

**Tipos de transistor**

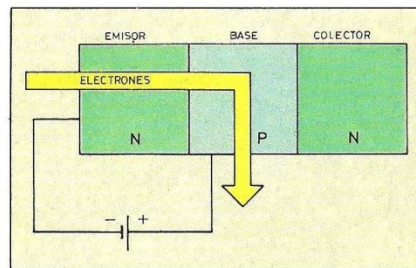
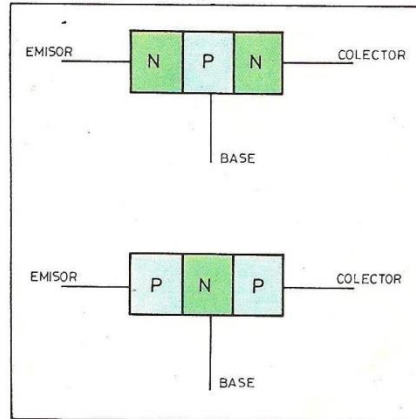
Un transistor está constituido internamente por un cristal semiconductor de germanio o silicio. Así como un diodo presenta dos zonas separadas por una unión, un transistor tiene tres zonas separadas por dos uniones.

Las zonas extremas son de igual naturaleza (N o P), mientras que la central es del tipo opuesto (P o N, respectivamente). Así, pueden darse dos tipos de transistor: el denominado NPN y el PNP.

Por las razones que ahora veremos, el electrodo central se denomina *base*, mientras que los extremos se denominan *emisor* y *colector*. Así, las dos uniones reciben los nombres de unión base-emisor y unión base-colector.

Supongamos que disponemos de un transistor NPN. Si nos olvidamos del colector, los otros dos electrodos forman un diodo. Si tal diodo se polariza en directo (base positiva, emisor negativo), circulará por él una cierta corriente. La corriente está formada por electrones que se mueven, de forma que pasan del emisor (el electrodo «emite» esa corriente; de ahí su nombre) a la base, que está a un potencial más positivo.

Si en esta situación, con la corriente emisor-base formada, se conecta el colector a una tensión positiva mucho mayor de la que se encuentra la



base, los electrones de tal corriente tenderán a marchar, en una proporción muy considerable, hacia ese potencial mayor del colector, que se les presenta mucho más «atractivo» que el pequeño potencial positivo al que se encuentra la base.

Ante esta situación, se ve claro que la corriente que se genera a partir del emisor se divide en dos caminos: uno que tiende a salir del transistor por su base y un segundo que va hacia el colector (de ahí el nombre del electrodo, «colector» de corriente).

Parece claro que cuanto más elevada sea la tensión del colector, más corriente «robará» a la base. Tal efecto no puede implicar, en ningún caso, que la corriente del colector sea superior a la del emisor. En la práctica, la tensión de colector con la que se consigue el máximo de corriente es comparativamente baja, por lo que el colector siempre va a obtener la mayor parte de la corriente de emisor, independientemente de su tensión.

Otra consecuencia parece clara: no puede existir corriente de colector si no existe corriente de emisor. Y otra más aún: cuanto mayor sea la corriente de emisor, mayor será la de colector.

Los transistores modernos se cons-

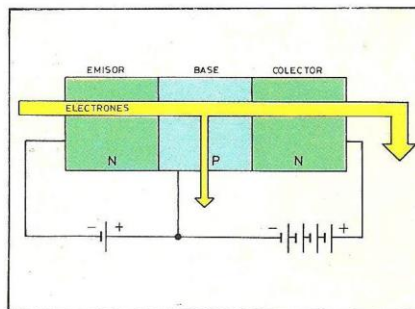
truyen con una geometría interna del cristal de tal manera que la mayor parte de la corriente de emisor vaya hacia el colector, y una pequeña fracción de aquélla (la menor posible) sea desviada hacia la base. La relación entre la corriente de colector y la de base se denomina *factor de amplificación de corriente*, y suele representarse por  $\beta$ . Así, el que un transistor tenga un valor de  $\beta = 200$ , significa que la corriente de colector es 200 veces la de base.

Puesto que la corriente de base es una fracción de la de colector, variando la corriente de base de un transistor, variará su corriente de colector (recordemos que esta última no puede existir sin aquélla). Aquí es donde estriba la gran ventaja de un transistor: con variaciones pequeñas de una corriente (la de base) pueden conseguirse variaciones muy grandes en otra (la de colector), pudiendo llegar a ser tal relación en los transistores modernos de hasta 500, siendo valores corrientes los comprendidos entre 50 y 200.

