

**Tema 7**

***TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO***

- 1.- Introducción.
- 2.- Transistores de unión de efecto de campo (JFET)
  - 2.1.- Estructura básica.
  - 2.2.- Símbolos.
  - 2.3.- Principio de funcionamiento.
    - 2.3.1.- Influencia de  $V_{DS}$ .
    - 2.3.2.- Influencia de  $V_{GS}$ .
  - 2.4.- Curvas características.
  - 2.5.- Zonas de trabajo.
- 3.- Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET).
  - 3.1.- MOSFET de Acumulación.
    - 3.1.1.- Estructura básica.
    - 3.1.2.- Símbolos.
    - 3.1.3.- Principio de funcionamiento.
      - 3.1.3.1.- Influencia de  $V_{GS}$ .
      - 3.1.3.2.- Influencia de  $V_{DS}$ .
    - 3.1.4.- Curvas características.
    - 3.1.5.- Zonas de trabajo.
  - 3.2.- MOSFET de Deplexión.
    - 3.2.1.- Estructura básica.
    - 3.2.2.- Símbolos.
    - 3.2.3.- Principio de funcionamiento.
    - 3.2.4.- Curvas características.

## 1. - INTRODUCCIÓN.

En este capítulo vamos a abordar el estudio de un dispositivo de tres terminales cuyo rango de aplicabilidad coincide en muchos casos, con el del transistor BJT visto con anterioridad.

A los transistores de efecto de campo se les conoce abreviadamente como **FET** (Field Effect Transistor) y entre ellos podemos distinguir dos grandes tipos:

- Transistor de Efecto de Campo de Unión:  
**JFET** (Junction Field Effect Transistor)
- Transistor de Efecto de Campo Metal - Óxido - Semiconductor:  
**MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

Vamos a comenzar el estudio de este tipo de transistores viendo algunas de las principales analogías y diferencias existentes entre los transistores FET y los BJT.

En primer lugar, la principal diferencia entre ambos radica en el hecho de que el transistor *BJT* es un dispositivo controlado por corriente, mientras que los transistores *FET* son dispositivos controlados por tensión. En ambos casos, la corriente del circuito de salida es controlada por un parámetro del circuito de entrada, en un caso el nivel de corriente y en el otro el nivel de tensión aplicada.

En los transistores FET se crea un campo eléctrico que controla la anchura del camino de conducción del circuito de salida sin que exista contacto directo entre la magnitud controlada (corriente) y la magnitud controladora (tensión).

De forma análoga a como en los transistores bipolares existen dos tipos *npn* y *pnp*, en los transistores de efecto de campo se habla de transistores FETs de *canal n* y de *canal p*.

Una diferencia importante entre ambos tipos de transistores consiste en que mientras que los transistores BJT son *bipolares*, es decir, en la corriente intervienen los dos tipos de portadores (electrones y huecos), los transistores FET son *unipolares*, en los que el nivel de conducción dependerá únicamente de un único tipo de portadores: de los electrones en los de canal n y de los huecos en los de canal p.

Una de las características más importantes de los FETs es su alta impedancia de entrada con niveles que pueden variar desde uno hasta varios cientos de megaohmios, muy

superiores a la que presentan los transistores bipolares que presentan impedancias de entrada del orden de unos pocos kiloohmios. Esto proporciona a los FET una posición de ventaja a la hora de ser utilizados en circuitos amplificadores.

Sin embargo, el transistor BJT presenta mayor sensibilidad a los cambios en la señal aplicada, es decir, la variación de la corriente de salida es mayor en los BJT que en los FET para la misma variación de la tensión aplicada. Por ello, típicamente, las ganancias de tensión en alterna que presentan los amplificadores con BJT son mucho mayores que las correspondientes a los FET.

En general los FET son más estables con la temperatura y, normalmente, más pequeños en construcción que los BJT, lo que les hace particularmente útiles en circuitos integrados (sobre todo los MOSFET).

Una característica importante de los FET es que se pueden comportar como si se tratasen de resistencias o condensadores, lo que posibilita la realización de circuitos utilizando única y exclusivamente transistores FET.

## **2.- TRANSISTORES DE UNIÓN DE EFECTO DE CAMPO. (JFET)**

Vamos a comenzar el estudio de los transistores de efecto de campo con los JFET (*Junction Field Effect Transistor*).

### **2.1.- Estructura Básica.**

Los JFET los podemos clasificar en dos grandes grupos:

- JFET de canal n
- JFET de canal p

En la *Figura 7.1.* se ha representado la construcción básica de un JEFT de canal n. Podemos observar como la mayor parte de la estructura es de material tipo n ligeramente dopado formando un canal con contactos óhmicos en ambos extremos (terminales de *Drenador* y *Fuente*). Este canal se encuentra inserto entre dos regiones de compuerta tipo  $p^+$  (material tipo p fuertemente dopado) con sendos contactos óhmicos que constituyen los terminales de puerta. En algunos casos los dos terminales de puerta están accesibles (JFET de doble puerta) aunque lo más habitual es que ambos terminales estén cortocircuitados teniendo un único terminal de puerta (dispositivo de tres terminales).

En ausencia de potencial aplicado, las dos uniones  $p-n$  que aparecen están sin polarizar. El resultado es una región de vaciamiento o zona de deplexión (región carente de portadores libres) de forma similar a la que se vio en su día al analizar en el diodo la unión  $p-n$  en ausencia de polarización.

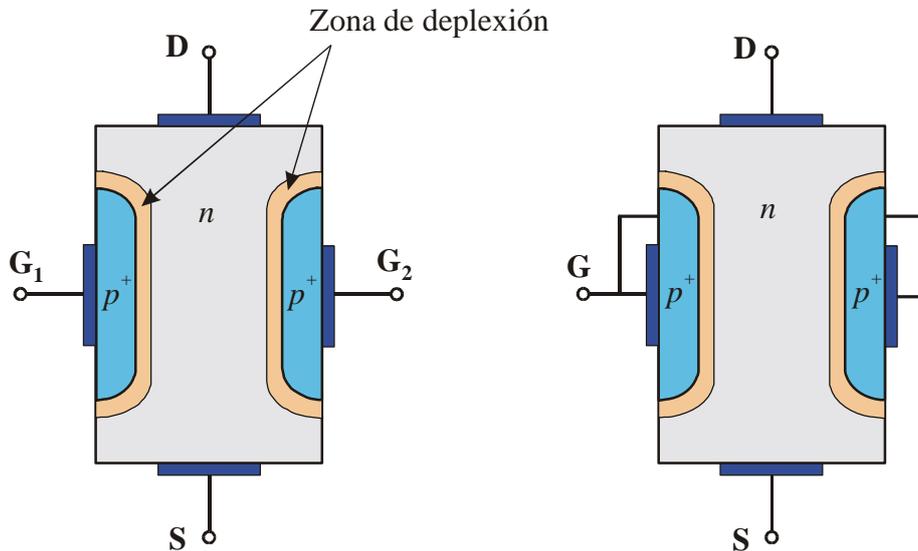


Figura 7.1.- Estructura básica del JFET de canal n.

**D = Drenador:** (Del inglés **Drain**). Es el terminal por el que salen los portadores del dispositivo (los electrones en el JFET de canal n y los huecos en el de canal p)

**S = Fuente:** (Del inglés **Source**). Es el terminal por el que entran los portadores.

**G = Puerta:** (Del inglés **Gate**). Es el terminal mediante el que se controla la corriente de portadores a través del canal.

## 2.2.- Símbolos.

Como ya se ha comentado con anterioridad se trata, en cualquier caso, de dispositivos con tres terminales cuyos símbolos aparecen representados en la Figura 7.2.

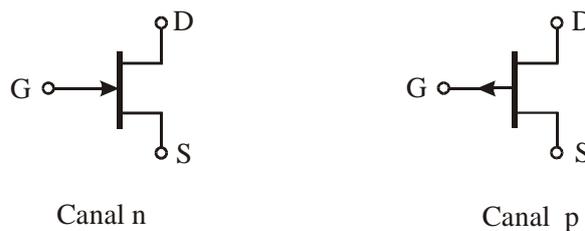


Figura 7.2.- Símbolos del JFET

Como podemos observar, la diferencia en el símbolo entre ambos tipos reside en el sentido de la flecha del terminal de puerta (G). En el JFET de canal n el terminal de puerta se representa con una flecha entrante al dispositivo, mientras que en el de canal p es saliente. Recordar que el sentido de la flecha indica el sentido de circulación de la corriente si la unión pn correspondiente estuviera polarizada en directa.

Para el funcionamiento más habitual, los transistores de canal n se polarizan aplicando una tensión positiva entre drenador y fuente ( $V_{DS}$ ) y una tensión negativa entre puerta y fuente ( $V_{GS}$ ). De esta forma, la corriente circulará en el sentido de drenador a fuente. En el caso del JFET de canal p la tensión  $V_{DS}$  a aplicar debe ser negativa y la tensión  $V_{GS}$  positiva, de esta forma la corriente fluirá en el sentido de la fuente hacia el drenador.

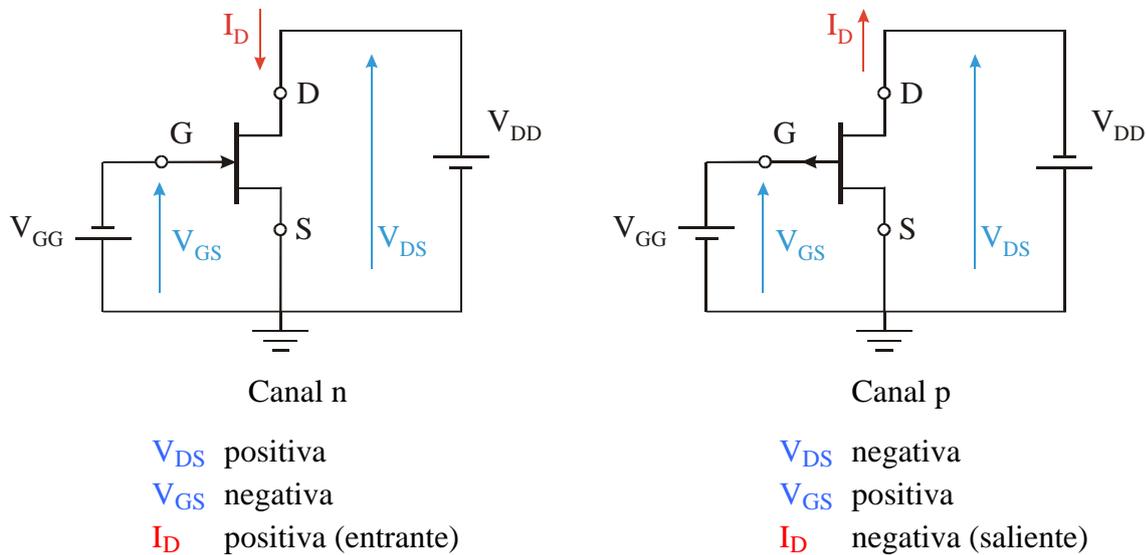


Figura 7.3.- Polarización del JFET.

