Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica
IEE2413 – Electrónica

Interrogación 2 - Total 50 Puntos
Captain Alan Brito: Civil War

Escriba sus respuestas en expresiones de baja entropía. Si para responder alguna de las preguntas necesita el resultado de una pregunta anterior que no ha podido responder, asuma una respuesta genérica (e.g., V en el caso de un voltaje, R en el caso de una resistencia, etc.). **Sólo se aceptarán preguntas de enunciado a viva voz y rige tanto el Código de Honor UC como las reglas de entrega del curso.**

- **WARNING 0: Póngale nombre a todas sus hojas de desarrollo.**
- **WARNING 1: Respalde sus respuestas con los cálculos o conceptos que correspondan; de no hacerlo o haber respuestas mágicas, no tendrá todo el puntaje tras la corrección de los ayudantes.**
- **WARNING 2: Explicite sus aproximaciones en su desarrollo. Los ayudantes no son adivinos.**
- **WARNING 3: Preocúpese de que la letra de la interrogación sea legible para la postcorrección. Un ayudante que corrige contento, corrige mejor, y en otro caso habrá descuento de nota.**
- **WARNING 4: Sólo puede usar formulario de elaboración propia y calculadora científica. Está estrictamente prohibido el uso de celulares, Solvers y cualquier otra herramienta no autorizada explícitamente para resolver problemas.**

P1: Tic-Tac (10 puntos)

Alan Brito Delgado, en sus tiempos de estudiante, elaboró un circuito que acorde a sus notas definió como **Temporizador de Alimentación**.

El circuito se presenta a continuación:

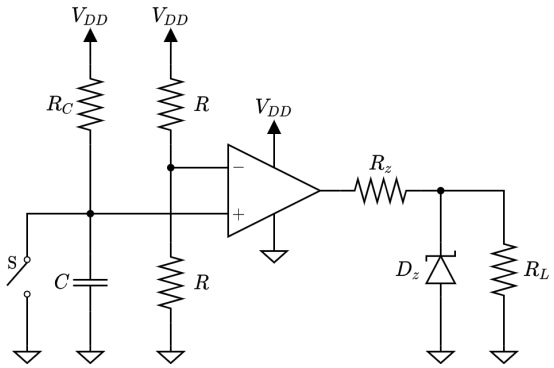


Figura 1: Circuito del problema 1.

Las características de los componentes son:

- Comparador Ideal
- D_z, es un diodo zener de 5[V] en polarización inversa, y 0.7[V] en polarización directa.
- S es un switch ideal, inicialmente cerrado y en t = 0 se abre.
- $V_{DD} = 20[V]$
- $R = 15[k\Omega]$; $R_c = 10[k\Omega]$; $R_z = R_L = 2[k\Omega]$
- $C = 1[\mu F]$, inicialmente descargado.

El nombre del circuito es bastante interesante para aplicaciones de control de cargas en un laboratorio pues de buenas a primeras pareciera que sólo necesita una fuente de alimentación para fijar voltajes en la carga dependiendo únicamente del diodo zener que se use. El problema es que como no tiene explicación de funcionamiento es arriesgado usarlo sin entenderlo. Es por lo anterior, que se le solicita a usted analizarlo.

A continuación, responda las siguientes preguntas:

1. Explique como funciona el circuito en conjunto una vez que el switch se abre en $t = 0$, y cómo es que se da la temporización. Sea explícito en la operación del comparador y su dependencia en V_{DD}, R, R_c y C; el estado de conducción del diodo zener y el voltaje que aparece en la carga.
2. Esboce las formas de onda de voltaje que se observaría en el capacitor C, a la salida del comparador y en la carga, desde que el switch se abre en t = 0 y hasta un tiempo razonable de establecimiento del circuito.
3. Encuentre una expresión generalizada para el tiempo de temporización del circuito, y luego calcule ese tiempo para los valores de componentes definidos en el circuito.
4. Asumiendo que C es un capacitor variable, ¿Cuánto debería ser su valor, si con la misma resistencia R_c necesitamos un tiempo de temporización de 20 [ms]?

Pauta P1

① Revisemos el circuito.

En el terminal inversor del comparador hay un divisor resistivo dado por las resistencias iguales R, por lo que aparece un voltaje $\frac{V_{DD}}{2}$ que corresponde a nuestro umbral de comparación.

