

CAPÍTULO**3 CIRCUITOS CON DIODOS****3.1 RECORTADORES DE VOLTAJE**

Los recortadores, también conocidos como limitadores de voltaje, son circuitos formadores de onda. El resultado generalmente obtenido es una señal a la que aparentemente se le ha cortado cierta porción de su figura.

Un circuito recortador requiere por lo menos dos componentes: un diodo y una resistencia; aunque es también común contar con una fuente DC de voltaje.

Supongamos que tenemos un circuito y una señal de entrada como los siguientes:

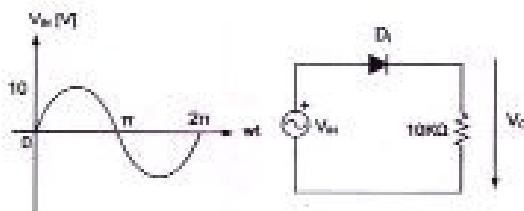


Figura 3.1 Circuito recortador con diodo ideal

Para su análisis consideremos que el diodo es ideal. Cuando el voltaje de entrada supera los 0 V, habrá voltaje suficiente para polarizar al diodo directamente. Esto significa que el diodo se lo puede considerar como un cortocircuito, y por tanto, todo el voltaje de la fuente caerá en la resistencia de 10 [KΩ]. Esta situación se conserva durante todo el semicírculo positivo, de modo que la señal de salida, para este intervalo, es exactamente la misma que la señal de entrada.

Cuando el voltaje de la entrada es inferior a los 0 V, el diodo del circuito se polariza inversamente, es decir, puede sustituirse como un circuito abierto, de tal manera que la corriente en la malla se anula. Esto ocasiona que el voltaje en la resistencia sea también igual a cero, mientras que el potencial de entrada se verá en su totalidad en las terminales del diodo. Obtenemos entonces las siguientes formas de onda para el diodo y la salida:

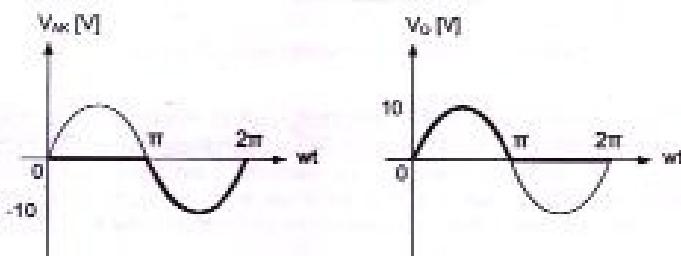


Figura 3.2 Forma de onda en el diodo y en la salida

Si el diodo no fuese ideal, sino de silicio, sería necesario incluir el potencial que cae sobre él. Si utilizamos, por ejemplo, la primera aproximación, se vería fácilmente que el diodo no entra a conducción sino luego de que el voltaje en la fuente supere los 0.7 [V], correspondientes al voltaje de barrera.

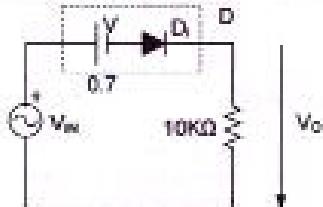


Figura 3.3 Circuito recortador sin diodo ideal

Los resultados en las formas de onda son los siguientes:

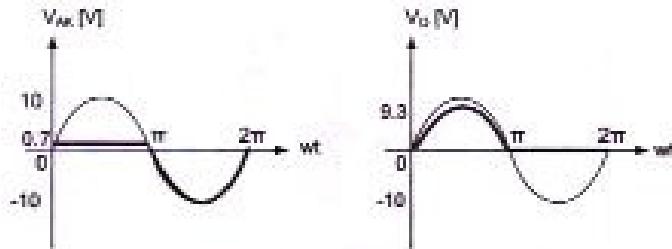


Figura 3.4 Forma de onda en el diodo y en la salida

Analicemos ahora el siguiente circuito para la misma forma de onda.

