



Electrónica Analógica

Ejercicios

Versión: 2015-11-09

Capítulo 9: **Diodos**

Referencias:

Texto base: *Circuitos Electrónicos. Análisis simulación y diseño*,
de Norbert R. Malik. Capítulo 3, secciones 3.7,
3.9, 3.10 y 3.14

Otros: Elaborados por los profesores de la materia.

Control de versiones

- 2015-11-09. Versión inicial. En esta versión se incorpora un código orientativo para la preparación y estudio de los ejercicios. Se tienen las siguientes categorías y recomendaciones (calificadas entre uno y dos asteriscos):
 - **(*) Ejercicios básicos:** estos ejercicios son aconsejables para la primera aproximación a este tema. Sirven como estudio de los conceptos básicos y técnicas de análisis (o diseño) correspondientes.
 - **(**) Ejercicios fáciles:** su resolución necesita de un conocimiento y una capacidad operativa algo más exigente que los ejercicios básicos. Se aconseja abordarlos después de haber alcanzado un cierto grado de soltura con los ejercicios básicos.
 - **(***) Ejercicios complejos:** bien por su longitud, su operativa o por necesitar de conocimientos y destrezas más completos, son los ejercicios más exigentes para los alumnos. No se aconseja abordarlos sin haber conseguido antes un cierto grado de soltura con los ejercicios básicos y fáciles.

1. Configuraciones y propiedades básicas

Nota: Algunos de los problemas siguientes están extraídos del libro de Malik. En esos casos, la numeración del mismo se indica entre paréntesis y en las figuras. Algunos enunciados han sido cambiados ligeramente.

D-1.-(*) (3.29 Malik) Los diodos de la figura P3.29 son ideales. Suponiendo que ambos diodos se encuentran en situación de corte,

- ¿Cuál sería el circuito equivalente del circuito planteado?
- ¿Qué diodo da una contradicción y cuál es dicha contradicción? (obtener resultado cuantitativo)

Haciendo una nueva suposición acerca del estado de los diodos

- ¿Cuál es el nuevo circuito equivalente?
- Calcular el valor de v_o en la figura.

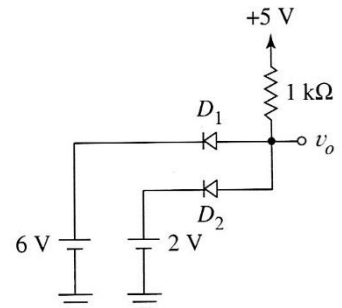


FIGURA P3.29

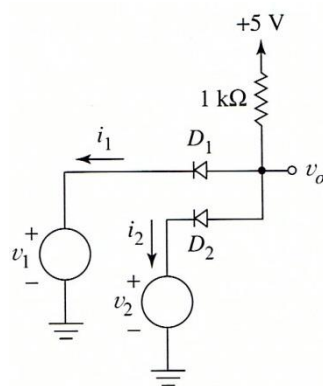


FIGURA P3.30

D-2.-(*) (3.30 Malik) Hallar los valores de v_o , i_1 e i_2 en el caso de que los diodos de la figura P3.30 sean ideales y se cumplan las siguientes condiciones

- $v_1=5V$, $v_2=0.2V$
- $v_1=0.1V$, $v_2=0.3V$
- $v_1=5.1V$, $v_2=5.3V$

Si se emplea el modelo con tensión de codo de un diodo de silicio, ¿cómo son los valores v_o , i_1 e i_2 en los casos anteriores?

D-3.-()** (3.32 Malik) Suponiendo que los diodos de la figura P3.32 son ideales, calcular i_1 e i_2 cuando

- $v_1=0.2V$
- $v_1=-9V$

Si se emplea el modelo con tensión de codo de un diodo de GaAs,

- Calcular i_1 e i_2 para los valores de v_1 de los apartados a) y b)

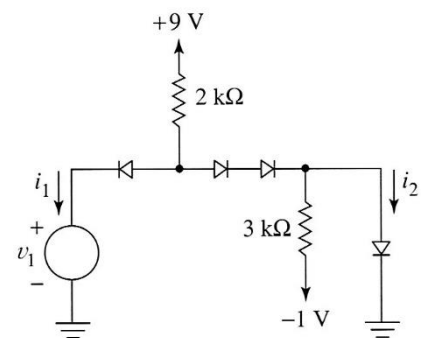


FIGURA P3.32

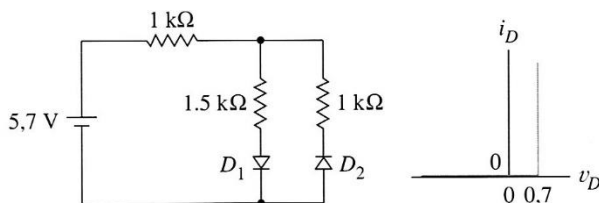


FIGURA P3.35

D-4.-(*) (3.35 Malik) Los dos diodos del circuito de la figura P3.35 tienen la misma curva característica, representada en la misma figura. Mientras que el diodo D_1 conduce, D_2 está cortado.

Representar sobre la característica I-V los puntos de funcionamiento de cada uno de los diodos, indicando su valor numérico

D-5.-(*) (3.36 Malik) Hallar los valores máximo y mínimo de V_{BB} en el circuito regulador de la figura P3.36, teniendo en cuenta que el diodo zener de 5V tiene una corriente inversa mínima de 10mA y su potencia máxima disipada es de 1W.

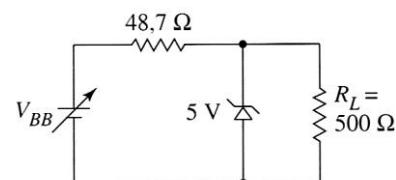


FIGURA P3.36

D-6.-(*) (3.38 Malik) Dibujar el circuito equivalente para el regulador de tensión zener de la figura 3.30 usando el modelo zener de la figura 3.29c.

- Para los valores de $V_{BB} = 9V$, $R_3 = 10\Omega$, $V_z = 6.8V$ y $r_z = 0.1\Omega$, escribir la ecuación de la tensión de salida en función de R_L .
- Representar la ecuación obtenida en el apartado a) (esta sería la *curva de regulación de tensión para el circuito regulador*)

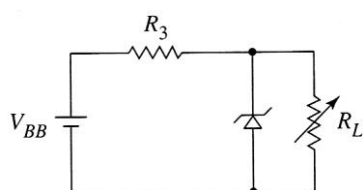


FIGURA 3.30

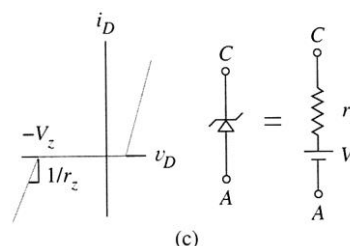


FIGURA 3.29

D-7.-()** (3.39 Malik) El diodo del circuito de la figura P3.39 es de silicio y su tensión de codo varía linealmente con la temperatura con una pendiente de $-2mV/^{\circ}C$. Escribir y representar la tensión de salida del circuito v_o en función de T .

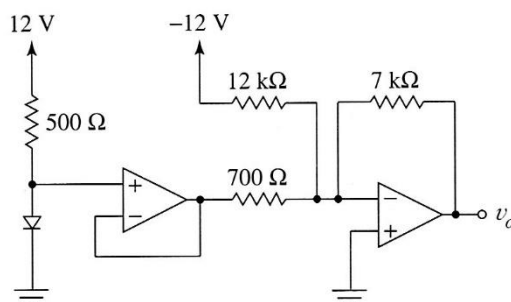


FIGURA P3.39

D-8.-()** (3.40 Malik) A $27^{\circ}C$ el diodo del circuito de la figura P3.40 está cortado. Si a dicha temperatura se tiene que $I_s = 2 \times 10^{-14}A$ y que ésta varía de acuerdo con la ecuación $I_s(T) = I_s(T_R) \times 2^{(T-T_R)/5}$, calcule la temperatura a la que el diodo empieza a conducir apreciablemente (considere que esto ocurre con una tensión V_{γ} , de valor 0.5V para el Si)

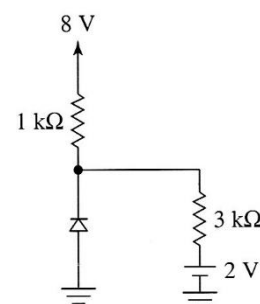


FIGURA P3.40

D-9.-()** En el circuito de la Figura 1, calcule el margen de valores de R_2 , para que el diodo D_2 conduzca con una corriente constante.

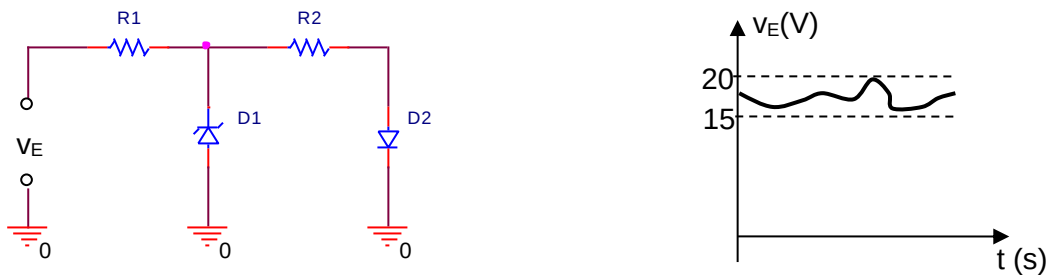
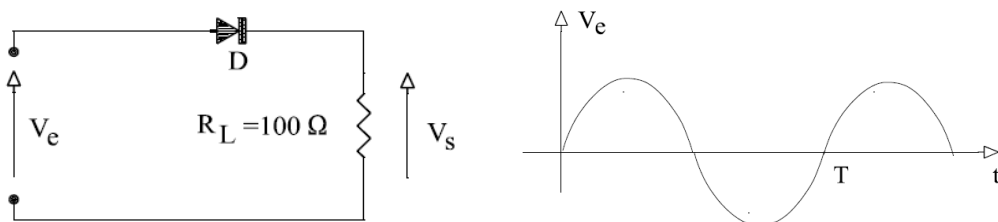


Figura 1

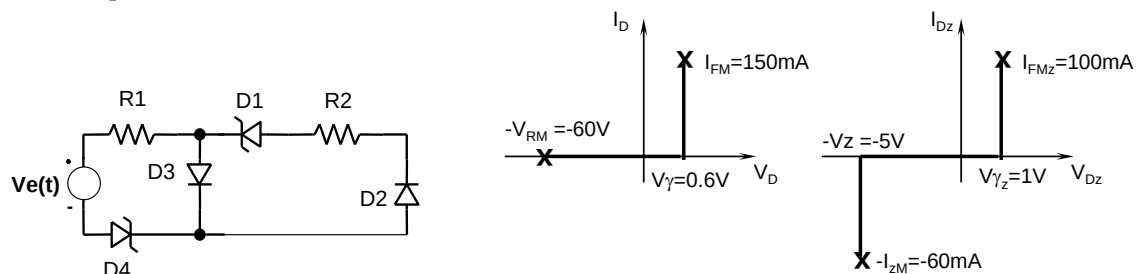
DATOS: $R_1 = 47 \Omega$



D-10.-(*) Calcular la tensión máxima en inverso (V_{RM}) y la corriente máxima en directo (I_{FM}) que debe soportar el diodo del circuito mostrado en la figura para que pueda trabajar con la tensión de red eléctrica doméstica, que se corresponde con la entrada V_e en la figura. Considérese el diodo con una tensión de codo nula ($V_\gamma=0$).



D-11.-(*)** Considerar el circuito mostrado en la figura 6, junto con las características correspondientes a cada uno de los dos tipos de diodos:



Datos: $R_1=R_2=1 \text{ k}\Omega$; $V_e(t) = A \sin(\omega t)$

- Calcular los valores máximos que puede tomar la amplitud (A) del generador de tensión sin que se deteriore ninguno de los componentes.
- Si $A=10\text{V}$, calcular el punto de trabajo en los distintos diodos para los valores extremos de amplitud.