Si $V_+ < \frac{V_{DD}}{2}$, la salida del comparador es 0 (tierra)

$V_+ > \frac{V_{DD}}{2}$, la salida del comparador es V_{DD}

En el terminal V_+, tenemos un circuito R_C-C. El capacitor inicialmente descargado fuerza y el switch cerrado fuerza $V_+ = 0$

↳ Antes de abrir el switch el comparador tiene salida tierra.

Al abrir el switch, el capacitor comenzará a cargarse desde 0 y hasta V_{DD} con una constante de tiempo RC, sin embargo al alcanzar el valor $\frac{V_{DD}}{2}$ forzará el cambio de estado del comparador de 0 a V_{DD}.

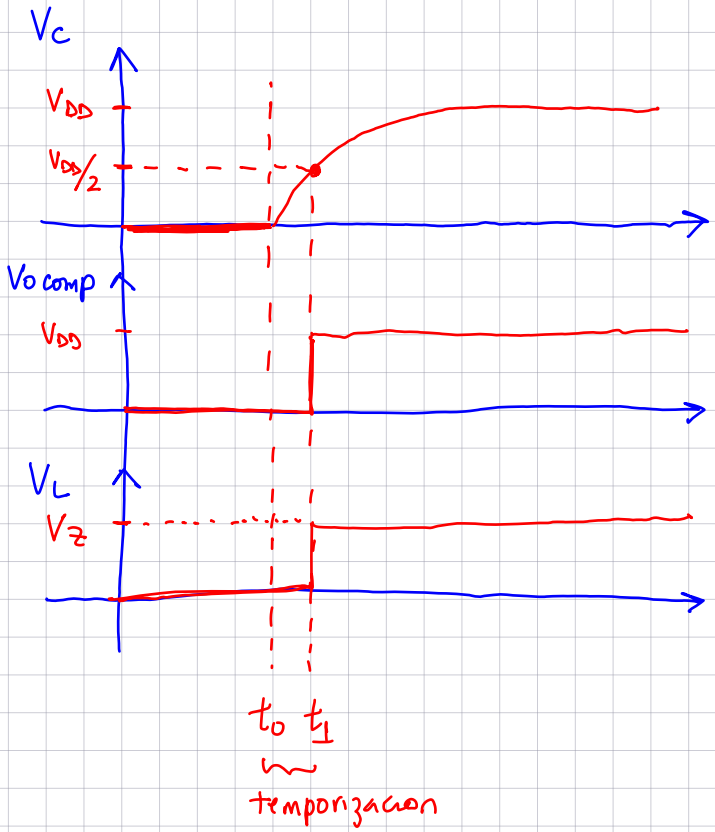
* Si la salida del comparador es 0, el diodo zener no puede conducir por lo que la carga no será alimentada.
* Si la salida del comparador es V_{DD}, el diodo zener conduce de forma inversa fijando su voltaje zener en la carga

⇒ Esto implica que la carga no es alimentada sino hasta que transcurra el tiempo necesario para que C alcance el voltaje $\frac{V_{DD}}{2}$

↳ Temporizador de Alimentación

* El sistema se resetea si el switch se vuelve a cerrar!

(2) Esbozamos las formas de onda:



(3) El tiempo de temporización está dado por el tiempo que le toma al capacitor cargarse desde 0 hasta $V_{DD}/2$

$$\text{L} \quad V_c(t) = V_{c(0)} + \left(V_{c(\infty)} - V_{c(0)}\right)\left(1 - e^{-t/R_c C}\right)$$

$$\frac{V_{DD}}{2} = 0 + \left(V_{DD} - 0\right)\left(1 - e^{-t/R_c C}\right)$$

$$\text{L} \quad t_{temp} = R_c C \ln(2) \Rightarrow 6.93 \text{ msec.}$$

(4) Si fuerzo un $t_{temp} = 20$ ms con la misma R_c, debemos cambiar el capacitor

$$\text{L} \quad C = \frac{t_{temp}}{R_c \cdot \ln(2)} = \frac{20 \text{ ms}}{10\text{k}\Omega \cdot \ln(2)} = 2.88 \ \mu\text{F}.$$

P2: El Clásico (15 puntos)

Considere el circuito que se presenta a continuación:

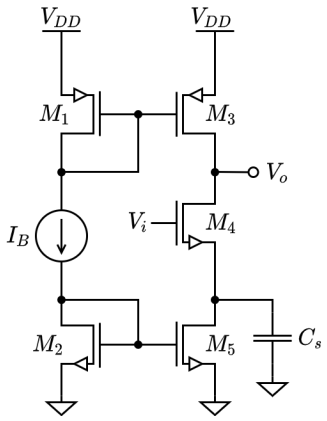


Figura 2: Circuito Amplificador con múltiples transistores.

