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

Interrogación 2 - Total 50 Puntos
Alan Brito y su Especial de Haloweeen II

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: 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 3: No se pegue en los problemas... si se ve atascad@, cámbiese de problema y ello probablemente le ayude a despejarse!.**
- **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: El Clásico (15 puntos)

Considere el siguiente circuito amplificador:

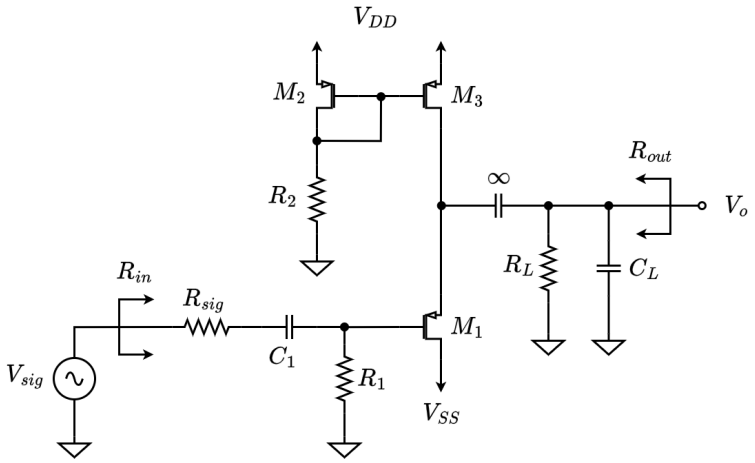


Figura 1: Circuito del Problema 1 - Amplificador

De los componentes del circuito se sabe lo siguiente:

- $V_{DD} = 5[V]$, $V_{SS} = -5[V]$; $R_1 = 3.3[k\Omega]$, $R_2 = 1[k\Omega]$, $R_{sig} = 50[\Omega]$, $R_L = 50[k\Omega]$
- $C_1 = 2.2[\mu F]$, $C_L = 47[nF]$
- Los transistores M_1, M_2 y M_3 son iguales en todo sentido. Tienen una constante de construcción $k = \mu_p C_{ox}(\frac{W}{L}) = 6[\frac{mA}{V^2}]$; $|V_{th}| = 0.7$[V] y $\lambda = 0[V]$
- El voltaje de entrada V_{sig} es una señal sinusoidal pequeña sin componente DC.

A continuación responda:

a) 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?.**

b) Haga un análisis de frecuencia descriptivo, e identifique la banda pasante de amplificación (Pasa-Bajos, Pasa-Banda o Pasa-Altos) y el estado de los capacitores C_1 y C_L (cortocircuito o circuito abierto) en dicha banda.

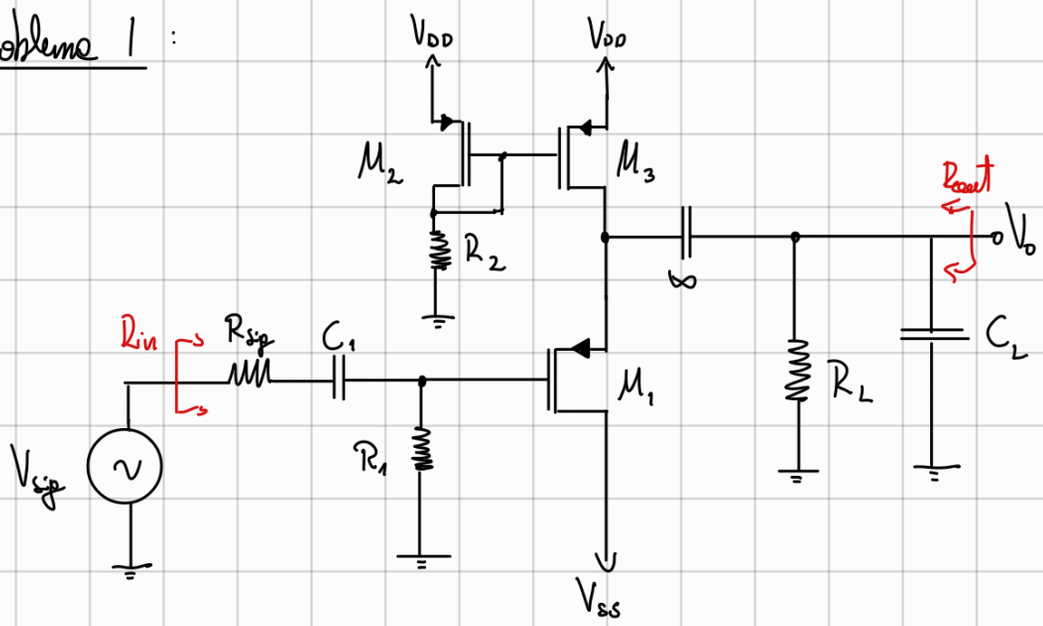
c) Determine el punto de operación DC (I_D, $|V_{GS}|$ y $|V_{DS}|$) de todos los transistores del circuito, y verifique su modo de operación.

d) Dibuje el circuito de pequeña señal con el mínimo número de componentes (eliminando los dispositivos/componentes que no tienen relevancia en los cálculos de pequeña señal), y determine los parámetros de pequeña señal g_m y r_o de los dispositivos relevantes según corresponda.

e) Determine el valor de R_{in}, R_{out} y la ganancia $\dfrac{V_o}{V_{sig}}$, todos en banda pasante

f) Determine la función de transferencia de ganancia definida como $\dfrac{V_o}{V_{sig}}$ y dibuje su diagrama de Bode - magnitud [dB] y fase [°], respecto a la frecuencia en [Hz] - , incluyendo todos los puntos y pendientes relevantes.