2. Conformadores de onda. Limitadores.

D-12.-(*) (3.43 Malik) Dibujar la función de transferencia para los circuitos mostrados en la figura P3.43:

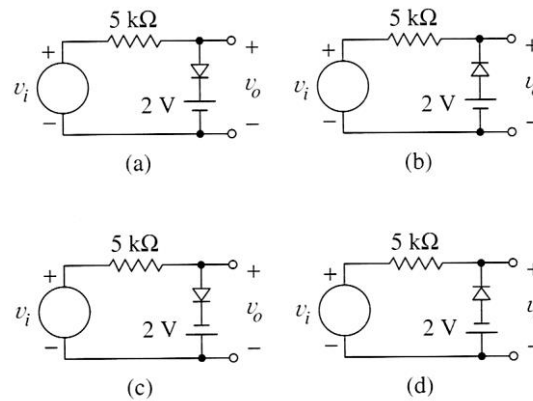


FIGURA P3.43

D-13.-()** (3.44 Malik) Sobre el circuito de la figura P3.44, cuyo diodo tiene la característica representada en la misma,

- Escribir la ecuación para v_o en función de v_i cuando el diodo está cortado
- Hallar la tensión de entrada v_i para la que el diodo empieza justo a conducir
- Escribir la ecuación para v_o en función de v_i cuando el diodo está conduciendo
- Representar la función de transferencia

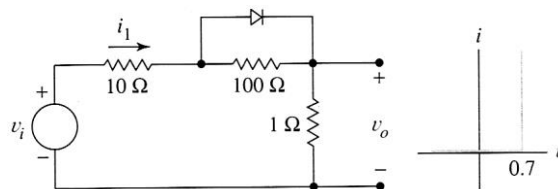


FIGURA P3.44

D-14.-()** (3.46 Malik) En el circuito de la figura P3.46, ambos diodos tiene la misma característica,

- Cuando $v_i=0$, ambos diodos están cortados con corriente cero. Redibujar el circuito remplazando los diodos por los modelos adecuados y escribir la expresión analítica de v_o en función de v_i [$v_o(v_i)$]
- Si v_i crece, ¿qué diodo empieza a conducir primero?, ¿para qué valor de v_i ?
- Redibujar el circuito, modificando el modelo para el diodo que primero empiece a conducir y escribir en ese caso la expresión de $v_o(v_i)$
- ¿Para qué valor de v_i conducirá el segundo diodo?
- Representar la ecuación de transferencia del circuito $v_o(v_i)$ a partir de ese valor

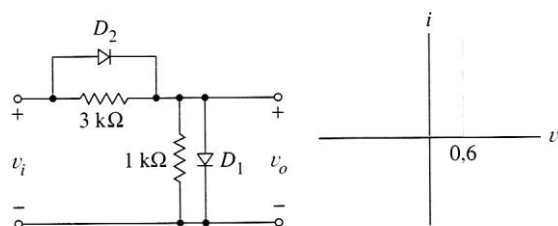


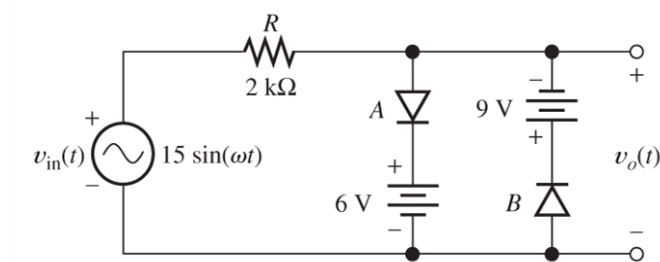
FIGURA P3.46

D-15.-()** (3.47 Malik)

- Diseñar un rectificador de media onda de forma que la componente de continua de salida sea de 9.3V y el pico de corriente entregada por el diodo sea 0.1A, y hallar el TIP (Tensión Inversa de Pico). Nota: suponer el diodo ideal.
- Reemplazar el diodo ideal del diseño inicial por un diodo real con tensión de codo de 0.7V. Para este nuevo circuito, calcular la componente continua de la tensión de salida, el pico de corriente del diodo y el TIP.

D-16.-()** (3.49 Malik) Diseñar un rectificador en puente de onda completa que proporcione una componente continua de la tensión de salida de 10V cuando se empleen diodos reales con tensión de codo de 0.7V. Calcular el TIP requerido por los diodos y especificar V_M . Obtener el valor de la resistencia de carga que da una corriente de pico del diodo de 20mA.

D-17.-(*) (Hambley) Represente la tensión de salida $v_o(t)$ y la función de transferencia del circuito mostrado en la figura.



3. Conformadores de onda con Operacionales.

D-18.-()** (3.57 Malik) Los diodos zener de la figura P3.57-(a y b) tienen $V_{on} = 0.7V$ y $V_z = 4V$

- Representar las características de transferencia de ambos circuitos
- Repetir el apartado a) tras colocar una resistencia de carga R entre cada nodo de salida y tierra
- ¿Qué conclusiones obtiene de la parte b)?

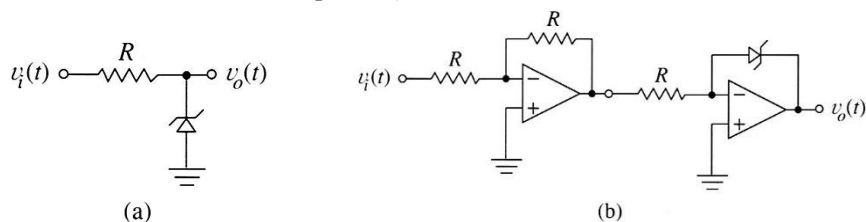


FIGURA P3.57

D-19.-()** (3.58 Malik) En la figura P3.58, la curva $V-I$ define al diodo.

- Escribir la ecuación que relaciona v_o y v_i cuando $v_i > 0$
- Escribir la ecuación que relaciona v_o y v_i cuando $v_i < 0$
- Representar la función de transferencia
- Emplear las funciones de transferencia para representar la señal $v_i(t) = 2 \sin \omega t$

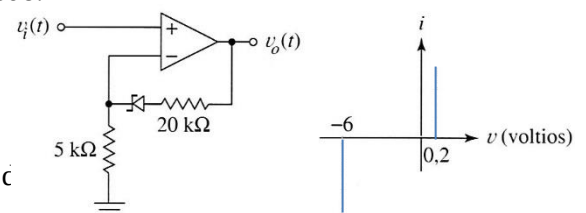
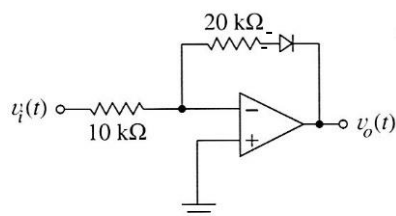


FIGURA P3.58



D-20.-()** (3.59 Malik) Repetir el ejercicio anterior (P3.15) con el circuito de la figura P3.59 (a la izquierda de este texto)

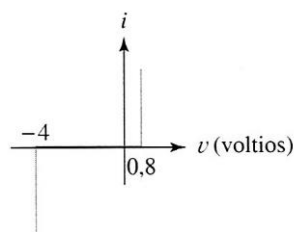


FIGURA P3.59

D-21.-(*)** (3.64 Malik)

- Use el rectificador de precisión de onda completa de la figura P-17 en un sistema que produzca una corriente de salida continua de 0-10mA con una resistencia de carga de 100Ω cuando la señal de entrada es sinusoidal con valor de pico 0-30V. La resistencia de entrada debe ser infinita y la de salida nula. Use tantos AO de ganancia infinita como desee.
- Diseñar otro sistema que difiera del anterior en que la resistencia de salida sea infinita y la corriente de salida de 0-10mA sea medida en una impedancia de carga arbitraria que tenga un terminal a tierra

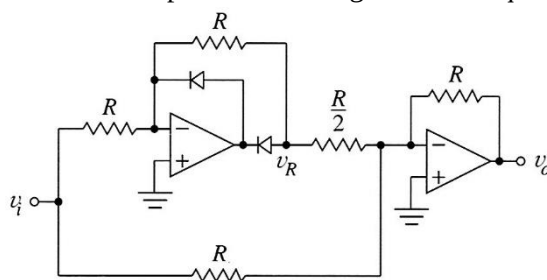


FIGURA P-17

D-22.-(*) (3.65 Malik) Los diodos zener del comparador de la figura P-18 tienen características como las representadas en la figura P3.58.

- Dibujar la función de transferencia del comparador $v_o(v_d)$, donde $v_d = v_a - v_b$
- Dibujar la señal de salida respecto al tiempo si $v_d(t) = v_a(t) - v_b(t)$ es una onda cuadrada que conmuta instantáneamente entre -1V y +1V y el amplificador operacional no tiene limitaciones dinámicas.

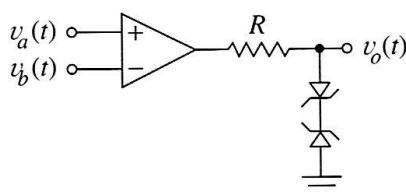
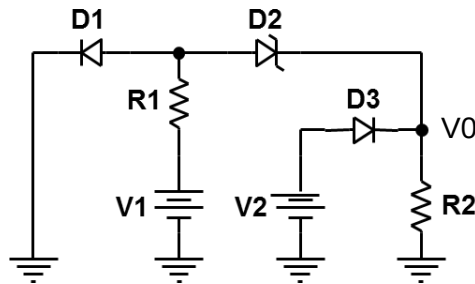


FIGURA P-18

4. Otros circuitos con diodos

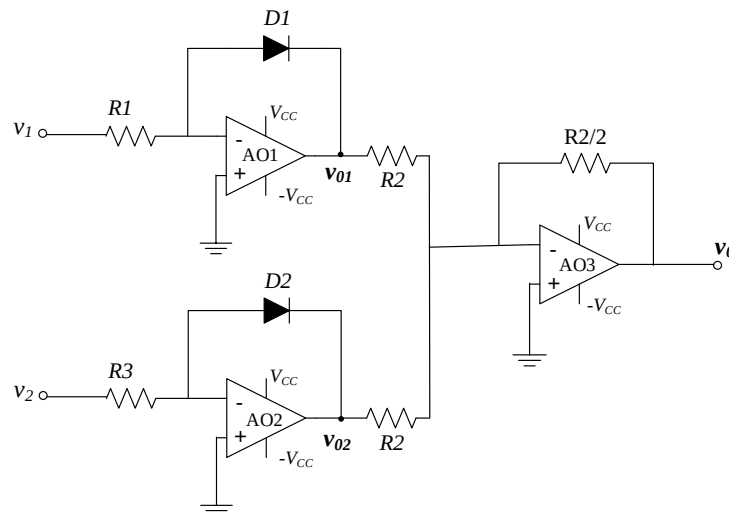
D-23.-(*)** Considere el circuito mostrado en la figura formado por dos diodos rectificadores (D1 y D3) y uno Zener (D2) junto con dos fuentes de tensión en continua (V1 y V2) caracterizados por los valores que se adjuntan. Calcular el punto de trabajo de los distintos diodos así como la tensión de salida (V0).



DATOS

$V_1 = 10 \text{ V}$
 $V_2 = 5 \text{ V}$
 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$
 $V_\gamma = 0.6 \text{ V}$
 $|V_Z| = 5 \text{ V}$

D-24.-()** Se dispone del circuito mostrado en la figura 2 formado por amplificadores ideales y diodos también ideales caracterizados por la ecuación de Shockley: $i_D = I_S \cdot (\exp(qV_D/KT) - 1)$.



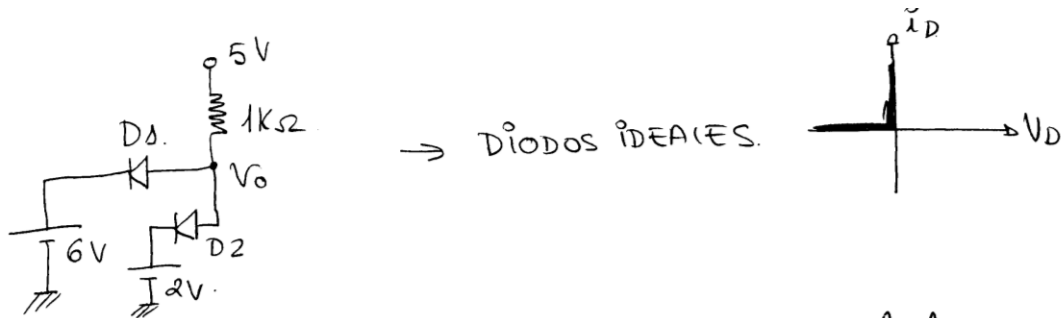
- Calcule la expresión analítica de la salida del sistema (V_0) en función de V_1 y V_2 .
- Calcule la expresión analítica de la salida parciales de los operacionales de entrada (AO1 y AO2), esto es:
 $V_{01} = f(V_1)$ y $V_{02} = f(V_2)$.
- Si el AO3 tuviera una corriente de polarización I_B , y una corriente de offset nula ¿cómo afectaría esto a la salida V_0 ? (Justifique la respuesta dando la expresión analítica de V_0 debida exclusivamente a I_B)

