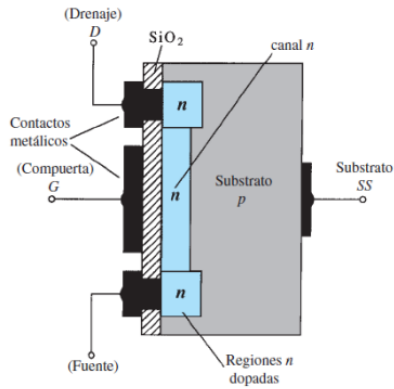
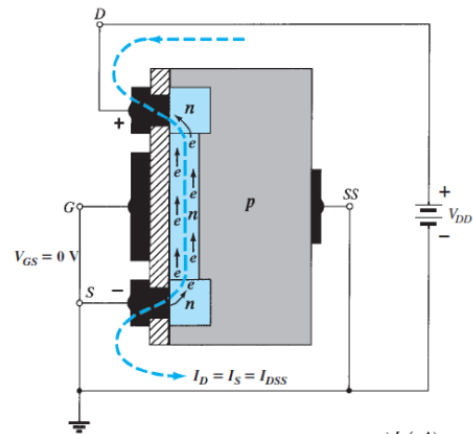


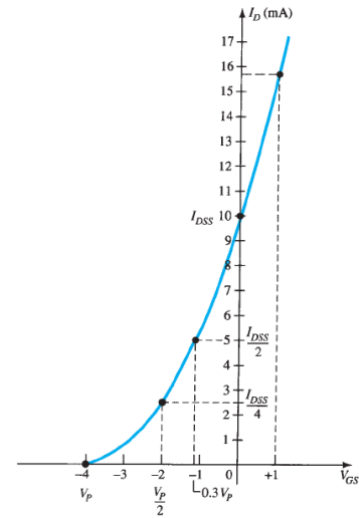
FIG. 6.27
MOSFET tipo empobrecimiento de canal n.



La corriente de drenador se calcula mediante las ecuaciones de Shockley (como con el JFET):

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

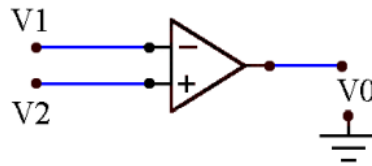
El MOSFET de canal P es exactamente el inverso del anterior. Sustrato N y un canal tipo P. Todas las polaridades y corrientes están invertidas.



TEMA 6: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

1. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Se representa por el símbolo de la figura:



La patilla (-) es la entrada inversora, y la (+) es la entrada no inversora. La salida es asimétrica, es decir, referida a masa. Normalmente se encuentra alimentado por dos fuentes de alimentación $\pm V_{cc}$, que no se representan.

El AO ideal tiene las siguientes características:

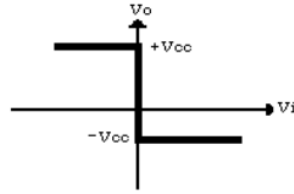
- Ganancia de tensión infinita:

$$A = -\frac{V_o}{V_i} = \infty$$

Donde $V_i = V^- - V^+$

- Impedancia de entrada R_i infinita.
- Impedancia de salida R_o nula.
- Ancho de banda infinito.
- Margen dinámico $\pm V_{cc}$
- Tiempo de conmutación nulo.
- Ruido nulo.
- Equilibrio perfecto $\rightarrow V_o=0$ cuando $V_1=V_2$
- Ausencia de desviación de las características con la temperatura.

Su función de transferencia es:



donde se pone de manifiesto que:

- Si $V_i \neq 0$, al ser la ganancia infinita, la señal de salida tendría que ser infinita, pero queda limitada a la tensión de las fuentes de alimentación $\pm V_{cc}$. Además, el amplificador estará saturado.
- Si $V_i > 0$, la patilla inversora hace que la salida sea negativa y viceversa.
- Solamente en el caso en el que $V_i = 0$, la salida queda indeterminada, $V_o = -A_V V_i = \infty \cdot 0$ pudiendo tener cualquier valor comprendido entre $\pm V_{cc}$, y que quedará determinado por el circuito exterior. La ganancia es infinita, y el operacional se comporta como amplificador. Esta zona de la gráfica se denomina ZONA LINEAL.

