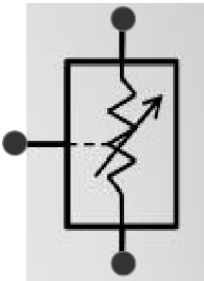


Tema 13: Transistores

Fundamentos Físicos y Electrónicos de la Informática

Introducción

Transistor

- ▶ Dispositivo electrónico de 3 terminales
 - ▶ El voltaje y/o la intensidad del terminal de control determinan el comportamiento de los otros dos terminales
- 
- ▶ Comportamiento similar a una resistencia controlada, o TRANS-resISTOR

Funciones principales de un transistor

- ▶ Amplificador
- ▶ Conmutador (interruptor)

Introducción

Función como amplificador

Ejemplo: Un amplificador simple

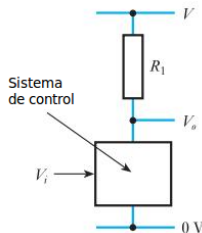
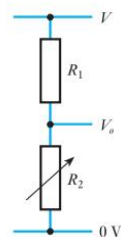
- Divisor de tensión con R_2 variable

$$V_0 = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

- ▶ Si R_2 disminuye V_0 se reduce
- ▶ Si R_2 aumenta V_0 aumenta

• Sustituimos R_2 por algún sistema de control (*transistor*) que con un voltaje de entrada V_i controla su resistencia \rightarrow **Variando** V_i **varío** V_0

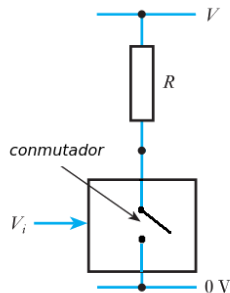
- Pequeños cambios de V_i pueden provocar grandes cambios de salida



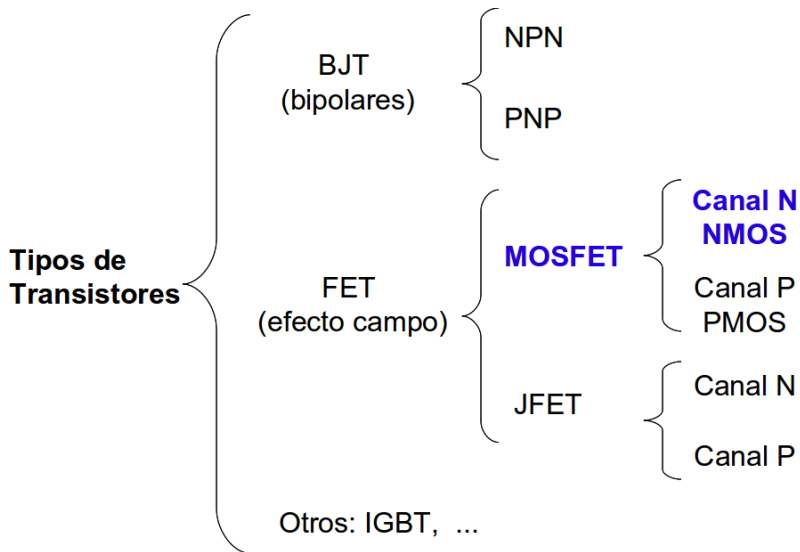
Introducción

Función como conmutador

La resistencia equivalente del transistor debe de ser muy grande (corte) o muy pequeña (conducción)



Introducción



Transistores de efecto campo (FET)

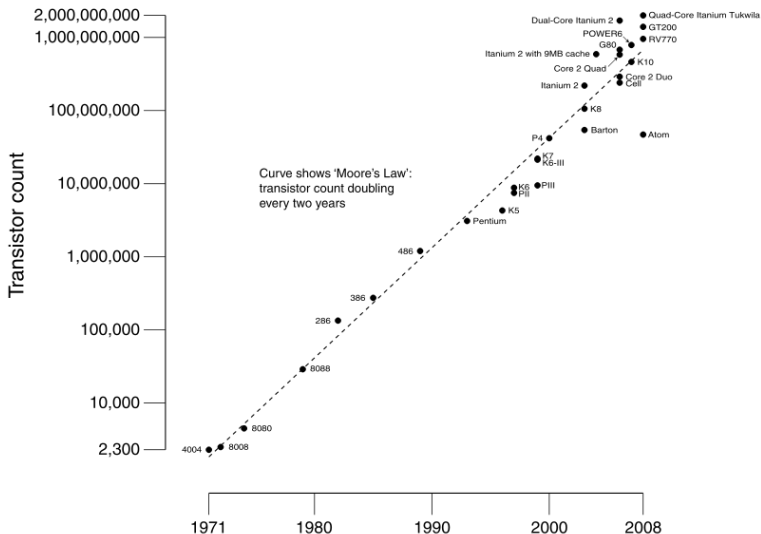
- FET : Transistor de Efecto Campo, en inglés *Field-Effect Transistor*
- Unipolar: sólo un tipo de portador participa en la conducción
- FET se usa tanto en aplicaciones analógicas o digitales.
- Los 2 tipos principales de FET son
 - ▶ JFET: Transistor de Efecto de Campo de unión
 - ▶ **MOSFET**: Transistor de Efecto Campo Semiconductor de Oxido metálico
- FET es un dispositivo controlado por voltaje

