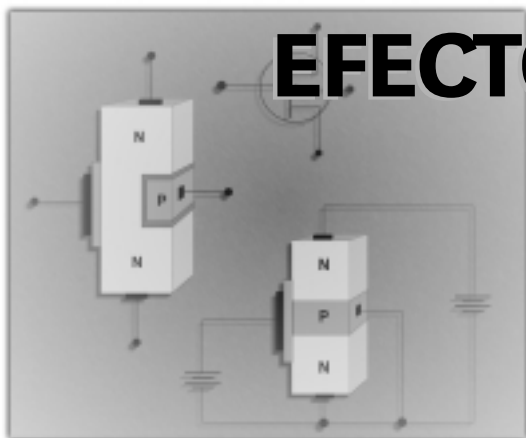


# TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO



Oscar Montoya Figueroa

***En el presente artículo hablaremos de las principales características de operación y construcción de los transistores de efecto de campo (FET's). El hecho de comprender su funcionamiento puede auxiliarnos en la reparación de circuitos donde son utilizados, o bien, sernos útil para considerarlos como elementos de diseño en sus propias aplicaciones.***

## Los FET's

Los transistores de efecto de campo son dispositivos electrónicos con tres terminales que controlan, mediante la aplicación de voltaje en ellas, el paso de la corriente eléctrica que los atraviesa; por eso se dice que esta última es controlada por un efecto electrostático llamado "efecto de campo".

Es común encontrar a los FET's como elementos activos en circuitos osciladores, amplificadores y de control. Debido a que el control de estos dispositivos se hace con voltajes y no con corrientes eléctricas, el consumo de éstas se minimiza. Esta característica es la que los hace especialmente atractivos para utilizarse como componentes básicos de construcción de sistemas cuyos consumos de energía son críticos; por ejemplo, en computadoras portátiles, en *walkmans* o teléfonos celulares, por mencionar sólo algunos (figura 1).

## El JFET

Un FET de unión cuenta con una sección de semiconductor tipo N, un extremo inferior denominado «fuente» y uno superior llamado «drenador»; ambos son análogos al emisor y colector de un transistor bipolar.



**Figura 1**



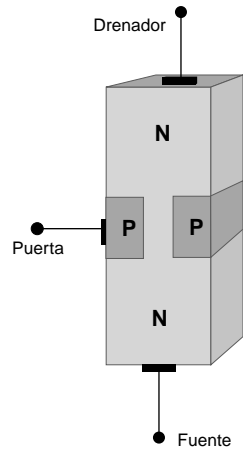
Para producir un JFET, se difunden dos áreas de semiconductor tipo P en el semiconductor tipo N del FET. Cada una de estas zonas P se denomina «puerta» y es equivalente a la base de un transistor bipolar (figura 2).

Cuando se conecta una terminal y así se separa cada puerta, el transistor se llama “JFET de doble puerta”. Estos dispositivos de doble puerta se utilizan principalmente en mezcladores (tipo MPF4856), que son circuitos especiales empleados en equipos de comunicación.

La mayoría de los JFET tienen sus dos puertas conectadas internamente para formar una sola terminal de conexión externa; puesto que las dos puertas poseen el mismo potencial, el dispositivo actúa como si tuviera sólo una.

Debido a que existe una gran analogía entre un dispositivo JFET y un transistor bipolar, mu-

Secciones de un transistor tipo JFET. Los JFET son dispositivos de silicio. Se requiere sólo 0.7 volt de polarización directa para tener una corriente significativa.



**Figura 2**

chas fórmulas que describen el comportamiento de aquél son adaptaciones de las fórmulas utilizadas en este último (tabla 1).

### Efecto de campo

El efecto de campo es un fenómeno que se puede observar cuando a cada zona del semiconductor tipo P la rodea una capa de depleción (figura 3); la combinación entre los huecos y los electrones crea las capas de depleción.

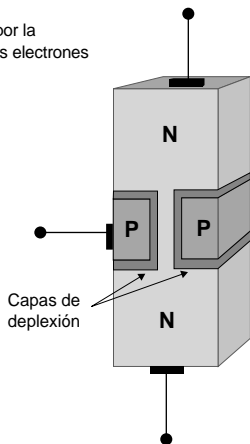
Cuando los electrones fluyen de la fuente al drenador, deben pasar por el estrecho canal situado entre la zona semiconductor; la tensión de la puerta controla el ancho del canal y la corriente que fluye de la fuente al drenador. Cuanto más negativa sea la tensión, más estrecho será el canal y menor será la corriente del drenador.