Del circuito se sabe que:

- Los transistores tienen $|V_{th}| = 0.7[V]$, $|V_A| = 100[V]$, y constante de fabricación $\mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} = 8\frac{mA}{V^2}$
- $I_B = 1[mA]$, $V_{DD} = 5[V]$ y C_s es un capacitor muy grande.
- V_i es una señal compuesta de una parte DC (V_{DC}) y una parte de pequeña señal AC (v_{ac}).

A continuación:

1. Determine la función de cada uno de los dispositivos del circuito (Espejo-Diodo, Espejo-Reflejador, Amplificador, Polarización o Carga Activa) y el tipo de amplificador (CS, CS-Deg, CG o CD) que resulta con esta topología. **Nota: Es posible que un transistor cumpla más de una función en un circuito... ¿quién polariza acá?.**
2. Determine la corriente I_D y V_{GS} en gran señal para cada transistor. Para este inciso puede usar las aproximaciones que considere razonables y necesarias.
3. Dibuje el circuito equivalente en pequeña señal del circuito completo **con el mínimo de componentes posibles** e indique los valores de g_m y r_o de los transistores según éstos sean necesarios en la linealización.
4. Determine la resistencia de entrada, vista desde V_i hacia el amplificador.
5. Determine la resistencia de salida, vista desde V_o hacia el amplificador.
6. Determine la ganancia del circuito $\frac{V_o}{V_i}$ en la banda pasante.
7. **No Trivial por 2 puntos bonus** - Determine el rango de voltajes que puede tomar V_o de modo que todos los transistores se encuentren en región activa.
8. **No Trivial por 2 puntos bonus** - Determine el rango de voltajes que puede tomar V_i de modo que todos los transistores se encuentren en región activa.

1. SOLUCIÓN

- Los transistores M_1 y M_2 actúan en conjunto como espejos de corriente, haciendo de **Espejo-Diodo** dado que están conectados como diodos y siempre operarán en región activa. La fuente de corriente I_B establece la corriente en la rama, generando el voltaje V_{GS} necesario para copiar la corriente hacia los transistores M_3 y M_4 respectivamente. En consecuencia, también cumplen la función de **Espejo-Reflejador**.
- El transistor M_4 cumple la función de **amplificador**, dado que el capacitor C_S para frecuencias suficientemente altas se comportará como un cortocircuito conectando a tierra de señal el *source* del transistor.
- El transistor M_5 cumplirá con la función de **polarización**, dado que los espejos de corriente forzarán sobre este transistor su corriente y a la vez este impondrá su corriente en el *source* de M_3.
- El transistor M_3 se comporta como una fuente de corriente constante, de modo que en pequeña señal se verá como una resistencia de valor r_o. Esto corresponde a la función de una **carga activa**.

El tipo de amplificador del circuito a corresponde a un *common source* (CS) con degeneración, debido a la presencia del capacitor C_S.

2. SOLUCIÓN

Para esta parte se asumirá que todos los transistores están en región activa.

La fuente de corriente impone una corriente de 1 mA en los transistores M_1 y M_2. Recordando la ecuación de corriente de dren (I_D) en región activa, podemos determinar el voltaje entre *gate* y *source* (V_{GS}) necesario:

$$I_D = \frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_T\right)^2 \Longrightarrow 1 = \frac{1}{2}\cdot 8 \cdot \left(V_{GS} - 0.7\right)^2$$

Resolviendo la ecuación anterior obtenemos:

$$V_{GS} = 1.2 \text{ V}$$

Nota: en los transistores PMOS esta diferencia se mide respecto a V_{DD}, pero también tiene un valor absoluto de 1.2 V como se calculó recién.