A partir de ahora, y al hablar del JFET, vamos a centrarnos en el estudio del JFET de canal n, para el caso del JFET de canal p el estudio sería completamente análogo sin más que hacer los cambios que aparecen representados en la *Figura 7.3*.

Para explicar el funcionamiento, de forma cualitativa, del transistor JFET vamos a aplicarle las tensiones  $V_{GS}$  y  $V_{DS}$  tal y como se han indicado anteriormente (*Figura 7.2*.) y recordando que nos estamos centrando en los JFET de canal n.

### 2.3.- Principio de Funcionamiento.

#### 2.3.1.- Influencia de $V_{DS}$ .

En primer lugar vamos a estudiar el efecto que sobre el dispositivo tiene la variación de la tensión  $V_{DS}$  aplicada entre los extremos del canal. Para ello vamos a suponer que inicialmente la tensión  $V_{GS} = 0$  y vamos a ir aumentando el valor de  $V_{DS}$  desde 0.

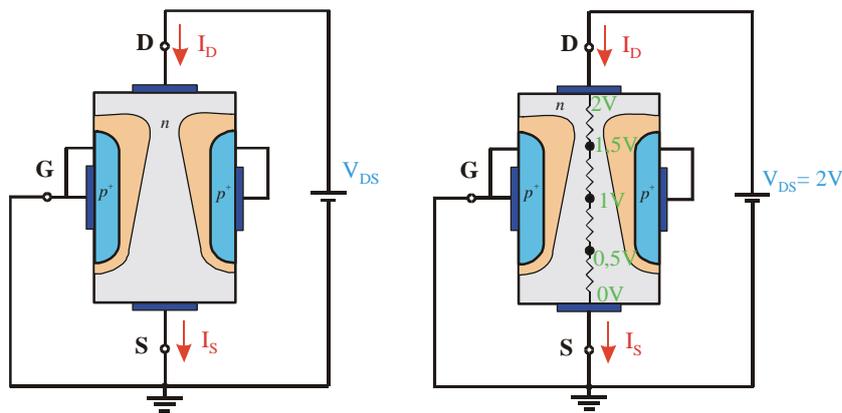


Figura 7.4.- Efecto de la tensión  $V_{DS}$ . El canal se estrecha de la zona del drenador.

Al establecer una tensión  $V_{GS} = 0$  los terminales de *fuentes* y *puerta* están al mismo potencial, por tanto la zona de depleción del lado de la *fuentes* será semejante a la que teníamos en condiciones de no polarización. En el instante en que apliquemos una tensión  $V_{DS}$ , los electrones se verán atraídos hacia el lado del *drenador*, estableciéndose una corriente  $I_D$  en el sentido mostrado en la Figura 7.4. Bajo estas condiciones las corrientes  $I_D$  e  $I_S$  serán iguales y se verán únicamente limitadas por la resistencia eléctrica que presenta el canal entre el drenador y la fuente. Es importante notar que ambas uniones  $p-n$  se encuentran polarizadas en inversa, con lo cual la corriente a su través será prácticamente nula.

Cuando aplicamos una tensión  $V_{DS}$  (por ejemplo 2 V en la Figura 7.4.) esta se distribuirá a lo largo del canal, distribución, que en un principio y para tensiones pequeñas, podemos suponer uniforme. De esta forma, si nos fijamos en la polarización inversa de las uniones  $p-n$ , podemos observar como éstas están más inversamente polarizadas de la zona del *drenador* que de la zona de la *fuentes*. Si recordamos que la anchura de la zona de carga de espacio en una unión  $p-n$  polarizada en inversa es tanto mayor cuanto mayor sea dicha polarización inversa, tendremos que la anchura de estas zonas depleción son tanto mayores

cuanto más cerca del *drenador* nos encontremos, o lo que es lo mismo, la anchura efectiva del canal será menor en la parte del *drenador* que en la parte de la *fuente*.

Para valores pequeños de la tensión  $V_{DS}$  aplicada, el estrechamiento del canal no será importante, por lo que el dispositivo se comporta, en esencia, como una resistencia de forma que la relación entre la tensión aplicada y la corriente que circula por el dispositivo será lineal tal y como establece la Ley de Ohm. Sin embargo, a medida que aumentamos la tensión aplicada, el estrechamiento del canal se va haciendo más importante, lo que lleva consigo un aumento de la resistencia y por tanto un menor incremento en la corriente ante un mismo incremento de la tensión aplicada.

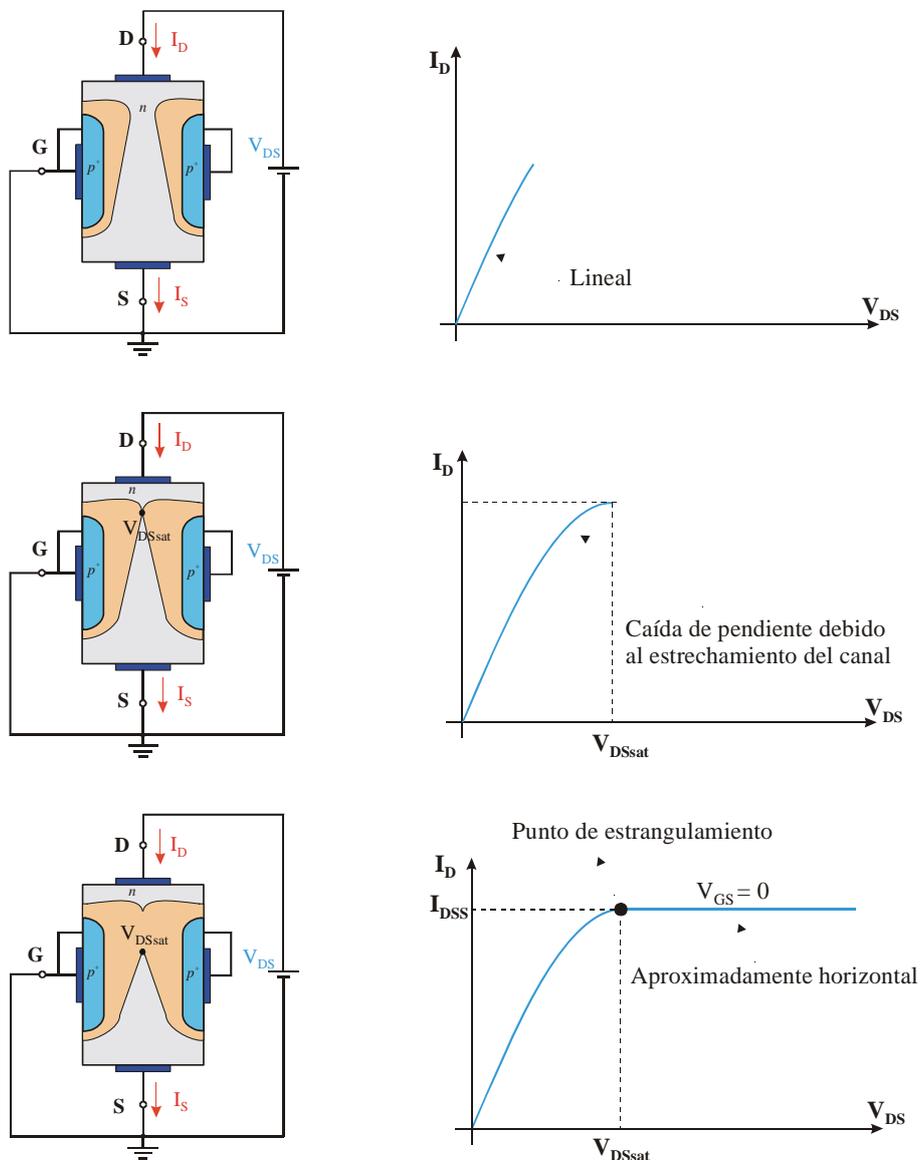


Figura 7.5.- Característica  $I_D - V_{DS}$  con  $V_{GS} = 0$ .

Si continuamos aumentando la tensión  $V_{DS}$ , el canal se estrecha cada vez más, especialmente cerca de la zona del *drenador*, hasta que ambas zonas de depleción se tocan. La tensión  $V_{DS}$  para la cual se produce el estrangulamiento del canal se denomina  $V_{DSsat}$ . Para tensiones  $V_{DS}$  aplicadas superiores a este valor, la pendiente de la curva ( $I_D - V_{DS}$ ) se satura, haciéndose aproximadamente cero, manteniéndose la corriente  $I_D$  prácticamente constante a un valor denominado  $I_{DSS}$  (Corriente drenador - fuente de saturación) que es la máxima corriente que podemos tener para un determinado JFET (característico para cada JFET).

En un principio, podríamos pensar que si el canal se cierra por completo la corriente que circula por el mismo debería ser nula. Si  $I_D$  fuera nula, no habría corriente en el canal en ningún punto, y el potencial a lo largo de éste sería el mismo que con  $V_{DS} = 0$ , es decir, cero en todo lugar. Si en el canal el potencial es cero en todos sus puntos, las uniones *p-n* estarían con polarización nula, y a su vez el canal tendría que estar abierto por completo desde la *fuelle* hasta el *drenador*, con lo que se contradice de forma clara la suposición inicial de un canal cerrado. En otras palabras, debe fluir una corriente en el JFET para inducir y mantener la condición de estrangulamiento.

Quizás la dificultad conceptual se encuentra a menudo con respecto a que la condición de estrangulamiento proviene de la necesidad de que fluya una corriente elevada por una zona de vaciamiento. Sin embargo, en los dispositivos de estado sólido no son inusuales los flujos de corriente elevados por zonas de vaciamiento (recordar un transistor BJT donde la unión de colector, en la zona activa, está polarizada en inversa y sin embargo a su través circulan corrientes elevadas).

Otra cuestión que precisa una explicación es la saturación de la corriente de drenador para tensiones de drenador superiores a  $V_{DSsat}$ . Una vez alcanzado el punto de estrangulamiento, si se incrementa la tensión por encima de  $V_{DSsat}$ , la porción de estrangulamiento se ensancha una extensión  $\Delta L$  desde un punto dentro de la zona de canal vacío (*Figura 6.6*). En la sección  $\Delta L$  la tensión del lado por el drenador es  $V_{DS}$ , mientras que por el lado de la fuente es  $V_{DSsat}$ . Es decir, la tensión aplicada por encima de  $V_{DSsat}$ , que vale  $V_{DS} - V_{DSsat}$ , cae a lo largo de la sección vacía del canal. Si ahora suponemos que  $\Delta L \ll L$  (suposición denominada *hipótesis de canal largo*), que suele ser el caso más habitual, la región que va de la fuente al estrangulamiento en el dispositivo resulta prácticamente idéntica en forma y con los mismos potenciales en los extremos (cero y  $V_{DSsat}$ ) que los que tenía al principio de la saturación. Si a lo largo de una sección conductora, no varía ni su forma ni la tensión aplicada, la corriente que la atraviesa también debe permanecer invariante. Esto explica la relativa constancia de la corriente  $I_D$

para tensiones superiores a la de estrangulamiento o de saturación. Evidentemente, si  $\Delta L$  es comparable a  $L$  (*hipótesis de canal corto*), la misma caída de tensión  $V_{DSsat}$  aparecerá sobre una sección de canal menor ( $L - \Delta L$ ), con lo que la corriente  $I_D$  aumentará de forma perceptible al aumentar la tensión  $V_{DS}$  por encima de  $V_{DSsat}$ .