Problema 1 :



$R_1 = 3.3k\Omega$; $R_L = 50k\Omega$

$R_{sig} = 50\Omega$

$C_1 = 2.2\mu F$; $C_2 = 47nF$

- Todos los transistores $|V_{tn}| = 0,7V$, $\mu C_{ox} \cdot \frac{W}{L} = 6mA/V^2$ y $\lambda = 0$.
- $V_{DD} = 5V$ y $V_{SS} = -5V$

1) Los transistores M_2 y M_3 actúan en conjunto como espejo de corriente. M_2 actúa como Espejo - Diodo y M_3 como Espejo - Reflejador, por lo tanto M_3 también cumple la función de polarización
M_1 es el amplificador, con su Drain conectado a tierra de señal

Así, tenemos un amplificador common - drain (CD)

2) Analizando M_2 tenemos:

$$V_{DD} - |V_{GS_2}| - I_{D_2} \cdot R_2 = 0 \quad , \quad I_{D_2} = \frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L}(|V_{GS}| - |V_t|)^2$$

$$\therefore V_{DD} - |V_{GS_2}| - \frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L}(|V_{GS}|^2 - 2|V_{GS}||V_t| + |V_t|^2) \cdot R_2 = 0$$

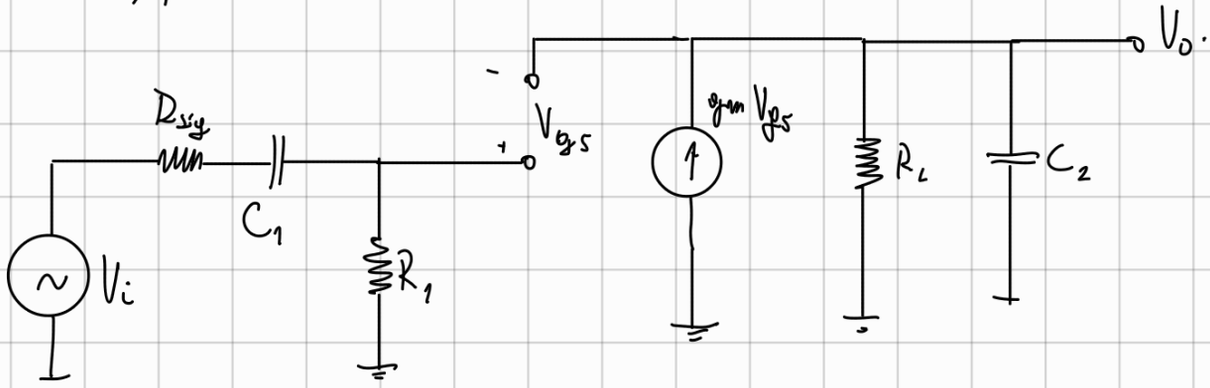
Reemplazando con valores $\rightarrow$ $3,53 + 3,2|V_{GS_2}| - 3|V_{GS}|^2 = 0$
Así, tenemos que $|V_{GS_2}| = 1,74V = |V_{GS_3}|$, y como tienen la misma corriente $|V_{GS_1}| = 1,74V$

Luego, $I_{D_1} = I_{D_2} = I_{D_3} = 3,24mA$, y para $M_2 \rightarrow |V_{DS_2}| = |V_{GS_2}| = 1,74V$.

En el caso de $M_1 \rightarrow V_G = 0$, $\therefore V_S = 1.74\,V$ y por ende $|V_{DS}| = |-5V - 1.74V| = 6.74\,V$

Finalmente, para M_3 $|V_{DS}| = |1.74\,V - 5V| = 3.26\,V$

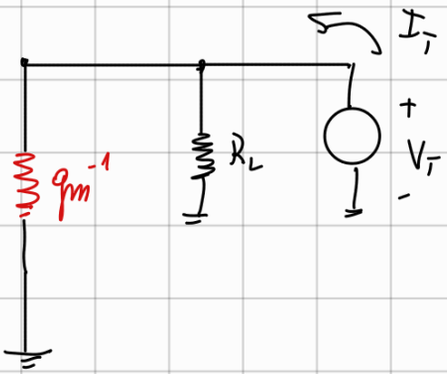
3)



4) $R_{in} = R_{sig} + R_1 = 33505\Omega$

Para calcular R_{out}, apagamos V_i. Así, $V_g = 0$, y $V_s = V_o$ $(V_{gs} = -V_o)$

Notamos que la fuente de corriente se puede convertir en una resistencia de g_m^{-1}:



$g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = 6.24\,mA/V \quad \therefore R_{out} = R_L \,//\, g_m^{-1} = 159.74\Omega$

Ahora, la ganancia.

$V_o = g_m (V_g - V_o) R_L$

$V_g = V_i \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{sig}}$;

$V_o \cdot (1 + g_m \cdot R_L) = V_i \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{sig}} \cdot g_m R_L$

$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1}{R_1 + R_{sig}} \frac{g_m \cdot R_L}{1 + g_m \cdot R_L}$ //

$\hookrightarrow \frac{V_o}{V_i} = 0.98\,V/V$ //

5) Teniendo en cuenta los capacitancias internas:

$$V_g = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_{sig} + Z_{C_1}} \quad ; \quad V_o = g_m (V_g - V_o) \cdot R_L // Z_{C_2}$$

$$V_g = V_i \frac{s R_1 C_1}{1 + s(R_1 + R_{sig})C_1} \quad ; \quad V_o = V_g \frac{g_m (R_L // Z_{C_2})}{1 + g_m (R_L // Z_{C_2})}$$

