

CURSO: ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

UNIDAD 1: EL FET – TEORÍA

PROFESOR: JORGE POLANÍA

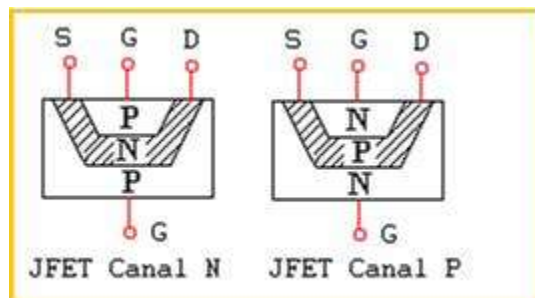
En la electrónica moderna se usan algunos dispositivos semiconductores diferentes al diodo de unión y al transistor bipolar que son muy utilizados en control de motores, de iluminación, de calefacción, en alarmas, en la optoelectrónica, etc. tales semiconductores a tener en cuenta son: El transistor a efecto de campo, el transistor unijuntura, el tiristor, el triac, fuentes de luz como el LED, detectores de luz como la fotocelda, sensores de temperatura como el termistor, etc. A continuación se analizarán y estudiarán cada uno de ellos.

1. EL JFET

CARACTERÍSTICAS

El transistor de efecto de campo FET es un dispositivo semiconductor que combina el bajo consumo de potencia y una elevada resistencia de entrada. Existen dos clases de FET: el JFET (transistor de juntura de efecto de campo) y el MOSFET (Transistor de efecto de campo de metal oxido semiconductor).

Existen dos tipos : El canal N (formado por tres capas PNP) y el canal P (formado por tres capas NPN), tal como se presenta en la siguiente figura,

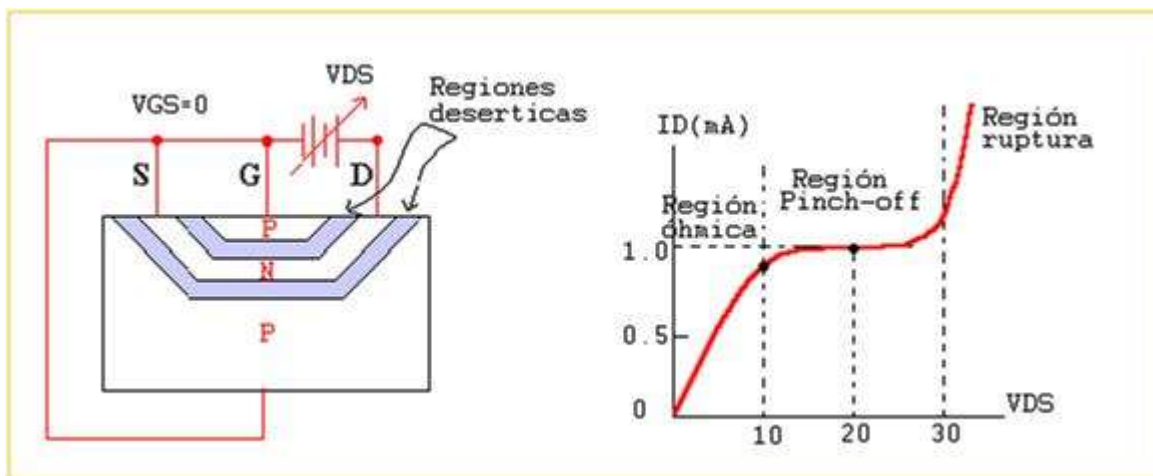


Tiene tres terminales: DRAIN (drenaje), GATE (puerta), SOURCE (fuente) que análogamente corresponden al colector, base y emisor en un transistor bipolar.

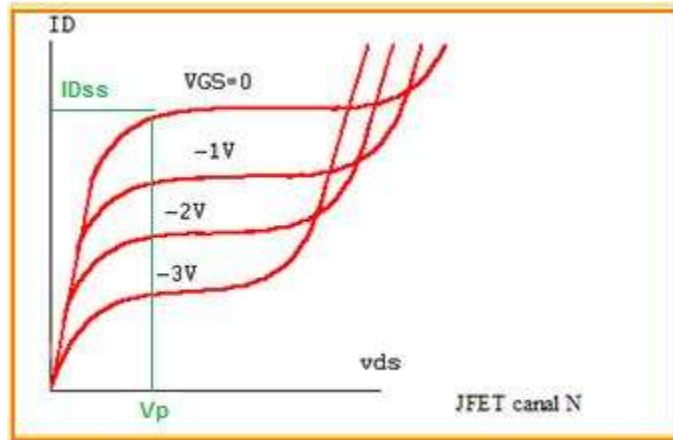
Cuando la puerta se polariza con una tensión apropiada, esta polarización influye sobre la resistencia entre el drenaje y la fuente y por lo tanto sobre la corriente entre ambos terminales. La conducción del JFET es a lo largo del canal y no a través de él como en un transistor bipolar.

JFET CANAL N

Al polarizar el JFET como se muestra abajo en la figura con $V_{GS} = 0$, la resistencia a lo largo del canal aumenta y el ancho de la región desierta también ($\#$ portadores ≈ 0).



La curva característica presenta tres regiones: La región óhmica existe hasta que el valor de la polarización aplicada no es suficiente para unir las regiones desiertas. La región de pinch - off ocurre cuando las regiones desiertas se unen. En esta región un aumento considerable de V_{DS} no produce gran aumento de I_D , su resistencia es muy elevada. Si la polarización sigue en aumento el diodo puerta - canal alcanza la región de ruptura y en ella un pequeño aumento de V_{DS} produce un gran aumento de I_D . Si se usa V_{GS} como parámetro se obtiene una familia de curvas características como se indica en la figura.



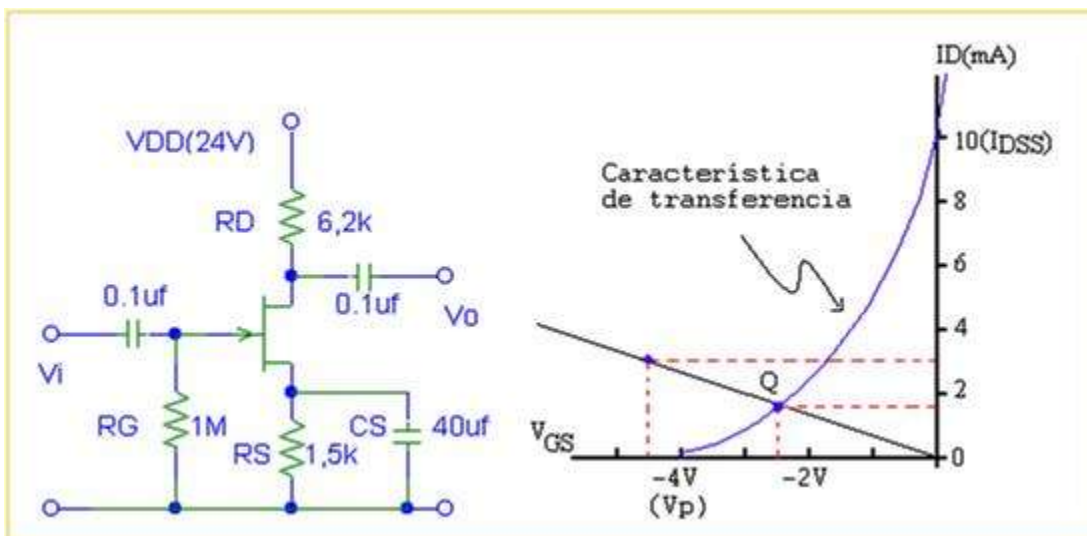
$$I_{DSS} = I_D \text{ para } V_{GS}=0. \text{ entonces } I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Vp: Tensión de pinch off

PUNTO DE OPERACIÓN

El punto de operación de una configuración con JFET CANAL N se refiere a los valores de VGS, VDS, ID.

