

El transistor tipo MOSFET

El transistor tipo MOSFET

Introducción al transistor tipo MOSFET y a sus variantes

En esta experiencia educativa, se presenta el transistor MOSFET, sus modos de empleo y sus configuraciones. La relevancia de este dispositivo radica en que tiene un rol de gran importancia en el diseño y fabricación de circuitos integrados, como microprocesadores, microcontroladores, módulos de memorias, dispositivos de amplificación, así como en acondicionamiento de potencia y de alta frecuencia.

El transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor **MOSFET** (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*, por sus siglas en inglés) es un dispositivo electrónico de estado sólido utilizado para amplificar o conmutar señales eléctricas. La estructura básica de MOSFET fue propuesta por Atalla y Kahng, en 1959 (Bansal y Maiya, 2023), y consta de tres terminales: la **fente** o *source* (S), la del **drenador** o *drain* (D) y la de la **compuerta** o *gate* (G).

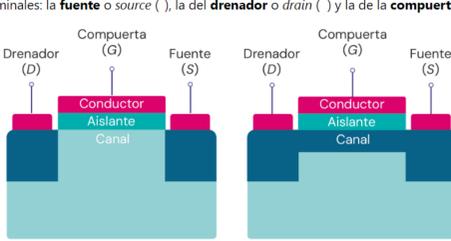


Figura 1. Representación esquemática de la estructura MOSFET.

Los transistores MOSFET surgen para aplicaciones en las que los **transistores BJT** no son adecuados, como en aquellas de alta frecuencia; en 1969, Hitachi inició la comercialización del primer MOSFET de potencia y, desde entonces, tanto configuraciones como estructuras de fabricación, se siguen perfeccionando con el objetivo de mejorar sus características eléctricas (Bansal y Maiya, 2023).

Durante la fabricación del dispositivo, la compuerta se sitúa sobre una región denominada canal; además, por debajo, entre este último y la compuerta, se deposita un material dieléctrico, como óxido de silicio (SiO_2), para formar un capacitor. La compuerta se fabrica con un material conductor, como polisilicio a manera de metal, así que queda aislada del canal mediante el óxido de compuerta. Para controlar su apertura y cierre en el momento preciso, el canal funciona como el medio por el cual los portadores de carga fluyen entre el drenador (algunos autores lo traducen como desagüe) y la fuente, en cantidad proporcional a un potencial (voltaje) aplicado en la compuerta; por su parte, el flujo de portadores se regula mediante la aplicación de un campo eléctrico en la compuerta, ya que así se permite la conducción a través del canal.

Los transistores MOSFET se dividen según el tipo de material semiconductor empleado para la fabricación del canal, por lo que pueden ser de **tipo n** o de **tipo p**; a su vez, estos se clasifican como de **enriquecimiento** o **empobrecimiento**, de acuerdo con el estado del transistor al tener un voltaje de polarización cero en la compuerta (Sedha, 2022). En la figura 1, se presenta un esquema de la estructura de los transistores MOSFET de enriquecimiento y empobrecimiento; mientras tanto, en la tabla 1, se muestran más detalles sobre cada tipo de estado.

Estado de enriquecimiento	Estado de empobrecimiento
<ul style="list-style-type: none"> También se le conoce como interruptor normalmente abierto o apagado. Ocurre cuando la conducción en el canal es muy baja, o bien, cuando el voltaje de polarización de la compuerta es cero, así que debe aplicarse un voltaje en dicho componente para permitir el flujo de portadores a través del canal. 	<ul style="list-style-type: none"> También se le denomina interruptor normalmente cerrado o encendido. Se presenta cuando el canal conduce, incluso aunque el voltaje de compuerta sea de cero, así que debe aplicarse un voltaje en dicho componente para detener el flujo de portadores.

Tabla 1. Comparativa entre MOSFET de enriquecimiento y empobrecimiento.

