

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica



Tutorías: Elementos Activos

Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

2019

Edición: Dr.-Ing. Juan José Montero Rodríguez  
Semestre I 2019



# Tutoría Introductoria

**PROBLEMA 1.** Demuestre la equivalencia  $1 \text{ eV} = 1.61 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

**PROBLEMA 2.** Calcule el voltaje térmico a  $300 \text{ K}$  y  $100^\circ\text{C}$  expresado en mV.

**PROBLEMA 3.** La densidad y la masa molar del germanio son  $5.32 \text{ g cm}^{-3}$  y  $72.64 \text{ g/mol}$ , respectivamente. Calcule:

- ¿Qué volumen ocupa una muestra de un gramo?
- ¿Cuántos átomos hay en la muestra?
- ¿Cuántos electrones de valencia hay en la muestra?
- ¿Cuántos enlaces hay en la muestra?

Repita para el caso de silicio, con una densidad de  $2.33 \text{ g cm}^{-3}$  y una masa molar de  $28.09 \text{ g/mol}$ .

**PROBLEMA 4.** Si en  $1 \text{ cm}^3$  de silicio hay  $5 \times 10^{22}$  átomos, ¿cuántos enlaces covalentes hay en ese volumen? A temperatura ambiente hay  $1.45 \times 10^{10}$  electrones libres por centímetro cúbico. ¿Cuántos enlaces rotos hay en ese volumen? ¿Cuál es la razón de átomos de silicio a enlaces rotos? ¿Cuál es la razón de enlaces totales a enlaces rotos?

**PROBLEMA 5.** Demuestre que las siguientes dos expresiones son equivalentes:

$$R = \frac{\rho I}{A} \equiv R = \frac{V}{I}$$

**PROBLEMA 6.** Calcule el número de electrones libres por centímetro cúbico para una muestra de plata, asumiendo que hay 1.3 electrones libres por átomo. La densidad de la plata es  $10.5 \text{ g/cm}^3$  y su masa molar es de  $107.8682 \text{ g/mol}$ .

**PROBLEMA 7.** Se tiene una muestra de silicio cilíndrica de  $5.1 \text{ mm}$  de diámetro y  $51 \text{ mm}$  de longitud, a la cual se le aplica una tensión constante entre los extremos. Si la tensión medida entre dos puntas de prueba separadas  $38 \text{ mm}$  que contactan la muestra es de  $12.5 \text{ V}$ , calcule:

- El campo eléctrico aplicado en la muestra.
- La tensión aplicada a la muestra de silicio entre los extremos.
- La conductividad eléctrica de muestra si una corriente de  $0.1 \text{ A}$  fluye en dirección axial.

**PROBLEMA 8.** Un capacitor de placas paralelas tiene  $160 \text{ mm}^2$  de área y una separación de placas de  $3.5 \text{ mm}$ . La permitividad relativa del dieléctrico entre las placas es de  $\epsilon_r = 5$ .

- Calcule el valor de la capacitancia.
- ¿Qué tensión debe aplicarse para almacenar una carga de  $3.5 \times 10^{-11} \text{ C}$ ?
- Calcule el valor de la capacitancia, si en lugar de dieléctrico se utiliza aire ( $\epsilon_r = 1.00058986$ ).
- ¿Qué tensión se requeriría para almacenar la misma carga, si existiera aire en lugar de dieléctrico entre las placas?

**PROBLEMA 9.** Un capacitor de placas paralelas utiliza un material dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_r = 3.9$ . El espaciamiento entre placas es de 5nm. Si se cambia el dieléctrico por otro material dieléctrico con  $\epsilon_r = 20$ . Calcule:

- La capacitancia por unidad de área en cada caso.
- ¿Cuál es la nueva separación entre placas para lograr la misma capacitancia al cambiar el material?
- Si se aplica al capacitor una diferencia de potencial de 1 V entre las placas, calcule el valor del campo eléctrico en el capacitor original y en el capacitor con la nueva separación de placas.

**PROBLEMA 10.** Mediante análisis dimensional, demuestre que la corriente eléctrica fluyendo a lo largo de una muestra conductora con sección transversal A puede calcularse como

$$I = q \cdot n \cdot v_d \cdot A$$

Donde

I: corriente fluyendo a lo largo de la muestra

q: magnitud de la carga del electrón =  $1.61 \times 10^{-19}$  C

n: número de electrones libres por unidad de volumen en la muestra

$v_d$ : velocidad de arrastre de los electrones

A: sección transversal de la muestra

**PROBLEMA 11.** Considere dos electrodos paralelos en el vacío, separados una distancia de 1 cm en el eje x. El electrodo 1 está ubicado a la izquierda, el electrodo 2 a la derecha. Se aplica una tensión de 0 V al electrodo 1, y de 10 V al electrodo 2. El electrodo 1 emite  $10^6$  electrones.

a) Calcule el campo eléctrico entre los electrodos.

b) Calcule la fuerza experimentada por los electrones emitidos.

c) Calcule la aceleración experimentada por los electrones en el trayecto entre los electrodos.

La masa del electrón en el vacío es de  $9.11 \times 10^{-31}$  kg

d) ¿En cuánto tiempo alcanzan los electrones el electrodo 2?

e) Calcule la velocidad final de los electrones al alcanzar el electrodo 2.

# Tutoría 1

**PROBLEMA 12.** Una muestra de silicio intrínseco está a 0 K. ¿Cuál es la concentración de portadores de carga? Justifique su respuesta.

**PROBLEMA 13.** Una muestra de silicio está dopada con  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . ¿Cuál es la concentración de portadores de carga a 0 K? Justifique su respuesta.

**PROBLEMA 14.** Una muestra de arseniuro de galio se dopa con estaño. Si el estaño sustituye (desplaza) átomos de galio en la red cristalina ¿de qué tipo de dopante se trata? ¿Qué tipo de semiconductor es?

**PROBLEMA 15.** La tabla 1 muestra una lista de semiconductores y sus dopantes. Para la combinación mostrada en cada fila de la tabla, indique si el dopante actuará como donador o acceptor para el semiconductor correspondiente. Asuma que todas las impurezas son sustitucionales.

TABLA 1. Combinaciones de semiconductores y dopantes

Dopante	Semiconductor
N	Si
B	Ge
Zn	GaAs
S	InSb
In	CdS
As	ZnTe

Para resolver los siguientes problemas, a menos que se indique lo contrario, asuma que  $E_F$  se encuentra en la mitad de la banda prohibida. Esta es una buena aproximación de la situación real.

**PROBLEMA 16.** Para fabricar circuitos integrados, se dopa una oblea de silicio con una concentración de aceptores  $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

- a. ¿Cuál es la razón de átomos de silicio a átomos dopantes?
- b. ¿Cuál es la razón de átomos dopantes a portadores de carga intrínsecos?
- c. ¿Cuál es la concentración de portadores minoritarios en la oblea?
- d. ¿Qué energía tiene el nivel de Fermi?

**PROBLEMA 17.** Una muestra de silicio a  $T = 300 \text{ K}$  está dopada con boro en una concentración  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  y con arsénico en  $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

- a) ¿De qué tipo es el material, P o N? Justifique su respuesta.
- b) Determinar el dopado neto de la muestra.
- c) Calcular la concentración de electrones y huecos

d) Repetir c) a una temperatura  $T = 600\text{ K}$ , utilizando la ecuación analítica para el cálculo de la concentración intrínseca de portadores:

$$n_i(T) = 2 \left( \frac{2\pi m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

donde  $m_e = 1.08 \cdot m_0$  para el Silicio.

Para los siguientes tres problemas, suponga, para facilitar el cálculo, que  $E_F$  permanece constante con la temperatura.

PROBLEMA 18. El nivel de energía de Fermi para cierto material es de 6.25 eV con respecto al nivel de vacío a una temperatura de 300 K. Los electrones en el material siguen la distribución de Fermi-Dirac. Para este ejercicio, suponga que  $E_F$  permanece constante con  $T$ .

a) Encontrar la probabilidad que un nivel de energía de 6.5 eV con respecto al nivel de vacío sea ocupado por un electrón.

Nótese que la energía está especificada con respecto al nivel de vacío, el cual se toma como referencia de energía cero.

b) Repetir para  $T = 950\text{ K}$

c) Calcular la temperatura a la cual hay un 1 % de probabilidad que un estado de 0.3 eV debajo del nivel de Fermi esté vacío de electrones.

PROBLEMA 19. Calcular la probabilidad que un nivel de energía  $3kT$  por encima de la energía de Fermi esté ocupado por un electrón a  $T = 300\text{ K}$ .

PROBLEMA 20. ¿Cuál es la probabilidad de ocupación de los estados electrónicos de silicio a una energía  $E = E_F + 0.0455\text{ eV}$  para:

a)  $T = 300\text{ K}$ ?

b)  $T = 450\text{ K}$ ?

c) Calcular el error cometido si se usa la aproximación de Boltzmann.

## Tutoría 2

PROBLEMA 21. Considerando como material semiconductor el silicio, asuma que la movilidad no cambia con la temperatura y calcule con ayuda de la figura ??

- a) La resistividad a temperatura ambiente
- b) La resistividad a 400 K
- c) La resistividad a 600 K

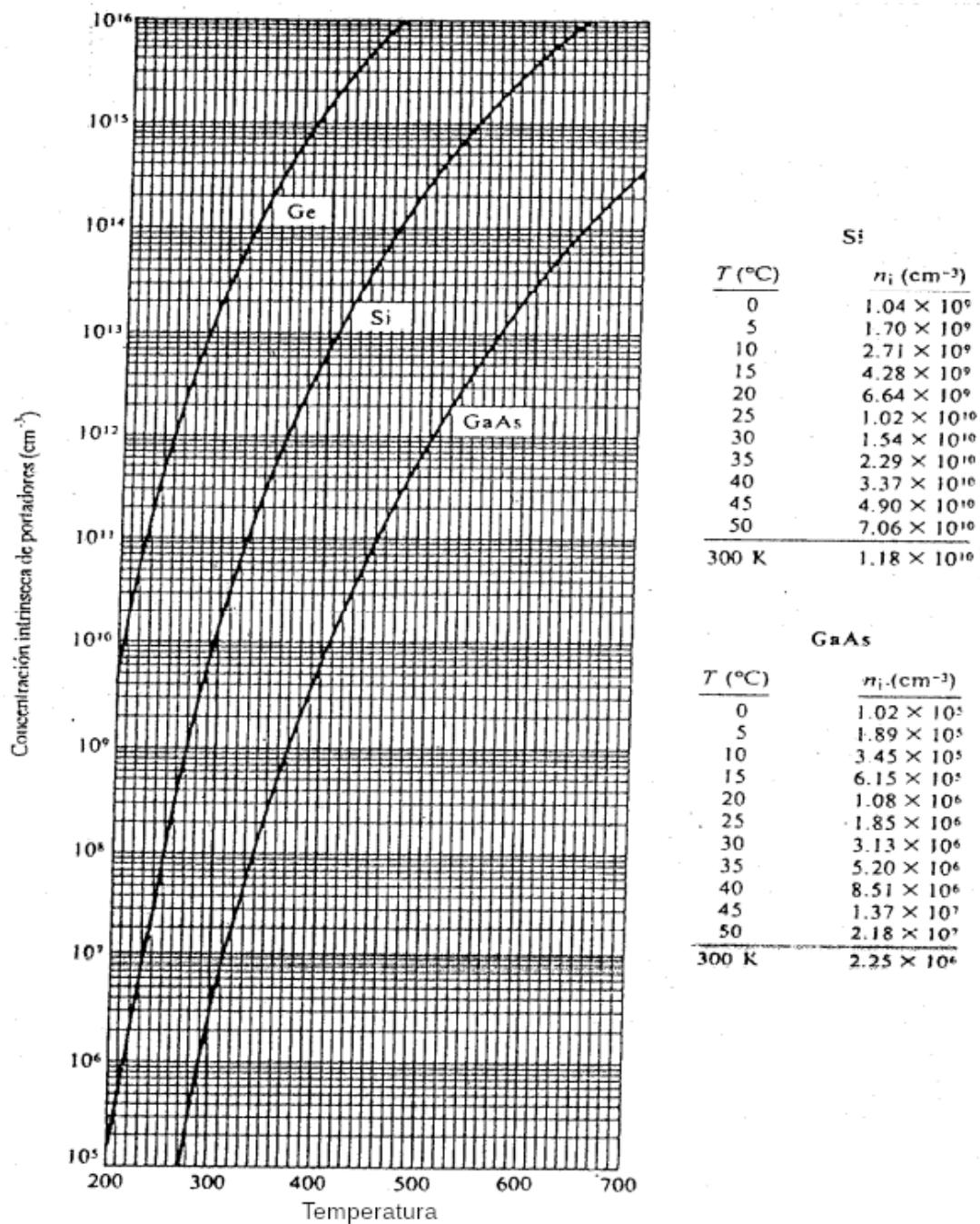


FIGURA 1. Concentración de portadores de carga contra temperatura.

PROBLEMA 22. Con ayuda de la figura ??, determine la concentración de impurezas necesaria para fabricar una resistencia de  $500 \Omega$  con una barra de silicio tipo P de  $1 \text{ cm}$  de longitud y  $10^{-2} \text{ cm}^2$  de sección. Calcule la concentración de portadores de carga minoritarios. Repita para una barra de silicio de tipo N.

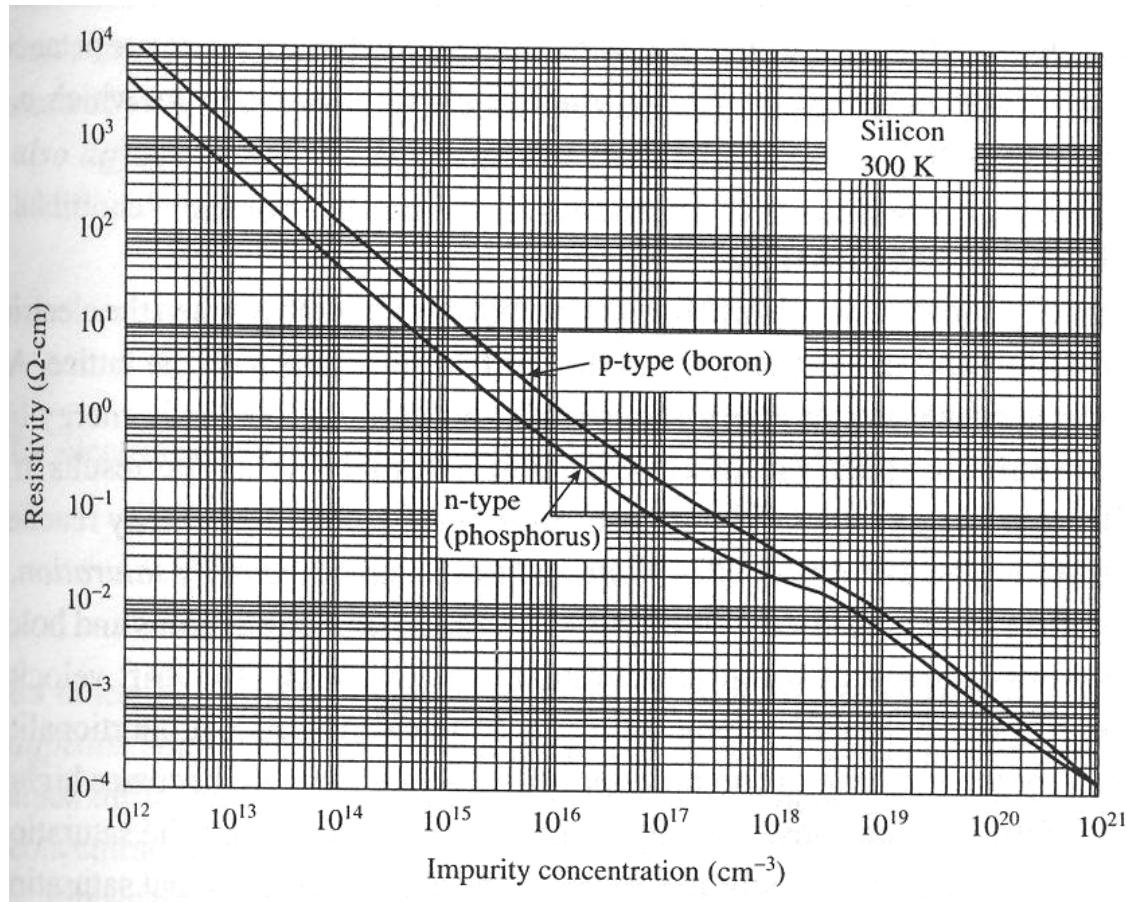


FIGURA 2. Resistividad contra dopado en el silicio, tipo N y tipo P, a 300 K.

PROBLEMA 23. Considere una muestra de silicio tipo p con una resistividad de  $2 \Omega \cdot \text{cm}$  a 300 K. Con ayuda de la figura ?? encuentre:

a) La concentración de huecos,  $p_0$

b) La concentración de electrones,  $n_0$

Con ayuda de la figura ?? encuentre:

c) El valor de la movilidad de los huecos,  $\mu_p$

d) El valor de la movilidad de los electrones,  $\mu_n$

Asumiendo que la concentración de electrones es despreciable,

e) Calcule de manera exacta la movilidad de los huecos, utilizando la ecuación:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n + q\mu_p p} \approx \frac{1}{q\mu_p p}$$

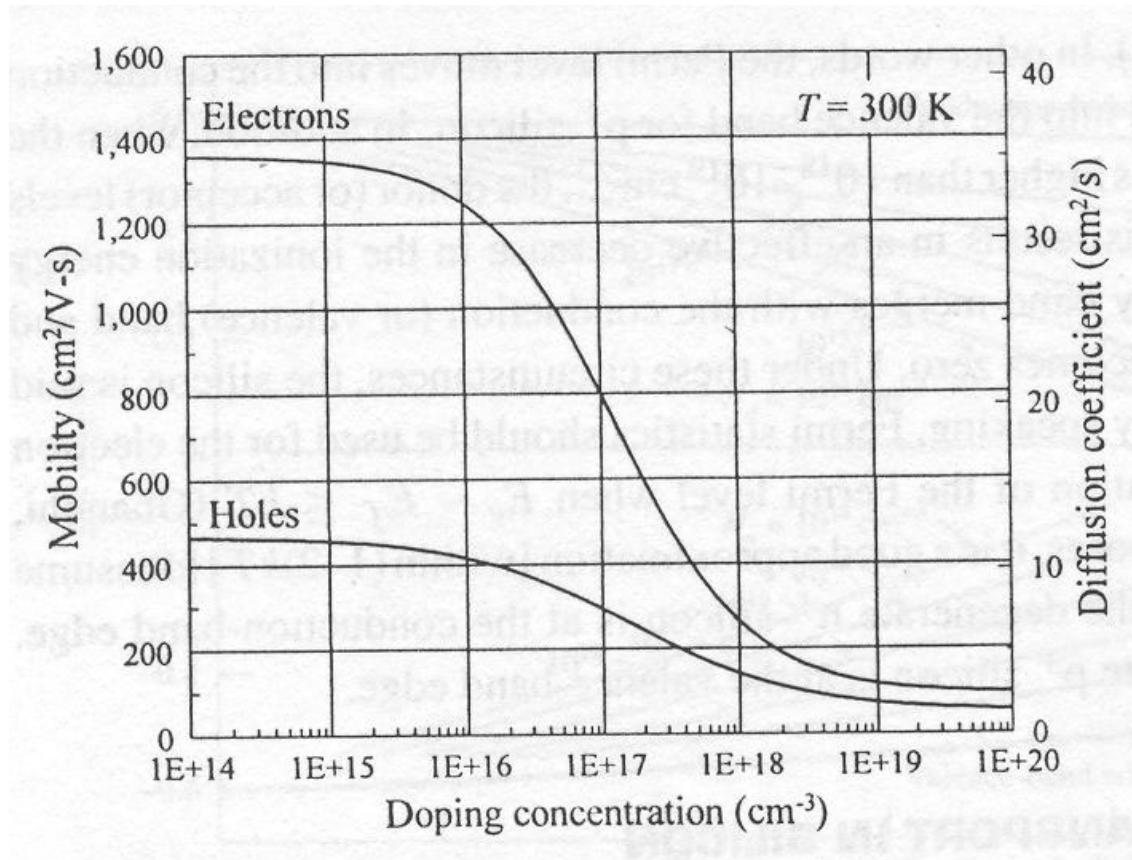


FIGURA 3. Movilidad de electrones y huecos en silicio a 300 K como función del dopado.

PROBLEMA 24. Calcule la energía máxima y mínima que puede tener el nivel de Fermi en una muestra de silicio para que el semiconductor no sea degenerado.

PROBLEMA 25. Tomando los resultados del ejercicio anterior, ¿cuál es la máxima concentración de dopado que puede tener la muestra sin ser degenerada? Para este ejercicio en particular, tome en cuenta que el nivel de Fermi intrínseco no está exactamente en la mitad de la banda prohibida, sino 0.0073 eV por debajo de la mitad de la banda prohibida.

PROBLEMA 26. A una barra de Ge de 10 cm de longitud y 2 cm<sup>2</sup> de sección se le aplica una diferencia de potencial de 10 V entre sus extremos. Los datos del material son:

$$n_i = 2.36 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \quad \mu_n(300K) = 0.39 \text{ m}^2/\text{Vs} \quad \mu_p(300K) = 0.182 \text{ m}^2/\text{Vs}$$

Determinar:

- La resistividad del material, en Ω · cm
- La resistencia de la barra, en Ω
- La corriente que circula por la barra

PROBLEMA 27. Una barra de silicio tiene dimensiones 10 μm x 5 μm x 4 μm. La concentración huecos es de 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>. Para las dos situaciones ilustradas en la figura ??, encuentre:

- La concentración de electrones
- La corriente en la barra

c) La velocidad de arrastre  $v_d$  de electrones y huecos

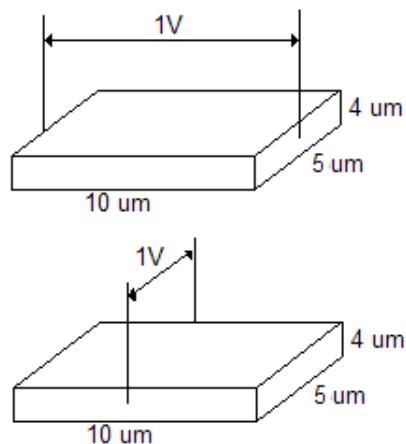


FIGURA 4. Barras de silicio de dimensiones:  $10 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ .

PROBLEMA 28. Considere la muestra de silicio del problema anterior. La geometría de la muestra es tal que puede analizarse unidimensionalmente. En un punto de la muestra, se mide una densidad de corriente de arrastre de  $10^2 \text{ Acm}^{-2}$ . Calcule:

- La magnitud del campo eléctrico en dicho punto
- La velocidad de arrastre de los huecos
- La velocidad de arrastre de los electrones

PROBLEMA 29. Se inyectan huecos de manera constante en una región de silicio tipo N. En estado estable, se establece el perfil de concentración de huecos mostrado en la figura ???. Encuentre  $D$  y  $J$ .

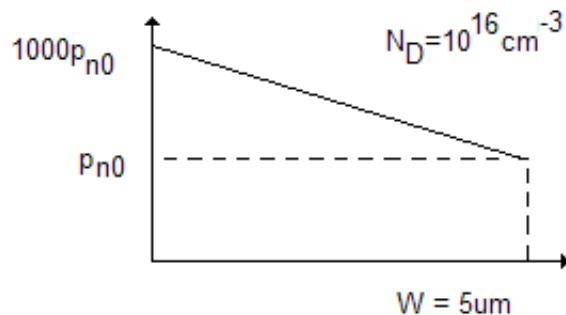


FIGURA 5. Perfil de concentración de huecos.

PROBLEMA 30. Se tiene una muestra de silicio a  $T = 300 \text{ K}$ . Suponiendo que la concentración de electrones varía con la distancia como se indica en la figura ??, la magnitud de la densidad de corriente de difusión es  $0.19 \text{ A/cm}^2$ .

- Calcule el coeficiente de difusión, asumiendo que la movilidad no varía con respecto al caso intrínseco
- Determine la concentración de electrones en  $x = 0$

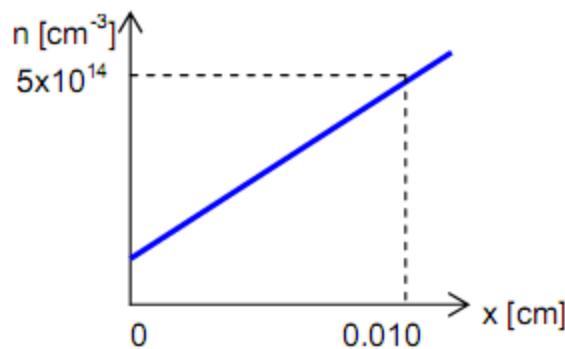


FIGURA 6. Cambio de concentración de electrones en una muestra de silicio a 300 K.

PROBLEMA 31. Consideré una muestra de silicio a 300 K en condiciones de equilibrio, dopado con una concentración de  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  de fósforo y  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  de boro. Determine:

- La movilidad de los portadores de carga en la muestra. Compárelas con las de una muestra sin dopar.
- La concentración de huecos y electrones en la muestra.
- La conductividad de la muestra. Compárela con la conductividad de una muestra sin dopar.
- Los coeficientes de difusión de los portadores de carga. Compárelos con los de una muestra sin dopar.

PROBLEMA 32. Una muestra de silicio se dopa con un material dopante tal que el nivel de Fermi está a 0.25 eV bajo la banda de conducción del semiconductor.

- ¿Qué tipo de dopante es?
- Dado que el nivel de Fermi está 0.25 eV debajo de la banda de conducción, calcule la concentración de huecos y electrones en el semiconductor a 300 K.

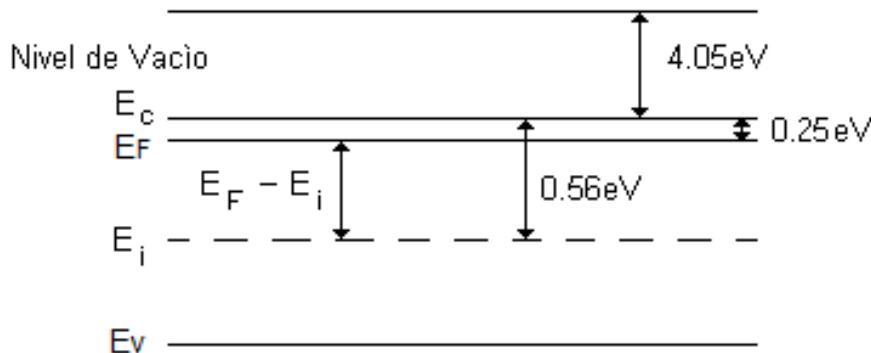


FIGURA 7. Diagrama de bandas del silicio para el ejercicio 12.

## Tutoría 3

Para resolver los problemas de esta tutoría, se resumen a continuación los valores de función de trabajo y afinidad electrónica de los elementos y compuestos más comunes utilizados en la electrónica.

Elemento	$\phi_M$ , función de trabajo [eV]
Ag, plata	4.26
Al, aluminio	4.28
Au, oro	5.1
Cr, cromo	4.5
Mo, molibdeno	4.6
Ni, níquel	5.15
W, tungsteno	4.55

Elemento	$\chi$ , afinidad electrónica [eV]
Ge	4.13
Si	4.05
GaAs	4.07
AlAs	3.5

$$\text{Banda prohibida del GaAs} = 1.424 \text{ eV}$$

PROBLEMA 33. ¿Cuánta energía se requiere para extraer un electrón de silicio al vacío si éste ocupa un estado electrónico ubicado en:

- a) El borde inferior de la banda de conducción?
- b) El borde superior de la banda de valencia?

PROBLEMA 34. Considere una barra en la que una mitad está hecha de aluminio y la otra mitad de silicio tipo N. La barra tiene una longitud de 2 cm y una sección transversal de  $5 \text{ cm}^2$ . Se desea que el sistema metal-semiconductor forme un contacto óhmico. La función de trabajo del aluminio es de 4.28 eV y la afinidad electrónica del silicio es de 4.05 eV. La banda prohibida del silicio es de 1.12 eV. La muestra está a temperatura ambiente (300 K). La resistividad del aluminio es de  $2.82 \times 10^{-10} \Omega \text{cm}$ .

- a) Dibuje el diagrama de bandas de energía del aluminio y del silicio intrínseco por separado.
- b) ¿Qué condición debe cumplir el contacto metal-semiconductor para que la muestra se comporte como un contacto óhmico?
- c) ¿Cuál es el mínimo valor de la función de trabajo del semiconductor para que se cumpla la condición del punto a?

d) Indique en el diagrama de energía la posición del nivel de Fermi resultante en el semiconductor dopado

e) ¿Cuál es el valor máximo de dopado al cual se cumple la condición del punto b)?

f) Calcule la resistividad de cada parte de la barra y la resistencia total de la barra.