EJEMPLO 1:



Para el circuito de la figura anterior, $R_D=6.2K$, $R_S=1.5K$, $V_{DD}=24V$. a la derecha del circuito se tiene la curva de transferencia de I_D en función de V_{GS} . en ella el $V_p = -4V$, $I_{DSS} = 10mA$

$$V_{DS}=V_{DD} - I_D \cdot (R_D+R_S)$$

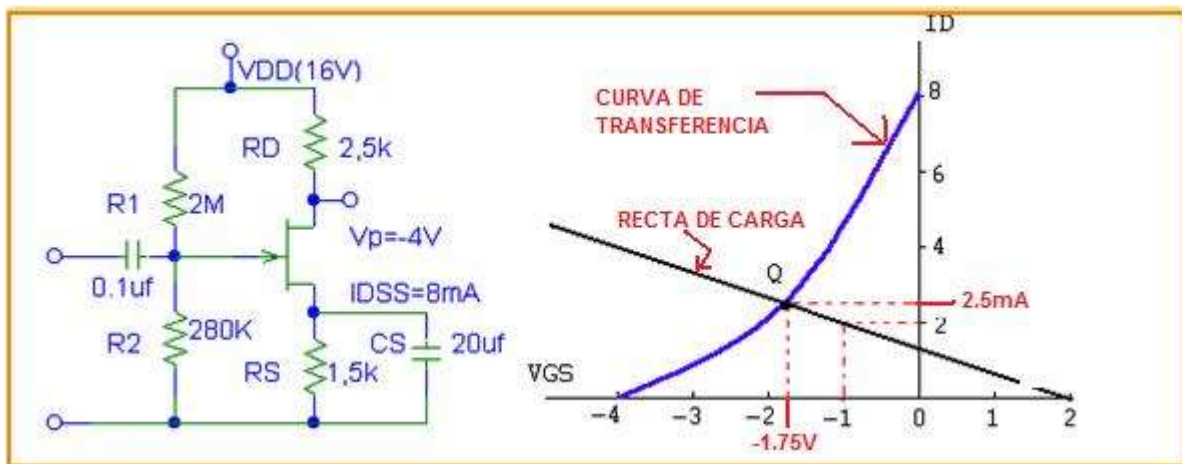
$$V_{GS} = - I_D \cdot R_S, \quad V_{GS} = I_D \cdot 1.5,$$

si $V_{GS}=0$, entonces, $I_D=0$; si $I_D = 3mA$, $V_{GS}=-4.5V$ con estos puntos se traza la recta y se obtiene Q, que es el corte entre la recta de carga y la curva de transferencia.

Punto Q: $V_{GS} = -2.5V$, $I_D=1.5mA$ y $V_{DS} = 24 - 1.5 \cdot (6.2+1.5) = 12.45V$.

Si no se conoce la curva de transferencia, el punto de operación se obtiene como se indica en el siguiente ejemplo:

EJEMPLO 2:



$R_D=2.5K$, $R_S=1.5K$, $R_1=1000K$, $R_2=280K$

$$V_{GG} = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2}, \quad V_{GS} = V_{GG} - I_D R_S$$

$$V_{GG} = \frac{280 \times 16}{2000 + 280} \approx 2V; \quad V_{GS} = 2 - I_D R_S = 2 - 1,5 I_D$$

Gráfica de la curva de transferencia:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$I_D = 8mA \left(1 - \frac{V_{GS}}{-4} \right)^2$$

V_{GS}	-4	-3	-2	-1	0
I_D	0	0,5	2	4,5	8

Con estos puntos se traza la curva de transferencia. Nótese que, $V_p = -4V$, $I_{DSS} = 8mA$

Recta de polarización:

$$V_{GS} = 2 - 1,5 I_D$$

V_{GS}	2	0	-1
I_D	0	1,33	2

Punto de operación:

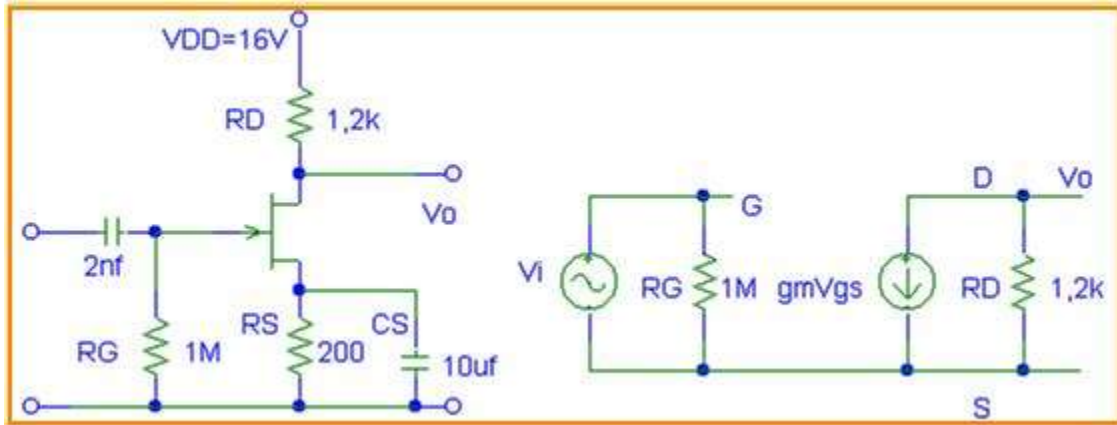
$$I_D = 2,5mA \quad V_{GS} = -1,75V$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) = 6V$$

$$\text{Prueba: } V_{GS} = V_{GG} - I_D R_S = 2 - 2,5(1,5) = -1,75V$$

AMPLIFICACIÓN

A continuación se presenta el circuito equivalente de la configuración fuente (source) común.



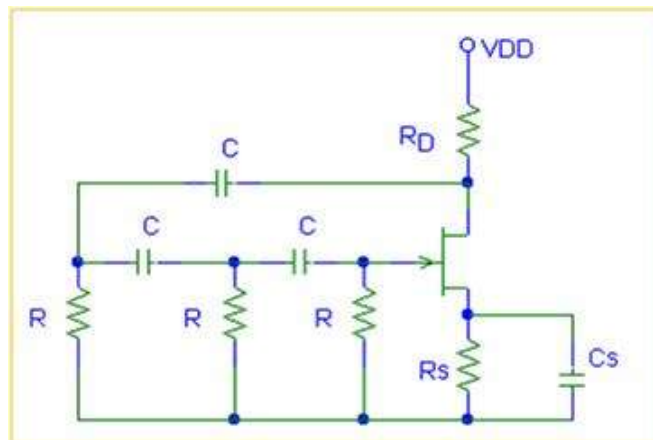
$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot R_D$$

$$v_i = v_{gs}, \quad A_v = -v_o / v_i$$

$$A_v = -g_m R_D$$

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{2I_{DSS}}{-V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

EJEMPLO: OSCILADOR PHASE-SHIFT



$$A = -g_m R_L$$

$$R_L = R_D || r_d$$

Criterio de Barkhausen:

$$A\beta = 1$$

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$$

$$\beta = \frac{1}{29}, A > 29.$$

EJEMPLO 3:

Diseñar un oscilador P-S si $g_m = 5000 \mu\text{hos}$; $r_d = 40\text{K}$; $R = 10\text{K}$. Determinar C para $f = 1\text{KHz}$ y R_D para asegurar $A > 29$. Suponiendo $A = 40$,

$$C = 1/(2\pi f R \sqrt{6}) = 1/(2\pi * 1e3 * 10e3 * 2.45) = 6.5 \text{ nF}$$

$$C = 6500 \text{ pF}$$

$$A = g_m R_L, R_L = A/g_m = 40/5000e-6 = 8\text{K}$$

R_L es el paralelo entre la resistencia R_D y la resistencia interna del JFET r_d

$$R_L = R_D * r_d / (R_D + r_d),$$

$$8 = R_D * 40 / (R_D + 40)$$

$$8*(R_D + 40) = R_D * 40, \quad 8*R_D + 320 = R_D * 40$$

$$32*R_D = 320, \quad R_D = 10 \text{ K}\Omega$$

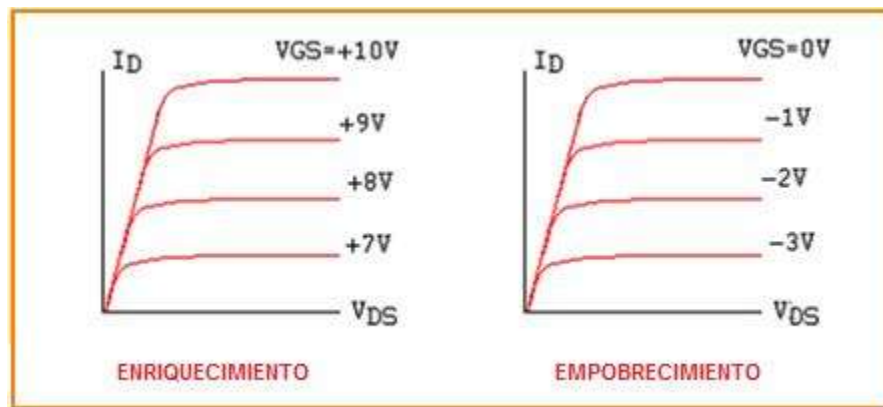
2. EL MOSFET

El transistor de efecto de campo metal – óxido semiconductor tiene una gran semejanza con el JFET. Su diferencia fundamental radica en la forma como se realiza la unión de la fuente. En el JFET el paso puerta – fuente es una unión PN

polarizada inversamente, mientras que en el MOSFET se coloca una capa delgada de material aislante (SiO_2) sobre el canal antes de colocar la puerta. Esto hace que el MOSFET tenga una resistencia de entrada superior al JFET y una corriente de entrada aproximadamente igual a cero.

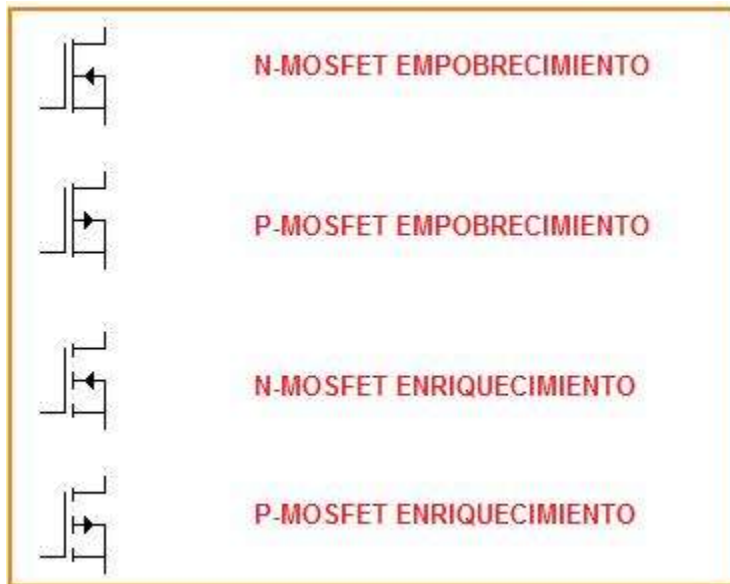
FUNCIONAMIENTO

Debido al aislante en el circuito de puerta, el potencial de entrada no tiene restricción en la polaridad como sucedía con el JFET la cual era inversa. Por tanto, hay dos modos de funcionamiento que se denominan: modo de “empobrecimiento” cuando la polarización es inversa y modo de “enriquecimiento” cuando la polarización es directa. Las curvas características y sus símbolos se dan en las figuras siguientes.



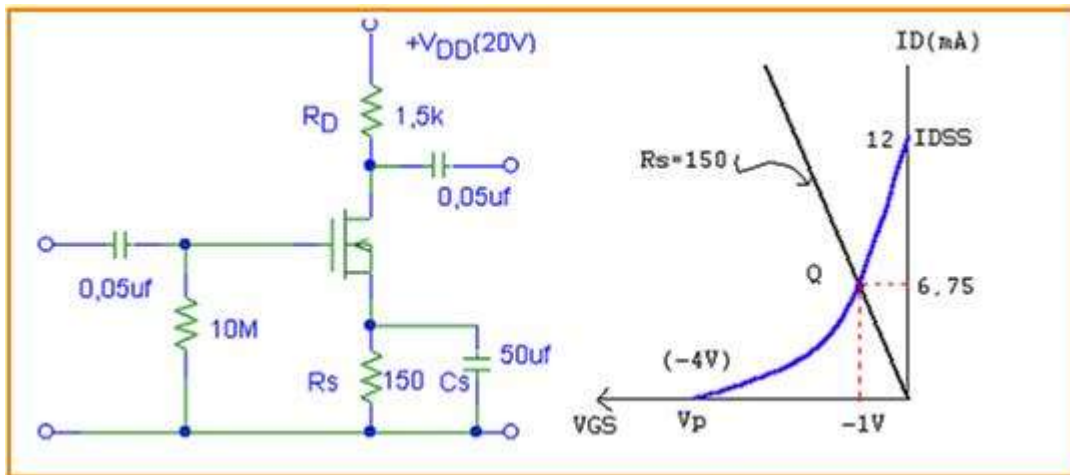
El MOSFET tiene una limitación de puerta que debe conocerse para no dañarlo. Una carga excesiva a la entrada puede perforar el aislante y dañar el transistor. Una carga excesiva puede ser la descarga electrostática de la mano que se produce al tocarlo, la de un soldador con bajo aislamiento. En algunos tipos protegen el MOSFET con un Zener a la entrada, pero esto hace que se altere sus principales características. Cuando la puerta no está protegida deben tomarse precauciones para no dañarlo. Por ejemplo, la punta del soldador conectarla a masa, lo mismo que la persona antes de tocarlo debe descargar su electrostática a una buena masa.

El MOSFET de empobrecimiento se polariza exactamente igual a un JFET.