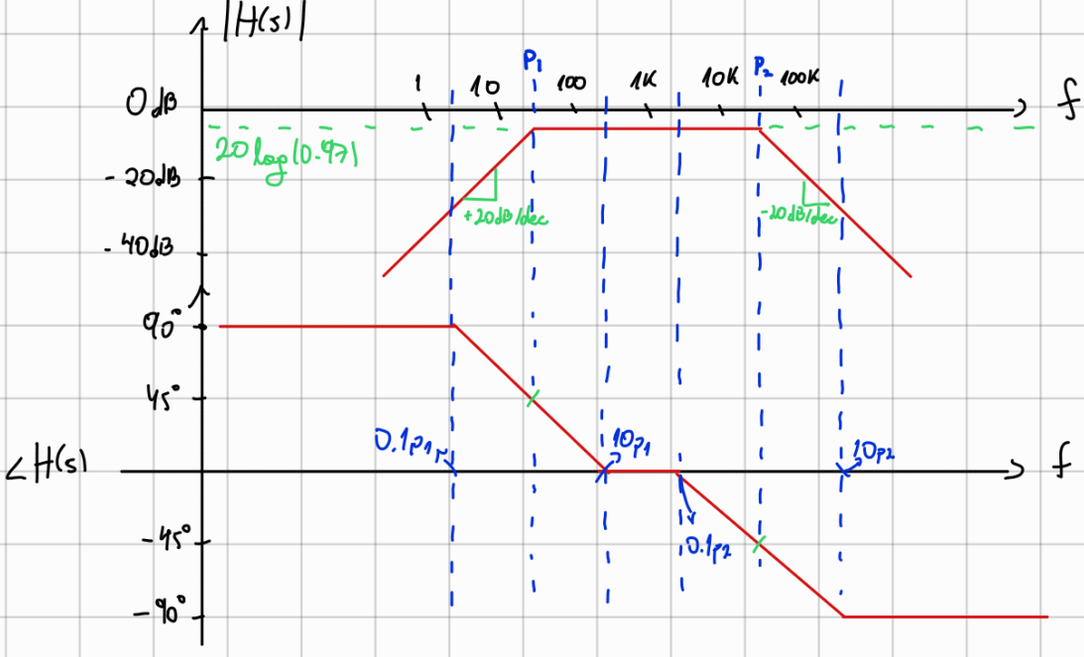
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s R_1 C_1}{1 + s(R_1 + R_{sig})C_1} \cdot \frac{g_m \cdot \frac{R_L \cdot \frac{1}{sC_2}}{R_L + 1/sC_2}}{1 + g_m \frac{(R_L \cdot \frac{1}{sC_2})}{R_L + 1/sC_2}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s R_1 C_1}{1 + s(R_1 + R_{sig})C_1} \cdot \frac{g_m \cdot R_L \cdot \frac{1}{sC_2}}{(R_L + 1/sC_2) + g_m (R_L \cdot \frac{1}{sC_2})} \cdot \frac{sC_2}{sC_2}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s R_1 C_1}{1 + s(R_1 + R_{sig})C_1} \cdot \frac{g_m \cdot R_L}{1 + g_m R_L + s R_L C_2} //$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{7.24 \cdot 10^{-3} s}{(1 + 7.37 \cdot 10^{-3} s)(1 + 7.51 \cdot 10^{-6} s)}$$

6) Para el diagrama de Bode tenemos un cero en $z = 0\,Hz$, y dos polos $p_1 = -21.59\,Hz$ y $p_2 = -21.2\,kHz$ y una ganancia en la banda pasante de $0.98\,V/V$



P2: Volante (10 puntos)

En este problema haremos un análisis del efecto de cargas inductivas en los dispositivos utilizados como switch. Considere los siguientes circuitos:

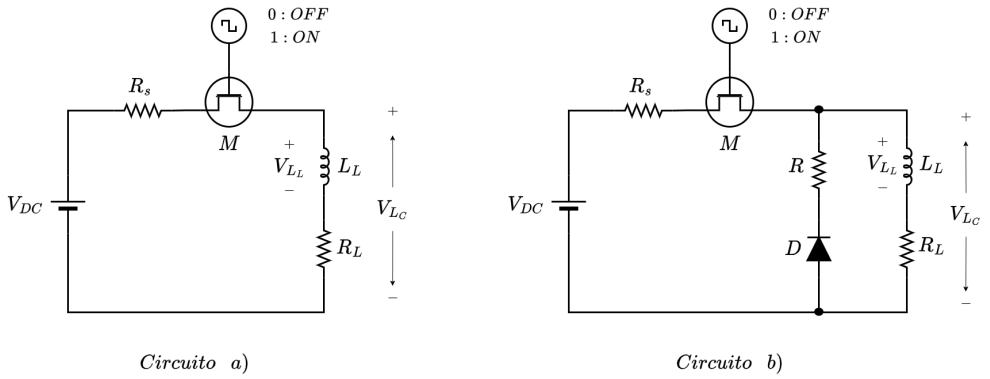


Figura 2: Circuitos del Problema 2 - Circuitos de Switcheo

El circuito A) es un driver switching para una carga inductiva; y el circuito B) es un driver switching para una carga inductiva, idéntico al anterior, pero que incluye un diodo antiparalelo a dicha carga.

Las características de los elementos son:

- $V_{DC} = 100[V]$ y $R_s = 1[k\Omega]$
- El transistor M, se puede considerar como un dispositivo cuya $R_{ds_{ON}} = 25[m\Omega]$, $R_{ds_{OFF}} = 1[M\Omega]$ y voltaje máximo de bloqueo $V_{DS_{MAX}} = 200[V]$.
- El inductor de carga L_C se compone de una inductancia pura $L_L = 10[H]$ en serie con una resistencia $R_L = 0.1[\Omega]$
- La rama anti-paralela está compuesta por un Diodo cuyo voltaje en conducción es 1[V], y una resistencia R en serie a definir por usuario

Procedamos a analizar el circuito A):

a) Considere que el transistor ha estado conduciendo por un tiempo largo. Determine el valor de la corriente y voltaje finales que tendrá el inductor L_C una vez cargado (régimen permanente).

b) En un instante, el transistor pasa a modo apagado. Determine el voltaje instantáneo que aparece en la inductancia L_L y el voltaje al que queda sometido el transistor entre sus terminales D y S. ¿Falla catastróficamente el transistor?.