Comercialmente, los transistores MOSFET están disponibles en modo enriquecimiento y empobrecimiento, con cada tipo de canal (n o p). Los símbolos para representar a los transistores MOSFET en un diagrama electrónico se presentan en la siguiente figura:

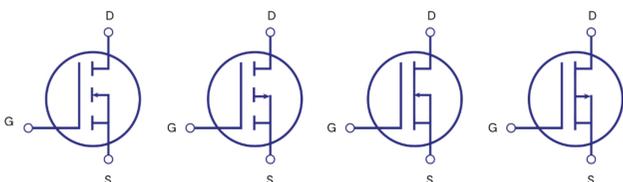


Figura 2. Símbolos eléctricos para representar al transistor MOSFET.

Una característica importante del funcionamiento de un MOSFET es la **curva IV**, en este caso, en función de V_{GS} , donde I_D es la corriente de drenaje en función del potencial aplicado entre drenaje y fuente V_{DS} , para un **voltaje de compuerta a fuente** V_{GS} fijo. La curva IV permite que los diseñadores de circuitos determinen los voltajes y corrientes necesarios para que el dispositivo funcione, dentro de los rangos adecuados, en la aplicación desarrollada.

Como ejemplo, hay que considerar un MOSFET-n de enriquecimiento al que se aplica un V_{GS} fijo; entonces, al variar V_{DS} , se obtiene valores de I_D , como se muestra en la figura 3:

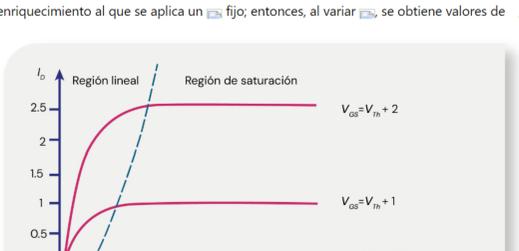


Figura 3. Curva característica IV de un transistor MOSFET-n de enriquecimiento.

Fuente: Bansal, M., y Maiya, R. (2023). A Taxonomical Review of MOS Power Transistors for Electronics Circuits and Devices. En N. Priyadarshi, K. Namrata, R. Bansal, y J. Kumar (Eds.), *Smart Energy and Advancement in Power Technologies*. Singapur: Springer Nature.

De acuerdo con Bai et al. (2023), en dicha curva, se distinguen tres regiones:

- Región de corte.** Sucede cuando V_{GS} es menor al voltaje de ruptura V_{th} , ya que V_{GS} es el voltaje necesario para activar el canal, condición en la que el transistor no conduce I_D .
- Región lineal u óhmica.** Corresponde a un incremento lineal de I_D para cierto rango de V_{DS} , siempre y cuando se cumpla que $V_{GS} > V_{th}$; esta región tiene aplicación en el modo de conmutación.
- Región de saturación.** Zona en la que I_D se mantiene prácticamente constante pese al incremento de V_{DS} ; esto significa que la corriente fluye a través del canal (se aplica en el diseño de amplificadores).

Para que la corriente I_D comience a circular por el canal y el dispositivo salga de la región de corte, el voltaje V_{GS} debe superar al **voltaje umbral** de compuerta V_{th} (*Threshold voltaje*, por sus siglas en inglés). Entonces, mientras $V_{GS} < V_{th}$, el transistor se comportará como un circuito normalmente abierto si el transistor es de enriquecimiento; en cambio, si es de empobrecimiento, funcionará como un circuito normalmente cerrado $I_D = 0$.

El transistor MOSFET como interruptor controlado

Una de las aplicaciones más comunes del transistor MOSFET es utilizarlo como un interruptor de **encendido o apagado**; esto se logra al pasar de la región de corte a la de saturación, o viceversa, mediante el control del voltaje V_{GS} . A manera de ejemplo, se puede considerar la **curva IV** de un MOSFET de **enriquecimiento**, como el que se mostró en la figura 3; por ende, mientras el voltaje aplicado entre la terminal de la compuerta y la del drenaje V_{GS} sea menor al de ruptura V_{th} , no existirá una corriente que circule desde la terminal del drenador, por lo que se dice que el dispositivo se encuentra apagado. En otras palabras, la corriente I_D será prácticamente nula cuando $V_{GS} < V_{th}$.