**Tabla 1**

Transistor bipolar	Fórmula	Dispositivo JFET	Fórmula
Emisor	E	Fuente	S
Base	B	Puerta	G
Colector	C	Drenador	D

Por ejemplo, cuando exista una corriente de emisor ( $I_E$ ), un JFET tendrá una corriente de fuente ( $I_S$ ). Cuando existe una corriente de base ( $I_B$ ), se tiene una corriente de puerta ( $I_G$ ). Y si hay una corriente de colector ( $I_C$ ), se tiene una corriente de drenador ( $I_D$ ).

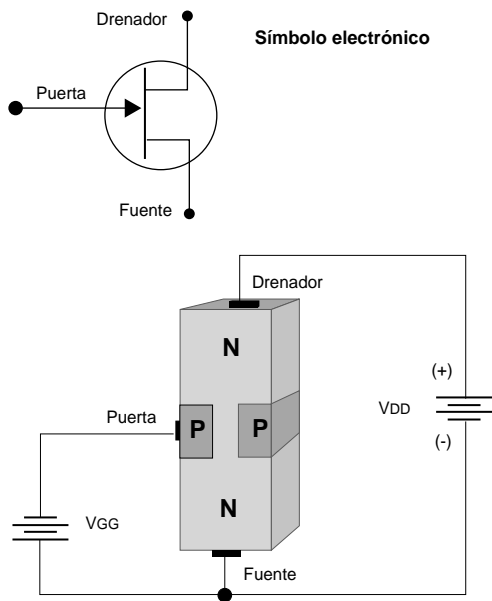
Capas de deplexión formadas por la combinación de los huecos y los electrones libres dentro de un JFET. Se le denomina "efecto de campo".



**Figura 3**

Casi todos los electrones libres que pasan a través del canal fluyen hacia el drenador; en consecuencia,  $I_D = I_S$ .

La tensión de alimentación del drenador es positiva y la tensión de la puerta es negativa, provocando que la tensión entre ambos sea también negativa. El diodo puerta-drenador está polarizado en forma inversa.



**Figura 4**

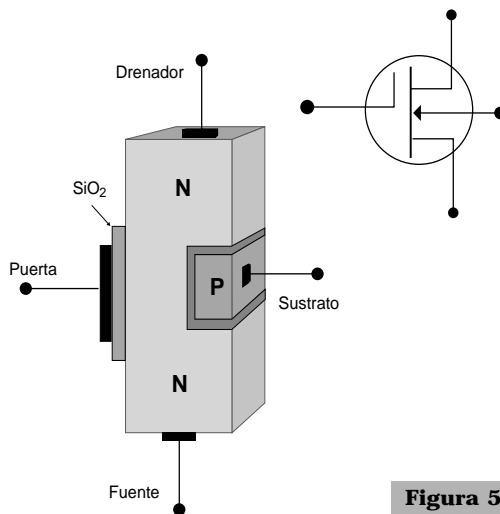
Si se considera que se encuentra polarizada en forma inversa la puerta de un JFET, éste actuará como un dispositivo controlado por tensión y no como un dispositivo controlado por corriente. En un JFET, la magnitud de entrada que se controla es la tensión puerta-fuente  $V_{GS}$  (figura 4). Los cambios en  $V_{GS}$  determinan cuánta corriente puede circular de la fuente al drenador; esta es la principal diferencia con el transistor bipolar, el cual controla la magnitud de la corriente de base ( $I_b$ ).

### El MOSFET de empobrecimiento

El FET de semiconductor óxido-metal o MOSFET, está integrado por una fuente, una puerta y un drenador. La característica principal que lo distingue de un JFET, es que su puerta se encuentra aislada eléctricamente del canal; por esta causa, la corriente de puerta es extremadamente pequeña en ambas polaridades.