Transistores de efecto campo (FET)

- Se pueden fabricar con pequeñas dimensiones, esto ha fomentado la integración a escala muy grande en circuitos (VLSI, *very large scale integration circuits*).
- Dispositivo dominante en los circuitos integrados modernos
- Funciones del FET :
 - ▶ *Amplificación*: Menos frecuente, comportamiento no lineal.
 - ▶ **Conmutación**: Son mucho más rápidos que los BJT.
- Los MOSFET son la base de circuitos digitales, memorias y microprocesadores.
- En un circuito integrado (CI) podemos encontrar millones de transistores.

Transistores de efecto campo (FET)

CPU Transistor Counts 1971-2008 & Moore's Law



Estructura del MOSFET

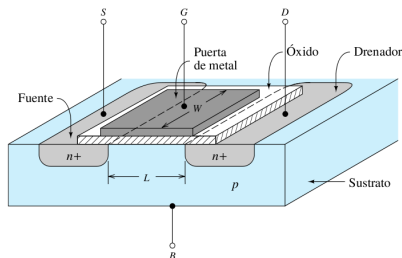
MOSFET: Transistor de Efecto Campo Semiconductor de Oxido metálico

- Se emplea tanto en circuitos discretos (interruptor de potencia) y circuitos integrados (conmutación digital)

NMOS o MOSFET de acumulación de canal n

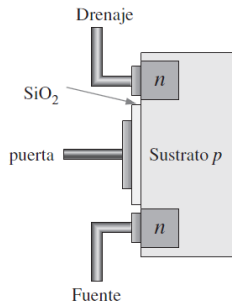
Es el tipo MOSFET en que nos vamos a centrar el resto del tema.

- Tiene las siguientes partes:
Drenador o Drenaje (D), Puerta (G), Fuente (S) y Sustrato (B)
- B es una pieza de semiconductor tipo *P* en la que se incluyen 2 regiones tipo *N* para formar S y D.



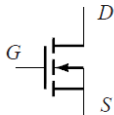
Estructura del MOSFET

- La G es de metal y está aislada del sustrato mediante una capa de óxido de silicio (aislante). Por la puerta no fluye corriente, $i_G = 0$.
- En su funcionamiento normal la corriente no pasa por el sustrato, sino por un canal de material semiconductor que se genera debajo de la puerta.

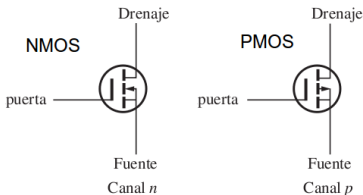


Estructura del MOSFET

- El B está conectado a la S, así NMOS es un dispositivo de 3 terminales, y este el símbolo empleado.



- Existen MOSFET de acumulación (o enriquecimiento) de canal P , PMOS. El comportamiento es similar aunque la polaridad de algunas corrientes y voltajes se invierte.