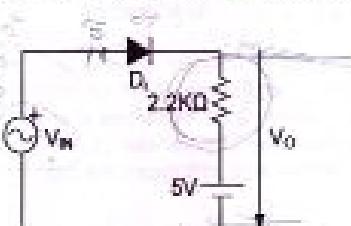


Figura 3.5 Circuito recortador con fuente de voltaje

Consideremos así mismo, en primera instancia, que el diodo es ideal. Cuando el voltaje a la entrada es igual a cero, la fuente independiente de voltaje DC estaría polarizando al diodo de forma inversa, y se mantendrá así hasta que el voltaje de entrada supere ligeramente los 5 [V]. A partir de esto, el diodo ideal entrará en conducción, y todo el voltaje de entrada aparecerá en la resistencia de 2.2 [kΩ].

Cuando la señal de entrada vuelve a tener un valor menor a los 5 [V] (y esto incluye el semicírculo negativo), el diodo entrará nuevamente a polarización inversa y formará un circuito abierto; de esta manera producirá a la salida un valor de voltaje igual a cinco.

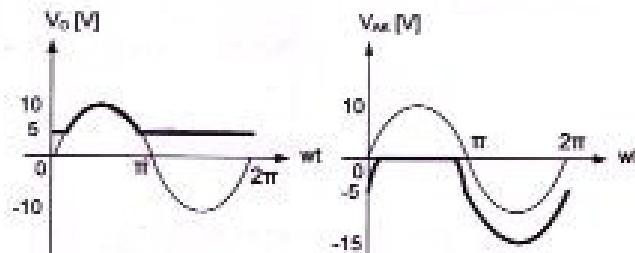


Figura 3.6 Forma de onda en la salida y en el diodo (ideal)

Si usamos la primera aproximación del diodo, al cual lo consideraremos de silicio, obtendremos las siguientes formas de onda:

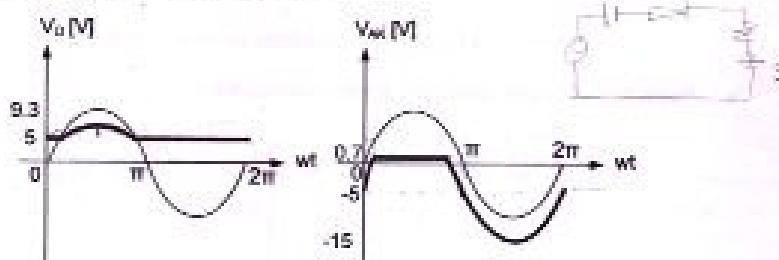


Figura 3.7 Forma de onda en la salida y en el diodo (Silicio)

El análisis sería el mismo si la forma de onda fuese diferente:

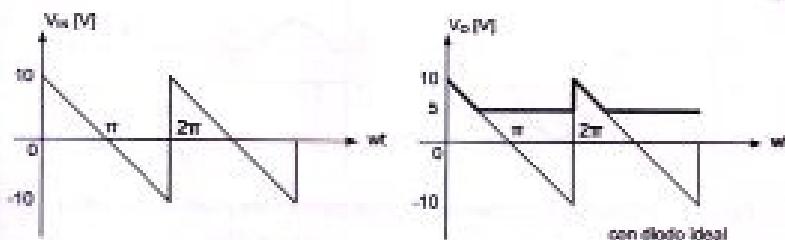


Figura 3.8 Forma de onda en la salida y en el diodo con señal diente de sierra

Presentamos a continuación una serie de circuitos semejantes, cuyos análisis son exactamente los mismos que en los casos anteriores, y que quedan como ejercicio para el alumno.

