
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica

EL-2207 Elementos Activos

Profesores: Dr. Juan José Montero Rodríguez
Dr. Alfonso Chacón Rodríguez
M.Sc. Aníbal Ruiz Barquero
M.Sc. Daniel Kohkemper Granados

I Semestre 2020

Práctica I

15 de junio 2020

| | |
|-------------------|----|
| Total de Puntos: | 57 |
| Puntos obtenidos: | |
| Porcentaje: | |
| Nota: | |

Nombres:

Carné: _____
Carné: _____

Instrucciones Generales:

- Resuelva esta práctica en forma ordenada y clara.
- La práctica se puede resolver en **parejas**.
- La práctica debe ser entregada el **viernes 26 de junio de 2020 antes de las 4:30 p.m.**
- Cada problema en el que se le pida usar LTSpice implica que usted además incluya dos archivos por problema: un archivo *.asc de su simulación (incluyendo aquellos modelos necesarios para la simulación misma) y un archivo *.plt que invoque de manera automática las curvas a visualizar. El archivo *.asc deberá tener los comandos necesarios de SPICE para que el profesor solo deba ejecutar la simulación desde el simulador para observar los resultados.
- En el caso de problemas resueltos con Octave o Python, es obligatorio presentar el código en un archivo de texto, listo para ejecutar (con todas las bibliotecas y dependencias resueltas). En caso de usar el ambiente Jupyter para Python, puede presentarse el cuaderno ipynb respectivo.
- Debe enviar la práctica por correo electrónico a su profesor del curso, en un único documento PDF que incluya todos los problemas, código fuente y gráficas que se le solicitan. Además un archivo .zip que contenga únicamente los archivos para LTSpice, Python o de Octave mencionados anteriormente.

| | |
|-----------------|------|
| Respuesta Corta | de 5 |
| Problema 1 | de 5 |
| Problema 2 | de 5 |
| Problema 3 | de 5 |
| Problema 4 | de 5 |
| Problema 5 | de 5 |
| Problema 6 | de 5 |
| Problema 7 | de 5 |
| Problema 8 | de 5 |
| Problema 9 | de 5 |
| Problema 10 | de 7 |

Respuesta corta

5 Pts

Escriba sobre las líneas que se le ofrecen, lo que se le solicita en cada caso. Encontrará todas las respuestas correctas dentro de las palabras sugeridas pero no deberá utilizarlas todas, las respuestas no pueden repetirse. La respuesta por ítem requiere de como máximo dos palabras para ganar 1 punto. Son un total de 10 ítems.

Palabras sugeridas: igual, movilidad, velocidad, colisiones, impurezas, proporcional, menor, semiconductor, conductor, aislante, valencia, conducción, electrones, huecos, mayoritarios, dopado, intrínseco, conductancia, extrínseco, físicas, semiconductor, compensación, ocupada, desocupada, tránsito, donadores, aceptores, portadores, diodos, minoritarios, N, P, vaciamiento, discontinuo, pequeña, gran, juntura, directa, inversa, longitud, ancho, inyección, colisión, saturación, equilibrio, despreciable, concentración, temperatura, ruptura, conductancia, dinámica, estática, pequeña, gran, positivos, negativos, neutros, acumulada, capacitancia.

1. En el caso de un sustrato P, los portadores en inversión serán _____. 0.5 Pts
2. Una forma de describir en estado puro a un semiconductor es decir que el semiconductor es _____. Y cuando no es puro se dice que es _____. 0.5 Pts
3. La ley de la juntura dice que la concentración de _____ se puede hallar multiplicando la concentración de _____ al otro lado de la juntura por el factor exponencial del cociente del potencial de la juntura sobre la tensión térmica. 0.5 Pts
4. La capacidad o capacitancia en _____ es llamada de difusión y depende en gran medida de variables _____ del diodo. 0.5 Pts
5. Para el diodo, el modelo lineal incremental o simplemente modelo lineal permite determinar la _____ dinámica en región activa directa para utilizar en _____ señal. 0.5 Pts
6. En un material aislante la banda conducción está completamente _____ y la banda de valencia está completamente _____. 0.5 Pts
7. En un semiconductor puro, la vibración térmica permite a los electrones ocasionalmente pasar de la banda de _____ a la banda de _____. 0.5 Pts
8. De acuerdo a la ley de acción de masas para un _____ intrínseco la cantidad de electrones es _____ a la cantidad de huecos. 0.5 Pts
9. En un material semiconductor dopado con impurezas aceptoras, los portadores _____ son mayoritarios y los portadores _____ son minoritarios. 0.5 Pts
10. La movilidad de electrones y de huecos no es constante, varía en términos del dopado de la muestra de Silicio. A mayor concentración de impurezas, mayor probabilidad de _____ y menor _____ de portadores. 0.5 Pts