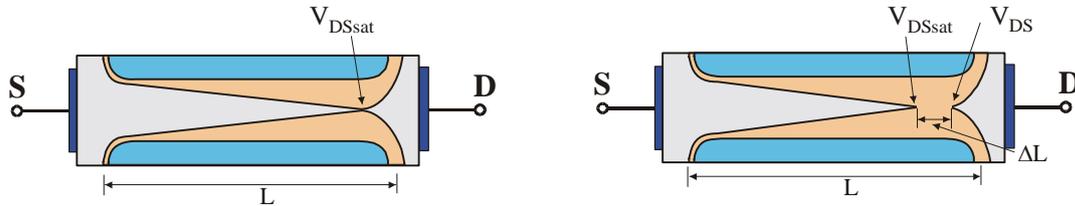


Figura 7.6.- JFET de canal largo. Para tensiones superiores a  $V_{DSsat}$  el exceso de tensión cae en la zona de canal vaciado  $\Delta L$ .

### 2.3.2.- Influencia de $V_{GS}$ .

Una vez establecida la variación de la corriente  $I_D$  por el dispositivo en función de la tensión  $V_{DS}$  cuando  $V_{GS} = 0$ , para completar el análisis, tenemos que estudiar el comportamiento del JFET para tensiones  $V_{GS}$  aplicadas menores que cero (por ser JFET de canal n). El funcionamiento del JFET para valores de  $V_{GS} < 0$  es muy similar al que tiene con  $V_{GS} = 0$ , con alguna pequeña modificación.

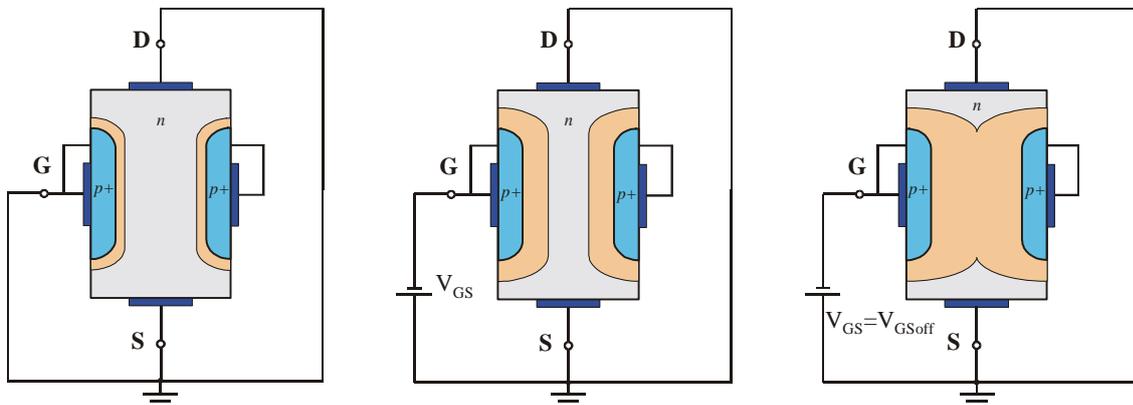
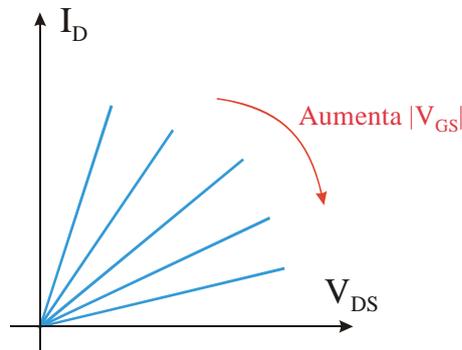


Figura 7.7.- La tensión  $V_{GS}$  modula la anchura del canal. Cuando  $V_{GS} = V_{GSoff}$  el canal se cierra por completo

Si suponemos, en primer lugar  $V_{DS} = 0$ , para valores de  $V_{GS} < 0$ , las uniones  $p-n$  están polarizadas inversamente. Una polarización inversa de dichas uniones incrementa el ancho de la zona de deplexión disminuyendo la anchura efectiva del canal n. Por tanto la resistencia del canal aumenta, de manera que en la zona de comportamiento óhmico, es

decir, para valores pequeños de la tensión  $V_{DS}$  aplicada donde la relación  $I_D - V_{DS}$  es lineal, la pendiente será tanto menor cuanto mas negativa sea  $V_{GS}$ .



**Figura 7.8.-** La tensión  $V_{GS}$  modula la anchura del canal. El dispositivo se comporta como una resistencia controlada por  $V_{GS}$ .

Por último, para tensiones  $V_{GS}$  suficientemente negativas, podría llegar a cerrarse por completo el canal, aun cuando  $V_{DS} = 0$ . Esto sucede cuando la tensión  $V_{GS}$  alcanza o disminuye por debajo del valor  $V_{GSoff}$ . Hecho este por el cual el fabricante suele denotar este parámetro como  $V_{GSoff}$ , (este es un valor de tensión característico de cada JFET) ya que indica el valor de tensión por debajo del cual (recordar que estamos hablando de valores negativos de tensión) el canal está completamente vaciado no habiendo posibilidad de circulación de corriente por mucho que se aumente la corriente  $V_{DS}$  (Salvo que dicha tensión sea lo suficientemente elevada para perforar las uniones p-n polarizadas en inversa. Este hecho se analizará más adelante al analizar la zona de ruptura de la curva característica del JFET).

#### 2.4.- Curvas Características.

Si juntamos ahora en una misma gráfica el efecto que sobre el funcionamiento del dispositivo tienen ambas tensiones ( $V_{DS}$  y  $V_{GS}$ ). Al representar la corriente de drenador en función de ambas tensiones, aparecen las denominadas curvas características del transistor JFET.

En la *Figura 7.9.* se representan las curvas características de salida para un JFET de canal n. En ella se representa la corriente de drenador  $I_D$  frente a la tensión drenador - fuente  $V_{DS}$  para distintos valores de la tensión puerta - fuente  $V_{GS}$ .

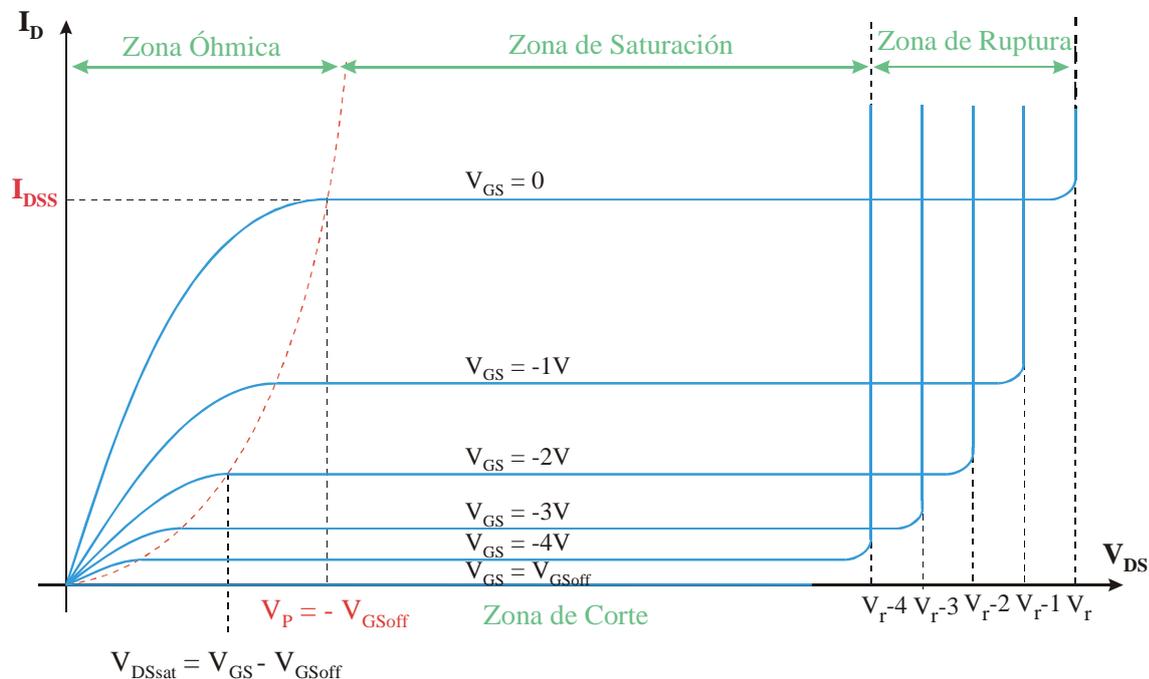
En la misma podemos ver como el valor de la tensión  $V_{DS}$  para el que se produce la saturación de la corriente de drenador cuando  $V_{GS} = 0$ , en algunos libro aparece

representado como  $V_P$  haciendo referencia al “estrangulamiento” o “pinch-off” que se ha producido en el canal. Indicar que esta tensión  $V_P$  se puede considerar de igual valor, pero de signo contrario, a la tensión  $V_{GSoff}$  característica del dispositivo.

Por otro lado, para otros valores de  $V_{GS}$  el valor de la tensión  $V_{DS}$  para el que se producirá la saturación de la corriente de drenador vendrá dado por la expresión  $V_{DSsat} = V_{GS} - V_{GSoff}$ , donde todas las tensiones deben de ponerse con su signo correspondiente. Es decir, cuanto más negativa sea la tensión  $V_{GS}$  antes se alcanzará la condición de saturación, o de otra forma, el canal se “estrangulará” para valores menores de la tensión  $V_{DS}$ , lo cual parece lógico ya que cuanto más negativa sea  $V_{GS}$  menor es el canal de partida que tenemos.

En las curvas características de la *Figura 7.9.* podemos distinguir 4 zonas bien diferenciadas:

- Zona de corte o de no conducción.
- Zona óhmica o de no saturación.
- Zona de saturación o de corriente constante.
- Zona de ruptura.



**Figura 7.9.-** Características ideales de un JFET de canal n.

## 2.5.- Zonas de Trabajo.

### Zona de corte o de no conducción.

Se corresponde con el eje horizontal de la gráfica. En esta zona la corriente  $I_D = 0$  con independencia del valor  $V_{DS}$ . Esto se da para valores de  $V_{GS} \leq V_{GSoff}$ , donde el canal está completamente cerrado.

### Zona óhmica o de no saturación.

Se da para valores de  $V_{DS}$  inferiores al de saturación, es decir, cuando  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{GSoff}$ . Para estos valores de tensión el canal se va estrechando de la parte del drenador, principalmente, hasta llegar al estrangulamiento completo para  $V_{DSsat}$ .