Capítulo 9:
Diodos

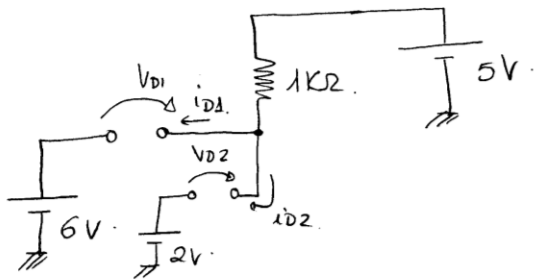
Soluciones a los ejercicios propuestos

1. Configuraciones y propiedades básicas

D-1.-



a) Suponiendo ambos diodos en corte, circuito equivalente.



b) ¿Qué diodo da una contradicción y cuál es ésta.
Analizando el circuito, no circula corriente por las ramas de los diodos ni tampoco por la de la resistencia (suma de los anteriores). Por lo tanto, los "puntos de polarización" de los diodos son:

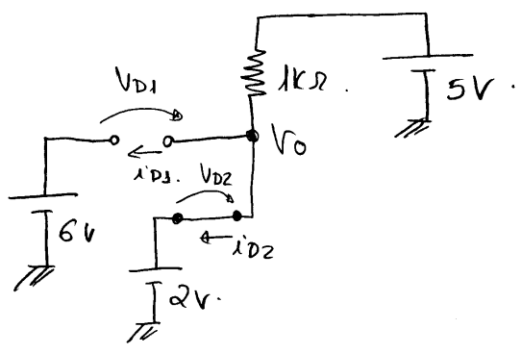
$$D_1 \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = 5 - 6 = -1V \end{array} \right\} \rightarrow \text{OK en OFF.}$$

$$D_2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = 5 - 2 = 3V \end{array} \right\} \rightarrow \text{No está en OFF. CONTRADICCIÓN}$$

Por lo tanto, la suposición inicial no es correcta.

c) Haciendo una nueva suposición sobre el estado de los diodos, ¿nuevo circuito equivalente?
La pila de 6V (mayor tensión del d.o) está directamente en el camino de D₁, por lo que D₁ sí quedará en OFF. Sin embargo,

al estar D_1 en OFF, D_2 queda en una rama en la que la mayor tensión estará en su ánodo (corriente entrante por el ánodo).
 Por lo tanto, suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D_1 \text{ en OFF} \\ D_2 \text{ en ON} \end{array} \right.$



$$D_1 \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = 2 - 6 = -4V \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Bien} \\ \text{en OFF} \end{array} \right.$$

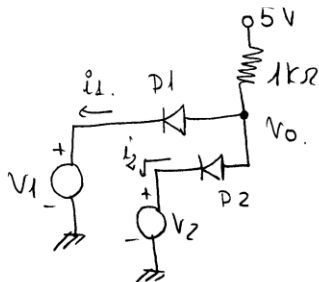
$$D_2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = \frac{5-2}{1K} = 3mA \\ V_{D2} = 0 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Bien} \\ \text{en ON} \end{array} \right.$$

En este caso, la suposición es correcta.

d) Calcular el valor de V_o

$$V_o = 2V$$

D-2.-

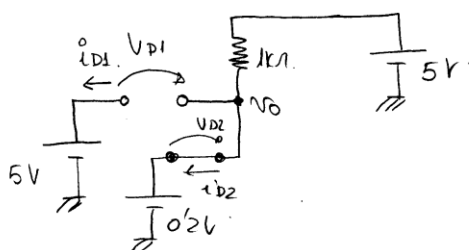


Diodos ideales.
 Calcular V_o , i_1 e i_2

a) $V_1 = 5V$ y $V_2 = 0.2V$

Suposición razonada: D_2 tiene su cátodo a una tensión pequeña respecto a los 5V, por lo que lo suponemos en ON.
 Con D_2 en ON, V_o quedaría a 0.2V, y por lo tanto D_1 en OFF.

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D_1 \text{ en OFF} \\ D_2 \text{ en ON} \end{array} \right.$



$$D_1 \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = 0.2 - 5 = -4.8V \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Bien} \\ \text{en OFF} \end{array} \right.$$

$$D_2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = \frac{5-0.2}{1K} = 4.8mA \\ V_{D2} = 0 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Bien} \\ \text{en ON} \end{array} \right.$$

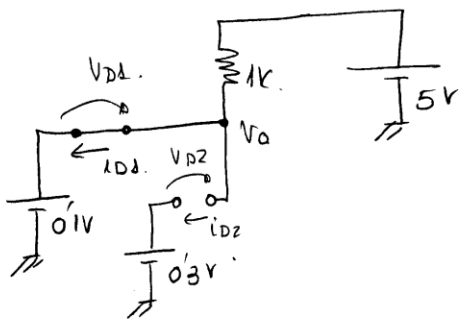
Suposición correcta, y obtenemos:

$$\begin{aligned} V_0 &= 0.2 \text{ V} \\ i_1 = i_{D1} &= 0 \text{ A} \\ i_2 = i_{D2} &= 4.8 \text{ mA} \end{aligned}$$

b) $V_1 = 0,4 V$ y $V_2 = 0,3 V$

Con $V_1 = 0'1V$, suponemos D1 en conducción. Si D1 conduce, no queda a $0'1V$, y entonces D2 está en corte. Por lo tanto:

Suponemos } D1 en ON
D2 en OFF.



$$D_{\Delta} \begin{cases} V_{D\Delta} = 0 \\ i_{D\Delta} = \frac{5 - 0.1}{1K} = 4.9 \text{ mA} \end{cases}$$

Bien
en ON.

$$D2 \begin{cases} I_{D2} = 0 \\ V_{D2} = 0'1 - 0'3 = -0'2V \end{cases}$$

Bei
en off.

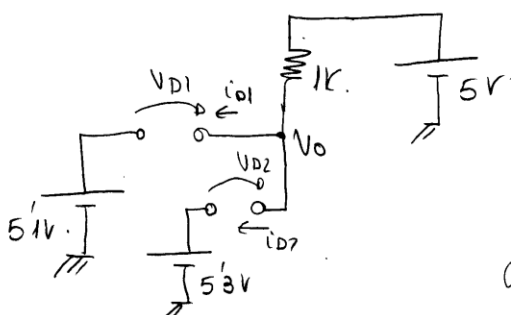
Suposición correcta

Obtenemos :

$$\begin{aligned} V_0 &= 0'1 V. \\ i_{A1} &= i_{D1} = 4'9 \text{ mA} \\ i_{A2} &= i_{D2} = 0 \text{ A} \end{aligned}$$

c) $V_1 = 5,1V$ y $V_2 = 5,3V$

$V_1 = 5.1V$ y $V_2 = 5.1V$
 D1 quedará en OFF ya que el ánodo está a mayor
 tensión que el cátodo y D2 en OFF también por el mismo
 motivo. Por lo tanto: Suponemos $\left. \begin{array}{l} D1 \text{ en OFF} \\ D2 \text{ en OFF} \end{array} \right\}$



$$D_A \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = 5 - 5'1 = -0.1V \end{array} \right.$$

Bei OFF

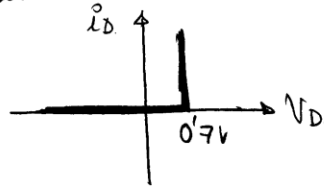
$$D_2 \begin{cases} i_{D_2} = 0 \\ V_{D_2} = 5 - 5'3 = -0'3V \end{cases}$$

Ben OFF

Aug

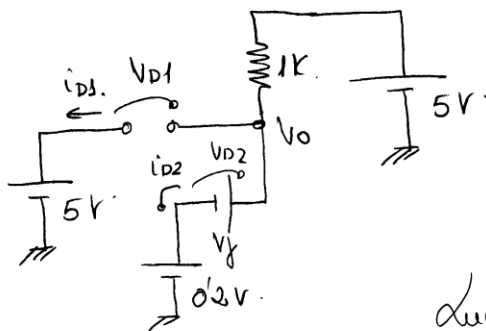
$$V_0 = 5V$$
$$i_1 = i_2 = 0A.$$

Repetir el ejercicio con el modelo con tensión de corte del diodo de silicio:



a.1) Con $V_1 = 5V$ y $V_2 = 0.2V$.

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en OFF.} \\ D2 \text{ en ON.} \end{array} \right.$



$$D1 \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = 0.2 + V_f - 5 = -4.5V \end{array} \right. \quad \text{Buen OFF.}$$

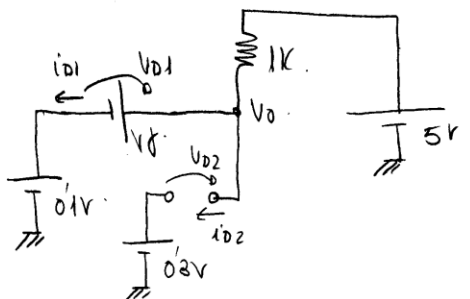
$$D2 \left\{ \begin{array}{l} V_{D2} = V_f = 0.7 \\ i_{D2} = \frac{5 - 0.7 - 0.2}{1k} = 4.5mA \end{array} \right. \quad \text{Buen en ON.}$$

luego

$$\boxed{\begin{array}{l} V_O = 0.9V \\ i_1 = 0 \\ i_2 = 4.5mA \end{array}}$$

b.1) Con $V_1 = 0.1V$ y $V_2 = 0.3V$

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en ON} \\ D2 \text{ en OFF.} \end{array} \right.$



$$D1 \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = V_f = 0.7V \\ i_{D1} = \frac{5 - 0.7 - 0.1}{1k} = 4.2mA \end{array} \right. \quad \text{Buen ON}$$

$$D2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = V_f + 0.1 - 0.3 = 0.5V \end{array} \right. \quad \text{Buen en OFF.}$$

Por lo tanto

$$\boxed{\begin{array}{l} V_O = 0.8 \\ i_1 = 4.2mA \\ i_2 = 0 \end{array}}$$

c.1) Con $V_1 = 5.1V$ y $V_2 = 5.3V$

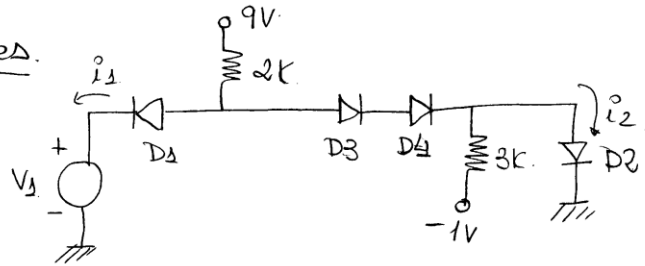
Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en OFF.} \\ D2 \text{ en OFF.} \end{array} \right.$

Mismo de que en el apartado c)

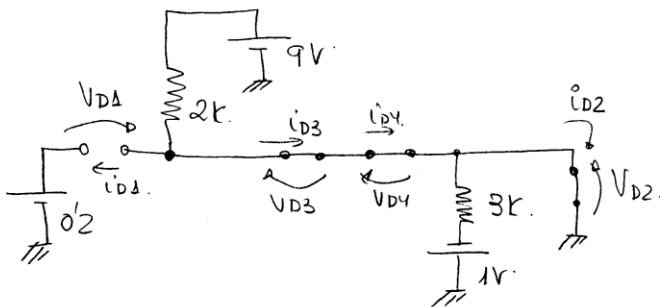
$$D1 \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = -0.1V \end{array} \right. \quad D2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = -0.3V \end{array} \right.$$

$$\text{luego } \boxed{V_O = 5V, i_1 = 0, i_2 = 0}$$

D-3.-

Diodos ideales.a) i_1 e i_2 cuando $V_1 = 0,2V$

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D2, D3 \text{ y } D4 \text{ en ON.} \\ D1 \text{ en OFF.} \end{array} \right.$



Analizando el cto obtenemos:

$$D1 \left\{ \begin{array}{l} i_{D1} = 0 \\ V_{D1} = -0,2V \end{array} \right. \rightarrow \text{Bien en OFF.}$$

$$D3 \text{ y } D4 \left\{ \begin{array}{l} V_{D3} = V_{D4} = 0 \\ i_{D3} = i_{D4} = \frac{9}{2K} = 4,5mA \end{array} \right. \rightarrow \text{Bien en ON.}$$

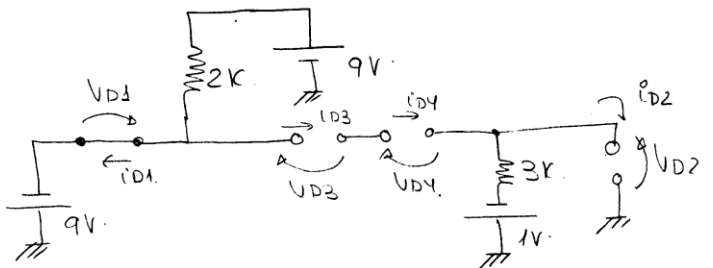
$$D2 \left\{ \begin{array}{l} V_{D2} = 0 \\ i_{D2} = i_{D3} - \frac{1}{3K} = 4,5 - 0,3 = 4,2mA \end{array} \right. \rightarrow \text{Bien en ON}$$