Ahora considere el circuito B):

c) Considere que el transistor ha estado conduciendo por un tiempo largo. ¿Cambian los valores finales (régimen permanente) de voltaje y corriente del inductor L_C respecto del circuito A)?

d) En un instante, el transistor pasa a modo apagado. Si la resistencia $R = 50[\Omega]$, determine el voltaje instantáneo que aparece en la inductancia L_L y el voltaje al que está sometido el transistor entre sus terminales D y S. ¿Falla catastróficamente el transistor?. Puede hacer alguna aproximación que le resulte pertinente comparando estimaciones de impedancias de rama en el circuito.

e) Determine el rango de valores para R tales que el voltaje que puede aparecer en la inductancia de carga L_C nunca exceda a la fuente de alimentación $V_{DC} = 100[V]$

P2)

a) Si el transistor ha conducido por mucho tiempo, la corriente final por el inductor es:

$$I_L(t=\infty) = \frac{V_{DC}}{R_S + R_{DS_{ON}} + R_L} = \frac{100}{1K + 25m + 0.1} = 0.0999\ A$$

Y su voltaje es el que existe en R_L:

$$V_{L_C} = I_L \cdot R_L = 0.0999\ A \cdot 0.1\ \Omega = 9.998\ mV.\ \left(V_L = 0V \text{ pues } \frac{di}{dt} = 0\right)$$

b) Cuando el transistor pasa a apagado, su resistencia instantáneamente cambia a $R_{DS\,off}$ y L_L mantiene la conducción así:

$$V_{DC} = I_L \cdot R_S + I_L \cdot R_{DS_{off}} + V_{L_L} + I_L \cdot R_L$$

$$V_{LL} = 100 - 99.98\ mA\,(1K + 1000K + 10^{-4}K)$$

$$V_{LL} = 100 - 100.08\ kV = -99.98\ kV.$$

Y el voltaje V_{DS} del transistor en este caso es:

$$V_{DS} = I_L \cdot R_{DS_{off}} = 99.98\ mA \cdot 1000K = 99.98\ kV$$

Claramente se destruye antes de llegar a ese voltaje.

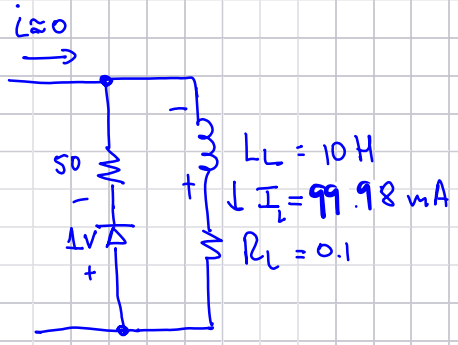
c) El circuito con el transistor conduciendo no cambia pues el diodo está inactivo

↳ $I_L(t=\infty) = 99.98\ mA$

↳ $V_{L_C} = 9.99\ mV.$ $\left(V_L = 0V \text{ pues } \frac{di}{dt} = 0\right)$

d) Cuando el transistor se abre, la impedancia total de esa rama es 1M aprox por lo que la conducción en practicamente nula (se puede despreciar) pues el diodo provee camino por la corriente del inductor. Así:

$\Rightarrow$



$$V_{LL} = I_L \cdot R_L + L + R \cdot I_L$$

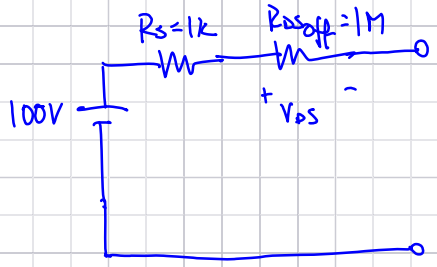
$$V_{LL} = I_L (R_L + R) + L$$

$$V_{LL} = 99.98\,mA\,(0.1 + 50) + 1$$

$$V_{LL} = 99.98\,mA\,(0.0501\,k) + 1$$

$$\boxed{V_{LL} = 6.008\,V.}$$

Luego, tenemos el circuito:



$$V_{DC} = V_{LL} - V_{RL} = V_D + I_L \cdot 50 = 1 + 4.999 = 5.999$$

La polaridad es relevante pues el inductor hace de fuente!

$$\Rightarrow \boxed{V_{DS} = 1M \cdot \frac{100 + 5.99}{1001\,k} \approx 105.88\,V \rightarrow \text{No falla catastróficamente.}}$$

e) Se pide determinar el valor R tal que el inductor nunca produzca más de $V_{DC} = 100\,V$. (no alcance un umbral donde el transistor se destruya)

* La corriente inicial no cambia y es la misma que pasa por el circuito $L_L - R_L - D - R$
* La caída en R_L es despreciable!

$$\hookrightarrow V_D + I_L R = 100 \Rightarrow R = \frac{100 - V_D}{I_L} = \frac{100 - 1\,V}{99.98\,mA} = 0{,}99\,k\Omega$$

P3: Alan Brito y sus Audios (10 puntos)

Alan Brito, buscando circuitos potencialmente interesantes para implementar, encontró un circuito que llamó mucho su atención:

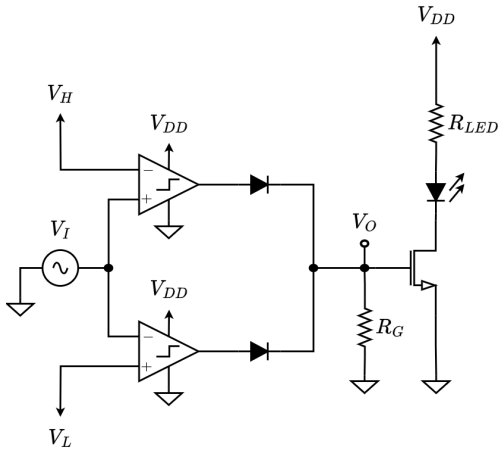


Figura 3: Circuito del Problema 3 - Vúmetro

El circuito estaba identificado como vúmetro, y venía con las siguientes notas.

