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

Interrogación 2 - Total 50 Puntos
¿Qué culpa tiene Alan Brito?

Plazo de Entrega: Lunes 15 de Noviembre de 2021 hasta las 21:00 horas (sin descuento). Luego de este plazo, podrá entregar su trabajo pero se le aplicará descuento a su nota. Cargue su desarrollo en formato PDF en el buzón de CANVAS respectivo. 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 vía ZOOM y rige el documento *Regla de Entregas del Curso* en CANVAS.**

- **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: Preocúpese de la presentación de su trabajo y use una aplicación para registrar su desarrollo; las fotos de celular muchas veces quedan mal y el ayudante no puede corregir. 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 usar Solvers y Simuladores para resolver problemas.**

P1: Clásico (15 puntos)

El circuito a continuación corresponde al primer amplificador diseñado por Alan Brito en su curso de Electrónica:

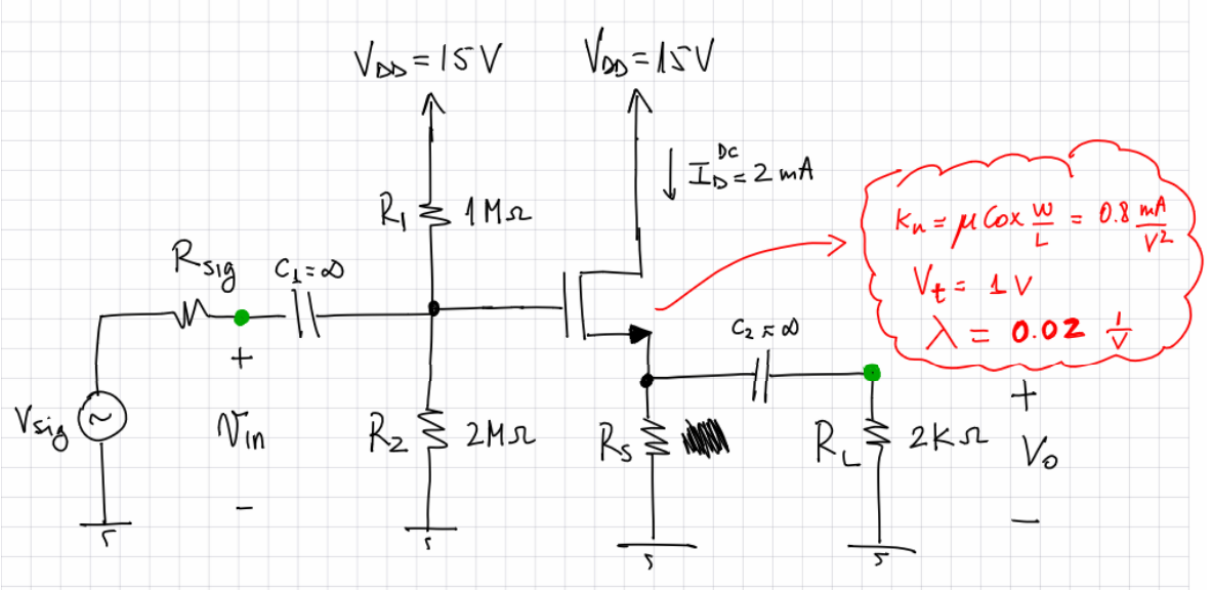


Figura 1: Primer Circuito de Alan

Dicen las malas lenguas que éste circuito era usado como intermediario para alimentar cargas cuando la fuente de señales no era capaz de entregar suficiente corriente.

Se pretenden hacer pruebas de laboratorio del circuito anterior, sin embargo como puede ver del escaneo del apunte de Alan, falta el valor de R_S que está borrado.

A continuación responda las siguientes preguntas:

a) Despreciando el efecto de λ, determine el valor de R_S de forma que por el transistor fluya la corriente I_{DC}.

b) Explicite los voltajes nodales del transistor V_G, V_S y V_D y muestre que el transistor conduce y que se encuentra en modo de operación activo.

c) Identifique el tipo de amplificador (CS, CS-Deg, CD, CG) configurado por el circuito de Alan.

d) Determine los parámetros de pequeña señal del transistor g_m y r_o.

e) Dibuje el circuito de pequeña señal del amplificador usando modelo Pi o T.

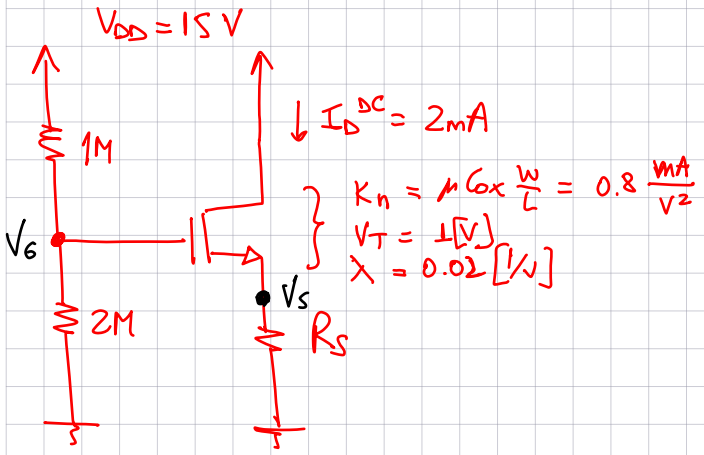
f) Determine la ganancia del circuito definida como $\frac{V_o}{V_{in}}$, sin considerar la carga R_L

g) Determine la resistencia de entrada del circuito vista desde el nodo V_{in} hacia el amplificador.

h) Determine la resistencia de salida del circuito vista desde R_L hacia el amplificador.