Suposición correcta, y por lo tanto

$$\boxed{\begin{array}{l} i_1 = i_{D1} = 0 \\ i_2 = i_{D2} = 4,2mA \end{array}}$$

b) i_1 e i_2 cuando $V_1 = -9V$

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en ON} \\ D2, D3 \text{ y } D4 \text{ en OFF.} \end{array} \right.$



Analizando el dío:

$$D1 \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = 0 \\ i_{D1} = \frac{9+9}{2k} = 9 \text{ mA} \end{array} \right. \quad \text{OK en ON.}$$

$$D3 \text{ y } D4 \left\{ \begin{array}{l} i_{D3} = i_{D4} = \emptyset \\ V_{D3} + V_{D4} = -9 + 1 = -8 \text{ V} \end{array} \right. \rightarrow \text{No sabemos cómo se la "reparten" pero están en OFF}$$

$$D2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = -1 \text{ V} \end{array} \right. \quad \text{Bien en OFF.}$$

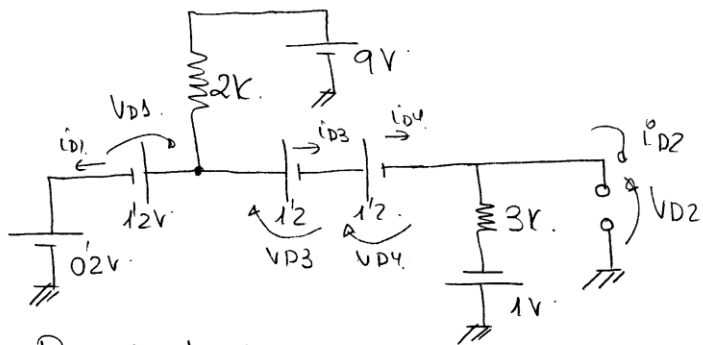
Suposición correcta, luego

$$\boxed{\begin{array}{l} i_1 = i_{D1} = 9 \text{ mA} \\ i_2 = i_{D2} = \emptyset \end{array}}$$

c.1) Igual que en a) pero con tensión de codo de 12V.

OSD: Aquí va a cambiar el estado de los diodos respecto al apartado A debido a V_f .

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1, D3 \text{ y } D4 \text{ en ON.} \\ D2 \text{ en OFF.} \end{array} \right.$



Analizando el dío:

$$\left\{ \begin{array}{l} 9 = 2(i_{D1} + i_{D3}) + 1'4 \\ 1'4 = 2'4 + 3i_{D3} - 1 \end{array} \right.$$

$$\text{Despejando } i_{D3} = \emptyset \\ i_{D1} = 3'8 \text{ mA.}$$

Por lo tanto:

$$D1 \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = 12 \text{ V} \\ i_{D1} = 3'8 \text{ mA} \end{array} \right. \quad \text{Bien en ON.}$$

$$D3 \text{ y } D4 \left\{ \begin{array}{l} V_{D3} = V_{D4} = 12 \text{ V} \\ i_{D3} = i_{D4} = 0 \end{array} \right. \quad \text{Bien, justo en el codo.}$$

$$D2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = -1 \text{ V} \end{array} \right. \quad \text{Bien en OFF.}$$

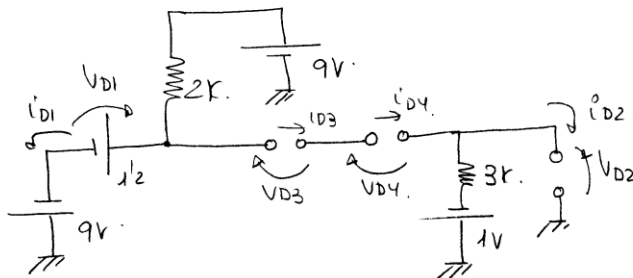
Luego

$$\boxed{\begin{array}{l} i_1 = 3'8 \text{ mA} \\ i_2 = 0 \end{array}}$$

C-2) Igual que en b) pero con tensión de codo $1'2V$.

Aquí el estado de los diodos parece que se mantiene.

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en ON} \\ D2, D3 \text{ y } D4 \text{ en OFF} \end{array} \right.$



luego $\boxed{\begin{array}{l} i_1 = 8'4 \text{ mA} \\ i_2 = 0 \end{array}}$

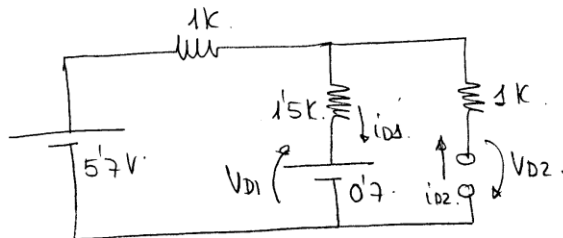
$$D1 \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = 1'2 \\ i_{D1} = \frac{9 + 9 - 1'2}{2} = 8'4 \text{ mA} \end{array} \right. \text{ Bien ON}$$

$$D3 \left\{ \begin{array}{l} i_{D3} = i_{D4} = 0 \\ V_{D3} + V_{D4} = 1'2 - 9 + 1 = -6'8 \end{array} \right. \text{ Bien OFF}$$

$$D2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = -1V \end{array} \right. \text{ Bien OFF}$$

D-4.-

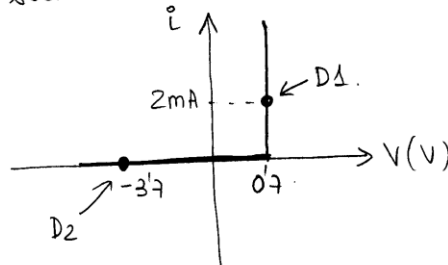
Sustituimos por los circuitos equivalentes $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en ON} \\ D2 \text{ en OFF} \end{array} \right.$



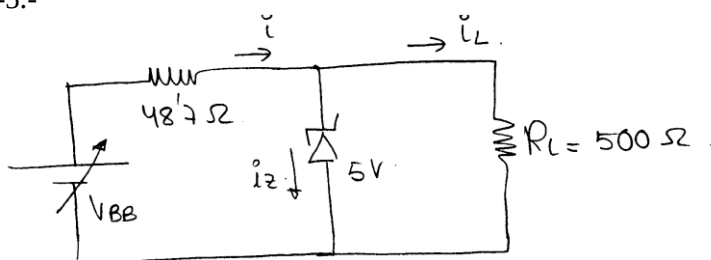
$$D1 \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = 0'7V \\ i_{D1} = \frac{5'7 - 0'7}{2'5} = 2 \text{ mA} \end{array} \right.$$

$$D2 \left\{ \begin{array}{l} i_{D2} = 0 \\ V_{D2} = -0'7 - 1'5 \cdot 2 = -3'7V \end{array} \right.$$

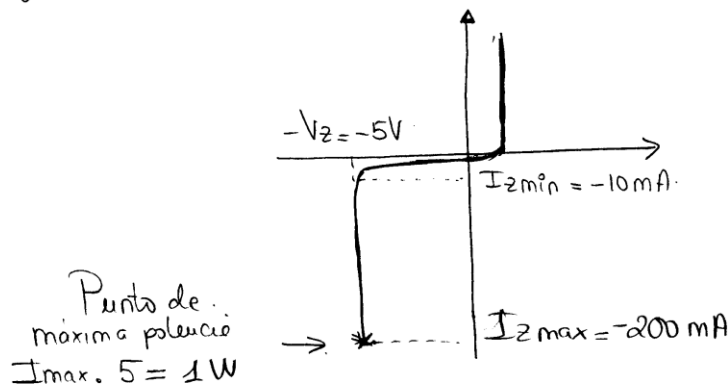
Representando sobre la característica I-V, tenemos:



D-5.-



Según el enunciado, la característica del Zener es:



Para que funcione como REGULADOR el diodo tiene que mantenerse en zona Zener:

$$\left. \begin{array}{l} V_D = -5V \\ 10mA < i_Z < 200mA \end{array} \right\} \text{(según el sentido dibujado en el dtd)}$$

Analizando el circuito:

$$i_Z = \frac{V_{BB} - 5}{48'7} - \frac{5}{R_L} = \frac{V_{BB} - 5}{48'7} - 0'01$$

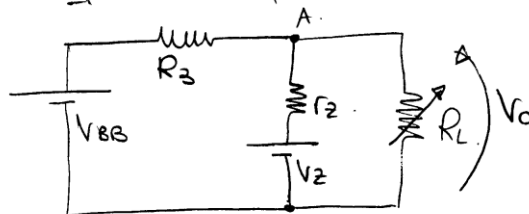
Debe cumplirse:

$$10mA < \frac{V_{BB} - 5}{48'7} - 0'01 < 200mA$$

$$\boxed{5'974 < V_{BB} < 15'227 V}$$

D-6.-

Circuito equivalente para el regulador de tensión:



a) Para $V_{BB} = 9$, $R_3 = 10\Omega$, $V_Z = 6'8V$ y $r_Z = 0'1\Omega$, escribir la ecuación de $V_O = f(R_L)$

Aplicando la 2ª ley Kirchhoff en el nodo A, obtenemos:

$$\frac{V_0 - V_{BE}}{R_3} + \frac{V_0 - V_2}{r_2} + \frac{V_0}{R_L} = 0$$

$$\frac{V_0 - 9}{10} + \frac{V_0 - 6.8}{0.1} + \frac{V_0}{R_L} = 0$$

$$V_0 \left[0.1 + 10 + \frac{1}{R_L} \right] = 0.9 + 6.8$$

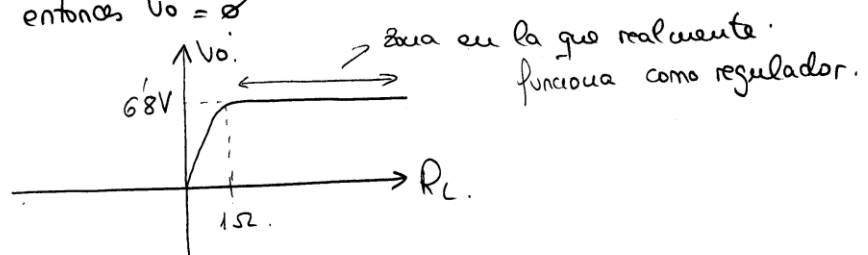
$$V_0 = \frac{6.8'9}{10.1 + \frac{1}{R_L}} = \frac{6.8'9 R_L}{1 + 10.1 R_L} = V_0.$$

b) Representar gráficamente el resultado.

* Si $10.1 R_L \gg 1$, es decir: $10.1 R_L > 10 \rightarrow R_L > 1 \Omega$, entonces.

$$V_0 \approx 6.8$$

* Si $R_L = 0$, entonces $V_0 = 0$

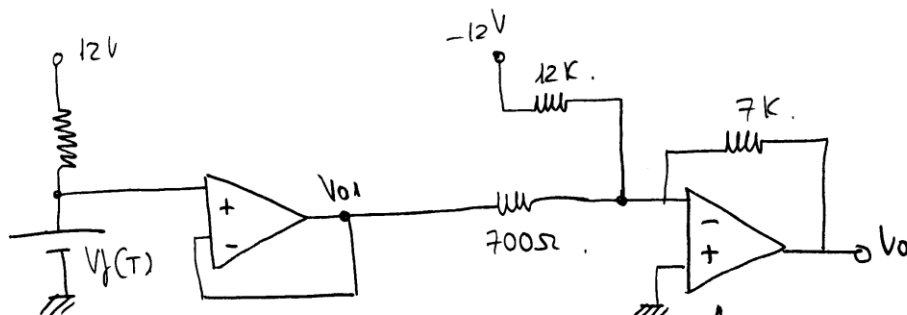


D-7.-

Si tomamos $V_f = 0.7 \text{ V}$ a una temperatura de referencia de 27°C , tenemos:

$$V_f(T) = 0.7 - 0.002 (T - 27^\circ\text{C})$$

El diodo está en ON en el circuito, que queda:



Seguidor de tensión

$$V_{01} = V_f(T)$$

Sumador:

$$V_0 = -\frac{7000}{700} V_{01} - \frac{7000}{12000} (-12) = 7 - 10 V_{01}$$

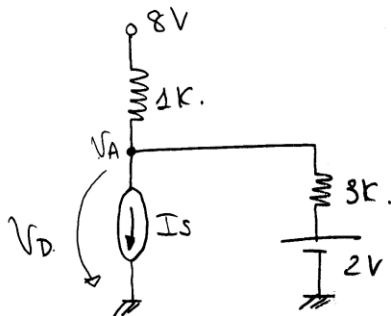
Por lo tanto :

$$V_0 = 7 - 10 \cdot V_f(T) = 7 - 10 [0.7 - 0.002 (T - 27^\circ\text{C})] =$$

$$= 7 - 7 + 0.02 (T - 27^\circ\text{C}) = \boxed{0.02 (T - 27^\circ\text{C}) = V_0}$$

