

## A.3. El transistor unipolar

### A.3.1. Introducción

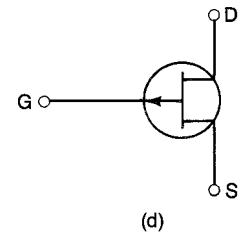
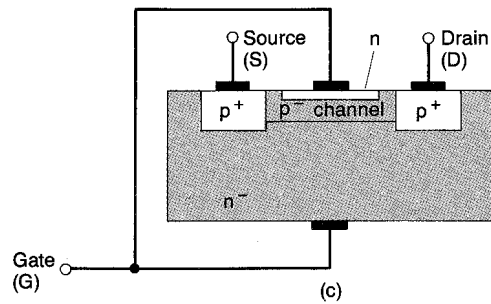
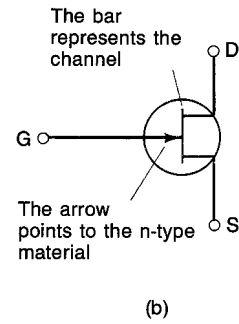
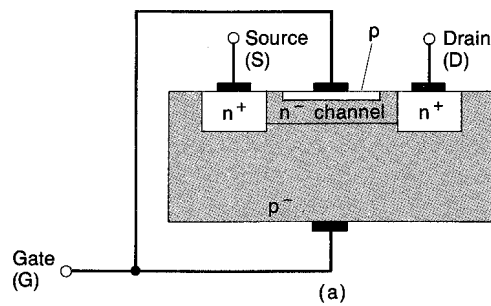
- transistor de efecto de campo o FET
  - => controlado por tensión
- dos tipos básicos:
  - JFET
  - MOSFET

### A.3.2. Caracterización de los transistores unipolares

#### A.3.2.1. El transistor JFET

tiene tres terminales:

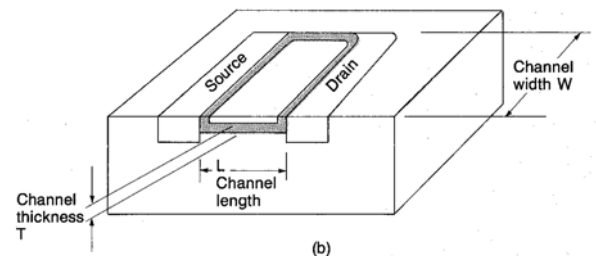
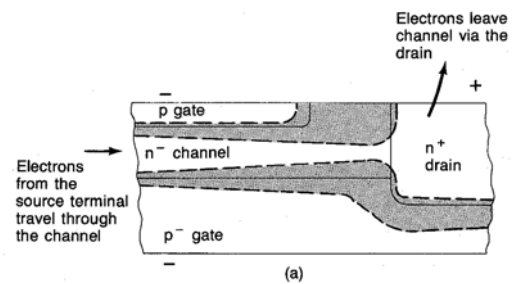
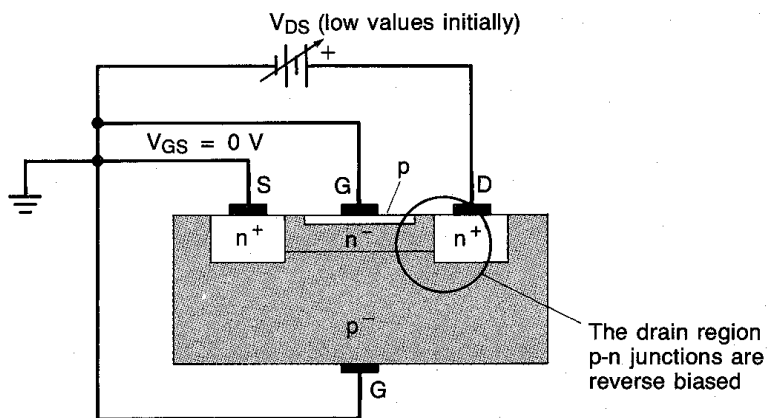
- *surtidor*: inyecta portadores en el canal
- *puerta*: controla la corriente que circula por el canal del transistor
- *drenador*: recoge los portadores del canal del transistor



hay dos tipos de FET:

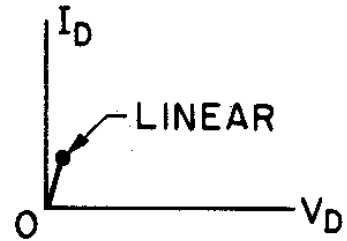
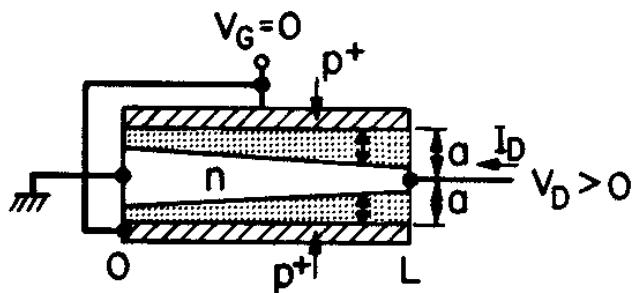
**canal N      y      canal P**

Funcionamiento:

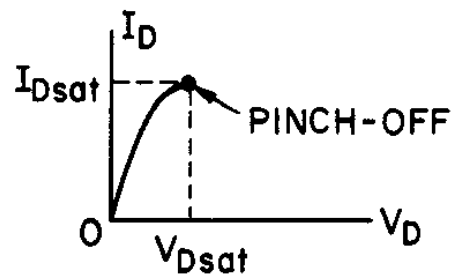
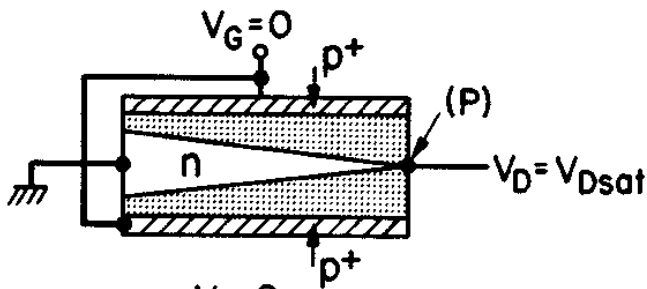


$$R = \rho_c \frac{L}{WT}$$

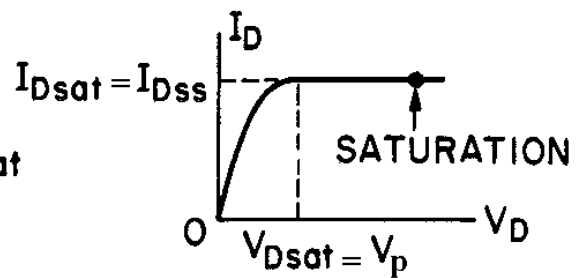
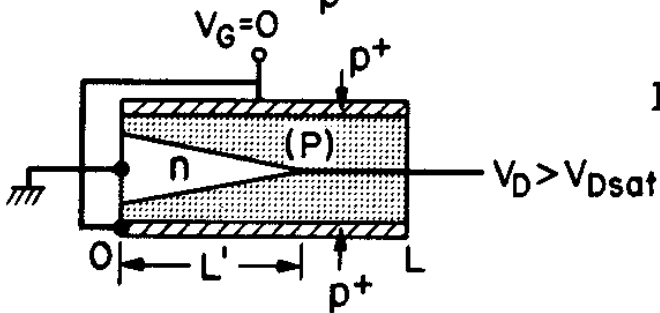
Para  $V_{GS} = 0V$ :



(a)



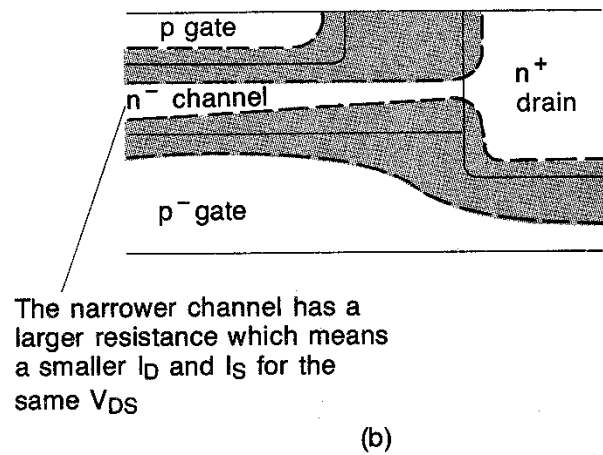
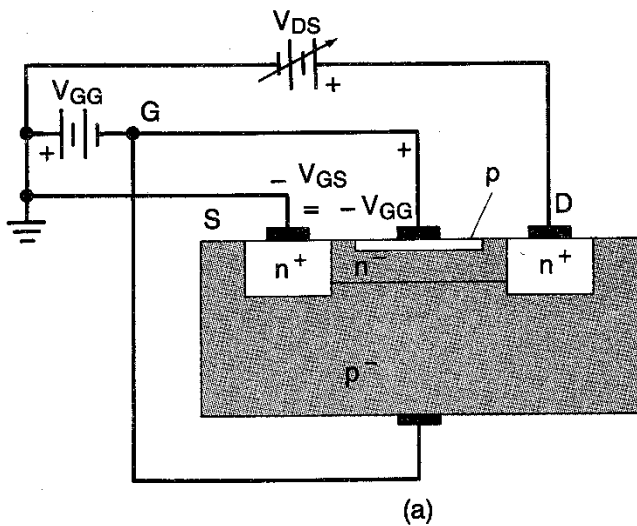
(b)



(c)

- $V_p$ : tensión  $V_{DS}$  a la que se estrangula del canal
  - $I_{DSS}$ : Corriente de drenador de saturación
- }  $V_{GS} = 0V$

Para  $V_{GS} < 0V$ :