Pauta I2

P1 | Armamos el circuito en DC



Determinamos R_S, asumiendo región activa dado que sabemos que el circuito activa como amplificador.

$$\Rightarrow I_D = \frac{1}{2} \cdot k_n \cdot (V_{GS} - V_t)^2 \quad y \quad V_G = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

$$2mA = \frac{1}{2} \cdot 0.8 \cdot (10 - V_S - 1)^2$$

$$\hookrightarrow V_S^{(1)} = 6.76\,[V] \begin{cases} V_{GS} = 3.24[V] \\ V_{DS} = 8.24[V] \end{cases} \checkmark$$

$$V_S^{(2)} = 11.2\,[V] \rightarrow V_{GS} < 0 \quad X$$

Conocido V_S, tenemos que: $R_S = \frac{V_S}{I_D^{DC}} = \frac{6.76}{2\,mA} = 3.38\,[k\Omega]$.

b) Dejamos los valores explícitos de V_G, V_D y V_S para confirmar la operación del transistor:

$$V_G = \frac{15}{1M+2M} \cdot 2M = 10\,[V]. \quad ; \quad V_D = 15\,[V]; \quad V_S = 6.76\,[V]$$

$$\hookrightarrow V_{GS} = 3.24$$

$$V_{ov} = 3.24 - 1 = 2.24\,[V] \checkmark \text{ conduce.}$$

$$V_{DS} = 15 - 6.76 = 8.24\,V > V_{ov} \checkmark \text{ Activa.}$$

c) Señal de Entrada → Gate (compuerta)
Señal de Salida → Source (fuente)
Común → Drain (drén)

} Amplificador tipo Drén Común
Buen Buffer de Voltaje!

d) Los parámetros de pequeña señal son g_m y r_o

↳ $g_m = \frac{2I_D}{V_{ov}} = \frac{2 \cdot 2mA}{2.24\,V} = 1.78\ \frac{mA}{V}$

* Si se calcula considerando λ con la fórmula completa:

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{ov}}(1+\lambda V_{DS}) = 1.78\,(1+0.1648) = 2.07\ \frac{mA}{V}$$

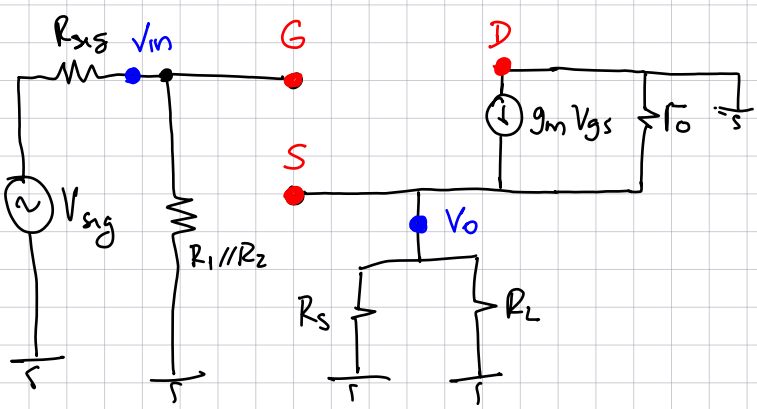
→ Son cercanos

Recuerde que la aproximación de despreciar λ era para evitar la ecuación cúbica.

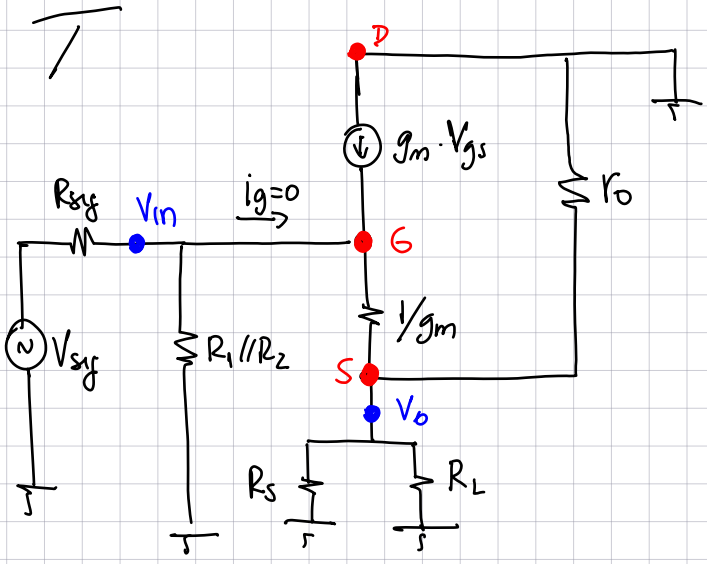
↳ $r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0.02 \cdot 2mA} = 25\ k\Omega$.

e) Dibujamos el circuito en modelo π y T para la pauta.

//

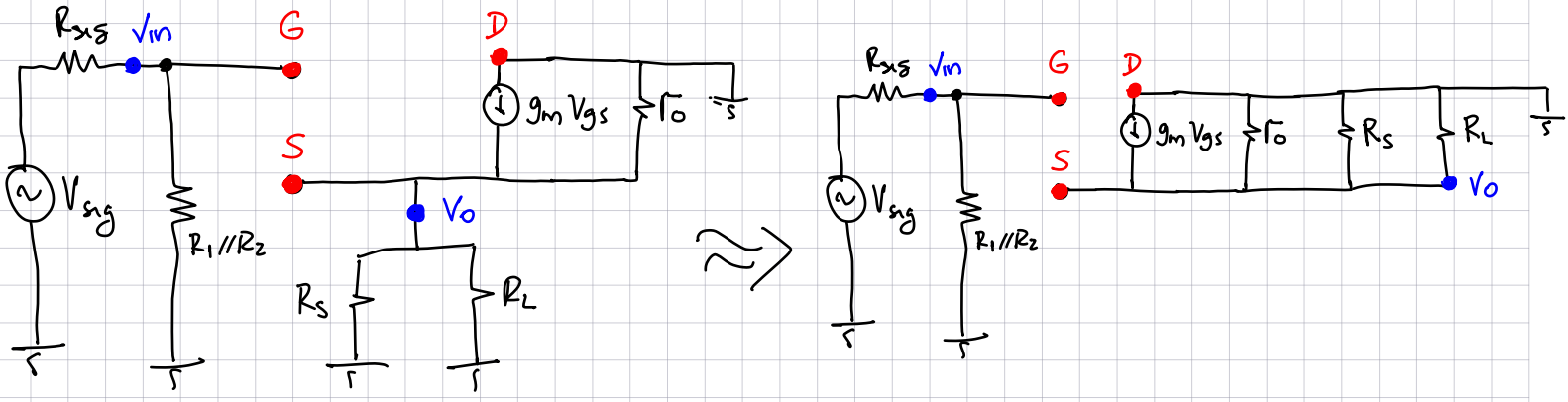


T



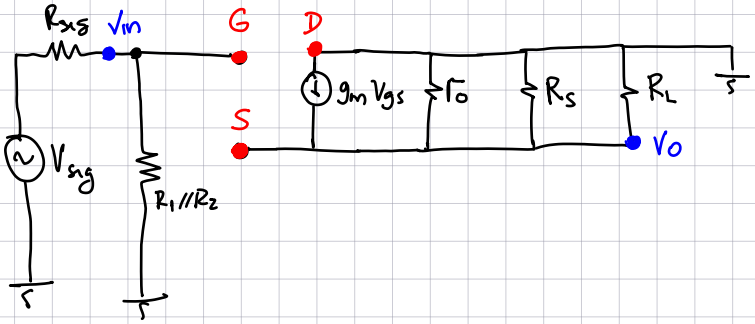
f, g y h) Para estos incisos, usaremos el circuito TI. Los resultados obtenidos son aplicables para el modelo T y DEBEN ser los mismos!