D-8.-

En OFF, el diodo equivale a una fuente de corriente inversa de valor I_s (función de la temperatura)



Me piden la temperatura a la que.
 $V_D = V_f = 0.5$. Supongo dicho valor, es decir, $V_A = -0.5\text{V}$.

$$I_s = \frac{8 + 0.5}{1000} + \frac{2 + 0.5}{3000} = 9.3 \text{ mA}$$

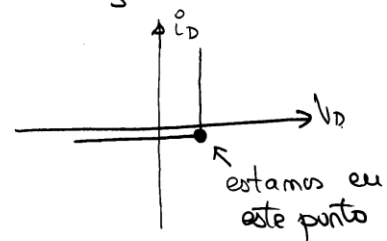
Para qué valor de T se produce esa corriente?

$$I_s(T) = 9.3 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-14} \cdot 2^{\frac{(T-27)}{5}}$$

$$4.6 \cdot 10^{11} = 2^{\frac{(T-27)}{5}}$$

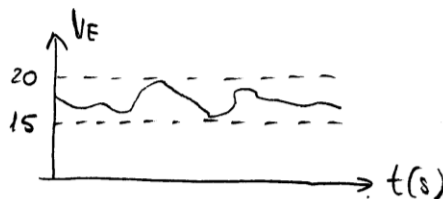
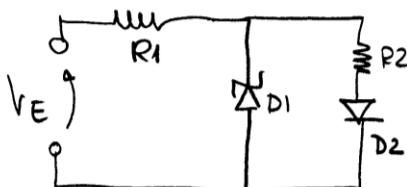
$$\log 4.6 \cdot 10^{11} = \frac{(T-27)}{5} \cdot \log 2 \Rightarrow \frac{T-27}{5} = 38.76$$

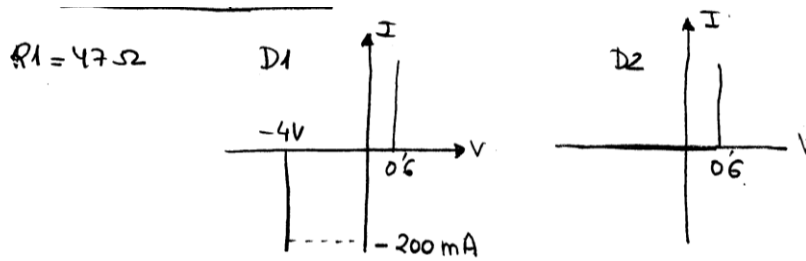
$$\text{Luego } \boxed{T = 220.81^\circ\text{C}}$$



D-9.-

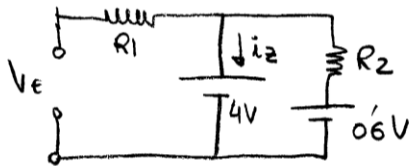
Marque de valores de R_2 para que el diodo D_2 conduzca con corriente constante:





El diodo D1 tiene que estar en zona zener, estabilizando $-4V$.

Para ello, i_z tiene que estar entre 0 y $200mA$.



- Con $V_E = 15$, i_z tiene que ser mayor que 0

$$i_z = \frac{15-4}{47} - \frac{4-0.6}{R_2} > 0 \rightarrow 0.234 > \frac{3.4}{R_2} \rightarrow R_2 > 14.52 \Omega$$

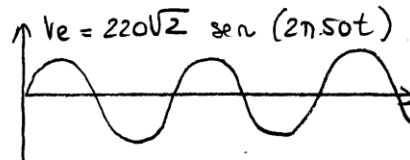
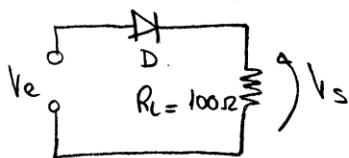
- Con $V_E = 20$, i_z tiene que ser menor que $200mA$.

$$i_z = \frac{20-4}{47} - \frac{4-0.6}{R_2} < 0.2 \rightarrow 0.1404 < \frac{3.4}{R_2} \rightarrow R_2 < 24.21 \Omega$$

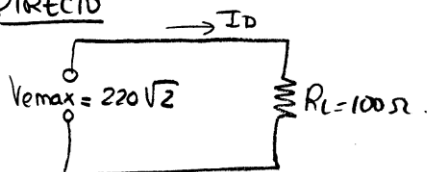
Después $14.52 < R_2 < 24.21$

D-10.-

Tensión máxima en inverso (V_{RM}) y corriente máxima en directo (I_{FM}) para trabajar correctamente con V_E . ($V_f = 0$)



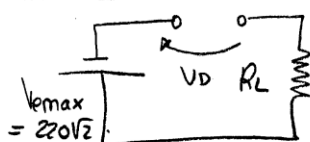
DIRECTO



$$I_D = \frac{220\sqrt{2}}{100} = 3.11 A$$

$$I_{FM} \geq 3.11 A$$

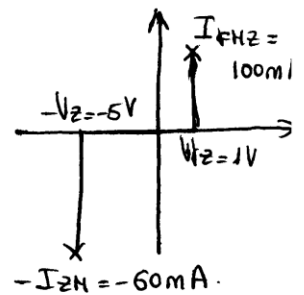
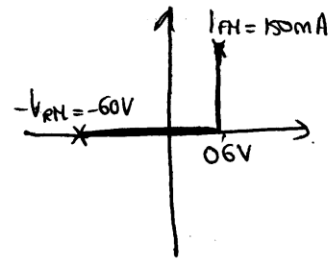
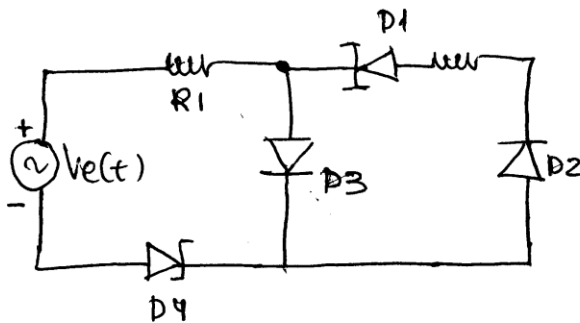
INVERSO



Toda la tensión cae en el diodo.

$$V_{RM} \geq 311.12 V$$

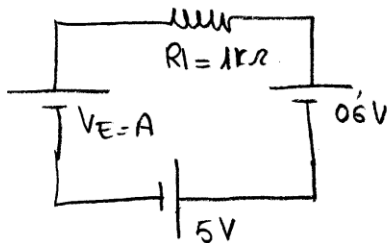
D-11.-



a) Valor máximo de la amplitud del generador de tensión para que no se dañe ningún componente.

* Para $V_e > 0 \rightarrow$ es imposible que D3 esté en OFF, ya que entonces la corriente tendería a ir por D1 y D2 que no pueden conducir simultáneamente en ese sentido.

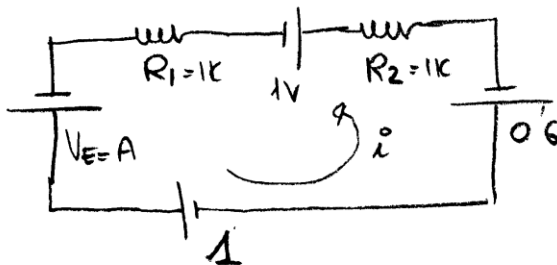
Por otro lado, si D3 está en ON, D1 y D2 están en OFF y no corre peligro por limitaciones.



$$i = \frac{A - 5 - 0.6}{1000} < \min(150 \text{ mA}, 60 \text{ mA})$$

$$\frac{A - 5.6}{1000} < 60 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \underline{A < 65.6 \text{ V}}$$

* Para $V_e < 0 \rightarrow$ D3 en OFF y el resto conduce en directo.



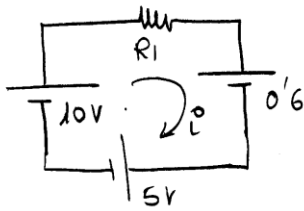
$$i = \frac{A - 0.6 - 1 - 1}{2000} < 100 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{A < 202.6 \text{ V}}$$

Más restrictivo $\boxed{A < 65.6 \text{ V}}$

b) Si $A = 10 \text{ V}$, punto de trabajo de los distintos diodos para los valores extremos de amplitud.

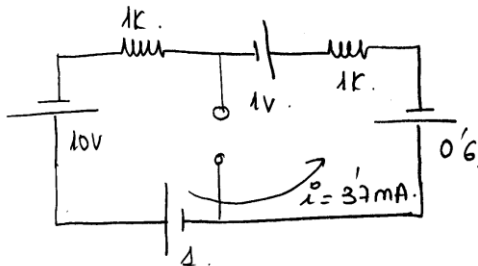
* Para $V_e = +10$ } D3 en ON
 D4 en ZENER.
 D1 y D2 en OFF.



$$i = \frac{10 - 5.6}{1000} = 4.4 \text{ mA}$$

	V_Q	I_Q
D1	$-V_{D2} - 0.6$	$\emptyset$
D2	$-0.6 - V_{D1}$	$\emptyset$
D3	0.6	4.4 mA
D4	-5	-4.4 mA

* Para $V_e = -10$ } D3 en OFF.
 D1, D2 y D4 en ON.

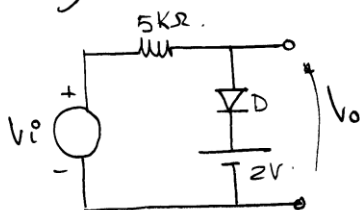


	V_Q	I_Q
D1	$1V$	3.7 mA
D2	0.6	3.7 mA
D3	-5.3	0
D4	$1V$	3.7 mA

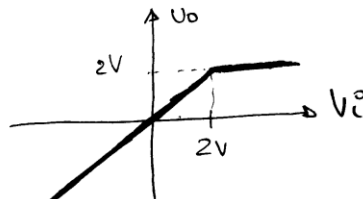
2. Conformadores de onda. Rectificadores.

D-12.-

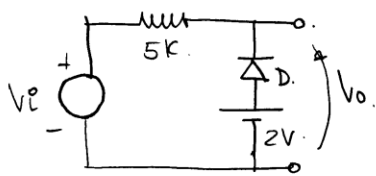
a) Función de transferencia:



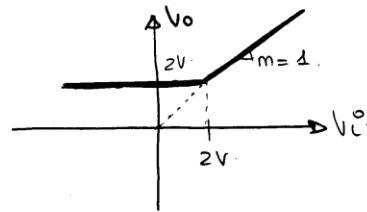
* Si $V_i > 2V \rightarrow D \text{ en ON} \rightarrow V_o = 2V$.
 * Si $V_i < 2V \rightarrow D \text{ en OFF} \rightarrow V_o = V_i$



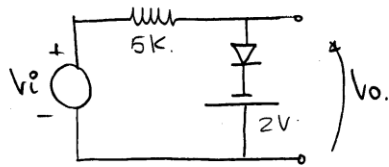
b) Función de transferencia:



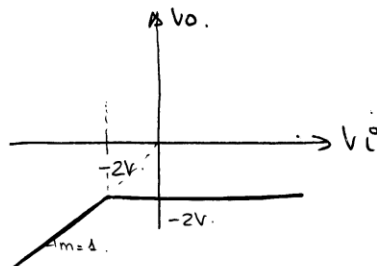
- * Si $v_i < 2V \rightarrow D \text{ en ON} \rightarrow v_o = 2V$.
- * Si $v_i > 2V \rightarrow D \text{ en OFF} \rightarrow v_o = v_i$



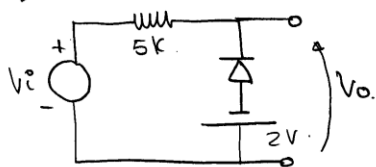
c) Función de transferencia:



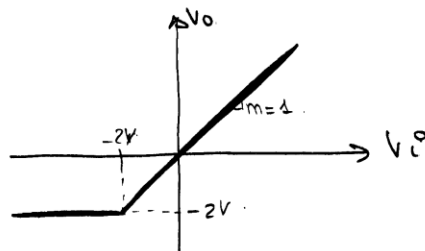
- * Si $v_i > -2V \rightarrow D \text{ en ON} \rightarrow v_o = -2V$.
- * Si $v_i < -2V \rightarrow D \text{ en OFF} \rightarrow v_o = v_i$