- La tensión  $V_{DS}$  a la que se estrangula del canal:

$$V_{Dsat} = V_p - |V_{GS}|$$

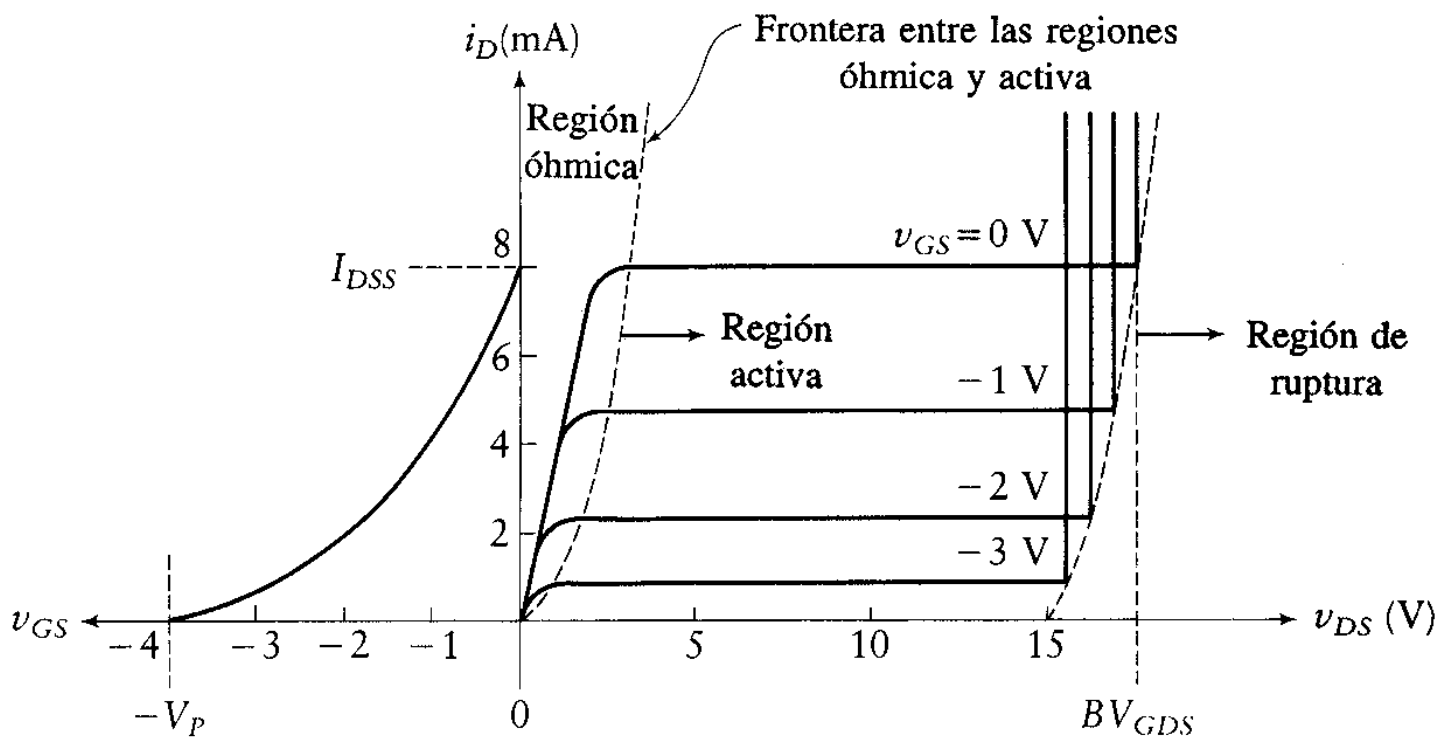
Si aumentamos  $V_{GS}$  llegamos a corte

$$|V_{GS(OFF)}| = V_p$$

| JFET    | $V_{DS}$ | $V_{GS}$ |
|---------|----------|----------|
| Canal N | +        | -        |
| Canal P | -        | +        |

### A.3.2.1.1. Ecuación de transferencia del JFET

$$\begin{aligned} I_D &= I_{DSS} \left( 1 - \frac{|V_{GS}|}{|V_{GS(OFF)}|} \right)^2 = \\ &= \frac{I_{DSS}}{(V_{GS(OFF)})^2} \cdot (|V_{GS(OFF)}| - |V_{GS}|)^2 = \\ &= \frac{I_{DSS}}{(V_{GS(OFF)})^2} \cdot (V_{Dsat})^2 \end{aligned}$$

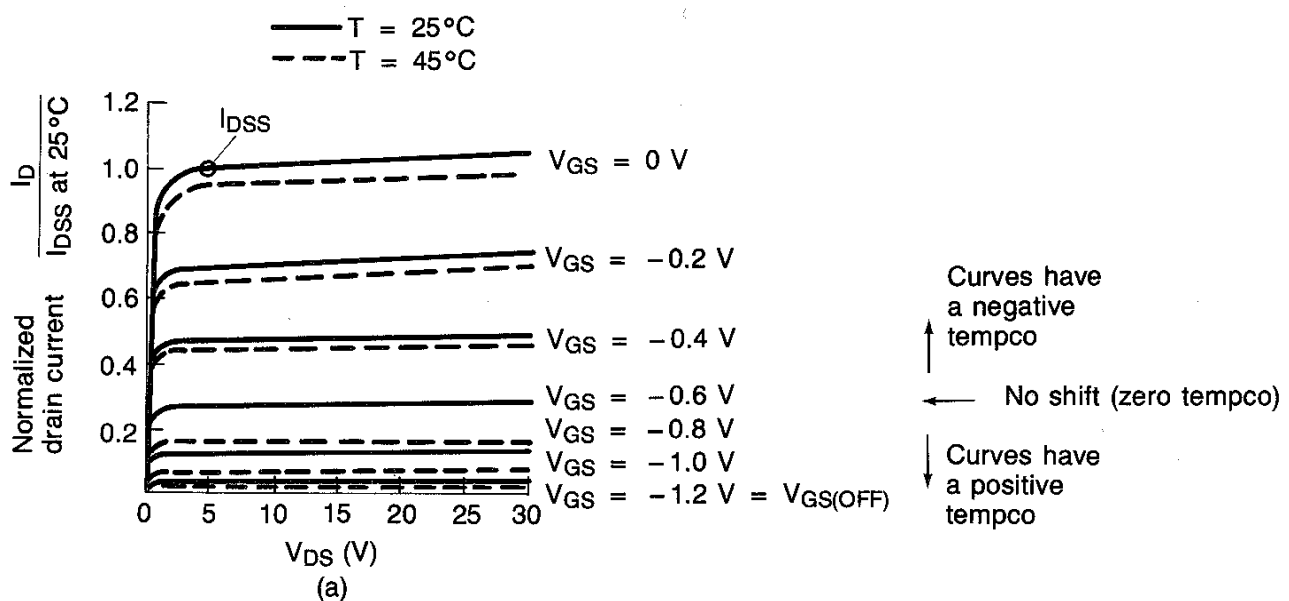


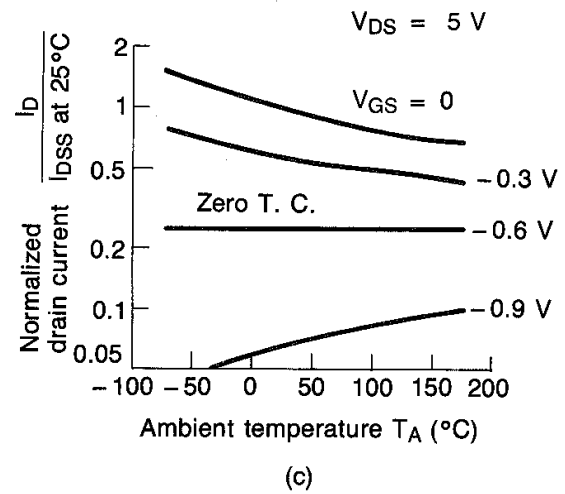
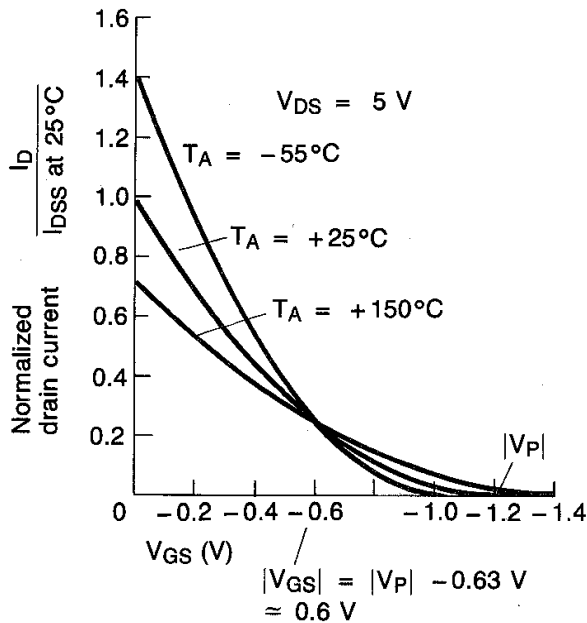
### A.3.2.2. Efectos de la temperatura en el transistor JFET

- Un incremento de temperatura provoca una disminución de la anchura de la zona de agotamiento lo que aumenta el grosor del canal
- La movilidad de los portadores mayoritarios se reduce con la temperatura

Ambos efectos de compensan para,

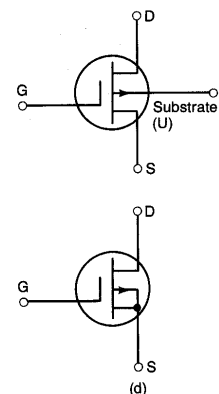
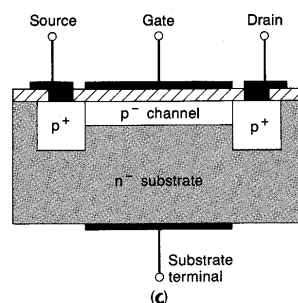
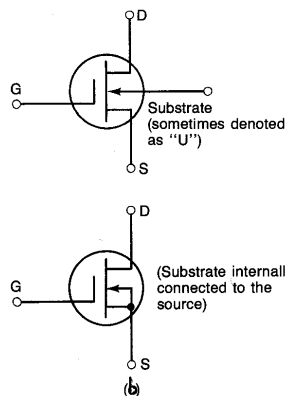
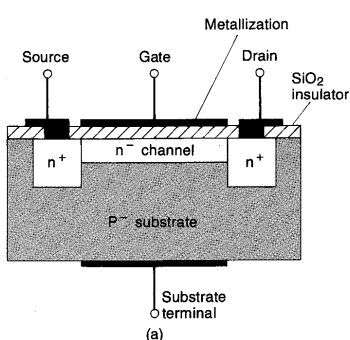
$$|V_{GS}| \approx |V_p| - 0,63V$$