- El voltaje de alimentación es $V_{DD} = 12[V]$
- Los diodos son idénticos e ideales y el LED es de color Rojo, con un voltaje constante en conducción de 1.5 [V], con una corriente de 20 [mA].
- Los comparadores son cuasi-ideales, con la única limitación que no pueden entregar más que 10 mA a la salida.
- El transistor tiene una constante de construcción $k = \mu_n C_{ox}(\frac{W}{L}) = 10[\frac{mA}{V^2}]$; $V_{th} = 1$[V] y $\lambda = 0[V]$ y la resistencia lo acompaña es $R_G = 15[k\Omega]$
- V_I representa el voltaje de un micrófono, y se puede asumir como un voltaje de cualquier forma; y V_H y V_L son voltajes puramente DC **finitos**, que cumplen la relación $V_H > V_L$

Alan ya tiene una idea más o menos de como funciona, pero le pide ayuda a usted para confirmar sus sospechas. A continuación, responda las siguientes preguntas de forma de ayudar a Alan:

a) Analice el circuito de la figura anterior, explicando su función y cómo la ejecuta. Sea explícito en indicar separar casos según el voltaje de entrada y la comparación con los umbrales.

b) Dibuje la curva de transferencia del circuito comparador (V_O v/s V_I) para todo V_I, con puntos relevantes

c) ¿Porqué son necesarios los diodos a la salida de los comparadores? Considere el caso en el que los diodos no existieran, y en función de la entrada V_I encuentre el problema que se produciría.

d) Encuentre el valor de la resistencia R_{LED} de forma que llegada la condición de encendido del transistor, el LED encienda nominalmente.

e) Intuitivamente y sin mayor detención, Alan cree que la interfaz R_G y transistor están demás y podría conectar el LED entre la salida de los comparadores y tierra con una resistencia de polarización simplificando el circuito. Dibuje como sería el circuito propuesto por Alan y luego justifique si el circuito funciona igual que con la interfaz R_G y transistor y cuál es la limitación, si la hubiere.

P3)

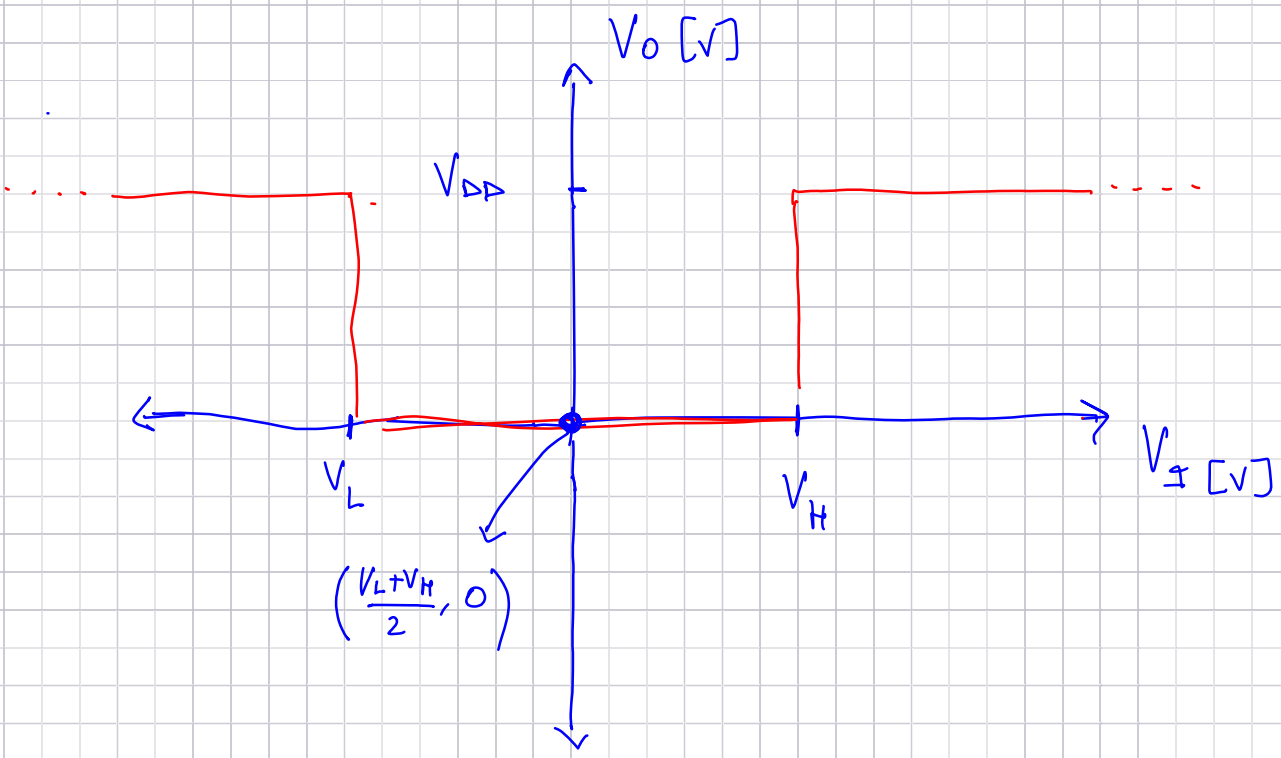
a) Se pide analizar el ckt.