Problemas

52 Pts

Problema 1. Semiconductores: Fundamentos

5 pts

La concentración intrínseca de portadores del silicio a temperatura ambiente tiene un valor aproximado de $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ considerando equilibrio térmico. La ecuación que relaciona $n_i(T)$ se encuentra en [1]. Consulte además el programa de ejemplo mostrado en [2].

1. Escriba un programa de computación que le permita obtener una gráfica de $n_i(T)$ para el silicio, germanio y GaAs. La gráfica debe ser semilogarítmica, el eje logarítmico es el vertical. Puede utilizar Octave, MATLAB, python o cualquier otro lenguaje de programación, siempre y cuando incluya el código fuente y una captura de pantalla del resultado. Rotule los ejes mediante código e incluya las unidades de cada eje. (3 pts)
2. Señale en la gráfica las concentraciones intrínsecas de portadores a temperatura ambiente. Rotule los puntos mediante código. Compare los valores obtenidos con los que se encuentran disponibles en la literatura. (1 pt)
3. Marque ahora en la gráfica por medio de código, a qué temperatura el germanio y el GaAs presentan una concentración intrínseca comparable a $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Indique los valores de temperatura obtenidos. (1 pt)

[1] Julián, Pedro (2013). Dispositivos semiconductores: principios y modelos, 1ra edición, p. 28., Alfaomega, ISBN 978-8426722065.

[2] Pierret, Robert F. (1996). Semiconductor Device Fundamentals, 2nd edition, pp. 55-57., Addison-Wesley, ISBN 978-0201543933.

Problema 2. Semiconductores: Difusión y Arrastre

5 pts

En un semiconductor en equilibrio, se sabe que la corriente de arrastre y la corriente de difusión son iguales, de manera que la corriente total es cero. Sin embargo, se conoce de antemano que la concentración de portadores varía de acuerdo con la siguiente ecuación exponencial:

$$N_D(x) = N_0 \cdot e^{-x/K}$$

Donde los extremos de la barra son $x_0 = 0$ y $x_1 = 10 \text{ } \mu\text{m}$.

Las constantes son $N_0 = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ y $K = 11.9682 \text{ m}$.

1. Determine una ecuación algebraica para la densidad de corriente de difusión J_{diff} en función de la posición x . (1 pt)
2. Si la densidad de corriente de difusión es igual a la densidad de corriente de arrastre en toda la barra, encuentre una ecuación para el potencial en función de la posición x . Para ello debe integrar el potencial por separación de variables. (2 pts)
3. A partir de la ecuación anterior, encuentre el potencial que se mediría con un voltímetro entre los extremos de la barra. (1 pt)
4. Determine la magnitud y dirección de la densidad de corriente de arrastre y la densidad de corriente de difusión en el centro de la barra, es decir, en $x = 5 \text{ } \mu\text{m}$. (1 pt)

Problema 3. Semiconductores: Dopado

5 pts

En una oblea de silicio de tipo p se tiene una concentración de átomos dopantes $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. El nivel de Fermi se mueve mediante compensación hasta que se logra establecer E_F a una distancia de 400 meV por encima del nivel de Fermi intrínseco. Considere que la oblea está en equilibrio térmico a 300 K.

1. Determine el dopado efectivo N_{Def} y la concentración de átomos dopantes donadores N_D que se tuvo que agregar para lograr la condición descrita en el enunciado. (1 pt)
2. Dibuje a escala el diagrama de bandas del silicio antes y después de realizar la compensación. Puede utilizar una regla donde $1 \text{ cm} = 1 \text{ eV}$. El dibujo debe mostrar la posición de E_{vac} , E_C , E_V , E_i y E_F , e indicar los valores de χ y ϕ_S . (3 pt)
3. Determine la concentración máxima de átomos dopantes donadores que se podrían agregar a la oblea original, si se quiere que el silicio siga siendo un material no degenerado (es decir, $E_C - E_F > 3kT$). (1 pts)

Problema 4. Contactos M-S

5 pts

Los parámetros más importantes de un diodo Schottky son el potencial de contacto V_{bi} y la barrera Schottky ϕ_B . Estos parámetros dependen del metal elegido para fabricar el dispositivo, y del nivel de dopado del semiconductor. La teoría y ejemplos de este tipo de contactos está en [3].