Rearmemos el circuito TI:



Con el circuito simplificado procedemos a determinar los valores solicitados.

$\frac{V_o}{V_{in}}$



Del circuito notamos que $\boxed{V_G = V_{in} \quad y \quad V_S = V_o}$

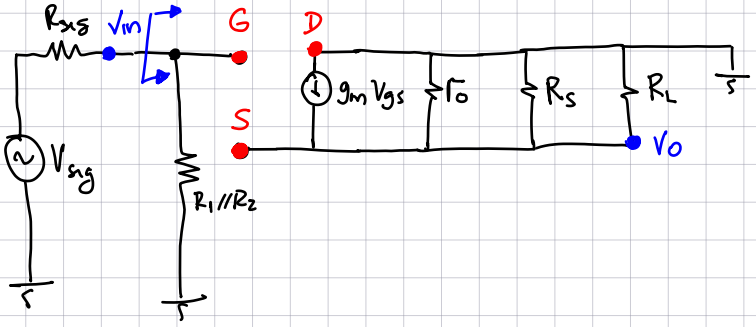
$$\Rightarrow \quad g_m \cdot (V_{in} - V_o) = \frac{V_o - 0}{r_o // R_S // R_L} \Rightarrow g_m V_{in} = V_o \left(g_m + \frac{1}{r_o // R_S // R_L} \right)$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{g_m}{g_m + \frac{1}{r_o // R_S // R_L}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{g_m (r_o // R_S // R_L)}} \overset{R_L \to \infty}{=} 0.84 \frac{V}{V}}$$

* Sin R_L es lo mismo que $R_L \to \infty$ (¡circuito abierto!)

* $g_m = 1.78 \frac{mA}{V}$.

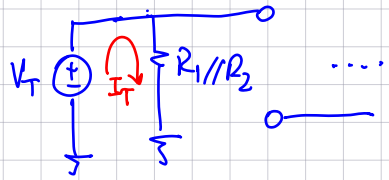
R_{in}



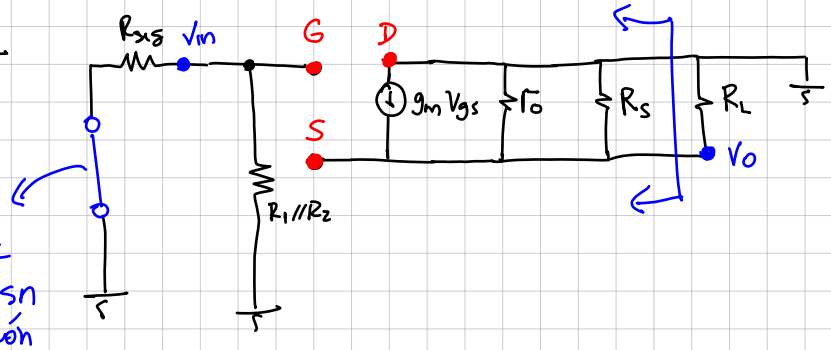
Sale por inspección!

↳ $R_1 // R_2 = 0.66\,M\Omega$

O bien por fuente de prueba:

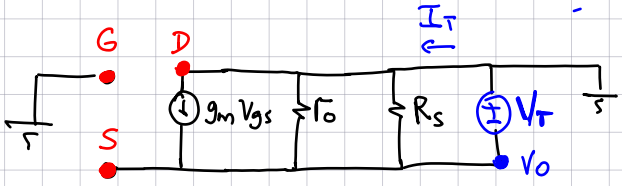


R_{OUT}



Rout se calcula sin excitación

↳ $V_G = V_{in} = 0\,V$, pues no hay corriente por R_{sig} y $R_1 // R_2$.



$\Rightarrow$ $V_G = 0$, $0 - V_o = V_T$ y $V_S = V_o$

$V_S = -V_T$

Ahora:

$$I_T = \frac{V_T}{R_S // r_o} + g_m V_{gs}$$

$$I_T = \frac{V_T}{R_S // r_o} + g_m \left(0 - (-V_T)\right)$$

$$I_T = \frac{V_T}{R_S // r_o} + \frac{V_T}{1/g_m}$$

$$\Rightarrow \frac{V_T}{I_T} = R_{OUT} = R_S // r_o // \frac{1}{g_m} = 0.472\,k\Omega$$

* $g_m = 1.78\ \frac{mA}{V}$

P2: Alan y sus problemas... el 2 en 1 (15 puntos)

Alan Brito Delgado, por pandemia dejó de ejercitarse en electrónica lo suficiente y últimamente ha tenido muchos problemas para analizar circuitos lo que lo ha hecho dependiente de usted para ayudarlo. Ésta vez le trae éste circuito:

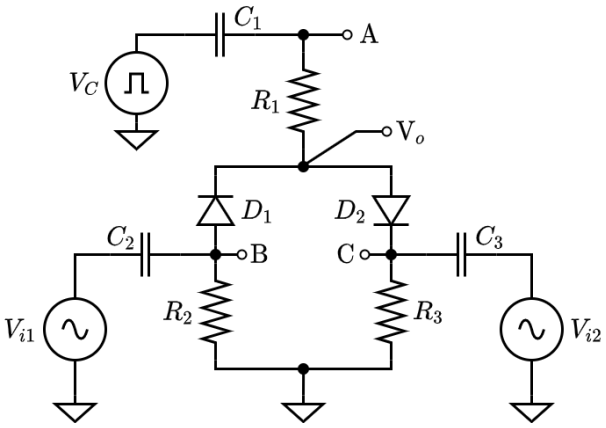


Figura 2: Otro Circuito de Alan

Según leyó por ahí, este circuito *dibuja* dos señales simultáneamente en su salida. Sin embargo, no puede entender cómo es que el circuito funciona. En pos de ayudarle, usted debe analizar la operación del circuito para explicarle detalladamente como lo hace.