Un MOSFET de empobrecimiento de canal N, también denominado MOSFET de deplexión, se compone de un material N con una zona P a la derecha y una puerta aislada a la izquierda (figura 5). A través del material N, los electrones libres pueden circular desde la fuente hasta el drenador; es decir, atraviesan el estrecho canal

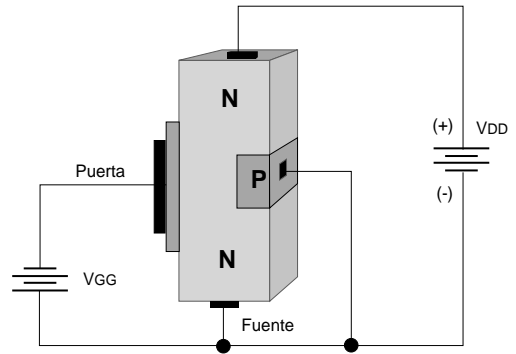
Construcción de un MOSFET de empobrecimiento y su símbolo electrónico.



**Figura 5**

**Figura 6**

El MOSFET de empobrecimiento con tensión de puerta negativa.



entra la puerta y la zona P (esta última, denominada "sustrato" o "cuerpo").

Una delgada capa de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) se deposita en el lado izquierdo del canal. El dióxido de silicio aísla la puerta del canal, permitiendo así la circulación de una corriente de puerta mínima aun y cuando la tensión de puerta sea positiva.

En el MOSFET de empobrecimiento con tensión de puerta negativa, la tensión de alimentación V<sub>DD</sub> obliga a los electrones libres a circular de la fuente al drenador; fluyen por el canal estrecho a la izquierda del sustrato P (figura 6). Como sucede en el JFET, la tensión de puerta controla el ancho del canal.

La capacidad para usar una tensión de puerta positiva, es lo que establece una diferencia entre un MOSFET de empobrecimiento y un JFET. Al estar la puerta de un MOSFET aislada eléctricamente del canal, podemos aplicarle una tensión positiva para incrementar el número de electrones libres que viajan por dicho conducto; mientras más positiva sea la puerta, mayor será la corriente que vaya de la fuente al drenador.

### MOSFET de enriquecimiento

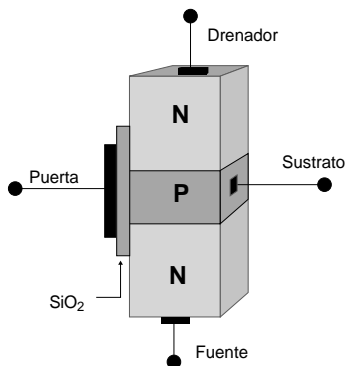
Aunque el MOSFET de empobrecimiento es muy útil en situaciones especiales (circuitos de carga de batería o control de encendido de camas fluorescentes), no tiene un uso muy extenso; pero sí desempeña un papel muy importante en

la evolución hacia el MOSFET de enriquecimiento (también llamado MOSFET de acumulación), que es un dispositivo que ha revolucionado la industria de la electrónica digital y de las computadoras. Sin él no existirían computadoras personales, que en la actualidad tienen un uso muy amplio.

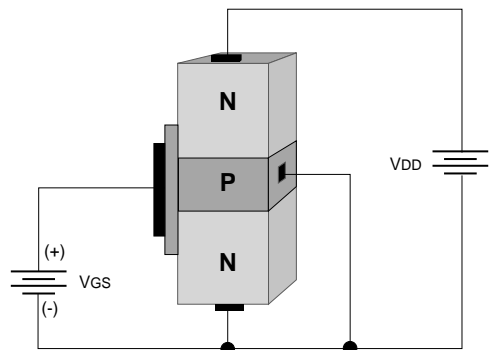
En el MOSFET de enriquecimiento de canal N, el sustrato o cuerpo se extiende a lo ancho hasta el dióxido de silicio; como puede observar en la figura 7A, ya no existe una zona N entre la fuente y el drenador.

En la figura 7B se muestra la tensión de polarización normal. Cuando la tensión de la puerta

**A** MOSFET de enriquecimiento. Observe que la zona P se extiende a lo ancho del dispositivo.



**B** Polarización normal de un MOSFET



**Figura 7**

es nula, la alimentación  $V_{DD}$  intenta que los electrones libres fluyan de la fuente al drenador; pero el sustrato P sólo tiene unos cuantos electrones libres producidos térmicamente. Aparte de estos portadores minoritarios y de alguna fuga superficial, la corriente entre la fuente y el drenador es nula.