En esta zona el transistor se comporta aproximadamente como una resistencia variable controlada por la tensión de puerta, sobre todo para valores pequeños de  $V_{DS}$ , ya que a medida que nos aproximamos al valor de  $V_{DSsat}$ , y para cada valor de  $V_{GS}$  se va perdiendo la linealidad debido al estrechamiento del canal que se aproxima al cierre.

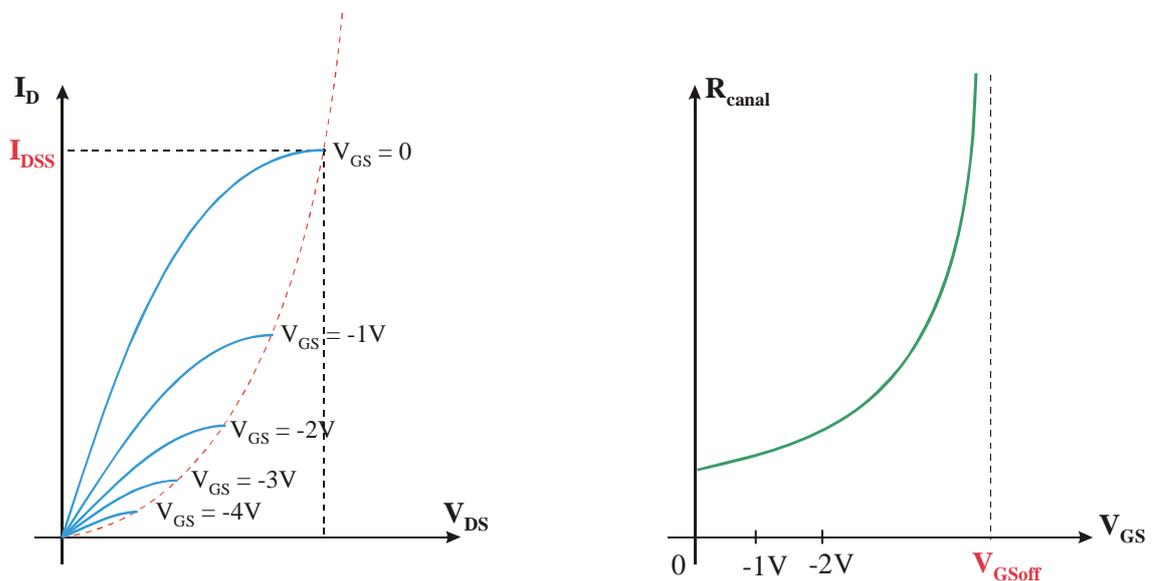


Figura 7.10.- Para  $V_{DS} < V_{DSsat}$  el JFET se comporta como una resistencia variable con  $V_{GS}$ .

**Zona de saturación o de corriente constante.**

Esta zona se da para valores  $V_{DS} > V_{DSsat}$  . Ahora la corriente  $I_D$  permanece invariante frente a los cambios de  $V_{DS}$  (suponiendo la *hipótesis de canal largo*) y sólo depende de la tensión  $V_{GS}$  aplicada. En esta zona el transistor se comporta como una fuente de corriente controlada por la tensión de puerta  $V_{GS}$ .

La relación entre la tensión  $V_{GS}$  aplicada y la corriente  $I_D$  que circula por el canal en esta zona viene dada por la siguiente ecuación:

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

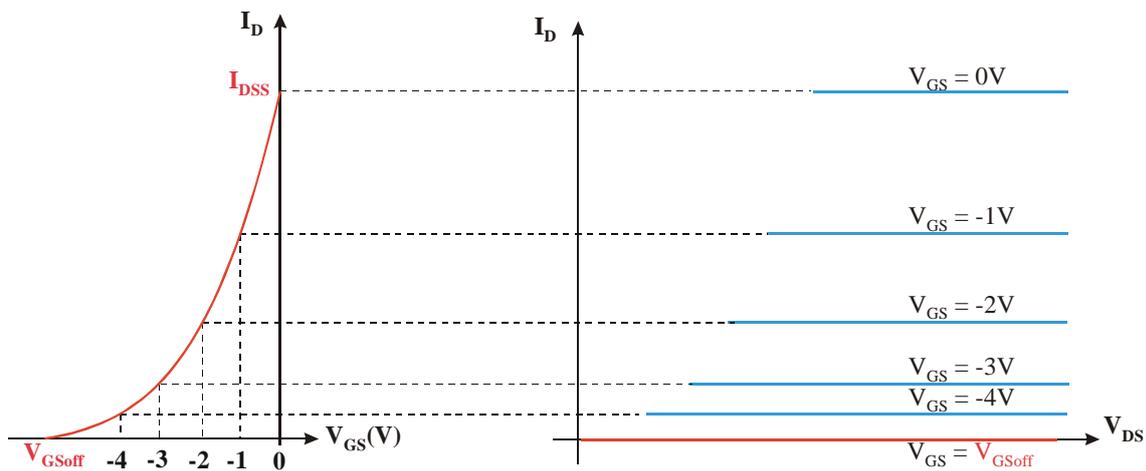
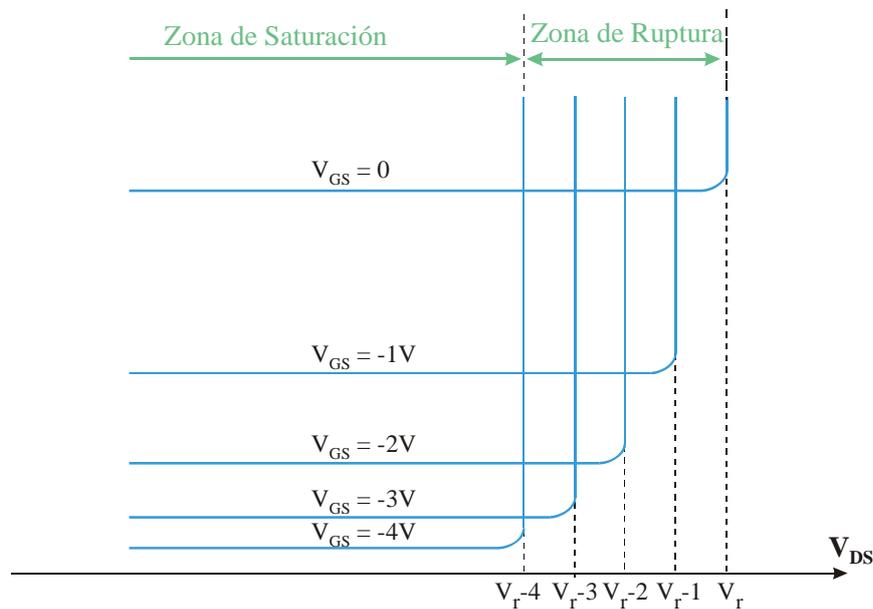


Figura 7.11.- Para  $V_{DS} > V_{DSsat}$  el JFET se comporta como una fuente de corriente controlable con  $V_{GS}$ .

**Zona de ruptura.**

En un transistor JFET tenemos dos uniones *p-n* polarizadas en inversa, tanto más cuanto menor sea el valor de  $V_{GS}$ . Tal y como vimos al abordar el estudio de la unión *p-n* en el tema 2 cuando una unión *p-n* la polarizamos en inversa, la zona de carga de espacio aumenta. Sin embargo, esta tensión inversa no se puede aumentar indefinidamente, ya que si se supera un determinado valor (tensión de ruptura, característico de cada unión y que suele ser proporcionado por el fabricante en sus hojas de características) la unión se perfora, produciéndose la ruptura del dispositivo.



$$V_{DSruptura} = V_r + V_{GS}$$

**Figura 7.12.-** Zona de ruptura. Las líneas correspondientes a los distintos valores de  $V_{GS}$  se cruzan.

En nuestro caso las uniones *p-n* están sometidas a una mayor polarización inversa del lado del drenador. Por tanto, el JFET entrará en ruptura cuando en la zona del drenador se supere la tensión de ruptura de la unión, es decir, cuando  $V_{DG} \geq V_r$ .  
 Teniendo en cuenta que  $V_{DS} = V_{GS} + V_{DG}$  la ruptura se dará para  $V_{DSruptura} \geq V_{GS} + V_r$   
 Por ello a medida que  $V_{GS}$  se hace más negativo, la tensión  $V_{DS}$  para la que se produce la ruptura será menor, lo que origina que en la zona de ruptura se crucen las líneas.

### 3.- TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO METAL ÓXIDO SEMICONDUCTOR. (MOSFET)

Visto el transistor JFET vamos ahora a ver el otro gran grupo de transistores de efecto de campo: Los transistores MOSFET. Vamos a ver que existen dos tipos de transistores MOSFET.

- **MOSFET de acumulación** o de enriquecimiento
- **MOSFET de deplexión** o empobrecimiento

#### 3.1.- MOSFET de Acumulación.

Vamos a comenzar el estudio de los transistores MOSFET viendo en primer lugar el MOSFET de acumulación.

##### 3.1.1.- Estructura Básica.

Como podemos ver en la *Figura 7.13.* en la que aparece representada la estructura básica para un MOSFET de canal n, partimos de una zona de material semiconductor tipo p en la que aparecen dos zonas tipo n<sup>+</sup> con contactos metálicos a los terminales de *drenador* y *fuentes*. La zona roja representada corresponde a una capa de material aislante, en este caso óxido de silicio. Por tanto, si nos fijamos en el terminal de *puerta*, vemos como tenemos una zona metálica (correspondiente al contacto óhmico) una zona de óxido y una zona de semiconductor. Es precisamente debido a esta estructura de donde le viene el nombre al dispositivo de Metal – Óxido – Semiconductor (MOS). Además, este dispositivo tendría un cuarto terminal, el terminal del *Sustrato* (SS), aunque habitualmente éste se encuentra conectado a la fuente.

Es preciso que notemos una característica fundamental de este dispositivo y es que la puerta está aislada eléctricamente del dispositivo, es decir, no hay conexión eléctrica entre la puerta y el sustrato.

Por otra parte, indicar que en este caso y en las sucesivas representaciones de los transistores MOSFET a lo largo de este capítulo no se han representado las zonas de carga de espacio que evidentemente aparecerán en las uniones pn por simplificar los dibujos, ya que en este caso, y a diferencia del JFET, las zonas de carga de espacio no juegan un papel primordial en el funcionamiento del dispositivo.

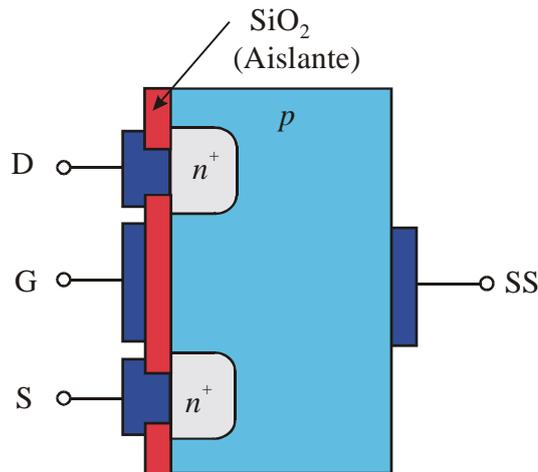


Figura 7.13.- Estructura básica del MOSFET de acumulación canal n.