MOSFET DE EMPOBRECIMIENTO

Hallar el punto de operación del circuito. $R_D=1.5K$, $R_S=150\Omega$, $R_G=10M\Omega$



Característica de transferencia para el MOFET de empobrecimiento, está dada por la ecuación:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_S}{V_P} \right)^2 \quad \text{curva de transferencia.}$$

El punto de polarización es el punto Q:

$$V_{GS} = -1V, I_D = 6.75mA$$

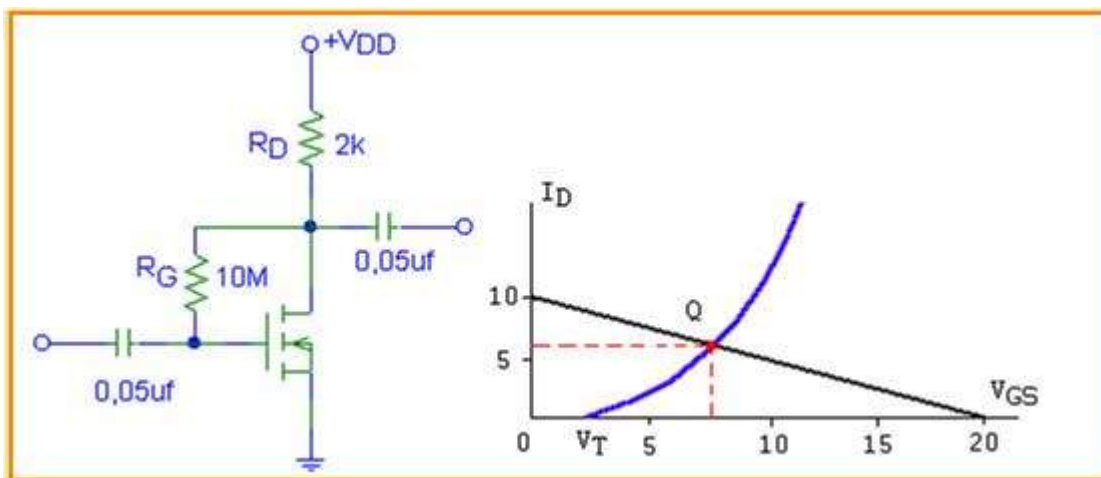
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S)$$

$$V_{DS} = 20 - 6.75e-3 \cdot (1.5e3 + 150)$$

$$V_{DS} = 8.86V$$

MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

Hallar el punto de operación o polarización del circuito. $R_D = 2k$, $R_G = 10M$



La curva característica se rige por la ecuación:

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \text{ donde } K \text{ (típico)} \approx 0,3 \text{ mA/V}^2$$

Para el ejemplo: $V_T = 3V$

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 0,3(V_{GS} - 3)^2$$

como $I_G = 0$, $V_{DS} = V_{GS}$

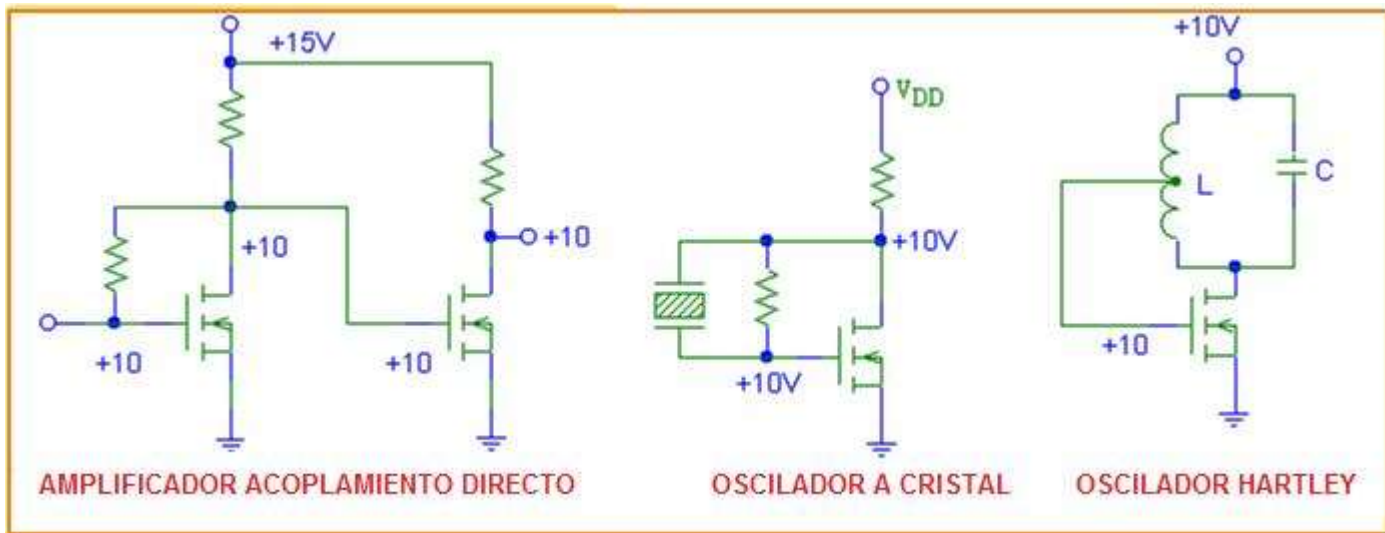
$$V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot R_D$$

En el punto Q: $V_{GS} = 7.5V$

$$7.5 = 20 - 2 \cdot I_D, \quad I_D = (20 - 7.5) / 2 = 6.25 \text{ mA}$$

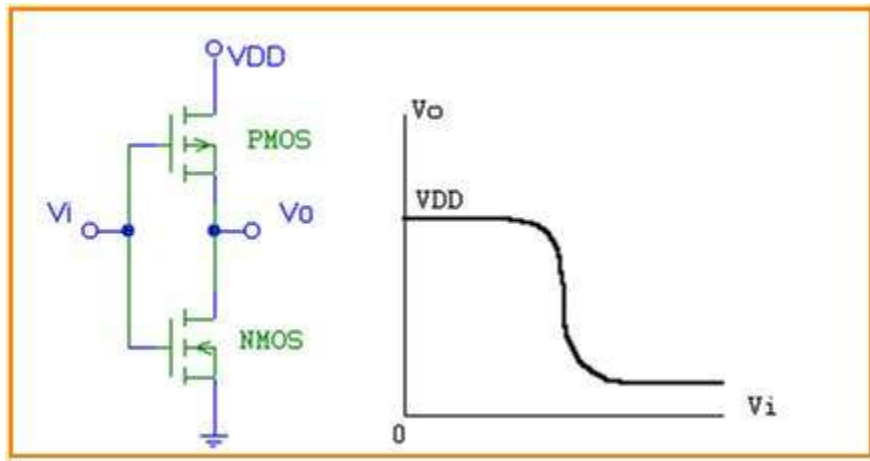
$$V_{GS} = V_{DS} = 7.5V, \quad I_D = 6.25 \text{ mA}$$

El MOSFET de enriquecimiento tiene la propiedad de poderse polarizar de tal forma que la G y el D tengan la misma magnitud y polaridad. En los transistores, JFET, MOSFET de empobrecimiento no ocurre esto, lo cual da una gran aplicación a circuitos tales como estos:



EL CMOS

Una conexión popular usada principalmente en circuitos integrados a gran escala conecta los transistores PMOS y NMOS de enriquecimiento en un dispositivo complementario CMOS, como se indica en la figura.



Con una entrada v_i baja el PMOS conduce y el NMOS está cortado

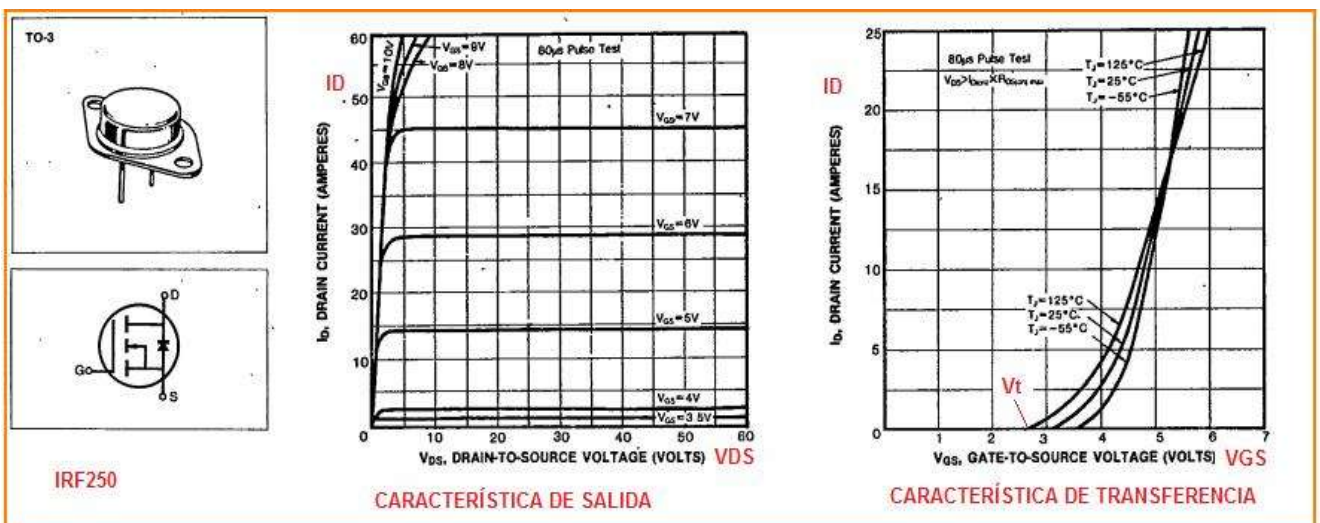
$v_o \approx VDD$

Con una entrada v_i suficientemente positiva el PMOS queda cortado y el NMOS conduce