Del circuito se sabe que:

- La fuente V_C corresponde a un pulso cuadrado de alta frecuencia (finita), cuyos valores máximo y mínimo corresponden a 10 [V] y 0 [V] respectivamente. Las notas manuscritas del circuito indican que es una especie de señal de control.
- Las fuentes V_{i1} y V_{i2} corresponden a señales de entrada externa cuyas magnitudes pico-pico son inferiores o iguales a 5 [V], no tienen componente DC y su frecuencia es mucho menor a la del pulso cuadrado.
- Los diodos, capacitores y resistores son **ideales**.
- Las resistencias R_1, R_2 y R_3 son iguales con valor R, y los capacitores C_1, C_2 y C_3 se pueden considerar muy grandes e inicialmente están descargados.

A continuación, responda las siguientes preguntas:

a) ¿Cuál sería la función de los capacitores C1, C2 y C3? (eliminación de componente DC, acoplamiento, bypass, etc...)

b) Dibuje la forma de onda de voltaje que se observaría en el nodo A (V_A), ubicado entre C_1 y R_1.

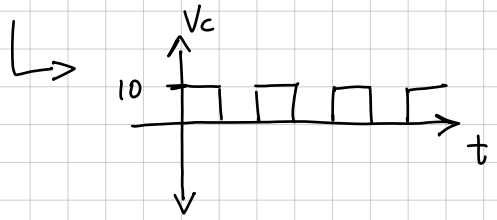
c) Teniendo en cuenta la forma de onda anterior y asumiendo entradas $V_{i1} = V_{i2} = 0$, explique cómo esta afecta los voltajes en los nodos B y C y la conducción de los diodos.

d) Ahora integre las ondas de entrada y explique cómo se forma y compone el voltaje de salida V_o. Apóyese en dibujos y gráficas de tiempo y tenga en consideración el estado de conducción de los diodos.

e) Dibuje el voltaje que se obtiene a la salida V_o, si las entradas son $V_{i1} = 1 \cdot sin(\omega \cdot t)$ y $V_{i1} = 1 \cdot sin(2\omega t)$

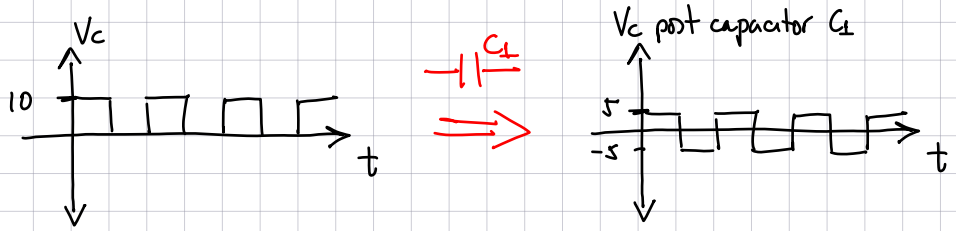
P2)

a) Viendo el circuito, V_c es una señal cuadrada 0 a 10 Volts



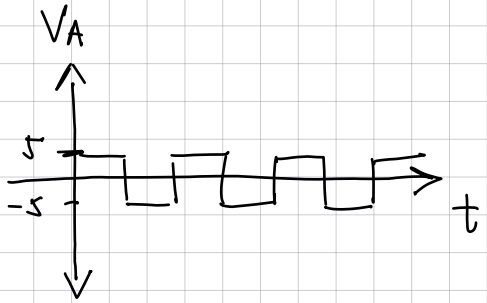
$\Rightarrow$ la señal cuadrada tiene una componente DC de 5V.

Así C_1 cumple la función de eliminar la componente DC de V_c



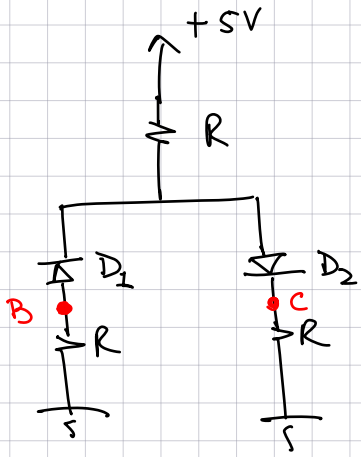
Y $C_2 - C_3$ son capacitores para acoplar las señales V_{i1} y V_{i2} a los nodos B y C respectivamente. Estos nodos B y C probablemente tengan alguna componente DC dependiendo del estado de conducción de los diodos y la señal V_c.

b) El nodo V_A es el nodo post capacitor C_1, por lo que es esperable ver la señal de control sin DC:

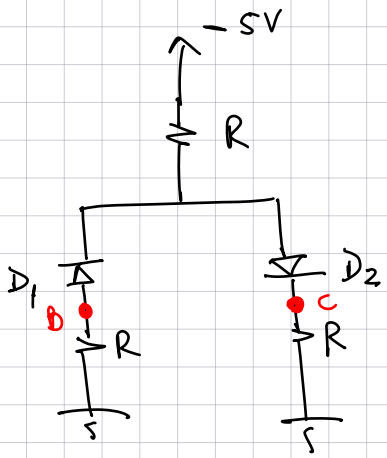


c) Si consideramos esta forma de onda (V_A), el circuito parecería comportarse como uno con red de alimentación variable.