### 3.1.2.- Símbolos.

Los símbolos más habituales utilizados para la representación en circuitos de los MOSFET de acumulación son los que aparecen representados a continuación

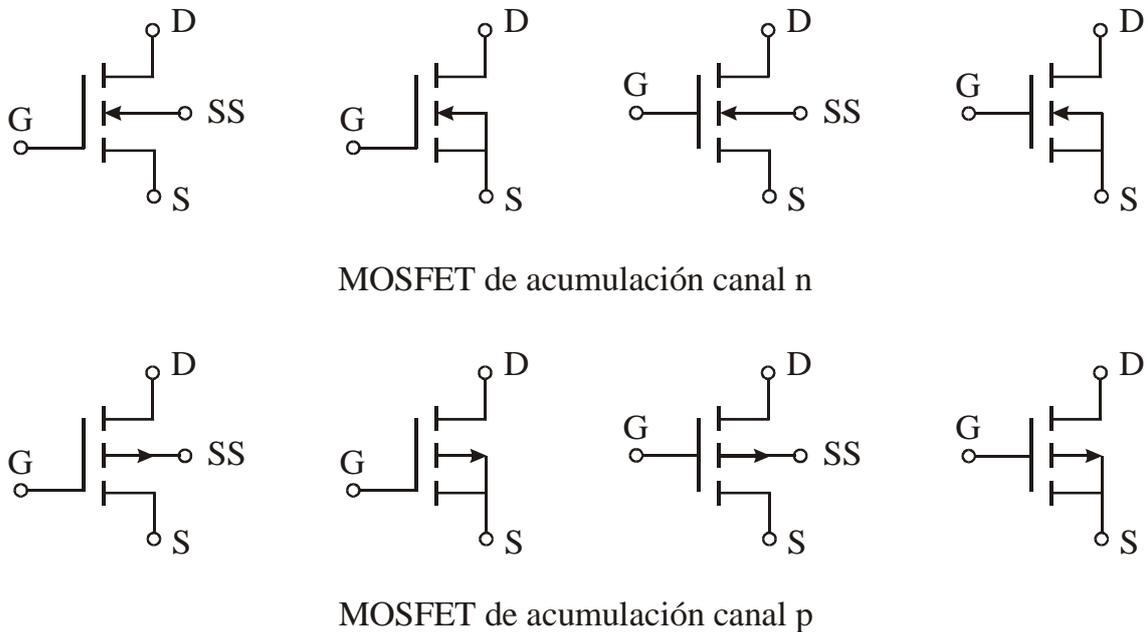
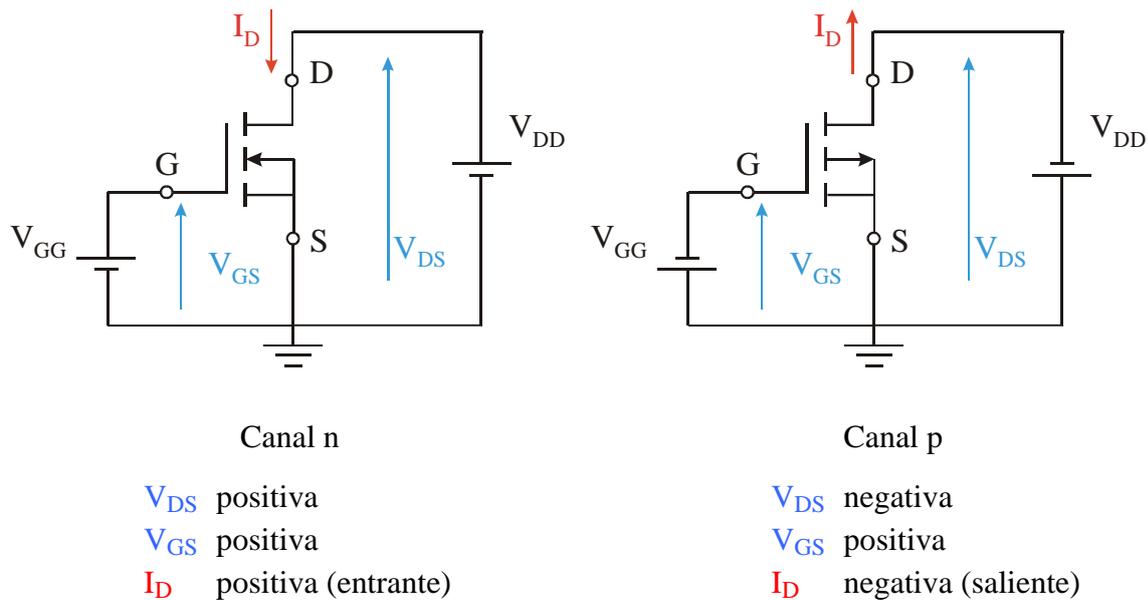


Figura 7.14.- Símbolos del MOSFET de acumulación

Notar dos aspectos significativos del símbolo, en primer lugar que el terminal de puerta no tiene conexión con el resto de terminales, ya que tal y como hemos visto anteriormente, está aislado eléctricamente del resto del dispositivo. En segundo lugar que

los terminales de drenador y fuente están unidos a través de una línea discontinua, esta línea hace referencia al canal que se va a formar y que veremos más adelante. De nuevo, la flecha indica el sentido en que circularía la corriente en el caso de que la unión pn estuviera polarizada en directa.

Para el funcionamiento más habitual, los transistores MOSFET de acumulación se polarizan tal y como aparece en la *Figura 7.15*.



*Figura 7.15.- Polarización del MOSFET de acumulación.*

Los transistores MOSFET de acumulación de canal n se polarizan aplicando una tensión positiva entre drenador y fuente ( $V_{DS}$ ) y una tensión positiva entre puerta y fuente ( $V_{GS}$ ). De esta forma, la corriente circulará en el sentido de drenador a fuente. En el caso del MOSFET de acumulación de canal p la tensión  $V_{DS}$  a aplicar debe ser negativa y la tensión  $V_{GS}$  negativa, de esta forma la corriente fluirá en el sentido de la fuente hacia el drenador.

A partir de ahora vamos a centrarnos en el estudio del MOSFET de acumulación de canal n, para el de canal p todos los razonamientos serían análogos sin más que tener en cuenta los sentidos de las tensiones y las corrientes que aparecen en la *Figura 7.15*.

### 3.1.3.- Principio de Funcionamiento.

#### 3.1.3.1.- Influencia de $V_{GS}$ .

A diferencia de lo hecho con el JFET, vamos a comenzar en este caso con el efecto de la influencia de la tensión  $V_{GS}$ . Para ello vamos a suponer en un principio  $V_{DS} = 0$

En primer lugar, si aplicamos una tensión  $V_{GS} = 0$ , (Figura 7.16 a) aunque apliquemos una tensión  $V_{DS}$  no circulará corriente alguna por el dispositivo, ya que la unión de drenador está polarizada en inversa.

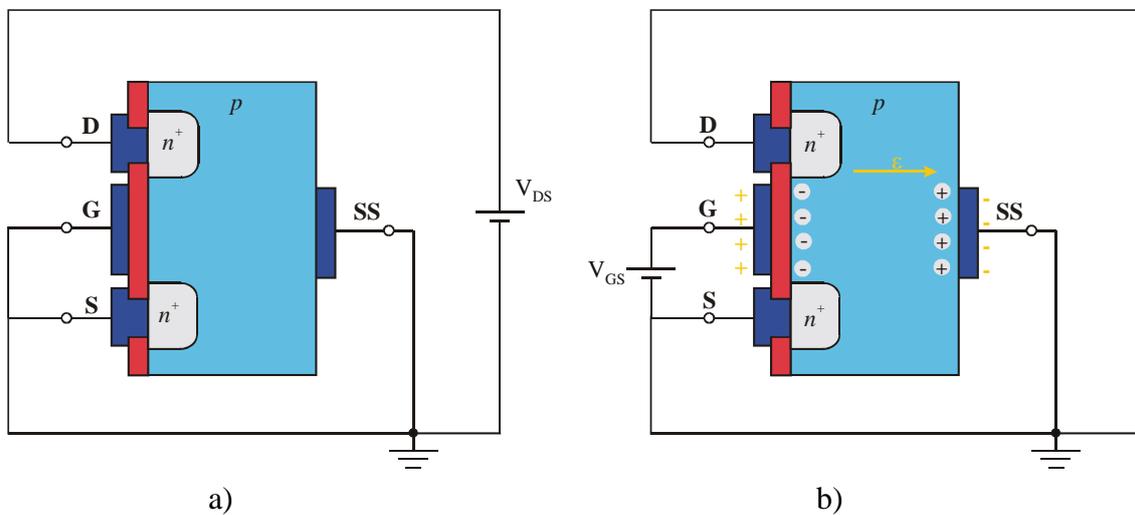


Figura 7.16.- Efecto de  $V_{GS}$ ; a)  $V_{GS} = 0$  b)  $V_{GS} > 0$ .

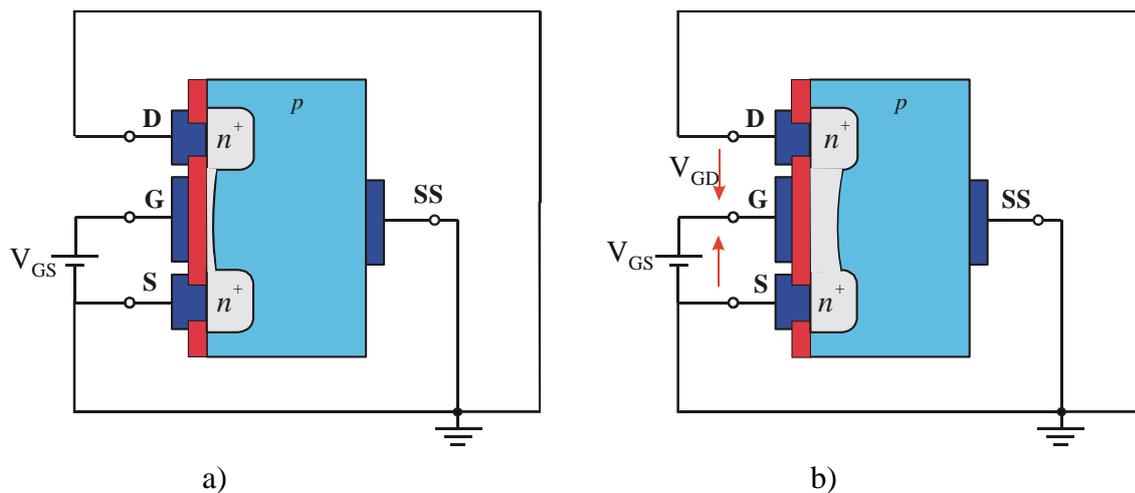
Sin embargo, cuando  $V_{GS} > 0$  aparece un campo eléctrico que lleva a los electrones hacia la zona de la puerta y aleja de dicha zona a los huecos, no pudiéndose establecer una corriente por estar la puerta aislada. Para valores pequeños de esta tensión  $V_{GS}$  aplicada se creará una zona de carga de espacio (sin portadores), sin embargo, si seguimos aumentando el valor de esta tensión, la acumulación de electrones se hará lo suficientemente importante como para decir que tenemos una zona n, es decir, se formará un canal de tipo n que unirá los terminales de drenador y fuente (Figura 7.17.).