Por otro lado, los transistores M_3 y M_5 comparten los nodos de *gate* y *source* con los transistores M_1 y M_2 respectivamente. En consecuencia, el voltaje V_{GS} será el mismo y. además, la corriente I_D también será la misma. Esto debido a que en región activa la corriente solamente depende de V_{GS}.

Por último, el transistor M_4 se encuentra polarizado por corriente debido al transistor M_5. Dado lo anterior, poseen la misma corriente I_D y el mismo voltaje V_{GS}.

3. SOLUCIÓN

Debido a que todos los transistores tienen los mismos parámetros, es decir, mismas corrientes I_D y mismos voltajes V_{GS}, es posible inferir que deberán también tener los mismos parámetros de pequeña señal:

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{ov}} = 4 \text{ mS}$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{V_A}{I_D} = 100 \text{ k}\Omega$$

Respecto al circuito mínimo de pequeña señal, se debe considerar que los transistores de espejo de corriente se pueden ignorar dado que sus corrientes y voltajes son únicamente DC. Por lo tanto, el circuito de pequeña señal pedido es el siguiente:

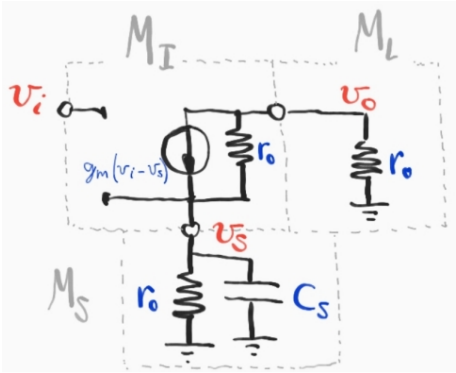


Figura 3: P2: Circuito mínimo de pequeña señal.

En la figura anterior considere que $M_L = M_3$, $M_I = M_4$ y que $M_S = M_5$.

4. SOLUCIÓN

Analizando el circuito de pequeña señal del circuito podemos notar que el voltaje de entrada v_i se aplica en el *gate* del transistor M_4, nodo que se observa como un circuito abierto.

Podemos concluir entonces que la resistencia de entrada R_{in} del circuito es infinita (circuito abierto).

Podemos llegar a este resultado también mediante el método de la fuente de prueba, conectando ya sea una fuente de corriente o voltaje al nodo de entrada (pero es más claro con una fuente de voltaje), y calcular la resistencia de entrada como:

$$R_{in} = \frac{V_T}{I_T}$$

Donde la corriente I_T deberá ser cero dado que la entrada se encuentra conectada a un circuito abierto (no circula corriente).

5. SOLUCIÓN

La resistencia de salida R_{out} se puede calcular como el paralelo entre r_o y la resistencia vista hacia R_x, que se observa en la siguiente figura:

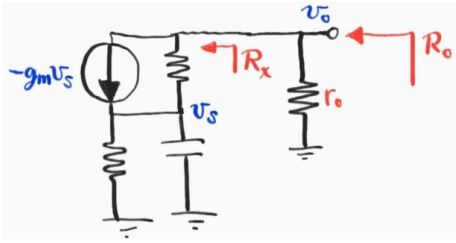


Figura 4: P2: Circuito de pequeña señal para calcular R_{out}.

La resistencia R_x se puede calcular utilizando el método de fuente de prueba. Luego, resolviendo las ecuaciones respectivas se tendrá que la resistencia de salida R_{out} es:

$$R_{out} = r_o || \left(r_o \cdot \frac{1 + g_m r_o + sC_S r_o}{2 + g_m r_o + sC_S r_o} \right) \approx \frac{r_o}{2}$$

El resultado anterior prácticamente no se ve afectado por el capacitor C_S a ninguna frecuencia.

6. SOLUCIÓN

Dado que se busca la ganancia en la banda pasante, podemos tomar el capacitor C_S en el circuito de pequeña señal y reemplazarlo por un cortocircuito. De este modo, el circuito se simplifica bastante y las ecuaciones necesarias para determinar la ganancia son sencillas.

$$\frac{0 - v_o}{r_o} = \frac{v_o - 0}{r_o} + g_m v_i \Longrightarrow \frac{2v_o}{r_o} = g_m v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m}{2} \cdot r_o$$

7. (BONUS) SOLUCIÓN

El límite superior de V_o se da cuando el transistor M_3 (considerar que es PMOS) entra a triodo, es decir:

$$V_{SD} > V_{ov} = V_{SG} - V_T$$

$$5 - V_o > 1.2 - 0.7$$

$$V_o < 4.5 \text{ V}$$

El límite inferior debe asegurar la misma condición para el transistor M_5 (considerar que es NMOS), entonces:

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

$$V_o - V_s > (V_i - V_s) - V_T$$

$$V_o > V_i - 0.7$$

Se puede notar de la última desigualdad que esta condición depende del voltaje de entrada, por lo que el rango de salida del amplificador se encuentra limitado por la entrada del circuito.