Podemos ver que:

* El comparador superior, solo emite nivel V_{DD} si $V_i > V_H$.
* El comparador inferior, solo emite nivel V_{DD} si $V_i < V_L$
* Si V_I está entre V_H y V_L, ambos comparadores dejan a la salida tierra.

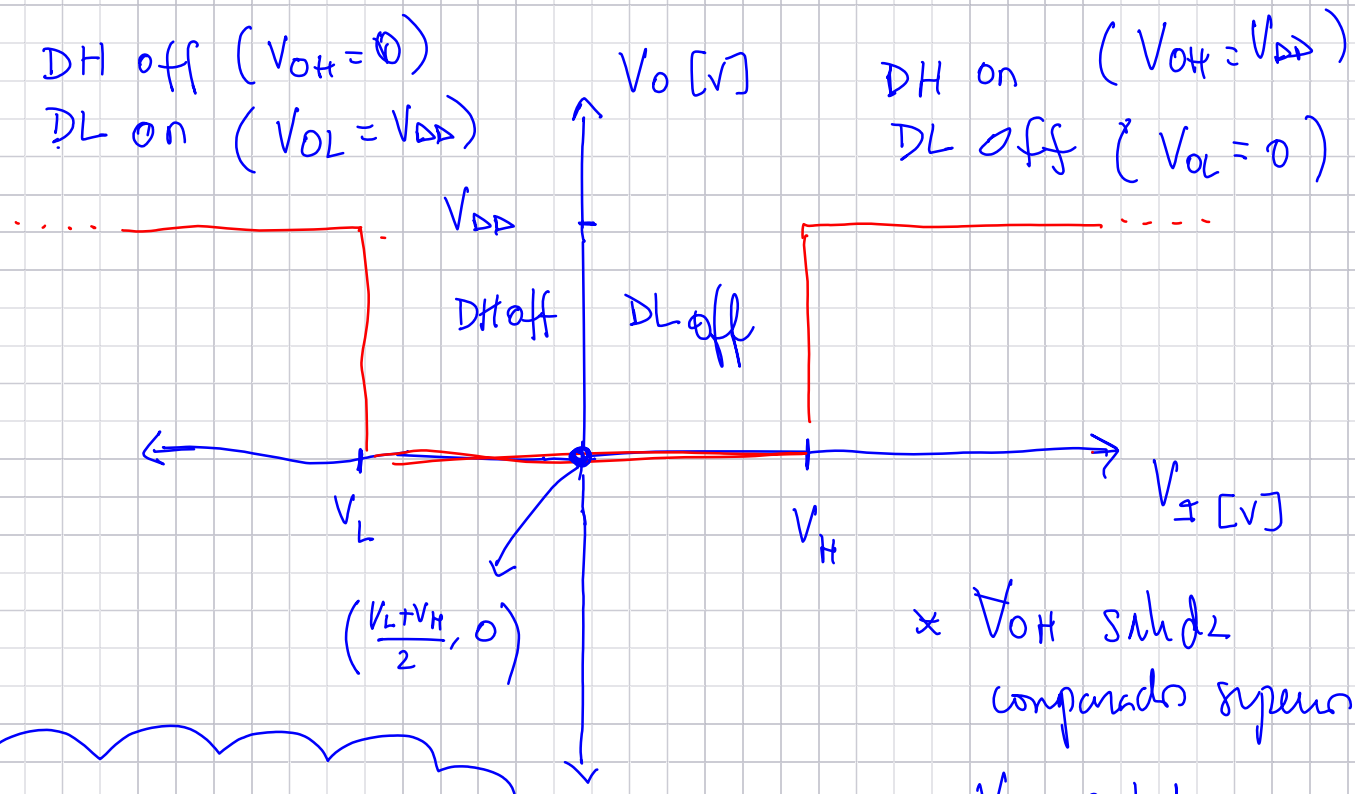
Esto implica que el circuito detecta cuando el micrófono emite una señal superior a cierto umbral y bajo cierto umbral activando el transistor y encendiendo el LED dando aviso de esto al usuario.

b) Armamos la curva de transferencia:



c) Se pide indicar porque los diodos son relevantes a la salida de los comparadores.

Remitiéndonos a la curva de transferencia, indicando los diodos conduciendo en cada región de V_i:



* V_{OH} salida comparador superior

* V_{OL} salida comparador inferior

Si los diodos no existen, habría cortocircuito entre comparadores en las regiones donde actualmente hay salida nula.

Note que la corriente que aporta cada comparador al encender es:

$$I_O = \frac{V_{DD}}{R_6} = \frac{12}{15}\,mA < 10\,mA$$

límite del comparador

d) Acá no preocupan solo de la región donde se superan umbrales.

Cuando se supera umbrales:

$V_D = V_D = 12\,V$

$V_{GS} = V_{DD} - 0 = 12\,V$

$V_{OV} = V_{GS} - V_{TH} = 11\,V$

} Transistor opera como switch.
⇒ Debe estar en triodo
⇒ $I_D = I_{diodo}$

Así:

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L}\left(V_{OV}\cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right)$$

$$20\,mA = 10\cdot\left(11\cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right) \Rightarrow$$