De esta forma, cuanto mayor sea la tensión  $V_{GS}$  aplicada mayor será la anchura del canal formado, es decir, de nuevo tenemos un efecto de modulación de anchura del canal con la tensión  $V_{GS}$ .

Por otra parte, vemos que en este dispositivo se produce un efecto de variación de una carga almacenada con una tensión aplicada. Este es precisamente el efecto que se

produce en un condensador. De esta forma, estamos viendo que, de alguna manera, este dispositivo puede comportarse como un condensador como habíamos adelantado en la introducción del capítulo.

Si ahora nos fijamos en la *Figura 7.17 b* al estar los terminales de fuente, sustrato y drenador a la misma tensión (por ser  $V_{DS} = 0$ ) las tensiones  $V_{GS}$  y  $V_{GD}$  serán iguales, y por lo tanto el canal simétrico respecto de la puerta.



*Figura 7.17.- Efecto de  $V_{GS}$ .*

Por tanto, vemos que con la tensión  $V_{GS}$  podemos modular la anchura del canal, pero no basta con que esta tensión sea positiva, sino que deberá superar un determinado nivel de tensión. A esta tensión umbral a partir de la cual hay canal formado que permite la circulación de corriente entre el drenador y la fuente en algunos libros se le suele llamar  $V_T$  (tensión de threshold). Aunque en realidad tiene el mismo significado que la tensión  $V_{GSoff}$  vista para el transistor JFET, ya que en ambos casos se trata del valor mínimo de tensión para el que existe canal que permite la circulación de corriente.

Al igual que en el caso del JFET, si ahora aplicamos valores de tensión  $V_{DS}$  pequeños, la relación entre la corriente  $I_D$  y la tensión  $V_{DS}$  aplicada será lineal, es decir, de nuevo el dispositivo se comporta como una resistencia cuyo valor dependerá de la anchura del canal y por lo tanto de la tensión  $V_{GS}$ .

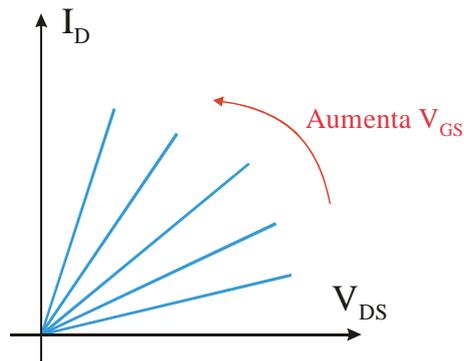


Figura 7.18.- La tensión  $V_{GS}$  modula la anchura del canal. El dispositivo se comporta como una resistencia controlada por  $V_{GS}$ .

3.1.3.2.- Influencia de  $V_{DS}$ .

Si una vez que se ha formado el canal aplicamos una tensión positiva, por el canal circulará una corriente  $I_D$  en el sentido del drenador hacia la fuente. Si ahora nos fijamos en la relación de tensiones  $V_{DS} = V_{GS} - V_{GD}$ , al ser  $V_{DS} > 0$  tendremos que  $V_{GD} < V_{GS}$ , por lo tanto la anchura del canal será menor del lado del drenador.

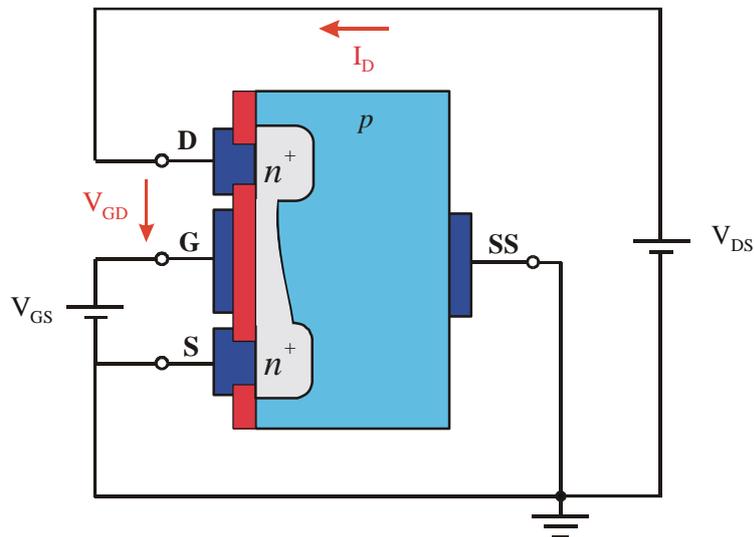


Figura 7.19.- Efecto de la tensión  $V_{DS}$ . El canal se estrecha más de la zona del drenador.

De nuevo el comportamiento es el mismo que hemos visto anteriormente para el JFET. Para valores de tensión  $V_{DS}$  pequeños, el estrechamiento del canal no será importante, por lo que la relación entre la tensión aplicada y la corriente que circula será

lineal tal y como establece la Ley de Ohm. A medida que el valor de  $V_{DS}$  aumente, el estrechamiento comenzará a ser importante, variando la resistencia que presenta el canal y perdiendo la linealidad de la característica. Hasta que la tensión  $V_{DS}$  alcance el valor de  $V_{DSsat}$ , momento en el cual el canal se habrá cerrado por completo. A partir de este instante, si seguimos aumentando la tensión  $V_{DS}$ , por encima de este valor  $V_{DSsat}$ , la corriente  $I_D$  se mantiene constante.

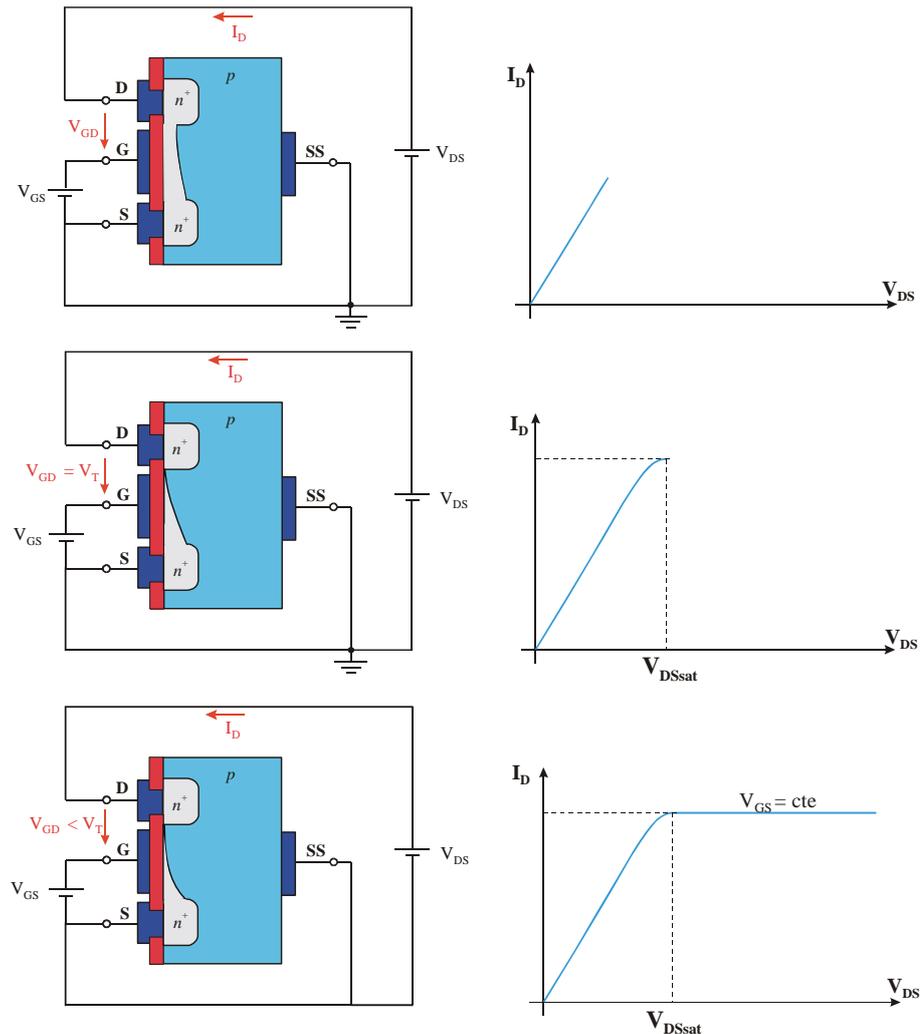
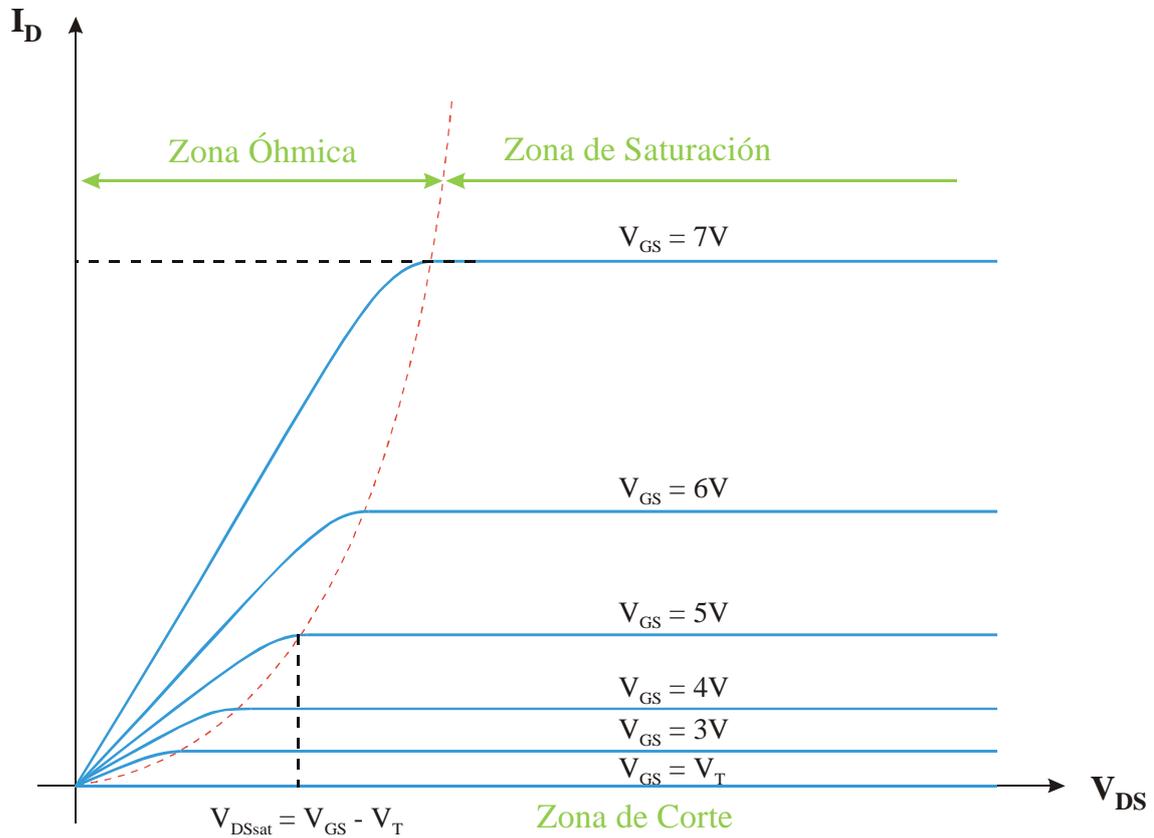


Figura 7.20.- Característica  $I_D - V_{DS}$  para una valor de  $V_{GS}$  constante.