8. (BONUS) SOLUCIÓN

El transistor M_5, mientras se encuentre en región activa, va a asegurar que el transistor M_4 también lo esté. Por lo tanto, solamente hay que ver la condición para que el transistor M_5 esté en región activa.

Dado que en DC estos dos transistores tienen V_{GS} constante:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$V_i - 1.2 > 1.2 - V_T$$

$$V_i > 1.7 \text{ V}$$

El límite superior está dado por la intersección con V_o. Mientras mayor sea V_i, menor será la excursión de salida. En el extremo, tomando en cuenta la última desigualdad planteada en la pregunta anterior, tenemos que:

$$V_o^{max} > V_i - 0.7$$

$$V_i < 4.5 + 0.7 = 5.2 \text{ V}$$

Este voltaje es mayor que el de alimentación, ya que los NMOS pueden funcionar con voltaje de *drain* menor que su voltaje de compuerta (con hasta un V_T de diferencia). Sin embargo, en este caso la excursión de salida es cero.

P3: Caja Afuera... (15 puntos)

Se desea diseñar un amplificador de voltaje empleando la topología de la figura que se presenta a continuación:

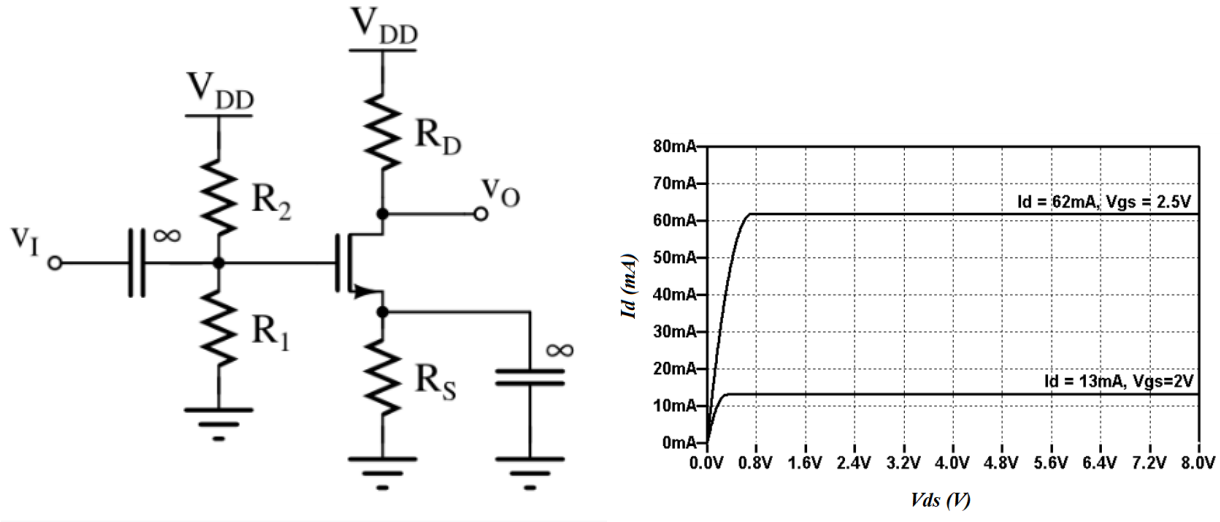


Figura 5: Circuito amplificador con transistor NMOS (derecha).

Como elemento activo utilizaremos el 2N7002, un MOSFET de canal N que puede ser modelado por las curvas estáticas de la figura anterior que se obtuvieron a partir de simulaciones.

Según consideraciones de transconductancia y excursión de salida, se ha decidido que $I_D = 13$ [mA] y $V_{DS} = 4$ [V] en el punto de operación. Se sabe además por simulaciones de la curva I_D - V_{GS}, que la transconductancia es $g_m = 62$ [mS] cuando $I_D = 13$ [mA].