Dibujamos los circuitos a continuación:



Y



↳ Acá solo puede conducir D2, dejando:

$V_{(C)} = \frac{5}{2R} \cdot R = 2.5V$

$V_{(B)} = 0$ dado que D_1 está abierto

↳ Acá solo puede conducir D1, dejando:

$V_{(B)} = \frac{-5}{2R} \cdot R = -2.5V$

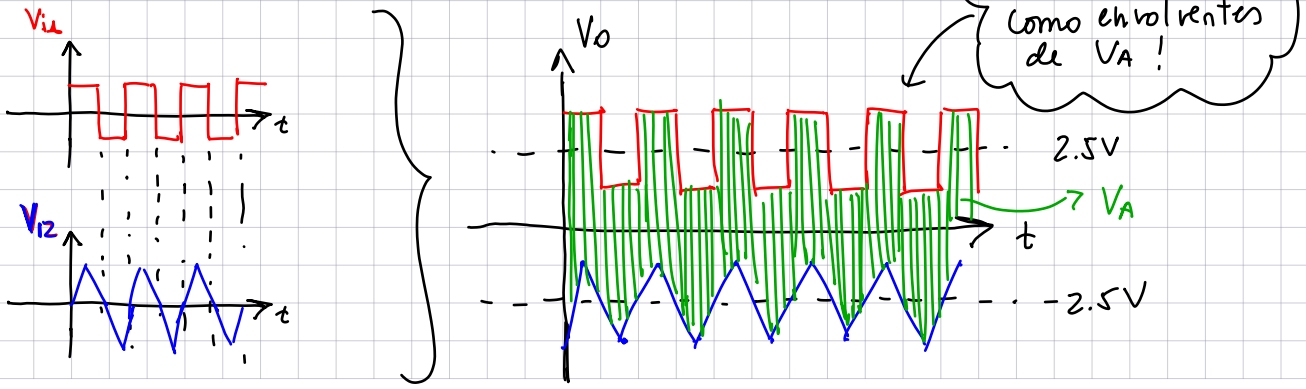
$V_{(C)} = 0$ dado que D_2 está abierto

Esto confirma el hecho que C_2 y C_3 cumplen función de capacitores de acople.

d) Si ahora consideran el hecho que V_{i1} y V_{i2} corresponden a señales de frecuencia finita es de esperar que C_2 acople V_{i1} a $V_{(B)}$ cuando D_1 está conduciendo y C_3 acople V_{i2} a $V_{(C)}$ cuando D_2 conduce. Evidentemente la salida V_o será $V_{(B)}$ o $V_{(C)}$ según el diodo que conduzca y el estado de la señal de control V_c.

Si V_{i1} = Cuadrada de 1 Vpeak sin DC

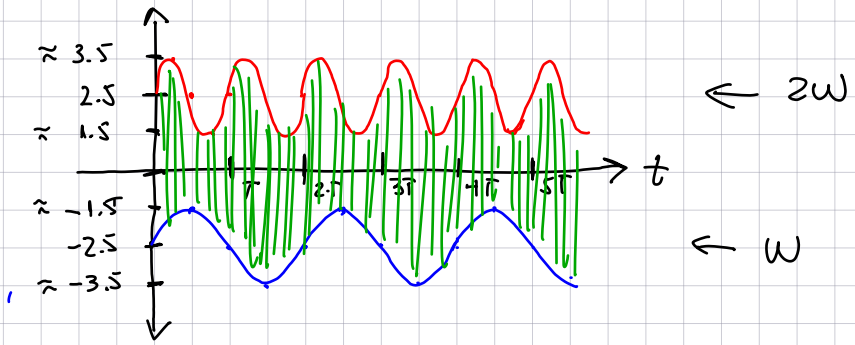
V_{i2} = Triangular de 1 Vpeak sin DC



e) De lo anterior, dibujar la salida es bastante sencillo:

$V_{i1} = 1 \cdot \sin(\omega t)$, periodo $2T$

$V_{i2} = 1 \sin(2\omega t)$, periodo T



P3: Alan Brito y sus Matemáticas (10 puntos)

Ésta vez Alan le trae el siguiente circuito para que lo analice:

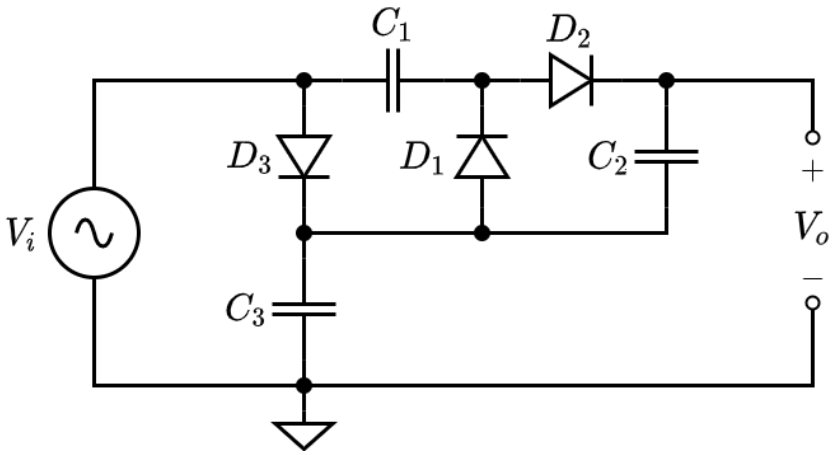


Figura 3: Un circuito más de Alan

Para ponerlo en contexto, en un laboratorio de alto voltaje le pidieron analizar este circuito, sin embargo su topología es un poco rara y enrevesada y Alan se encuentra bloqueado.

Del circuito se sabe que:

- El voltaje de entrada corresponde a una onda sinusoidal pura con amplitud V_p
- Los diodos son **ideales**.
- Los capacitores tienen capacitancia muy grande e inicialmente se encuentran descargados.

En su vasta experiencia en Electrónica, Alan tiene la idea de que éste circuito debe ser un multiplicador de voltaje, sin embargo tiene poca intuición sobre cómo funciona y por cuánto multiplica.

Alan le pide que lo ayude a analizarlo para entender mejor su funcionamiento y poder implementarlo adecuadamente en el laboratorio y llega con las siguientes preguntas:

a) ¿Qué pasa con los capacitores, a medida que varía el voltaje de entrada?

b) ¿Cómo es el proceso de carga de los capacitores?

c) ¿Cómo es el flujo de corriente de carga al interior de cada capacitor en el proceso?

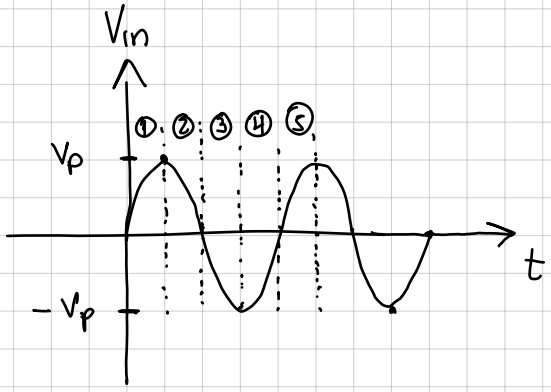
d) ¿Con cuánto voltaje se carga finalmente cada capacitor?

e) ¿En qué relación quedan el voltaje de salida y el voltaje de entrada?

f) Dado que debe hacerse una implementación en el laboratorio y los capacitores tienen voltajes nominales límites de carga, ¿cuál sería el mínimo voltaje teórico necesario para los mismos de forma que ninguno falle/explote durante las pruebas? Nota: No considere márgenes de seguridad.