$v_o \approx 0V$

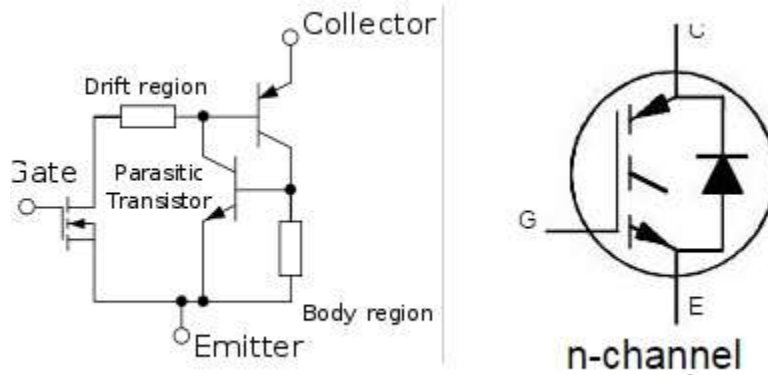
MOSFET DE POTENCIA

Son MOSFET de muy alta amplificación de corriente como el IRF250 que opera hasta con VDS de 200V y una ID de 30A. son muy utilizados en control de potencia.



3. EL IGBT

El insulated-gate bipolar transistor (IGBT) es un semiconductor de potencia que combina la característica puerta drenaje de los Mosfet con la alta corriente y bajo voltaje de saturación de los transistores bipolares BJT. Tiene la entrada de control aislada del FET y la potencia bipolar de un transistor como interruptor.



En resumen, es un dispositivo que tiene una alta impedancia de entrada y es capaz de manejar altas potencias a altas velocidades.

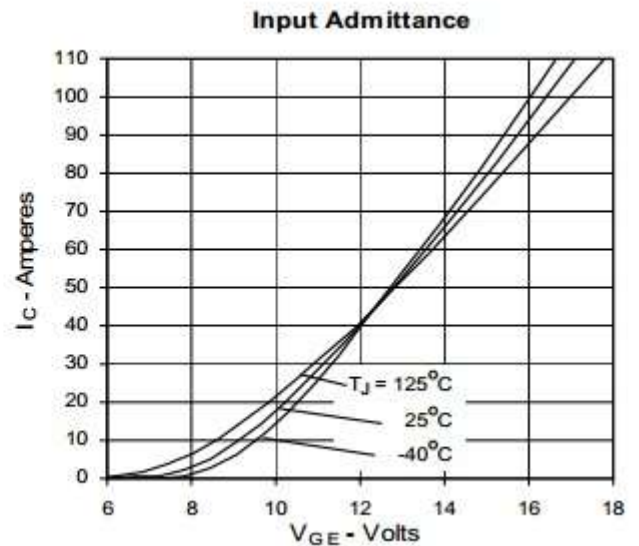
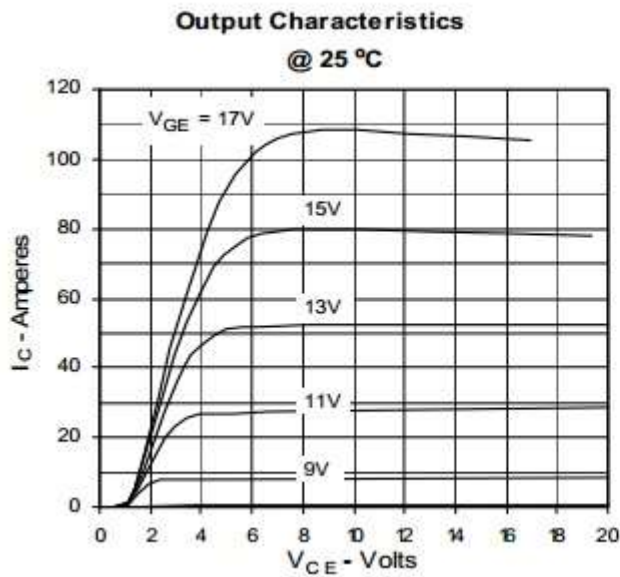
Cuando se aplica un voltaje V_{GE} a la puerta, el IGBT enciende inmediatamente, la corriente de colector I_C es conducida y el voltaje V_{CE} se va desde el valor de bloqueo hasta cero. La corriente I_C persiste para el tiempo de encendido en que la señal en la puerta es aplicada. Para encender el IGBT, el terminal C debe ser polarizado positivamente con respecto a la terminal E. La señal de encendido es un voltaje positivo V_G que es aplicado a la puerta G.

Este voltaje, si es aplicado como un pulso de magnitud aproximada de 15 volts, puede causar que el tiempo de encendido sea menor a 1 s, después de lo cual la corriente de colector I_D es igual a la corriente de carga I_L (asumida como constante). Una vez encendido, el dispositivo se mantiene así por una señal de voltaje en el G. Sin embargo, en virtud del control de voltaje la disipación de potencia en la puerta es muy baja.

El IGBT se apaga simplemente removiendo la señal de voltaje V_G de la terminal G. La transición del estado de conducción al estado de bloqueo puede tomar apenas 2 microsegundos, por lo que la frecuencia de conmutación puede estar en el rango de los 50 kHz.

EL IGBT requiere un valor límite V_{GE} (TH) para el estado de cambio de encendido a apagado y viceversa. Este es usualmente de 4 V. Arriba de este valor el voltaje V_{CE} cae a un valor bajo cercano a los 2 V. Como el voltaje de estado de

encendido se mantiene bajo, el G debe tener un voltaje arriba de 15 V, y la corriente IC se autolimita.