Teniendo en consideración que el voltaje de alimentación a utilizar con este amplificador es $V_{DD} = 8$ [V] y la ganancia objetivo es $A_v = -10\ \frac{V}{V}$, responda las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el valor necesario de R_D para cumplir con las especificaciones mencionadas?
2. ¿Cuál es el valor necesario de R_S para cumplir con las especificaciones mencionadas?
3. ¿Cuál es el valor DC necesario de V_G para cumplir con las especificaciones mencionadas?
4. ¿Cuál sería el valor necesario de las resistencias R_1 y R_2, si se requiere una resistencia de entrada vista desde V_I de 500 [kΩ]?

Pauta P3.1

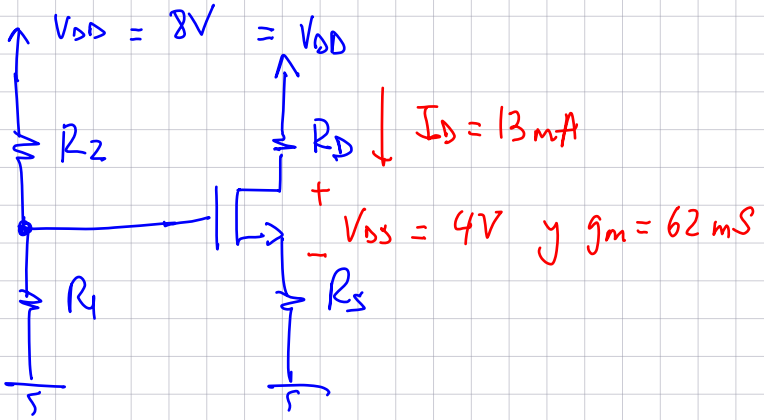
De clases sabemos que las hojas de datos de transistores nunca incluyen los datos constructivos (μ, C_{ox}, $\frac{W}{L}$) por lo que el diseño se hace basado en cursos y estimaciones.

El diseñador ya definió:

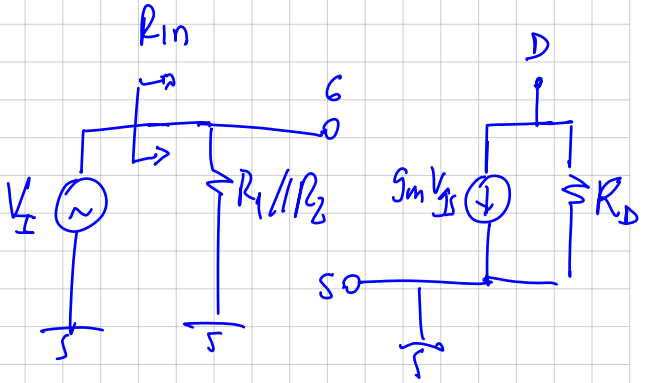
* $I_D = 13\,mA$ → Corriente de polarización
* $V_{DS} = 4$ → Voltaje V_{DS} de polarización del Mosfet.
* $g_m = 62\ (mS = \frac{mA}{V})$ → Transconductancia
* $A_V = -10\ \frac{V}{V}$ → Ganancia esperada sin carga.
* $V_{GS} = 2\,V$ → V_{GS} de polarización.

Ahora debemos determinar las resistencias que cumplen:

Polarización



Pequeña Señal



↳ Con $g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} \Rightarrow V_{OV} = \frac{2 \cdot 13\,mA}{62\,mS} = 0.41\,V \Rightarrow V_t = 1.59[V]$

↳ Con $A_V \Rightarrow A_V = \underbrace{-g_m \cdot R_D}_{CS!} \Rightarrow R_D = -\frac{A_V}{g_m} = \frac{10\,\frac{V}{V}}{62\,mS} = 0.161[k\Omega]$

Podemos ahora, conocido R_D, armar la ecuación de malla en polarización:

↳ $V_{DD} - R_D \cdot I_D - V_{DS} - R_S \cdot I_D = 0$

↳ $8 - 0.161\,[k\Omega] \cdot 13\,mA - 4 - R_{S(k\Omega)}\, 13\,mA = 0$

↳ $R_S = 0.146\ k\Omega$.