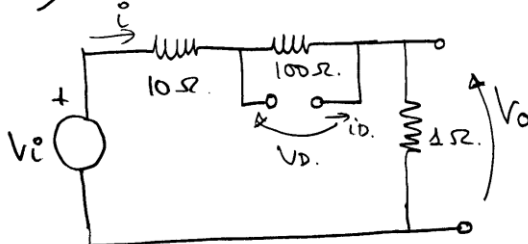
d) Función de transferencia



- * Si $v_i < -2V \rightarrow D \text{ en ON} \rightarrow v_o = -2V$.
- * Si $v_i > -2V \rightarrow D \text{ en OFF} \rightarrow v_o = v_i$



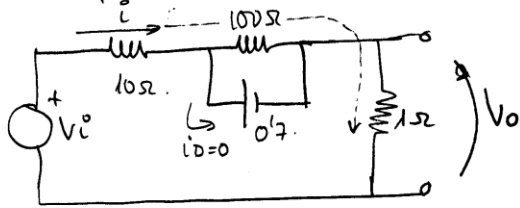
D-13.-

a) Ecuación de $v_o = f(v_i)$ cuando el diodo está cortado

$$i = \frac{v_i}{111}$$

$$v_o = 1 \cdot i = \frac{v_i}{111} = 9 \cdot 10^{-3} v_i = v_o$$

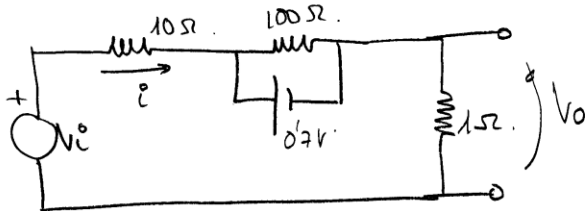
- b) V_i^0 para que el diodo empiece justo a conducir
 Suponemos el diodo justo en el codo $\left\{ \begin{array}{l} V_D = 0.7 \\ I_D = 0 \end{array} \right.$



$$i = \frac{0.7}{100} = 7 \text{ mA}$$

$$V_i^0 = 0.7 + 7 \cdot 10^{-3} \cdot 11 = \boxed{0.777 \text{ V} = V_i^0}$$

- c) Ecuación de $V_o = f(V_i)$ cuando D conduce.

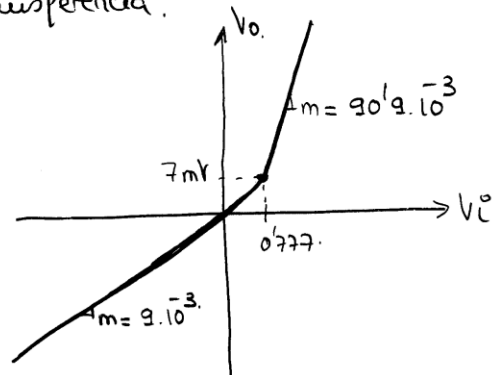
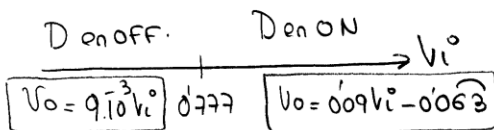


$$i = \frac{V_i - 0.7}{11}$$

$$V_o = 1.5i = \frac{1.5(V_i - 0.7)}{11}$$

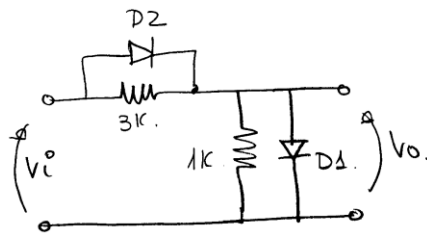
$$\boxed{V_o = 0.09 V_i - 0.063}$$

- d) Representar la función de transferencia.

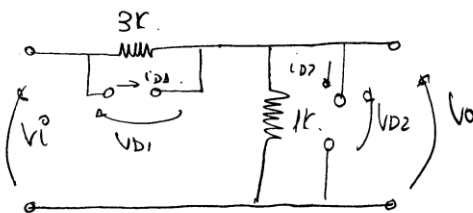


777

D-14.-



- a) Con $V_i = 0$, diodos cortados. Circuito equivalente y $V_o = f(V_i)$



$$V_o = \frac{V_i \cdot 1}{3 + 1} = \boxed{\frac{V_i}{4} = V_o}$$

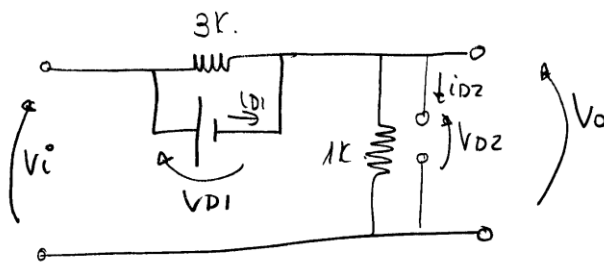
$$\text{Como } V_i = 0, \underline{\underline{V_o = 0}}$$

- b) Si V_i crece ¿qué diodo empieza a conducir primero?
 ¿para qué valor de V_i ?

Mientras los diodos están cortados, el circuito es un divisor resistivo, en el que la tensión mayor cae en la resistencia de $3k$. Como D2 está en paralelo con esta resistencia, alcanzará antes la tensión umbral. $\Rightarrow$ D2 conduce primero

$$V_{D2} = \frac{V_i \cdot 3}{4} = 0.6 \rightarrow \text{Para } \boxed{V_i = 0.8V}$$

- c) Redibujar el cb equivalente cuando el primer diodo ya ha empezado a conducir y obtener $V_o = f(V_i)$



$$\boxed{V_o = V_i - 0.6}$$

- d) ¿Para qué valor de V_i conducirá el segundo diodo?

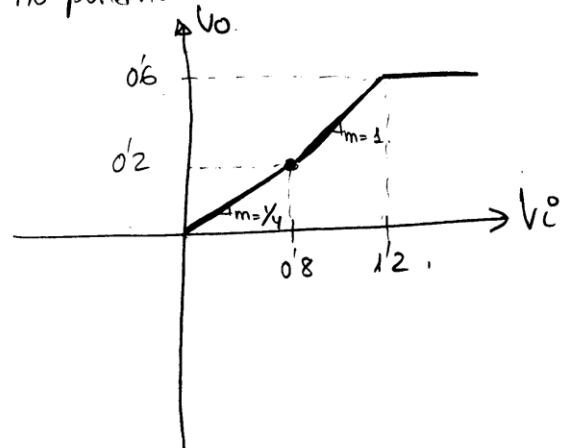
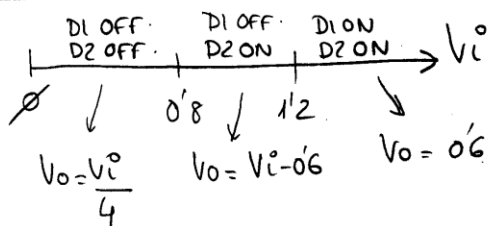
$$\text{Para } V_i - 0.6 = 0.6 \Rightarrow \boxed{V_i = 1.2V}$$

- e) Representar la ecuación de transferencia del circuito $V_o = f(V_i)$ a partir de ese valor.

Si D1 conduce, $\boxed{V_o = 0.6V}$

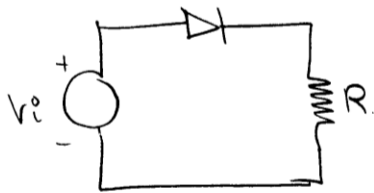
¡OJO! Pero para $V_i > 1.2V$, la corriente por los diodos crecerá rápidamente (peligro de rotura) si no ponemos una R en serie con V_i

Resumen:



D-15.-

- a) Diseño de un rect. de media onda de forma que $V_{dc} = 9'3V$ y el pico de corriente entregada por el diodo sea $0'1A$. Hallar el TIP. (DIODO IDEAL)



Como $V_{dc} = \frac{V_H}{\pi} = 9'3 \rightarrow V_H = 29'21V$

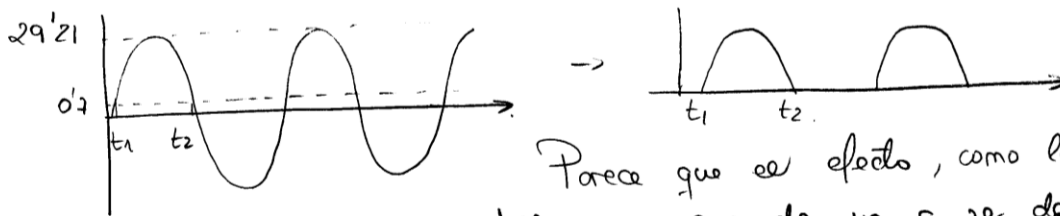
Es decir, $v_i = 29'21 \cdot \sin \omega t$

Pico de corriente $i_{max} = \frac{V_H}{R} = \frac{29'21}{R} = 0'1A \rightarrow R = 292'16\Omega$

La tensión inversa máxima en el diodo es V_H , luego.

$TIP \geq 29'21V$

- b) Si se reemplaza por un diodo real con $V_f = 0'7$, calcular los nuevos valores de V_{dc} , i_{pico} y TIP.



Parece que es efecto, como la señal. V_i es muy grande, va a ser despreciable.

Cálculo de t_1 y t_2 :

$29'21 \sin \omega t_1 = 0'7 \rightarrow \omega t_1 = 0'02396 \text{ rad.}$

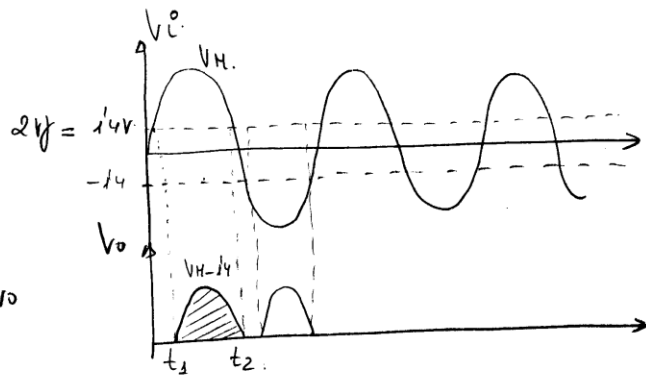
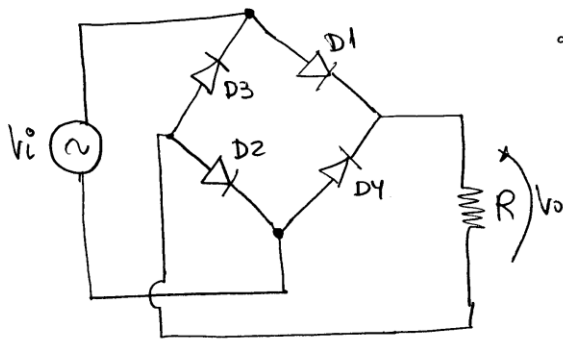
$\rightarrow \omega t_2 = \pi - \omega t_1 = 3'1176 \text{ rad.}$

$$\begin{aligned} * V_{dc} &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 29'21 \sin \omega t \, dt = \frac{1}{T} \cdot \frac{29'21}{\omega} [-\cos \omega t]_{t_1}^{t_2} = \\ &= \frac{29'21}{T \cdot \frac{2\pi}{T}} [-\cos \omega t_2 + \cos \omega t_1] = \frac{29'21}{2\pi} [0'9997 + 0'9997] = \\ &= 9'2951 = V_{dc}. \quad (V_f \text{ CASI NO AFFECTA}) \end{aligned}$$

* $i_{pico} = \frac{V_H - V_f}{R} = \frac{29'21 - 0'7}{292'16} = 0'0975A = i_{pico}$

* En inverso V_f no afecta, luego $TIP \geq 29'21V$

D-16.-



Para calcular V_{dc} , calculo sólo el área rallada (ente t_1 y t_2) y después multiplico por 2.

$$V_{dc} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} V_H \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

Calculo t_1 y t_2 : (o sus fases asociadas).

$$V_H \cdot \sin \omega t_1 = 1.4 \rightarrow \sin \omega t_1 = \frac{1.4}{V_H} \rightarrow \cos \omega t_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{1.4}{V_H}\right)^2}$$