$V_{DS_1} = 21.82 > V_{OV}$

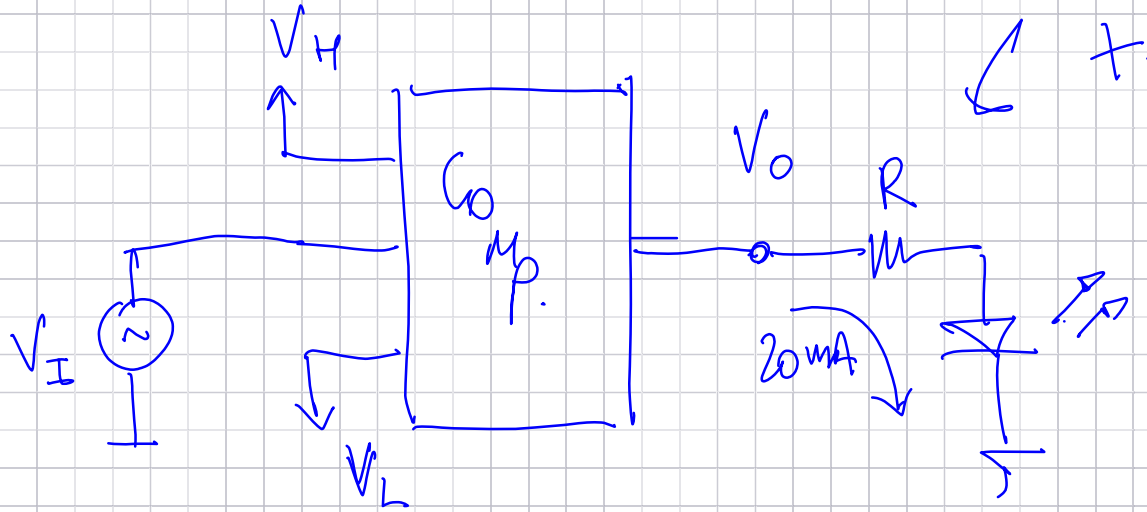
$V_{DS_2} = 0.1833 < V_{OV}$

Conocido V_{DS}, determinamos R_{LED} en una malla:

$$V_{DD} - I_{DIODO}\cdot R_{LED} - V_{DIODO} - V_{DS} = 0$$

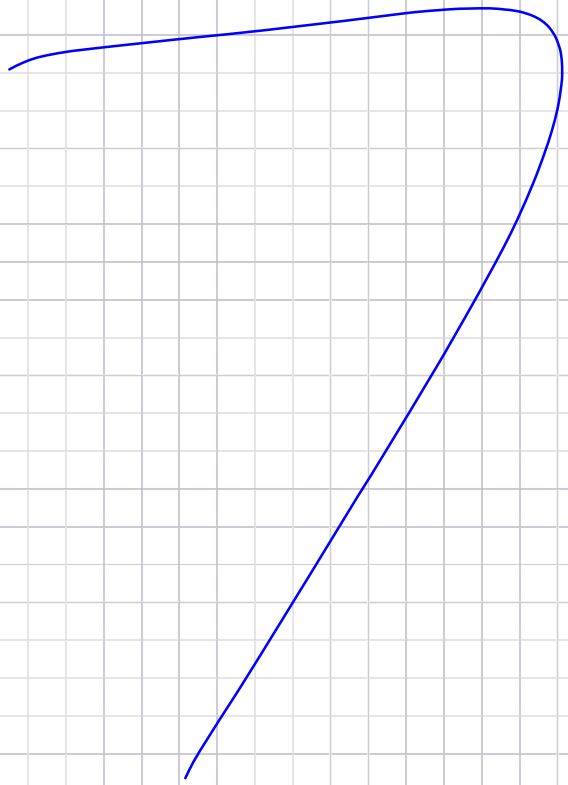
↳ $R = 515.84\,\Omega$

e) Alza propone esto



Cada compuerta tendría que entregar 20 mA ¡que supera su límite!

El arreglo R_6 - Transistor está para dar mas corriente al LED sin exigir al límite a los Comparadores.



P4: Debugeando y Procesando Señales con Alan Brito II (15 puntos)

Alan Brito II, tratando de incrementar su conocimiento en el procesamiento analógico de señales encontró el siguiente circuito.

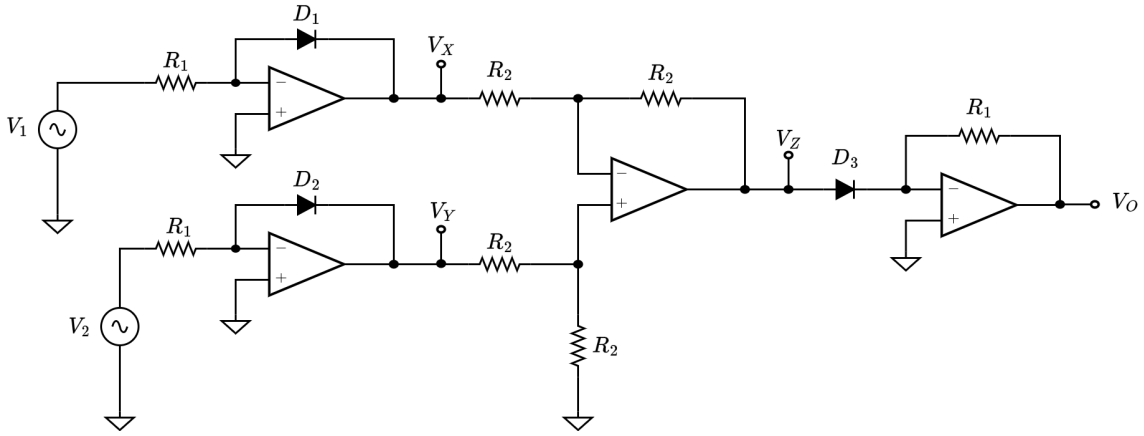


Figura 4: Circuito del Problema 4 - Operador de Señales

Él ha tratado de analizarlo con todas sus herramientas, e incluso implementarlo, pero no ha llegado a buen puerto y le cuesta visualizar bien la función que cumple. Es por esto que llega a usted para que le ayude a entenderlo. No obstante, Alan no viene con las manos vacías, y trae algunas conclusiones que pueden ser de utilidad para su análisis:

- Todos los diodos son iguales, con corriente de fuga I_S conocida del orden de [fA] (fA es una milésima de nA), y operan a temperatura ambiente con V_T y n conocidos.
- Los Opamps son identicos, ideales y tienen rieles $V_{DD} > 0$ y $V_{EE} < 0$
- Las resistencias, son todas finitas y no nulas.
- V_1 y V_2 son voltajes que pueden tener cualquier forma.