PROBLEMA 35. Se tiene un contacto entre aluminio y Si tipo N, dopado con  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , a  $T = 300 \text{ K}$ .

a) Dibujar el diagrama de bandas de energía de los dos materiales antes de formar la unión.

b) Dibujar el diagrama de bandas de energía del contacto.

c) Calcular  $\phi_S$ ,  $\phi_M$  y  $V_{bi}$

PROBLEMA 36. Se tiene un diodo Schottky a  $T = 300 \text{ K}$ . El dispositivo está formado por la unión de Au y GaAs dopado con  $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . La concentración intrínseca de portadores de carga del GaAs es  $2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ .

a) Dibujar el diagrama de bandas de energía de los dos materiales antes de formar la unión, asumiendo que  $E_i$  está en la mitad de la banda prohibida.

b) Dibujar el diagrama de bandas de energía del contacto.

c) Calcular  $\phi_S$ ,  $\phi_M$  y  $V_{bi}$

PROBLEMA 37. Considere un diodo Schottky a temperatura ambiente, fabricado depositando tungsteno en silicio tipo N. La función de trabajo del tungsteno es 4.5 eV. La concentración de donadores en el silicio es de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

a) Calcule la función de trabajo de la muestra de silicio

b) Calcule la barrera Schottky

c) Calcule el potencial de contacto

d) Dibuje el diagrama de bandas de energía resultante en condiciones de equilibrio

PROBLEMA 38. Dibuje cualitativamente el diagrama de bandas de energía de un contacto Schottky de tipo P.

PROBLEMA 39. Dibuje cualitativamente el diagrama de bandas de energía de un contacto óhmico de tipo P.

PROBLEMA 40. En una junta PN de silicio, la concentración de portadores mayoritarios en el lado P es de 1 átomo dopante por cada  $10^8$  átomos de silicio, y la concentración de portadores mayoritarios del lado N es de 1000 veces mayor que la concentración de portadores mayoritarios de lado P.

a) Calcule el potencial de contacto

b) Calcule la concentración de portadores minoritarios en cada lado de la junta.

## Tutoría 4A

Los problemas de esta práctica fueron tomados del capítulo dos del libro: Electrónica: Teoría de Circuitos. R. Boylestad, L. Nashelsky, de la editorial Prentice Hall, y Microelectronic Circuits: an integrated approach, de M. Rashid, de la editorial PWS Publishing Company.

Para resolver los problemas, considere los siguientes modelos para el diodo:

Para diodos de silicio:

- El diodo es un circuito abierto para  $V_D < 0.7 \text{ V}$
- El diodo está activo para  $V_D \geq 0.7 \text{ V}$ . En estas condiciones, se aplica el modelo de caída de tensión constante, por lo que su circuito equivalente es el de una fuente de tensión de CD con valor de  $0.7 \text{ V}$ .

Para diodos de germanio:

- El diodo es un circuito abierto para  $V_D < 0.3 \text{ V}$
- El diodo está activo para  $V_D \geq 0.3 \text{ V}$ . En estas condiciones, se aplica el modelo de caída de tensión constante, por lo que su circuito equivalente es el de una fuente de tensión de CD con valor de  $0.3 \text{ V}$ .

**PROBLEMA 41.** 1. Determine la corriente  $I$  para la configuración de la figura ??.

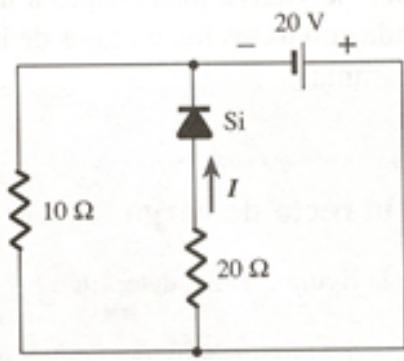


FIGURA 8. Circuito para el problema 1.

**PROBLEMA 42.** Determine  $V_o$  e  $I$  para los circuitos de la figura ??.

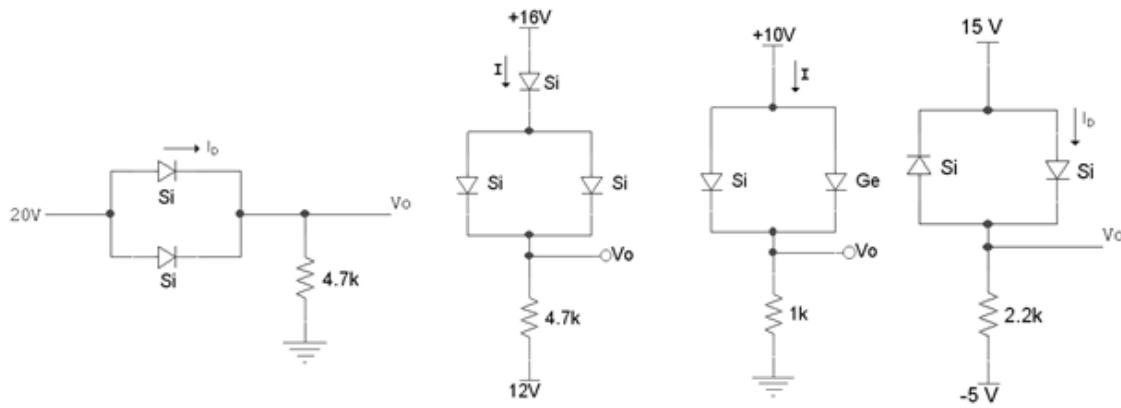


FIGURA 9. Circuitos para el problema 2.

PROBLEMA 43. Determine el nivel de  $V_o$  para cada una de las redes de la figura ??.

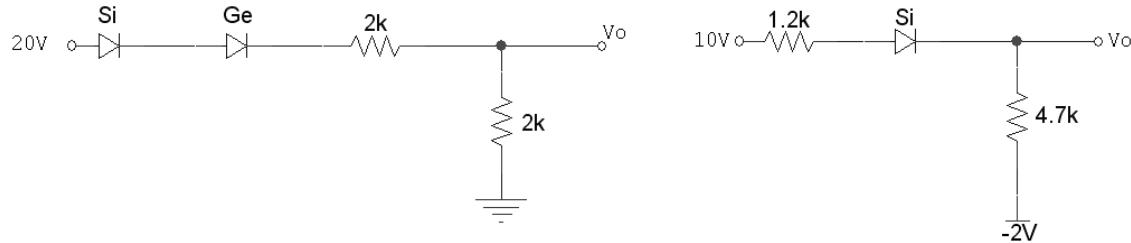


FIGURA 10. Circuitos para el problema 3.

PROBLEMA 44. Determine  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$  e  $I$  para el circuito de la figura ??.

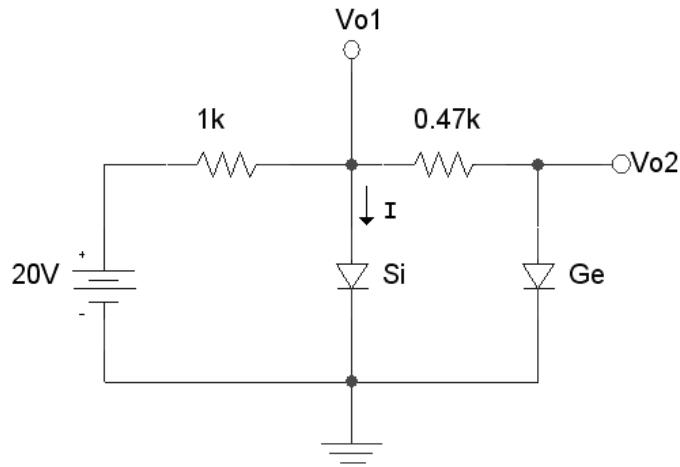


FIGURA 11. Circuito para el problema 4.

PROBLEMA 45. Determine  $V_o$  e  $I_D$  para el circuito de la figura ??.

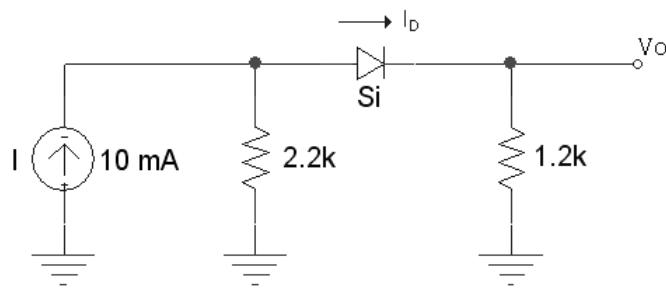


FIGURA 12. Circuito para el problema 5.

**PROBLEMA 46.** Encuentre la tensión  $V_O$  y la corriente  $i_O$  para los circuitos de la figura 6. Todos los diodos son de silicio.

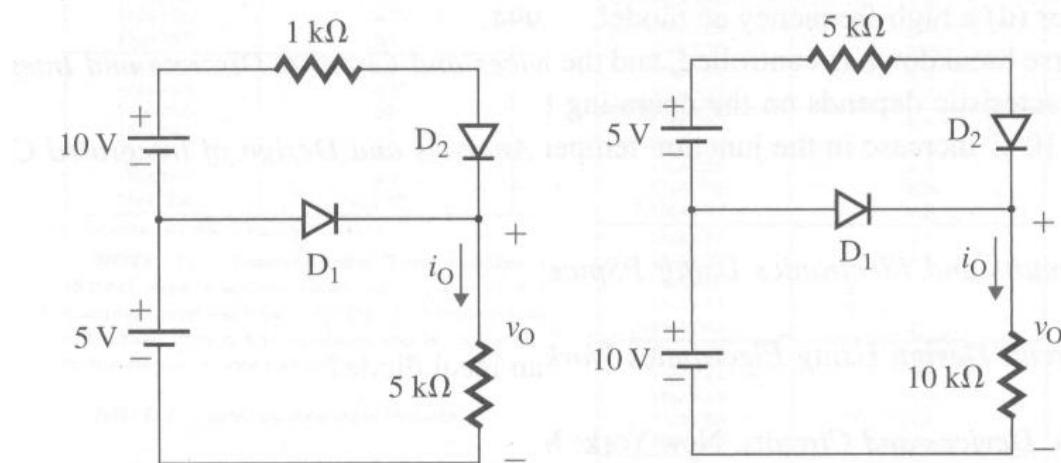


FIGURA 13. Circuito para el problema 6.



## Tutoría 4B

PROBLEMA 47. Determine  $V_O$  e  $i_O$  para los circuitos de la figura ??.

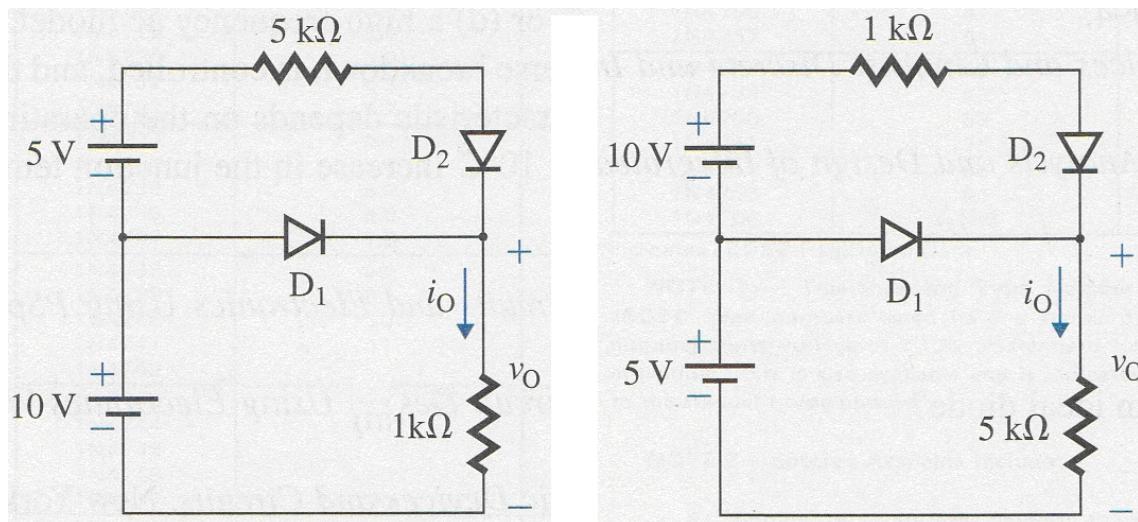


FIGURA 14. Circuito para el problema 1.

PROBLEMA 48. Grafique la función de transferencia  $V_O$  contra  $V_S$  si la tensión de entrada  $V_S$  varía linealmente

- de 0 a 10 V en incrementos de 2 V para el circuito de la figura ??a.
  - de -10 V a 10V en incrementos de 2 V para el circuito de la figura ??b.
- Asuma que los diodos son ideales.

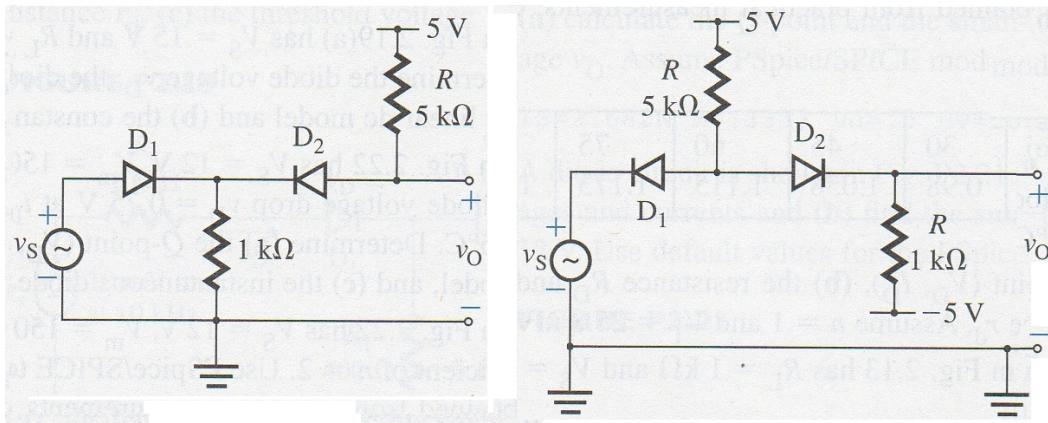


FIGURA 15. Circuito para el problema 2.

**PROBLEMA 49.** Determine  $I_S$ , la corriente en las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  para el circuito de la figura ??, si la tensión aumenta linealmente de 0 a 12 V. Grafique la función de transferencia  $I_S$  contra  $V_S$ .

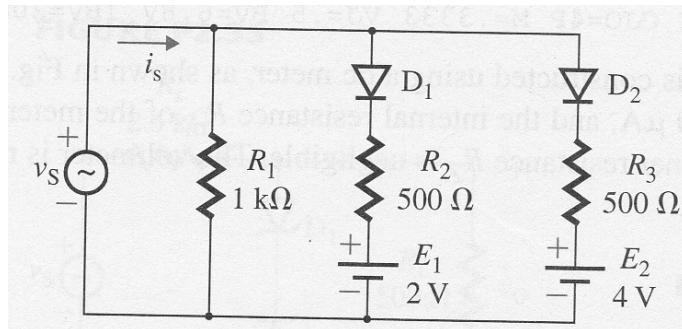


FIGURA 16. Circuito para el problema 3.

**PROBLEMA 50.** Los valores de tensión y corriente de un diodo medidas a temperatura ambiente son:  $I_{D1} = 5\mu A$ ,  $V_{D1} = 0.5V$  y  $I_{D2} = 100\mu A$ ,  $V_{D2} = 0.6V$ . Asuma que la ecuación de Shockley puede aproximarse como:

$$I_D = I_S(e^{V_D/nV_t} - 1) \approx I_S e^{V_D/nV_t}$$

Determine la corriente de saturación inversa del diodo  $I_S$  y el coeficiente de emisión  $n$ .

**PROBLEMA 51.** Para las funciones lógicas representadas en las tablas de verdad (Tabla ?? y ??), proponga un circuito basado en diodos, resistencias y fuentes de tensión de CD que permita implementarlas. Todas las fuentes de CD deben tener el mismo valor. El valor lógico '0' corresponde a 0 V, y el valor lógico '1', corresponde al valor más alto de tensión que pueda alcanzar el circuito (idealmente, el valor de la fuente).

TABLA 2. Tabla de verdad de la función OR

Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

TABLA 3. Tabla de verdad de la función AND

Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

PROBLEMA 52. Considere el circuito de la figura ?? y su correspondiente tensión de entrada. La corriente del diodo debe limitarse a 30 mA. El diodo es de silicio.

- a) Determine el valor mínimo de  $R$  para cumplir con el límite de corriente del diodo
- b) Grafique la tensión de salida
- c) Calcule la corriente promedio y la corriente RMS del diodo
- d) Calcule la potencia máxima que se disipa en la resistencia. Compare con el valor calculado utilizando el concepto de corriente RMS.

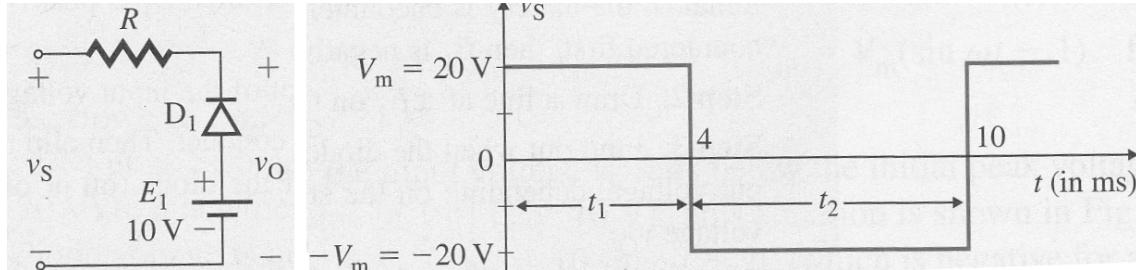


FIGURA 17. Circuito para el problema 6.



## Tutoría 5

PROBLEMA 53. Utilizando la curva de la figura ??, determine  $I_D$ ,  $V_D$  y  $V_R$  para el circuito mostrado. Repita el problema utilizando el modelo de caída constante del diodo y el modelo ideal.

$$V_{SS} = 8 \text{ V}, R = 0.33 \text{ k}\Omega.$$

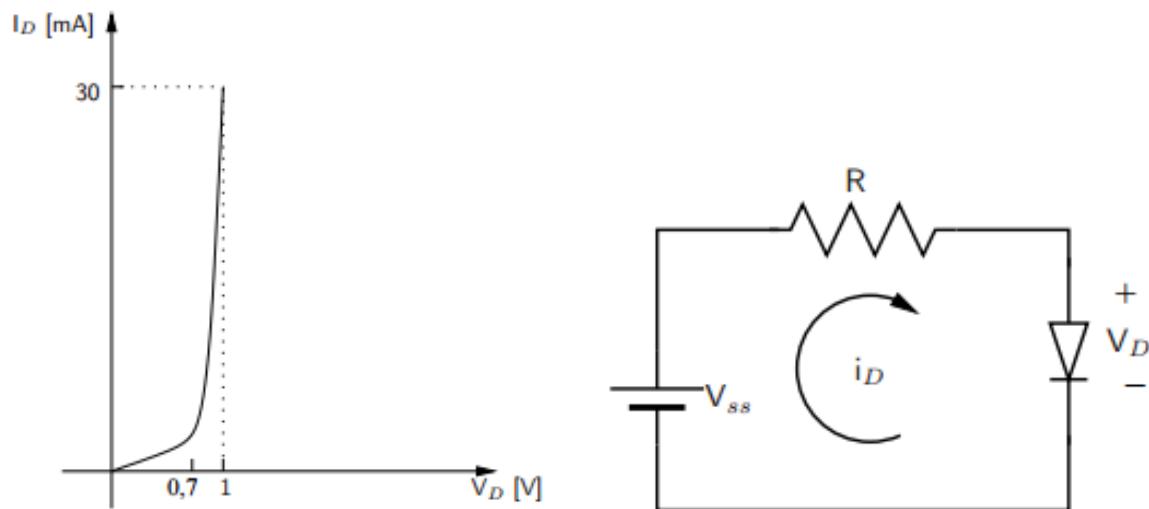


FIGURA 18. Figuras para el problema 1.

PROBLEMA 54. Determine el valor de  $R$  para el circuito de la figura ?? que resultará en una corriente de diodo de  $10 \text{ mA}$  con  $V_{SS} = 7 \text{ V}$ . Utilice las características de la figura ??.

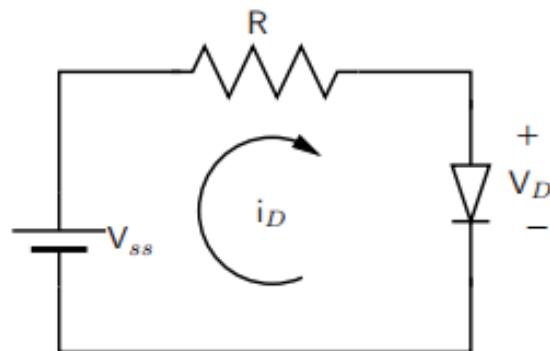
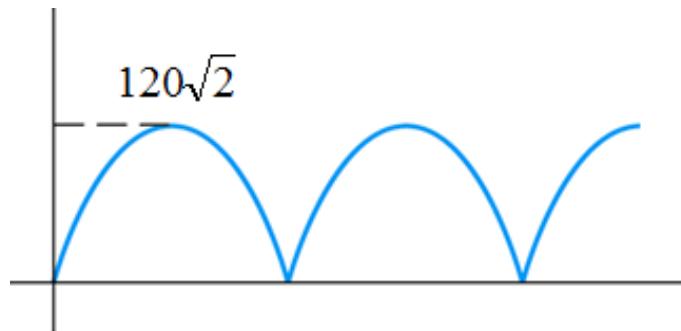
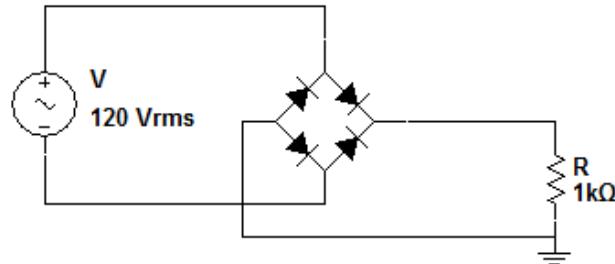
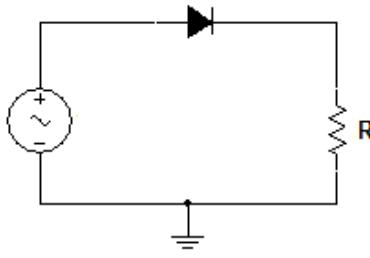


FIGURA 19. Circuito para el problema 2.

**PROBLEMA 55.** Considere un rectificador de media onda sin capacitor de filtrado para una onda de entrada senoidal. El valor pico de la tensión de entrada es 5 V. Resuelva el problema para un diodo ideal y para un diodo de silicio. Dibuje la forma de onda de:

- La tensión en el diodo
- La corriente en el diodo
- La tensión de salida
- Calcule la tensión promedio a la salida

**PROBLEMA 56.** Un puente rectificador de onda completa con una entrada senoidal de  $120 \text{ V}_{\text{RMS}}$  tiene una resistencia de carga de  $1 \text{ k}\Omega$ .



- Si se utilizan diodos ideales, ¿cuál es el voltaje promedio disponible en la carga?
- Demuestre que  $V_{\text{PROM}} = 2 V_{\text{P}} / \pi$  para un rectificador ideal de onda completa
- Encuentre el voltaje pico inverso a través de cada diodo, en caso de que los diodos sean ideales
- Encuentre el voltaje pico inverso a través de cada diodo, en caso de que los diodos sean reales
- Encuentre la corriente máxima a través de cada diodo, para el caso de diodos ideales y reales
- ¿Cuál es el valor de la potencia que debe disipar cada diodo?

**PROBLEMA 57.** Determine la tensión de salida del circuito de la figura ?? para las combinaciones de tensiones de entrada mostradas en la tabla. Los diodos son ideales.  $0 = \text{GND}$ ,  $1 = V_{\text{DD}}$ .

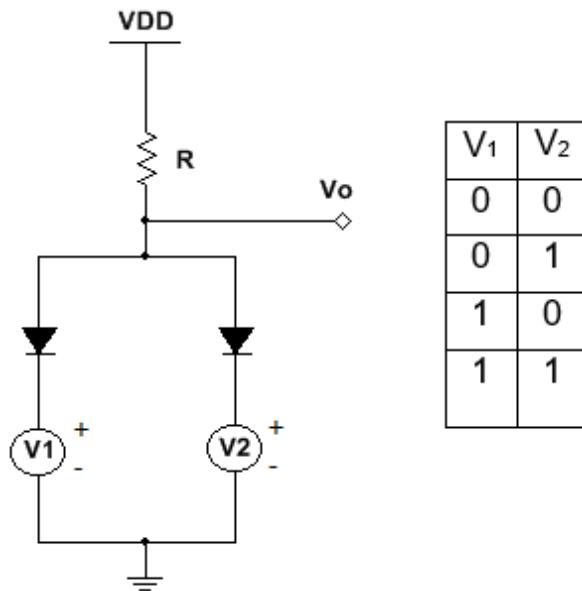


FIGURA 20. Circuito para el problema 5.

PROBLEMA 58. Determine la tensión de salida del circuito de la figura ?? para las combinaciones de tensiones de entrada mostradas en la tabla. Los diodos son ideales.  $0 = GND$ ,  $1 = V_{DD}$ .

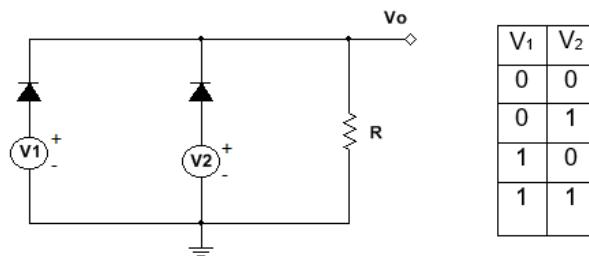


FIGURA 21. Circuito para el problema 6.

PROBLEMA 59. Considere el circuito y la forma de onda de la tensión de entrada de la figura ?? . Determine la tensión de salida  $V_o$  de la figura 7 en estado estable.  $C = 1 \mu F$ ,  $V = 5 V$ ,  $R = 100 k\Omega$  y el diodo es de silicio. La frecuencia de la señal de entrada es de  $100 kHz$ .

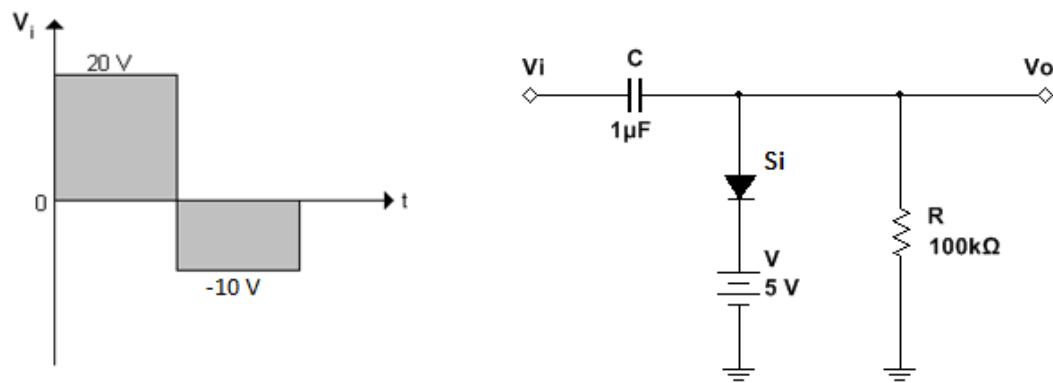


FIGURA 22. Circuito para el problema 7.