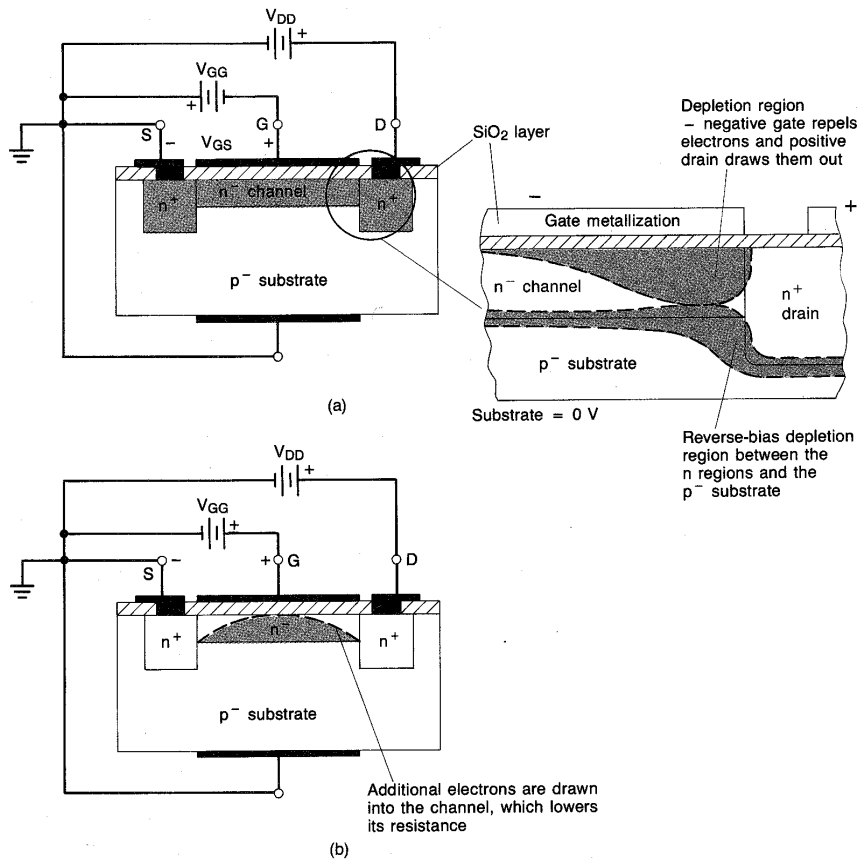




### A.3.2.3. El transistor MOSFET de deplexión (DE-MOSFET)

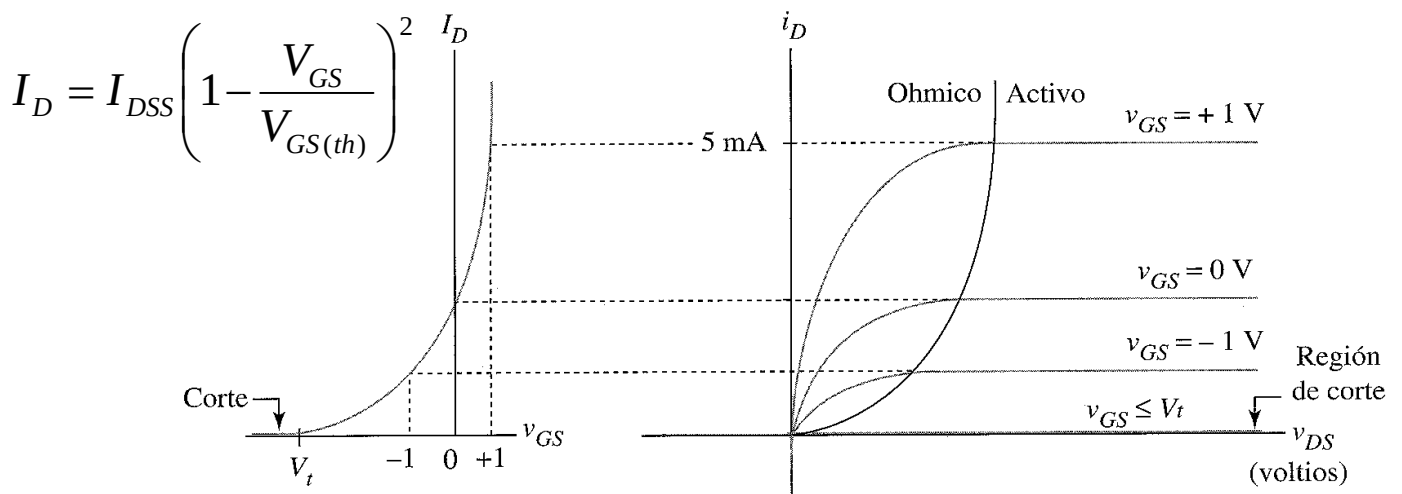
- es de puerta aislada y permite tensiones  $V_{GS}$  positivas
- hay de canal N y canal P
- dos modos de funcionamiento: **vaciamiento** y **acumulación**





| DE-MOSFET | V <sub>DS</sub> | V <sub>GS</sub> | Modo de funcionamiento |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------------|
| Canal N   | +               | +               | Acumulación            |
|           |                 | –               | Vaciamiento            |
| Canal P   | –               | –               | Acumulación            |
|           |                 | +               | Vaciamiento            |

### A.3.2.3.1. Ecuación de transferencia del DE-MOSFET

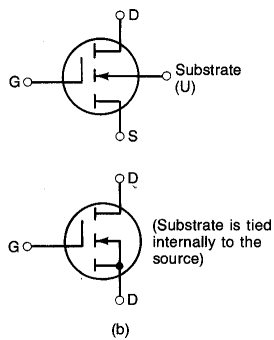
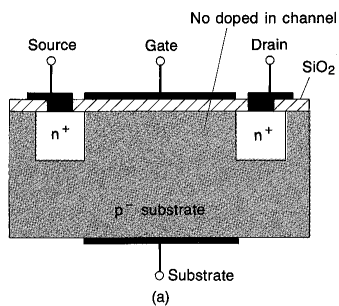




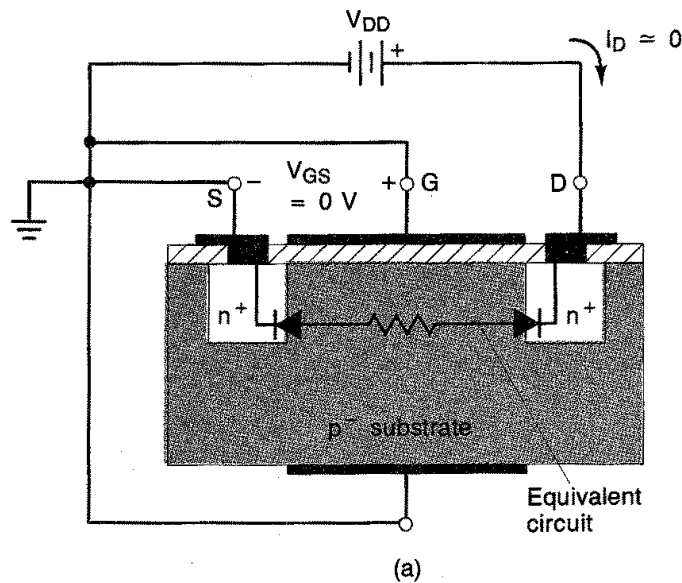
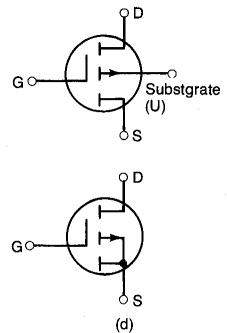
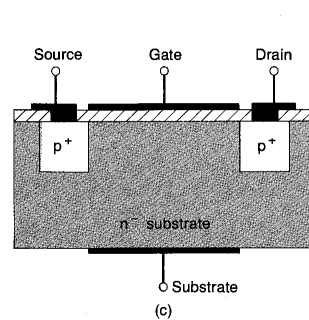
### A.3.2.4. El transistor MOSFET de inducción o enriquecimiento (E-MOSFET)

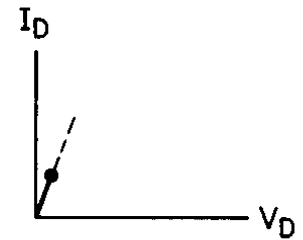
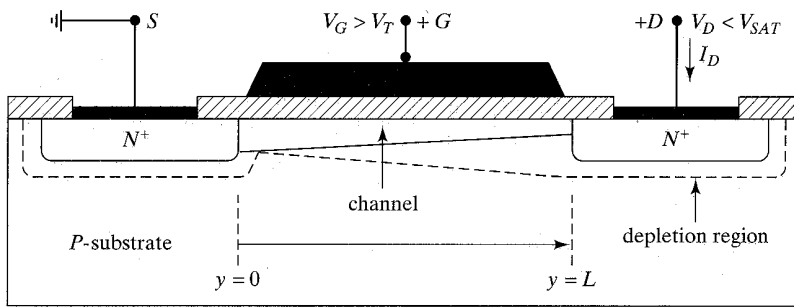
- sólo funciona en modo de acumulación induciendo un canal

#### CANAL N

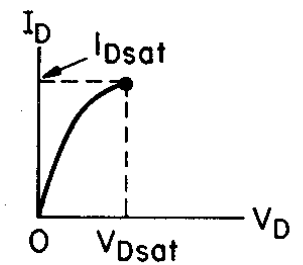
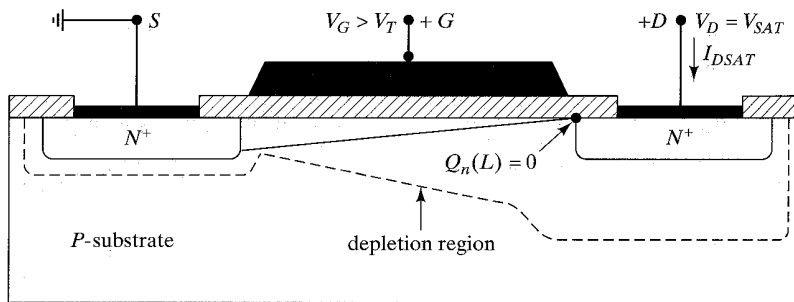


#### CANAL P

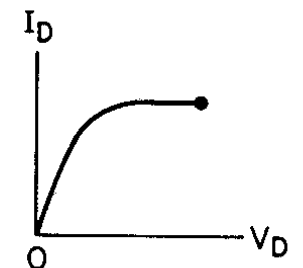
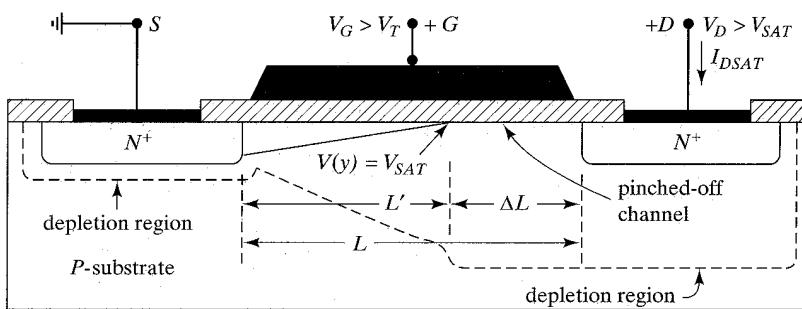