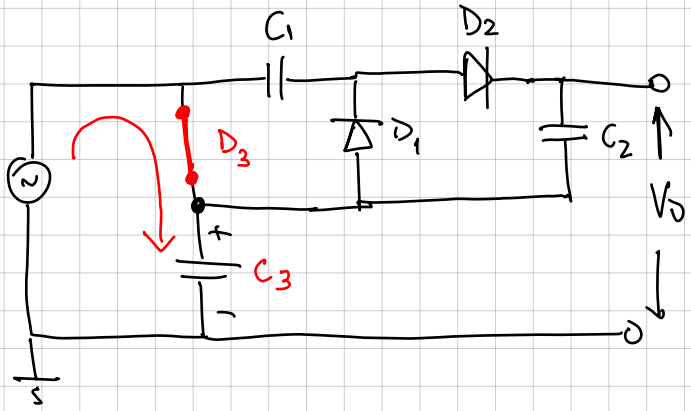
HINT: Para analizar este problema se le recomienda analizar lo que sucede con el circuito en una ventana de tiempo dada por un par de ciclos de entrada.

P3| Un grafico explica más que mil palabras:



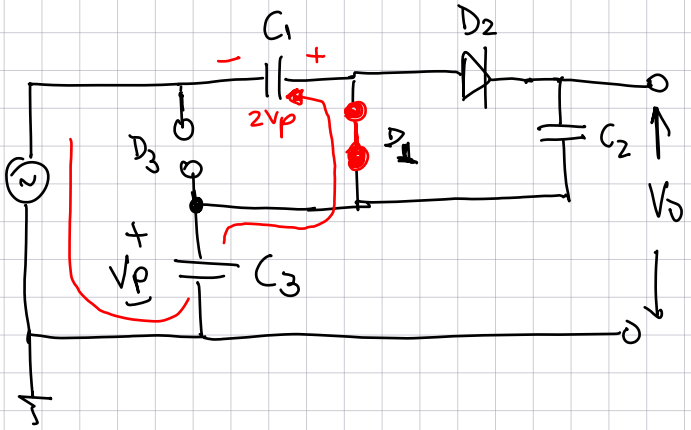
Que sucederá con el circuito en cada una de las etapas 1 a 5 del voltaje de entrada.

①



- D3 queda en polarización directa y C3 se carga hasta Vp
- D3 al conducir, cortocircuita la rama a la derecha impidiendo la carga y conducción de dicha sección del circuito.

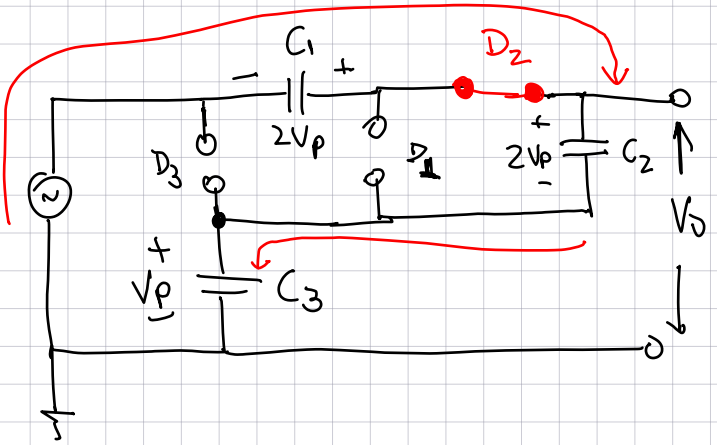
②-③



- D3 queda en polarización inversa y D1 en polarización directa cortocircuitando el lado D2-C2.
- C1 se carga con la diferencia entre Vin - Vc3. Esta diferencia alcanza un peak de 2Vp cuando Vin alcanza su peak negativo.

Así, C1 se carga con 2Vp.

④-⑤



- D3 y D1 quedan en polarización inversa y D2 queda en directa
- Esto permite cargar el capacitor C2 con un voltaje igual a:

$$V_{in} + V_{C1} - V_{C3}.$$

Que tiende finalmente a 2Vp.

Una vez que el capacitor final toma el voltaje $2V_p$, todos los diodos quedan en polarización inversa dejando un voltaje de salida

$$V_o = V_{C2} + V_{C1} = 2V_p + 1V_p = 3V_p.$$

De esta forma el multiplicador es un triplicador.

Y para asegurar la correcta operación de los capacitores debemos conseguir que sus voltajes nominales sean al menos sus voltajes finales de carga.

↳ $C_3 \Rightarrow V_p$.

C_1 y $C_2 \Rightarrow 2V_p$.

Notas:

* Recuerde que al inicio de la carga, si un capacitor está descargado su voltaje es 0 (un cortocircuito)

* Si $C \rightsquigarrow \infty \Rightarrow I = C \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow \frac{dV}{dt} \rightsquigarrow 0$

lo que implica que retiene su voltaje de carga.

P4: Relajaditos... (10 puntos)

1. (5 pt.) - Otro clásico... pero Digital.

   Complete la tabla en donde se definen un conjunto de valores para las entradas del circuito digital CMOS de la siguiente figura. Indique si los transistores M1, M2, M3 y M4 operan como corto-circuitos (CC) o circuitos-abiertos (CA) y el valor de la salida Y (0/Tierra o $1/V_{DD}$) para cada fila.

   Nota: Si en un transistor su voltaje V_S no puede ser definido, asuma que éste opera en circuito abierto.