**PROBLEMA 60.** Para los siguientes circuitos, dibuje la tensión de salida correspondiente. Los diodos son de silicio.

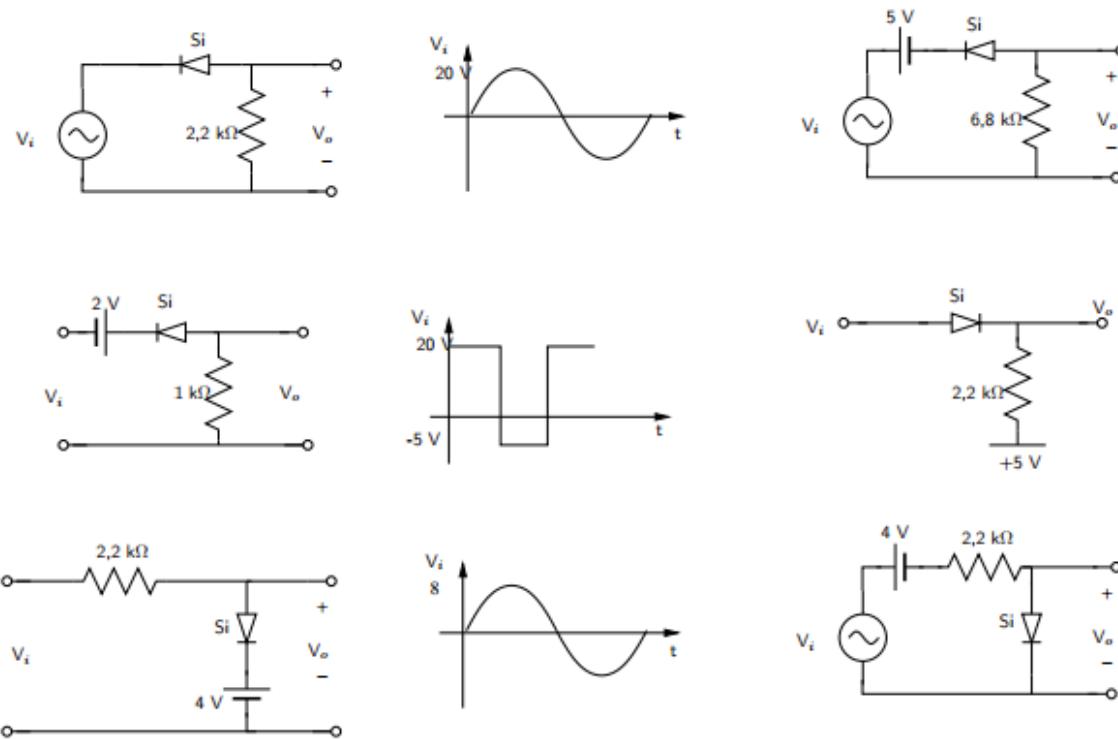


FIGURA 23. Circuitos para el problema 8.

**PROBLEMA 61.** Diseñar el circuito cambiador de nivel que lleve a cabo la siguiente función:

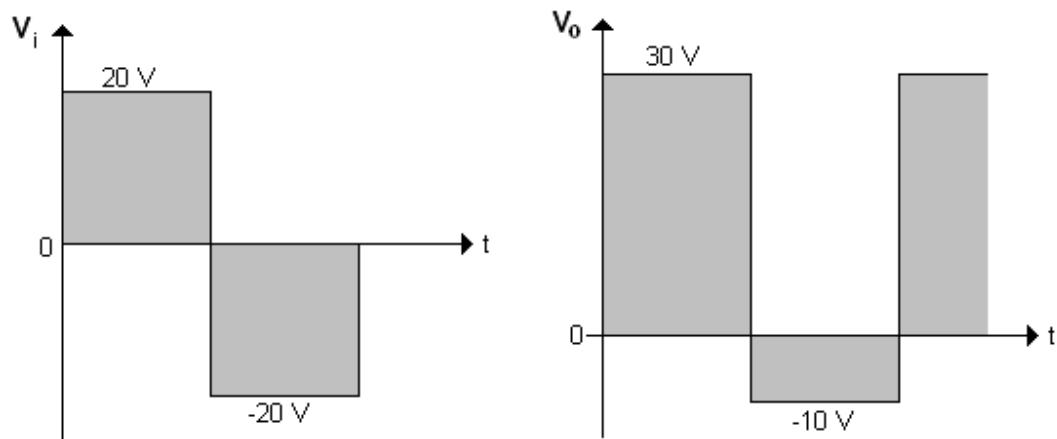


FIGURA 24. Formas de onda para el problema 9.

PROBLEMA 62. *Dibujar  $V_o$  para cada caso:*

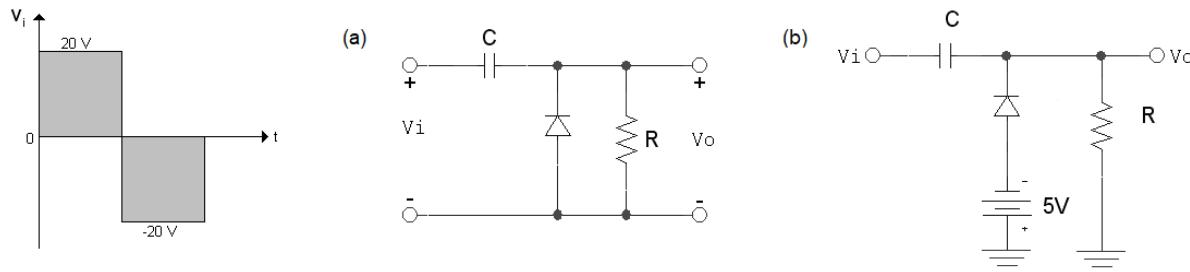


FIGURA 25. Formas de onda para el problema 10.



# Tutoría 6

**Nota: Para resolver los ejercicios de esta tutoría requiere papel milimétrico**

PROBLEMA 63. El circuito de la figura ?? es el modelo de un cargador de batería.  $V_{in}$  es una onda senoidal de 10 V pico,  $D1$  y  $D2$  son diodos ideales,  $I = 100 \text{ mA}$  y  $V_B$  es una batería de 4.5 V.

- Grafique la corriente en la batería.
- Encuentre el valor pico de la corriente en la batería.
- Encuentre el valor promedio de la corriente en la batería.

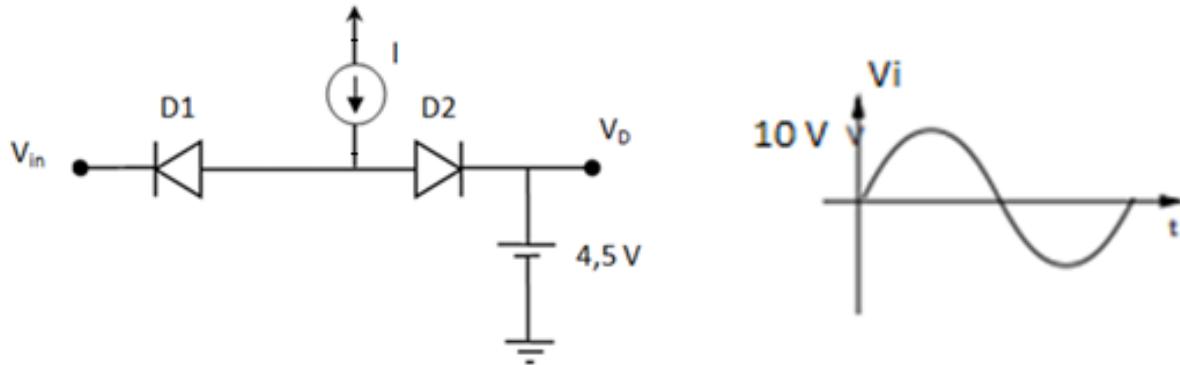


FIGURA 26. Formas de onda para el problema 1.

PROBLEMA 64. En el circuito de la figura 2,  $I$  es una corriente directa y  $V_S$  es una señal senoidal. Los condensadores  $C_1$  y  $C_2$  tienden a infinito,  $R_S = 1\Omega$ .

- ¿Cuál es la función de  $C_1$  y  $C_2$ ?
- Asuma que las capacitancias del diodo son despreciables. Utilice un análisis de pequeña señal del diodo para demostrar que la tensión de salida está dada por la expresión:

$$V_O = V_S \cdot \frac{nV_t}{nV_t + IR_S}$$

Para realizar este análisis de pequeña señal (es decir, en corriente alterna), considere:

- que los capacitores se comportan como cortos circuitos ( $|Z_C|$  tiende a cero, porque  $C$  tiende a infinito)

- desactive las fuentes de corriente directa

-utilice el modelo de pequeña señal del diodo

c) Calcule la ganancia de tensión  $V_O/V_S$  para  $I = 1 \text{ mA}$ ,  $0.1 \text{ mA}$  y  $1 \mu\text{A}$

d) ¿A qué valor de corriente  $I$  la tensión de salida es igual a la mitad de  $V_S$ ?

e) ¿Cuál es la función del circuito?

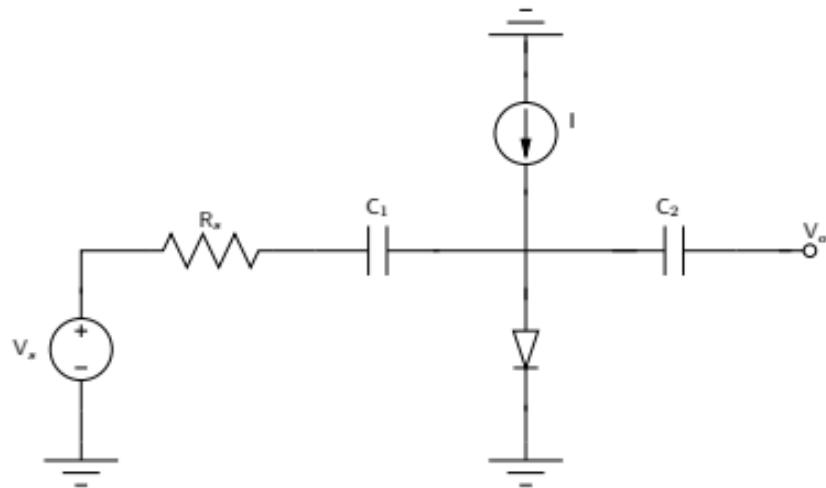


FIGURA 27. Circuito para el problema 2.

PROBLEMA 65. Encuentre la tensión de salida para los siguientes circuitos.  $V_{in}$  es una señal triangular simétrica con valor pico de 10V. Los diodos son de silicio.

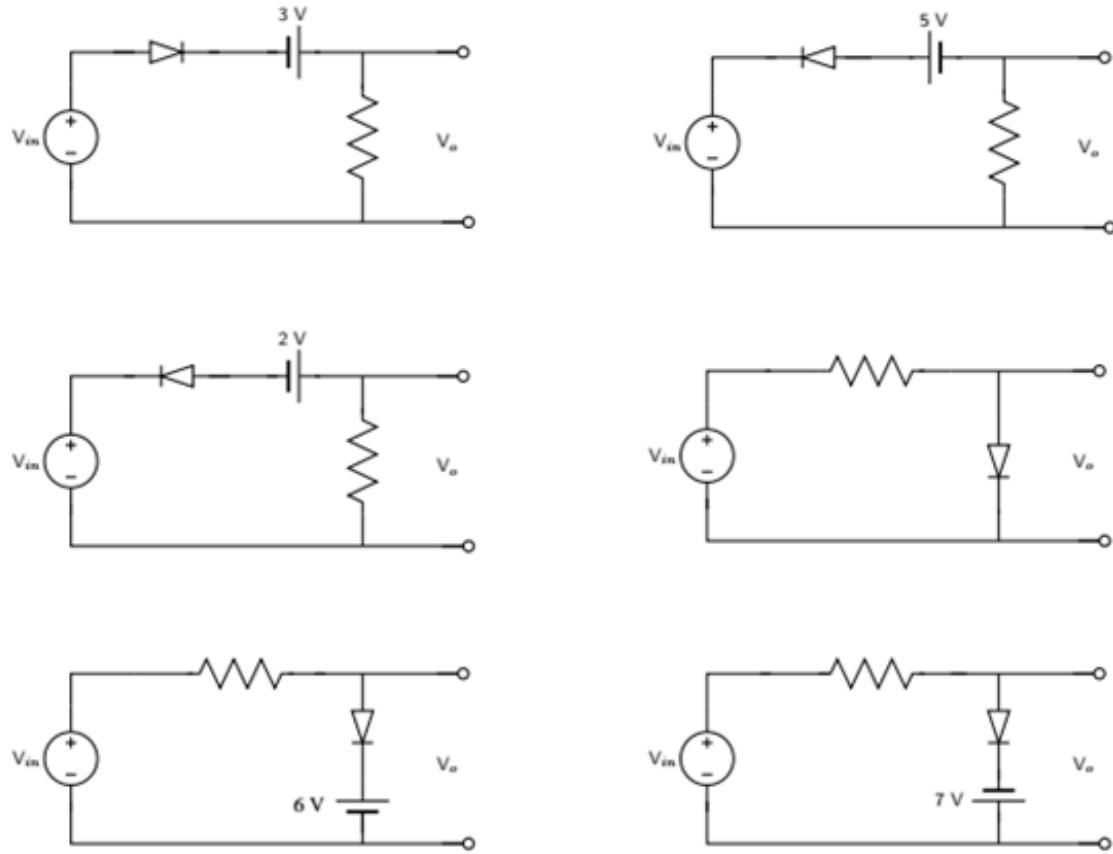


FIGURA 28. Circuitos para el problema 3.

PROBLEMA 66. Grafique la onda del voltaje de salida del circuito de la figura 3 si la entrada es una onda cuadrada de 50V.

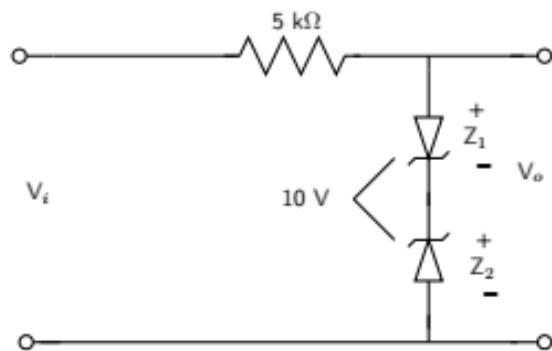


FIGURA 29. Formas de onda para el problema 4.

PROBLEMA 67. Considere el circuito de la figura ??, con  $R=220\Omega$ ,  $V_Z=10V$ ,  $P_{Zmax}=400mW$ ,  $V_{in}=20V$ .

a) Determine  $V_L$ ,  $I_L$  e  $I_R$  si  $R_L=180\Omega$

- b) Determine el valor de  $R_L$  que establecerá las condiciones máximas de potencia para el diodo Zener
- c) Determine el valor mínimo de  $R_L$  para asegurar que el diodo Zener opere en la región de ruptura
- d) ¿Para qué valor de  $V_{IN,MIN}$  el regulador aún funciona?

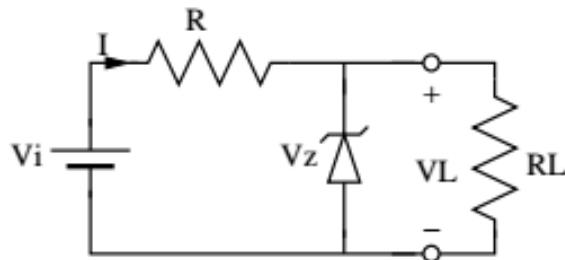


FIGURA 30. Formas de onda para el problema 5.

PROBLEMA 68. El circuito regulador con diodo Zener de la figura ?? está conectado a una fuente real de 6V. La corriente de corto circuito de la fuente está limitada a 20mA. La potencia máxima en el Zener es de 23mW y su tensión de ruptura es de 2.3V. Asuma que la curva característica del diodo Zener es una línea recta en la región de ruptura, pero considere que requiere de una corriente mínima para operar. Resuelva este problema utilizando el método de la línea de carga. Muestre claramente sus respuestas en los gráficos.

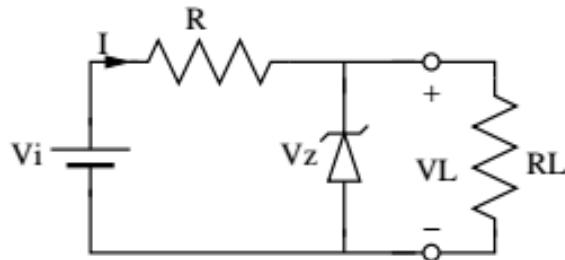


FIGURA 31. Circuito para el problema 6.

- a) ¿Para qué valores de resistencia de carga puede operar el regulador?
- b) Si la resistencia de carga es máxima, ¿cuánto puede disminuir la tensión de entrada para que el regulador aún funcione?
- c) Si la resistencia de carga es mínima y la limitación de corriente de corto circuito de la fuente falla, ¿cuál es la corriente máxima de la fuente a la que el regulador puede operar sin dañarse? ¿Cuál es el valor de R al cual sucede esto?

PROBLEMA 69. Considere el circuito y la tensión de entrada mostrada en la figura ??.

- a) Dibuje las líneas de carga en la curva característica del diodo Zener mostrada en la figura ??, para el caso de máximo y mínimo voltaje de entrada y calcule la corriente, el voltaje y la potencia en todos los elementos.
- b) Dibuje UA en función del tiempo

c) Calcule la corriente a través de  $R_V$  cuando la magnitud del voltaje de entrada es máximo y está conectada al circuito de polaridad opuesta.

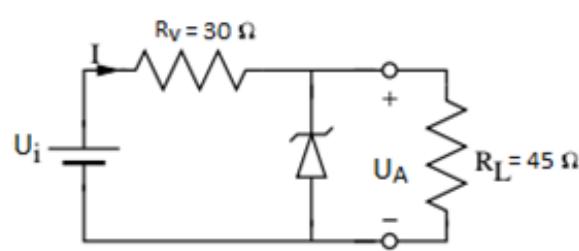
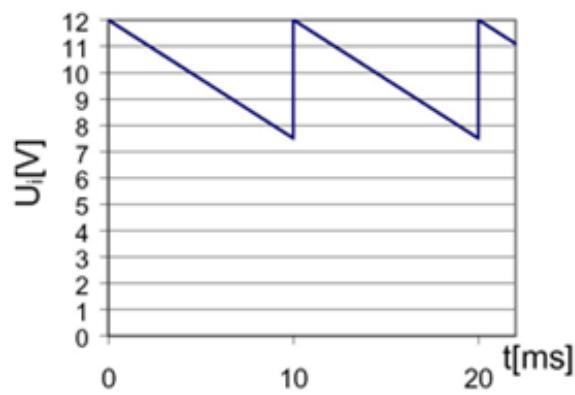


FIGURA 32. Circuito para el problema 7.

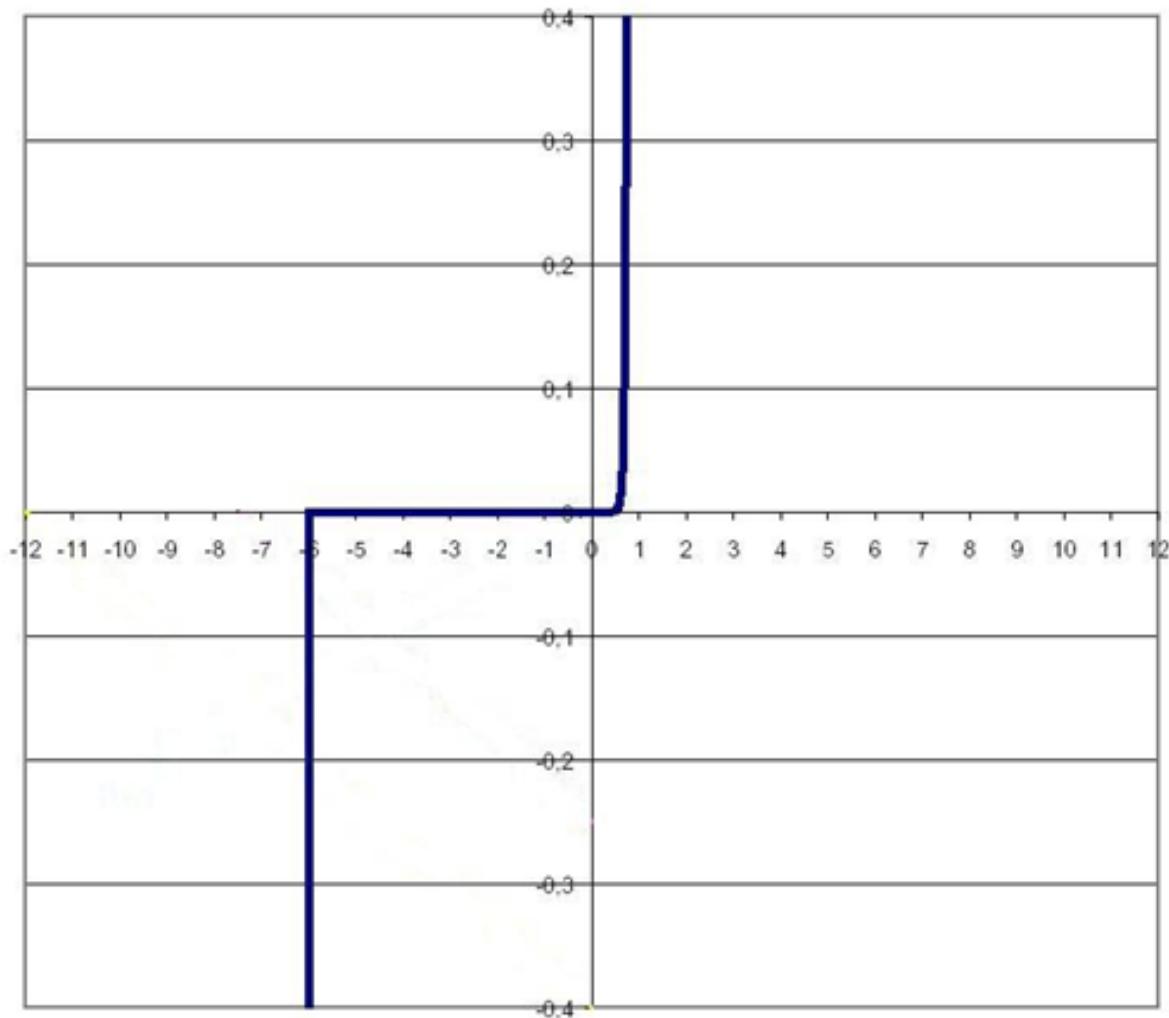


FIGURA 33. Curva característica del diodo para el problema 7.

## Tutoría 7

**PROBLEMA 70.** Considere un MOSFET de canal n con  $t_{ox} = 20 \text{ nm}$ ,  $\mu_n = 650 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$  y  $W/L = 10$ . Encuentre la corriente de drenador en los siguientes casos

- a)  $V_{GS} = 5 \text{ V}$  y  $V_{DS} = 1 \text{ V}$
- b)  $V_{GS} = 2 \text{ V}$  y  $V_{DS} = 1.2 \text{ V}$
- c)  $V_{GS} = 5 \text{ V}$  y  $V_{DS} = 0.2 \text{ V}$
- d)  $V_{GS} = V_{DS} = 5 \text{ V}$

**PROBLEMA 71.** En un proceso de fabricación de circuitos integrados, la transconductancia del proceso de un transistor NMOS es  $K_n' = 50\mu\text{A}/\text{V}^2$  y  $V_{TH} = 1 \text{ V}$ . En una aplicación en la que  $V_{GS} = V_{DS} = VDD = 5 \text{ V}$ , se requiere una corriente de drenador de  $0.8 \text{ mA}$  de un dispositivo de longitud mínima de  $2 \mu\text{m}$ . ¿Cuál valor de ancho de canal debe usar el diseño?

**PROBLEMA 72.** Un MOSFET de enriquecimiento de canal n tiene una corriente de drenador de  $4 \text{ mA}$  a  $V_{GS} = V_{DS} = 5 \text{ V}$ , y de  $1 \text{ mA}$  a  $V_{GS} = V_{DS} = 3 \text{ V}$ . ¿Cuáles son los valores de  $K$  y  $V_{TH}$  para este dispositivo?

**PROBLEMA 73.** En el caso de un transistor NMOS con  $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$ , y que opera con  $V_{GS}$  en el intervalo de  $1.5 \text{ V}$  a  $4 \text{ V}$ , ¿cuál es el máximo valor de  $V_{DS}$  para el cual el canal sigue siendo continuo?

**PROBLEMA 74.** Un transistor NMOS que opera en la región lineal con  $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$  y conduce  $60 \mu\text{A}$  con  $V_{GS} = 2 \text{ V}$  y  $160 \mu\text{A}$  con  $V_{GS} = 4 \text{ V}$ .

- a) ¿Cuál es el valor del voltaje umbral  $V_{TH}$ ?
- b) Si  $K'n = 50\mu\text{A}/\text{V}^2$ , ¿cuál es la relación  $W/L$  del dispositivo?
- c) ¿Qué corriente esperaría que fluyera con  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  y  $V_{DS} = 0.15 \text{ V}$ ?
- d) ¿Para qué valor de  $V_{DS}$  se comprimirá el canal y cuál es la corriente de drenador correspondiente?

**PROBLEMA 75.** Un transistor PMOS de enriquecimiento tiene  $K'p = 80\mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $W/L=1$ ,  $V_{TH} = -1.5 \text{ V}$  y  $\lambda = -0.02 \text{ V}^{-1}$ . La compuerta está conectada a tierra y la fuente a  $5\text{V}$ . Encuentre la corriente de drenador para  $V_D = +4 \text{ V}$ ,  $+1.5 \text{ V}$ ,  $0 \text{ V}$  y  $-5\text{V}$ .

**PROBLEMA 76.** Considere los circuitos mostrados en la figura 1. Todos los transistores de los circuitos mostrados tienen los mismos valores de  $|V_{TH}|$ ,  $K$  y  $\lambda$ . Más aún,  $\lambda$  es despreciable. Todos operan en el punto de operación a  $ID = I$  y  $|V_{GS}| = |V_{DS}| = 3\text{V}$ . Considere  $|V_{TH}| = 1\text{V}$  e  $I = 2 \text{ mA}$

- a) ¿En qué región de operación está el transistor? ¿Cuál es el valor de  $K$ ?
- b) Encuentre los voltajes  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  y  $V_4$ .
- c) ¿Cuál es el valor máximo del resistor que puede conectarse en serie con cada conexión de drenador para que el transistor se mantenga en saturación si  $|V_{GS}|$  se mantiene constante?

d) ¿Cuál es el valor de resistencia más grande que puede colocar en serie con el surtidor de cada MOSFET mientras se asegura la operación en el modo de saturación para  $ID = I$ , si la fuente de corriente  $I$  requiere por lo menos de 2 V entre sus terminales para operar apropiadamente?

e) Para la situación descrita en el punto d), ¿cuáles son los valores resultantes de  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  y  $V_4$ ?

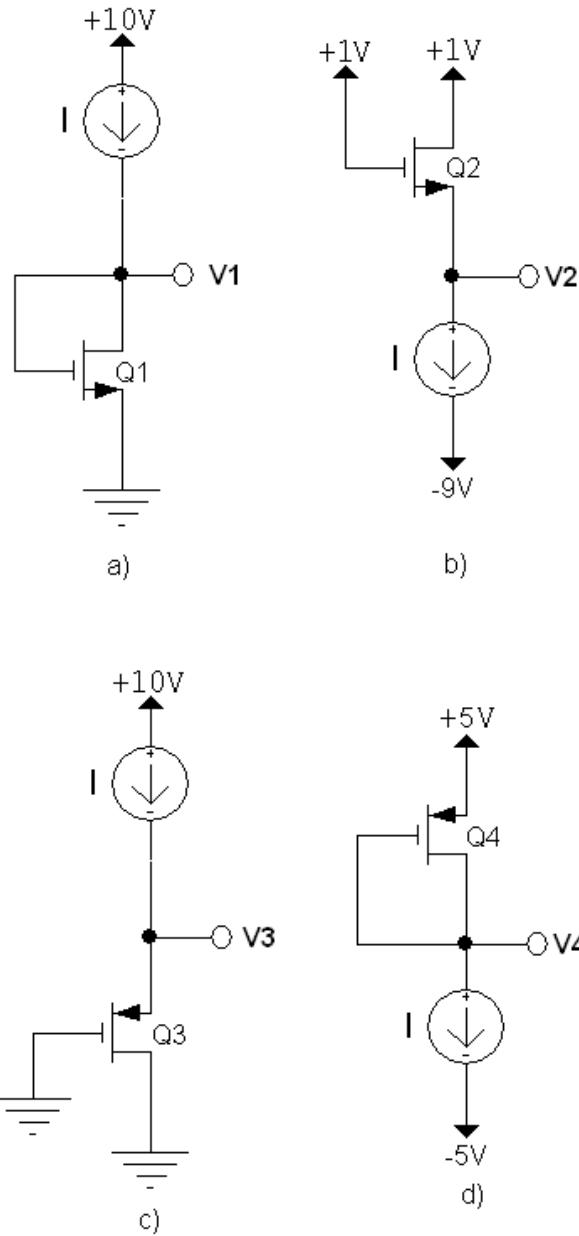


FIGURA 34. Figuras para el problema 7.