CURSO: ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

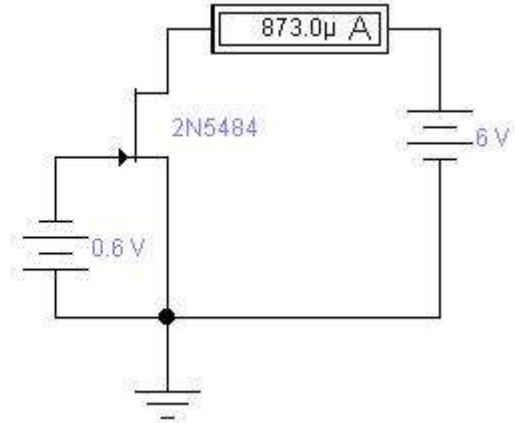
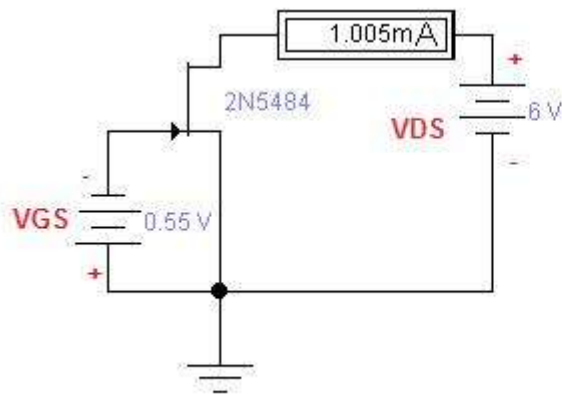
UNIDAD 1: EL FET - SIMULACIÓN

PASO 1: PARÁMETROS VGS, GM

Para un VDS= 6V, variar VGS hasta obtener una corriente de drenaje ID=1 mA, en el transistor JFET 2N5484 como se indica en la figura. el valor obtenido es VGS=-0.55V. Luego variar VGS un valor por encima en 0.5V. Obtener el valor aproximado de gm (transconductancia)

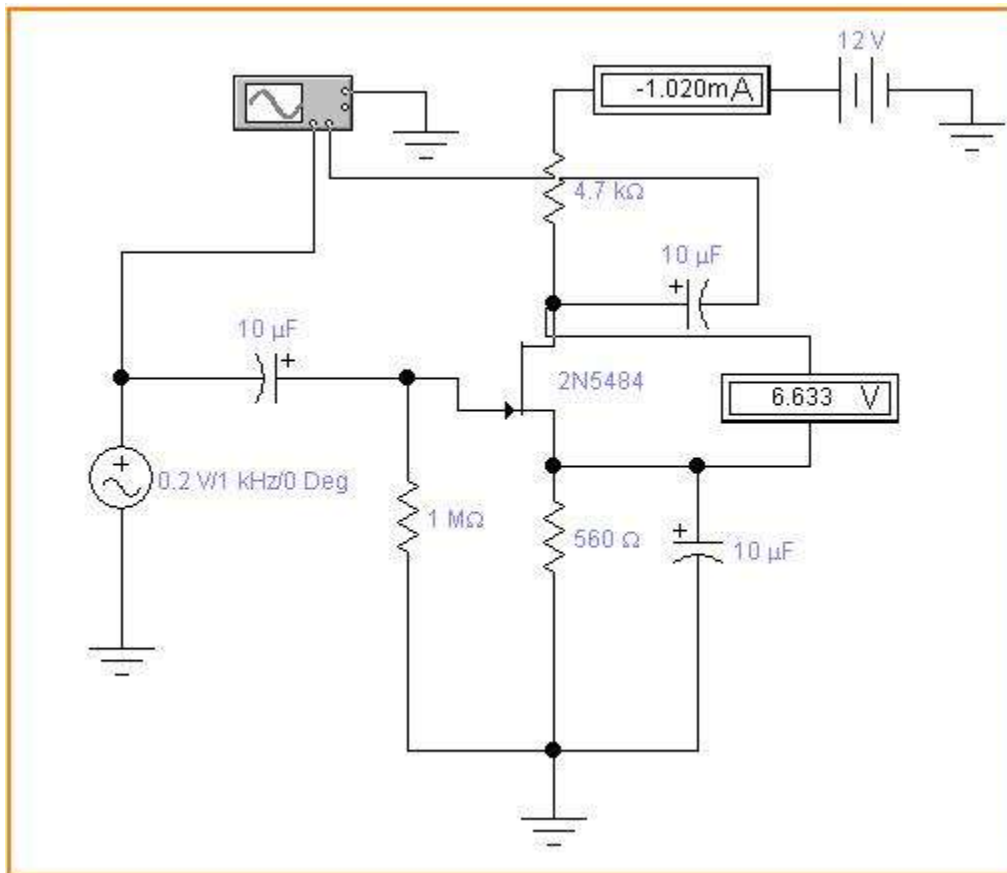
$$g_m = \Delta I_d / \Delta v_{gs} = (1.005 - 0.873) \text{mA} / (-0.55 + 0.6) \text{V}$$

$$g_m = 2.64 \text{ mmhos}$$



PASO 2: AMPLIFICACIÓN

Diseñar un amplificador con una $A_v = 12$ para la siguiente configuración:



Como $V_{GS} = -0.55V$, $V_{GS} = -R_S \cdot I_D$, si se escoge como en el paso 1, $I_D = 1\text{ mA}$,
 $-0.55 = R_S \cdot 1\text{ mA}$, $R_S = 0.55/1\text{ mA} = 0.55\text{ k}\Omega$, se escoge un valor comercial de
 $R_S = 560\Omega$

Como el valor de $g_m = 2.64 \text{ mmhos}$ (paso 1)

$A_v = -g_m \cdot R_D$, o sea, $12 = 2.64 \cdot 10^{-3} \cdot R_D$

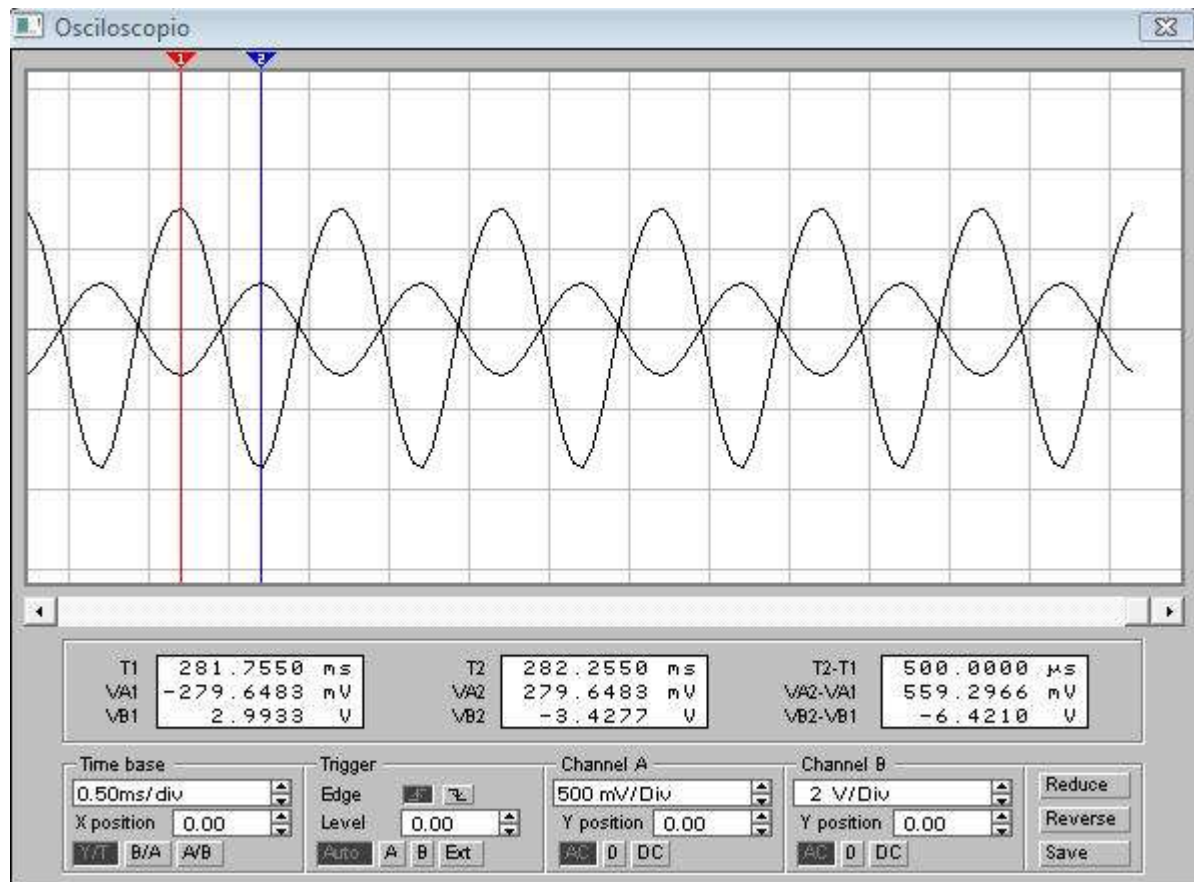
$R_D = 12 / 2.64 \cdot 10^{-3} = 4.54 \text{ K}\Omega$