Todos estos fenómenos eran válidos para transistores NPN.

El razonamiento puede extenderse de igual forma para los de tipo PNP,

con la única condición de invertir las polaridades aplicadas sobre los electrodos. Así, la base debe ser ligeramente negativa respecto del emisor

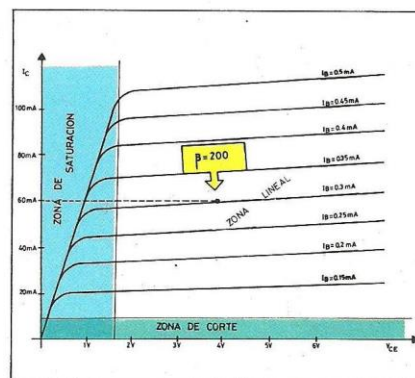


(tensión directa) y el colector debe ser muy negativo con respecto a la base (tensión-inversa). Por lo demás, el transistor PNP funciona exactamente igual que uno NPN.

Cuando se polariza la unión base-emisor en inversa (o con una pequeña tensión directa, que no llegue a la de umbral) no circula corriente alguna de base ni de emisor; consecuentemente, no hay tampoco corriente de colector, incluso aunque dicho electrodo tenga aplicada la tensión de polaridad y valor correctos. El transistor, entonces, se dice que está *cortado*, o *en corte*, ya que no permite el paso de corriente a su través.

Cuando la tensión de colector se mantiene baja, dicho electrodo es incapaz de absorber toda la corriente que circula desde el emisor a la base. En tal situación, el factor de amplificación de corriente ( $\beta$ ) «aparente» es bajo o muy bajo, y el transistor se dice *saturado*, o *en saturación*. Estos dos estados (corte y saturación) son los típicos de trabajo de un transistor cuando funciona en un equipo digital.

La zona de trabajo comprendida entre ambos se denomina *zona lineal*, y es en la que trabajan los transistores en los equipos analógicos.



**Polarización de un transistor**

Para que un transistor pueda funcionar necesita que sus tres electrodos (base, emisor y colector) reciban la tensión adecuada en valor y polaridad. Esto se consigue con el llamado *circuito de polarización*, habitualmente constituido por resistencias de diferentes valores. En la figura 1 se muestran algunos ejemplos.

Existen tres circuitos básicos en que puede utilizarse un transistor. Son los denominados en *emisor común*, en *base común* y en *colector común*. En el primero de ellos, la entrada de señal se realiza sobre la base, y la salida, sobre el colector. El *emisor* sirve de electrodo *común* a ambas (de ahí el nombre de la configuración). En el segundo montaje, la entrada se hace por el emisor y la salida por el colector, siendo en el tercero la entrada por base y la salida por emisor (ver figura 2).

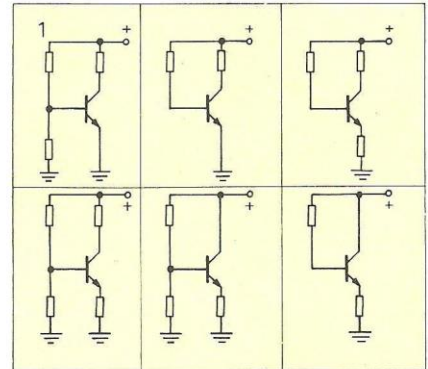
Cada una de las tres configuraciones básicas tiene sus propias características, que están resumidas en la tabla 1. La polarización del transistor debe incluirse en cada caso, aunque no siempre es posible emplear cualquier circuito de polarización en cualquier configuración básica. El transis-

| Configuración                    | Emisor común | Colector común | Base común |
|----------------------------------|--------------|----------------|------------|
| Impedancia de entrada            | Media        | Alta           | Baja       |
| Impedancia de salida             | Media        | Baja           | Alta       |
| Ganancia de tensión              | Media        | Unidad         | Alta       |
| Ganancia de corriente            | Media        | Alta           | Unidad     |
| Inversión de fase entrada-salida | Sí           | No             | No         |

tor en emisor común es, con mucho, la configuración más utilizada.

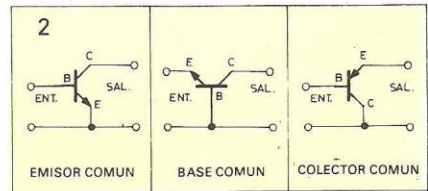
Cuando un transistor se utiliza en configuración de emisor común, la ganancia de tensión del circuito depende del valor de la amplificación de corriente del transistor utilizado. Dada la gran dispersión en los valores de tal parámetro, debido fundamentalmente al proceso de fabricación, puede ser difícil asegurar a priori cuál va a ser la ganancia de un circuito.