1.1 ZONA DE FUNCIONAMIENTO DE UN AO

Un amplificador operacional puede estar funcionando de tres formas diferentes dentro de un circuito electrónico:

- Sin realimentación.
- Con realimentación positiva.
- Con realimentación negativa.

Un circuito se dice que está realimentado cuando la salida del mismo está conectada, directa o indirectamente, a la entrada de ese circuito.

1.1.1 Sin realimentación

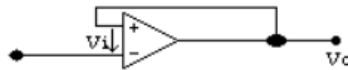
El comportamiento del circuito está definido por su función de transferencia $V_o = f(V_i)$.

En ella la ganancia viene determinada por el propio fabricante y sobre ella no se tiene ningún control. Esta configuración se utiliza para circuitos comparadores.

1.1.2 Con realimentación positiva

La salida del amplificador está conectada a la entrada no inversora del operacional.

Un ejemplo sería:

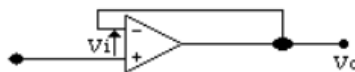


Supongamos que en un instante determinado el circuito está trabajando en zona lineal. En esas condiciones $V_i = 0$ y la tensión de salida es igual a la de entrada. Pero si por cualquier ruido se incrementa la tensión en la entrada inversora, entonces v_i aumenta y según la función de transferencia, la salida se dirige hacia una tensión $-V_{cc}$, con lo que V^+ se hace más negativa y v_i aumenta más, hasta que al final el amplificador ha llegado a la zona de saturación negativa.

El circuito se encuentra en un equilibrio inestable, ya que, ante cualquier variación en las condiciones del mismo, éste se iría a una de las zonas de saturación.

1.1.3 Con realimentación negativa

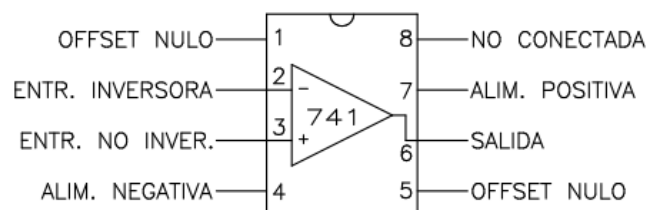
La señal de salida está conectada, directa o indirectamente, a la entrada inversora. Un ejemplo sería:



Si en un principio el amplificador está funcionando en la zona lineal, entonces $V_i = 0$ y $V^+ = V^-$. Si cualquier variación hace que aumente la tensión en la entrada no inversora V^+ , entonces la tensión de salida y con ella V_i , crecen por lo que tiende a desplazarse hacia el nivel de saturación $+V_{cc}$, pero como $V_o = V^-$, entonces V^- también aumenta y en definitiva v_i decrece, oponiéndose al incremento anterior y obligando al amplificador a volver a su zona inicial de funcionamiento. Además, hay que aplicar el teorema de la TTV (tierra virtual).

Por eso el amplificador se mantiene siempre en su zona lineal y en estas condiciones se cumple que: $V^+ = V^-$.

Si el A.O. está realimentado negativamente, entonces $V^+ = V^-$ y se puede analizar el circuito considerando las otras propiedades del integrado: corrientes nulas por las entradas, impedancia de salida nula, etc...



2. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

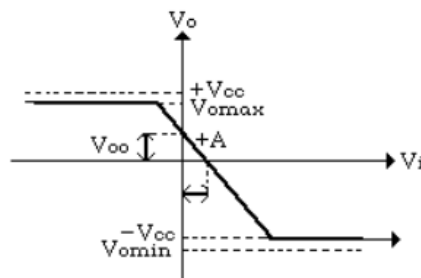
Las diferencias con respecto al ideal son:

- Para una tensión de entrada nula, la tensión de salida ya no lo es, por lo que aparece la tensión de entrada de offset, cuyos valores típicos están entre 0,1 mv y 30 mv.
- La ganancia en lazo abierto ya no es infinita, sino de un valor finito A, que suele ser del orden de 10^6 .

$$-A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

Luego, $V_o = -A_V V_i$ y $V_i \neq 0$.

- La excursión máxima de la señal de salida ya no es $\pm V_{cc}$, sino algo inferior, debido a que la tensión de saturación de los transistores de salida en la práctica no es nula.
- La impedancia de entrada en los amplificadores operacionales reales tampoco es infinita. Los valores típicos oscilan entre 100 K Ω y 10⁶ M Ω .
- La resistencia de salida, que en el amplificador ideal era nula, adquiere valores comprendidos entre 6 Ω y 100 Ω .