Por tal motivo, el MOSFET de enriquecimiento está normalmente en corte cuando la tensión de la puerta es cero. Este dato es completamente diferente en los dispositivos de empobrecimiento, como es el caso del JFET y del MOSFET de empobrecimiento.

Cuando la puerta es lo suficientemente positiva, atrae a la región P electrones libres que se recombinan con los huecos cercanos al dióxido de silicio. Al ocurrir esto, todos los huecos próximos al dióxido de silicio desaparecen y los electrones libres empiezan a circular de la fuente al drenador.

El efecto es idéntico cuando se crea una capa delgada de material tipo N próxima al dióxido de silicio. Esta capa conductora se denomina «capa de inversión tipo N». Cuando el dispositivo se encuentra en estado de corte y de repente entra en conducción, los electrones libres pueden circular fácilmente de la fuente al drenador. La  $V_{GS}$  mínima que crea la capa de inversión tipo N se llama “tensión umbral” ( $V_{GS-Th}$ ). Cuando  $V_{GS}$  es menor que  $V_{GS-Th}$ , la corriente del drenador es nula; pero cuando  $V_{GS}$  es mayor que  $V_{GS-Th}$ , una capa de inversión tipo N conecta la fuente al drenador y la corriente del drenador es grande. Dependiendo del dispositivo en particular que se use,  $V_{GS-Th}$  puede variar desde menos de 1 hasta más de 5 volts.

Los JFET y los MOSFET de empobrecimiento están clasificados como tales porque su conductividad depende de la acción de las capas de depleción. El MOSFET de enriquecimiento está clasificado como un dispositivo de enriquecimiento porque su conductividad depende de la acción de la capa de inversión de tipo N. Los dispositivos de empobrecimiento conducen normalmente cuando la tensión de puerta es cero, mientras que los dispositivos de enriquecimiento están normalmente en corte cuando la tensión de la misma es también cero.

## Protección de los FET's

Como mencionamos anteriormente, los MOSFET contienen una delgada capa de dióxido de silicio que es un aislante que impide la corriente de puerta para tensiones de puerta tanto positivas como negativas. Esta capa de aislamiento se debe mantener lo más delgada posible, para proporcionar a la puerta mayor control sobre la corriente de drenador. Debido a que la capa de aislamiento es tan delgada, fácilmente se puede destruir con una tensión puerta-fuente excesiva; por ejemplo, un 2N3796 tiene una  $V_{GS MAX}$  de  $\pm 30$  volts. Si la tensión puerta-fuente es más positiva de +30 volts o más negativa de -30 volts, la delgada capa de aislamiento será destruida.

Otra manera en que se destruye la delgada capa de aislamiento, es cuando se retira o se inserta un MOSFET en un circuito mientras la alimentación está conectada; las tensiones transitorias causadas por efectos inductivos y otras causas, pueden exceder la limitación de  $V_{GS MAX}$ . De esta manera se destruirá el MOSFET incluso al tocarlo con las manos, ya que se puede depositar suficiente carga estática que exceda a la  $V_{GS MAX}$ . Esta es la razón por la que los MOSFET frecuentemente se empaquetan con un anillo metálico alrededor de las terminales de alimentación.

Muchos MOSFET están protegidos con diodos zener internos en paralelo con la puerta y la fuente. La tensión zener es menor que la  $V_{GS MAX}$ ; en consecuencia, el diodo zener entra en la zona de ruptura antes de que se produzca cualquier daño a la capa de aislamiento. La desventaja de los diodos zener internos es que reducen la alta resistencia de entrada de los MOSFET.

Por último, advertimos que los dispositivos MOSFET son delicados y se destruyen fácilmente; hay que manejarlos cuidadosamente. Asimismo, nunca se les debe conectar o desconectar mientras la alimentación esté conectada. Y antes de sujetar cualquier dispositivo MOSFET, es necesario conectar nuestro cuerpo al chasis del equipo con el que se está trabajando; así podrá eliminarse la carga electrostática acumulada en nosotros, a fin de evitar posibles daños al dispositivo.