PROBLEMA 77. Considere el circuito de la figura 2. La curva característica del transistor MOSFET del circuito se muestra en la figura 3. El voltaje de umbral del transistor es de 1V. Utilizando el método de la línea de carga, encuentre el punto de operación del transistor

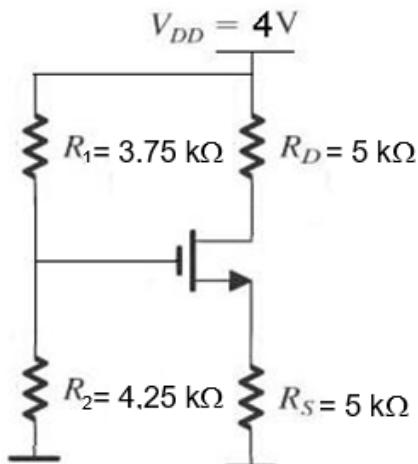


Figura 2

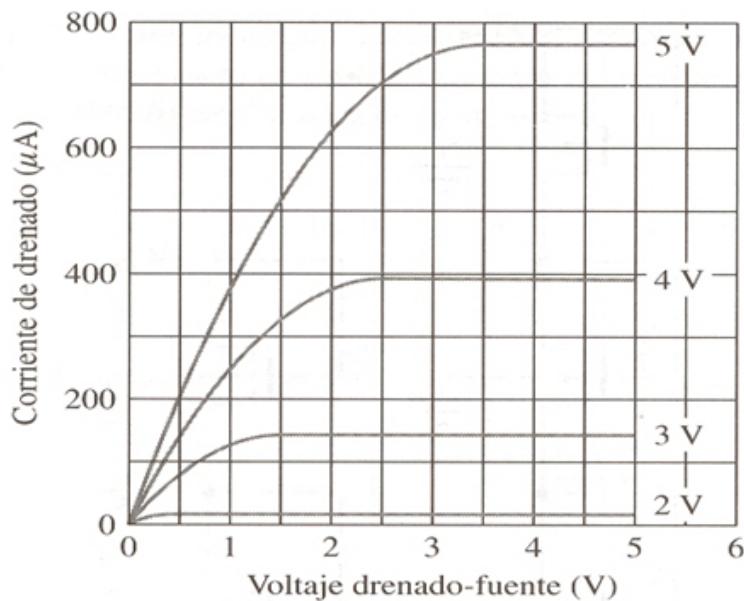


FIGURA 35. Figuras para el problema 77.

PROBLEMA 78. Considere el circuito y las curvas características del MOSFET mostrados en la figura. El voltaje de umbral del transistor es 1.5V. La resistencia  $R_1$  es de  $100\text{k}\Omega$ . Dimensione las resistencias  $R_D$ ,  $R_S$  y  $R_2$  para que el transistor opere en saturación con  $V_{DS}$  polarizado en 1 V a partir del extremo de la región lineal con  $V_D = 3\text{V}$ . Para esto, ignore el efecto de substrato. Muestre en curva característica el punto de operación del transistor para cumplir con este objetivo con mínima potencia.

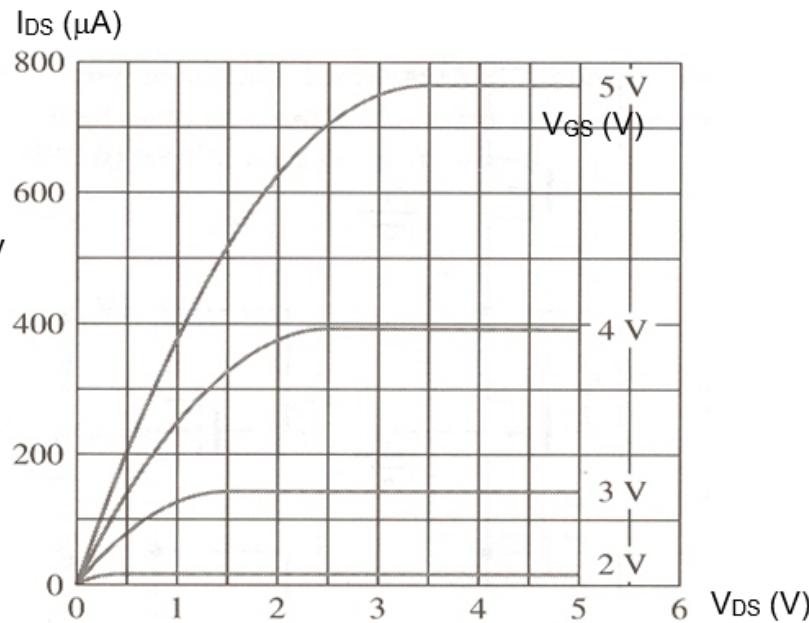
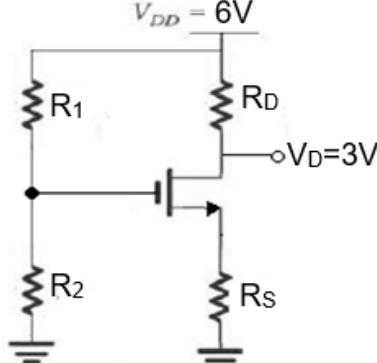


FIGURA 36. Figuras para el problema.



## Tutoría 8

**PROBLEMA 79.** Las características de salida de un transistor NMOS se dan en la figura 1. ¿Cuáles son los valores de  $K$  y  $VTH$  para este transistor? ¿Se trata de un transistor de enriquecimiento o de empobrecimiento? Si  $K' = 25\mu\text{A}/\text{V}^2$ , ¿cuál es el valor de  $W/L$  para este dispositivo?

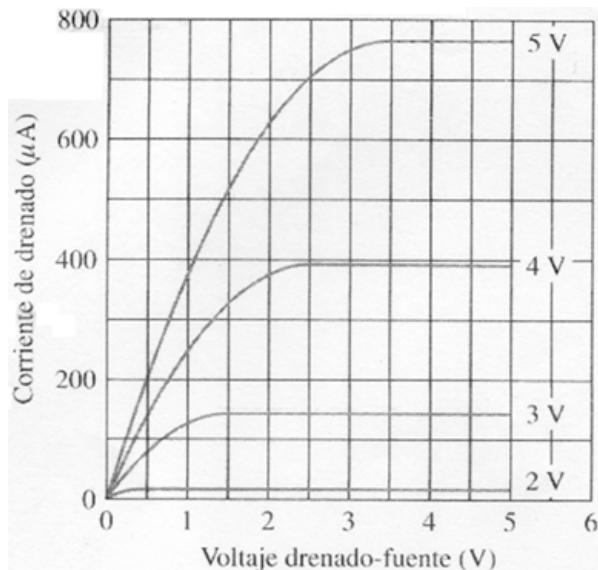


FIGURA 37. Característica de salidad para el problema 1.

**PROBLEMA 80.** Considere el circuito de la figura 2. El transistor tiene las siguientes características:  $VTH = 0.7 \text{ V}$ ,  $K' = 100\mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $L = 1\mu\text{m}$ ,  $W=32 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 0$ . Dimensione  $RD$  y  $RS$  para que para que  $ID = 0.6 \text{ mA}$ ,  $VD = 0.6 \text{ V}$

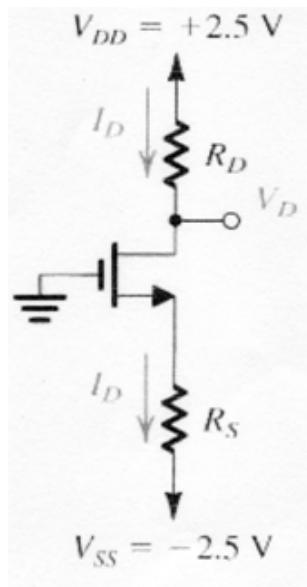


FIGURA 38. Circuito para el problema 2.

PROBLEMA 81. Consideré el circuito de la figura 3. El voltaje de umbral del transistor es 1 V.

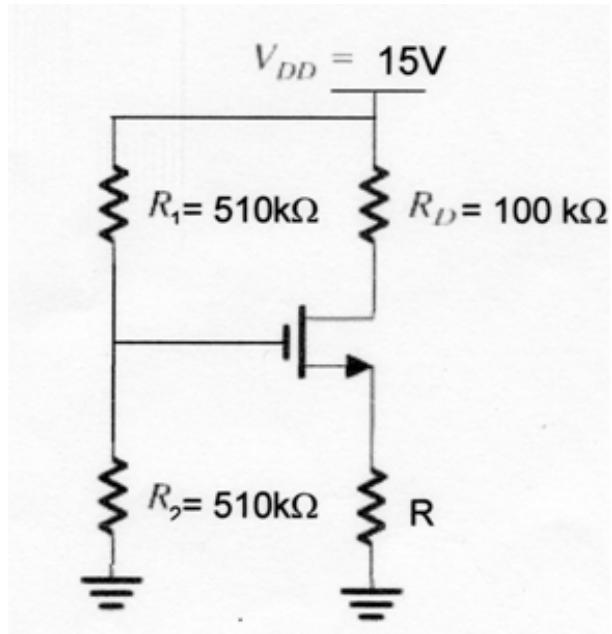


FIGURA 39. Circuito para el problema 3.

Calcule:

- El voltaje máximo en  $R$  para que el transistor esté activo (no opere en la región de corte)
- La corriente de drenador máxima para que el transistor opere en la región de saturación
- El valor mínimo de  $R$  para cumplir las condiciones de los puntos a y b

PROBLEMA 82. En una tecnología para la cual el espesor del óxido de la compuerta es de 20 nm.

- a) Encuentre el valor de  $NA$  para  $\gamma = 0.5V^{1/2}$
- b) Si la concentración de dopado se mantiene constante pero el espesor del óxido de la compuerta aumenta a 100 nm, ¿cuál será el valor de  $\gamma$ ?
- c) Si  $\gamma$  se mantiene constante a  $0.5V^{1/2}$ , ¿a qué valor debe cambiarse la concentración de dopado?

PROBLEMA 83. En una aplicación, un MOSFET de canal n opera con VSB en el intervalo de 0 a 4 V. Si  $V_{TH0}$  es nominalmente 1 V.

- a) Encuentre el valor de  $V_{TH}$  que se obtiene si  $\gamma = 0.5V^{1/2}$  y  $2\phi_B = 0.6V$ .
- b) Si el espesor del óxido de la compuerta se aumenta por un factor de 4, ¿cuál será el voltaje de umbral?

PROBLEMA 84. Un transistor de canal P opera en saturación con un voltaje de fuente de 3 V menor que el voltaje de sustrato. Para  $\gamma = 0.5V^{1/2}$ ,  $2\phi_B = 0.75V$  y  $V_{TH0} = -0.7V$ , encuentre  $V_{TH}$ .

PROBLEMA 85. Considere la compuerta lógica de la figura 4. Complete la tabla de verdad indicando el valor de la salida para las combinaciones de entradas mostradas en la tabla.

X	Y	Z	Salida
0	0	0	
0	1	0	
1	1	0	
1	1	1	

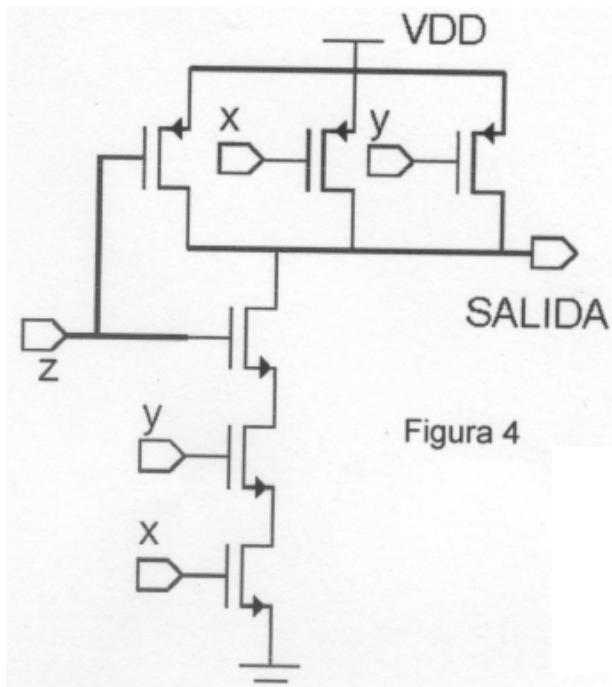


Figura 4

FIGURA 40. Circuito para el problema 7.

PROBLEMA 86. Los transistores del circuito de la figura mostrada son de enriquecimiento y tienen el mismo valor de  $K$  y la misma magnitud de tensión de umbral. Asuma que  $\lambda=0$  para ambos transistores. Encuentre expresiones para las corrientes  $IDS$  de ambos transistores y la tensión de salida para los siguientes valores de la tensión de entrada: a) 0 V, b) 2.5 V, c) -2.5 V.

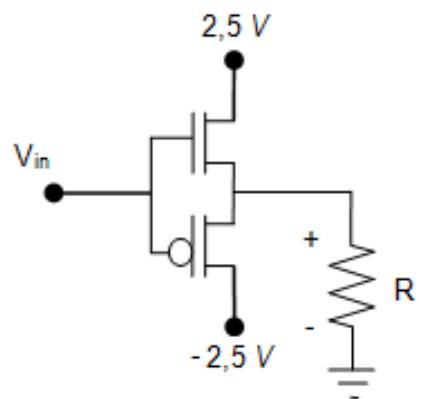


FIGURA 41. Circuito para el problema.

## Tutoría 9A

**PROBLEMA 87.** Los siguientes circuitos corresponden a compuertas lógicas implementadas con transistores MOSFET. Para cada caso, obtenga la tabla de la verdad que describe el funcionamiento de la compuerta.

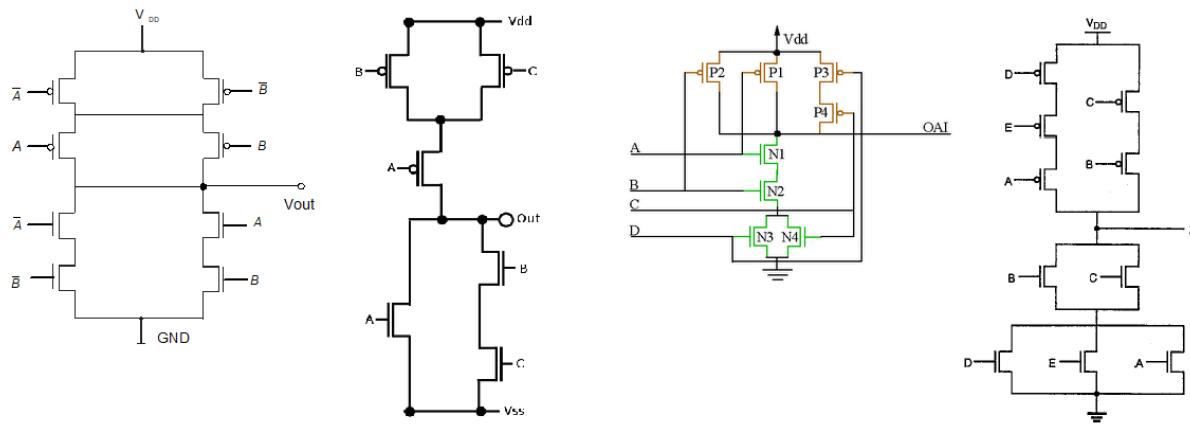


FIGURA 42. Circuito para el problema 1.

**PROBLEMA 88.** Un parámetro importante para una compuerta lógica es el valor de la tensión de entrada al cual  $V_{in} = V_{out}$ . Este parámetro se conoce como punto de disparo, o tensión de disparo de la compuerta lógica, e indica el valor de tensión de entrada que sirve de frontera entre una salida de 0 lógico y una salida de 1 lógico. Se considera que una compuerta es simétrica si la tensión de disparo es  $V_{in} = V_{DD}/2$ . Considere un inversor CMOS. Encuentre:

- Una expresión para la tensión de disparo del inversor en función de las tensiones de umbral de los transistores, la tensión de alimentación y los parámetros de transconductancia de los transistores.
- Considerando que ambos transistores tienen la misma magnitud de tensión de umbral, encuentre la razón de parámetros de transconductancia necesaria para obtener un inversor simétrico.
- Considerando la respuesta obtenida en el punto b), encuentre la razón de anchos de los transistores necesaria para obtener un inversor simétrico si el largo de compuerta para ambos transistores es igual a la longitud mínima permitida por la tecnología de implementación del inversor.

**PROBLEMA 89.** Dos transistores NMOS de enriquecimiento con tensiones de umbral V<sub>TH</sub> idénticas están conectados en serie como se muestra en la figura 2. Los efectos de modulación de largo de canal son despreciables. El comportamiento del circuito debe ser modelado por un transistor NMOS de enriquecimiento M<sub>3</sub> equivalente, que opera en saturación.

a) ¿En cuál modo opera M1 cuando M2 está en saturación? Considere que la tensión  $VGS2 > VTH$ .

b) Obtenga una expresión para  $K_3$  y  $VTH3$  del transistor equivalente M3, en función de las constantes  $K_1$ ,  $K_2$  y de la tensión de umbral de M1 y M2.

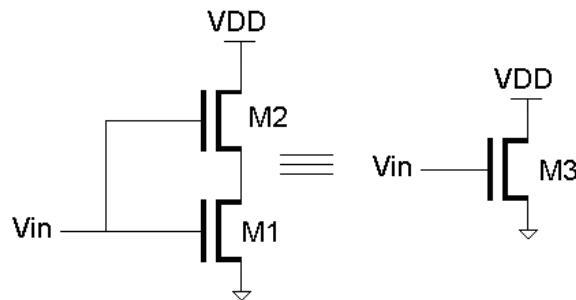


FIGURA 43. Circuito para el problema 3.

**PROBLEMA 90.** Considere la compuerta lógica de la figura, en el que  $V_{IN} = V_{IN1} = V_{IN2}$ . Para todos los transistores,  $|V_{THP}| = 0.5V$  y  $\lambda=0$ . Para los transistores NMOS  $K'_N = 75\mu A/V^2$  y  $W/L = 1$  para todos los dtransistores. La tensión de alimentación es  $V_{DD} = 3V$ . Con  $V_{IN1} = V_{IN2} = V_{OUT} = V_{DD}/2$ , la corriente que fluye en los transistores NMOS es de  $18.75 \mu A$ .

a) Calcule el valor de  $K_P$ .

b) Se desea reemplazar los transistores PMOS por un único transistor equivalente. Encuentre  $K_{PEQ}$  y  $VTH_{EQ}$  del transistor equivalente. ¿Cuál es la razón  $W/L$  del transistor equivalente?

c) Sustituya los transistores NMOS por un sólo transistor, y los PMOS por el equivalente obtenido en el apartado anterior. Obtenga una expresión para el voltaje de conmutación de la compuerta.

d) ¿Qué valor debe tener la razón  $K_P/K_N$  para que la compuerta tenga un diseño simétrico, es decir, la tensión de disparo sea  $V_{IN} = V_{IN1} = V_{IN2} = V_{OUT} = V_{DD}/2$ ?

e) Calcule el ancho de los transistores PMOS cumplir la condición del punto d), si  $L_{NMOS} = L_{PMOS} = 350nm$ .

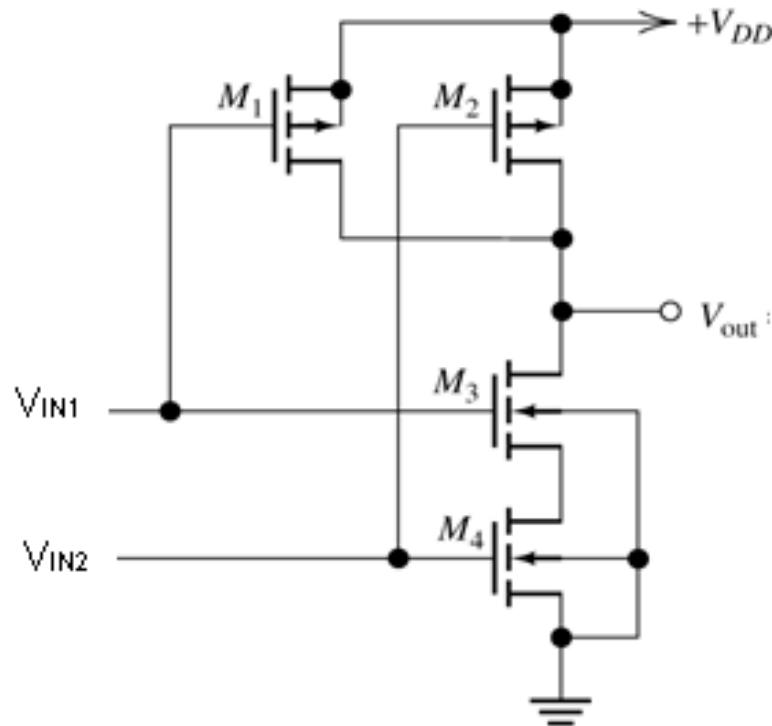


FIGURA 44. Circuito para el problema.

**PROBLEMA 91.** Cuando un inversor CMOS experimenta una transición lógica, ambos transistores se encuentran en la región de saturación durante el tiempo de transición, creando una trayectoria de baja impedancia entre  $V_{DD}$  y  $GND$ . A la potencia consumida durante ese transiente se le conoce como potencia de corto circuito. Demuestre que la potencia de corto circuito de un inversor CMOS simétrico ante una señal lógica trapezoidal periódica está dada por la fórmula:

$$P_{SC} = I_{SC} \cdot V_{DD} = \frac{2}{3} \cdot K \cdot \frac{t_r}{T} \left( \frac{V_{DD}}{2} - V_{TH} \right)^3$$

Donde  $P_{SC}$  es la potencia de corto circuito,  $I_{SC}$  es la corriente de corto circuito,  $K$  es el parámetro de transconductancia de los transistores,  $T$  es el período de la señal de entrada y  $t_r$  es el tiempo de subida de la señal de entrada, el cual se asume igual al tiempo de bajada. Asuma que los transistores tienen la misma magnitud de tensión de umbral.

**PROBLEMA 92.** Un microprocesador tiene 300 millones de transistores, sin incluir la memoria cache. Se desea calcular el consumo de potencia estática del microprocesador. Para esto, asuma el caso hipotético en el que todos los elementos lógicos del microprocesador fueran inversores y se aplica a todos los inversores un 0 a la entrada. Los parámetros de los transistores son los siguientes:

-Para el NMOS,  $V_{THN} = 0.5V$ ,  $W/L=1$ ,  $S=80mV/dec$

-Para el PMOS,  $V_{THP} = -0.7V$ ,  $W/L=3$ ,  $S=85mV/dec$

a) Calcule la corriente de subumbral del inversor.

b) Calcule la corriente de subumbral total del microprocesador.

c) Calcule la potencia estática del microprocesador, para una tensión de alimentación de 1.5V.

d) Si se utiliza el mismo transistor como transistor de acceso para implementar una memoria DRAM de 1GB, calcule la corriente de fuga de subumbral total de la memoria DRAM.

e) Para proveer de energía a la memoria, se conecta a una batería de 1.5V y 2000mAh. ¿Cuánto tiempo dura la batería si el consumo de corriente de la memoria se mantiene en el valor de corriente calculado en d)?

## Tutoría 10A

PROBLEMA 93. Para un transistor NMOS, el dopado del substrato es  $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

- a) Calcule el parámetro  $\gamma$  del transistor a partir de la figura ??.
- b) Calcule el espesor del dióxido de silicio de la compuerta.

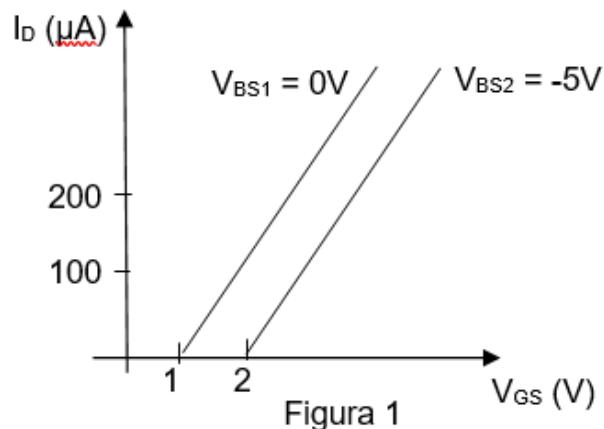


FIGURA 45. Diagrama para el problema ??.

PROBLEMA 94. Considere el circuito de la figura ?? . La corriente en el circuito es de  $50\mu\text{A}$ , la tensión de alimentación es de  $5\text{V}$ , la tensión de umbral de ambos transistores es de  $1\text{V}$ , y la transconductancia del proceso es de  $25\mu\text{A/V}^2$ .

- a) Utilizando una tabla de verdad, demuestre cuál es la función del circuito.
- b) Si al aplicar  $5\text{V}$  a la entrada del circuito se desea obtener una tensión de salida de  $0.25\text{V}$ , ¿cuál debe ser la razón  $W/L$  de los transistores?

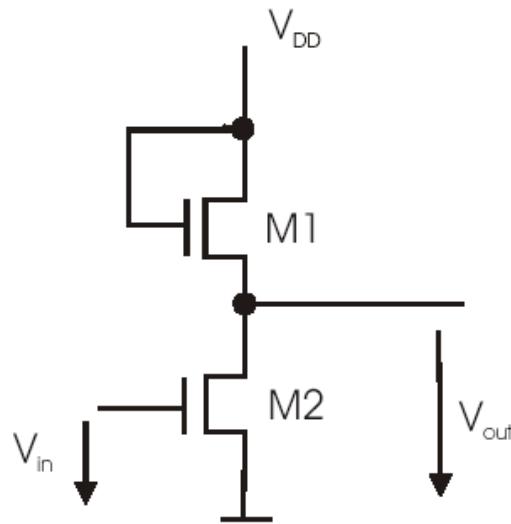


FIGURA 46. Circuito para el problema ??.

**PROBLEMA 95.** Considere la celda de memoria SRAM de la figura ?? . El dato almacenado se lee del lado izquierdo de la memoria. La memoria tiene un 1 lógico almacenado y se desea almacenar un 0 lógico.

- Para escribir un cero lógico, se aplica 0V a la terminal de M3 externa a la celda. Antes de lograr escribir el 0 lógico, ¿en qué región de operación están los transistores?
- Durante la escritura del cero lógico, en qué región deben operar los transistores M1, M3 y M5?
- ¿Cómo debe ser la razón K5/K3 para poder escribir un cero en el lado izquierdo de la celda?
- ¿Cómo se escribe un 1 lógico en la celda?

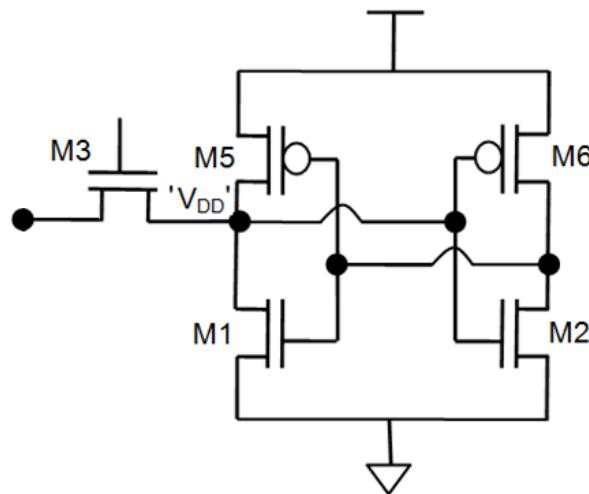


FIGURA 47. Circuito para el problema ??.

**PROBLEMA 96.** Considere el circuito de la figura, que implementa una memoria no volátil de solo lectura (ROM). Cada transistor NMOS permite almacenar un bit de información. Durante la

fabricación, para almacenar un cero lógico el voltaje de umbral del transistor se fija en  $V_{TH,0} = 0.5V$ , mientras que para almacenar un uno lógico se fija en  $V_{TH,1} = -0.5V$ . La tensión de alimentación del circuito es de  $2.5V$ , la razón  $W/L$  de los transistores es de  $1$ , y el parámetro de transconductancia de los transistores  $M1$  y  $M2$  es  $K_1=K_2=50\mu A/V^2$ . El efecto de cuerpo es despreciable para esta aplicación. El transistor  $M3$  almacena un uno lógico, y los transistores  $M1$  y  $M2$  almacenan un cero lógico.

- a) ¿Qué tipo de transistores son  $M1$ ,  $M2$  y  $M3$ ? ¿Cómo debe modificarse el esquemático para que indique esto?
- b) ¿Cómo puede leerse la información almacenada?
- c) Encuentre un sistema de ecuaciones para calcular la corriente que fluye por los transistores, si se aplica una tensión de compuerta de  $VDD$  en las terminales  $Vin1$ ,  $Vin2$  y  $Vin3$ .
- d) Asuma que la caída de tensión  $VDS$  del transistor  $M1$  es  $0.5V$ . Calcule la corriente que fluye en los transistores para este caso.
- e) Calcule las caídas de tensión  $VDS$  de  $M2$  y  $M3$ .
- f) Calcule el valor del parámetro de transconductancia del transistor  $M3$ .