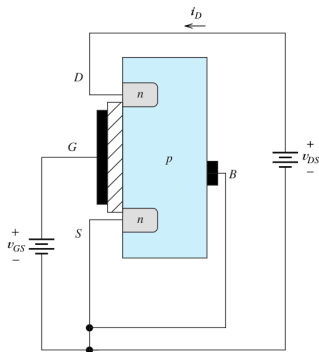
Funcionamiento del MOSFET

Notación

v_{DS} = voltaje en el drenador respecto a la fuente

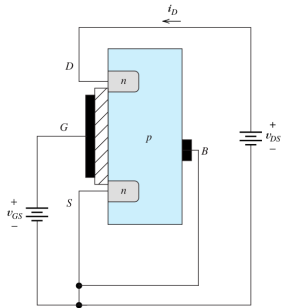
v_{GS} = voltaje en la puerta respecto a la fuente

i_D = corriente entrando en el drenador

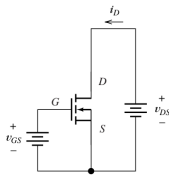


Funcionamiento del MOSFET: Región de corte

- Las interfaces D-B y S-B son uniones PN
- Si $v_{DS} > 0$ y $v_{GS} = 0 \Rightarrow i_D = 0$ porque la unión D-B está polarizada en inversa.
- Si aumentamos v_{GS} el dispositivo estará en corte hasta que $v_{GS} > v_{to}$
 v_{to} = voltaje umbral (de uno a varios voltios)
- En corte no fluye ninguna corriente hacia el D, $i_D = 0$



Para $v_{GS} < V_{to}$, la unión pn entre drenador y sustrato está polarizada en inversa, e $i_D = 0$.



MOSFET está en corte si

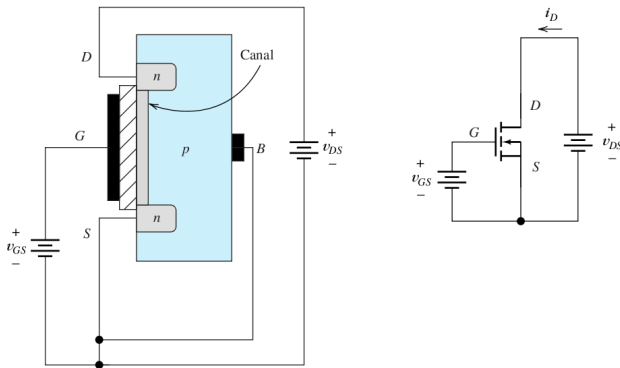
$$v_{GS} < v_{to} \Rightarrow i_D = 0$$

En corte

Entre DS similar a un interruptor abierto.

Funcionamiento del MOSFET: Región óhmica

- Si $v_{GS} > v_{to} \Rightarrow$ el campo eléctrico en G repele los huecos y atrae los electrones
- Esto produce un canal de tipo N entre el D y la S por el que puede circular la corriente



- Si aumentamos v_{DS} , aumentamos la corriente que va de S a D a través del canal

Funcionamiento del MOSFET: Región óhmica

- Si v_{GS} aumenta \rightarrow el canal se hace más ancho
- Para valor pequeño dado de v_{DS}

► $i_D \propto v_{DS}$

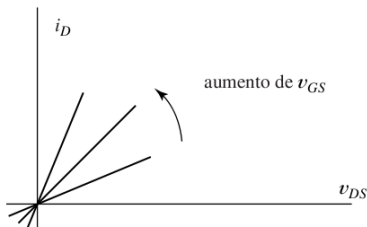
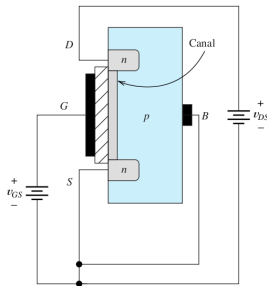
► $i_D \propto (v_{GS} - V_{to})$

- Entre el D y la S, el NMOS se comporta como una resistencia que disminuye al aumentar v_{GS} (resistencia controlada por tensión)

$$\rightarrow R_{DS(ON)} = \frac{v_{DS}}{i_D}$$

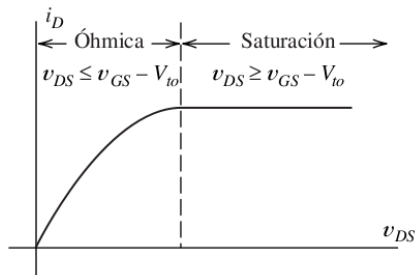
En region ohmica

Entre D y S, similar a un interruptor cerrado



Funcionamiento del MOSFET

- Si seguimos aumentando v_{DS} la tensión entre los puntos del canal y la S se hace mayor a medida que nos desplazamos hacia el D.
- La tensión entre la puerta y el canal disminuye, resultando en un afilamiento del canal y con ello aumento de la resistencia del canal.