Para construir un diodo Schottky, usted dispone de tres metales: aluminio ($\phi_M = 4.08 \text{ eV}$), cobre ($\phi_M = 4.7 \text{ eV}$) y estaño ($\phi_M = 4.42 \text{ eV}$). Además tiene silicio ($\chi = 4.05 \text{ eV}$) y como dopante se tiene únicamente de arsénico.

1. Si la concentración de dopado debe ser de al menos 10^{13} cm^{-3} , seleccione el metal para la construcción de su diodo. (2 pts)
2. Determine la concentración de dopado necesaria para que el potencial de contacto tenga un valor de exactamente $V_{bi} = 0.3 \text{ V}$. (3 pts)

[3] Pierret, Robert F. (1996). MS Contacts and Schottky Diodes. In *Semiconductor Device Fundamentals*, 2nd edition, pp. 477-487., Addison-Wesley, ISBN 978-0201543933.

Problema 5. Unión P-N

5 pts

Dada una juntura PN de silicio dopado no-degeneradamente, a temperatura ambiente ($T=300 \text{ K}$), y excitada por un diferencial de potencial V_A , tal como la de figura 1:

1. Construya un programa en Octave o Python (se recomienda usar cuadernos Jupyter para Python, y las bibliotecas Numpy y Matplotlib de Python) que calcule y grafique el campo eléctrico \vec{E} y el potencial electrostático ϕ en la juntura como función de la posición x . Utilice los siguientes valores de dopado: $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. El programa debe trazar las curvas en un solo gráfico respectivo para \vec{E} y ϕ , para seis valores de V_A : -20 V , -10 V , $-5,0 \text{ V}$, $-2,5 \text{ V}$, 0 V , 0 V). El programa además debe entregar los valores de N_A , N_D , x_n , x_p , $W = x_n - x_p$ (largo total de la zona de vaciamiento), \vec{E} , y ϕ para $x=0$. Para ajustar los límites de los ejes tome las siguientes consideraciones: para el eje y , considere los límites

$(\vec{E}_{min}, 0)$, y $(0, \phi_{max})$, donde $\vec{E}_{min}=1,1\vec{E}(0)$, y $V_{max}=1,1(\phi_B - V_A)$; para el eje x , utilice $(-x_{max}, x_{max})$, $x_{max}=2,5MAX(x_n, x_p)$, con MAX una función que encuentre el máximo de dos valores.

Suponga que los contactos óhmicos son ideales ($R=0\Omega$). (3 pts)

2. Modifique el programa para que grafique \vec{E} y ϕ para $V_A = -20\text{ V}$, pero ahora para estas combinaciones de dopado (N_D, N_A) : $(10^{17}\text{cm}^{-3}, 10^{15}\text{cm}^{-3})$, $(10^{16}\text{cm}^{-3}, 10^{15}\text{cm}^{-3})$, $(10^{15}\text{cm}^{-3}, 10^{15}\text{cm}^{-3})$, $(10^{15}\text{cm}^{-3}, 10^{16}\text{cm}^{-3})$, $(10^{15}\text{cm}^{-3}, 10^{17}\text{cm}^{-3})$, $(10^{18}\text{cm}^{-3}, 10^{16}\text{cm}^{-3})$, $(10^{16}\text{cm}^{-3}, 10^{14}\text{cm}^{-3})$. Comente sobre los resultados para cuando $N_D \geq 100N_A$, o $N_A \geq 100N_D$. (2 pts)

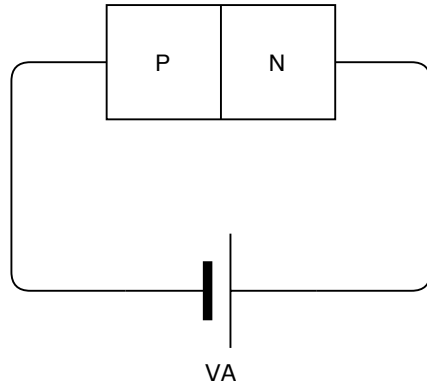


Figura 1: Unión PN. Note que la fuente ya está conectada en inversa.

