Tecnología CMOS.
Conceptos básicos.

Disseny Bàsic VLSI

Departament d'Arquitectura de Computadors
Universitat Politècnica de Catalunya

Objetivos

MOS: Metal - over - silicon:

Conocer como se diseñan distintos tipos de estructuras lógicas mediante la utilización de la tecnología MOS.

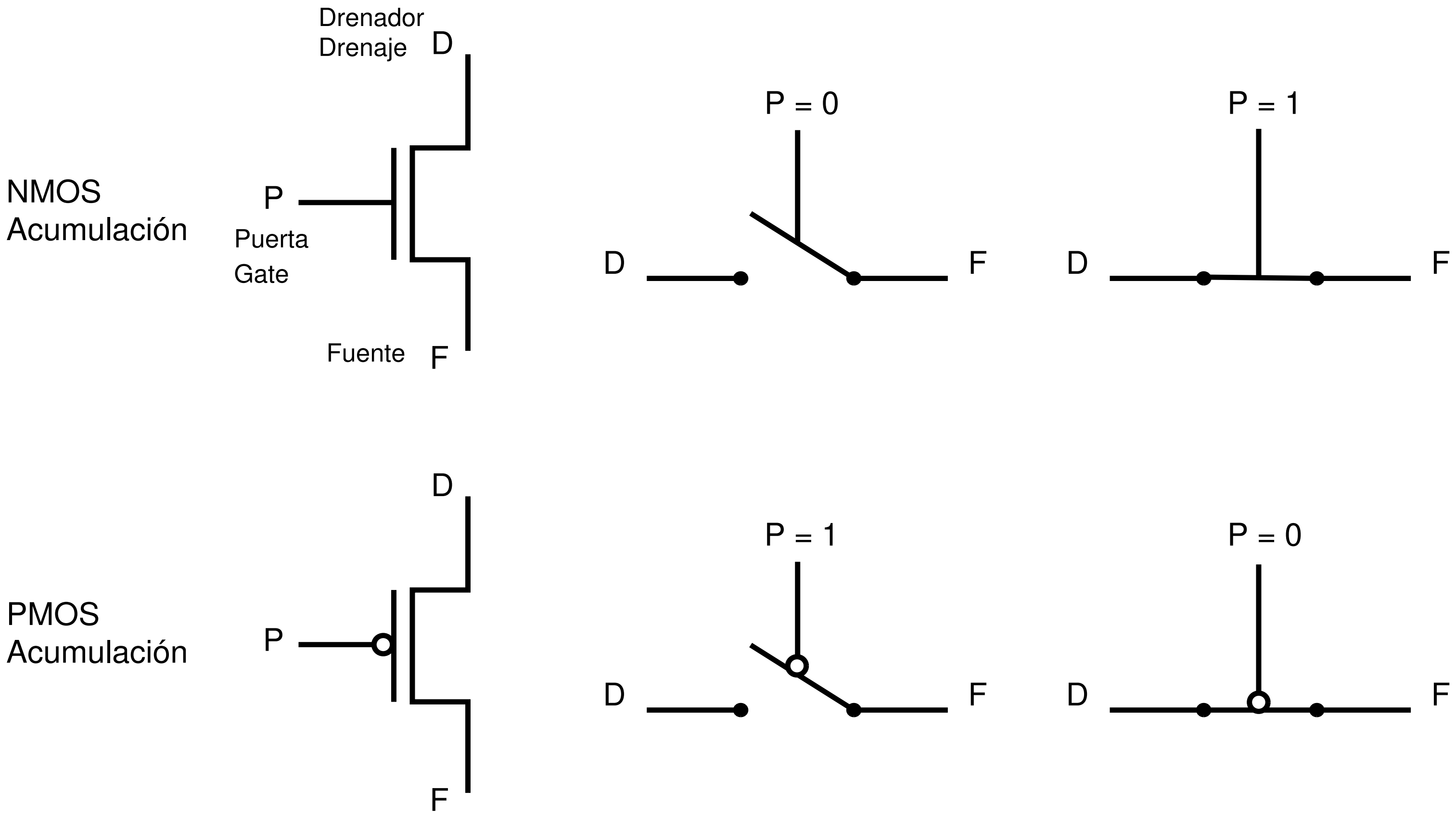
Tener una visión general de los aspectos físicos que influencian el rendimiento la tecnología MOS.

El contenido del tema se centra en:

- Comportamiento lógico del transistor MOS.
- Introducción a las estructuras lógicas combinacionales.
- Conceptos básicos sobre el transistor MOS.
- Repaso de conceptos físicos básicos:
  resistencia, capacidad, retardo, consumo.

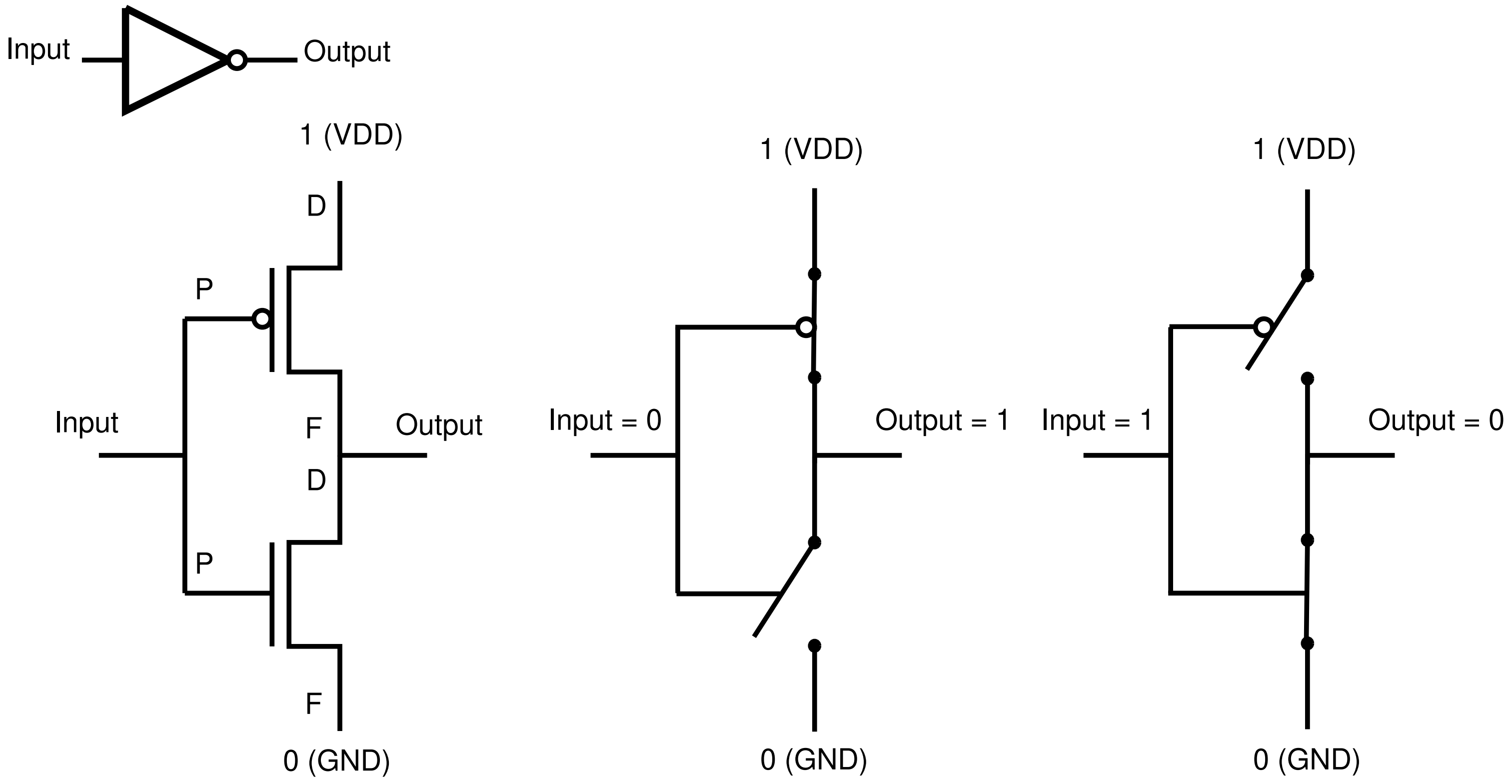
Tecnología MOS

Comportamiento: interruptor digital.