MOSFET está en R. Óhmica si

$$v_{DS} < v_{GS} - v_{to} \quad \text{y} \quad v_{GS} > v_{to}$$

MOSFET está en R. Saturación si

$$v_{DS} > v_{GS} - v_{to} \quad \text{y} \quad v_{GS} > v_{to}$$

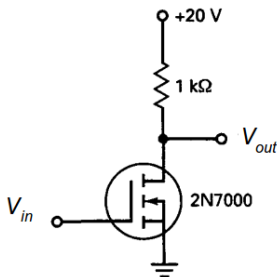
En R. Saturación el MOSFET

- Es una fuente de corriente controlada por tensión
- Debe estar el MOSFET si lo queremos emplear como amplificador

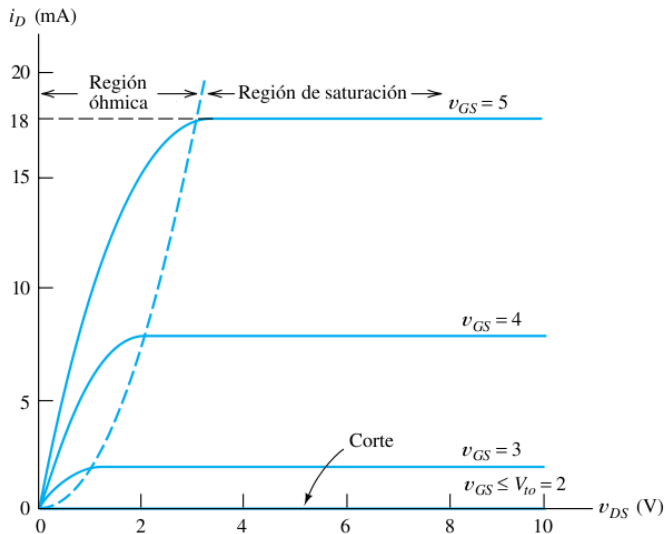
Funcionamiento del MOSFET

Ejemplo 1: El 2N700 es un MOSFET con $v_{to} = 2 \text{ V}$ y $R_{DS(ON)} = 6 \Omega$. Calcular el voltaje de salida V_{out} y la corriente a través del transistor i_D , cuando a) $V_{in} = 0 \text{ V}$ y b) $V_{in} = 4.5 \text{ V}$.

Sol. a) $V_{out} = 20 \text{ V}$, $i_D = 0$; b) $V_{out} = 0.12 \text{ V}$, $i_D = 20 \text{ mA}$



Funcionamiento del MOSFET



Curvas características de un transistor NMOS.

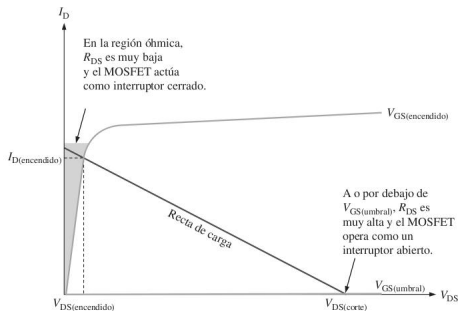
MOSFET como Conmutador

En un MOSFET sabemos que

- ▶ Si $v_{GS} < v_{to}$ está en Corte \rightarrow interruptor abierto (apagado)
- ▶ Si $v_{GS} > v_{to}$ y $v_{DS} < v_{GS} - v_{to}$ está R. Óhmica \rightarrow interruptor cerrado (encendido)

• En el estado apagado, el MOSFET opera en el límite inferior de la recta de carga y actúa como interruptor abierto (R_{DS} muy alta).

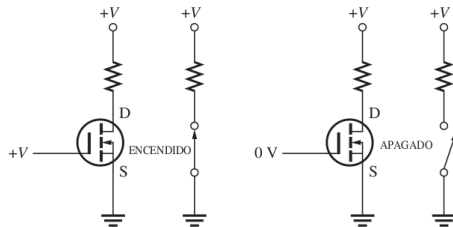
• En el estado encendido, el MOSFET opera en el extremo superior de la recta de carga en la región óhmica y actúa como interruptor cerrado con una resistencia muy baja ($R_{DS} = R_{DS(ON)}$).