Esto puede obviarse empleando ciertas técnicas como, por ejemplo, la de *realimentación negativa*. Básicamente, esta técnica consiste en introducir en la entrada parte de la señal de salida (realimentación) con signo



opuesto al de aquella (negativa). Hay muchas formas de hacerlo, algunas de las cuales se muestran en la figura 3.

Aunque con esta técnica se pierde parte de la ganancia que es capaz de dar el circuito, se obtienen ciertas ventajas muy útiles, tales como una más amplia respuesta en frecuencia del circuito, una menor distorsión y, en particular, una ganancia global independiente de la ganancia en co-

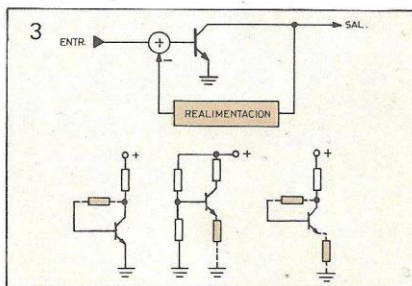


riente del transistor que se emplee, con lo que pueden diseñarse circuitos con una ganancia fija preestablecida de, pongamos, 50 veces, aunque el tipo de transistor empleado tenga una dispersión en el valor del factor de amplificación propio tan amplia como para que esté comprendida en el margen entre 100 y 500.

Todo lo dicho hasta ahora es válido cuando el transistor se emplea en su zona lineal, en la cual, las señales de salida del mismo tienen igual forma (idealmente) que las de entrada, aunque varían en su amplitud. Cuando el transistor se utiliza en circuitos digitales, sólo se le permite funcionar en uno de dos estados: cortado y saturado.

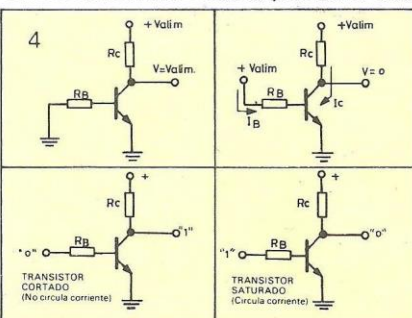
Un transistor en emisor común puede ser llevado al corte poniendo la base a igual tensión que el emisor. Así, no circulará corriente de base y tampoco de colector. La tensión de este último electrodo será igual a la de alimentación (figura 4).

Para saturar el mismo transistor debe polarizarse con una corriente de base elevada. Como la corriente de colector está limitada por la resistencia conectada entre él y la línea de alimentación positiva, el transistor se saturará cuando la corriente de base se haga de tal valor que provoque



una corriente de colector igual a la máxima que permita la resistencia externa. En esta situación, la tensión de colector será igual a cero.

Como puede verse, los dos estados del transistor son tan netamente diferentes, que son reconocidos fácilmente por cualquier circuito o equipo electrónico. Este tipo de circuito digital se denomina *binario*, por tener *dos*



estados posibles, que suelen denominarse "1" y "0", alto y bajo, encendido y apagado, sí y no, "on" y "off" y otras muchas parejas de denominaciones.

La tensión base-emisor de un transistor que funcione en su zona lineal se considera que es siempre constante (0,6 V para los de silicio y 0,2 V para los de germanio, ya muy poco utilizados). Por lo general, puede despreciarse para el cálculo de circuitos de polarización.

Cuando un transistor se satura, la tensión base-emisor es algo mayor de lo normal, y alcanza unos 0,8-0,9 V para un transistor de silicio. En esta misma situación, la tensión colector-emisor no se hace nula, sino que adopta un valor de unos 0,2 V. En transistores de potencia y para elevadas corrientes de colector, tal tensión puede ser más elevada, e incluso alcanzar 1 V ó 1,5 V (según el tipo de transistor).

Todo lo arriba comentado vale tanto para los transistores de germanio como de silicio, y tanto para los de tipo NPN como PNP. Sólo ha de tenerse en cuenta en cada caso particular la polaridad de las tensiones a aplicar, y cuando así se requiera, el valor de la tensión base-emisor (distinta para germanio y silicio).