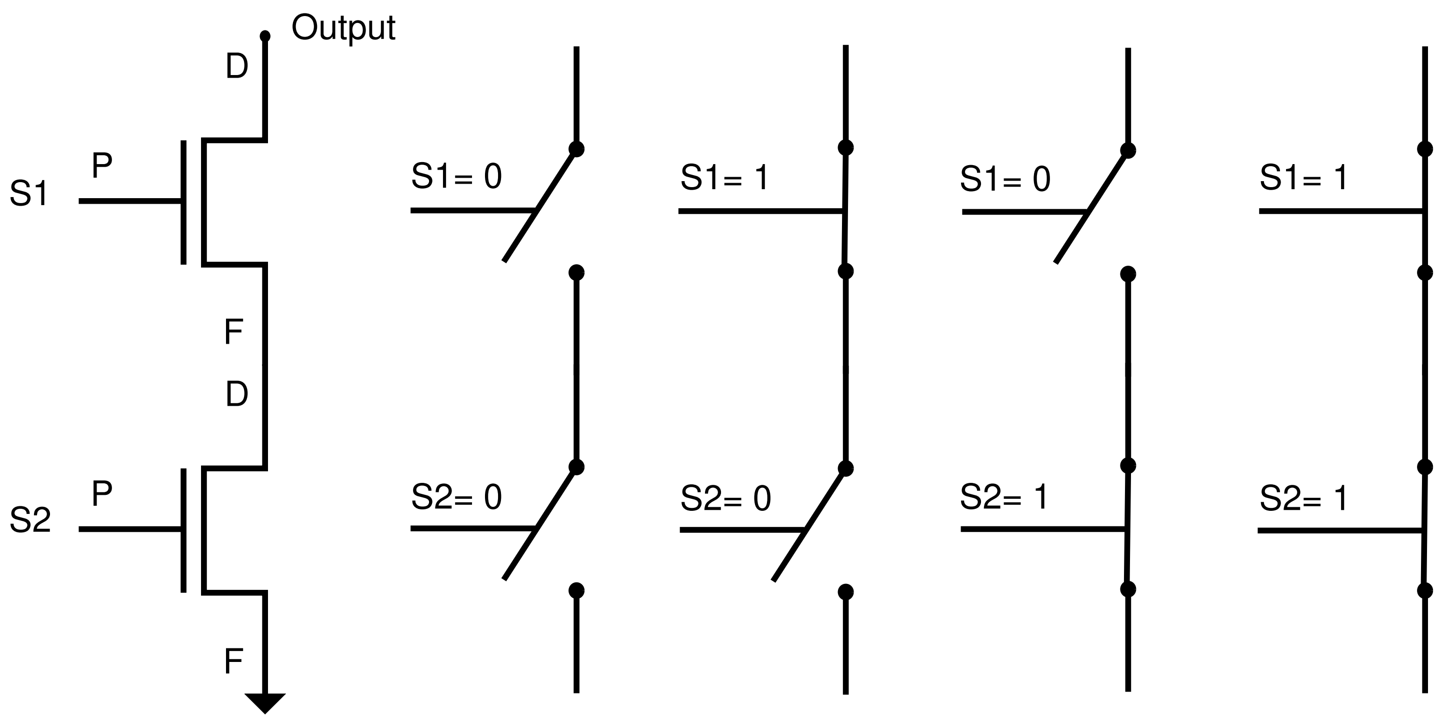
Tecnología MOS

Inversor CMOS: Complementary MOS.



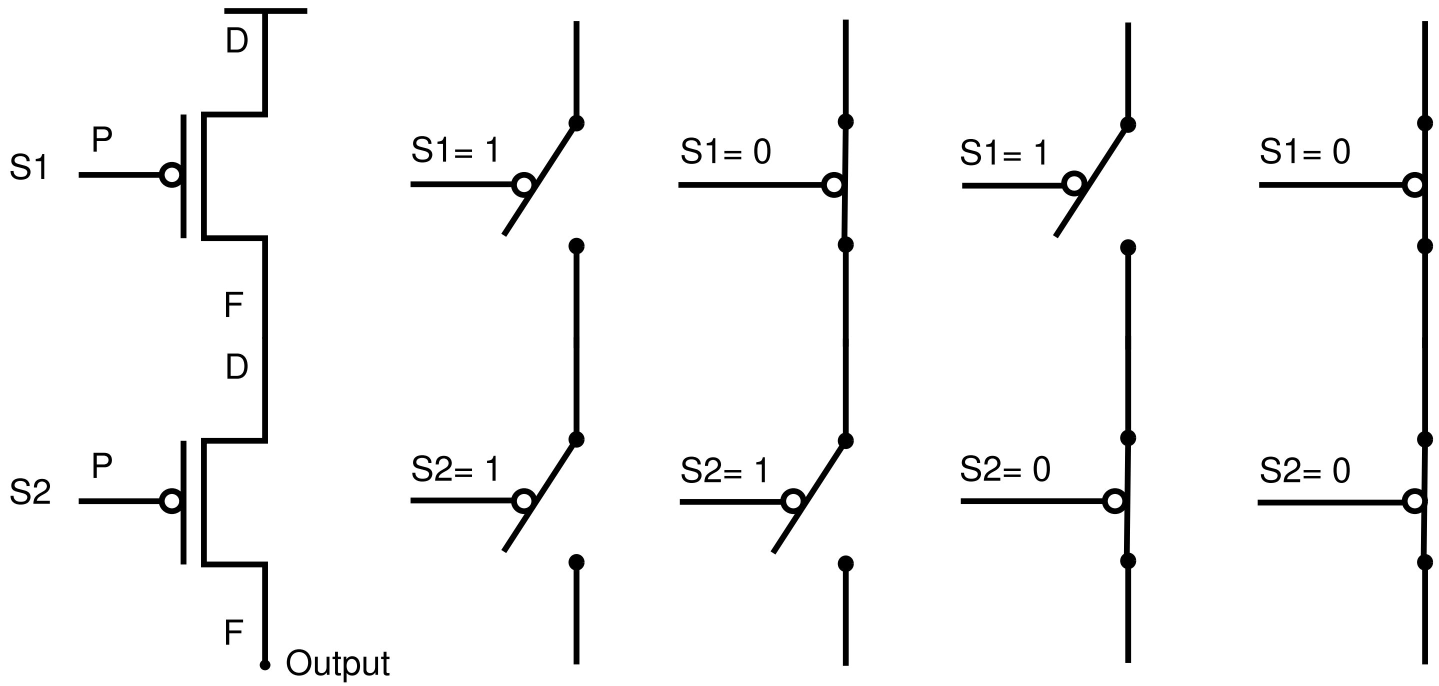
Combinación serie NMOS:

Función NAND: Output $= \overline{S1 \cdot S2}$



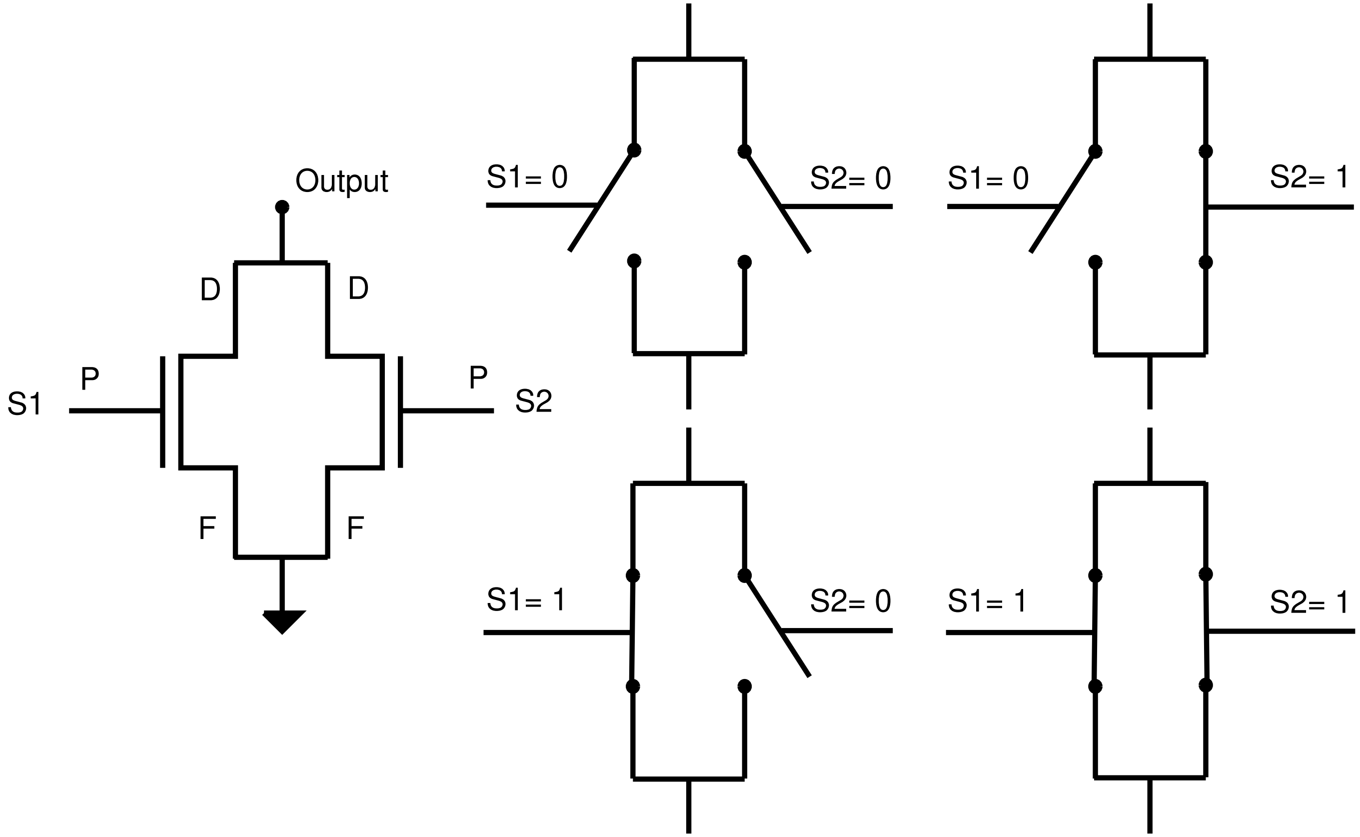
Combinación serie PMOS:

Función NOR: Output $= \overline{S1} \cdot \overline{S2}$



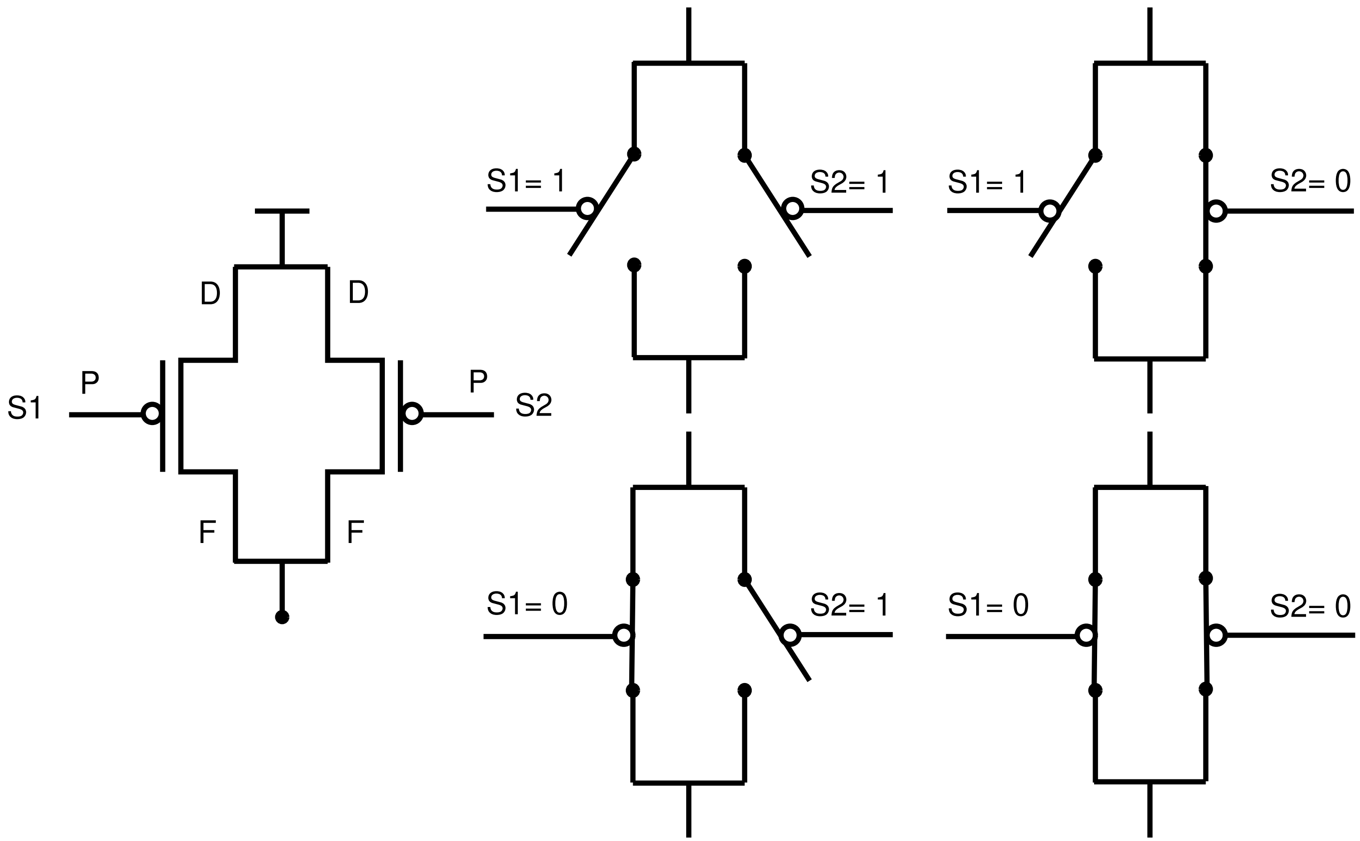
Combinación paralelo NMOS:

Función NOR: Output $= \overline{S1 \ + \ S2}$



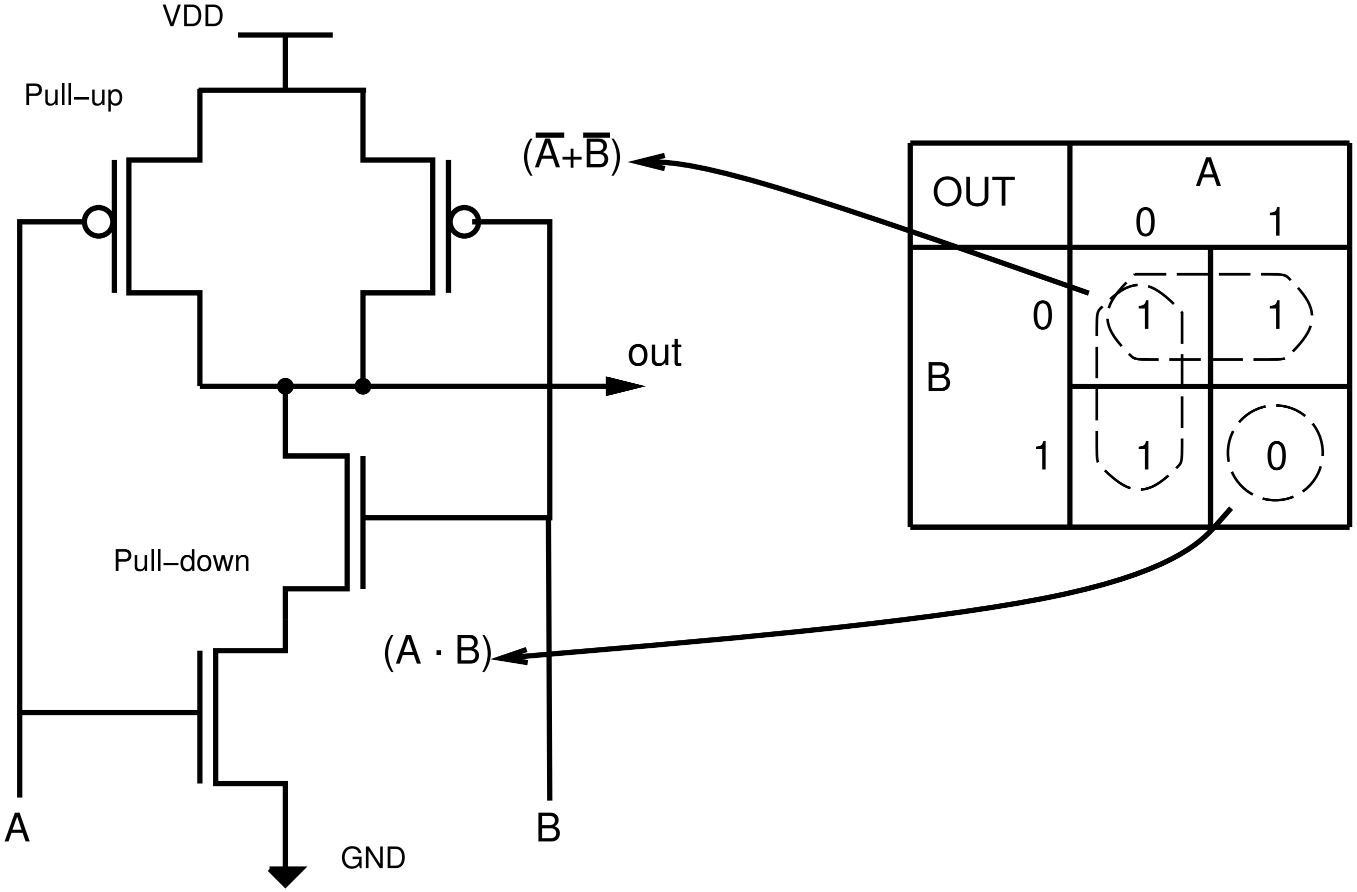
Combinación paralelo PMOS:

Función NAND: Output $= \overline{S1} + \overline{S2}$

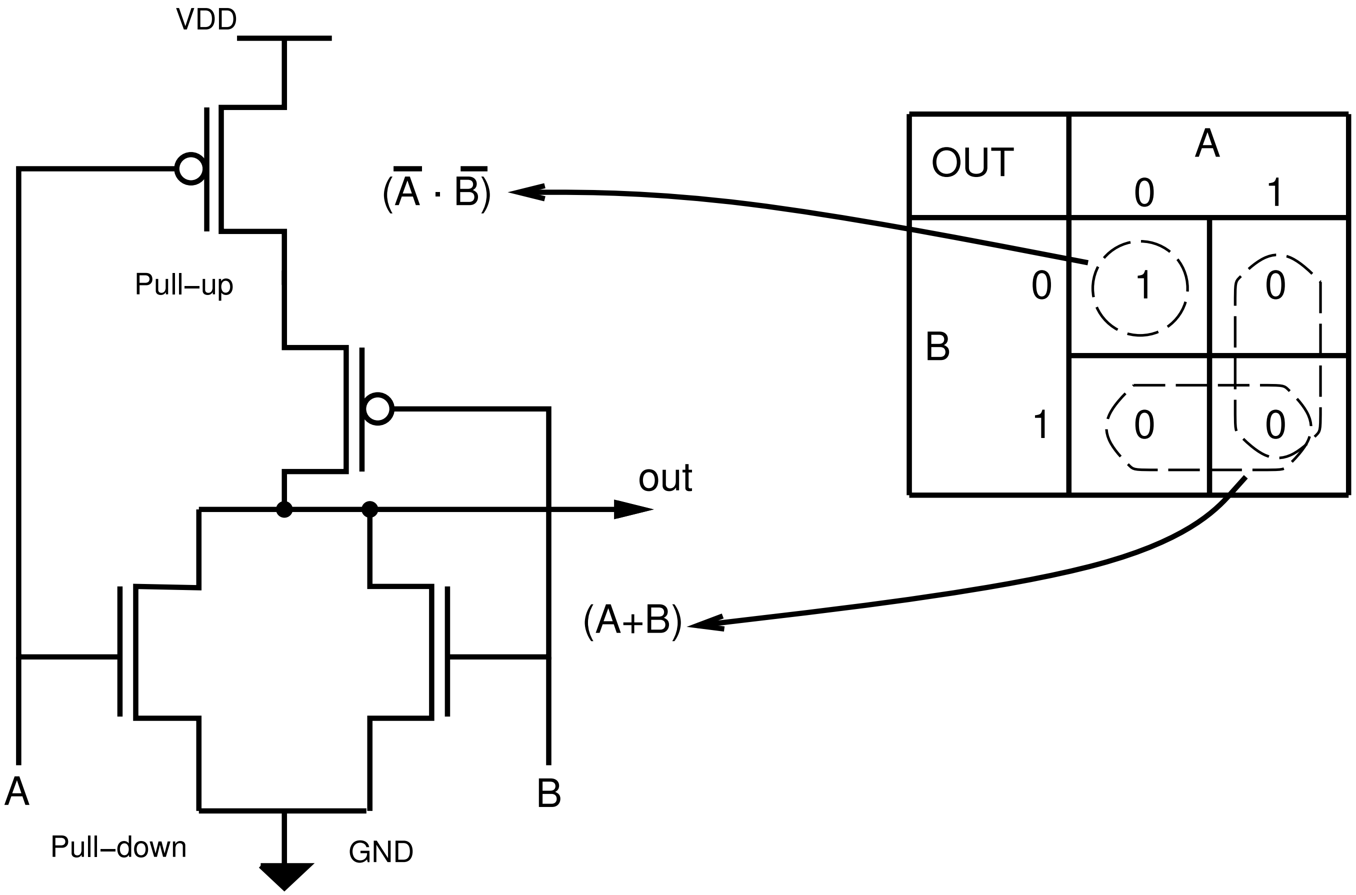


Tecnología MOS

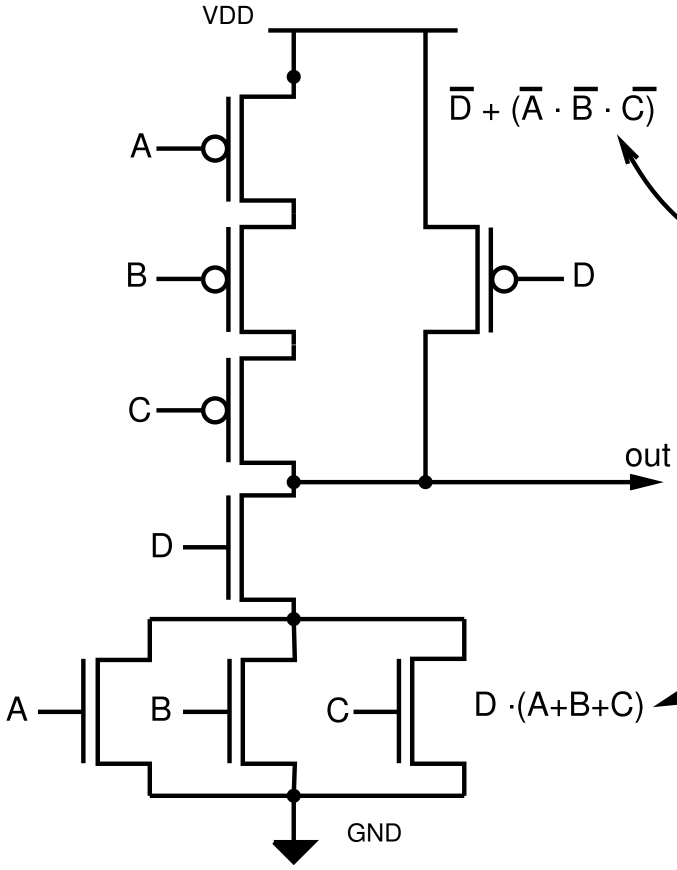
Creación de una puerta NAND:



Creación de una puerta NOR:



Creación de una puerta compleja:

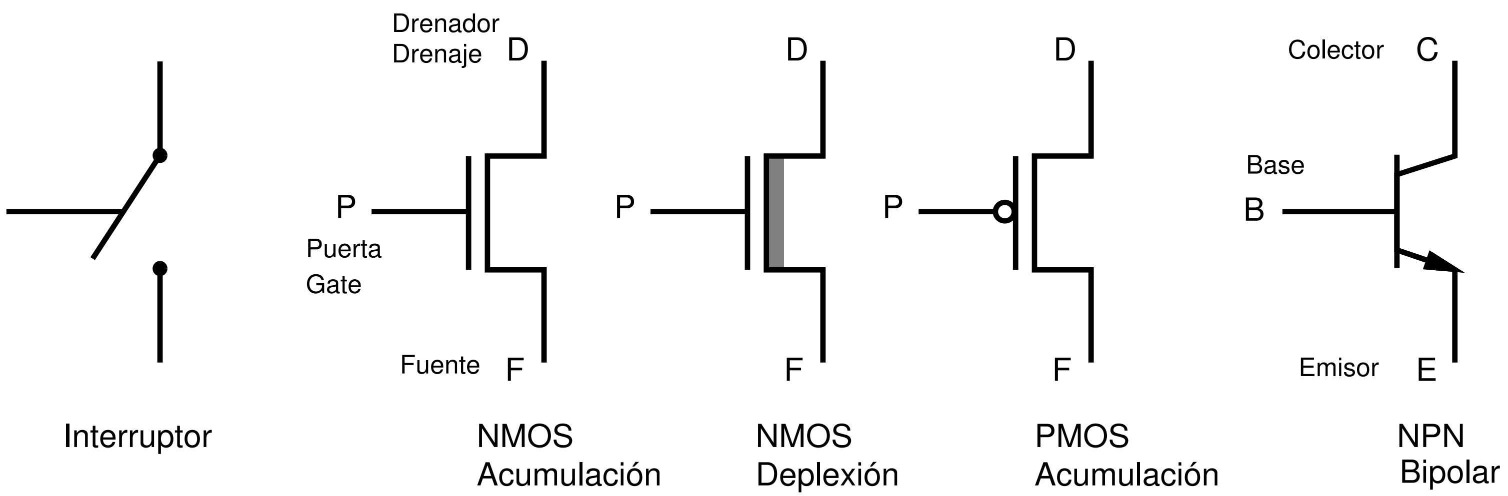


OUT	AB 00	01	11	10
CD 00	1	1	1	1
01	1	0	0	0
11	0	0	0	0
10	1	1	1	1

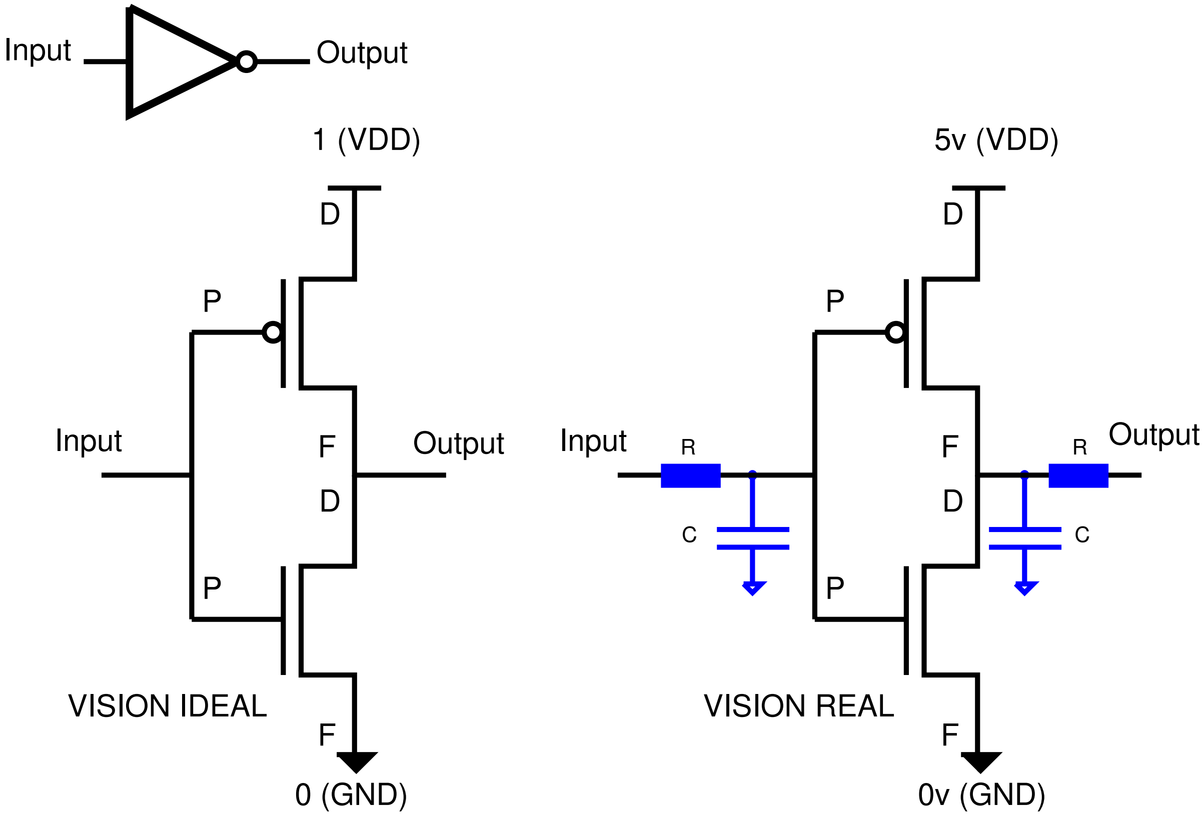
Tecnología MOS

Tipos de transistores:

- Transistores de tipo MOS: NMOS y PMOS.
- Transistores NMOS: acumulación y deplexión.
- Transistores bipolares: NPN, PNP.
- Operación (interruptor electrónico):
  - **MOS**: controlado por tensión (interruptor ideal).
  - **Bipolar**: controlado por corriente (interruptor + amplificador).