La siguiente tabla muestra la condición de encendido/apagado para transistores MOSFET:

Tipo de MOSFET	Condición		
	$V_{GS} \ll V_{th}$	$V_{GS} = 0$	$V_{GS} \gg V_{th}$
Canal n de enriquecimiento	Apagado	Apagado	Encendido
Canal n de empobrecimiento	Apagado	Encendido	Encendido
Canal p de enriquecimiento	Encendido	Apagado	Encendido
Canal p de empobrecimiento	Encendido	Encendido	Apagado

Tabla 2. Condiciones para la conmutación del MOSFET.

Fuente: Liu, T., Zhu, S., White, M., Salemi, A., Sheridan, D., y Agarwal, A. (2021). Time-Dependent Dielectric Breakdown of Commercial 1.2 kV 4H-SiC Power MOSFETs. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 9.

Configuraciones de amplificación con un transistor tipo MOSFET

La **amplificación de señales** es otra aplicación del transistor MOSFET, particularmente cuando se emplea como un **amplificador lineal**; para lograr su correcto funcionamiento, es necesario un voltaje de polarización V_{GS} fijo y calcular VDS para asegurar que I_D se mantenga en el **punto de operación Q**. Estos conceptos se emplean para las configuraciones de **fente, drenaje y compuerta comunes**.

En la configuración de **fente común**, se considera lo siguiente: 1) que la impedancia de entrada es infinita (la cual comprende la resistencia y la reactancia o resistencia en AC), es decir, como si no consumiera corriente; 2) la resistencia de salida es alta para asegurar una transferencia de potencia máxima; y 3) la ganancia en voltaje es alta (amplificación), pues un pequeño cambio en el voltaje de la compuerta produce una gran respuesta en la corriente de drenaje I_D , en cuanto incrementa la señal de entrada.

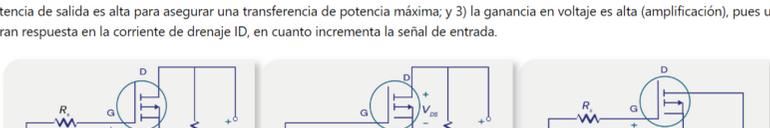


Figura 4. Configuraciones de un transistor MOSFET tipo n. Fuente: Sedra, A., Smith, K., Chan, T., y Gaudet, V. (2020). *Microelectronic Circuits*. Reino Unido: Oxford University Press.

En la configuración de **base común**, se considera lo siguiente: 1) una resistencia de entrada baja de $1/g_m$, donde g_m es la transconductancia relacionada con la corriente de drenaje I_D y con el voltaje de entrada V_{GS} , se considera un efecto no deseable, ya que se consumirá una gran corriente por un voltaje de entrada; 2) la ganancia de voltaje del amplificador puede ser similar, en magnitud, a la del amplificador en configuración fuente común, sobre todo si el paralelo de la resistencia de drenaje y la de carga se hace suficientemente grande, en comparación con la resistencia de la fuente sumada en serie con la transconductancia; 3) la resistencia de salida puede aumentar y equipararse con la del drenador para adecuar la transferencia de potencia máxima de salida; y 4) esta configuración tiene un buen rendimiento en altas frecuencias.

En la configuración de **drenador común** (seguidor), el transistor opera como un amplificador de ganancia unitaria con una impedancia de entrada muy grande y una de salida pequeña; en este caso, su utilidad es la de acoplar un circuito de alta impedancia con uno de baja, o bien, con un circuito que necesita un mayor suministro de corriente.