De nuevo, la corriente no se anula al cerrarse el canal, ya que si ello sucediese drenador y fuente estarían al mismo potencial, lo que implicaría que  $V_{GS}$  y  $V_{GD}$  serán iguales y por lo tanto el canal simétrico respecto a la puerta, es decir, la situación en la que estábamos con  $V_{DS} = 0$

### 3.1.4.- Curvas Características.

En la *Figura 7.21*. se representan las curvas características de un transistor MOSFET de acumulación.



**Figura 7.21.-** Características ideales de un MOSFET de acumulación canal n.

Igualmente, podremos distinguir las 4 zonas de funcionamiento del transistor.

- Zona de corte o de no conducción.
- Zona óhmica o de no saturación.
- Zona de saturación o de corriente constante.
- Zona de ruptura.

Aunque en la figura no se haya representado la zona de ruptura la analizaremos en el siguiente punto.

### 3.1.5.- Zonas de trabajo

#### Zona de corte o de no conducción.

Se corresponde con el eje horizontal de la gráfica. En esta zona la corriente  $I_D = 0$  con independencia del valor  $V_{DS}$ . Esto se da para valores de  $V_{GS} \leq V_T$ , donde el canal no está completamente formado.

#### Zona óhmica o de no Saturación.

Se da para valores de  $V_{DS}$  inferiores al de saturación, es decir, cuando  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$ . Para estos valores de tensión el canal se va estrechando de la parte del *drenador*, principalmente, hasta llegar al estrangulamiento completo para  $V_{DSsat}$ .

En esta zona el transistor se comporta aproximadamente como una resistencia variable controlada por la tensión de puerta, sobre todo para valores pequeños de  $V_{DS}$ , ya que a medida que nos aproximamos al valor de  $V_{DSsat}$ , y para cada valor de  $V_{GS}$  se va perdiendo la linealidad debido al estrechamiento del canal que se aproxima al cierre.

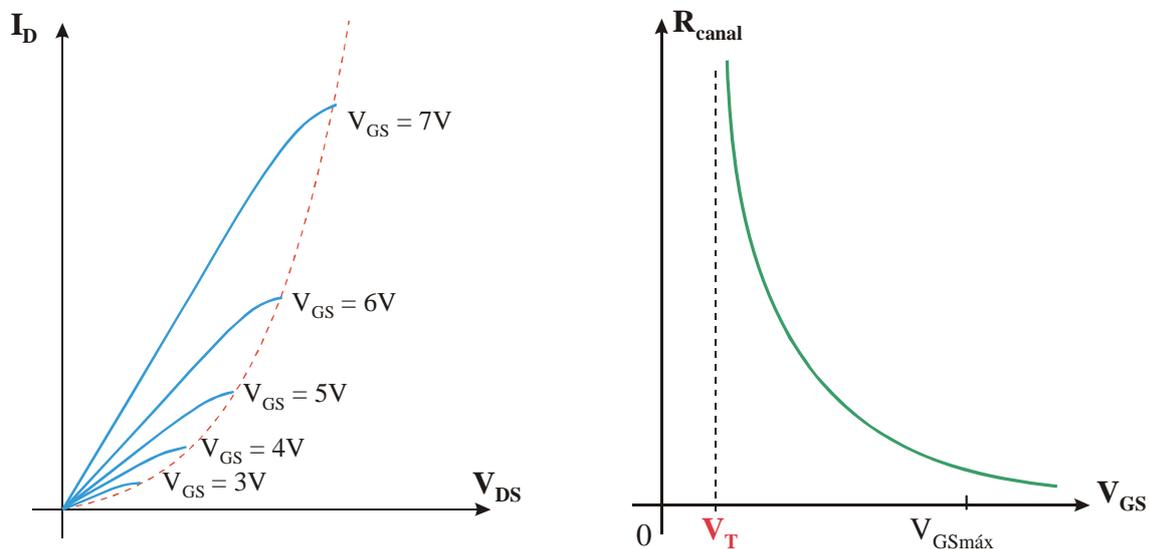


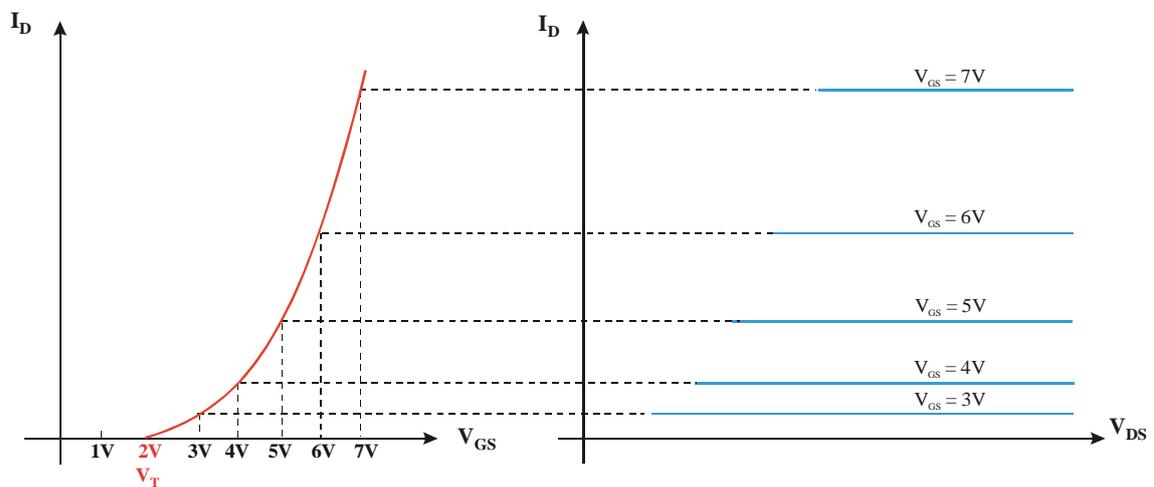
Figura 7.22.- Para  $V_{DS} < V_{DSsat}$  el MOSFET se comporta como una resistencia variable con  $V_{GS}$ .

**Zona de saturación o de corriente constante.**

Esta zona se da para valores  $V_{DS} > V_{DSsat}$  . Ahora la corriente  $I_D$  permanece invariante frente a los cambios de  $V_{DS}$  y sólo depende de la tensión  $V_{GS}$  aplicada. En esta zona el transistor se comporta como una fuente de corriente controlada por la tensión de puerta  $V_{GS}$ .

La relación entre la tensión  $V_{GS}$  aplicada y la corriente  $I_D$  que circula por el canal en esta zona viene dada por la siguiente ecuación:

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$



**Figura 7.23.-** Para  $V_{DS} > V_{DSsat}$  el MOSFET se comporta como una fuente de corriente controlada con la tensión  $V_{GS}$ .

**Zona de ruptura.**

Un transistor MOSFET puede romper por dos motivos. Bien porque se perfora el dieléctrico cuando la tensión  $V_{GS}$  supera un determinado valor que vendrá determinado por el aislante, o bien porque en la unión pn del lado del drenador (polarizada en inversa) se supera el valor de la tensión de ruptura de dicha unión, dado que esta unión está polarizada con una tensión inversa de valor  $V_{DS}$  la ruptura se producirá cuando  $V_{DS} \geq V_r$  con independencia del valor de  $V_{GS}$ , por tanto en la zona de ruptura todas las distintas curvas en función de  $V_{GS}$  se juntan en una única.

### 3.2.- MOSFET de Deplexión.

Vamos a continuar con el siguiente gran grupo de transistores MOSFET, en este caso, el MOSFET de deplexión o empobrecimiento.

#### 3.2.1.- Estructura Básica.

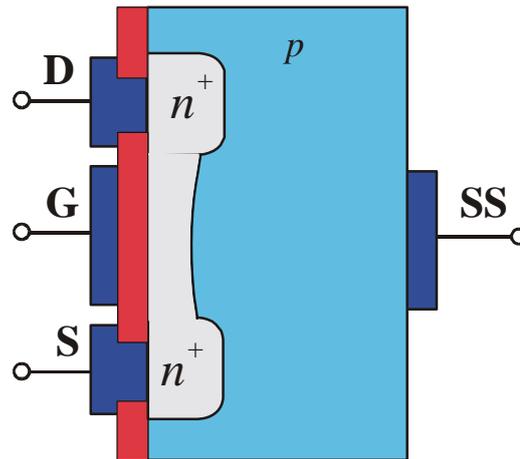


Figura 7.24.- Estructura básica del MOSFET de deplexión canal n.

Como podemos observar en la *Figura 7.24.* la estructura básica para un MOSFET de deplexión es similar al caso del de deplexión, con la importante diferencia de que en este caso disponemos de un canal inicial realizado en el proceso de fabricación del dispositivo.

#### 3.2.2.- Símbolos.

Los símbolos más habituales utilizados para la representación en circuitos de los MOSFET de acumulación son los que aparecen representados en la *Figura 7.25.*

Al igual que en el caso anterior el terminal de puerta no tiene conexión con el resto de terminales, ya que tal y como hemos visto anteriormente, está aislado eléctricamente del resto del dispositivo. Pero, a diferencia del caso anterior, en el MOSFET de acumulación los terminales de drenador y fuente están unidos a través de una línea continua, esta línea hace referencia al canal que ahora si que existe desde un principio. De nuevo, la flecha indica el sentido en que circularía la corriente en el caso de que la unión pn estuviera polarizada en directa.