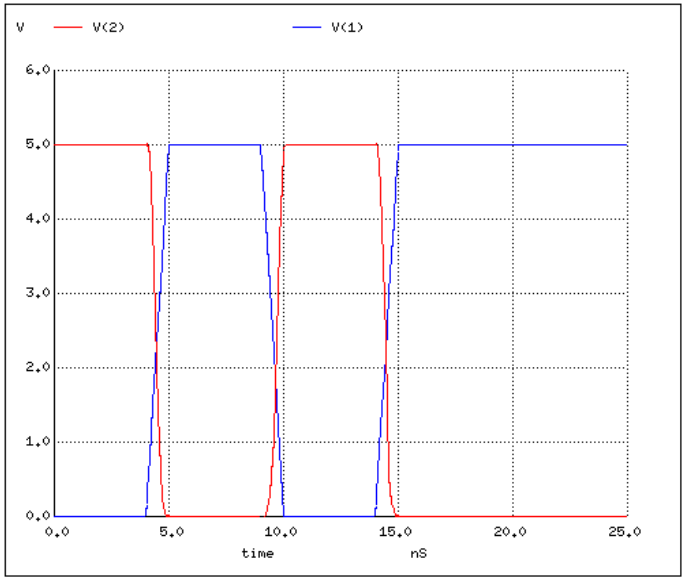


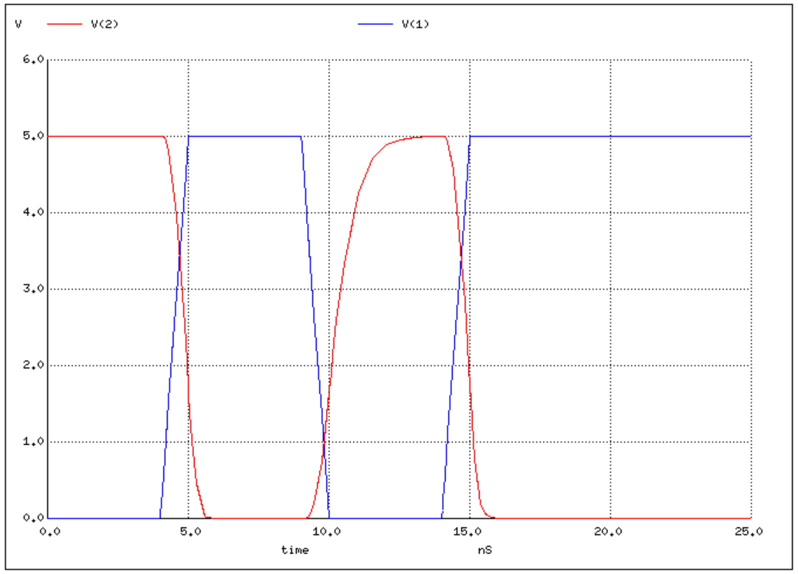
Visión ideal vs. visión real de un circuito:



Visión ideal vs. visión real de un circuito:

Ejemplo, relación input/output de un inversor CMOS.



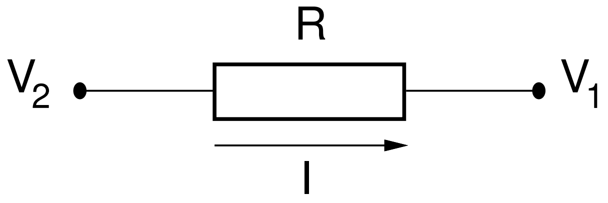


Conceptos físicos: Introducción

- Resistencia:
  - Ley de Ohm
  - Divisor de tensión.
- Capacidad:
  - Carga/descarga.
  - Redistribución de la carga.
- Retardo

Conceptos físicos: Ley de Ohm

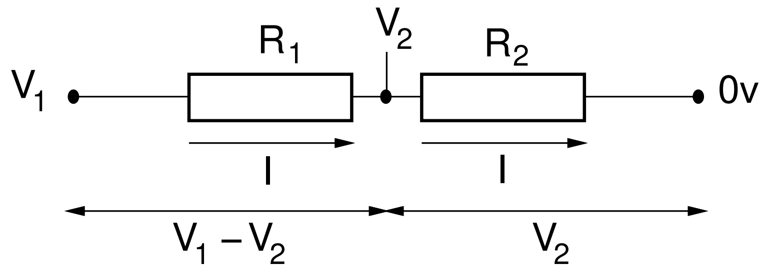
Relaciona los tres elementos más importantes en el funcionamiento de los circuitos digitales:



$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

La *corriente* es proporcional a la *diferencia de potencial* $V_2 - V_1$ pero inversamente proporcional a la *resistencia*.

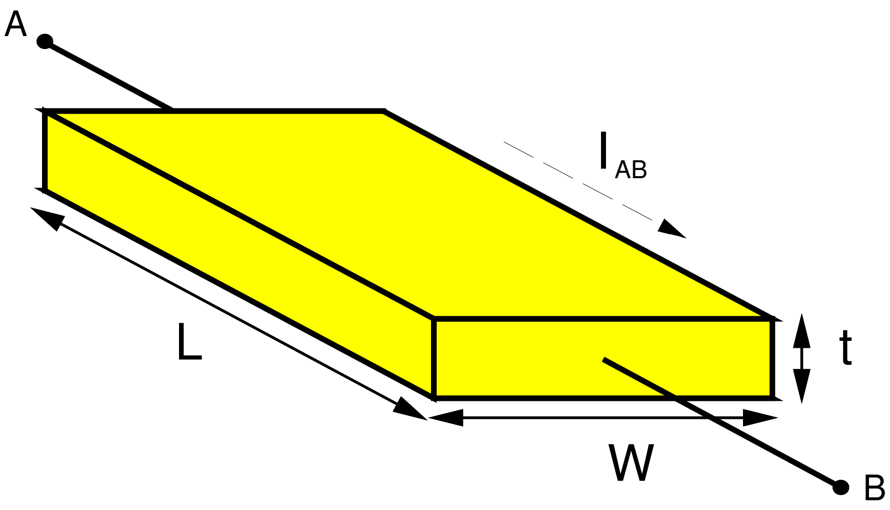
La diferencia de potencial "se distibuye" proporcionalmente a la resistencia. El potencial se divide:



$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1$$

Conceptos físicos: Resistencia

En general: $R_{AB} = \rho \frac{L}{tW}$ $\qquad I_{AB} = \frac{V_{AB}}{R_{AB}}$



Tecnología $0,5\mu$
NMOS: $1,5 \times 10^4$ ohms/□
PMOS: $3,0 \times 10^4$ ohms/□
Metal: $0,08$ ohms/□

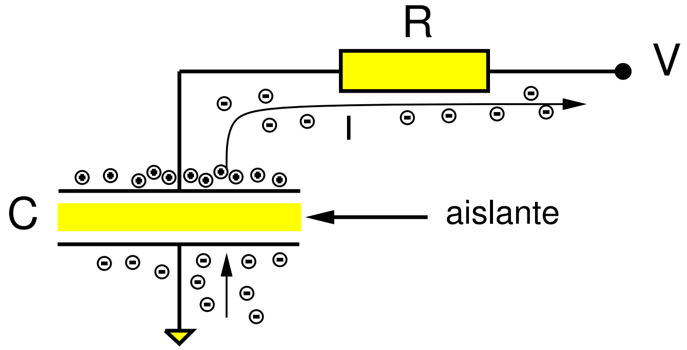
Para una determinada tecnología:

- t constante.
- Unidad básica de resistencia rectángulo □ $(2\lambda \times 2\lambda)$.

$$R_s = \frac{\rho}{t} \qquad \rightarrow \qquad R_{AB} = \frac{L}{W} R_s \quad .$$

Conceptos físicos: Capacidad

Es capaz de almacenar una diferencia de potencial entre sus dos terminales:

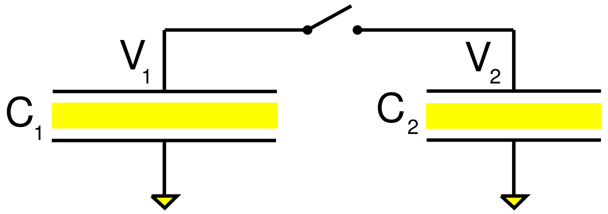


La energía almacenada (carga):

$$Q = CV$$

Cuanto mayor es la capacidad más dificil resulta cargarla, pero más cantidad de energía almacena.

Si unimos dos capacidades su carga se distribuye:

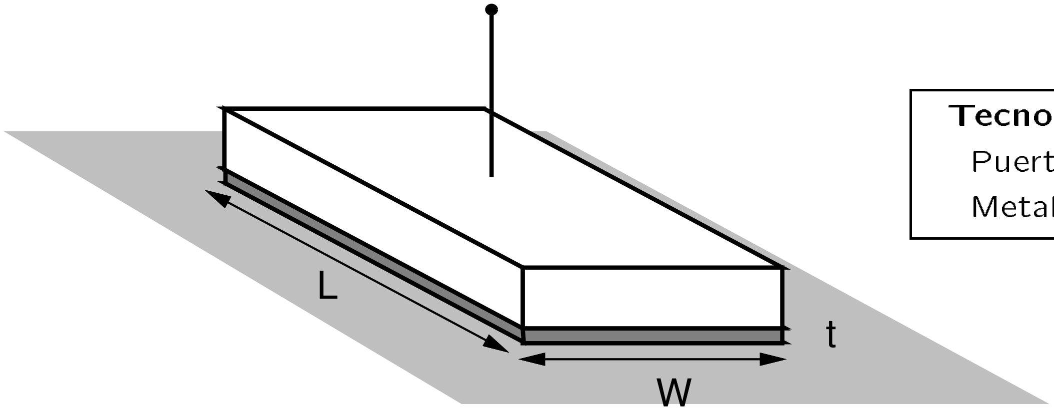


$$V_R = \frac{Q_T}{C_T} = \frac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1 + C_2}$$

Conceptos físicos: Capacidad

La capacidad depende del área del aislante.