MOSFET de potencia y aplicaciones de conmutación

Los transistores **MOSFET de potencia** están mejorados para operar con corrientes y voltajes mucho más grandes que un MOSFET convencional, además de que poseen una mayor estabilidad térmica; asimismo, tienen una gran capacidad de **conmutación** (encendido-apagado), la cual es hasta 100 veces más rápida que la de un transistor BJT. Esto se logra debido a la formación de un diodo parásito interno entre la fuente y el drenador (**diodo conectado al cuerpo**), utilizado a la manera de un diodo de sujeción en conmutación de carga inductiva, como se representa en la figura 4 (Batarseh, 2011). Aunado a lo anterior, los fabricantes han logrado reducir las capacitancias internas del dispositivo, así como la impedancia interior del circuito de accionamiento de compuerta R_g , mediante la ingeniería del material de fabricación; esto incluye materiales semiconductores como silicio (**Si**), carburo de silicio (**SiC**), nitruro de galio (**GaN**).

Para conmutar del estado **apagado** al de **encendido**, se requiere que $V_{GS} > V_{th}$; en otras palabras, se debe superar el voltaje umbral antes de que exista un aumento considerable en la corriente de drenaje. Mientras esta condición no se cumpla ($V_{GS} < V_{th}$), el dispositivo actuará como un **interruptor abierto**. El valor de encendido $I_{D(on)}$ típico es de, al menos, 2 V y debe considerarse al diseñar el circuito de activación; luego, para regresar al estado de corte (**apagado**), se remueve el voltaje de polarización V_{GS} . Cabe mencionar que se requiere de cierto tiempo para conmutar entre los estados de apagado y encendido, ya que la velocidad de conmutación potencializa su uso en aplicaciones de alta frecuencia, como sucede con los circuitos.



Figura 4. Esquema de MOSFET tipo p de enriquecimiento. Fuente: Bai, H., Liu, C., Majstorovic, D., y Gao, F. (2023). *Power Electronic Devices*. Reino Unido: Academic Press.

En general, los MOSFET de potencia son dispositivos electrónicos caracterizados por bajas pérdidas, alta velocidad de conmutación y gran confiabilidad, los cuales se desempeñan en aplicaciones de alto voltaje y de elevada corriente, como en fuentes de alimentación conmutadas, variadores de frecuencia para motores AC y DC, amplificadores de radiofrecuencia desde UHF hasta microondas y en la industria automotriz. En la figura 5, se presenta un comparativo de aplicación a partir del material semiconductor empleado en su fabricación:



Figura 5. Áreas de aplicación de MOSFET de potencia.

Fuente: Prado, E., Bolsi, P., Sartori, H., y Pinheiro, J. (2022). An Overview about Si, Superjunction, SiC and GaN Power MOSFET Technologies in Power Electronics Applications. *Energies*, 15(14).

Referencias bibliográficas

- Bai, H., Liu, C., Majstorovic, D., y Gao, F. (2023). *Power electronic devices*. En *Real-Time Simulation Technology for Modern Power Electronics*. Reino Unido: Academic Press.
- Bansal, M., y Maiya, R. (2023). A Taxonomical Review of MOS Power Transistors for Electronics Circuits and Devices. En *Smart Energy and Advancement in Power Technologies*. Singapur: Springer Nature.
- Liu, T., Zhu, S., White, M., Salemi, A., Sheridan, D., y Agarwal, A. (2021). Time-Dependent Dielectric Breakdown of Commercial 1.2 kV 4H-SiC Power MOSFETs. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 9.
- Prado, E., Bolsi, P., Sartori, H., y Pinheiro, J. (2022). An Overview about Si, Superjunction, SiC and GaN Power MOSFET Technologies in Power Electronics Applications. *Energies*, 15(14).
- Sedha, S. (2022). *Field Effect Transistors*. En *A Textbook of Applied Electronics (LPSPE)*. India: Schand Company Limited.
- Sedra, A., Smith, K., Chan, T., y Gaudet, V. (2020). *Microelectronic Circuits*. Reino Unido: Oxford University Press.