A continuación y en pos de ayudar a Alan:

a) Al ser la corriente de fuga tan pequeña, Alan cree que asumir los diodos como dispositivos cuya relación I-V es exponencial pura para polarización directa y conducción nula para polarización inversa, es suficiente. Asumiendo V_1 y V_2 tales que el circuito funciona correctamente, encuentre las expresiones matemáticas que definen el voltaje de cada nodo intermedio y la salida del circuito en función de los parámetros circuitales que correspondan.

b) Encuentre una relación entre los componentes del circuito, de forma que se pueda lograr una operación matemática pura entre V_1 y V_2. Luego, considere que las resistencias normalmente pueden variar hasta un 5 % de su valor nominal por imperfecciones en su fabricación y explique cómo afecta esto al hecho de lograr una operación pura exacta y si es realista.

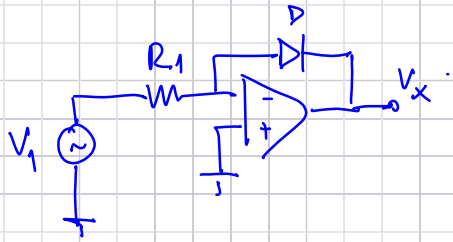
c) Alan armó el circuito y milagrosamente los componentes que eligió son tales que la operación matemática es exacta. Sin embargo ha probado con todo tipo de señales, y sólo ha logrado resultado coherente cuando V_1 y V_2 son positivos y no nulos, en el resto sólo logra saturaciones. Alan indica que la matemática indica que el resultado debería funcionar para cualquier caso razonable... ¿Porqué no funciona en otros casos? Imponga condiciones sobre V_1 y V_2 de forma que se asegure el correcto funcionamiento del circuito.

P4)

a) Si asumimos la diodo como exponencial clásica pura:

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{nV_T}} \Rightarrow \text{Esto implica que para } V_D = 0 \Rightarrow I_D = I_S > 0$$

Determinamos los voltajes nodales:



$\Rightarrow$ La corriente que fluye por el diodo es la que fluye por el circuito, y como es no nula matemáticamente, el diodo mantiene al opamp en realimentación negativa.

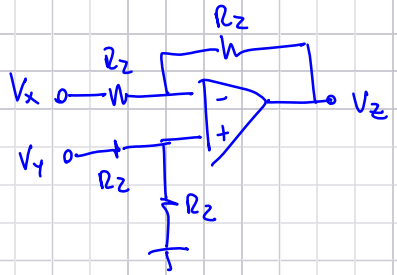
$$\Rightarrow \frac{V_1 - 0}{R_1} = I_D = I_S \cdot e^{\frac{0 - V_x}{nV_T}} \Rightarrow -\frac{V_x}{nV_T} = \ln\left(\frac{V_1}{R_1 \cdot I_S}\right)$$

finalmente: $V_x = -nV_T \ln\left(\frac{V_1}{R_1 \cdot I_S}\right)$

Y V_y se genera con la misma topología usando V_2

$$V_y = -nV_T \ln\left(\frac{V_2}{R_1 \cdot I_S}\right)$$

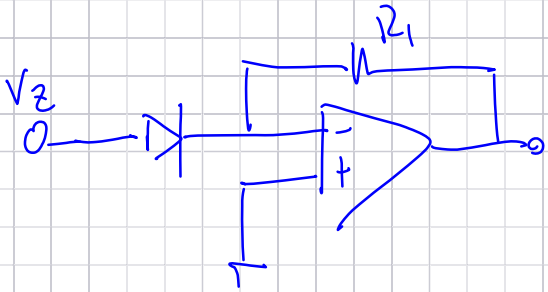
Luego V_x y V_y van a una topología restadora:



$$\Rightarrow V_z = V_y - V_x = -nV_T \ln\left(\frac{V_2}{R_1 I_S}\right) + nV_T \ln\left(\frac{V_1}{R_1 I_S}\right)$$

$$\boxed{V_z = nV_T \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

Y el último bloque, invierte la topología logarítmica por lo que diseña un Antilog:



$$\left.\begin{aligned} I_D &= \frac{0 - V_0}{R_1} \\ I_S \cdot e^{\frac{V_2 - 0}{nV_T}} &= \frac{0 - V_0}{R_1} \end{aligned}\right\}$$

$\Rightarrow$ finalmente:

$$V_0 = -I_S R_1 \cdot e^{\frac{V_2}{nV_T}} = -R_1 I_S \cdot e^{\frac{nV_T \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{nV_T}} = -R_1 I_S \frac{V_1}{V_2}$$

$$V_0 = -R_1 \cdot I_S \cdot \frac{V_1}{V_2}$$

b) Este circuito ejecuta la división analógica si $R_1 \cdot I_S = 1$

El valor I_S es muy pequeño y R_1 diseñado grande y si éste además tiene tolerancia respecto a su valor nominal, es difícil lograr la división exacta. Esto hace el circuito un tanto irrealista.

c) Para $V_1, V_2 > 0$, los logaritmos analógicos están definidos siempre.

Para V_1 ó V_2 nulo, los logaritmos se indefinen saturando sus etapas de cálculo

Para $V_1, V_2 < 0$, la operación logaritmo no está definida, los diodos respectivos deberían aceptar corrientes inversas cosa que no pueden y los opamp quedan en lazo abierto saturando.

Es por lo anterior que Alan no puede lograr resultados para voltajes negativos y nulos!