**Tipos de transistor**

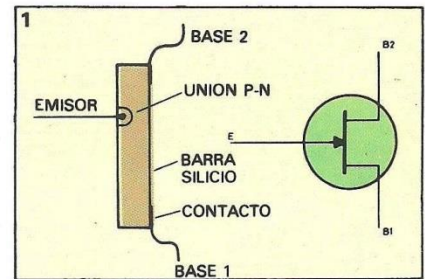
El nombre genérico de «transistor» proviene de la abreviatura de los términos anglosajones «transfer resistor», ya que originariamente la característica que mayores estudios ocasionó fue la de la variación de la resistencia eléctrica aparente de un cristal semiconductor (germanio o silicio, con las correspondientes impurezas), que podía conseguirse controlando o «transfiriendo» la corriente de uno de sus terminales (el llamado *base*).

Los primeros transistores que estuvieron disponibles en el mercado comercialmente fueron los llamados *bipolares*, cuyo funcionamiento ya ha sido objeto de comentario anteriormente, existiendo dos tipos básicos: PNP y NPN. Sin embargo, puede aplicarse el nombre de *transistor* a cualquier otro dispositivo semiconductor cuya «resistencia» pueda ser controlada con ayuda de una tensión y/o una corriente en uno de sus terminales.

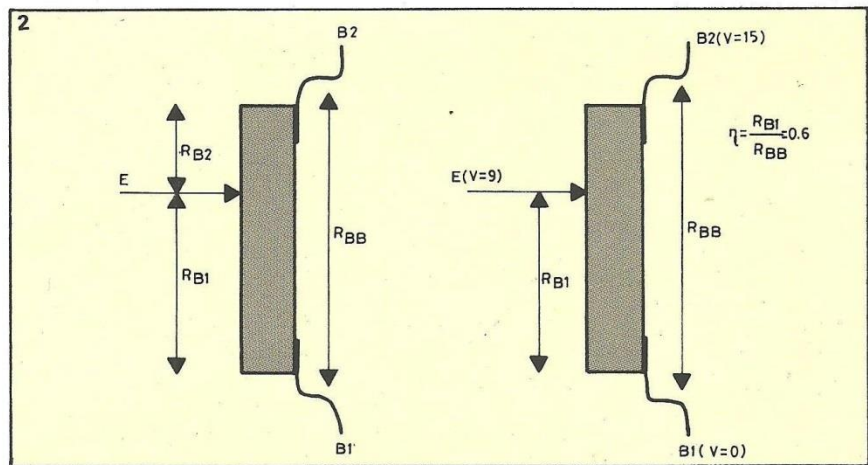
Este es el caso de los transistores denominados *uniunion* (en inglés, «unijunction transistor», abreviado comúnmente como UJT). Tales dispositivos están constituidos internamente por una barra de material

semiconductor (generalmente silicio tipo N) de cuyos extremos se toman dos contactos, que se denominan *bases*, y cuya nomenclatura más corrientemente usada es la de B1 y B2.

En un punto de la barra, intermedio entre ambas bases, se conecta un tercer terminal, de forma que el contacto establecido forme una unión semiconductor, o unión P-N, correspondiendo la zona P al nuevo contacto, y la zona N de la barra. Tal terminal se denomina *emisor* (figura 1), y el contacto actúa real-



mente como un *diodo* (ánodo en el emisor, cátodo sobre la barra). Entre el emisor y cada una de las bases, la barra de silicio presenta



una cierta resistencia eléctrica, simbolizadas generalmente como  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$ , siendo su suma igual a la resistencia eléctrica entre extremos o bases ( $R_{BB} = R_{B1} + R_{B2}$ ). Para un transistor dado, la relación entre  $R_{B1}$  y  $R_{BB}$  será fija. Tal cociente suele denominarse *relación intrínseca*, y su valor viene dado por el fabricante. Suele simbolizarse como  $\eta$  ( $\eta = R_{B1}/R_{BB}$ ).

**Funcionamiento**

Cuando entre las bases se aplica una cierta tensión (por ejemplo, 15 V), por la barra semiconductor circula una cierta corriente cuyo valor depende del modelo de transistor empleado. La tensión, a lo largo de la barra, variará desde 0 V, en B1, hasta 15 V, en B2, siendo la tensión correspondiente al emisor  $\eta$  veces la aplicada entre bases. Si, por ejemplo,  $\eta$  tiene un valor de 0,6, la tensión en dicho terminal será de:  $0,6 \times 15 = 9$  V (figura 2).