Con R_S podemos establecer V_G, pues conocemos V_{GS} y V_S o V_{OV} y V_T

$$V_{GS} = 2V \quad y \quad V_S = R_S \cdot I_D$$

$$V_G - V_S = 2$$

$$\boxed{V_G = 2 + R_S \cdot I_D = 3.898\ (V)}$$

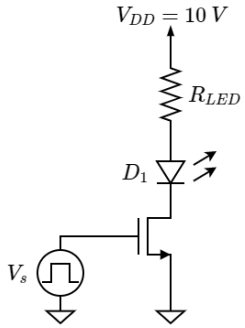
Y finalmente sabemos que:

① $V_G = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2} \cdot R_1$ y ② $R_{in} = R_1 // R_2$

$$\boxed{\Rightarrow \underline{R_1 = 975.1\,[k\Omega]} \quad y \quad R_2 = 1.02\,[M\Omega]\ //.}$$

P4: Popurrí (10 puntos)

Parte A. - 5 Puntos Se tiene el siguiente circuito:



- Este circuito sirve de driver para el Diodo LED D_1, cuyo voltaje de conducción es 2.7 [V] y su corriente de conducción es 15 [mA].
- El voltaje V_s corresponde a una onda cuadrada que alterna periódicamente entre 0 [V] y 5 [V].
- Se sabe que el transistor tiene un $V_{th} = 1$ [V], $|V_A|$ muy grande y cuando está encendido debe tener una resistencia equivalente $r_{ds} = 0.3\ \Omega$.

¿Cuál es el valor de la constante constructiva $k = \mu C_{ox}\dfrac{W}{L}$ del transistor y R_{LED} que permiten que el circuito funcione apropiadamente acorde a los requerimientos especificados? Puede hacer aproximaciones que estime razonables y pertinentes.

Parte B. - 5 Puntos En un proyecto de laboratorio se ha solicitado diseñar, construir y probar un **rectificador de onda completa** capaz de producir a la salida un voltaje DC promedio de 12 [V] con un rizado peak-peak menor a 0.3 [V], todo esto usando diodos con caída constante de 0.7 [V] en conducción. Dentro de los muchos diseños logrados uno llama mucho la atención pues da un resultado extraño.

El diagrama esquemático del circuito es el siguiente:

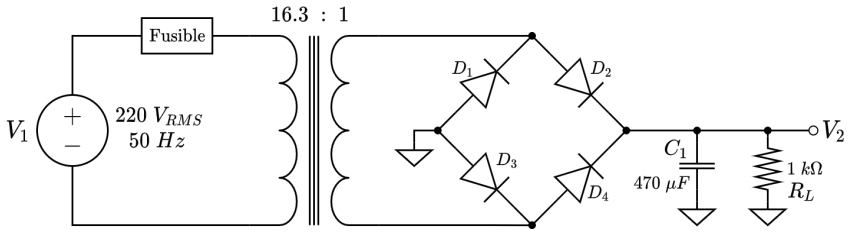


Figura 6: Circuito rectificador con falla.

Los estudiantes que lo diseñaron dicen que en la práctica si bien hay un voltaje DC a la salida, éste no cumple con ninguna especificación. En efecto, tienen una tabla que compara sus simulaciones iniciales y mediciones en el circuito final:

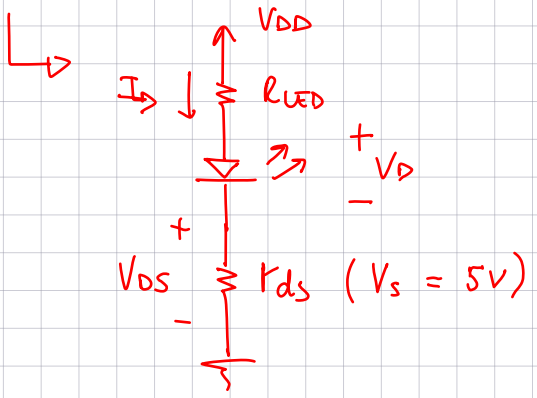
	Voltajes y Frecuencias Relevantes						Estado de Componentes		
	V_{prim} [V_{rms}]	V_{sec} [V_{rms}]	f_{RED} [Hz]	V_L [$V_{promedio}$]	V_{rizado} [V_{pk-pk}]	f_{rizado} [Hz]	R_L [Ω]	C_1	*Fusible*
Simulados LTSpice	220	9,5	50	12	0,24	100	1k	Ok	Ok
Medidos Circuito	220	9,5	50	11,85	0,5	50	1k	Ok	Ok

Estos alumnos le piden ayuda para entender lo que sucede con su circuito, y le piden hacer un diagnóstico indicando cuál es el problema y justificar técnicamente cómo llegó a dicha conclusión. Considere que la falla del circuito puede estar relacionada con componentes en circuito-abierto/corto-circuito o conexiones de alimentación o tierra.