Se escoge un valor de,

$R_D = 4.7 \text{ K}\Omega$

Se varía un poco la polarización por no tener valores precisos, $V_{DS} \approx 6.7 \text{ V}$

El resultado de la simulación es:



El osciloscopio se conectó con el canal A en la entrada v_i y el canal B a la salida v_o ,

$v_{ipp} = V_{A2} - V_{A1} \approx 560 \text{ mV} = 0.56 \text{ V}$

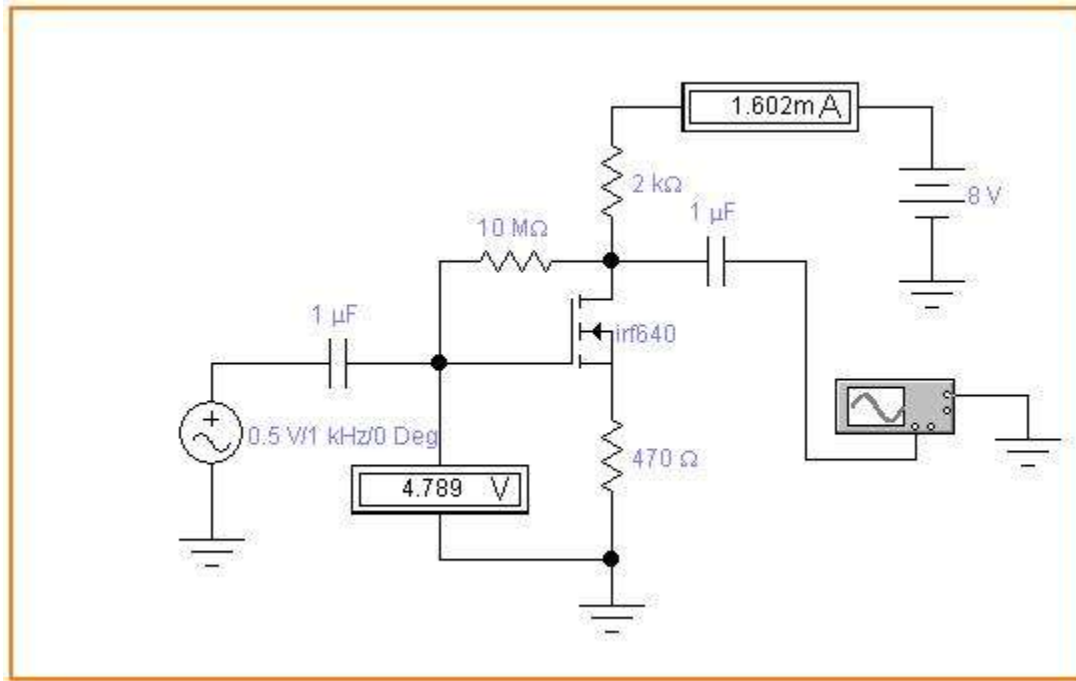
$v_{opp} = V_{B2} - V_{B1} = -6.42 \text{ V}$

$$A_v = v_{opp}/v_{ipp} = -6.42/0.56 \approx -11.5$$

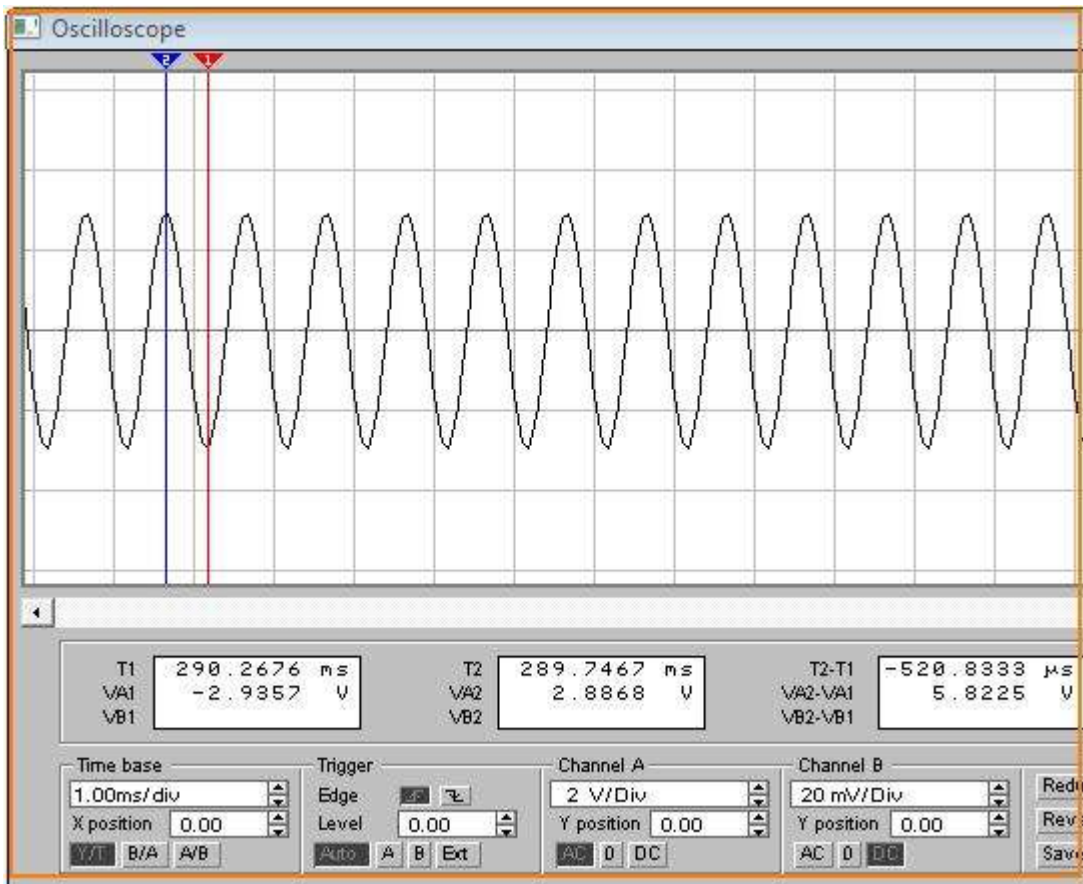
El signo negativo significa que las señales están desfasada 180 grados. Observe que el pico positivo de una es el pico negativo de la otra.