Para t_2 , mismo seno, pero coseno cambiado de signo

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{2V_H}{T \cdot \omega} \left[-\cos \omega t \right]_{t_1}^{t_2} = \frac{2V_H}{\cancel{T} \cdot \cancel{2\pi}} \left[-\cos \omega t_2 + \cos \omega t_1 \right] = \\ &= \frac{V_H}{\pi} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{V_H^2 - 1.96}{V_H^2}} \right] = 10 \end{aligned}$$

$$\text{Despejando } V_H \rightarrow \frac{\cancel{V_H}}{\pi} \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{V_H^2 - 1.96}}{\cancel{V_H}} = 10$$

$$\sqrt{V_H^2 - 1.96} = 15.708 \rightarrow \boxed{V_H = 15.77 \text{ V}}$$

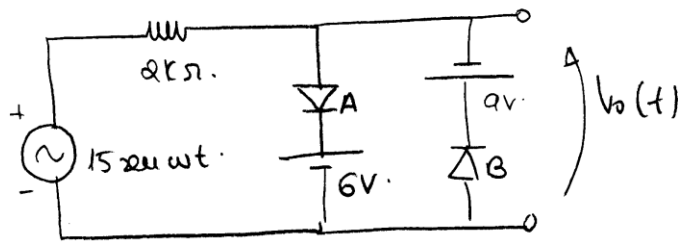
$$\text{Luego } \boxed{v_i = 15.77 \cdot \sin \omega t}$$

$$\boxed{TIP \geq 15.77 \text{ V}}$$

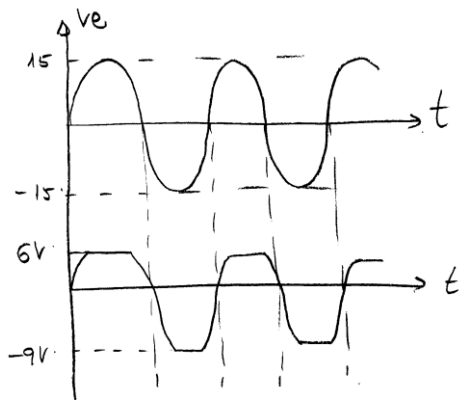
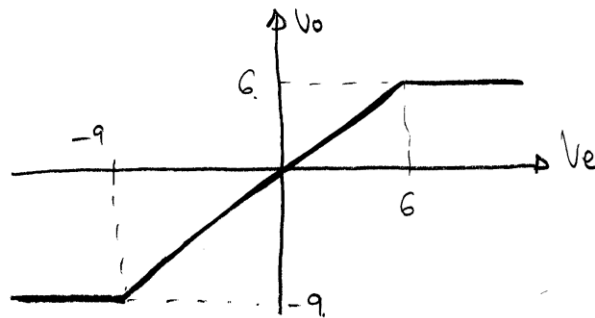
$$i_{pico} = \frac{V_H - 1.4}{R} = \frac{15.77 - 1.4}{R} = 0.02 \rightarrow \boxed{R = 418.5 \Omega}$$

D-17.-

Tensión de salida y F.T. del circuito



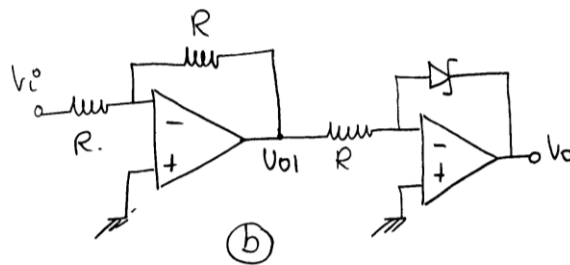
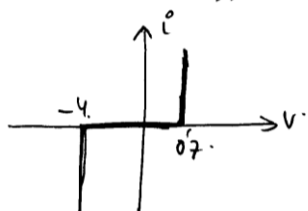
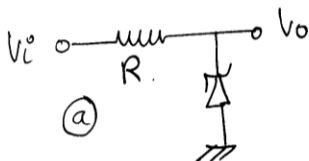
Es un reconvertidor de dos niveles típico.



(1)

3. Conformadores de onda con Operacionales.

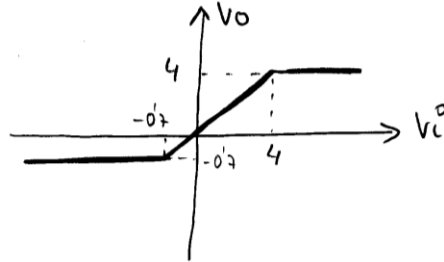
D-18.-



a) Representar la función de transferencia de ambos circuitos

Circuito a)

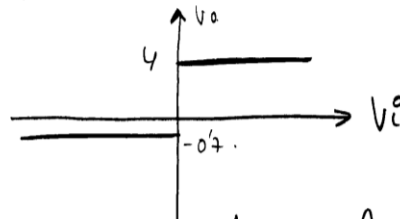
$$\begin{cases} \text{Si } V_i > 4V \rightarrow \text{Diodo en ZENNER} \rightarrow V_o = 4V \\ \text{Si } V_i < -0.7 \rightarrow \text{Diodo en ON} \rightarrow V_o = -0.7 \\ \text{Resto, Diodo en OFF} \rightarrow V_o = V_i \end{cases}$$



Circuito b)

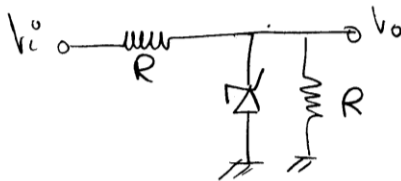
$$V_{os} = -V_i$$

$$\begin{cases} \text{Si } V_{os} > 0 \rightarrow V_o = -0.7 \text{ (cuando } V_i \text{ negativa)} \\ \text{Si } V_{os} < 0 \rightarrow V_o = 4 \text{ (cuando } V_i \text{ positiva)} \end{cases}$$

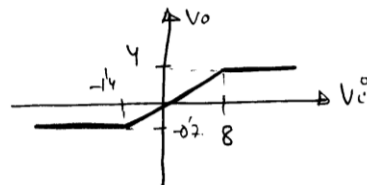


b) Repetir el apartado a) tras colocar una resistencia de carga R entre cada nodo de salida y tierra.

Circuito a)

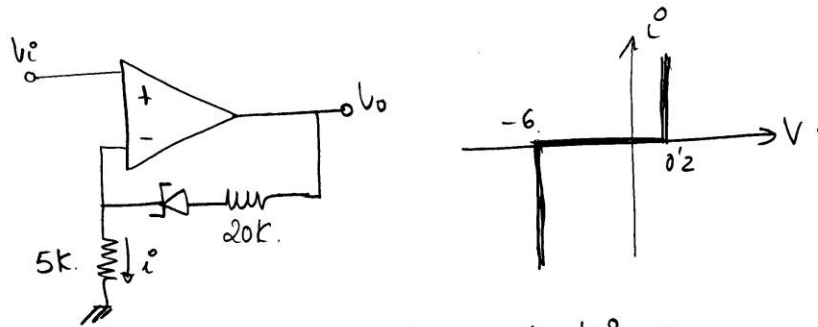


$$\begin{cases} * \text{ Si } V_i > 8V \rightarrow \text{ZENNER} \rightarrow V_o = 4V \\ * \text{ Si } V_i < -1.4 \rightarrow \text{ON} \rightarrow V_o = -0.7V \\ * \text{ Resto, } \rightarrow \text{OFF} \rightarrow V_o = V_i/2 \end{cases}$$



Circuito b) Al tomarse V_o en la salida de un operacional, $V_o \neq f(R) \rightarrow$ no afecta el colocar la resistencia de carga.

D-19.-



a) Ecuación que relaciona V_o y V_i cuando $V_i > 0$

$$i = \frac{V_i}{5k} \quad (\text{positiva} \rightarrow \text{Diodo en ON})$$

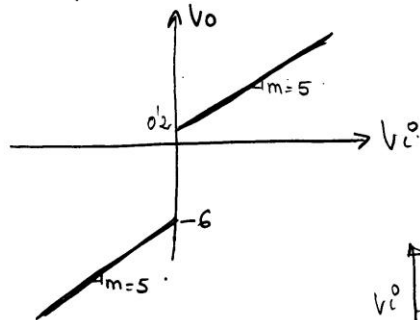
$$\text{Luego } V_o = \frac{V_i}{5k} \cdot 25k + 0.2 = \boxed{5V_i + 0.2 = V_o}$$

b) Idem cuando $V_i < 0$

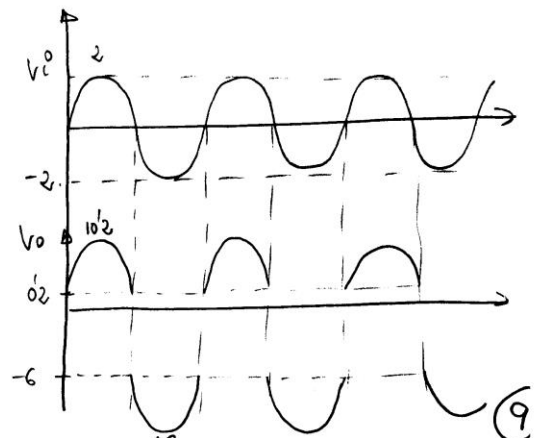
$$i = \frac{V_i}{5k} \quad \text{será negativa} \rightarrow \text{Diodo en ZENER}$$

$$\text{Luego } V_o = \frac{V_i}{5} \cdot 25 - 6 = \boxed{5V_i - 6 = V_o}$$

c) Función de transferencia.



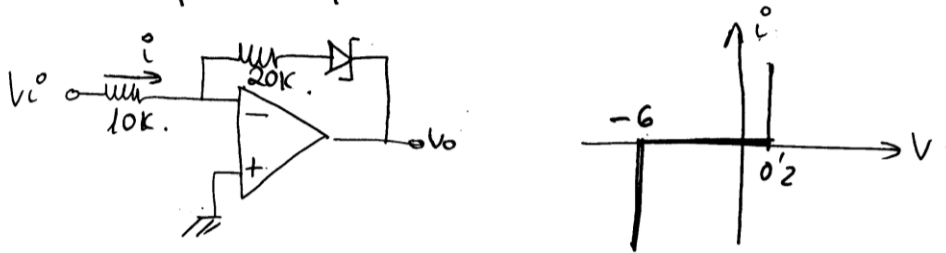
d) Representar V_o si $V_i = 2 \sin \omega t$.



(9)

D-20.-

Repetir el ejercicio anterior con este circuito.



a) $V_o = f(V_i)$ cuando $V_i > 0$

Con $V_i > 0$, $i = \frac{V_i}{10k}$ es positiva $\rightarrow$ diodo en ON

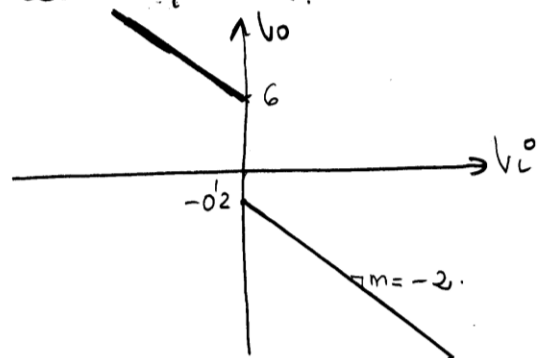
$$\text{Luego } V_o = -0.2 - 20i = -0.2 - 20 \cdot \frac{V_i}{10} = \boxed{-0.2 - 2V_i = V_o}$$

b) Idem cuando $V_i < 0$

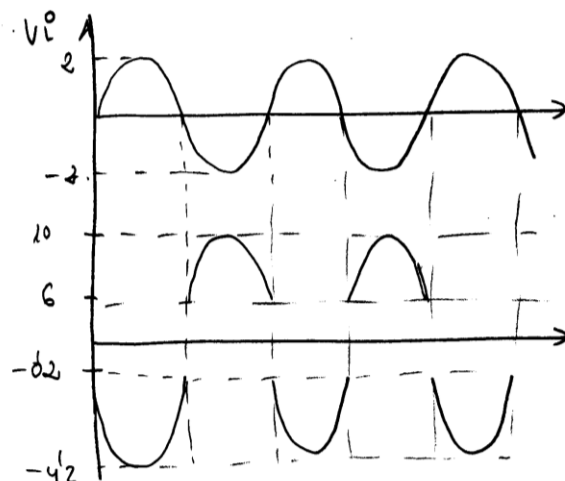
Con $V_i < 0$, $i = \frac{V_i}{10k}$ es negativa $\rightarrow$ diodo en ZENER.

$$\text{Luego } V_o = V_z - 20i = \boxed{6 - 2V_i = V_o}$$

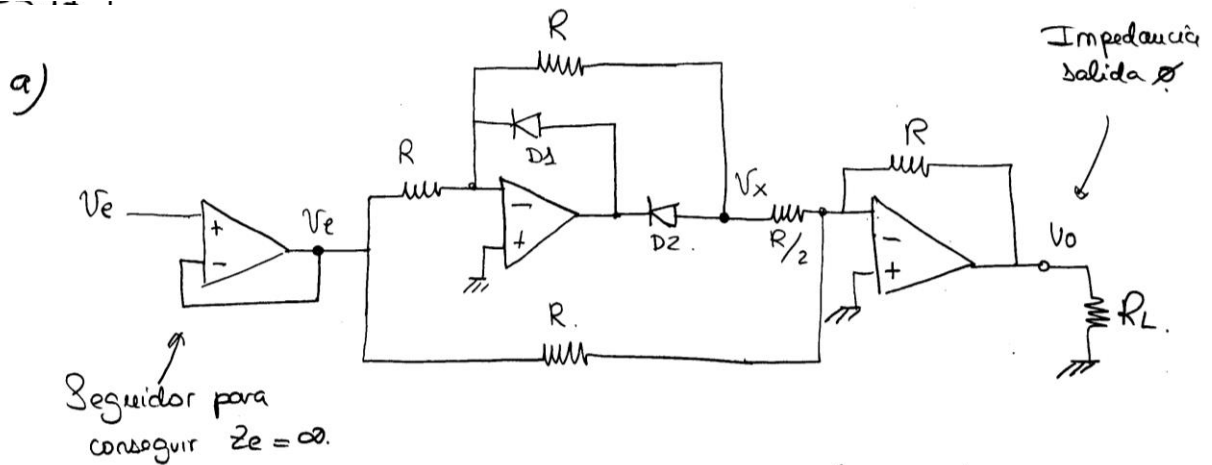
c) Función de transferencia.



d) Representa V_o si $V_i = 2 \sin \omega t$.