Pauta 4A

El transistor opera solo en modo triodo y corte, lo que facilita el análisis un montón.

Cuando el transistor conduce (está encendido) tiene un $r_{ds} = 0.3\,\Omega$ esto implica que podemos calcular la resistencia requerida para polarizar el LED con una ecuación de mallas



$$V_{DD} - I_D \cdot R_{LED} - V_D - r_{DS} \cdot I_D = 0$$

$$10 - 15\,mA \cdot R_{LED} - 2.7 - 0.3\,\Omega \cdot 15\,mA = 0$$

$$\boxed{R_{LED} = 486.3\,\Omega}$$

$$* \quad V_{DS} = I_D \cdot r_{ds} = 4.5\,mV \approx 0\,!$$

Y la constante de construcción del transistor se puede calcular usando la ecuación de triodo:

$$I_D = \underbrace{\mu C_{ox} \frac{W}{L}}_{K} \left((V_{GS} - V_T) \underbrace{V_{DS}}_{I_D \cdot r_{ds}} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

$$15\,mA = K \left((5-1)\, 4.5 \cdot 10^{-3} - \frac{(4.5 \cdot 10^{-3})^2}{2} \right)$$

$$\Rightarrow \quad K = 0.833\ \frac{A}{V^2}$$

Si aproxima $V_{DS} \approx 0$, el resultado es el mismo.

Pauta P4 B

Viendo la tabla podemos hacer varias inferencias

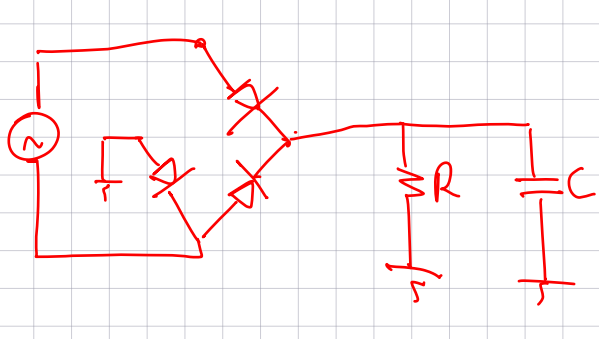
* El transformador está en buen estado
* R_L y C están en buen estado
* El fusible está en buen estado, por lo que no hay ningún cortocircuito o falla que haya implicado un gran flujo de corriente.

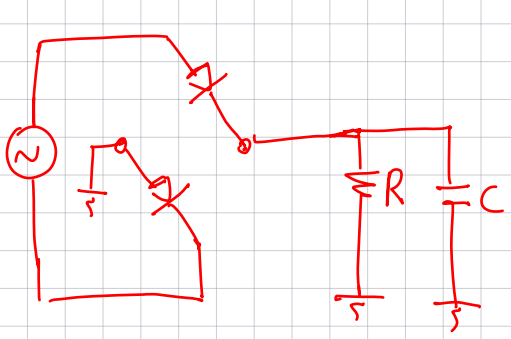
↳ Centro de Falla es el Puente Rectificador

El rectificador de onda completa produce un rizado de 2·fred y un voltaje de rizado bastante bajo al tener filtro.
La tabla muestra que el rizado tiene la misma frecuencia de la red y un Voltaje de rizado mayor al esperado, lo que nos lleva a pensar que el rectificador está operando como de media onda

Para que esto ocurra hay 2 opciones (igualmente correctas)

* Uno de los diodos falló en circuito abierto
* Dos diodos del mismo semiciclo de fallaron abiertos.





En ambos casos, solo podemos pasar un semiciclo al capacitor para limitar el voltaje DC lo que limita el comportamiento del rectificador a media onda (con frizado = fred y Vrizado mayor)