MOSFET como Conmutador

- Podemos construir un interruptor o conmutador con el MOSFET

- Cuando el voltaje en la G es V , con $V > V_{to}$, el MOSFET está encendido y aparece como **interruptor cerrado** entre el D y S

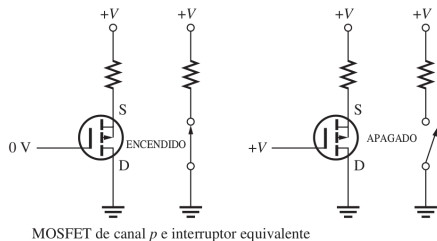


MOSFET de canal n e interruptor equivalente

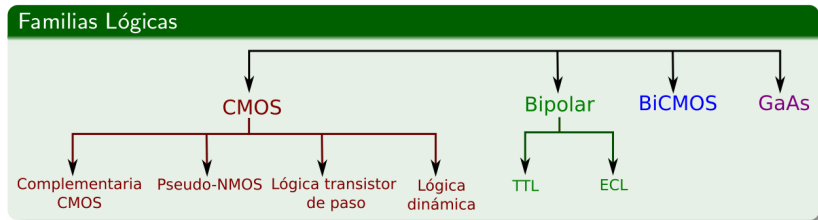
- Cuando el voltaje en la G es cero, el voltaje entre ésta y la S es 0 V. El MOSFET está apagado y aparece como **interruptor abierto** entre el D y la S

MOSFET como Conmutador

- Un MOSFET de canal p (PMOS) también puede ser empleado como conmutador.
- Cuando el voltaje en la G es nulo, $V_{GS} < V_{to}$. El PMOS está encendido y se comporta como un interruptor cerrado entre el D y la S.
- Cuando el voltaje en la G es $+V \Rightarrow V_{GS} = 0$. El MOSFET está apagado y se comporta como un interruptor abierto entre el D y la S.



Circuitos lógicos digitales



- Familias lógicas → Grupos de circuitos integrados (CI) que implementan puertas lógicas y que están basados en la misma tecnología de fabricación y diseñados para ser compatibles entre sí.
- Puerta lógica es un dispositivo electrónico con una función booleana.
- Existen diversas tecnologías para implementar las funciones lógicas necesarias para la construcción de sistemas digitales.
- Primeros circuitos integrados lógicos implementaban pocas puertas por dispositivo, actualmente los circuitos integrados programables integran un elevado número de puertas

Circuitos lógicos digitales

- Los circuitos lógicos digitales usan dos niveles: **alto (1) y bajo (0)**.
- Vamos a centrarnos los circuitos básicos con MOSFET que constituyen las familias lógicas.
- Las familias basadas en tecnología CMOS predominan actualmente

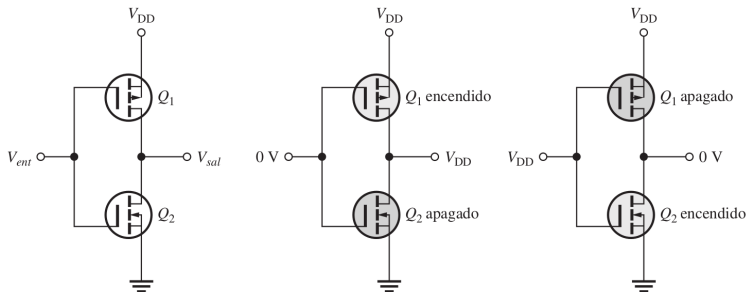
CMOS (MOS complementario)

Tecnología que consiste en la utilización conjunta de transistores de tipo PMOS y tipo NMOS.

- **Ventajas de CMOS:** Mejora el consumo de energía y permite una mayor densidad de componentes por unidad de superficie

Circuitos lógicos digitales

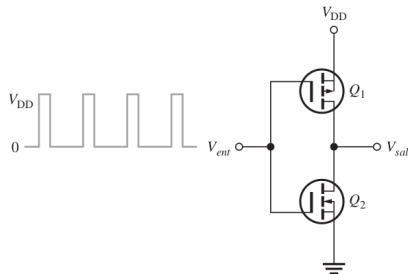
Inversor lógico (NOT)



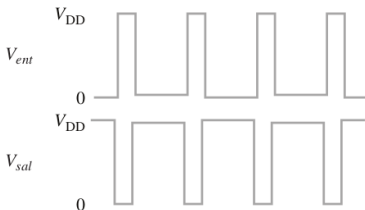
- V_{DD} como tierra están conectados a la S de los transistores.
- Cuando $V_{ent} = 0\text{ V}$, Q_1 está encendido y Q_2 apagado $\Rightarrow V_{sal} \sim V_{DD}$
- Cuando $V_{ent} = V_{DD} \Rightarrow Q_2$ está encendido y Q_1 apagado $\Rightarrow V_{sal} \sim 0$

Circuitos lógicos digitales

Ejemplo 2: Se aplica una forma de onda pulsante a un inversor CMOS como se muestra en la figura. Determine la forma de onda de salida y explique la operación.