2.1 TENSIONES DE OFFSET

Se denomina “offset” a los pequeños desequilibrios o faltas de simetría en el A.O. El A.O. tiene la salida asimétrica y las tensiones de offset se definen:

- **Tensiones de offset de entrada:** Es la tensión V_{IO} que debe aplicarse a los terminales de entrada del AO para equilibrar el amplificador, es decir, hacer su salida nula $V_o = 0$.
- **Tensión de offset de salida:** Es la tensión de salida del A.O. cuando los terminales de entrada están conectados a tierra (V_{oo}).
- **Corriente de offset de entrada:** Es la corriente I_{io} diferencia entre las corrientes separadas que entran en los terminales de entrada del A.O. cuando está equilibrado $V_o = 0$, $I_{io} = I_{B1} - I_{B2}$.

2.2 CORRIENTES DE POLARIZACIÓN

Se define la “corriente de polarización de entrada” como la semisuma de las corrientes separadas que fluyen por los terminales de entrada en un amplificador equilibrado (con $V_o=0$ V). La corriente de polarización es:

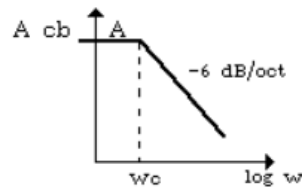
$$I_B = \frac{(I_{B1} + I_{B2})}{2}$$

2.3 RESPUESTA EN FRECUENCIA. ANCHO DE BANDA

Respecto al ancho de banda, en los amplificadores operacionales ideales se ha supuesto infinito. en la realidad, aparece una frecuencia de corte superior. Debido a estar construido con varias etapas, la respuestas en alta frecuencia puede tener caídas de 18 dB/oct o superiores. Este hecho significa tener tres o más polos en la función de transferencia y por lo tanto, pueden aparecer inestabilidades cuando se le realimenta.

Para evitar las inestabilidades, aún en el caso del 100% de realimentación cuando se usa como seguidor, se incluyen en los circuitos redes de compensación por polo dominante, con la consiguiente pérdida de ancho de banda.

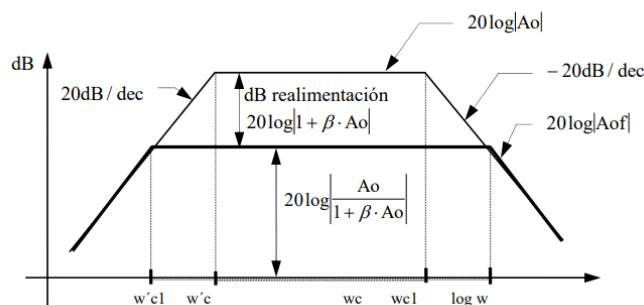
En un A.O. compensado por polo dominante, el módulo de la ganancia en lazo abierto tiene la siguiente representación.



En donde A es la ganancia en frecuencias medias, w_c es la pulsación de corte en lazo abierto o el polo de la función de transferencia.

2.4 EFEECTO DE LA REALIMENTACIÓN SOBRE EL ANCHO DE BANDA

Al final el efecto conjunto de la realimentación sobre el ancho de banda se muestra en la siguiente figura:



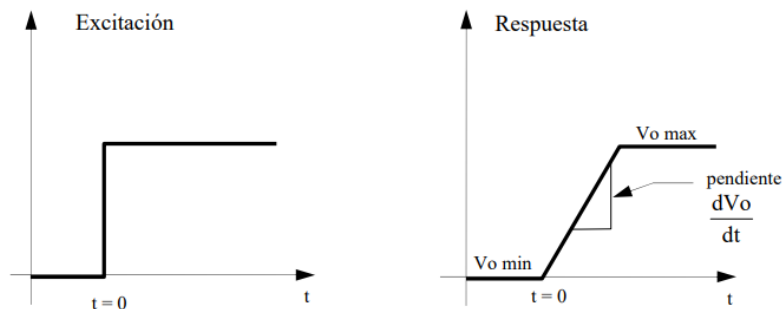
Se mantiene constante el producto ganancia frecuencia de corte:

$$A_{of} \cdot \omega_{c1} = A_o \cdot \omega_c$$

Se observa que $A_{of} < A_o$ y $\omega_{c1} > \omega_c$, luego la ganancia cae y la frecuencia de corte aumenta elevando el ancho de banda.