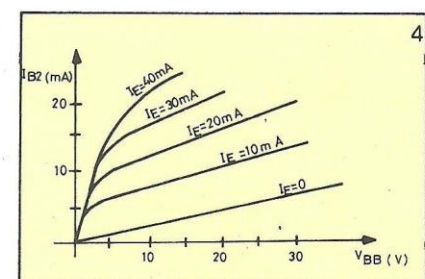
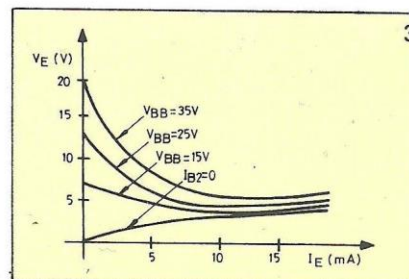
Puesto que el contacto sobre la barra puede verse como el cátodo de un diodo, y sobre tal cátodo existe una tensión de 9 V, mientras que al terminal emisor (ánodo del mismo diodo) no se aplique una tensión superior a esos 9 V, el citado diodo

no entrará en conducción, y por el emisor no circulará corriente alguna. El transistor uniunión, se dice en esta situación que está *en corte*.

Cuando la tensión exterior aplicada sobre el emisor supera la de conducción del «diodo» interno (unos 9,6 V, para el ejemplo), por dicho terminal comienza a circular corriente, comportándose el conjunto emisor-base1 como un diodo semiconductor normal, con lo que la tensión sobre el emisor pasa a ser de un valor muy bajo (la de umbral de un diodo de silicio, unos 0,6 V). Mientras dura esta transición, se dice que el transistor está en la *zona de resistencia negativa*, debido a que a un *aumento* de la corriente le corresponde una *disminución* de la tensión.

Una vez que en el transistor se ha estabilizado la corriente de emisor, la situación permanece estable, diciéndose que se encuentra *saturado*. Tal situación se mantiene hasta que la corriente de emisor baja a un valor tal que el transistor vuelve a su situación primitiva (región de corte).

La figura 3 muestra las llamadas *curvas de entrada* de un UJT, o relación entre la corriente y la tensión de emisor. La figura 4 da las *curvas de salida*, o relación tensión-corriente entre las bases del transistor. Puede verse que la resistencia (cociente entre la tensión y la corriente) del dispositivo semiconductor puede hacerse variar con la corriente de emisor; de aquí que a tal dispositivo pueda aplicarse la denominación genérica de *transistor*.



**Fundamentos**

Los transistores de efecto de campo son también denominados comúnmente FET, de las iniciales de la terminología «field effect transistor». Son dispositivos semiconductores formados por capas de material P y N tal y como se indica en la figura 1, que representa un FET de canal N.

Los dos electrodos conectados a los extremos se denominan *fuentes* y *drenador* (en inglés, «source» y «drain»), mientras que el central y el conectado al sustrato reciben el nombre de *puertas* («gate»), y usualmente se corresponden con un único terminal disponible exteriormente (figura 2).

Las distintas uniones P-N existentes hacen que sólo pueda circular corriente entre drenador y fuente cuando entre dichos electrodos existe una tensión. Dicha corriente circula a través de un pequeño canal entre ambas uniones, de donde recibe el nombre el dispositivo. Cuando sobre las puertas (de material tipo P) se aplica una tensión negativa, las uniones se polarizan en inversa, lo que hace que la anchura de tales uniones aumente. Esto significa que la anchura del «canal»

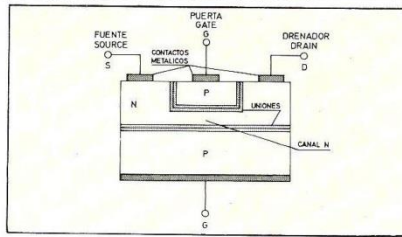


Figura 1. Corte esquemático de la estructura interna de un FET.

disminuye, su resistencia eléctrica aumenta y la corriente a su través disminuye (figura 3).

**Saturación**

Cuando el dispositivo funciona como más arriba se menciona, se dice que trabaja en la *zona lineal*. Si la tensión positiva del drenador es suficientemente elevada, las dos uniones existentes llegan a tocarse

Figura 3. El canal del FET se estrecha e impide el paso de corriente cuando sobre la puerta se aplica una tensión negativa.