(a)



(b)



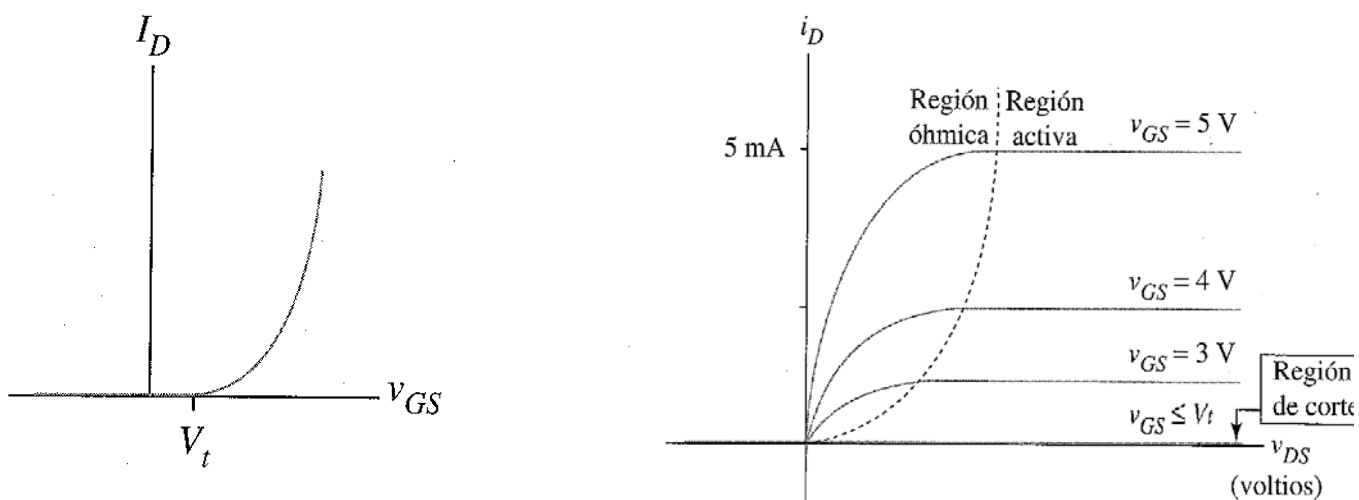
(c)

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_{GS(th)} \text{ para } V_{GS} > V_{GS(th)}$$

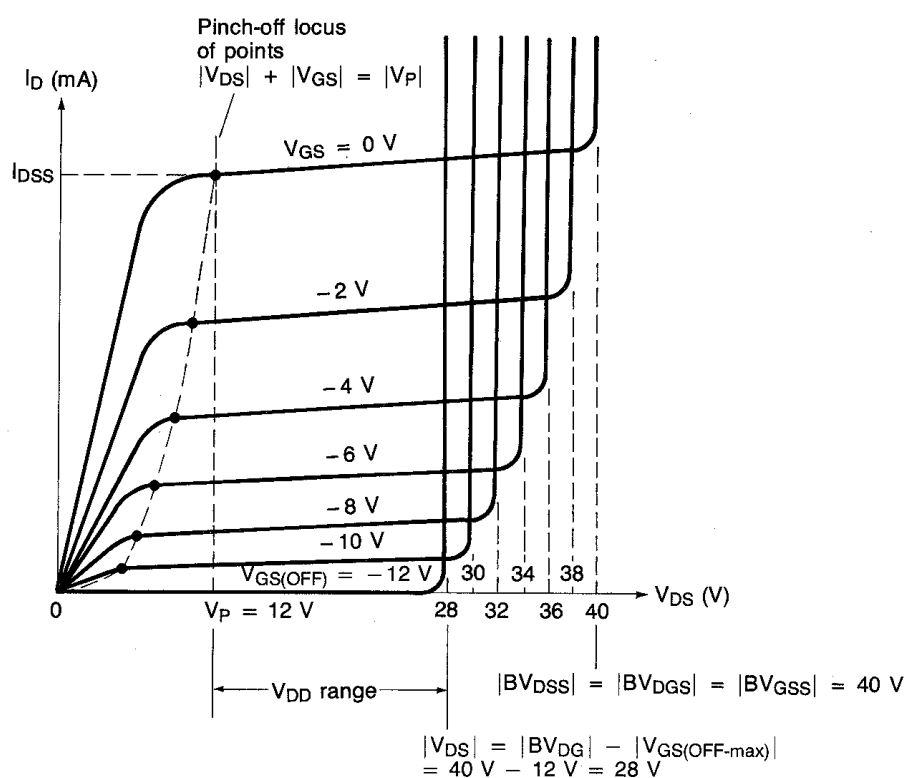
| E-MOSFET | $V_{DS}$ | $V_{GS}$ |
|----------|----------|----------|
| Canal N  | +        | +        |
| Canal P  | -        | -        |

#### A.3.2.4.1. Ecuación de transferencia del E-MOSFET

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 = \frac{K}{2} \cdot V_{Dsat}^2 \text{ con } K = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox}$$



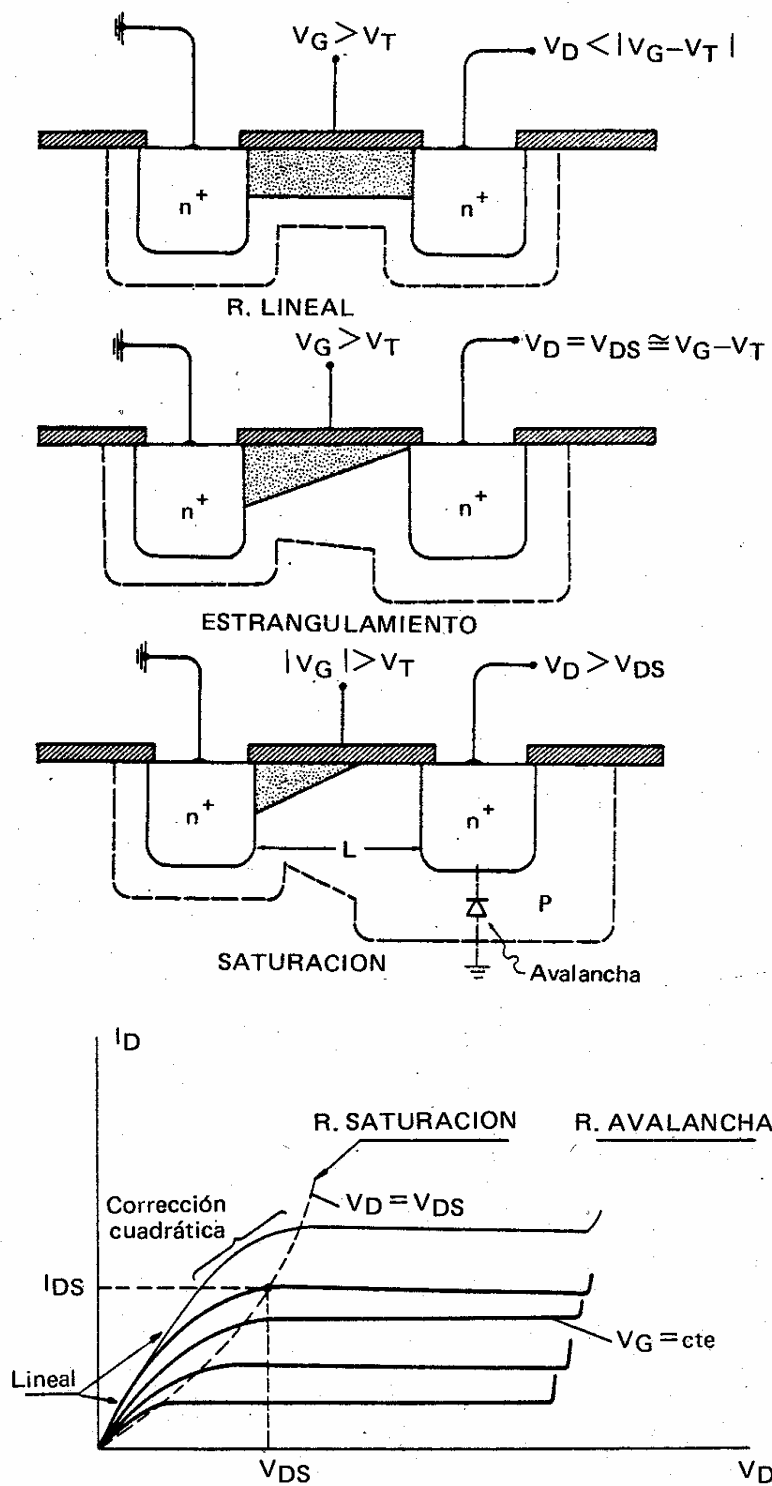
### A.3.2.5. Tensiones de ruptura en el JFET