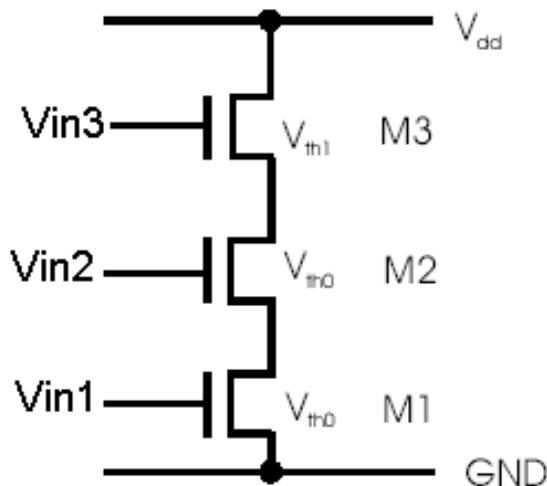


FIGURA 48. Circuito para el problema 4.

PROBLEMA 97. Calcule el voltaje en el nodo A para los circuitos de la figura ???. Las tensiones de umbral de los transistores son  $V_{THN} = 0.5V$  y  $V_{THP} = -0.7V$  y la tensión de alimentación del circuito es  $V_{DD} = 2.5V$ . Las  $K_P$  y  $K_N$  son iguales para todos los transistores.

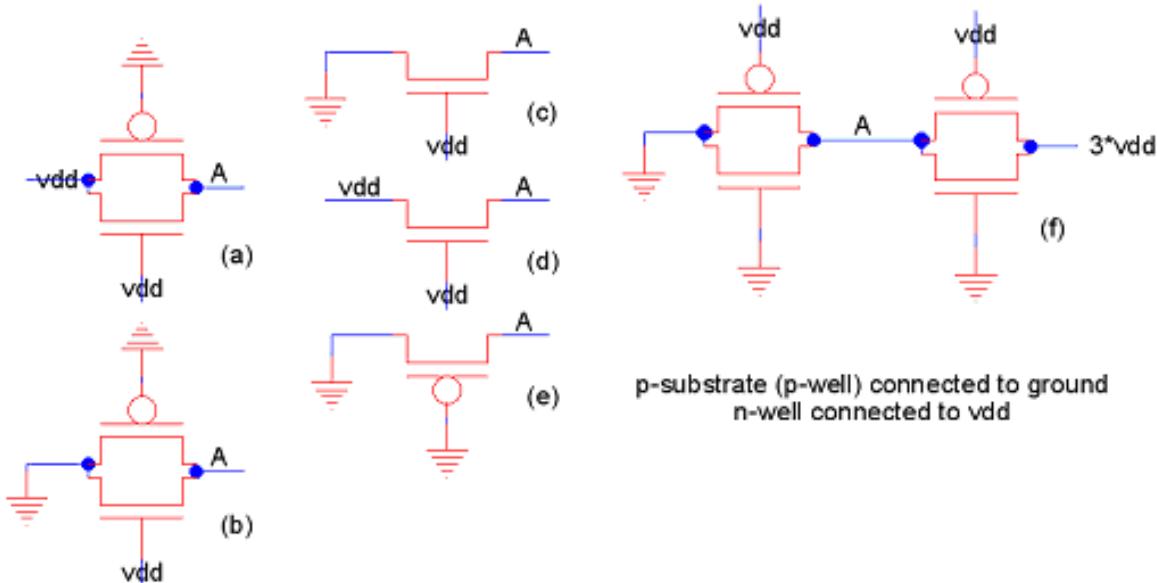


FIGURA 49. Circuito para el problema ??.

**PROBLEMA 98.** Considere el circuito de la figura ?? . La terminal C es una señal de control, mientras que la terminal A es un dato, la salida está en la terminal Z. Utilizando una tabla de verdad, encuentre qué función cumple este circuito.

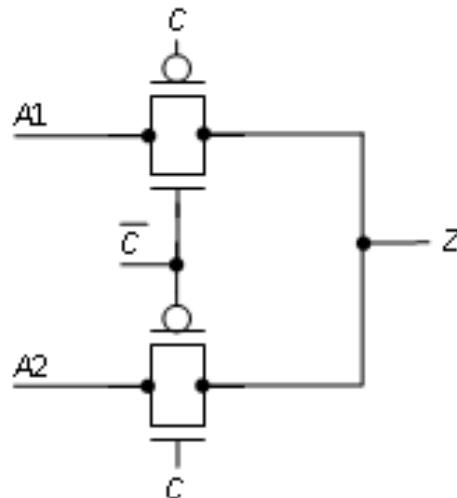


FIGURA 50. Circuito para el problema ??.

**PROBLEMA 99.** Considere el circuito de la figura ?? . El transistor M<sub>3</sub> es  $\alpha$  veces más ancho que M<sub>4</sub>; M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub> son del mismo tamaño. Obtenga una expresión para I<sub>REF</sub> en términos de  $\alpha$ , K<sub>N</sub> y R.

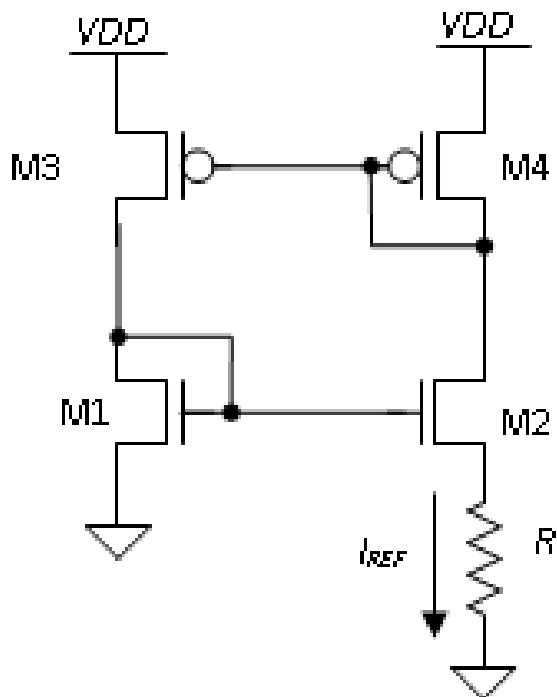


FIGURA 51. Circuito para el problema ??.

**PROBLEMA 100.** Considere una tecnología de fabricación de MOSFETs para la que  $L_{min}=0.1\mu m$ ,  $tox=8nm$ ,  $\mu_n=1350\text{ cm}^2/Vs$  y  $VTH=0.5\text{ V}$ . Considere un MOSFET de tipo N fabricado con dicha tecnología para el cual  $W=1\mu m$ .

- Encuentre la capacitancia por unidad de área  $C_{ox'}$
- Calcule los valores de  $VGS$  y  $VDS_{min}$  para operar el transistor en saturación con  $ID=3\text{ mA}$ , si  $\lambda = 0$  y el transistor no sufre efecto de substrato
- Encuentre  $VGS$  para que el transistor opere como una resistencia de  $1000\Omega$  para un  $VDS$  muy pequeño

**PROBLEMA 101.** Considere el circuito de la figura, para el cual  $VTH = 0.5V$ ,  $VDD = 3.3V$ ,  $R_1 = 500k\Omega$ ,  $R_2 = 750k\Omega$ ,  $R_3=R_4=10\text{ k}\Omega$ . La corriente del transistor en el punto de operación es  $I_{DS} = 0.1\text{ mA}$ .

- ¿En qué región opera el transistor? Justifique con cálculos.
- Calcule  $K_N$ .
- Debe reemplazarse  $R_3$  por un transistor de enriquecimiento PMOS con  $|V_{THP}| = V_{THN}$ , de forma el nuevo circuito mantenga la tensión entre drenador y surtidor del transistor NMOS del circuito original. Dibuje el nuevo circuito y calcule  $K_P$ .

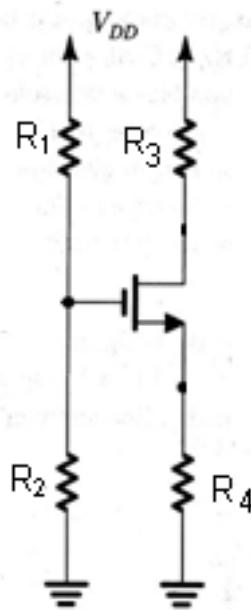


FIGURA 52. Circuito para el problema 9.

**PROBLEMA 102.** Para manejar cargas de alta demanda de corriente se conectan dos inversores en cascada como se ilustra en la figura 7. Los transistores del segundo inversor tienen 4 veces más ancho que los del primero. Los parámetros para este circuito son:  $V_{DD} = 3V$ ,  $L = 1.2 \mu m$ ,  $t_{ox} = 7 nm$ ,  $V_{THN} = 0.5 V$  y  $V_{THP} = -0.7V$ ,  $K'_N = 100 \mu A/V^2$  y  $K'_P = 50 \mu A/V^2$ . La modulación de largo de canal es despreciable. Asumiendo que los anchos de la primera etapa son  $W_N = 3 \mu m$  y  $W_P = 6 \mu m$ , determine:

a) El circuito equivalente del conjunto de inversores, utilizando el modelo digital del MOSFET.

b) La capacitancia de carga que el segundo inversor representa para la primera

c) La capacitancia total de carga en la salida del primer inversor

Asumiendo que sólo un transistor está activo a la vez, modele el transistor como una fuente de corriente y calcule para el primer inversor:

d) El tiempo de conmutación de la salida de alto a bajo ( $\tau_{PHL}$ ), es decir, el tiempo que la salida tarda en pasar de  $V_{DD}$  a  $V_{DD}/2$ .

e) El tiempo de conmutación de la salida de bajo a alto, ( $\tau_{PLH}$ ), es decir, el tiempo que la salida tarda en pasar de  $V_{DD}/2$  a  $V_{DD}$ .

f) El promedio de ambos tiempos de conmutación ( $\tau_P$ )

g) Calcule la potencia dinámica debido a cargas capacitivas cuando el circuito opera a 100 MHz para el primer inversor. Nótese que para este circuito el factor de actividad es de 1.

h) Calcule la potencia dinámica debido a corriente de corto circuito para el primer inversor cuando el circuito opera a 100 MHz. Como aproximación utilice tiempo de subida el tiempo promedio de conmutación y como tensión del umbral el promedio de las magnitudes de las tensiones de umbral de los transistores.

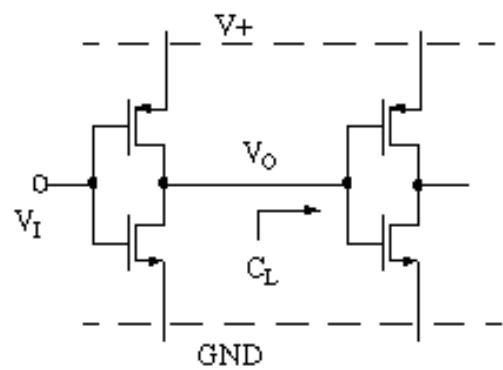


FIGURA 53. Circuito para el problema 10.



## Tutoría 10C

**PROBLEMA 103.** Considere el circuito de la figura ???. La curva característica del transistor MOSFET del circuito se muestra en la figura 6. El voltaje de umbral del transistor es de 1 V. Utilizando el método de la línea de carga, encuentre el punto de operación del transistor.

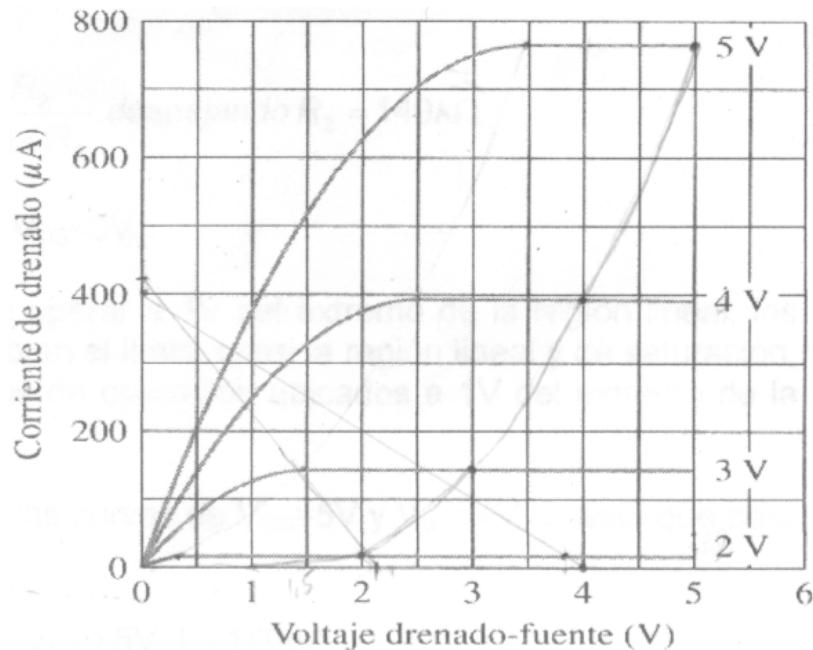
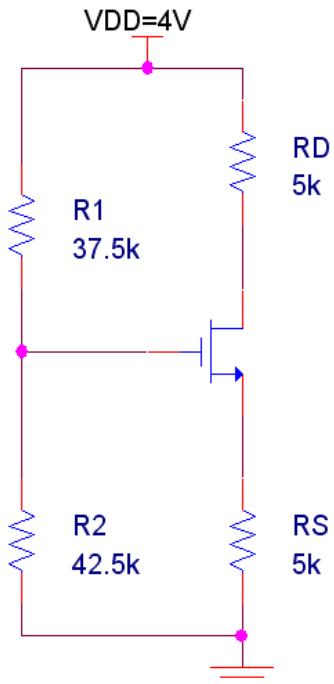


Figura 6

FIGURA 54. Figuras para el problema.

**PROBLEMA 104.** Considere el circuito y las curvas características del MOSFET mostrados en la figura. El voltaje de umbral del transistor es de 1.5V. La resistencia  $R_1$  es de  $100\text{ k}\Omega$ . Dimensione las resistencias  $R_D$ ,  $R_S$  y  $R_2$  para que el transistor opere en saturación con  $V_{DS}$  polarizado en 1V a partir del extremo de la región lineal con  $V_D = 3\text{V}$ . Para esto ignore el efecto de substrato. Muestre en la curva característica la región de operación del transistor para cumplir con este objetivo.

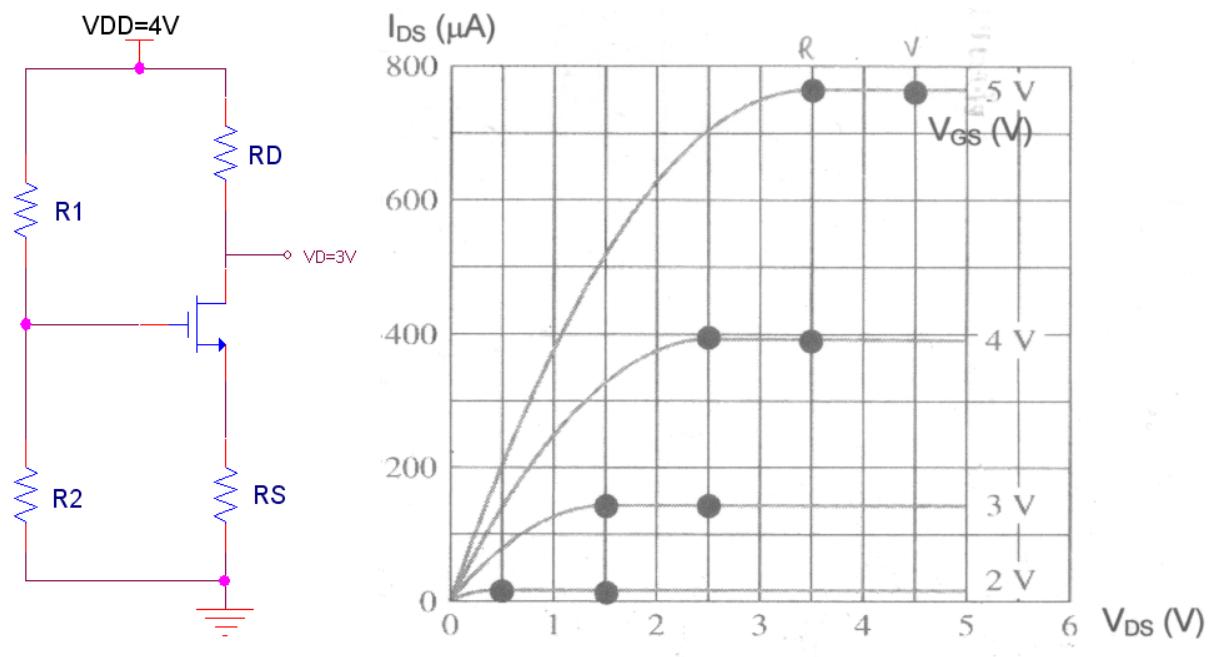


FIGURA 2

FIGURA 55. Figuras para el problema.

**PROBLEMA 105.** Obtenga el modelo a pequeña señal del amplificador de la figura 4 y calcule la resistencia de entrada, la resistencia de salida y la ganancia de tensión si  $K=0.5mA/V^2$ ,  $V_{TH}=1V$ ,  $\lambda=0.0133 V^{-1}$  y el punto Q es  $(1.45mA, 3.88V)$

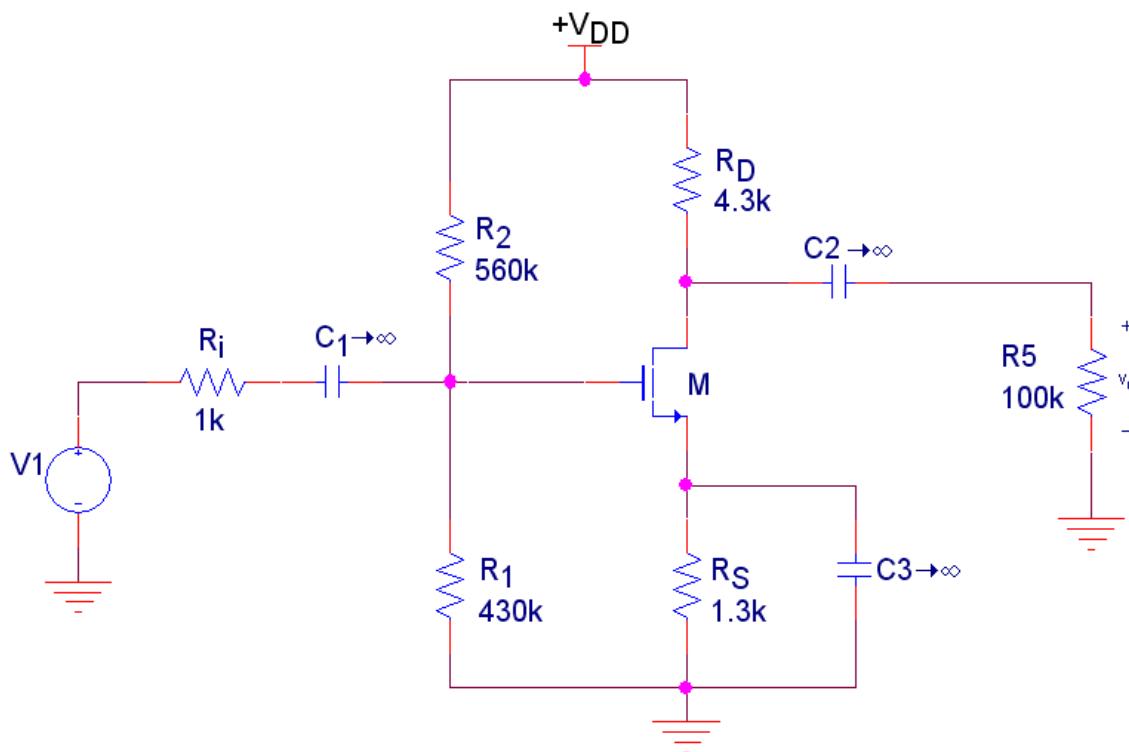


FIGURA 56. Circuito para el problema 3.

¿Cuál es el punto Q si  $k_N = 0.5 \text{ mA/V}^2$ ,  $VDD = 12 \text{ V}$ ,  $VTH = 1 \text{ V}$ ,  $\lambda = 0.0133 \text{ V}^{-1}$ ? Con los datos anteriores, calcular  $A_V$

PROBLEMA 106. Usando el circuito siguiente determine (ignore el efecto del substrato):

$$ID = 0.1 \text{ mA}$$

$$VTH = 0.5 \text{ V}$$

$$VDD = 3.3 \text{ V}$$

$$R1 = 500 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 750 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = R4 = 10 \text{ k}\Omega$$

a) ¿en cuál modo opera el MOSFET?

b) Calcule  $kN$

c)  $R3$  debe ser reemplazado por transistor p-mos de enriquecimiento ( $|VTP| = |VTN|$ ) tal que el valor de  $VDS$  del transistor n-mos no cambie. Dibuje el circuito y determine  $KP$

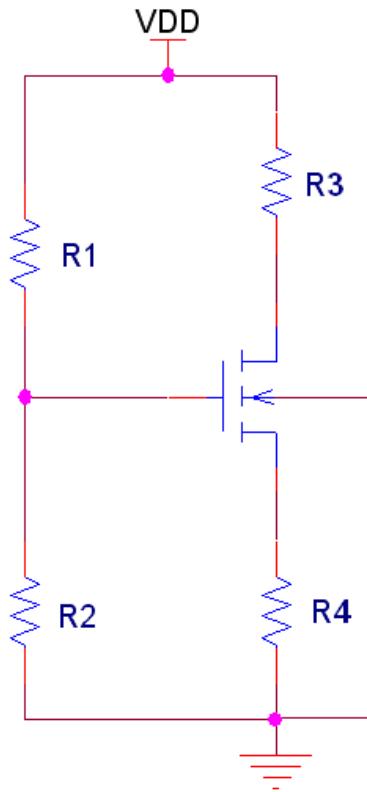


FIGURA 57. Circuito para el problema 4.

PROBLEMA 107. El siguiente circuito tiene 3 transistores MOS  $T_1, T_2, T_3$  (todos con la misma tensión de umbral) que operan en modo de saturación.  $V_2 > V_1$

a) ¿Qué función cumple el circuito?

b) Obtenga una ecuación para la corriente de salida  $ID_2$  como función de las tensiones  $V_1$  y  $V_2$

c) Calcule  $ID_2$  para  $K_1 = K_2 = 20\mu A/V^2$ ,  $K_3 = 5\mu A/V^2$ ,  $V_{TH} = 1V$ ,  $V_1 = 0V$ ,  $V_2 = 10V$

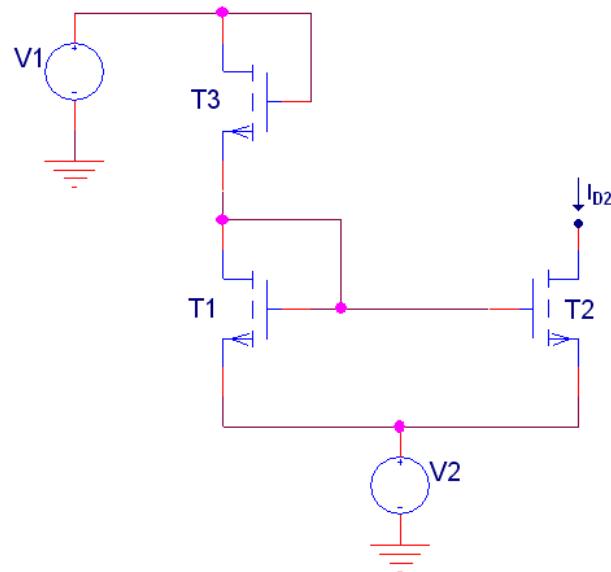


FIGURA 58. Circuito para el problema 5.

PROBLEMA 108. Obtenga la función de la siguiente compuerta

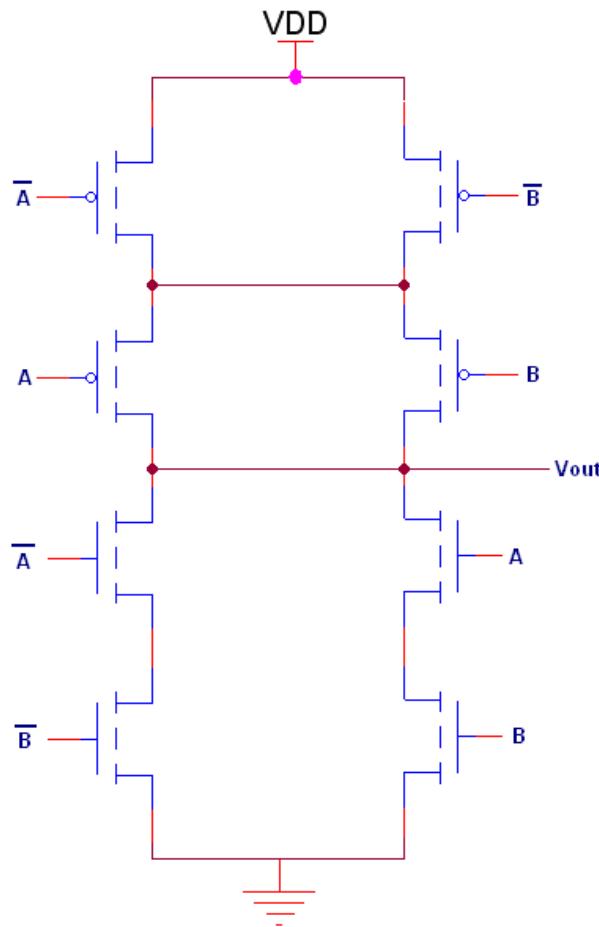


FIGURA 59. Circuito para el problema 6.

A	B	F
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

PROBLEMA 109. Dos transistores de enriquecimiento con tensiones de umbral  $VTH$  idénticas están conectados como se muestra en la figura. Ignore los efectos de modulación de canal ( $\lambda=0$ ). El comportamiento del circuito debe ser modelado por un transistor  $T3$  equivalente (del mismo tipo que  $T1$  y  $T2$ )

- a) ¿En cuál modo opera  $T1$  cuando  $T2$  está en saturación?
- b) Calcule los valores  $K3$ ,  $VTH3$  del equivalente.  $T3$  debe estar expresado en función de las constantes  $K1$  y  $K2$  y de las tensiones de umbral de  $T1$  y  $T2$ .

Sugerencia:  $T3$  opera en la región de saturación ( $VG \leq VDD$ )

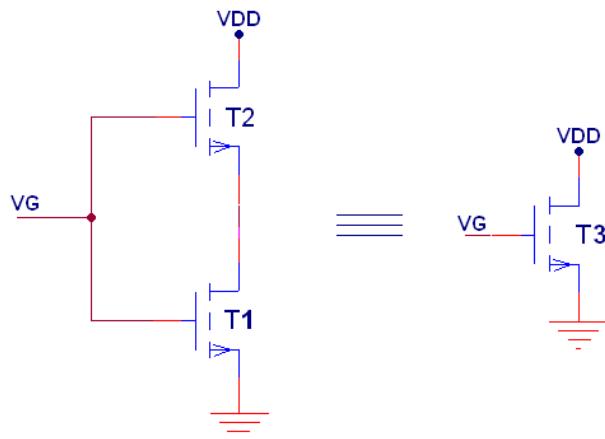


FIGURA 60. Circuito para el problema 7.

PROBLEMA 110. Consideré los siguientes inversores

- NMOS con un transistor de carga NMOS de empobrecimiento
- Con carga PMOS y NMOS de enriquecimiento
- Inversor CMOS estandar

Dibuje los equivalentes de pequeña señal. Calcule la amplificación (ganancia) de los circuitos.

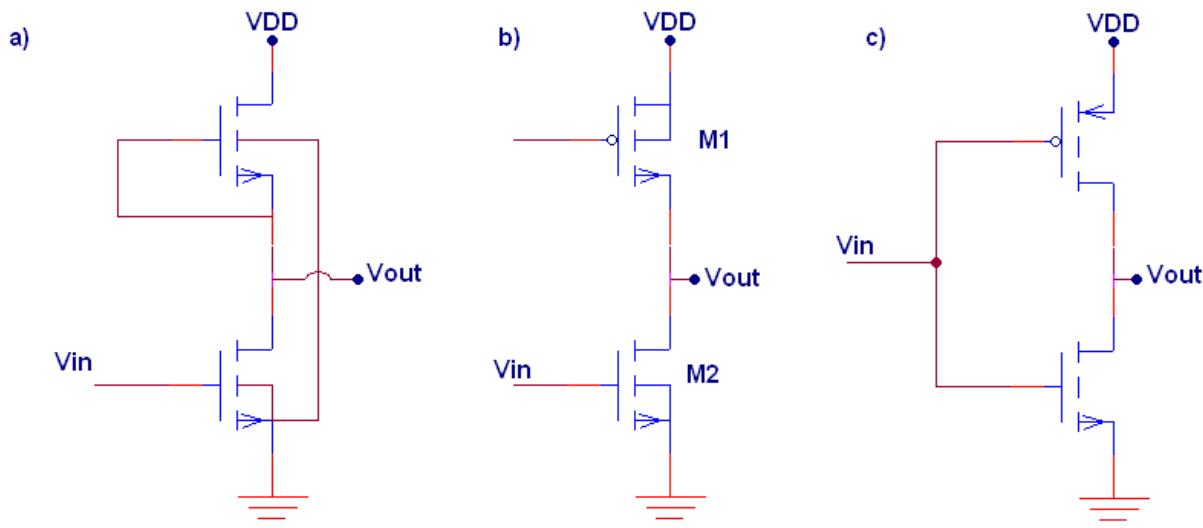


FIGURA 61. Circuito para el problema 8.