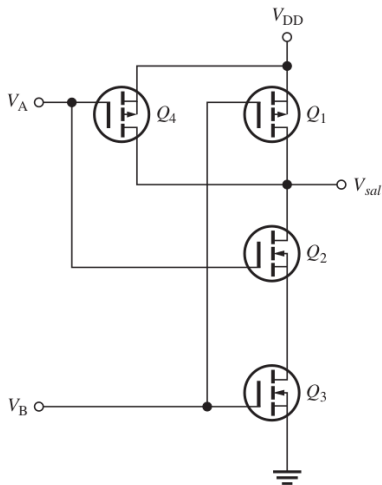


Sol.



Circuitos lógicos digitales

Puerta NAND

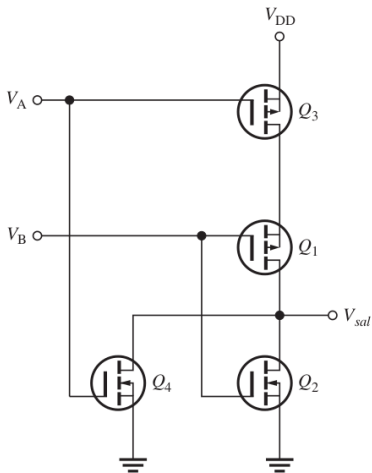


V_A	V_B	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	V_{sal}
0	0	on	off	off	on	V_{DD}
0	V_{DD}	off	off	off	on	V_{DD}
V_{DD}	0	on	off	off	off	V_{DD}
V_{DD}	V_{DD}	off	on	on	off	0

on = encendido off = apagado

Circuitos lógicos digitales

Puerta NOR



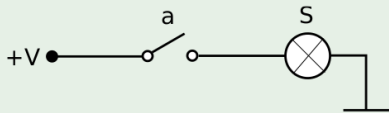
V_A	V_B	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	V_{sal}
0	0	on	off	on	off	V_{DD}
0	V_{DD}	off	on	on	off	0
V_{DD}	0	on	off	on	off	0
V_{DD}	V_{DD}	off	on	off	on	0

on = encendido off = apagado

Funciones Lógicas: ejemplos

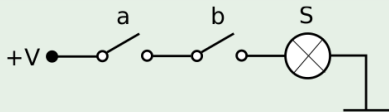
1 $S = a$

Función Igualdad



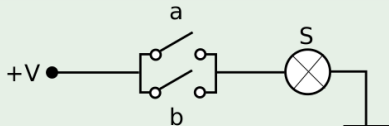
2 $S = a \cdot b$

Función Intersección



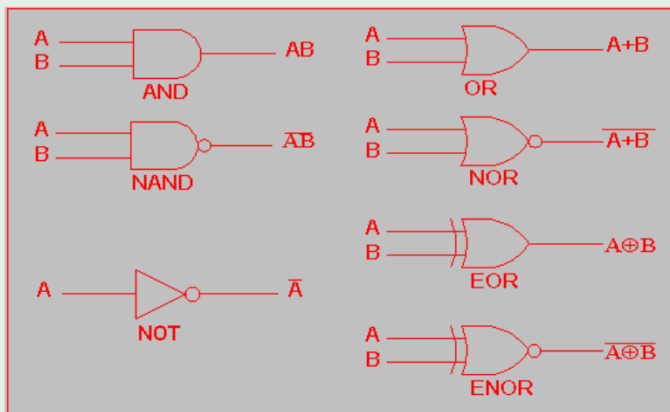
3 $S = a + b$

Función Unión



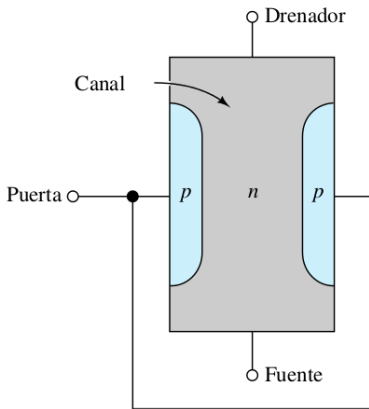
Funciones Lógicas:representación. Puertas Lógicas