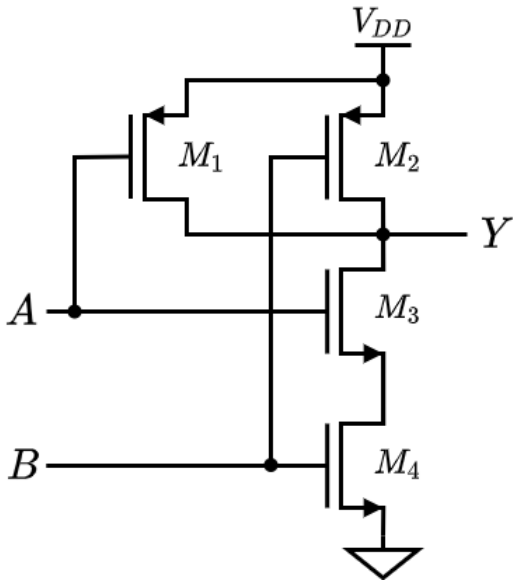


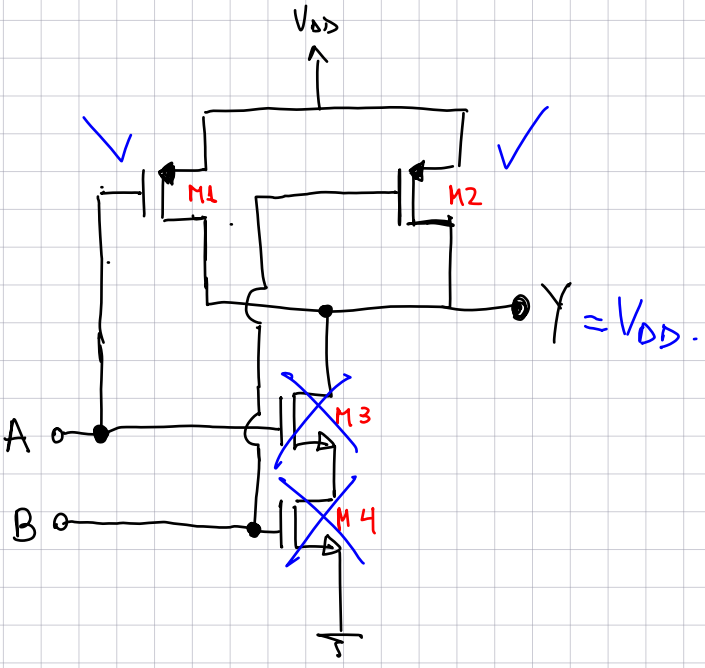
Figura 4: Circuito Digital CMOS.

- Los MOSFETs actúan como interruptores ideales. Es decir, circuito-abierto cuando están apagados y cortocircuito cuando están encendidos.
- Voltaje de threshold para transistores NMOS es 1 V.
- Voltaje de threshold para transistores PMOS es -1 V.
- El voltaje del riel de alimentación del circuito es $V_{DD} = 5$ V.
- Un 1 lógico equivale a V_{DD} y un 0 lógico equivale a Tierra.

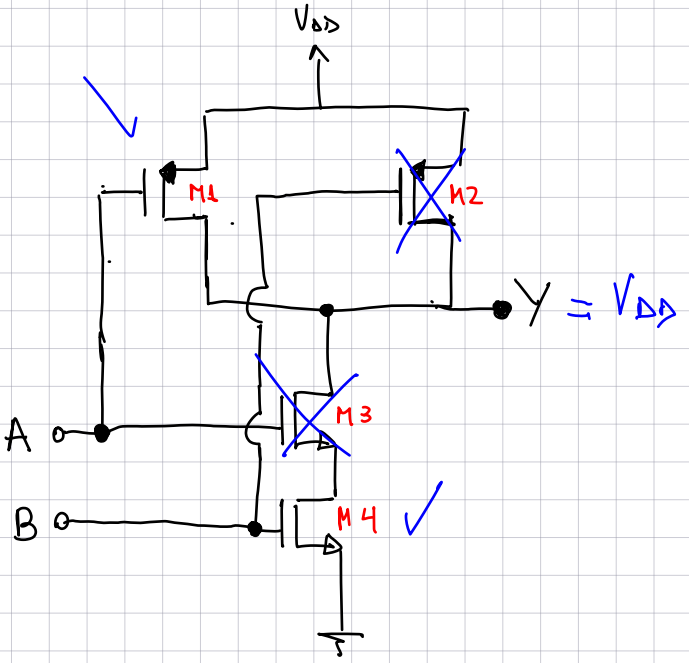
Tabla 1: Tabla Problema 4 (Parte 1)

A	B	M1	M2	M3	M4	Y
0	0					
0	1					
1	0					
1	1					

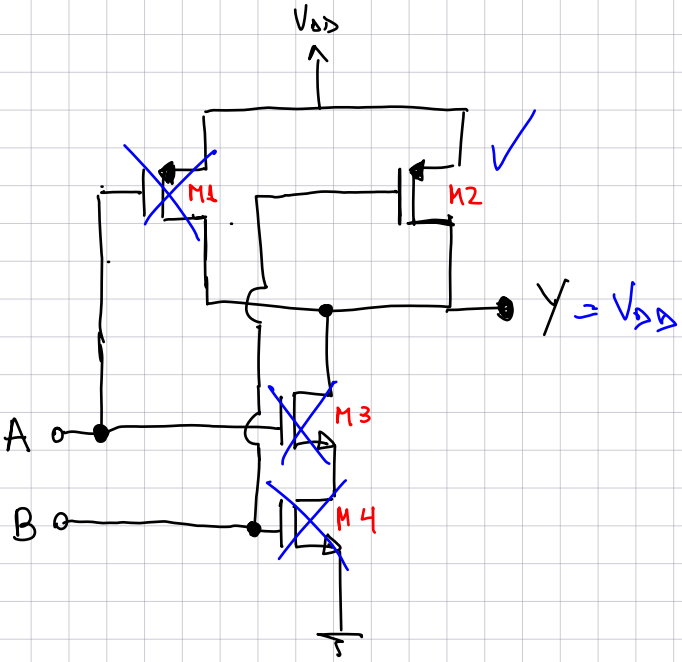
P4 A | Compuerta NAND (NOT-AND)