PASO 3: MOSFET

Realice la siguiente simulación:



Resultado de la simulación:



Polarización:

$V_{GS}=4.8V$, $I_D=1.6\text{ mA}$

Prueba:

Como $V_{DD} = 8V$, entonces, se polariza el Mosfet con $V_{DS}=V_{DD}/2 = 4V$

$V_{DD}-V_{DS}=8 - 4 = 4V$

$I_D = (V_{DD}-V_{DS})/(R_D+R_S) = 8V / (2K+0.47K) = 8V / 2.47K = 1.6\text{ mA}$

Amplificación:

De la simulación $A_v = v_o / v_i$

$v_o = 5.8V$, $v_i = 0.5V * 2 * 1.4 = 1.4V$

$A_v = 5.8 / 1.4 = 4.1$

Prueba:

$A_v = R_D / R_S = 2K / 0.47K = 4.2$

CURSO: ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

UNIDAD 1: EL FET - LABORATORIO

PASO 1: EL JFET COMO AMPLIFICADOR

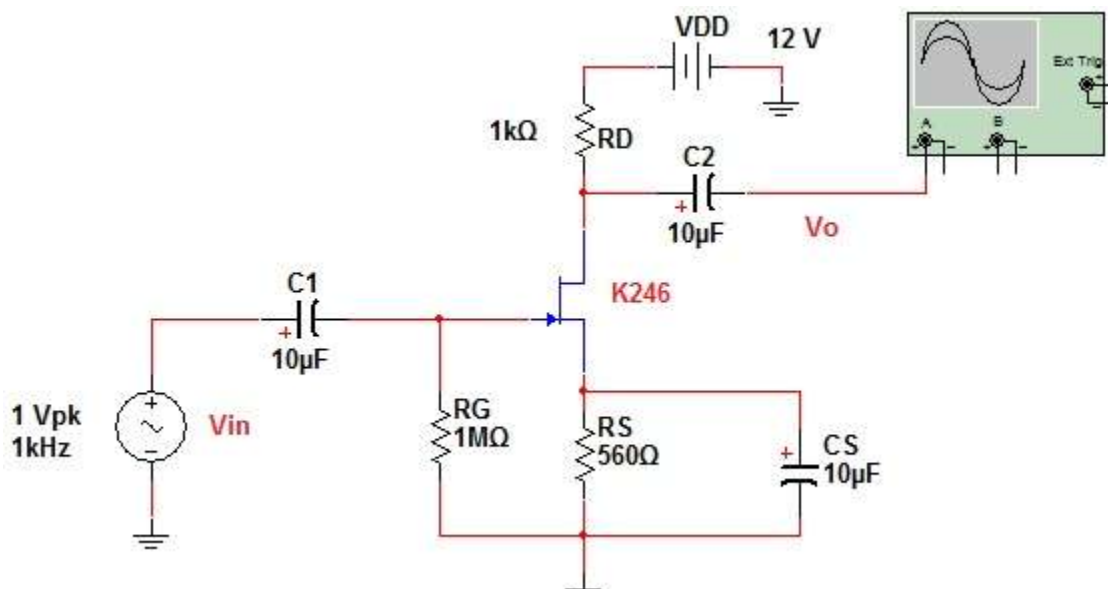
a) Implemente el circuito de la figura en un protoboard $V_{DD}=12V$, $R_D=4.7k\Omega$, $R_S=560\Omega$, $R_G=1M\Omega$. Mida la polarización del transistor:

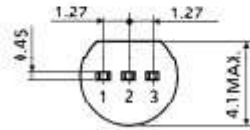
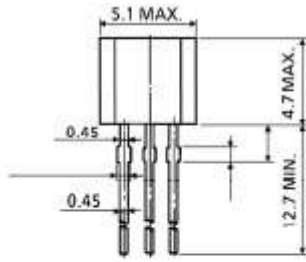
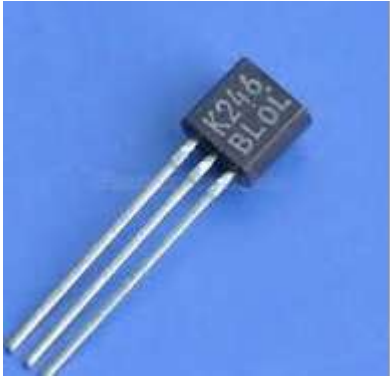
$V_{DS} =$

$V_{GS} =$

$I_D = V_{RD} / R_D =$

Comprobar que: $V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot (R_D + R_S)$





1. SOURCE
2. GATE
3. DRAIN

Si $ID_{SS} = 8 \text{ mA}$ para este transistor, encuentre el valor de V_p (voltaje de pinchoff) de la siguiente ecuación,

$$ID = ID_{SS} * \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$$

Despejando V_p ,

$$V_p = \frac{V_{GS}}{1 - \sqrt{\frac{ID}{ID_{SS}}}}$$

Hallar la transconductancia del fet g_m de la siguiente ecuación,

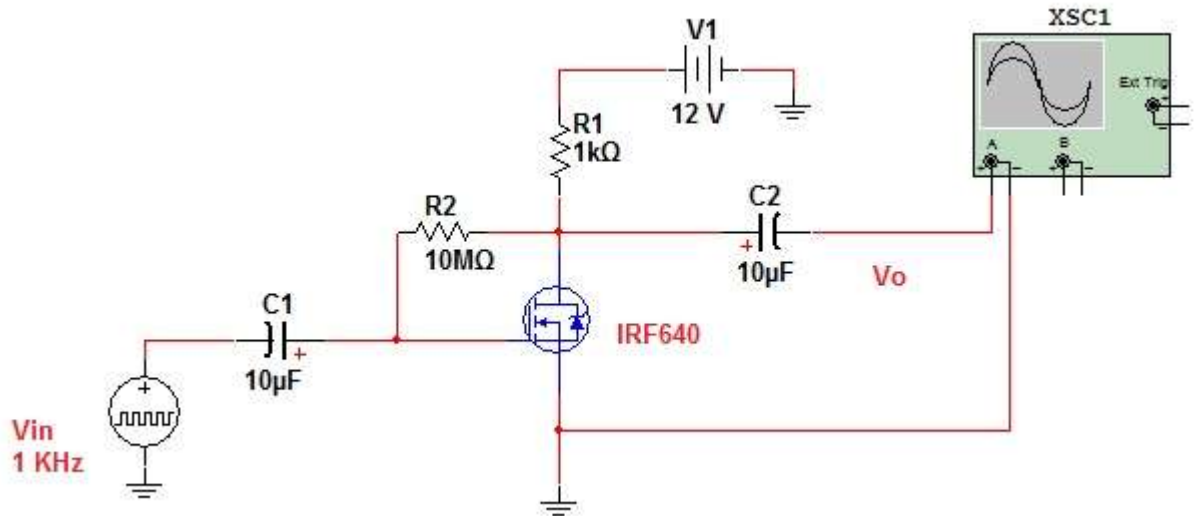
$$g_m = \frac{2 * ID_{SS}}{-V_p} * \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)$$

b) Aplique a la entrada V_{in} una señal senoidal de 1 Vpp a una $f = 1 \text{ KHz}$, conecte el osciloscopio a la salida como se indica en la figura y encuentre la ganancia de este amplificador.

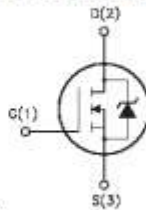
Compruebe este valor obtenido experimentalmente con el valor teórico obtenido de,

$$A_v \approx -g_m \cdot R_D$$

PASO 2: EL MOSFET COMO INTERRUPTOR



INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



Implemente el circuito en el protoboard, el MOSFET es de tipo mejoramiento canal N.

a) Mida el punto de polarización y compruebe que $V_{DD} = V_{DS} + R_D \cdot I_D$

$V_{DS} =$

$V_{GS} =$

$I_D = V_{RD} / R_D =$

Encuentre el valor de V_T (Voltaje de umbral) de la ecuación, suponga $K = 0.5$ mA/V²

$$I_D = K * (V_{GS} - V_T)^2$$

Despejando V_T ,

$$V_T = V_{GS} - \sqrt{\frac{I_D}{K}}$$

Ahora encuentre el valor de la transconductancia de la ecuación,

$$g_m = \frac{2 * I_D}{(V_{GS} - V_T)}$$

b) Aplique una señal de entrada cuadrada de 1 KHz (D=50%), conecte a la salida el osciloscopio. Mida y observe esta señal. ¿Qué concluye?