La limitación para  $V_{DS}$  es,

$$|V_{DS}| = |BV_{DGS}| - |V_{GS(OFF-max)}|$$

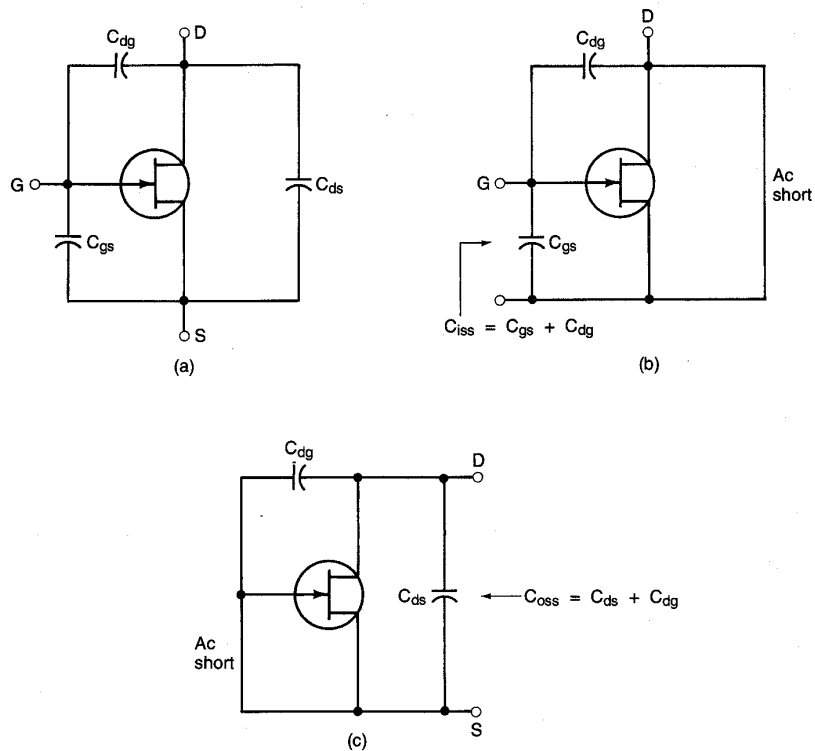
## Ruptura por avalancha en el MOSFET



El fabricante nos especifica  $BV_{DSS}$

### A.3.2.6. Capacidades parásitas del transistor de efecto de campo

- hay una capacidad entre cada dos terminales,  $C_{gs}$ ,  $C_{dg}$ ,  $C_{ds}$
- los fabricantes miden:  $C_{iss}$ ,  $C_{oss}$  y  $C_{rss}$



$$C_{dg} = C_{rss}$$

$$C_{gs} = C_{iss} - C_{rss}$$

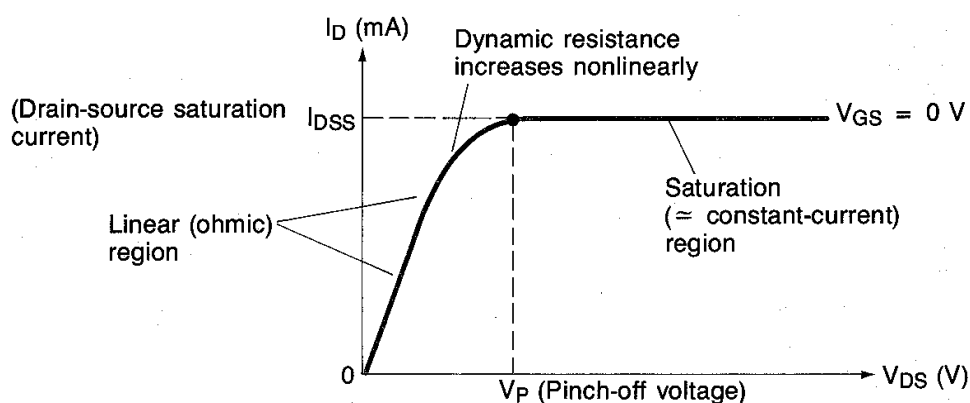
$$C_{ds} = C_{oss} - C_{rss}$$

### A.3.2.7. Precauciones en el manejo del MOSFET - ESD

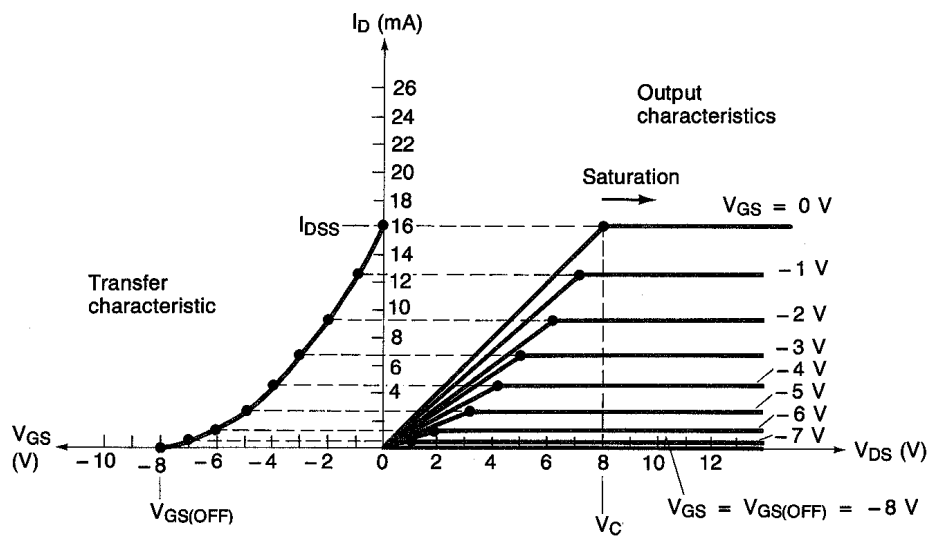
- el MOSFET tiene una  $V_{GS(max)}$  muy baja
- si  $C_{gs}$  se carga estáticamente por encima de  $V_{GS(max)}$  se perfora el dieléctrico

### A.3.3. Curvas características

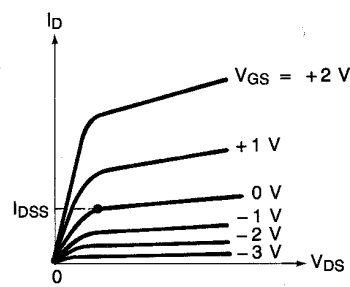
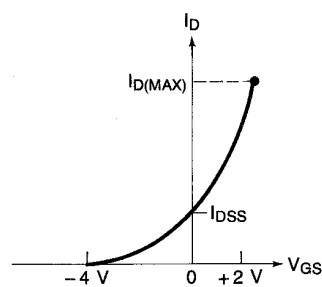
- hay tres zonas de funcionamiento:
  - corte
  - saturación o activa
  - óhmica



### A.3.3.1. El JFET

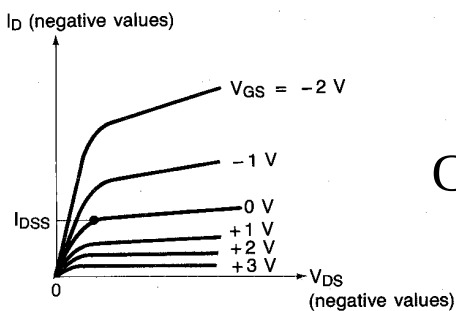
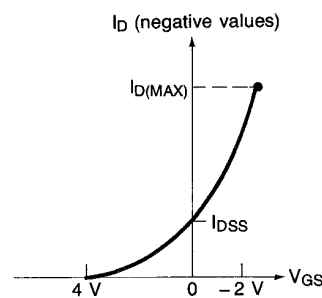


### A.3.3.2. El DE-MOSFET



CANAL N

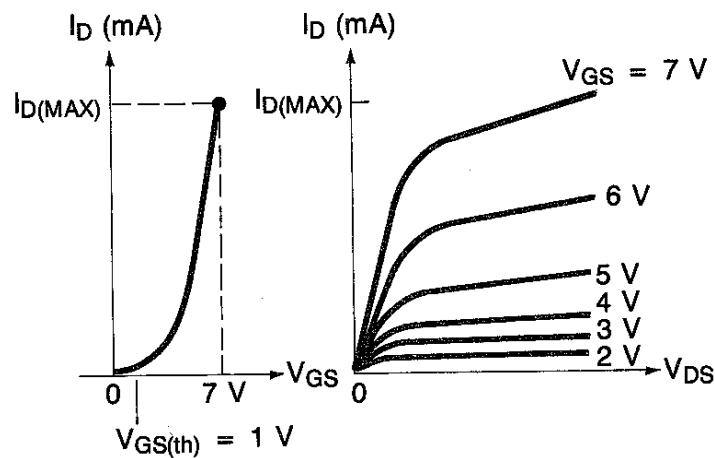
(a)



CANAL P

(b)

### A.3.3.3. El E-MOSFET



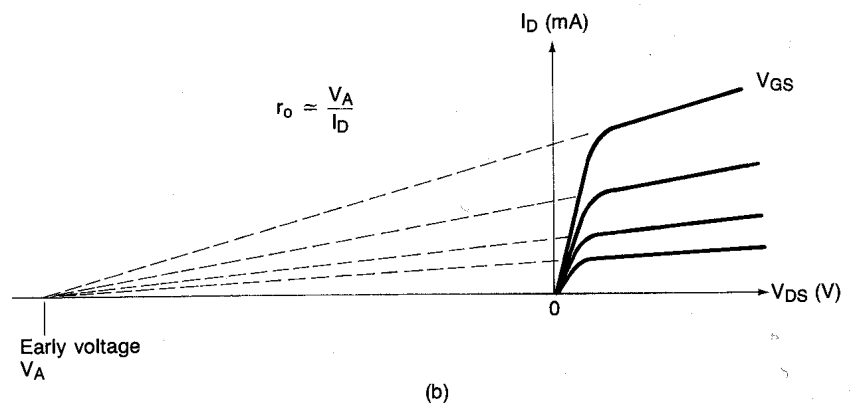
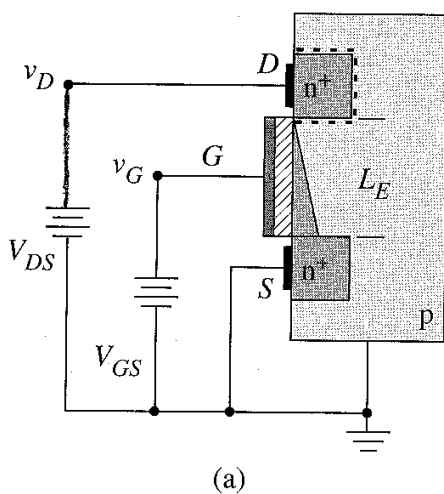
La frontera entre la zona óhmica y la activa es

$$V_{DS} = V_{GS} - V_{GS(th)}$$

La resistencia del canal en la zona óhmica vale:

$$R_{\text{ohmicaMOSFET}} = \frac{V_D}{I_D} = \frac{1}{K(V_{GS} - V_{GS(th)})}$$

Efecto Early:



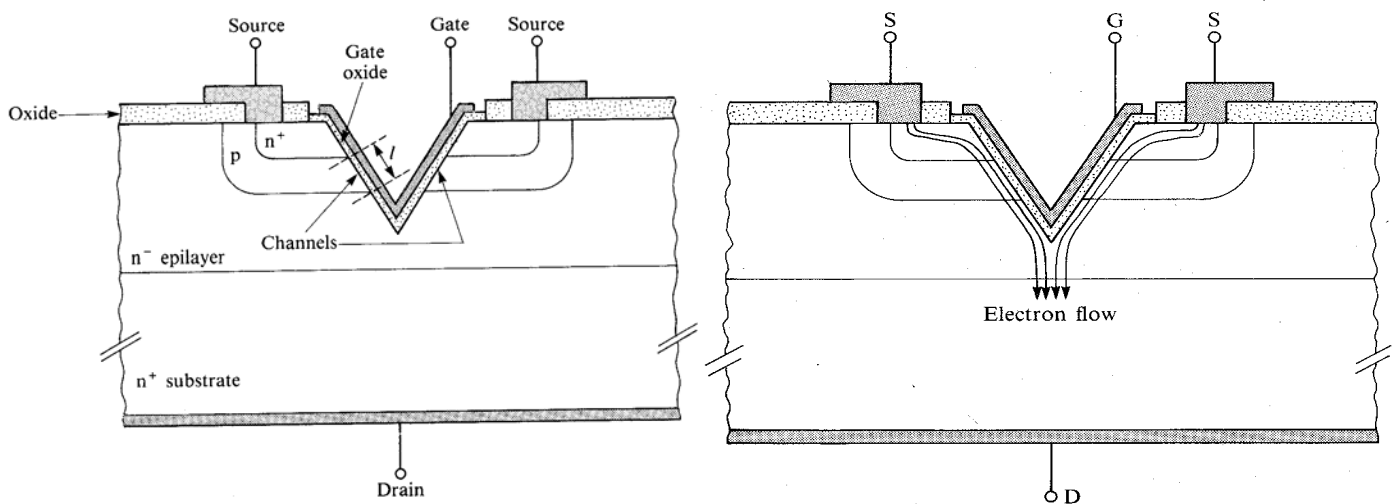


## A.3.4. Tipos de transistores unipolares

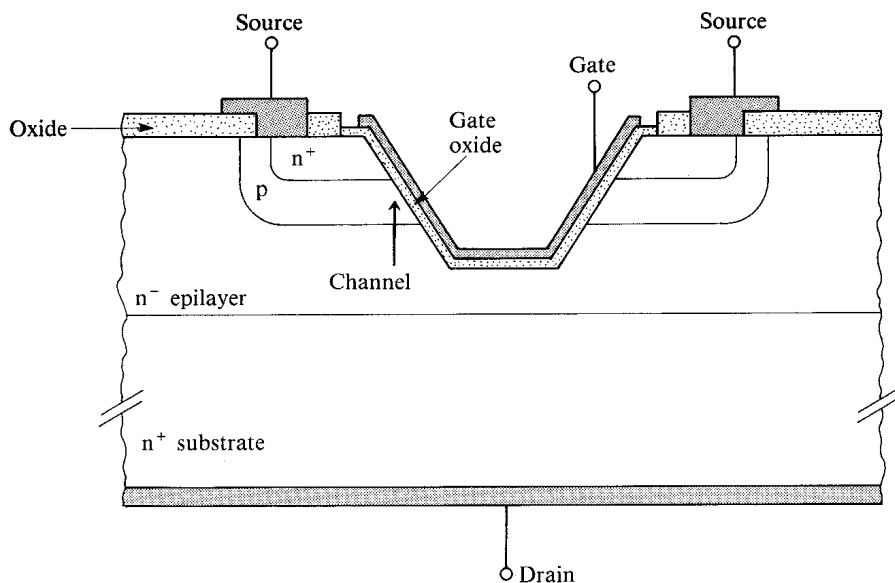
### A.3.4.1. El transistor de estructura vertical

- desarrollado para aplicaciones de potencia

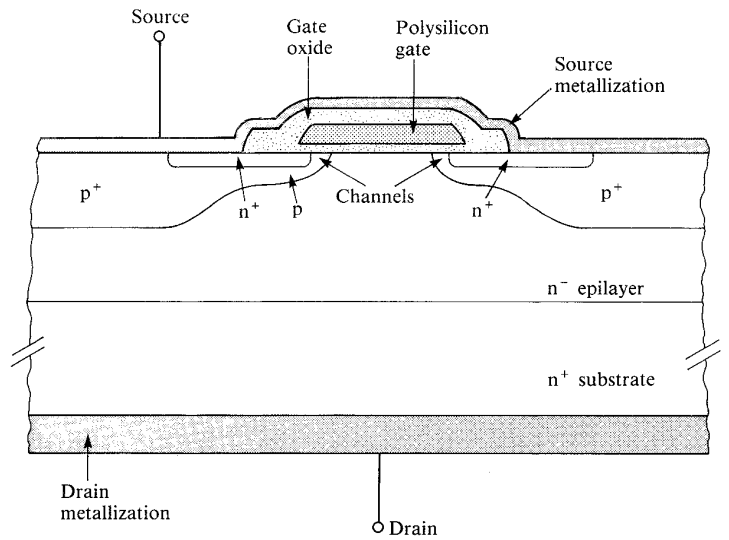
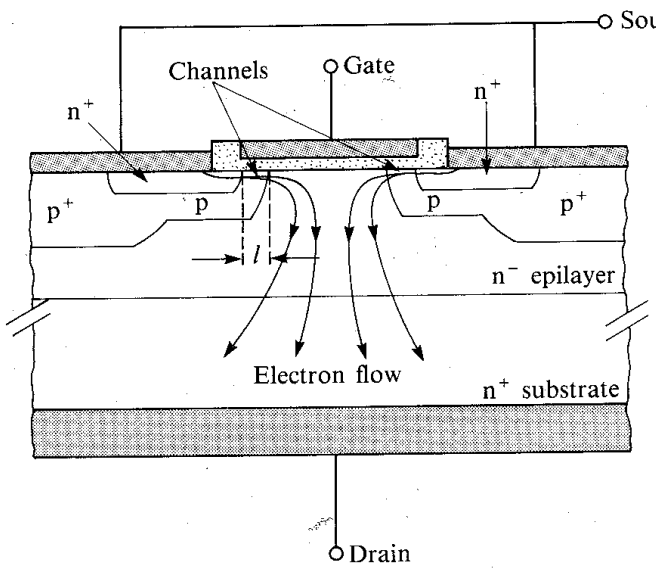
- VMOS



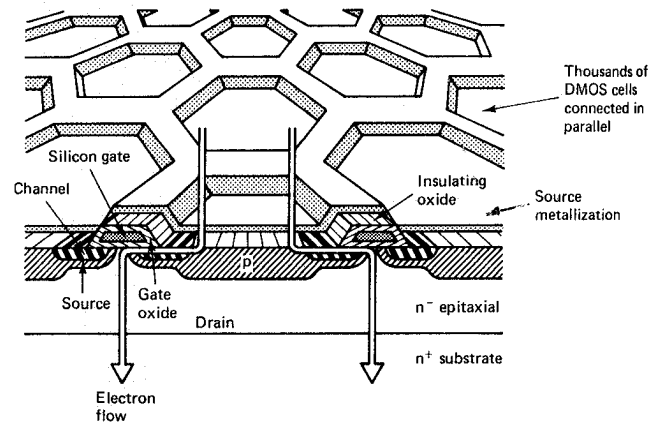
- UMOS



## • DMOS

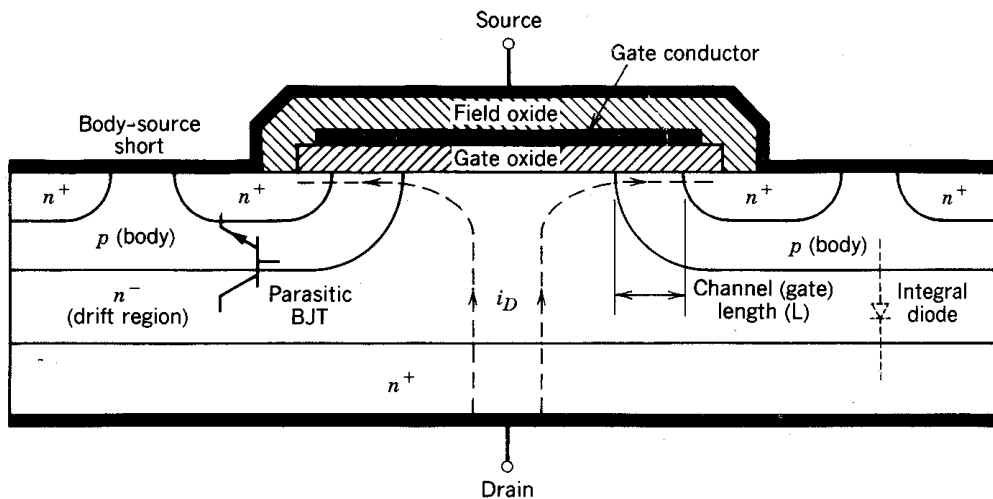


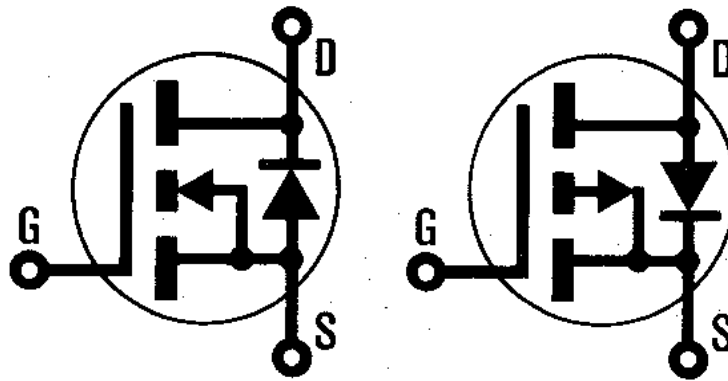
## Celdas MOS



Problema: BJT parásito

Solución: cortocircuito de sustrato y surtidor



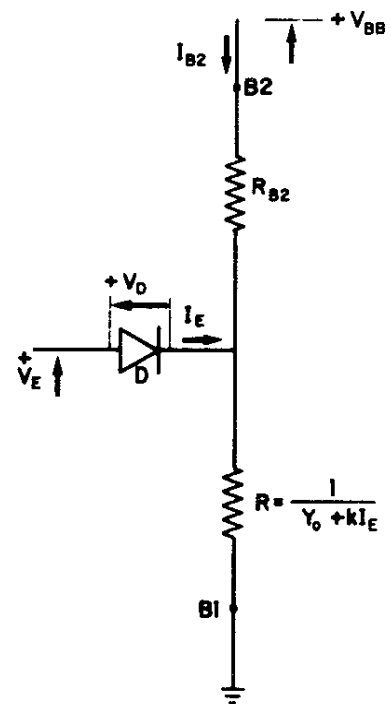
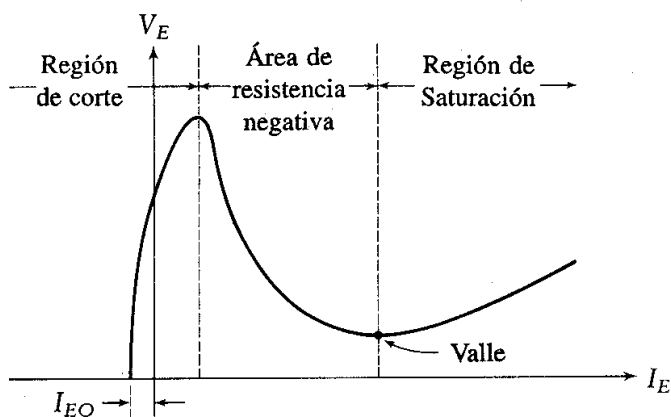
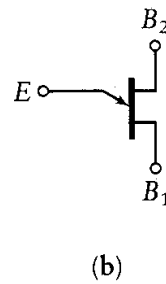
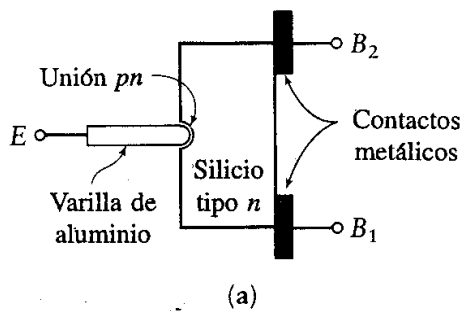