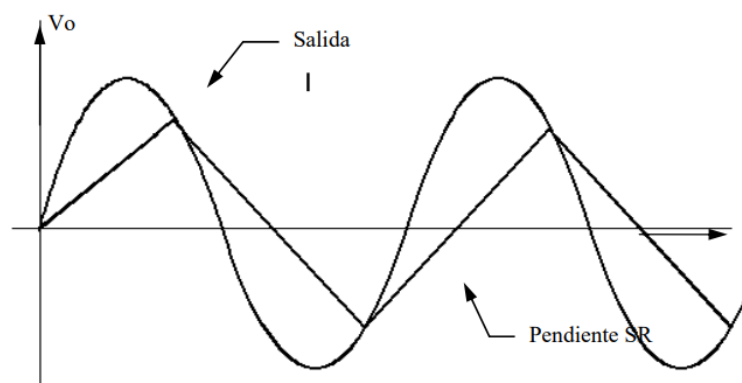
2.5 RESPUESTA A GRANDES SEÑALES

Si se excita un A.O. con una señal rápida capaz de saturar el amplificador, como puede ser un escalón de gran amplitud, la salida no responde inmediatamente como aparece en la siguiente figura:



La señal de salida crece a una velocidad dV_o / dt determinada por las capacidades y corrientes internas, así como por la amplitud del escalón aplicado. Cuando esta amplitud es óptima se obtiene la relación de velocidad máxima (Slew rate) que constituye una especificación importante (velocidad de subida) medida en voltios/microsegundos.

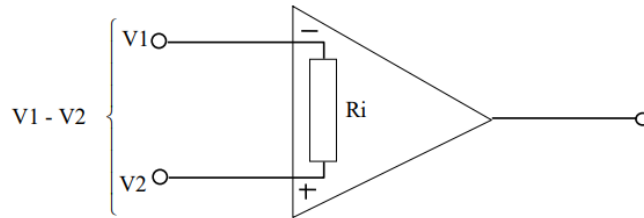
El Slew rate nos indica la relación entre la frecuencia y la amplitud de una señal que puede ser amplificada por el A.O. Para grandes señales debe limitarse la frecuencia máxima y viceversa. Para frecuencias mayores que la máx, la salida aparecerá distorsionada.



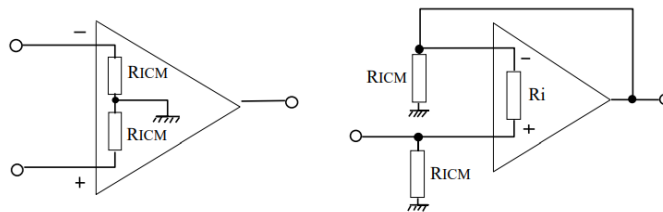
Por tanto, el ancho de banda para gran señal no viene dado por la frecuencia de ganancia unidad sino por la frecuencia máxima calculada anteriormente con el S_R (slew rate).

2.8 IMPEDANCIA DE ENTRADA

- **Impedancia de entrada diferencial:** Es la que aparece entre los terminales + y - del A.O. Para el caso ideal es ∞ y para el caso real varía según el tipo de amplificador diferencial de entrada que tenga el A.O. Suele ser del orden o superior a $10^5 \Omega$.



- **Impedancia de entrada en modo común (CMRR):** Está asociada a las señales de entrada al A.O. que se encuentran entre una entrada y tierra. El orden de magnitud de R_{ICM} es considerablemente mayor que el de la impedancia de entrada diferencial R_i , para los A.O.



En un A.O. ideal la salida es proporcional a la diferencia entre las entradas (amplificador diferencial) $V_o = A_d (V_1 - V_2)$ siendo A_d la ganancia en modo diferencial: $V_o = 0$ si $V_1 = V_2$

En el A.O. real esto no se cumple y $V_o \neq 0$ si $V_1 = V_2$, se define el factor de rechazo del modo común como:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{\text{ganancia en modo diferencial}}{\text{ganancia en modo común}} \text{ dB}$$

2.9 EFFECTOS EN CIRCUITOS LINEALES CON A.O

- Efectos de las corrientes de polarización.
- Efectos de la tensión de offset.
- Ganancia en lazo abierto finita (A_{vo}).
- Impedancia de entrada infinita.
- Impedancia de salida no nula.