Puertas Lógicas

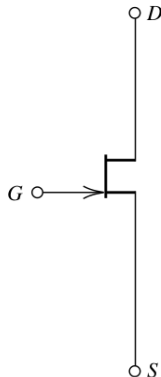


JFET

Transistor de efecto de campo de unión (*junction field-effect transistor*)



(a) Estructura física simplificada



(b) Símbolo de circuito

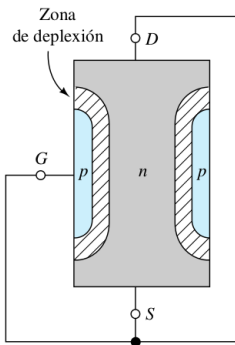
JFET de canal n .

JFET

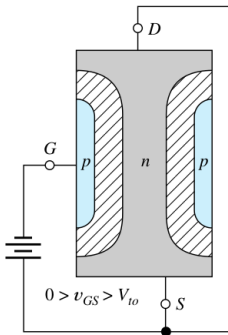
- Consiste en un canal de semiconductor tipo N, con contactos en cada extremo, llamados drenador y fuente.
- A los lados del canal hay regiones de semiconductor tipo P conectadas entre sí y al terminal denominado puerta
- La puerta es negativa con respecto al canal durante el funcionamiento normal de un JFET de canal N
- La unión entre la puerta y el canal está polarizada en inversa, prácticamente no entra ninguna corriente a través del terminal de la puerta.
- Cuanto mayor es la polarización inversa, más gruesa se hace la zona de deplexión.
- Al final, la zona no conductora ocupa toda la anchura del canal, y decimos que ocurre un fenómeno llamado estrangulamiento (pinch-off)
- La resistencia entre drenador y fuente depende de la polarización puerta-canal

JFET

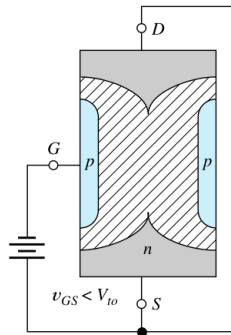
Transistor de efecto de campo de unión (*junction field-effect transistor*)



(a) La polarización es cero, y la zona de depleción es delgada; existe un canal de baja resistencia entre el drenador y la fuente.



(b) Una polarización inversa moderada entre puerta y canal da como resultado un canal más estrecho.

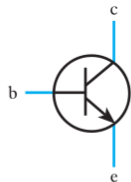
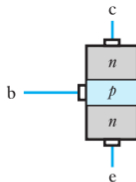


(c) Polarización mayor que la tensión de estrangulamiento; no hay camino conductor entre drenador y fuente.

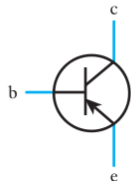
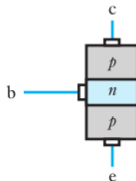
La zona de depleción no conductora se hace más ancha a medida que aumenta la polarización inversa. *Nota:* las dos regiones de puerta de cada FET están conectadas entre sí.

Transistor bipolar (BJT)

- En inglés *Bipolar Junction Transistor* (BJT)
- *Bipolar*: electrones y huecos participan en la conducción
- BJT es un componente básico en la construcción de circuitos analógicos y digitales.
- Funciones del BJT
 - ▶ Amplificación
 - ▶ Conmutación
 - ▶ Regulación
- Está formado por 3 capas de semiconductor alternadas (2 uniones *PN*)



nnp transistor



pnp transistor

Transistor bipolar (BJT)

- Un BJT npn está constituido por una fina capa de semiconductor tipo p entre 2 capas de material tipo n

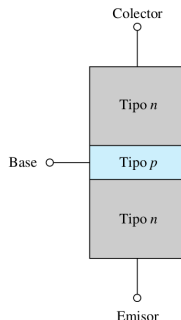
- También podemos construir un BJT pnp

- 3 terminales: Base (B), Colector (C) y Emisor (E)

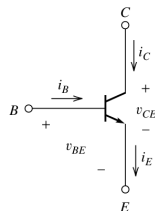
Base = Capa intermedia, mucho más delgada, levemente dopada

Emisor = Alto dopaje comparado con la base

Colector = Nivel dopaje intermedio



(a) Estructura física simplificada



(b) Símbolo esquemático

El transistor bipolar *nnp*.