### A.3.4.2. El MESFET

- utilizado en aplicaciones de microondas

### A.3.4.3. El UJT

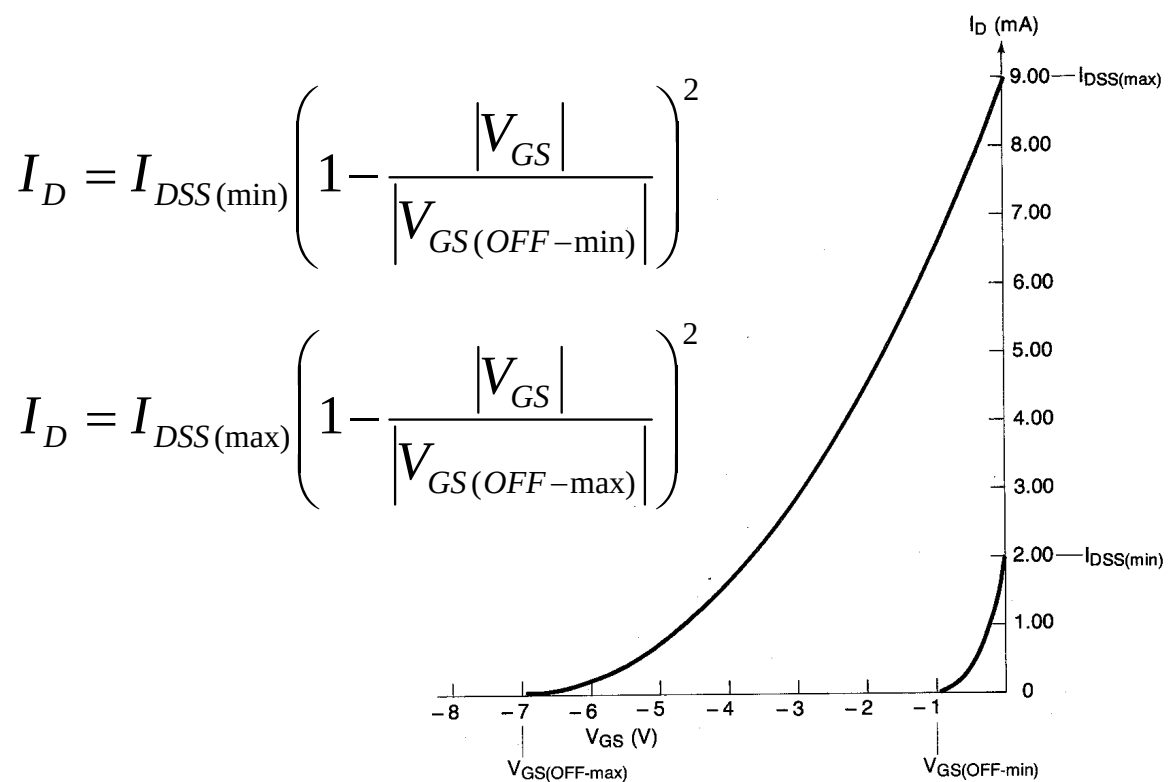
- dispositivo con resistencia negativa y muy utilizado para osciladores



### A.3.5. Análisis del funcionamiento en régimen estático

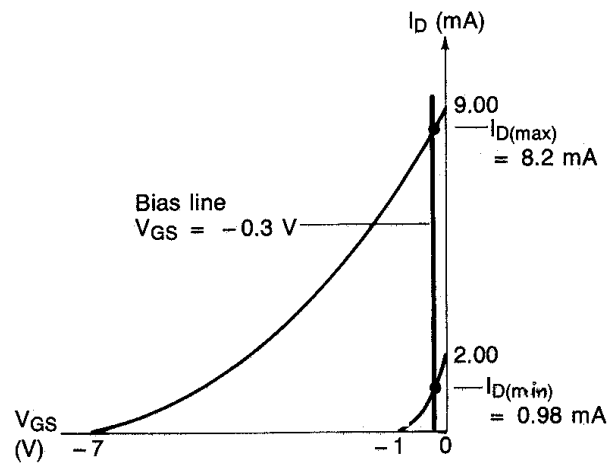
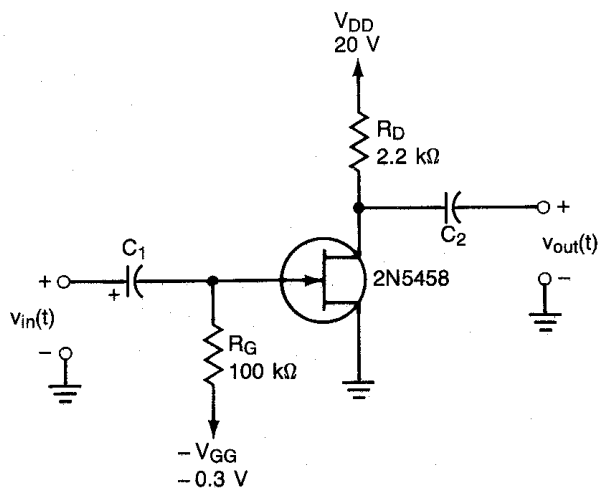
- la ecuación de transferencia es cuadrática
  - => solución analítica más complicada
  - => es preferible la solución gráfica

#### A.3.5.1. Circuitos de polarización del transistor



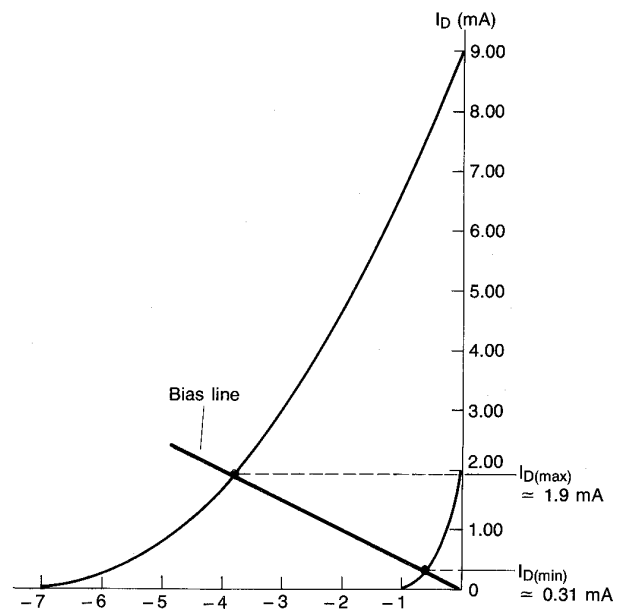
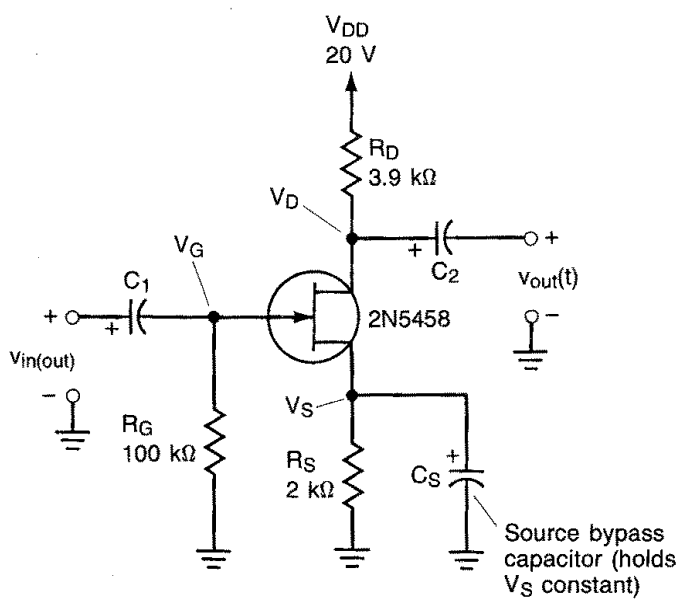
- mucha tolerancia
  - => se necesita estabilizar bien el JFET

### A.3.5.1.1. Polarización fija



$$\Delta I_D = 79\%$$

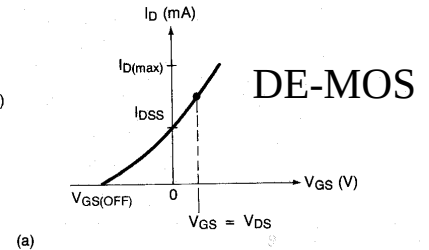
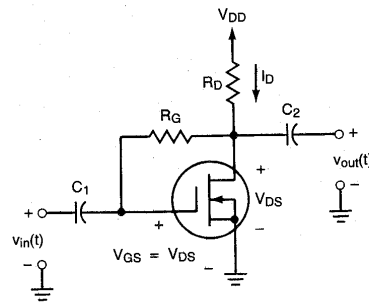
### A.3.5.1.2. Polarización estabilizada en surtidor