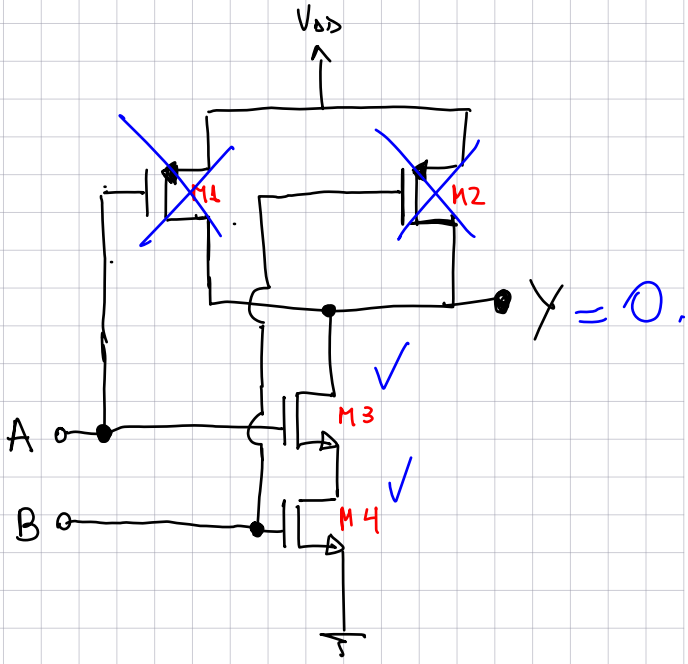
A = 0, B = 0



A = 0, B = 1 (V_{DD})



A = 1 (V_{DD}), B = 0 (0)



A = 1 (V_{DD}), B = 1 (V_{DD})

2. (5 pt.) - Alan, vuelve con sus problemas.

Para el Laboratorio de Electrónica Analógica y Digital está haciendo un transmisor de luz infrarroja usando un Arduino, un MOSFET y un LED infrarrojo, según la topología siguiente:

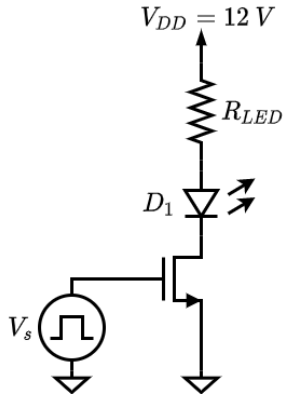


Figura 5: Driver LED con MOSFET.

De los componentes del circuito se sabe:

- El arduino entrega una señal cuadrada entre 0 y 5[V] de 1 [Hz].
- El transistor tiene un $V_t = 1$ [V], y constante constructiva dada por $k_n = \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} = 2\ [\frac{mA}{V^2}]$
- El LED infrarrojo al conducir tiene un voltaje de conducción de 2 [V] constante. Su corriente nominal es 5 [mA] y su máxima corriente sin quemarse es de 10 [mA].
- El voltaje del riel de alimentación es $V_{DD} = 12$ [V].

Alan olvidó cómo funcionan los MOSFETs y está muy nervioso por lo que le pide ayuda para su diseño. A continuación responda:

a) Determine la resistencia R_{LED} necesaria en el circuito para polarizar el diodo LED con su corriente nominal y el voltaje V_{DS} al que opera el transistor. *No use aproximaciones para este cálculo.*

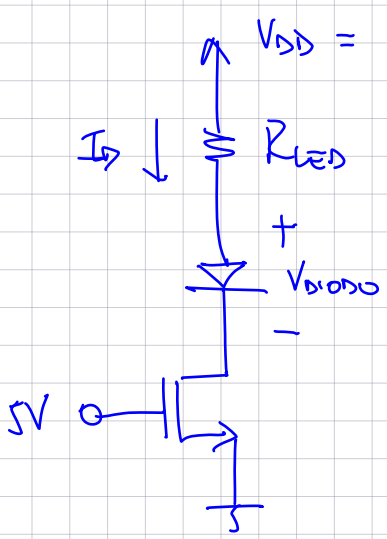
b) Determine la resistencia r_{ds} del transistor al emplear la resistencia R_{LED} calculada previamente. *Use la aproximación que estime pertinente para este cálculo.*

c) Alan le dice que el valor de R_{LED} que usted calculó no está disponible en el laboratorio, pero que tienen resistencias de 0.7 [kΩ] y está listo para probar. Evalúe técnicamente y justifique si es posible usar dicha resistencia para el diseño e indique a Alan si su circuito va a funcionar adecuadamente o fallar tristemente.

P4B | En este problema, resulta evidente fue el transistor opera en modo switch (corte/triodo)

→ Cuando Arduino provee 0V, el transistor opera en corte.
→ Cuando Arduino provee 5V, el transistor opera en triodo

Analizamos el circuito con el transistor en triodo.



$V_{GS} = 5V$

$V_t = 1V$

$k_n = \mu C_{ox} \frac{W}{L} = 2 \frac{mA}{V^2}$

$\Rightarrow V_{OV} = 4V.$
(impuesto por Arduino)

Las ecuaciones que definen el comportamiento del circuito son:

(1) $V_{DD} - R_{LED} \cdot I_D - V_{DIODO} = V_{DS}$

(2) $I_D = k_n \cdot \left(V_{OV} \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$

Resolviendo el sistema de ecuaciones para $I_D = 5mA$, $V_{DIODO} = 2$ logramos los valores posibles para R_{LED} y V_{DS}

(1) $R_{LED} = 0.53k\Omega$, $V_{DS} = 7.31V > V_{OV}$ (X)

(2) $R_{LED} = 1.86k\Omega$, $V_{DS} = 0.68V < V_{OV}$ (✓).

b) Bajo el R_{LED} calculado, el transistor opera como una resistencia (triodo)

↳ $I_D = k_n \left(V_{OV} \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$, como $V_{DS} < 1$ podemos hacer la aproximación:

$$I_D = k_n \left(V_{OV} \cdot V_{DS} \right) \Rightarrow \frac{V_{DS}}{I_D} = r_{ds} = \frac{1}{k_n \cdot V_{OV}} = \frac{1}{2 \frac{mA}{V^2} \cdot 4V} = \frac{1}{8} k\Omega = 0.125 k\Omega$$

c) Alan informa que solo hay disponibles resistencias de 0.7kΩ para la implementación. Por lo tanto desconocemos como operará el circuito (I_D, V_{DS})

Podemos asumir que opera en triodo y resolver el mismo sistema de ecuaciones previo, solo que nuestras variables desconocidas son I_D y V_{DS}.

↳ (1) $V_{DD} - R_{LED} \cdot I_D - V_{Diodo} = V_{DS}$

(2) $I_D = k_n \cdot \left(V_{OV} \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$

(1) $I_D = 3.52\,mA$, $V_{DS} = 7.53\,V > V_{OV}$ ✗

(2) $I_D = 11.57\,mA$, $V_{DS} = 1.89\,V < V_{OV}$ ✓

Podemos asegurar que el transistor seguirá en modo triodo, pero la corriente es mas alta que la que soporta el diodo LED por lo que éste se quemará instantaneamente.