# Tutoría 11

PROBLEMA 111. Considere el circuito amplificador de la figura 1.

Los parámetros del transistor son  $K = 0.5\text{mA/V}^2$ ,  $VTH=1\text{V}$ ,  $\lambda = 0.0133\text{V}^{-1}$ .

- Calcule el punto de operación.
- Obtenga el modelo de pequeña señal
- Obtenga las expresiones para la resistencia de entrada, la resistencia de salida y la ganancia de tensión y calcule sus valores.

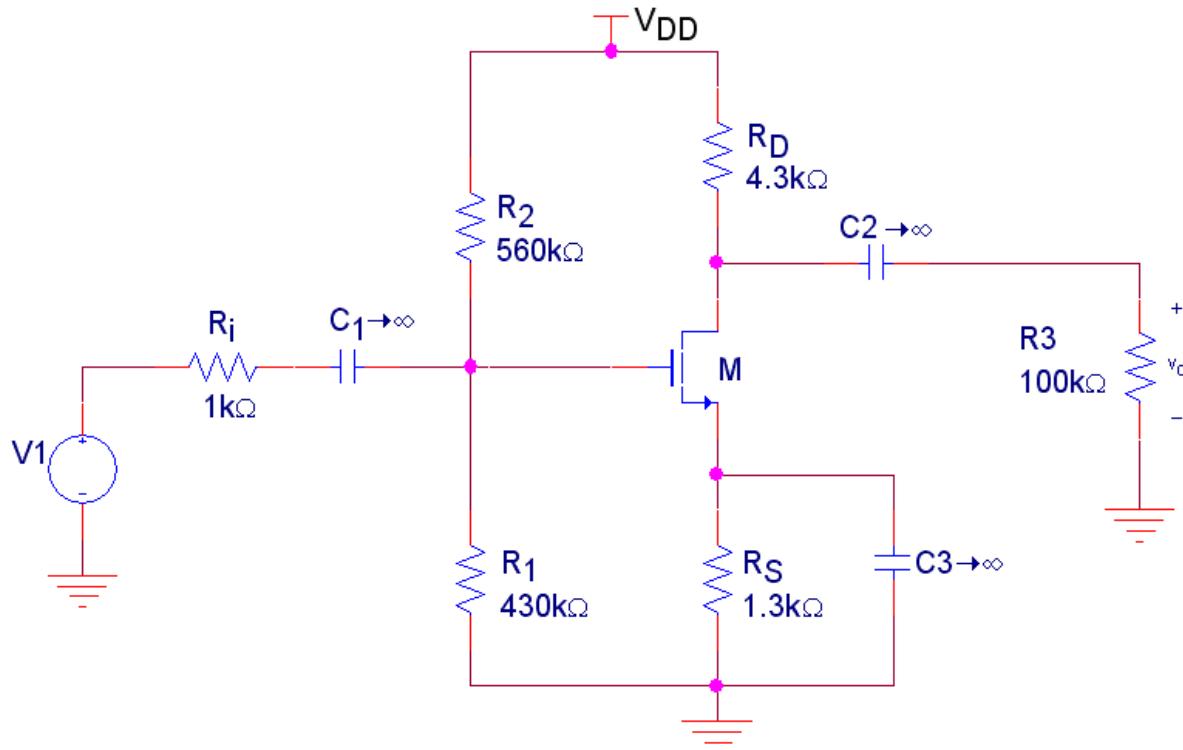


FIGURA 62. Circuito para el problema 1.

PROBLEMA 112. Considere los siguientes inversores, mostrados en la figura 2.

- NMOS con un transistor de carga NMOS de empobrecimiento
- NMOS con un transistor de carga PMOS
- Inversor CMOS

Dibuje los equivalentes de pequeña señal y encuentre las expresiones para calcular la amplificación de dichos circuitos.

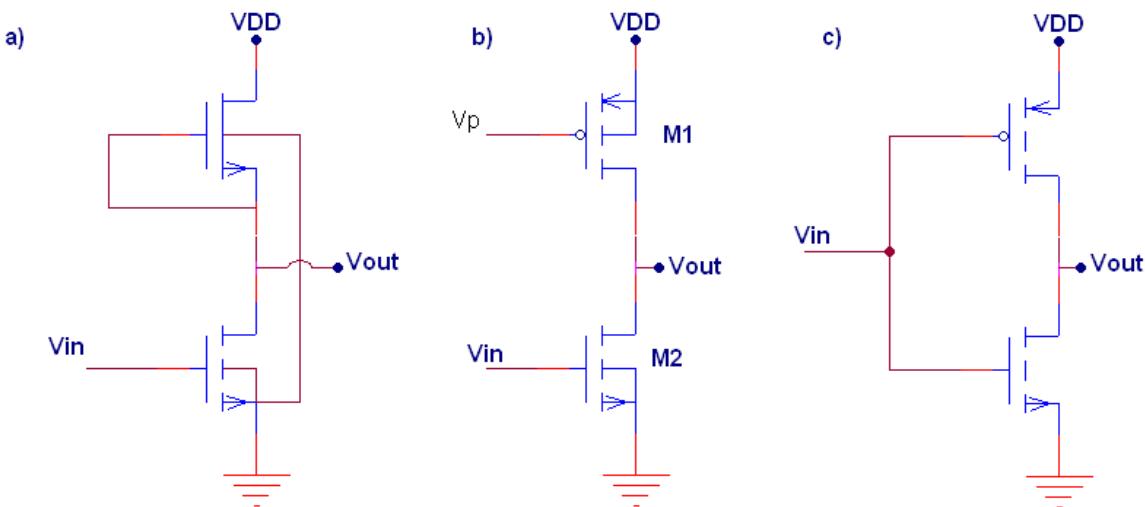


FIGURA 63. Circuito para el problema 2.

Para los problemas 3 a 6, los parámetros del transistor son  $V_{TH} = 1$  V,  $K' = 50\mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\lambda = 0.1 \text{ V}^{-1}$ .

PROBLEMA 113. Considere el amplificador de la figura 3, en el que  $W/L = 10$ .

- Calcule los valores de  $R_D$  y  $V_G$  tal que  $V_{OUT} = 0$  V e  $I_D = 500\mu\text{A}$ .
- Dibuje el equivalente de pequeña señal del circuito.
- Calcule  $g_m$ ,  $R_{IN}$ ,  $R_{OUT}$  y  $A_V$ , del modelo de pequeña señal.

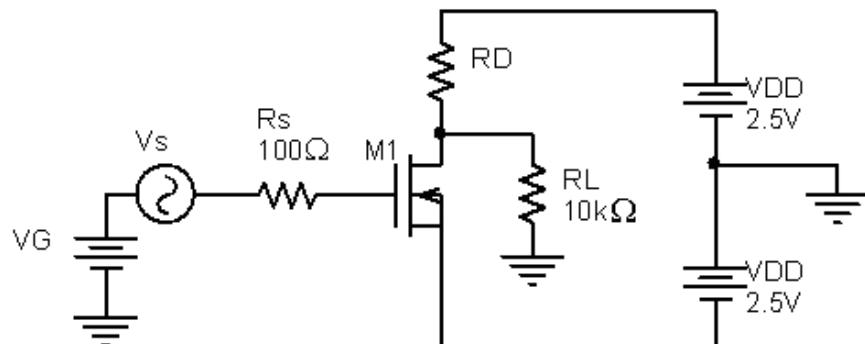


FIGURA 64. Circuito para el problema 3.

PROBLEMA 114. Considere el amplificador de la figura 4, en el que  $L = 2\mu\text{m}$ . Calcule los valores de  $V_G$ ,  $I_{SUP}$ , y  $W$ , que permiten obtener  $g_m \geq 2 \text{ mS}$  y  $A_V \geq | -45 |$ .

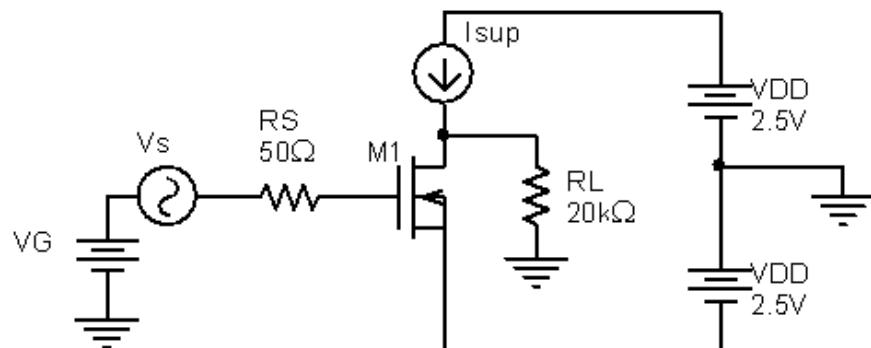


FIGURA 65. Circuito para el problema 4.

PROBLEMA 115. Considere el amplificador de la figura 5, en el que  $RL = 20\text{k}\Omega$ . Calcule  $ISUP$  para obtener  $R_{OUT} \geq 10\text{k}\Omega$  y calcule  $W/L$  que permite obtener  $R_{IN} \leq 1\text{k}\Omega$ .

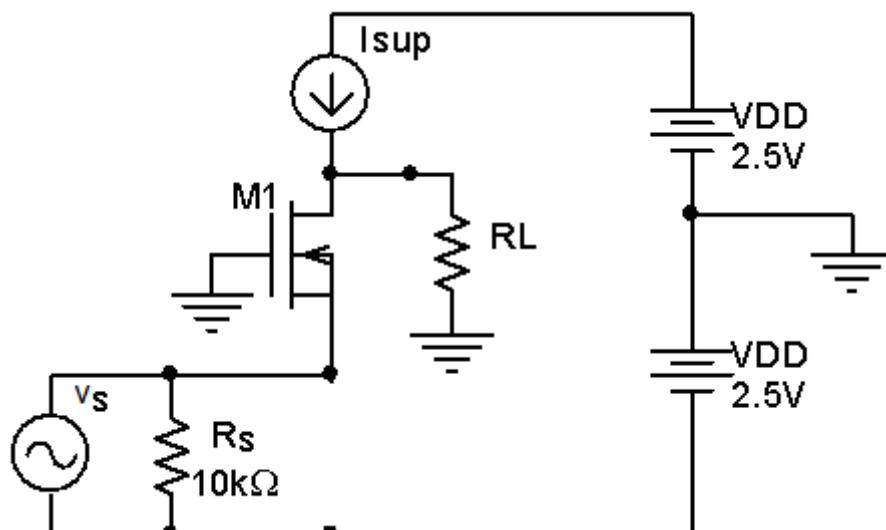


FIGURA 66. Circuito para el problema 5.

PROBLEMA 116. Considere el amplificador de la figura 6, en el que los parámetros del transistor son  $\phi_B = 0.6\text{ V}$ ,  $\gamma = 0.6\text{ V}^{1/2}$  y  $W/L = 50$ . Calcule la ganancia de tensión y la resistencia de salida. ¿Cómo influye en estos parámetros la polarización del substrato?

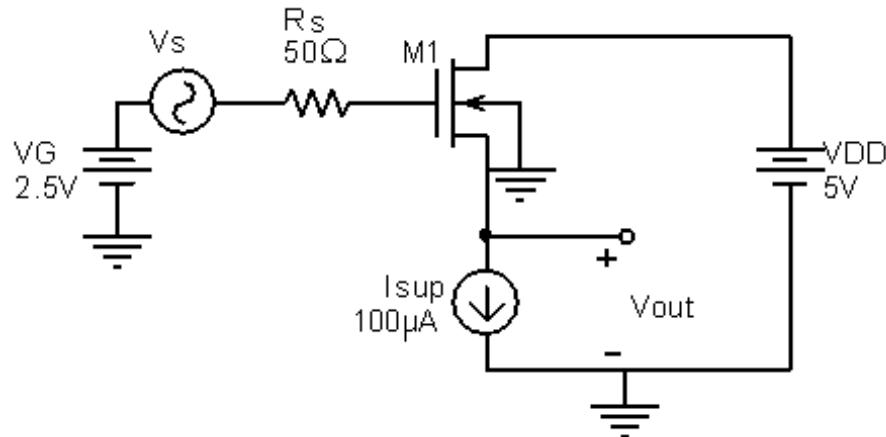


FIGURA 67. Circuito para el problema 6.

PROBLEMA 117. Considere el circuito de la figura 7.

- Obtenga el equivalente de pequeña señal del circuito. Indique claramente las terminales de entrada, salida, las tensiones y terminales del transistor
- Con base en el equivalente de pequeña señal obtenido en el punto anterior, obtenga una expresión para la ganancia de voltaje  $AV = v_o/v_{in}$
- Con base en el equivalente de pequeña señal obtenido en el punto anterior, obtenga una expresión para la resistencia de entrada del circuito

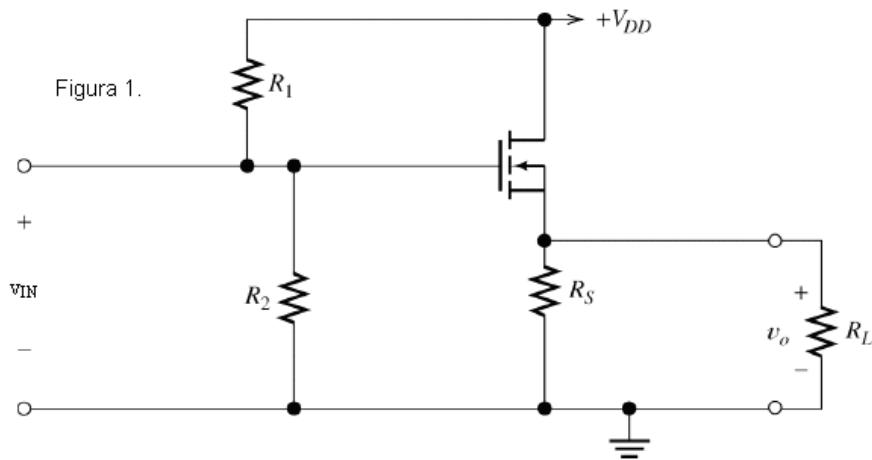


FIGURA 68. Circuito para el problema 7.

## Tutoría 12

**PROBLEMA 118.** Considere el circuito amplificador de la figura 1. La transconductancia del transistor es de  $1\text{mA/V}$ , la tensión de umbral es de  $1\text{V}$ , el voltaje de Early es de  $40\text{V}$ . La resistencia de salida del transistor es de  $100\text{k}\Omega$ . La tensión de alimentación del circuito es de  $5\text{V}$ .

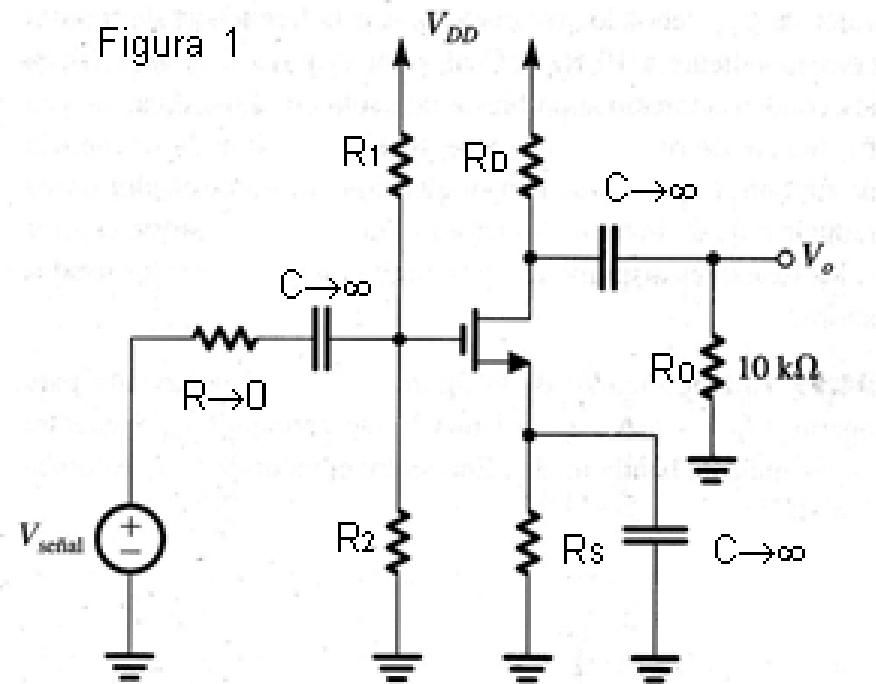


FIGURA 69. Circuito para el problema 1.

- Encuentre el valor de la corriente de drenador en el punto de polarización.
- Encuentre el valor del parámetro de transconductancia del transistor.
- Encuentre el valor de  $V_{GS}$  en el punto de operación.
- ¿En qué región de polarización debe mantenerse operando el transistor para que el amplificador funcione? Considerando esto, calcule el máximo valor de la resistencia total de la rama drenador-surtidor que puede conectarse en el circuito.
- Dibuje el equivalente de pequeña señal del circuito y encuentre una expresión para la ganancia de tensión del circuito.
- Calcule el valor de  $R_D$  para que la resistencia de salida de pequeña señal de todo el amplificador sea de  $3225\Omega$ .

g) Tomando el valor calculado en f), calcule el valor máximo  $RS$  para cumplir el criterio obtenido en d).

h) Calcule la tensión de compuerta en el punto de operación  $VG$  considerando el valor de  $Rs$  encontrado en g).

i) Calcule el mínimo valor de  $R2$  para que la resistencia de entrada de pequeña señal de todo el amplificador sea mayor a  $10M\Omega$  y se obtenga el valor de  $VG$  calculado en h).

j) ¿Cuál sería el valor de  $R1$  si  $R2$  tiene el valor calculado en i) ?

**PROBLEMA 119.** Considere el circuito de la figura 2.  $C1, C2$  tienden a infinito y las tensiones de alimentación son  $VDD = 5V$  y  $VSS = -5V$ . El parámetro de transconductancia del transistor es de  $1mA/V2$ , la tensión de umbral es de  $1V$ , el voltaje de Early tiende a infinito. La resistencia  $R$  del generador es de  $1k\Omega$ ,  $RD = 7.5k\Omega$ ,  $RS = 6 k\Omega$  y la resistencia de carga  $RL$  es de  $10 k\Omega$ .

a) ¿En qué región debe operar en transistor para que el circuito funcione como amplificador?

b) Encuentre el punto de operación del transistor  $VGS, IDS, VDS$

c) Obtenga el equivalente de pequeña señal del circuito. Indique claramente las terminales de entrada, salida, las tensiones y terminales del transistor

d) Calcule el valor de los parámetros de pequeña señal del transistor

e) Con base en el equivalente de pequeña señal obtenido en el punto anterior, obtenga una expresión para la ganancia de voltaje  $AV=vo/vin$  y calcule su valor para el punto de operación encontrado en el inciso b).

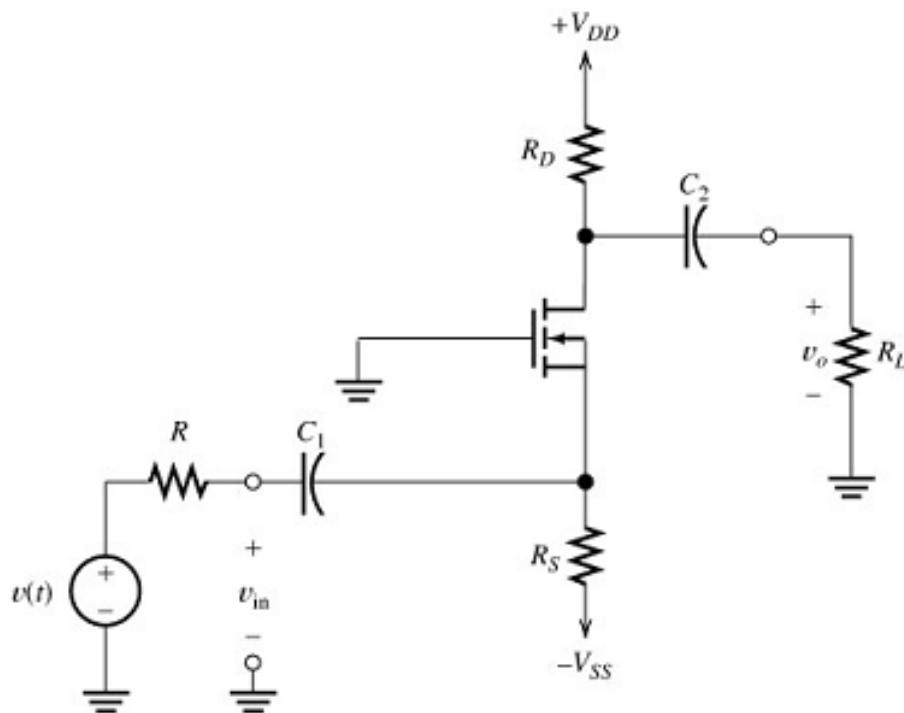


FIGURA 70. Circuito para el problema 2.

**PROBLEMA 120.** Encuentre el equivalente de pequeña señal de los siguientes circuitos, junto con la resistencia de entrada, salida y ganancia de tensión.

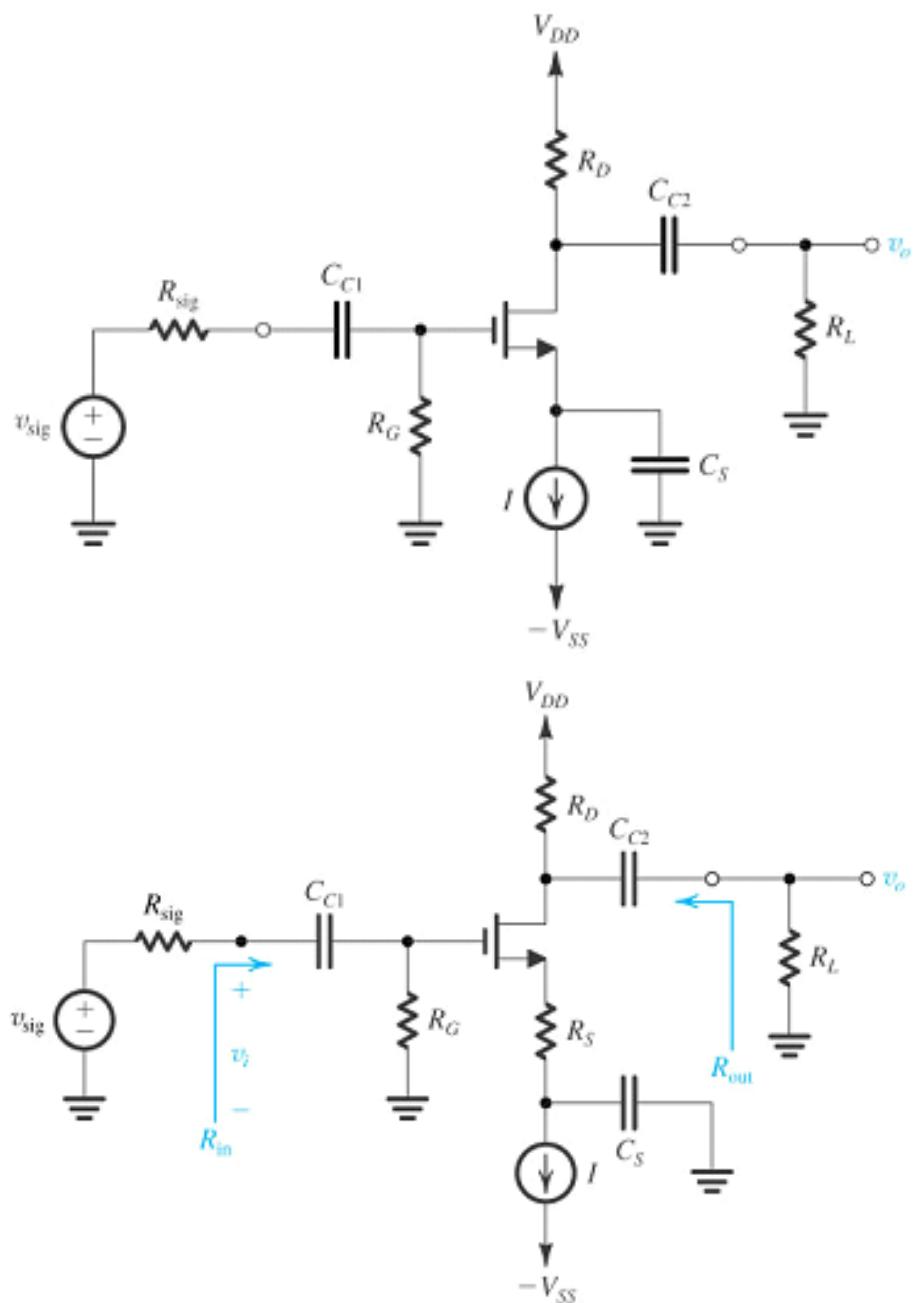


FIGURA 71. Circuitos para el problema 3.

**PROBLEMA 121.** Un BJT polarizado opera como un amplificador con emisor conectado a tierra entre una fuente de señal, con una resistencia de fuente de  $10k\Omega$  conectada a la base y una carga de  $10k\Omega$  conectada como una resistencia de colector  $RC$ . En el modelo correspondiente,  $gm$  es de  $40 \text{ mA/V}$  y  $r_\pi$  es de  $2.5 k\Omega$ . Trace el modelo del amplificador completo usando el circuito equivalente BJT  $\pi$  híbrido. Calcule la ganancia de voltaje global ( $v_c/v_s$ ). ¿Cuál es el valor de  $\beta$  para el BJT que implican los valores de los parámetros del modelo? ¿A qué valor se debe incrementar  $\beta$  para duplicar la ganancia del voltaje global?

PROBLEMA 122. Para el circuito mostrado en la figura 4, dibuje el circuito equivalente en pequeña señal. Use  $\alpha = 0.99$  y  $VA \rightarrow \infty$ . Su circuito debe mostrar los valores de todos los componentes, incluidos los parámetros del modelo. ¿Cuál es la resistencia de entrada  $R_{in}$ ? Calcule la ganancia del voltaje global ( $V_o/V_s$ )

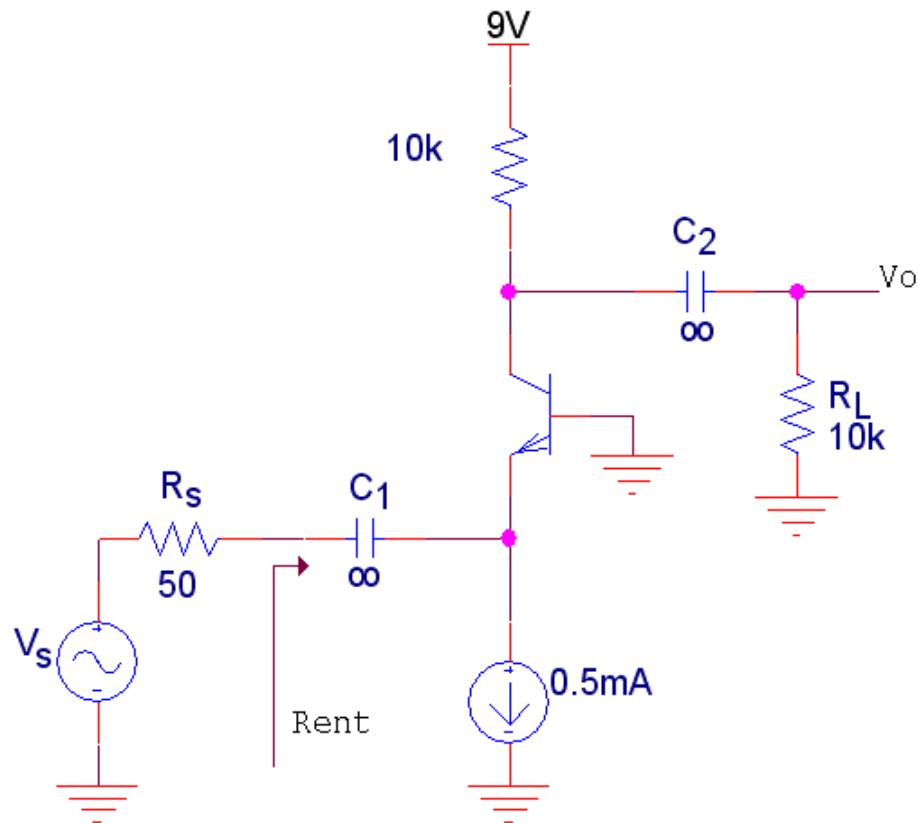


FIGURA 72. Circuito para el problema 4.