Problema 6. Unión P-N

5 pts

Se tiene una unión N^+P , de una longitud suficientemente corta para poder aplicar la ecuación ideal del diodo derivada en clase, y de un área transversal de $A=10^{-3}\text{cm}^2$, tal que se cumplen las ecuaciones (3.119) y (3.120) de [4]. Si $N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y el tiempo de transición $\tau_n=10^{-6}\text{s}$, construya un programa Octave o Python (se recomienda usar cuadernos Jupyter para Python, y las bibliotecas Numpy y Matplotlib de Python) que grafique la corriente por el diodo en función de V_A , para T igual a 250 K, 300 K, 350 K y 400 K. Las curvas deben trazarse sobre un mismo gráfico. Use como límites $-5\text{ V} \leq V_A \leq 0,15\text{ V}$ para el eje x , y para $-1,0I_S \leq I \leq 5I_S$, para el eje y con I_S la corriente de saturación en reversa del diodo. Suponga que $\mu_n(T=300)$ es $1345\text{cm}^2/\text{Vs}$. Ajuste para la temperatura según la ecuación (2.43) de [4]. Suponga también que τ_n no es función de la temperatura.

[4] Julián, Pedro (2013). Dispositivos semiconductores: principios y modelos, 1ra edición, p. 28., Alfaomega, ISBN 978-8426722065.

Problema 7. Capacidad de Vaciamiento

5 pts

Se toman los siguientes datos de la Tabla 1 en un diodo Schottky a 1 kHz, en donde el área del contacto es un cuadrado con $A = 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$. Se recomienda el uso de Excel, Octave/Matlab o Python para la tabulación y cálculos con los datos.

Tabla 1: Mediciones de capacitancia a diferentes tensiones.

| V_A [V] | C [pF] |
|-----------|----------|
| -6 | 0,6215 |
| -5 | 0,6756 |
| -4 | 0,7469 |
| -3 | 0,8469 |
| -2 | 1,0020 |
| -1 | 1,2940 |

1. Determine el valor de V_{bi} . (3 pts)
2. Determine el valor de N_A . (1 pto)
3. Determine el valor de N_D . (1 pto)

Problema 8. Unión P-N

5 pts

Considere el diagrama de bandas de la figura 2 para una unión PN dada a temperatura ambiente. Los círculos rellenos de color negro, representan electrones y los círculos sin relleno y de color gris, representan huecos. Se sabe que $E_i - E_F = E_G/4$ en $X = -L$; $E_F - E_i = 0$ en $X = 0$ y que $E_F - E_i = E_G/4$ en $X = L$. Además considere que el nivel de Fermi está definido únicamente para condiciones de equilibrio.