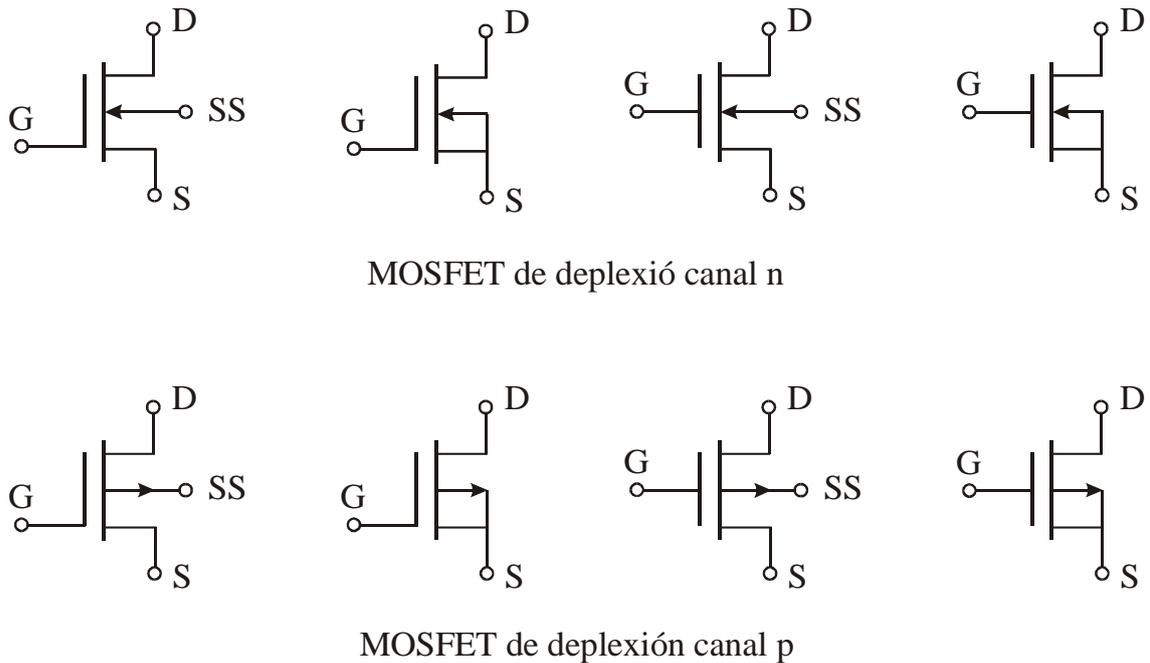


Figura 7.25.- Símbolos del MOSFET de deplexió.

Para el funcionamiento más habitual, los transistores MOSFET de acumulación se polarizan tal y como aparece en la Figura 7.26.

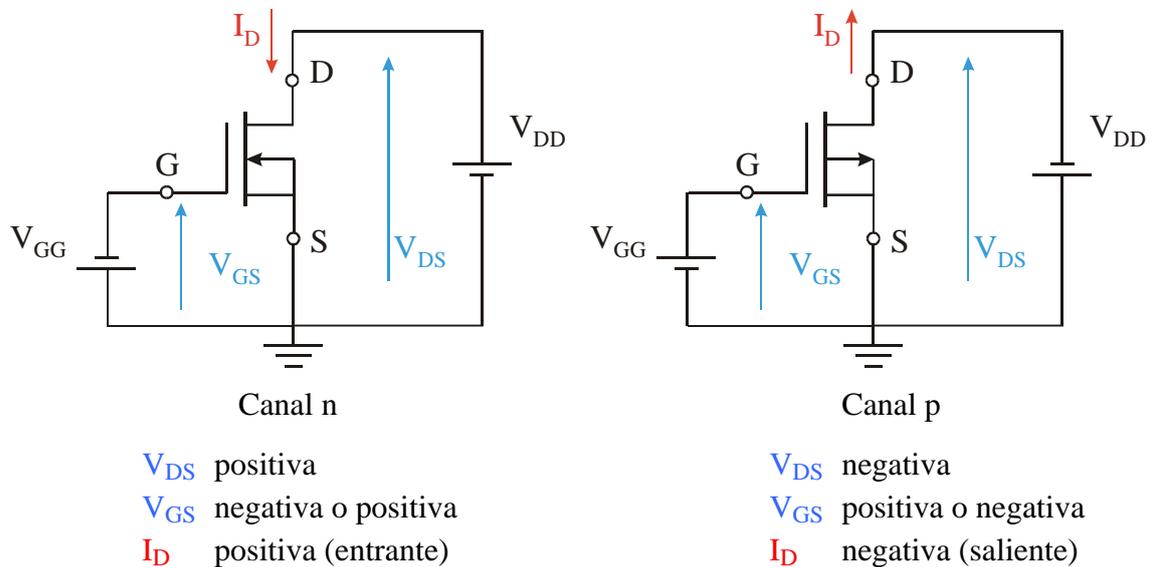


Figura 7.26.- Polarización del MOSFET de deplexió.

Los transistores MOSFET de deplexió de canal n se polarizan aplicando una tensión positiva entre drenador y fuente ( $V_{DS}$ ) y una tensión entre puerta y fuente ( $V_{GS}$ ) que puede ser negativa o positiva, según veremos al analizar el funcionamiento del

dispositivo. De esta forma, la corriente circulará en el sentido de drenador a fuente. En el caso del MOSFET de acumulación de canal p la tensión  $V_{DS}$  a aplicar debe ser negativa y la tensión  $V_{GS}$  positiva o negativa, de esta forma la corriente fluirá en el sentido de la fuente hacia el drenador.

### 3.2.3.- Principio de Funcionamiento.

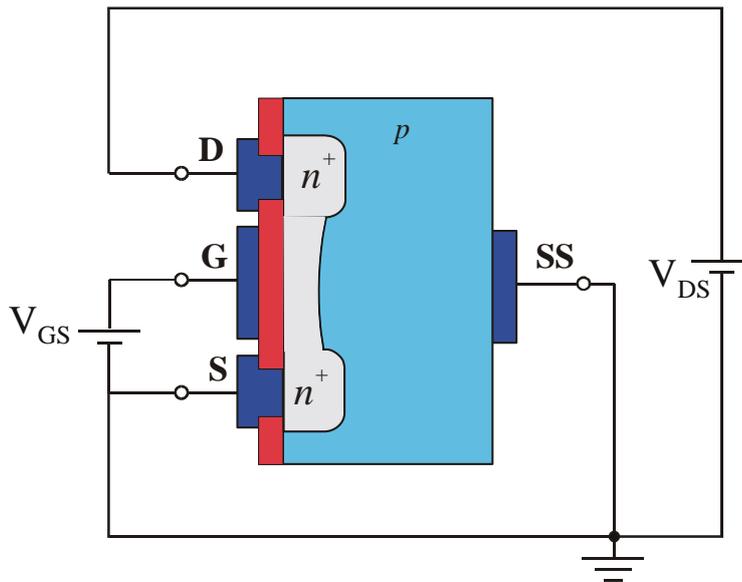


Figura 7.27.- Funcionamiento del MOSFET de depleción canal n.

En este caso, si aplicamos una tensión  $V_{GS} > 0$ , se atraerán más electrones hacia la zona de la puerta y se repelerán más huecos de dicha zona, por lo que el canal se ensanchará. Por lo tanto, el efecto que tenemos es el mismo que en el caso del MOSFET de acumulación, es decir, para valores  $V_{GS} > 0$  el MOSFET de depleción tiene un comportamiento de acumulación. Si por el contrario damos valores  $V_{GS} < 0$  el efecto será el contrario, disminuyéndose la anchura del canal. En definitiva, volvemos a tener de nuevo un efecto de modulación de la anchura de un canal en función de una tensión aplicada  $V_{GS}$ . Sin embargo, si seguimos disminuyendo el valor de  $V_{GS}$  podrá llegar un momento en que el canal desaparezca por completo, esto sucederá cuando  $V_{GS}$  disminuya por debajo de un valor  $V_{GSoff}$ .

En cuanto al efecto de la tensión  $V_{DS}$  tendríamos exactamente lo mismo que en los dos casos analizados anteriormente.

### 3.2.4.- Curvas Características.

De nuevo las curvas características para el transistor MOSFET de depleción (en este caso de canal n) son en esencia iguales a las vista hasta ahora. Indicar que en este caso, cuando la tensión  $V_{GS}$  aplicada es cero, a la corriente por el dispositivo se le denomina  $I_{DSS}$  por analogía al caso del JFET, sin embargo, en este caso no se trata de la máxima corriente que podemos extraer del dispositivo

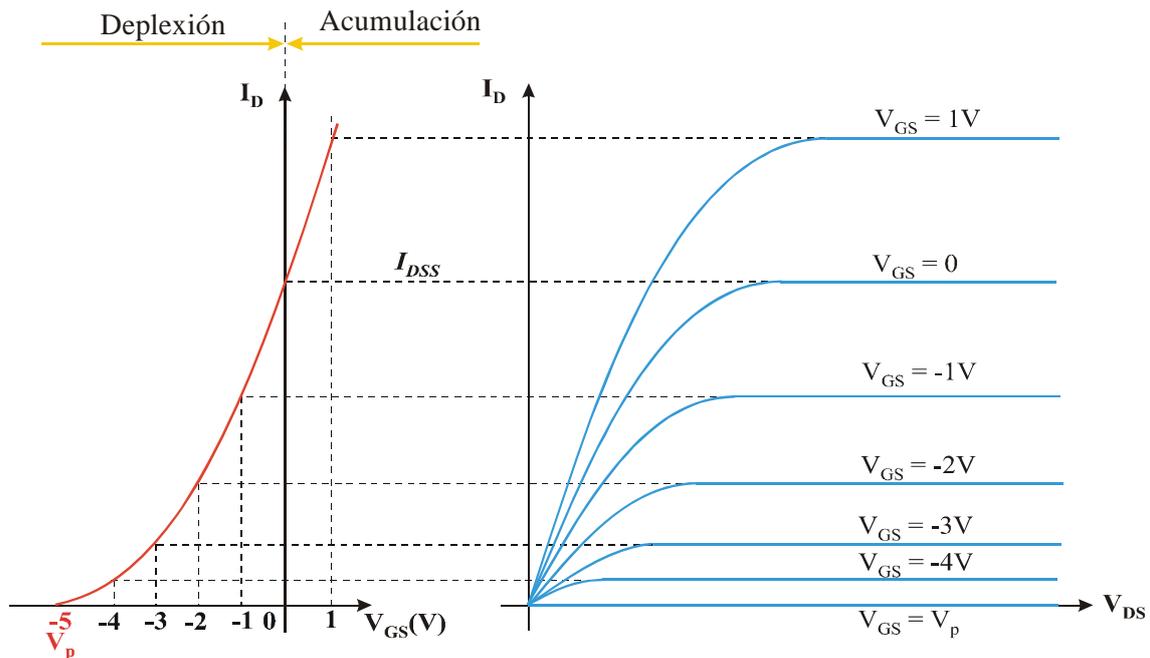


Figura 7.28.- Características ideales de un MOSFET de depleción canal n.

Por último, recordar lo que en su día ya dijimos para el transistor BJT, en cualquier caso el funcionamiento del transistor debe estar siempre dentro de la zona marcada por las características propias del transistor. Es decir no se deben superar los límites de  $I_{Dm\acute{a}x}$ , ni de  $V_{DS\ m\acute{a}x}$  ni por supuesto la curva de la potencia máxima.

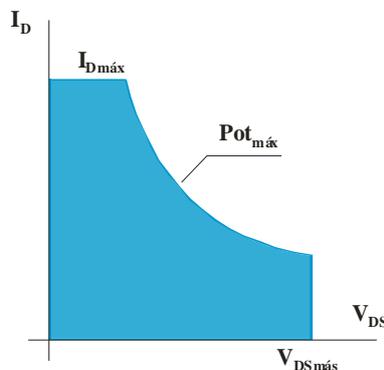


Figura 7.29.- Límites de funcionamiento.