## Tutoría 13A

**PROBLEMA 123.** En el circuito mostrado en la figura 1, el transistor tiene una  $\beta$  de 200. ¿Cuál es el voltaje de dc en el colector? Encuentre las resistencias de entrada  $R_{ib}$  y  $R_{ent}$  y la ganancia de voltaje global ( $v_o/v_{señal}$ ). Para una señal de salida de  $\pm 0.4V$ , ¿Cuáles valores de  $v_{señal}$  y  $v_b$  se requieren?

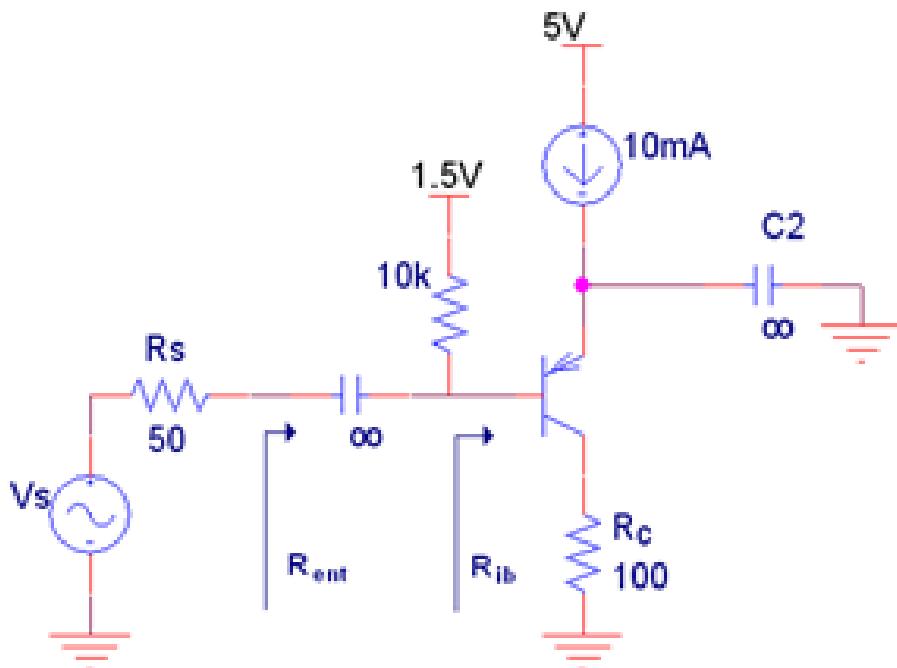


FIGURA 73. Circuito para el problema 1.

**PROBLEMA 124.** El transistor del circuito mostrado en la figura 2 se polariza para operar en el modo activo. Suponiendo que  $\beta$  es muy grande, encuentre la corriente de polarización del colector IC. Reemplace el transistor con el modelo de circuito equivalente a pequeña señal de la figura 5.52b) (recuerde sustituir el suministro de energía de dc con un cortocircuito). Analice el circuito equivalente amplificador resultante para mostrar que

$$\frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{R_E}{R_E + r_e}$$

$$\frac{v_{o2}}{v_i} = \frac{-\alpha R_C}{R_E + r_e}$$

Determine los valores de estas ganancia de voltaje (para  $\alpha \approx 1$ ). Ahora, si la terminal marcada con  $v_{o1}$  se conecta a tierra, ¿cuál es la ganancia de voltaje  $v_{o2}/v_i$ ?

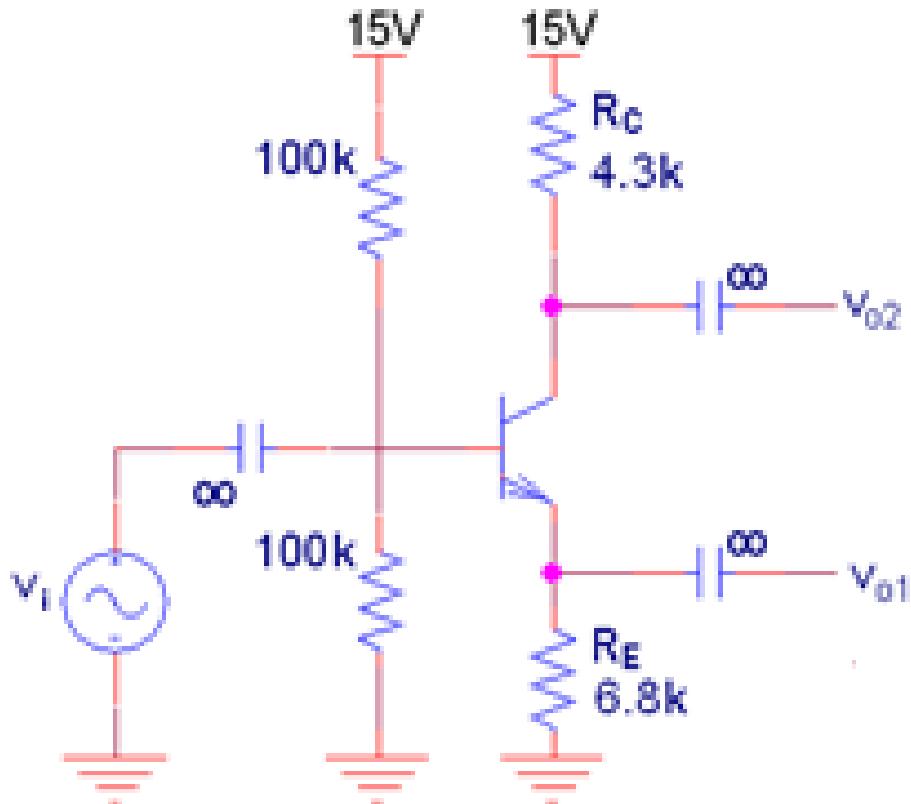


FIGURA 74. Circuito para el problema 2.

**PROBLEMA 125.** Un amplificador de emisor común del tipo mostrado en la figura 3 se polariza para operar a  $I_C = 0.2\text{mA}$  y tiene una resistencia de colector  $R_C = 24\text{k}\Omega$ . El transistor tiene una  $\beta = 100$  y una VA grande. La fuente de señal está directamente acoplada a la base y se eliminan  $CC_1$   $R_B$ . Use estos resultados para determinar la ganancia de voltaje global cuando se conecta al colector un resistor de carga de  $10\text{k}\Omega$  y la resistencia de fuente  $R_{\text{señal}} = 10\text{k}\Omega$ .

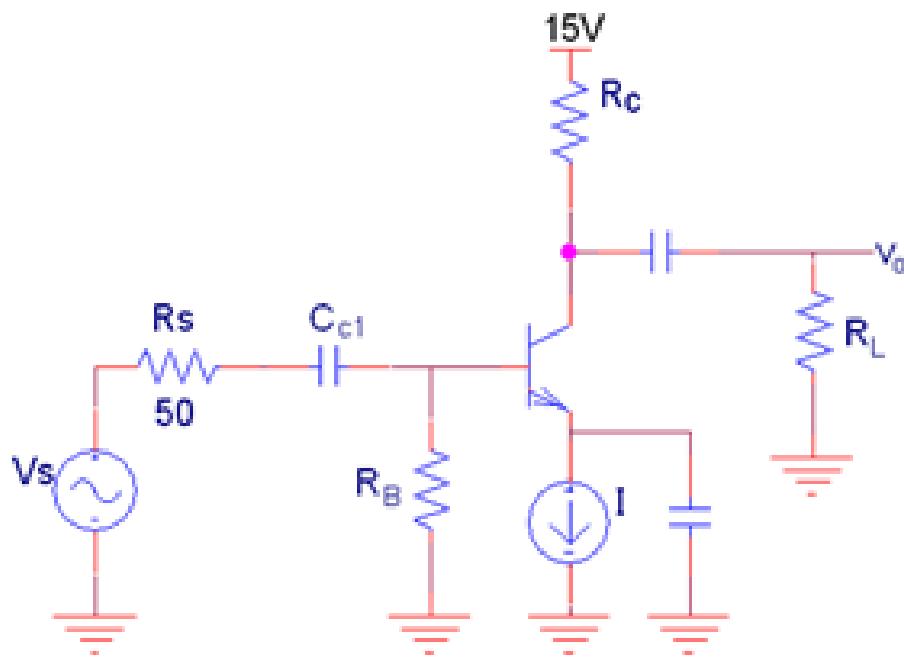


FIGURA 75. Circuito para el problema 3.

**PROBLEMA 126.** Para el amplificador de emisor común mostrado en la figura 4, sean  $V_{CC} = 9V$ ,  $R_1 = 27k\Omega$ ,  $R_2 = 15k\Omega$ ,  $R_E = 1.2k\Omega$  y  $R_C = 2.2k\Omega$ . El transistor tiene  $\beta=100$  y  $V_A = 100V$ . Calcule la corriente de polarización de dc de  $I_E$ . Si el amplificador opera entre una fuente para la cual  $R_{señal} = 10k\Omega$  y una carga de  $2k\Omega$ , reemplace el transistor con su modelo  $\pi$  híbrido y calcule los valores de  $R_{en}$ , la ganancia de voltaje  $v_o/v_{señal}$  y la ganancia de corriente  $i_o/i_i$ .

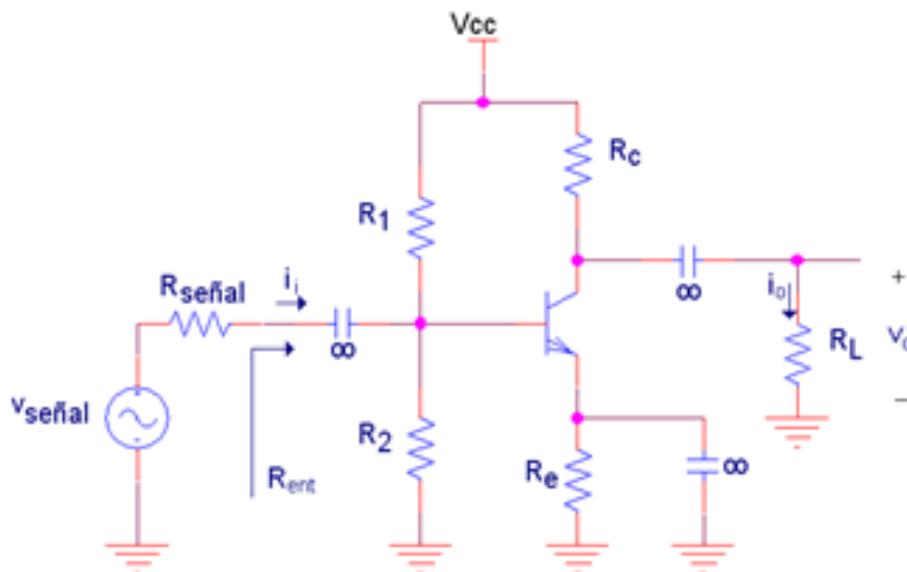


FIGURA 76. Circuito para el problema 4.

**PROBLEMA 127.** El amplificador de la figura 5, consiste en dos amplificadores de emisor común idénticos conectados en cascada. Observe que la resistencia entrada de la segunda etapa,  $R_{ent2}$  constituye la resistencia de carga de la primera etapa.

a) Para  $V_{CC} = 15V$ ,  $R_1 = 100k\Omega$ ,  $R_2 = 47k\Omega$ ,  $R_E = 3.9k\Omega$ ,  $R_C = 6.8k\Omega$  y  $\beta = 100$ , determine la corriente de dc del colector y el voltaje de dc del colector de cada transistor.

b) Dibuje el circuito equivalente a pequeña señal de todo el amplificador y dé los valores de todos sus componentes. Ignore  $r_o1$  y  $r_o2$ .

c) Calcule  $R_{ent1}$  y  $v_{b1}/v_{señal}$  para  $R_{señal}$  de  $5k\Omega$

d) Obtenga  $R_{ent2}$  y  $v_{b2}/v_{b1}$

e) Para  $R_L = 2k\Omega$ , determine  $v_o/v_{b2}$

f) Estime la ganancia de voltaje total  $v_o/v_{señal}$

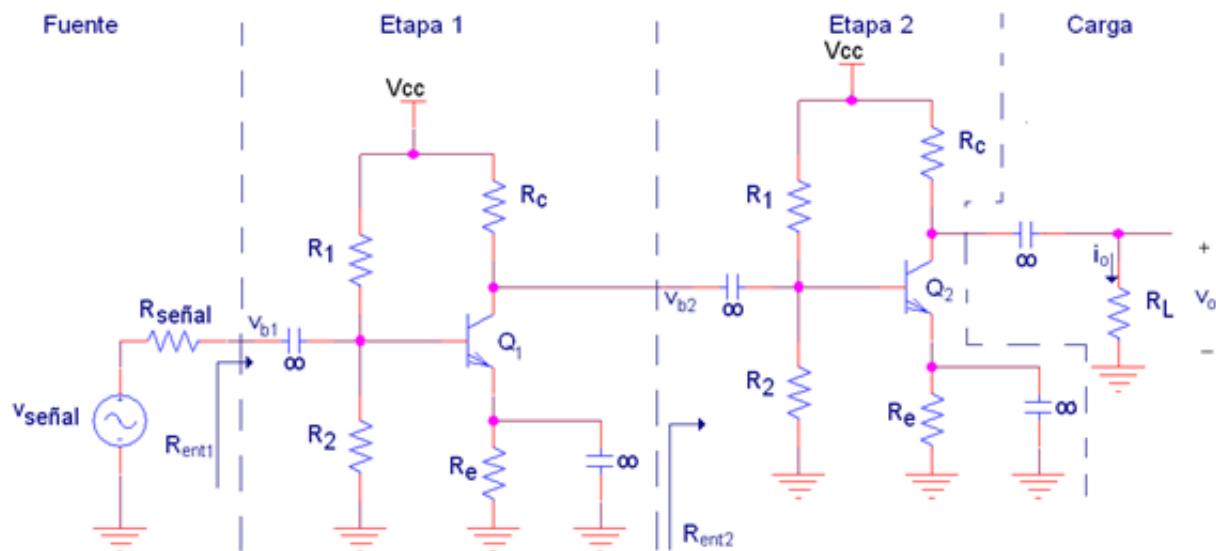


FIGURA 77. Circuito para el problema 5.

**PROBLEMA 128.** El BJT del circuito de la figura 6, tiene una  $\beta = 100$ .

a) Determine la corriente de dc del colector y el voltaje de dc en el colector

b) Reemplace el transistor por su modelo T y dibuje el circuito equivalente a pequeña señal del amplificador. Analice el circuito resultante para determinar la ganancia de voltaje  $v_o/v_i$ .

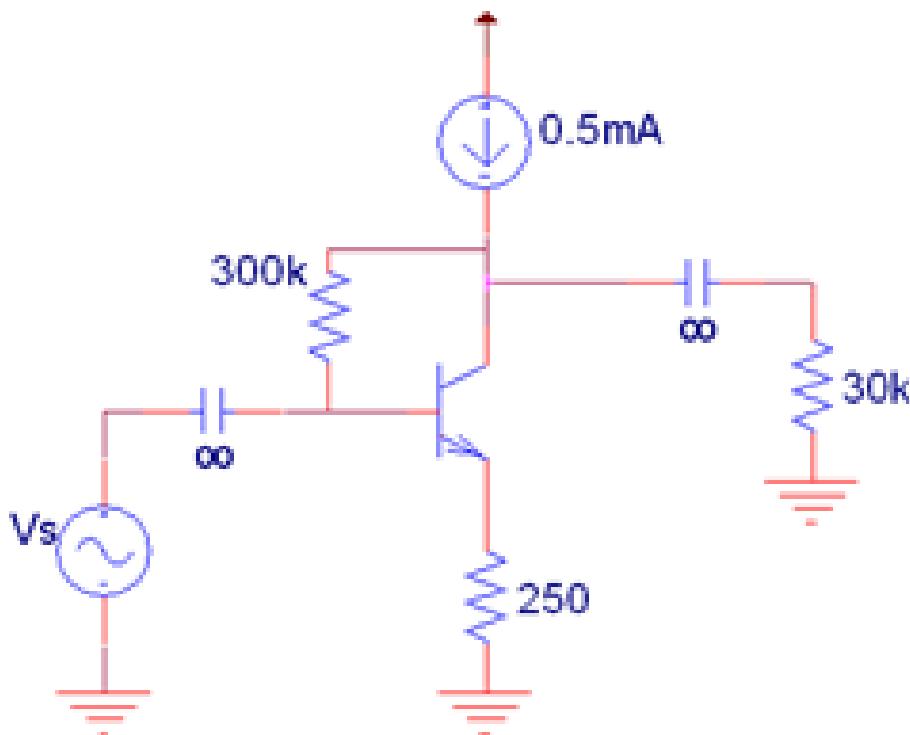


FIGURA 78. Circuito para el problema 6.

**PROBLEMA 129.** Para el circuito del seguidor de la figura 7, considere que el transistor Q1 tiene una  $\beta = 50$  y el transistor Q2 una  $\beta = 100$ , e ignore el efecto de  $r_o$ . Use  $V_{BE} = 0.7V$

a) Determine las corrientes dc de emisor de Q1 y Q2. También, calcule los voltajes de dc de  $V_{B1}$  y  $V_{B2}$ .

b) Si una resistencia de carga  $R_L = 1k\Omega$  se conecta a la terminal de salida, estime la ganancia de voltaje de la base al emisor de Q2,  $v_o/v_{B2}$  y determine la resistencia de entrada  $R_{in2}$  viendo hacia la base de Q2. (Sugerencia: considere a Q2 como un seguidor de emisor alimentador por un voltaje  $v_{B2}$  en su base)

c) Reemplazando Q2 con su resistencia de entrada  $R_{in2}$  encontrada en b), analice el circuito del seguidor de emisor Q1 para determinar su resistencia de entrada  $R_{in1}$  y la ganancia de su base a emisor,  $v_e/v_{B1}$ .

d) Si el circuito se alimenta con una fuente que tiene una resistencia de  $100k\Omega$ , determine la transmisión hacia la base de Q1,  $v_{B1}/v_{señal}$ .

e) Encuentre la ganancia de voltaje global  $v_o/v_{señal}$ .

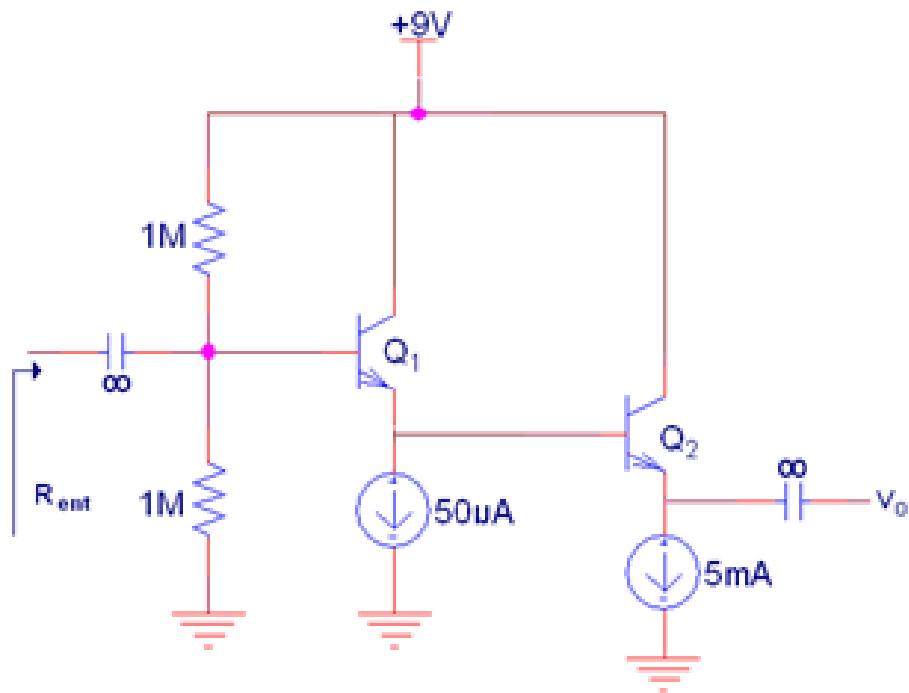
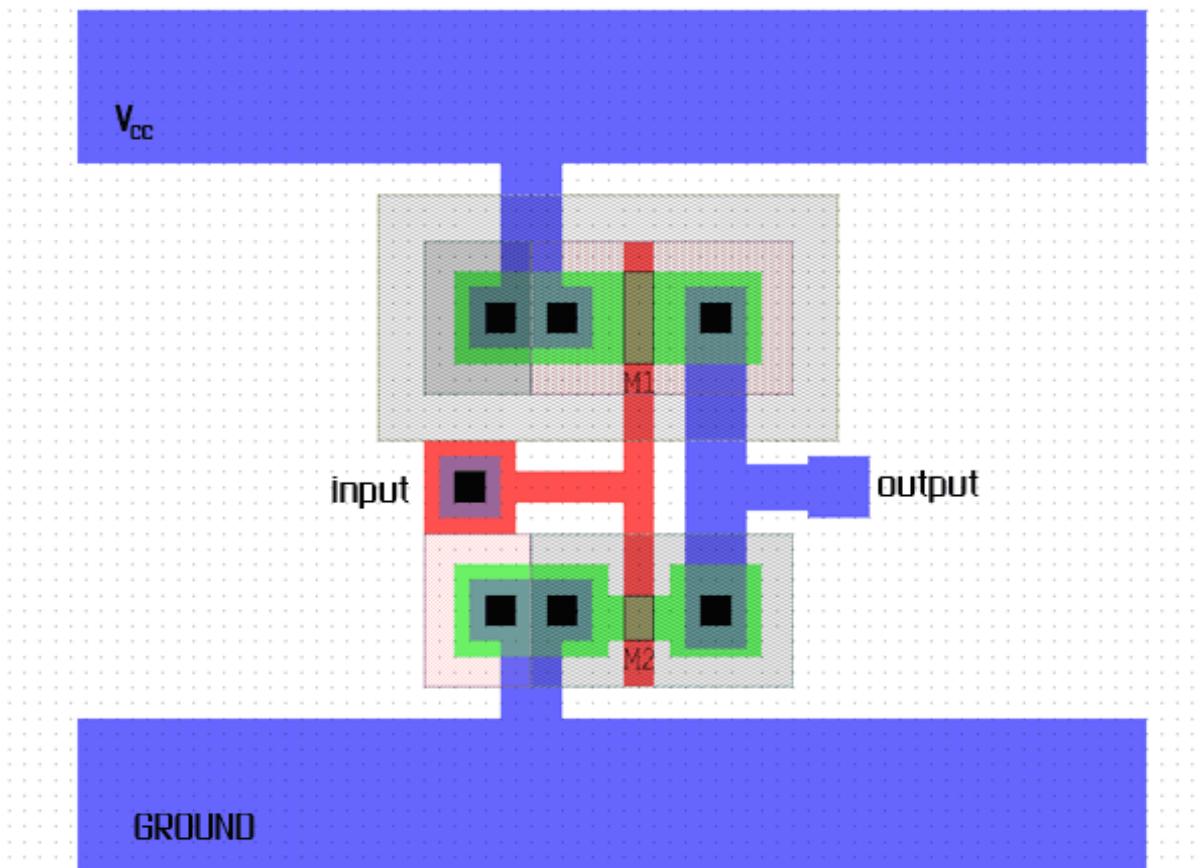
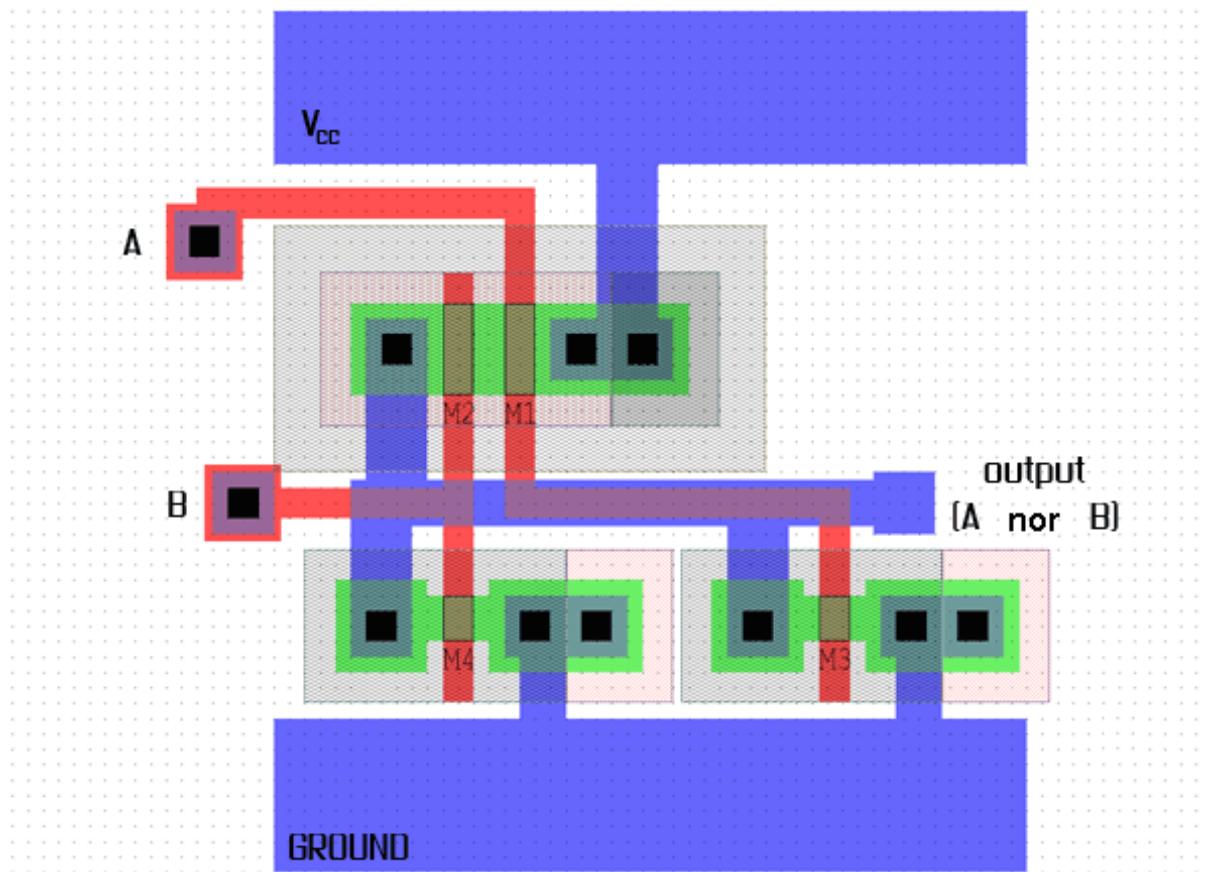


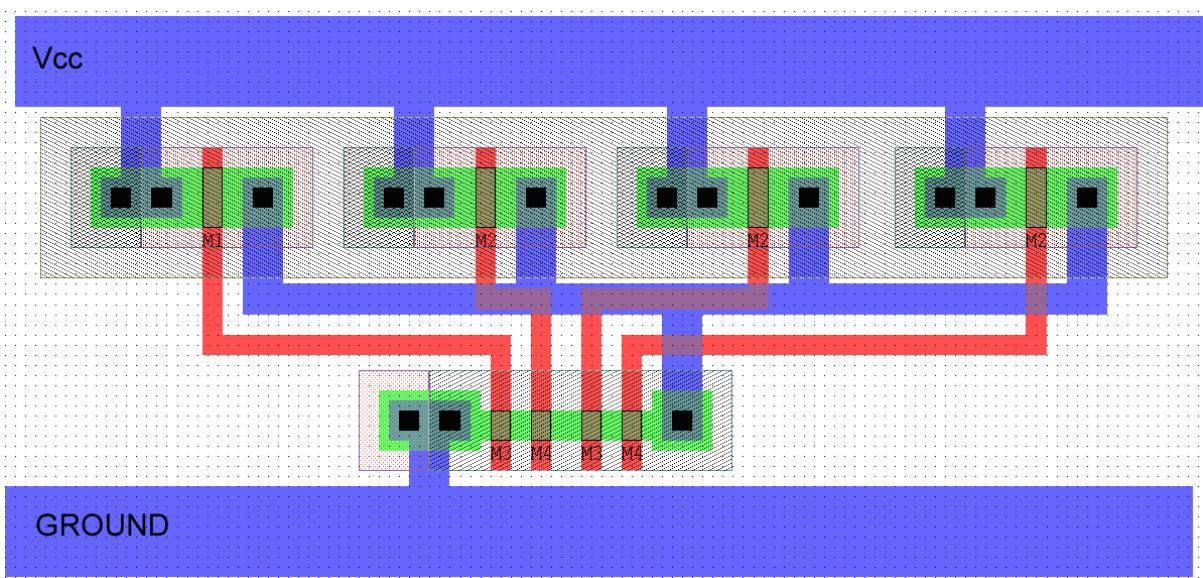
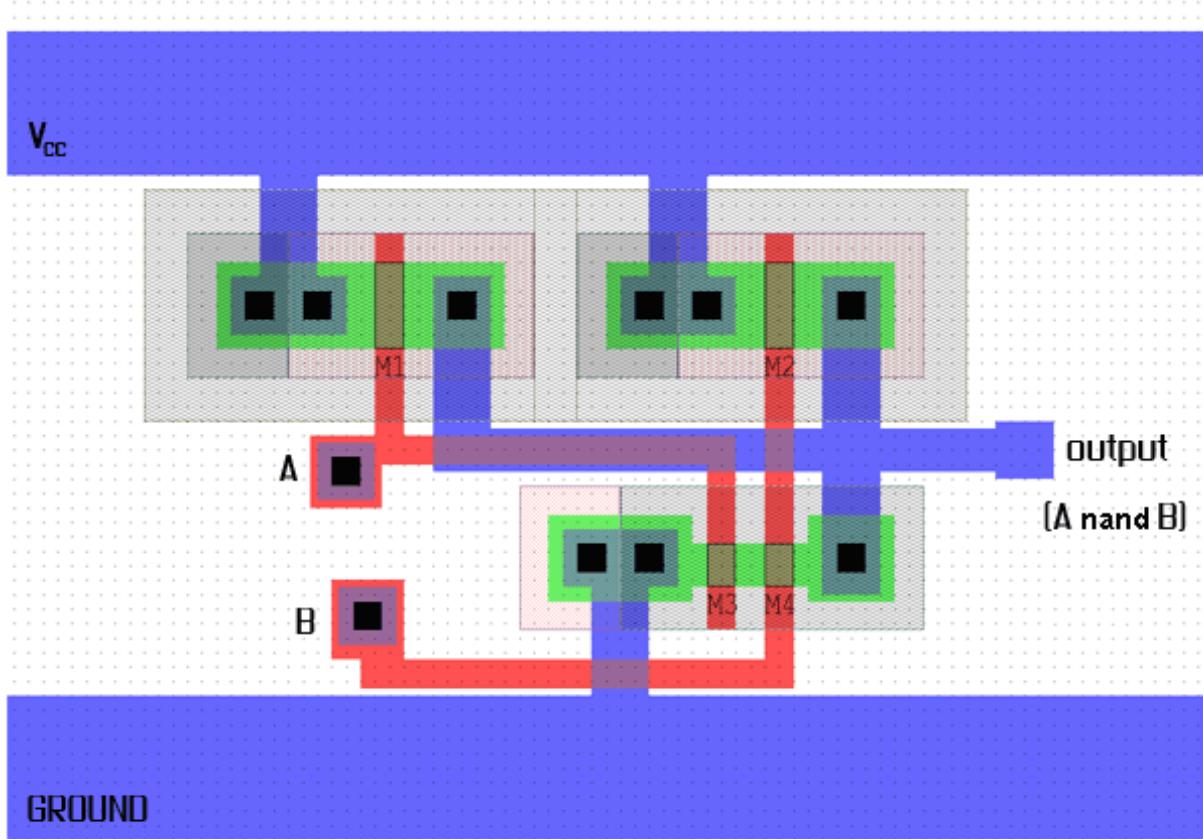
FIGURA 79. Circuito para el problema 7.