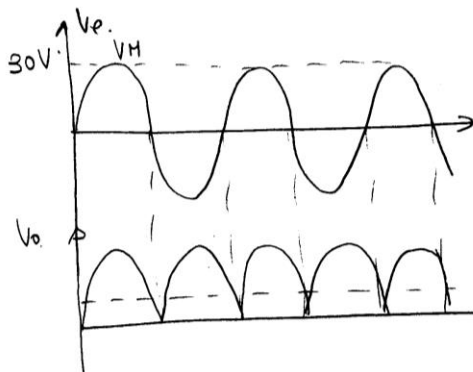
D-21.-



- * Si \$V_e > 0 \rightarrow\$ Conduce \$D_2\$; \$D_1\$ cortado. \$\rightarrow V_x = -V_e\$.
- * Si \$V_e < 0 \rightarrow\$ Conduce \$D_1\$; \$D_2\$ cortado \$\rightarrow V_x = \infty\$

$$\text{Como } V_o = -\frac{R}{R/2} V_x - \frac{R}{R} V_e = -2V_x - V_e$$

- * Si \$V_e > 0 \rightarrow V_o = 2V_e - V_e = V_e \quad \vee \quad V_o = |V_e|\$
- * Si \$V_e < 0 \rightarrow V_o = -V_e\$



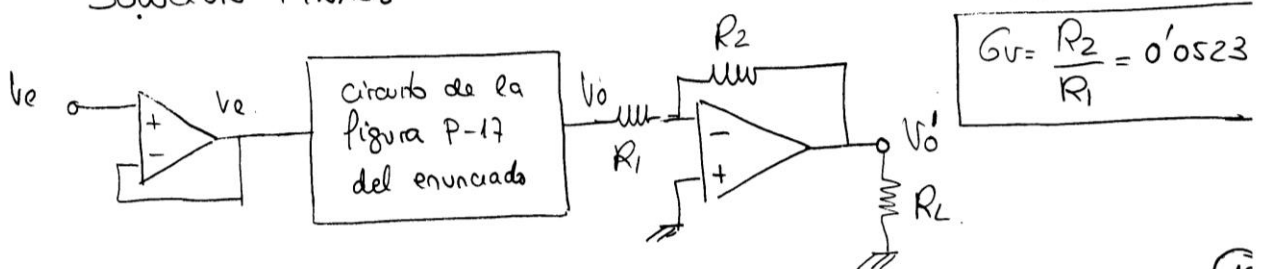
$$V_{dc} = \frac{2V_M}{\pi} = \frac{2 \cdot 30}{\pi} = 19.09$$

Sobre una carga de \$R_L\$, debe producir 10 mA

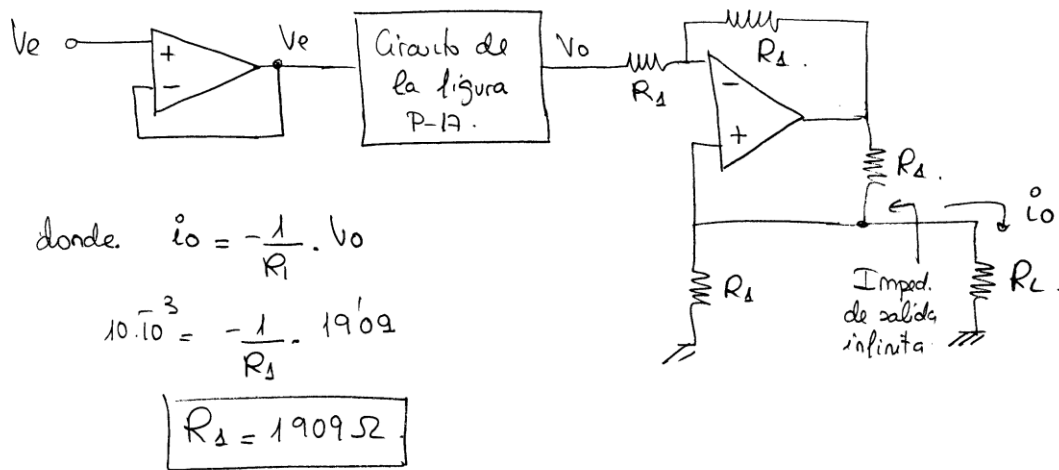
$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R_L} = \frac{2.30/\pi}{100} = 190 \text{ mA}$$

¡ Hay que atenuar \$V_o\$ antes de aplicarla a la carga! \$G_v = \frac{10 \text{ mA} \cdot 100}{2.30/\pi} = 0.0523\$

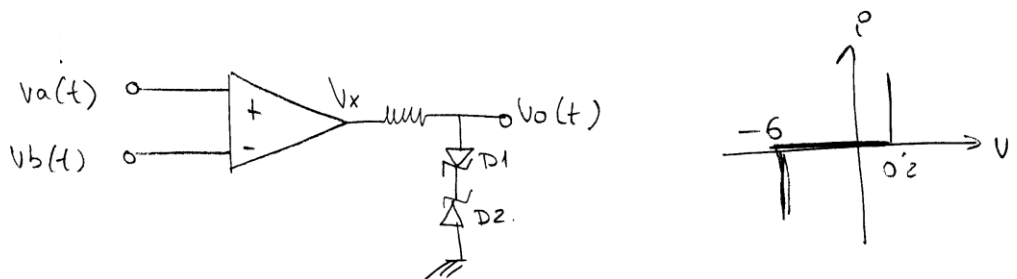
Solución FINAL



b) Si queremos que la corriente de salida sea 10mA independiente del valor de R_L , tenemos que poner un convertidor $V-I$

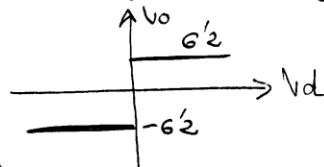


D-22.-

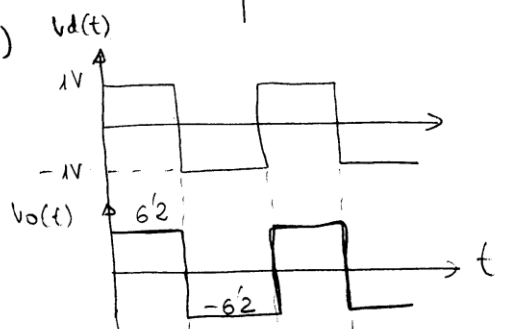


a) Función de transferencia $V_o(V_d)$ con $V_d = V_a - V_b$.

- Si $V_d > 0$ ($V_a > V_b$) $\rightarrow V_x = V_{cc}$ y si $|V_{cc}| > 6.2V$, entonces los diodos conducen (D1 en ON y D2 en ZENER), siendo $V_o = 6.2$
- Si $V_d < 0$ ($V_a < V_b$) $\rightarrow V_x = -V_{cc}$ y si $|V_{cc}| > 6.2V$, entonces los diodos conducen (D2 en ON y D1 en ZENER), siendo $V_o = -6.2$

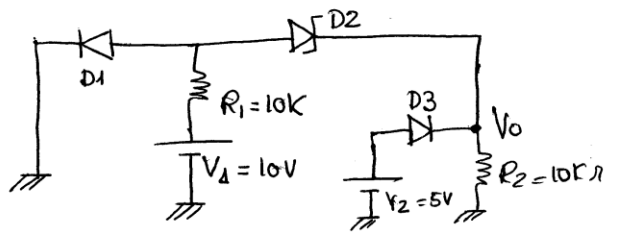


b) Obtener $V_o(t)$



4. Otros circuitos con diodos

D-23.-



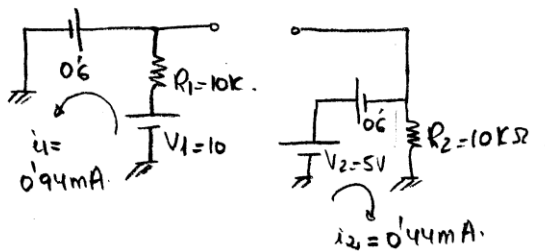
DATOS:

$$V_f = 0.6V$$

$$|V_z| = 5V$$

a) Punto de trabajo de todos los diodos y tensión de salida V_0

Suponemos $\left\{ \begin{array}{l} D1 \text{ en ON} \\ D2 \text{ en corte (no entra en zener)} \\ D3 \text{ en ON.} \end{array} \right.$



$$V_0 = 4.4V$$

Obtenemos:

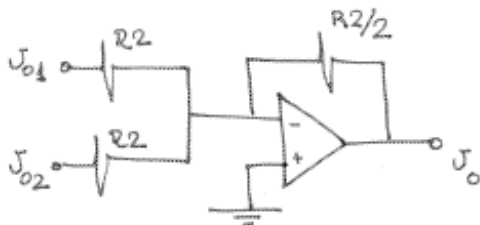
$$D1 \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = 0.6V \\ I_{D1} = 0.94mA \end{array} \right. \quad \underline{\underline{OK}}$$

$$D2 \left\{ \begin{array}{l} V_{D2} = -3.8V \\ I_{D2} = 0 \end{array} \right. \quad \underline{\underline{OK}}$$

$$D3 \left\{ \begin{array}{l} V_{D3} = 0.6V \\ I_{D3} = 0.44mA \end{array} \right. \quad \underline{\underline{OK}}$$

D-24.-

3) Todos los AO ideales con $R^- \Rightarrow V^+ = V^- = \phi$

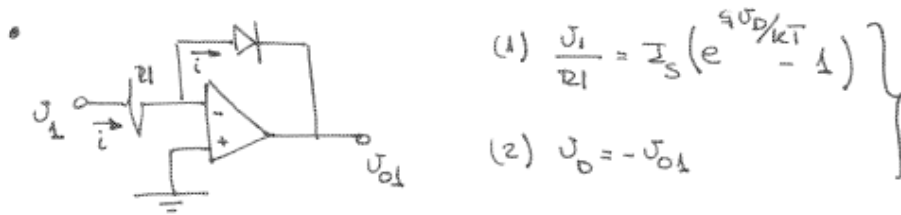


Sumador inversor:

$$V_0 = - \frac{R2/2}{R2} (V_{01} + V_{02})$$

$$\Rightarrow V_0 = - \frac{1}{2} (V_{01} + V_{02})$$

b) Las dos ramas son idénticas:

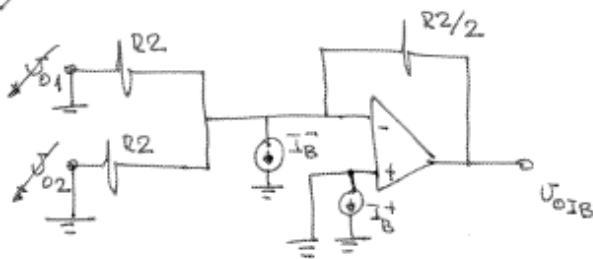


$$\left. \begin{aligned} (1) \quad \frac{V_1}{R_1} &= I_S \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \\ (2) \quad V_D &= -V_{01} \end{aligned} \right\}$$

$$\ln \left(\frac{V_1}{R_1 \cdot I_S} + 1 \right) = -\frac{q}{kT} V_{01} \Rightarrow \boxed{V_{01} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{V_1}{R_1 \cdot I_S} + 1 \right)}$$

$$\boxed{V_{02} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{V_2}{R_3 \cdot I_S} + 1 \right)}$$

c)



- $I_{off} = 0 \Rightarrow I_B^- = I_B^+ = I_B$
- I_B^+ no afecta porque está compensado

$$\bullet \quad I_B^- = \frac{-V_{01B}}{R_2/2} \Rightarrow \boxed{V_{01B} = -\frac{R_2}{2} I_B}$$