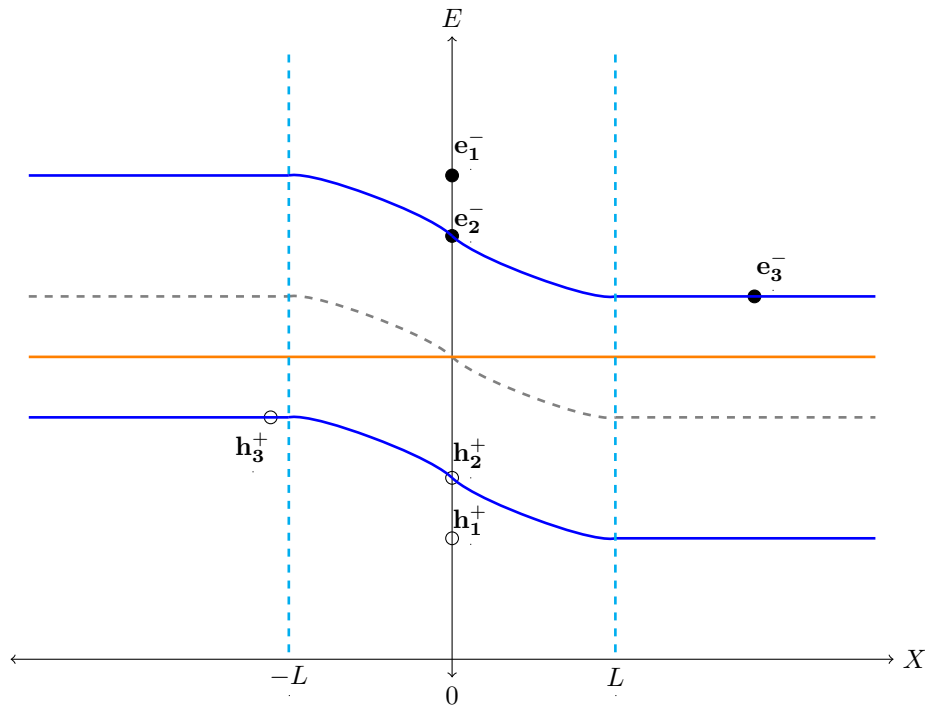


Figura 2: Diagrama de bandas de una unión PN.

Dicho lo anterior:

1. Rotule correctamente, la banda prohibida, la banda de conducción y la banda de valencia. Además señale en el diagrama, de que lado se encuentra el material P y de que lado se encuentra el material N. (1 pt)
2. Esboce el potencial eléctrico y el campo eléctrico, en ambos casos señale los valores de posición proporcionados en el gráfico. (1 pt)
3. Tomando como referencia el nivel de Fermi, determine la energía potencial y cinética para $e_1^-, e_2^-, e_3^-, h_1^+, h_2^+$ y h_3^+ en terminos de E_G . Indique sus unidades. (3 pt)

Problema 9. Limitador de tensión eléctrica (SPICE)

5 pts

Los circuitos limitadores con diodos son circuitos que se pueden utilizar para evitar saturar etapas de recepción de señales. Normalmente el circuito es definido a partir de su función de transferencia, la cual determina el comportamiento deseado para limitar a la señal de entrada de un receptor. La figura 3 es una función de transferencia dada para este problema.

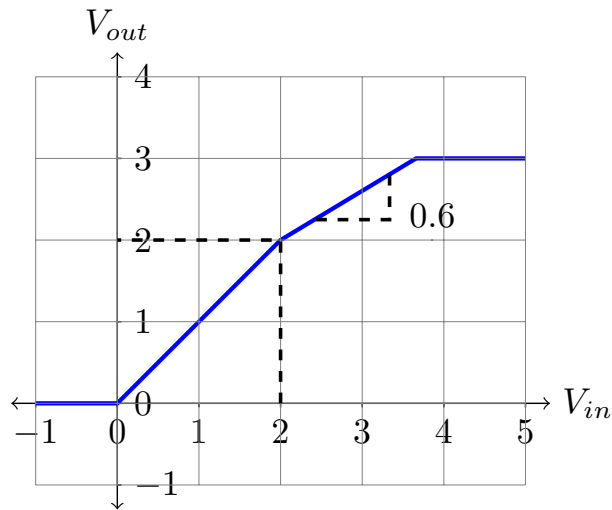


Figura 3: Función de transferencia del circuito limitador a diseñar.

Considerando que:

1. La salida debe ser nula para valores negativos de tensión de entrada.
2. Los diodos no deben operar en directa a más de $I_{D_{máx}} = 50 \text{ mA}$.
3. El circuito emisor de señal no puede enviar señales con una amplitud mayor a $V_{IN_{máx}} = 25 \text{ V}$.

Dicho lo anterior:

1. Diseñe y compruebe en LTSpice un circuito limitador con únicamente diodos de silicio con tensión de encendido $V_{D_{ON}} = 1 \text{ V}$, de forma tal que cumpla con las especificaciones de transferencia dada en la figura 3. De ser necesario diseñe su propio modelo de diodo en LTSpice. (2 pts)

2. Adjunte la simulación en LTSpice de la tensión en la salida del circuito (sin carga) para un barrido de tensión de entrada entre $V_{IN} = -6\text{ V}$ y $V_{IN} = 6\text{ V}$. (1 pts)
3. Diseñe y compruebe en LTSpice un circuito que cumpla con la misma función de transferencia solicitada, puede utilizar los mismos diodos del primer punto pero debe utilizar al menos un diodo Zener. Adjunte todos los archivos de simulación como se describe en las instrucciones. (2 pts)

Problema 10. Rectificador y regulador de tensión eléctrica (SPICE)

7 pts

Algunos dispositivos electrónicos tales como computadores, celulares, dispositivos bluetooth, entre otros; requieren de valores de tensión fijos para su correcta operación. Para lo cual se diseñan fuentes de alimentación como la que se muestra en la figura 4.