## Tutoría 13B

PROBLEMA 130. Considere los siguientes layouts. Dibuje los esquemáticos de los circuitos y las secciones transversales de las secciones indicadas. Código de capas: celeste = metal 1, rojo = silicio policristalino, verde = difusión, textura rosada= difusión P, textura celeste con líneas inclinadas hacia la izquierda = difusión N, negro = contacto, textura celeste con líneas inclinadas hacia la derecha = tina N.







PROBLEMA 131. Dibuje los layouts y secciones transversales para las siguientes situaciones:

- Un contacto entre metal 1 y poly1
- Un contacto entre metal1 y poly2
- Contactos entre las capas de metal: 1-2, 2-3, 1-3,
- Contacto al substrato p

- Contacto al pozo  $n$
- Dos transistores  $P$  adyacentes con difusiones compartidas
- Dos transistores  $P$  adyacentes aislados eléctricamente
- Dos transistores  $N$  adyacentes con difusiones compartidas
- Dos transistores  $N$  adyacentes aislados eléctricamente

## Tutoría 14

PROBLEMA 132. Para el amplificador de emisor común mostrado en la figura 1, sean  $V_{CC} = 9V$ ,  $R_1 = 27k\Omega$ ,  $R_2 = 15k\Omega$ ,  $R_E = 1.2k\Omega$  y  $R_C = 2.2k\Omega$ . El transistor tiene  $\beta=100$  y  $V_A = 100V$ .

a) Calcule la corriente de polarización de  $i_E$ .

Si el amplificador opera entre una fuente para la cual  $R_{señal} = 10k\Omega$  y una carga de  $2k\Omega$ ,

b) Encuentre el equivalente de pequeña señal y calcule el valor de los parámetros de pequeña señal

c) Calcule los valores de rent, la ganancia de voltaje  $v_o/v_{señal}$  y la ganancia de corriente  $i_o/i_i$ .

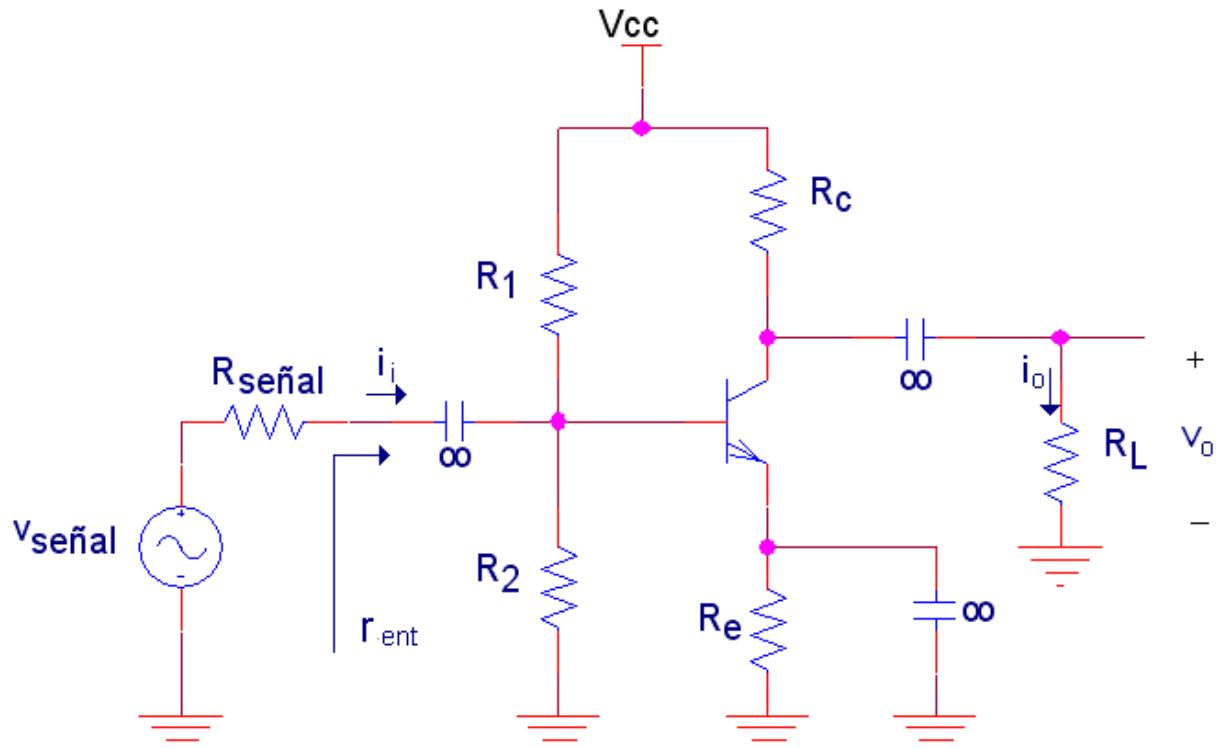


FIGURA 80. Circuito para el problema 1.

PROBLEMA 133. El amplificador de la figura 2 consiste en dos amplificadores de emisor común idénticos conectados en cascada. Observe que la resistencia entrada de la segunda etapa,  $R_{ent2}$  constituye la resistencia de carga de la primera etapa.

a) Para  $V_{CC} = 15V$ ,  $R_1 = 100k\Omega$ ,  $R_2 = 47k\Omega$ ,  $R_E = 3.9k\Omega$ ,  $R_C = 6.8k\Omega$  y  $\beta = 100$ , determine el punto de operación de cada transistor.

b) Dibuje el circuito equivalente a pequeña señal de todo el amplificador y dé los valores de todos sus componentes. Ignore  $r_{o1}$  y  $r_{o2}$ .

c) Calcule  $R_{en1}$  y  $v_{b1}/v_{señal}$  para  $R_s$  de  $5k\Omega$

d) Obtenga  $R_{en2}$  y  $v_{b2}/v_{b1}$

e) Para  $R_L = 2k\Omega$ , determine  $v_o/v_{b2}$

f) Calcule la ganancia de voltaje total  $v_o/v_{señal}$

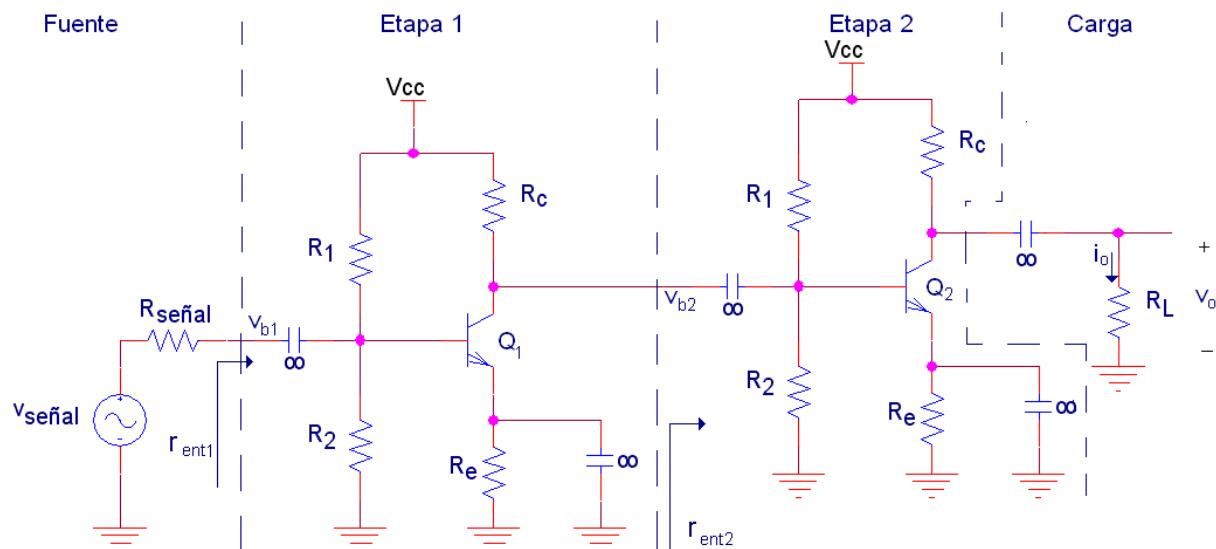


FIGURA 81. Circuito para el problema 2.

PROBLEMA 134. Para el circuito de la figura 3, encuentre  $I_E$  en función de  $I_B$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$ .

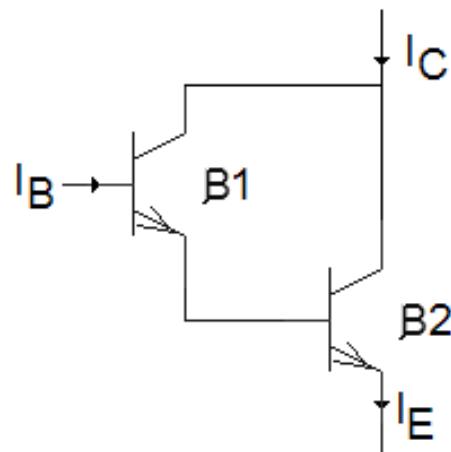


FIGURA 82. Circuito para el problema 3.

PROBLEMA 135. Para el circuito de la figura 4, encuentre  $I$  en función de  $I_X$  y calcule su valor.

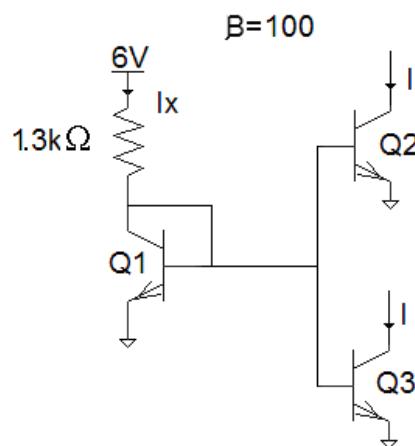


FIGURA 83. Circuito para el problema 4.

**PROBLEMA 136.** Considere el circuito de la figura 5.  $V_{CC} = 20V$ ,  $RC = 2.2k\Omega$ ,  $R_1 = 390k\Omega$ ,  $R_E = 1.2k\Omega$ ,  $\beta = 140$ ,  $r_o$  tiende a infinito.

- Encuentre el punto de operación del transistor:  $I_B$ ,  $I_E$ ,  $V_{CE}$
- Encuentre el equivalente de pequeña señal del circuito y los valores de los parámetros de pequeña señal
- Encuentre la expresión para la ganancia de tensión del amplificador y su valor

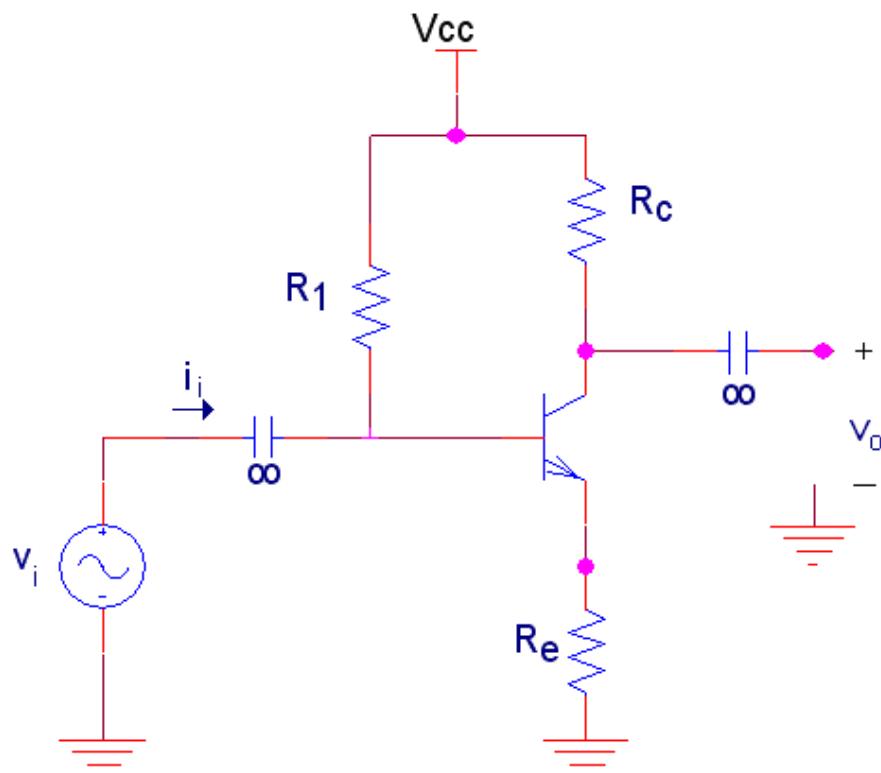


FIGURA 84. Circuito para el problema 5.

PROBLEMA 137. Considere el circuito amplificador de la figura 6. La tensión de entrada es una señal senoidal con valor promedio cero. Para el transistor mostrado,  $\beta=100$ .

a) Determine el valor de  $R_E$  para que la corriente de emisor en el punto de operación sea de  $0.5\text{mA}$ .

b) Calcule  $RC$  para establecer un voltaje de colector de aproximadamente  $5\text{V}$  en el punto de operación.

c) Dibuje el equivalente de pequeña señal del circuito.

d) Para  $R_L = 10\text{k}\Omega$ , y una resistencia de salida del transistor  $r_o$  de  $200\text{k}\Omega$ , obtenga la ganancia de voltaje y la resistencia de salida del circuito.

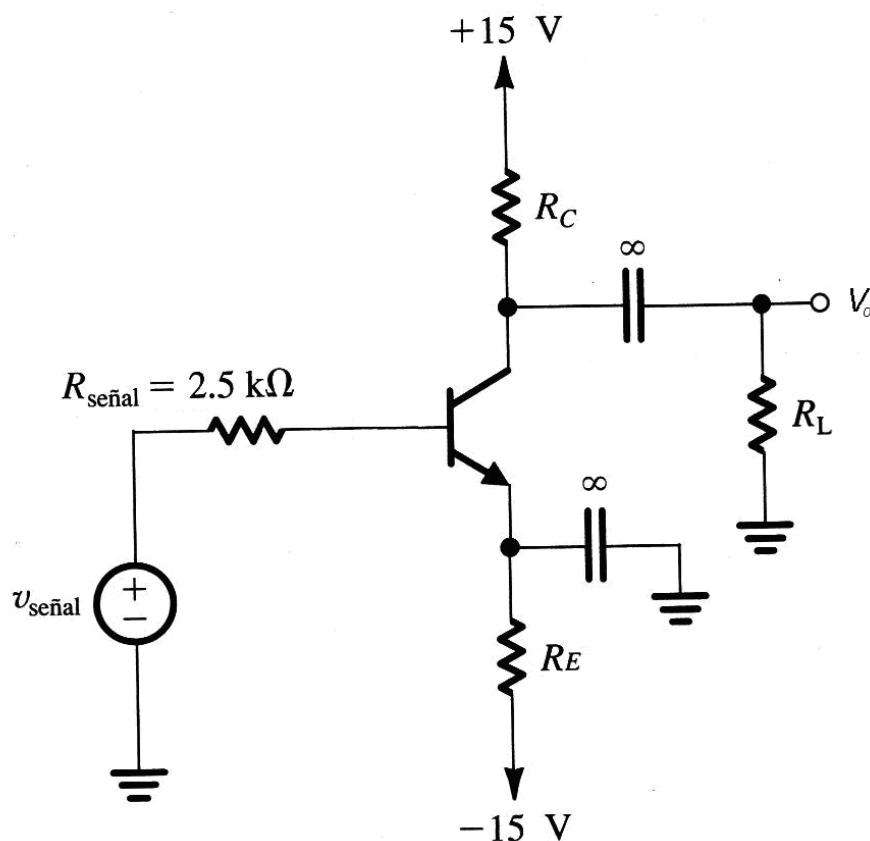


FIGURA 85. Circuito para el problema 6.

PROBLEMA 138. Considere el circuito amplificador de la figura 7a. La tensión de entrada es una señal de corriente alterna con valor promedio cero y  $100\text{mV}$  de valor pico, como se muestra en la figura 7b. Para el transistor mostrado,  $\beta = 100$ ,  $VA = 145\text{V}$ . La resistencia  $RB1$  es de  $100\text{k}\Omega$ ,  $RB2$  es de  $50\text{k}\Omega$  y la tensión de alimentación es de  $5\text{V}$ .

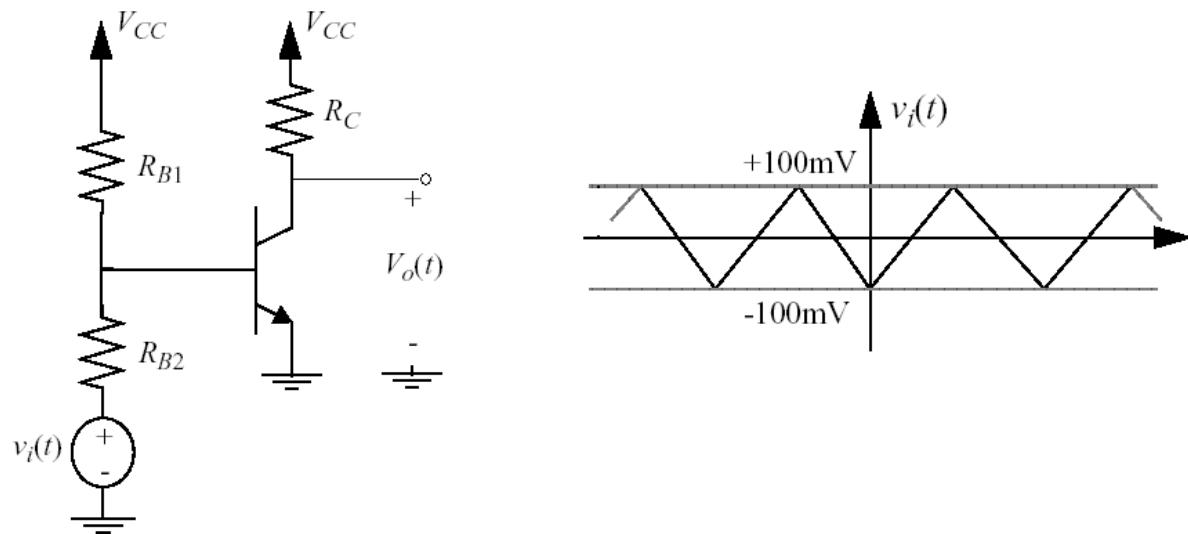


FIGURA 86. Circuito para el problema 7.

- Determine las condiciones que debe cumplir  $RC$  para que el circuito opere como amplificador.
- Dibuje el equivalente de pequeña señal del circuito.
- Si se fija  $RC = 1k\Omega$ , obtenga la ganancia de voltaje y la resistencia de salida del circuito.
- Dibuje la forma de onda de la tensión de salida del circuito, si se aplica la tensión de entrada mostrada en la figura 7b.



## Tutoría 15

**PROBLEMA 139.** Determine  $I_C$  y  $V_{CE}$  para los circuitos de las siguientes figuras usando  $\beta = 90$  y  $\beta = 135$ .

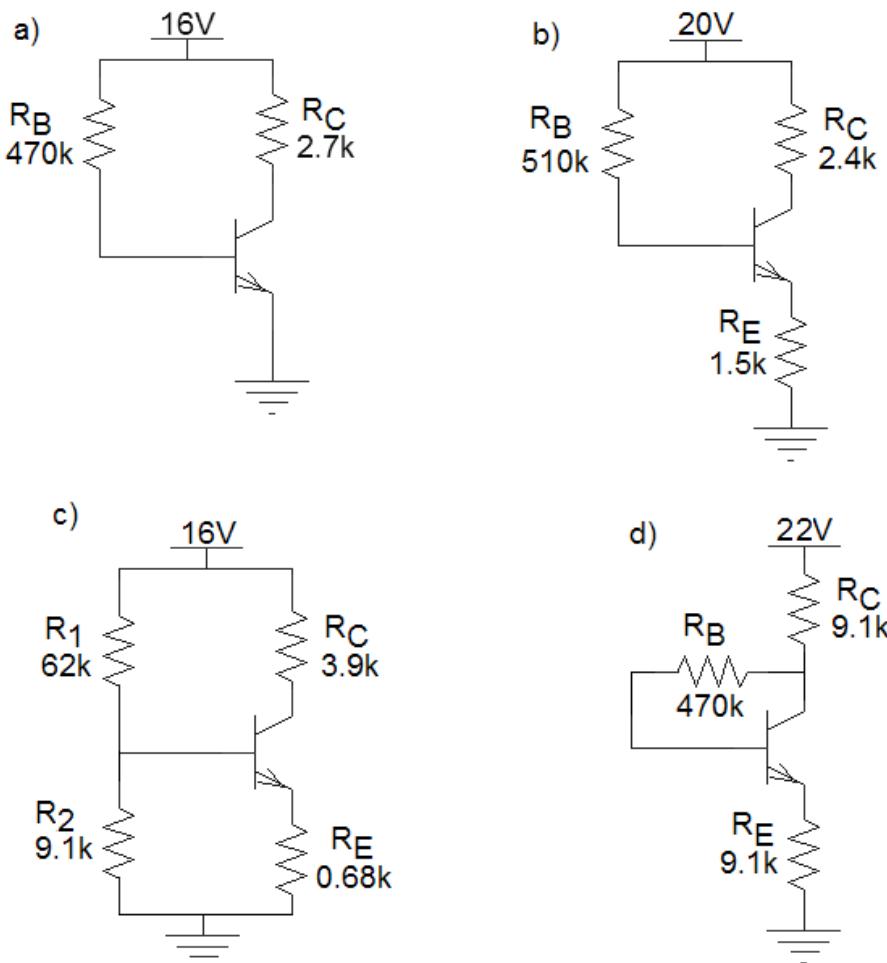


FIGURA 87. Circuito para el problema 1.

**PROBLEMA 140.** Para el siguiente circuito con  $\beta = 30$

- Encuentre los valores de  $V_B$ ,  $V_C$  y  $V_E$
- Si  $R_B$  se aumenta a  $270 k\Omega$  ¿Cuáles son los nuevos valores de tensiones?
- Con qué valor de  $\beta$  se obtendría de nuevo las tensiones calculadas en el punto a)?

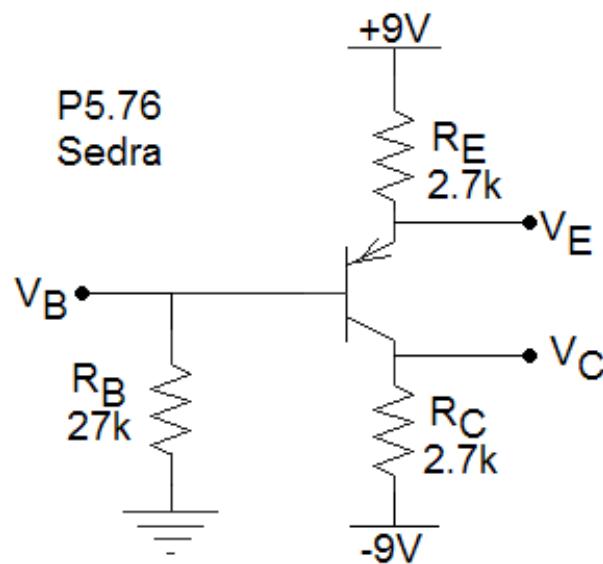


FIGURA 88. Circuito para el problema 2.

PROBLEMA 141. Encontrar las tensiones de los nudos señalados y las corrientes de cada rama del siguiente circuito. Asuma  $\beta = 100$  y  $|V_{BE}| = 0.7V$

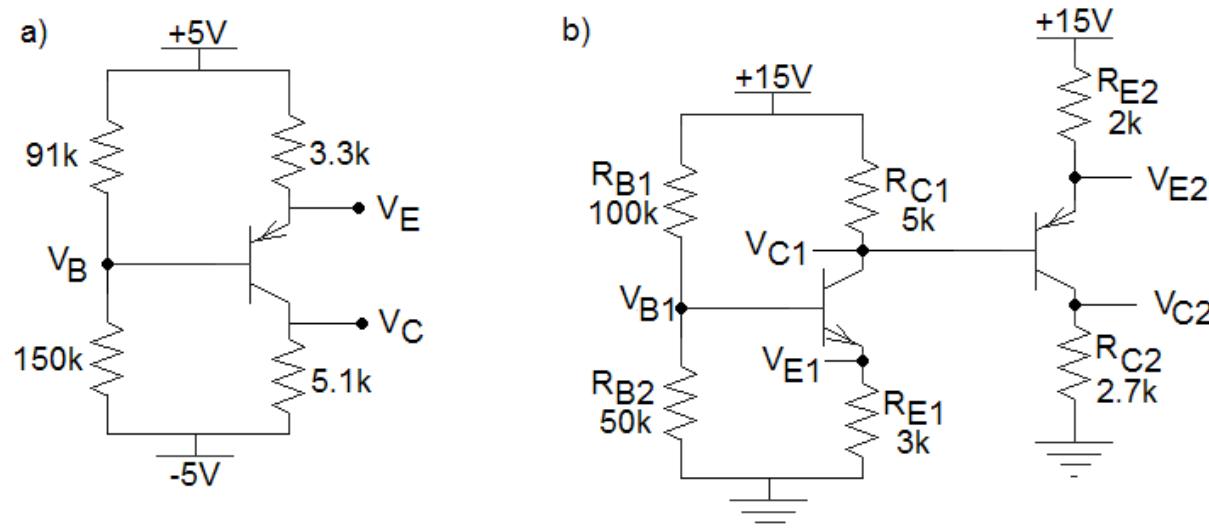


FIGURA 89. Circuito para el problema 3.