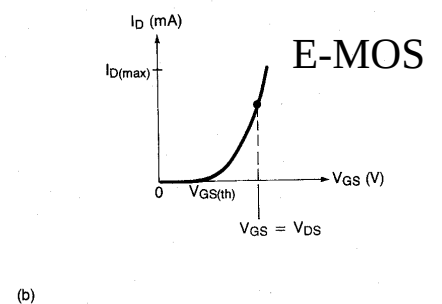
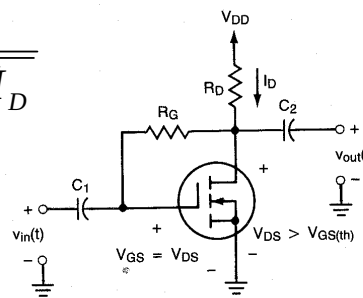
$$\Delta I_D = 72\%$$

### A.3.5.1.3. Polarización realimentando tensión de drenador

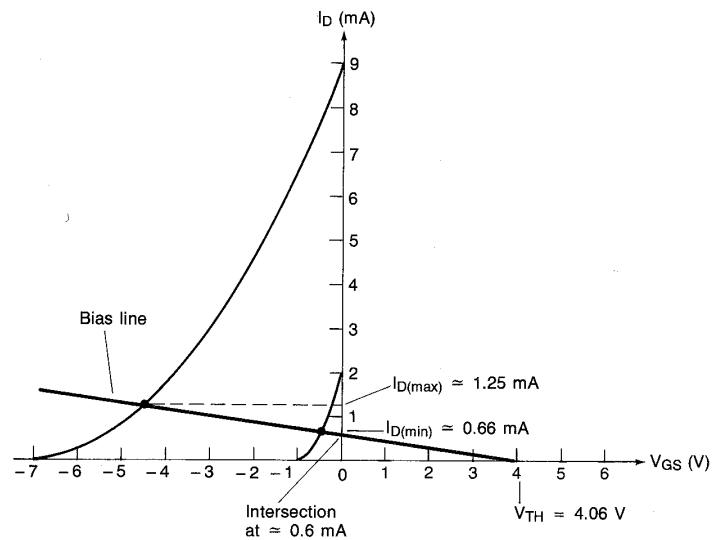
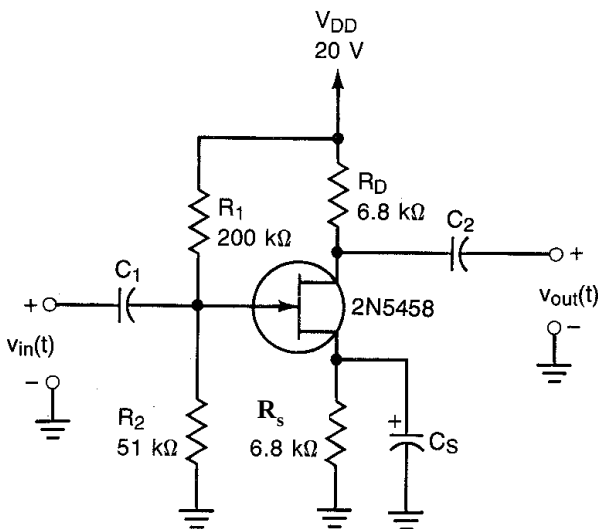
No se puede utilizar con el JFET.



$$R_{no-linearMOSFET} = \frac{dV_{DS}}{dI_D} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot K \cdot I_D}}$$

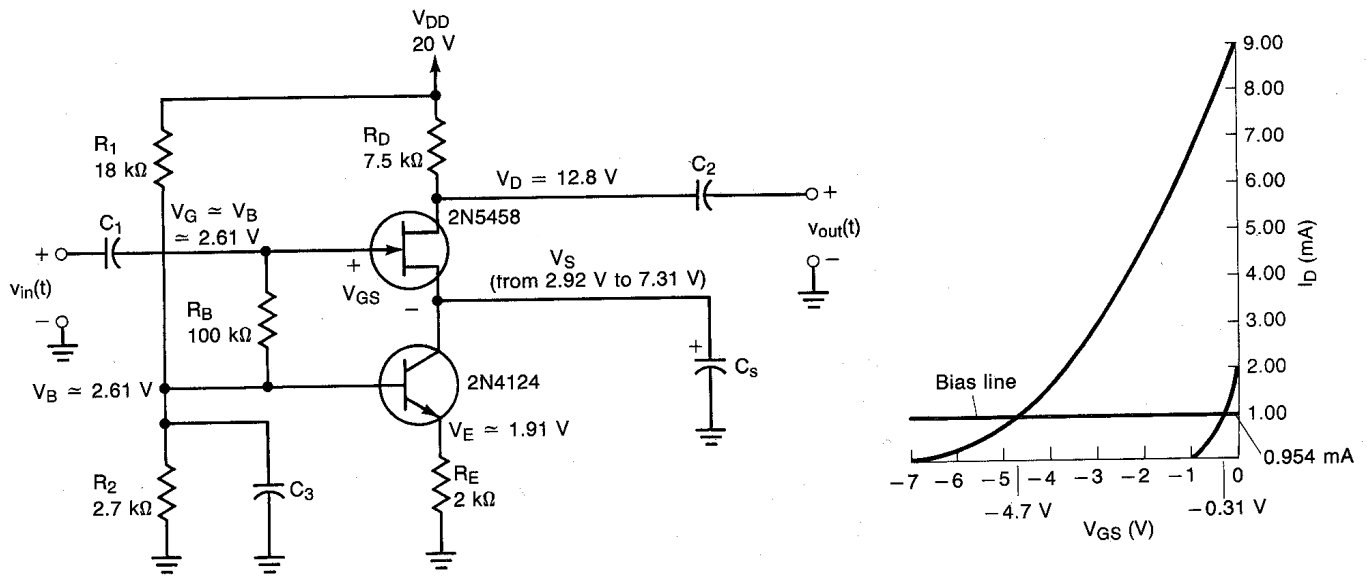


### A.3.5.1.4. Polarización por divisor de tensión



$$\Delta I_D = 31\%$$

### A.3.5.1.5. Polarización de surtidor

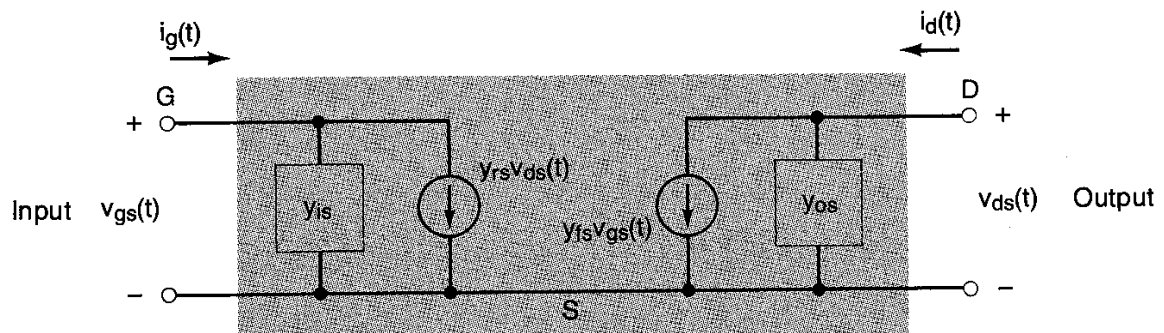


$$\Delta I_D = 0\%$$

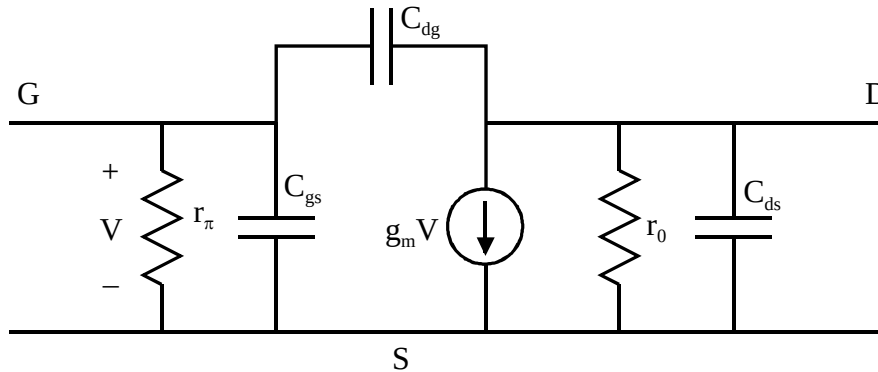
### A.3.6. Análisis del funcionamiento en régimen dinámico

#### A.3.6.1. El transistor en régimen de pequeña señal

- mismos modelos que el BJT
- hay que recalcular los parámetros
- los fabricantes prefieren el modelo de parámetros Y



### A.3.6.1.1. Modelo de parámetros híbridos en $\pi$



JFET y DE-MOSFET 
$$g_m = g_{m0} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$

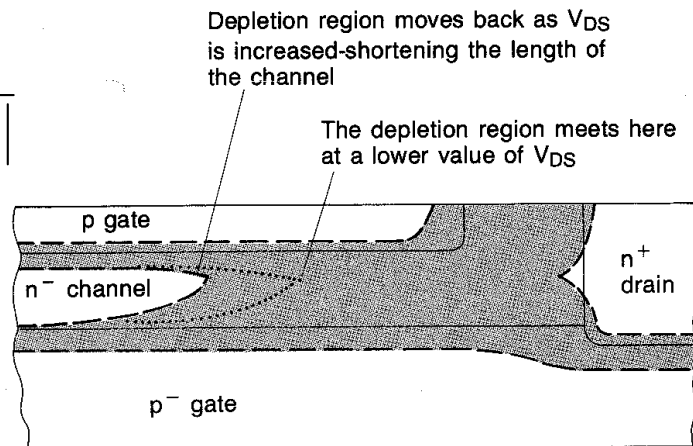
E-MOSFET 
$$g_{m2} = g_{m1} \sqrt{\frac{I_{D2}}{I_{D1}}}$$

JFET 
$$r_\pi = \infty \Omega$$

MOSFET

Variación de la resistencia de salida  $r_0$  en el JFET y DE-MOSFET

$$r_0 = \frac{1}{g_{os}} \approx \frac{1}{|y_{os}|}$$





## **A.3.6.2. El transistor en régimen de gran señal**

### A.3.6.2.1. El transistor en régimen de conmutación

- El E-MOSFET es el más utilizado como interruptor y su funcionamiento es casi ideal
- solamente hay que controlar la tensión de puerta,  $V_{GS}$ , (perforación del dieléctrico) y la de drenador  $V_{DS}$  (ruptura por avalancha).