En general: $C_{LW} = \dfrac{\mathcal{E}_o\ \mathcal{E}_{ins}}{t}\ LW$



Tecnología $0,5\mu$
Puerta: $0,9\ fF/\mu m^2$
Metal: $0,04\ fF/\mu m^2$

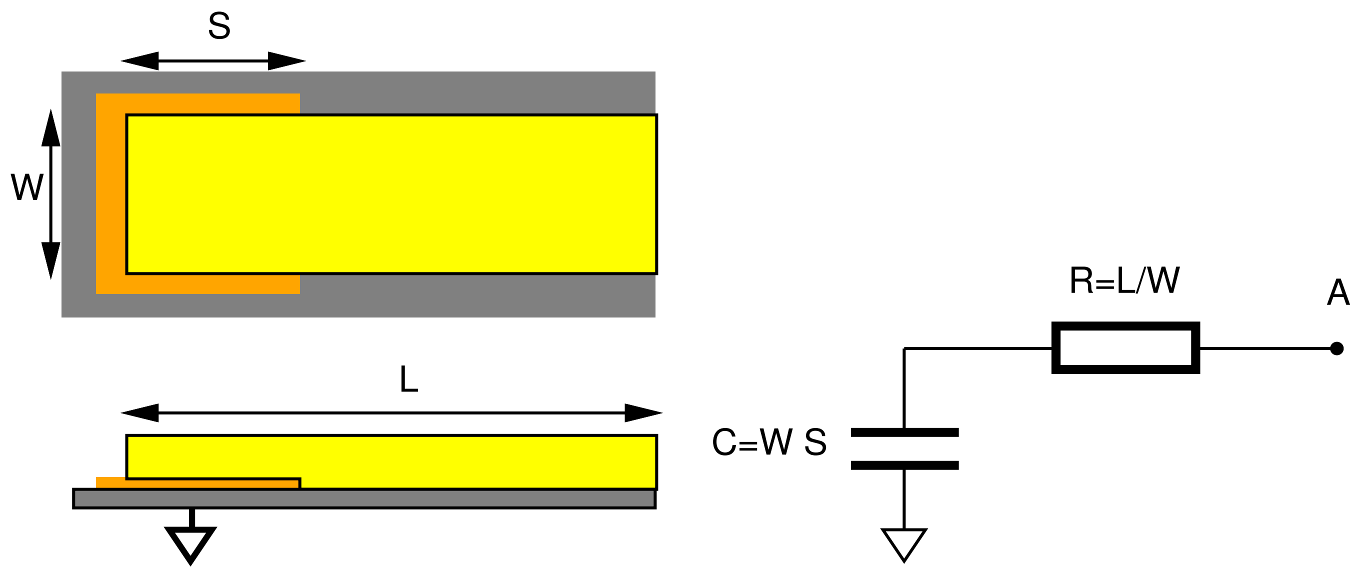
Para una determinada tecnología:

- Permeabilidad $\mathcal{E}_{ins}$ constante.
- Distancia t constante.
- Unidad básica de capacidad rectángulo $\square$ $(2\lambda \times 2\lambda)$.

$$C_g = \frac{\mathcal{E}_o\ \mathcal{E}_{ins}}{t}\,(4\lambda^2) \quad \longrightarrow \quad C_{LW} = \frac{LW}{4}\,C_g.$$

Conceptos físicos: Retardo

En general: $\tau_A = R\ C$



Para una determinada tecnología:

- R_s y C_g predeterminados para □ $(2\lambda \times 2\lambda)$.

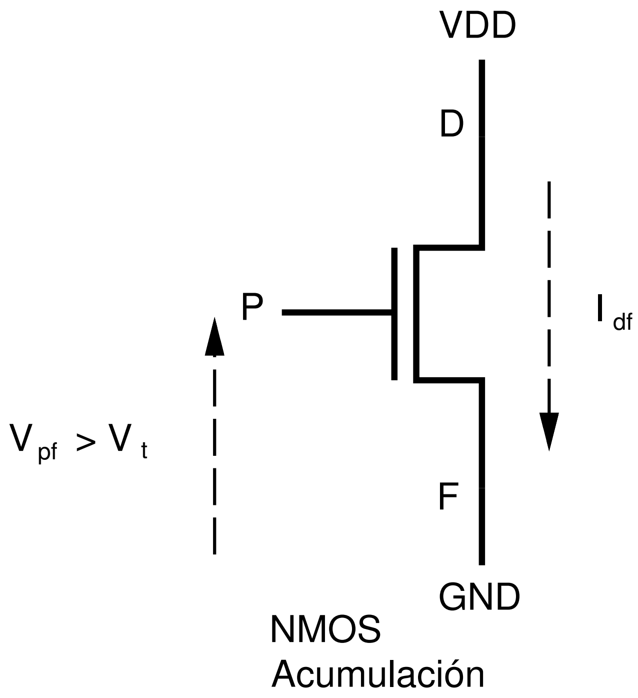
$$\tau = R_s\ C_g \quad \longrightarrow \quad \tau_A = (\frac{L}{W}\ R_s)(\frac{SW}{4}\ C_g) = \frac{L}{W} \cdot \frac{WS}{4}\ \tau.$$

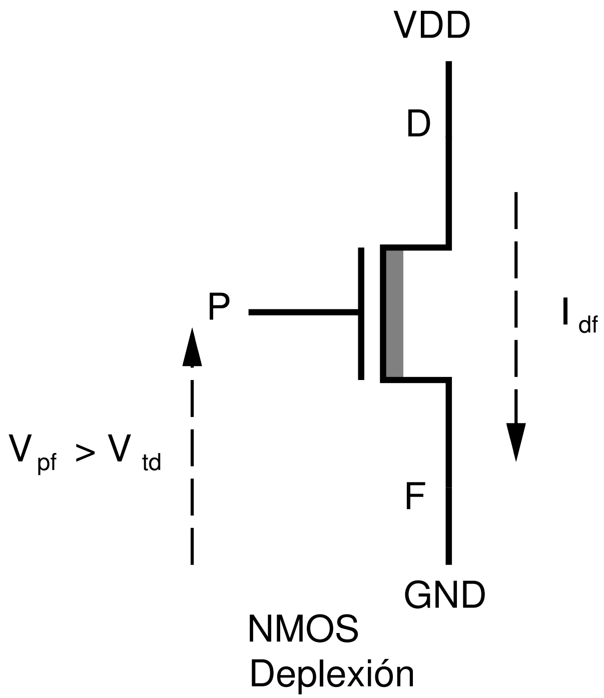
Tecnología MOS

Transistores de tipo NMOS.

Corriente Drenaje-Fuente (I_{df}) si:

- NMOS (acumulación): $V_{pf} > V_t > 0$ (0.2v).
- NMOS (deplexión): $0 > V_{pf} > V_{td}$ (-0.6v)

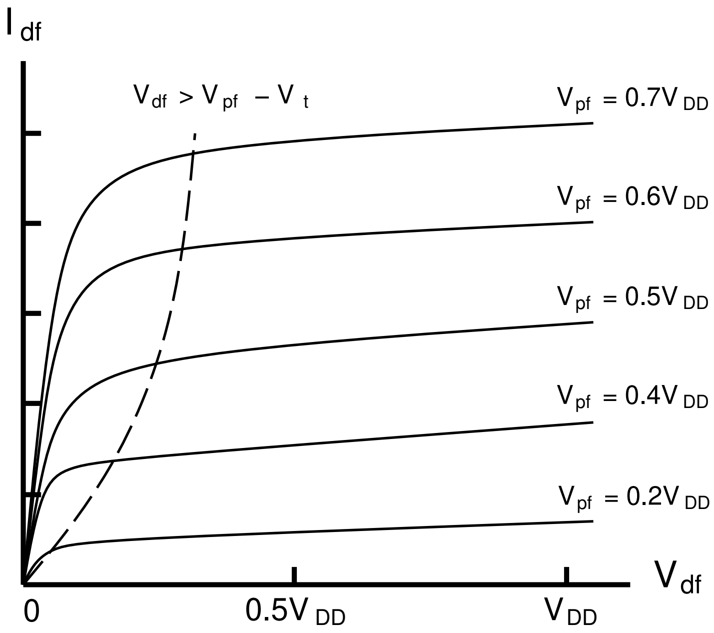




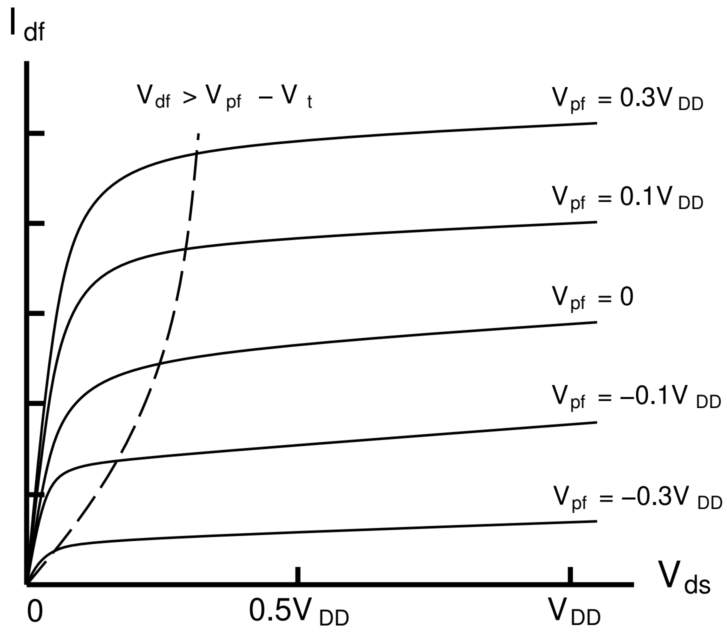
Tecnología MOS

Transistores de tipo NMOS.