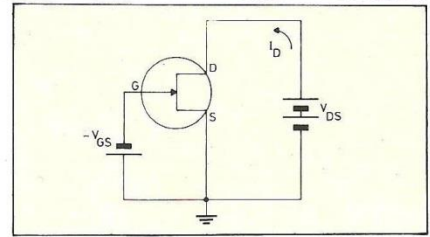
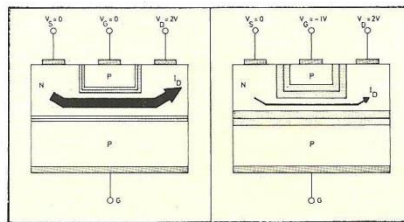


Figura 2. Símbolo de un FET (canal N) y tensiones de polarización.

en una región próxima a dicho electrodo. Aumentando aún más tal tensión, la corriente del canal permanece constante. Se dice que el FET está en *saturación* (figura 4). Cuando el FET está saturado, también la tensión de puerta ejerce su acción sobre la corriente (constante) del canal, siendo su comportamiento totalmente similar al de un transistor bipolar que trabaje en su zona lineal aunque ahora es la *tensión de puerta* la que controla el dispositivo, en lugar de ser la *corriente de base* la que lo haga.

**Características**

El principal atractivo de un FET es su elevada resistencia de entrada (entre puerta y fuente), dado que se trata de una unión polarizada en inversa (valores típicos de  $10^8 \Omega$ ; esto

es,  $100 M\Omega$ ). Esto hace que sea un dispositivo controlable con una *tensión*, en lugar de con una *corriente*, como ocurre con un transistor bipolar.

Aunque sólo se ha mencionado la existencia de los FET de canal N, también los hay de canal P, formados por zonas semiconductoras de carácter opuesto a los de canal N (puertas N; drenador y fuente P). El funcionamiento es idéntico al de aquéllos, aunque las tensiones de puerta deben ser ahora *positivas*, en lugar de negativas.

**El MOST o MOSFET**

Este dispositivo tiene características totalmente similares a un FET, aunque su principio de funcionamiento físico difiere ligeramente de aquél. Su denominación proviene del término «metal oxide semiconductor transistor». Su constitución física es tal como se muestra en la figura 5, para un dispositivo de canal N. Cuando sobre la puerta se aplica una tensión positiva, se crea un campo eléctrico a través del óxido que atrae algunos electrones del sustrato tipo P. Tal efecto equivale a la formación de un canal N, cuya anchura dependerá de la tensión

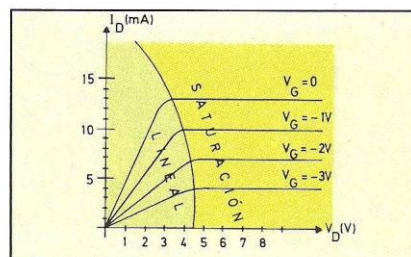


Figura 4. Curvas características de un FET.

aplicada a la puerta. Por tanto, las características serán las mismas que para un FET.

Figura 6. Símbolos circuitales empleados para MOST.

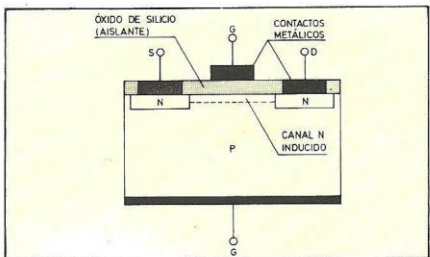
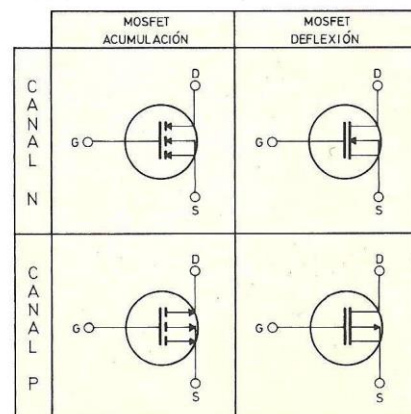


Figura 5. Corte esquemático de la estructura interna de un MOST.

Las diferencias con los FET están en algunos de sus parámetros. Por ejemplo, la resistencia de entrada es mucho mayor, dado que no existe una unión polarizada en inversa, sino una verdadera zona aislante (el óxido de silicio). Pueden encontrarse valores típicos de  $10^{10} \text{ ohmios}$  (¡10000 megohmios!). En el MOSFET descrito se *forma* un canal por acción de la tensión aplicada a la puerta; este tipo de transistor se denomina *de acumulación*. En un MOSFET de *deplexión* el canal existe, incluso aunque no se aplique tensión de puerta. Aunque su constitución física es similar a la de un FET, la diferencia básica con él es la existencia de la capa aislante de óxido que los encierra dentro de los de tipo MOST.