Considerando que:

1. La fuente de alimentación funciona correctamente hasta la etapa de entrada del regulador de tensión dando 4 V en corriente directa y ofrece un rizado que no es mayor a 200 mV (5 %).
2. La entrada de la fuente (V_{IN}) es de 120 V a 60 Hz .
3. Para el regulador de tensión por los diodos pasará una corriente de 6.5 mA @ $T = 300\text{ K}$.
4. La carga consume 21 mA @ $T = 300\text{ K}$.

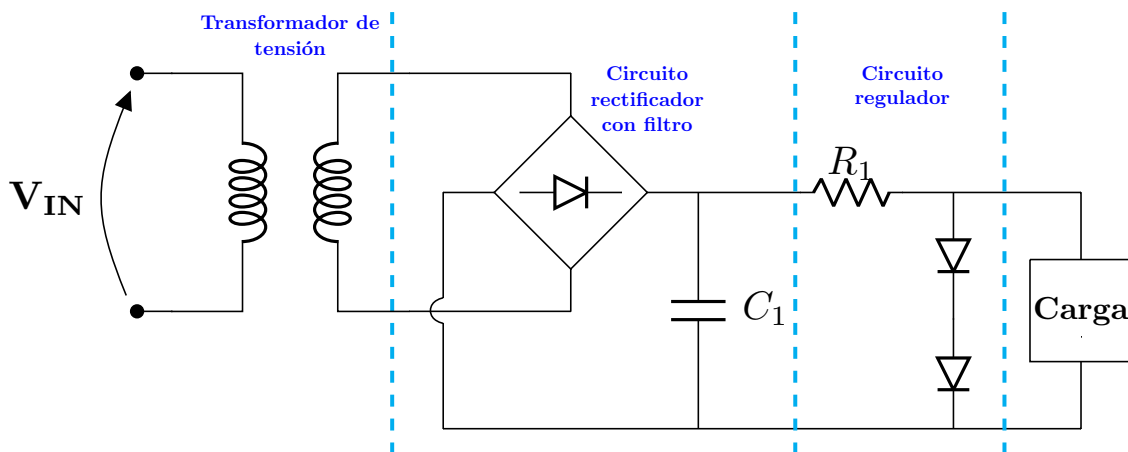


Figura 4: Fuente de alimentación para circuitos electrónicos con regulador de tensión.

Dicho lo anterior:

1. Diseñe y simule en LTSpice el circuito mostrado en la figura 4 hasta la etapa de filtrado del rectificador, de forma tal que logre obtener los mismos resultados del diseño descrito arriba (Sin el regulador). Puede reutilizar lo hecho en la primera tarea y reajustarlo de ser necesario. Adjunte todos los archivos de simulación como se describe en las indicaciones y no olvide señalar el valor de su capacitor y los diodos utilizados en su puente de diodos. (2 pts)

2. Diseñe el regulador de tensión utilizando algún diodo real de silicio (sugerido: 1N4148). Considere que R_1 debe de ser al menos 200 veces el valor de $2 * r_d$ de los diodos utilizados y trabajando en el punto de operación más crítico indicado en su hoja de datos (cuide que el circuito cumpla con las exigencias de corriente). Recuerde que el valor de tensión de salida de su regulador dependerá de su elección de diodos. Adjunte en su solución todos los cálculos realizados (R_1 , diodo escogido, tensión de salida, etc). (2 pts)
3. Para su diseño (punto anterior) determine la tensión a través de los diodos del regulador si la carga incrementa su consumo a 23mA. Adjunte sus cálculos en la solución. (2 pts)
4. Conecte ambas etapas en LTSpice y asegúrese de que el valor de salida, sea la tensión calculada en el diseño realizado por usted. Puede reajustar sus cálculos de ser necesario, pero los debe justificar en su solución. Adjunte todos los archivos de simulación como se describe en las instrucciones. (1 pt)