Comportamiento dinámico:



NMOS Acumulación



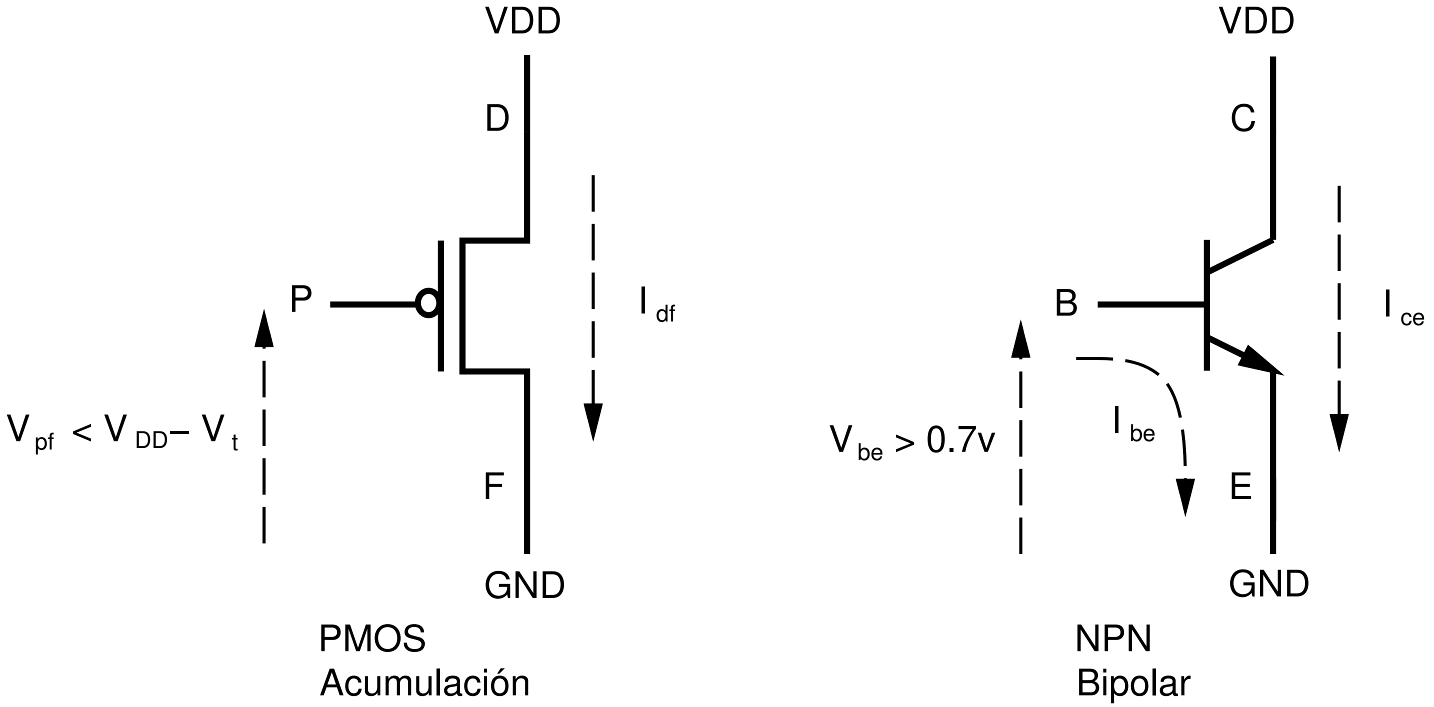
NMOS Deplexión

Tecnología MOS

Transistores de tipo PMOS y Bipolar NPN.

Corriente Drenaje-Fuente (I_{df}) o Colector-Emisor (I_{ce}) si:

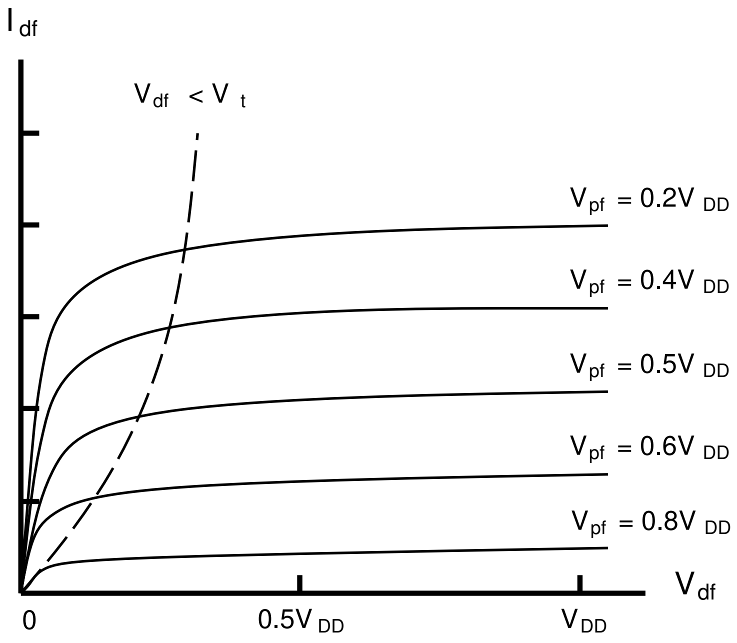
- PMOS (acumulación): $V_{DD} - V_t > V_{pf}$.
- NPN (bipolar): $I_{be} > K \longrightarrow V_{be} > 0.7v$.



Tecnología MOS

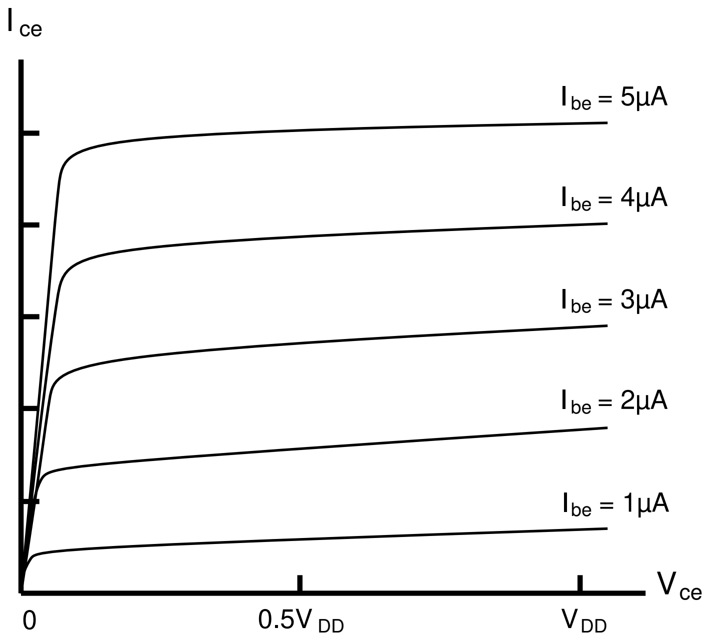
Transistores de tipo PMOS y Bipolar NPN.

Comportamiento dinámico:



PMOS Acumulación

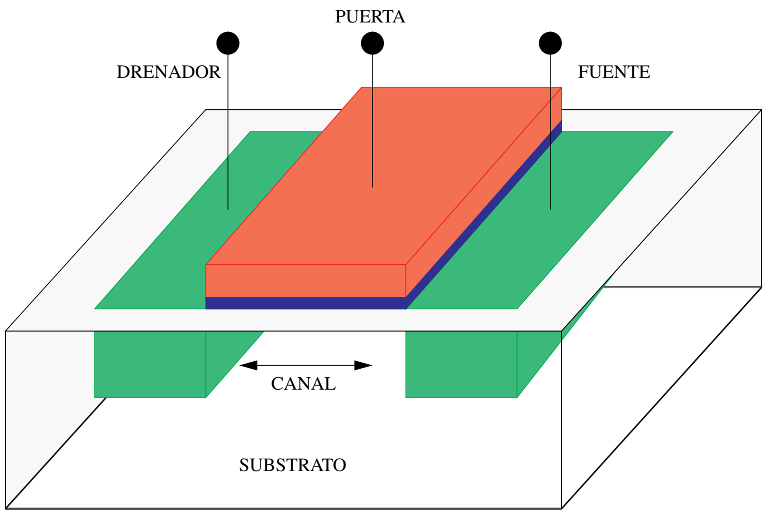
(Dos veces menos corriente que NMOS)

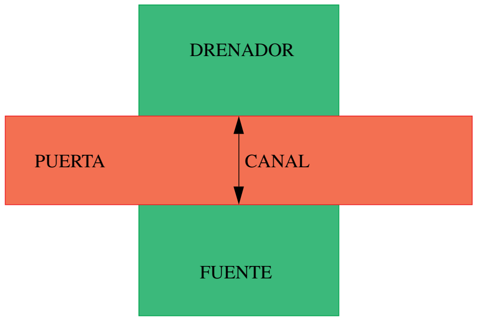


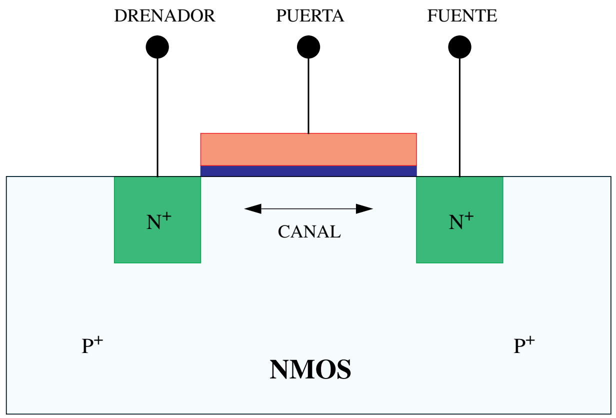
NPN Bipolar

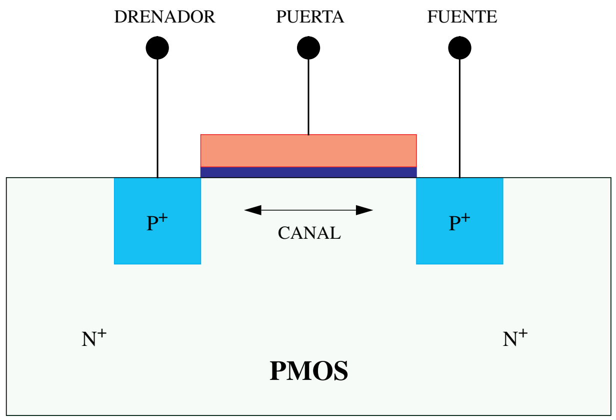
Tecnología MOS

Implementación tecnológica.



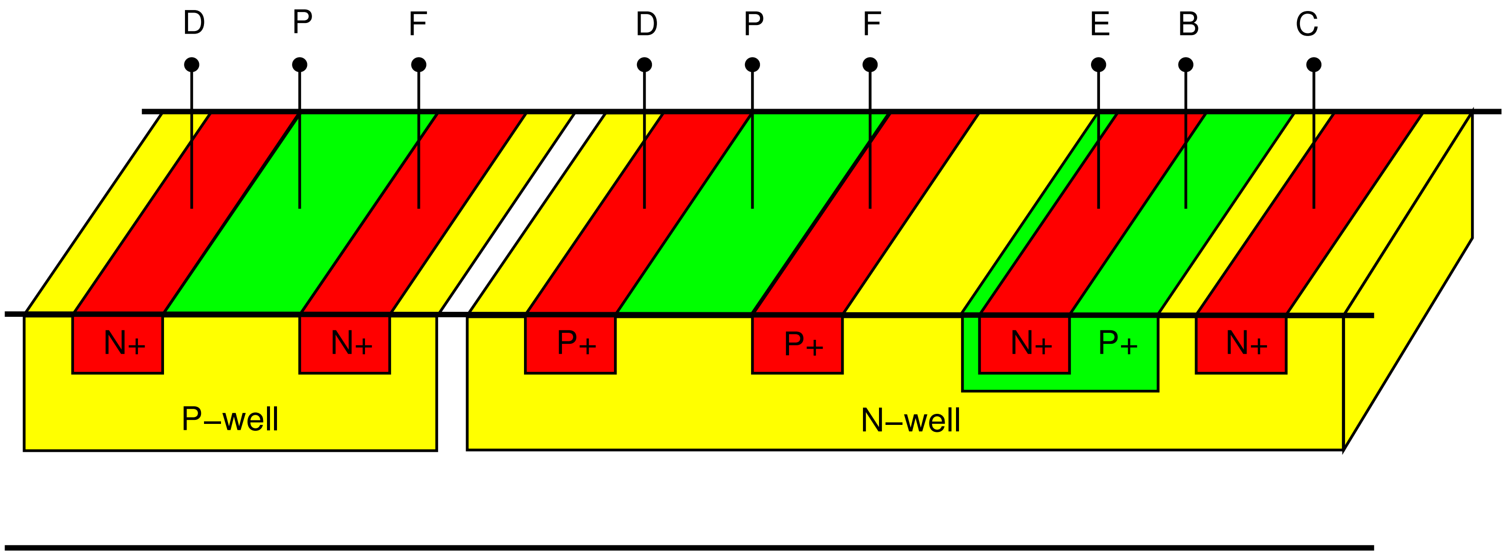






Tecnología MOS

Implementación tecnológica.



NMOS PMOS NPN (bipolar)

Tecnología MOS

Comparación entre distintas tecnologías:

Característica	NMOS	PMOS	NPN
Resistencia de entrada:	alta	alta	baja
Resistencia de salida:	baja	baja	baja
Movilidad:	alta	baja (1/2)	alta
Nivel integración:	alta	alta	mediano
Consumo estático:	bajo	bajo	alto
Consumo dinámico:	mediano	mediano	alto

- **NMOS y PMOS:**
  - Rendimiento aceptable + Bajo consumo.
  - Requiere *drivers* para cargar capacidades grandes.
- **Bipolar:**
  - Alto rendimiento + Alto consumo.
- **Bipolar + MOS (BiCMOS):**
  - Alto rendimiento + Bajo consumo.
  - Reducción en área debido a la eliminación de los *drivers*.

Tecnología MOS: Comportamiento dinámico

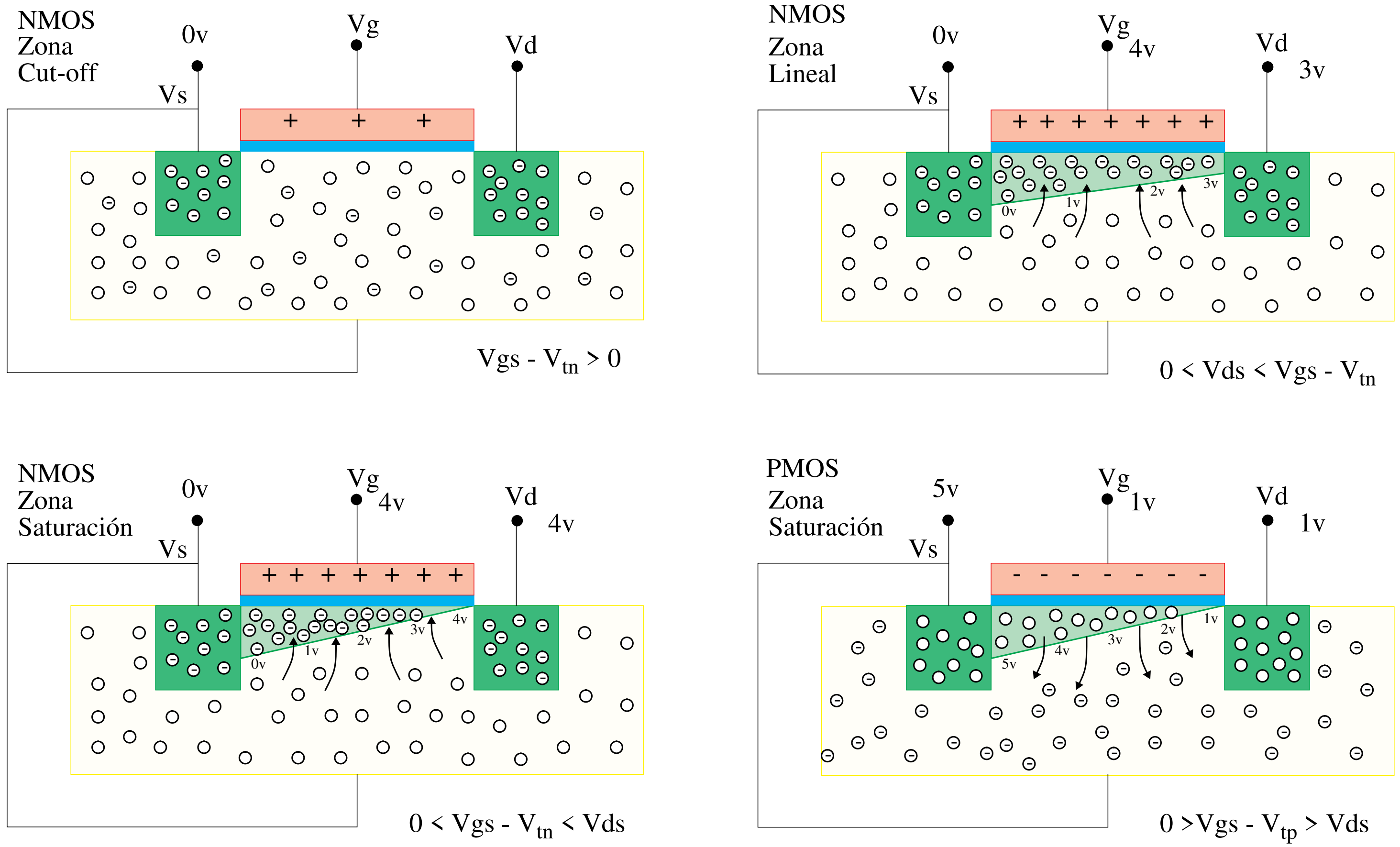
El funcionamiento del transistor NMOS se basa en la creación de un *canal* entre *drenador − fuente*.

El canal se produce debido a un potencial positivo en la *puerta* respecto a su *substrato*, que atrae a los electrones libres en el substrato, acumulándolos en el *canal*.

Existen tres regiones de operación:

- Zona de corte (Cut-off) En esta zona no hay creación de canal, corriente $I_{ds} = 0$.
- Zona lineal o no saturada
  En esta zona hay creación de canal y la corriente eléctrica I_{ds} es proporcional a la tensión entre el drenador y la fuente V_{ds}.
- Zona saturada
  El canal se estrecha hasta romperse. Existe paso de corriente eléctrica I_{ds}, pero su valor es casi constante e independiente de V_{ds}.

Comportamiento Dinámico



Comportamiento Dinámico

Zona de corte:

En esta zona no hay creación de canal, por tanto la corriente entre el drenador y la fuente es cero ($I_{ds} = 0$).

Comportamiento Dinámico

Zona lineal:

Si definimos

$$\beta = \frac{W}{L}\,\frac{\mathcal{E}_{ins}\mathcal{E}_o\mu}{D},$$

tenemos:

$$I_{ds} = \beta\left((V_{gs} - V_t)V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2}\right).$$

Comportamiento Dinámico

Zona saturada:

En este caso $V_g = V_{gs} - V_t$ no es suficiente para mantener el canal debido a que V_d es mayor.

La saturación se inicia cuando $V_{ds} = V_{gs} - V_t$, por tanto:

$$I_{ds} = k\frac{W}{L}\frac{(V_{gs} - V_t)^2}{2} \quad ,$$

o bien

$$I_{ds} = \frac{\beta}{2}(V_{gs} - V_t)^2 \quad .$$

Comportamiento Dinámico

Tabla resumen:

NMOS		
Región	Condiciones	Corriente I_{ds}
COFF	$V_{gs} < V_{tn}$	$I_{ds} = 0$
LIN.	$V_{ds} < V_{gs} - V_{tn}$	$I_{ds} = \beta \left((V_{gs} - V_{tn})V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right)$
SAT.	$V_{ds} \geq V_{gs} - V_{tn}$	$I_{ds} = \frac{\beta}{2}(V_{gs} - V_{tn})^2$

PMOS		
Región	Condiciones	Corriente I_{ds}
COFF	$V_{tp} < V_{gs}$	$I_{ds} = 0$
LIN.	$V_{ds} > V_{gs} - V_{tp}$	$I_{ds} = -\beta \left((V_{gs} - V_{tp})V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right)$
SAT.	$V_{ds} \leq V_{gs} - V_{tp}$	$I_{ds} = -\frac{\beta}{2}(V_{gs} - V_{tp})^2$