• Recortadores con diodo en serie simples

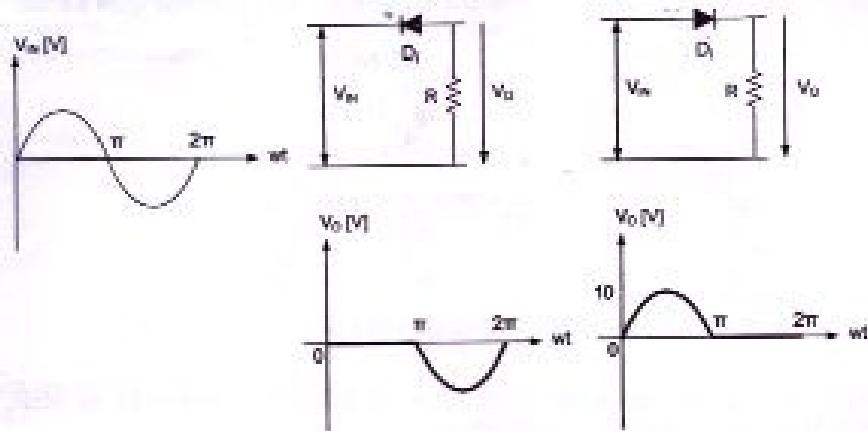


Figura 3.9 Circuitos Recortadores en serie simples

• Recortadores con diodo en serie polarizados

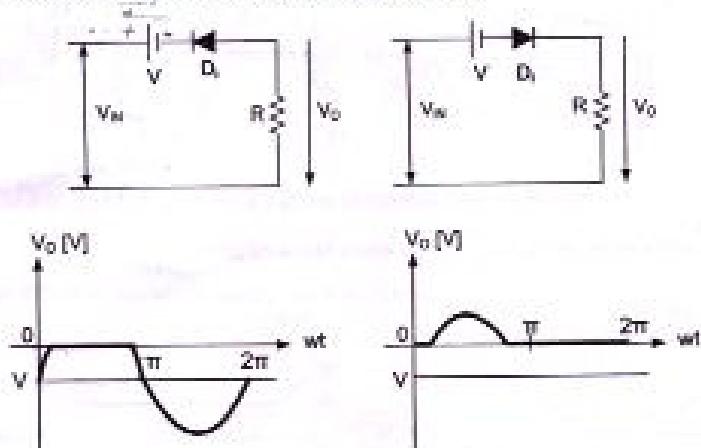
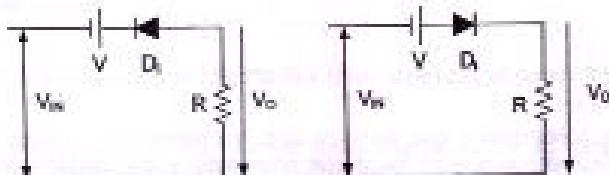


Figura 3.10 Circuitos Recortadores en serie polarizados y señales de salida



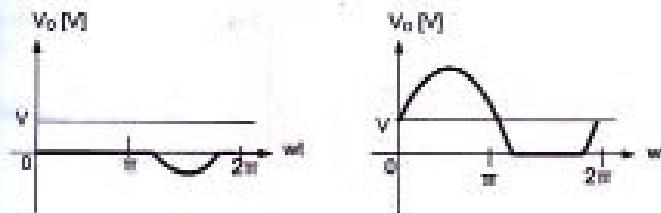


Figura 3.11 Circuitos Recortadores en serie polarizados y señales de salida

- **Recortadores con diodo en paralelo simples**

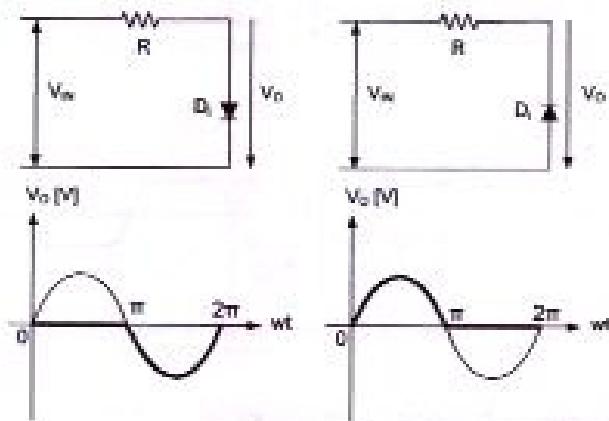
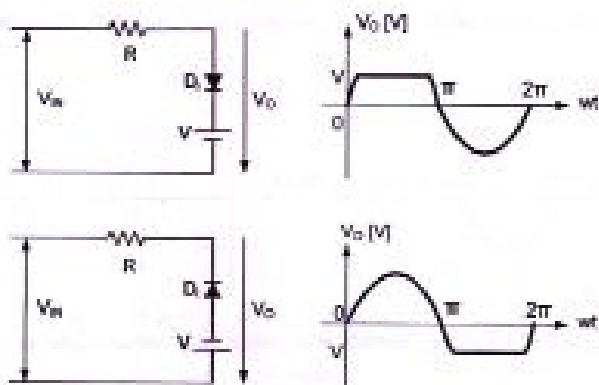


Figura 3.12 Circuitos recortadores en paralelo simples

- **Recortadores con diodo en paralelo polarizados**



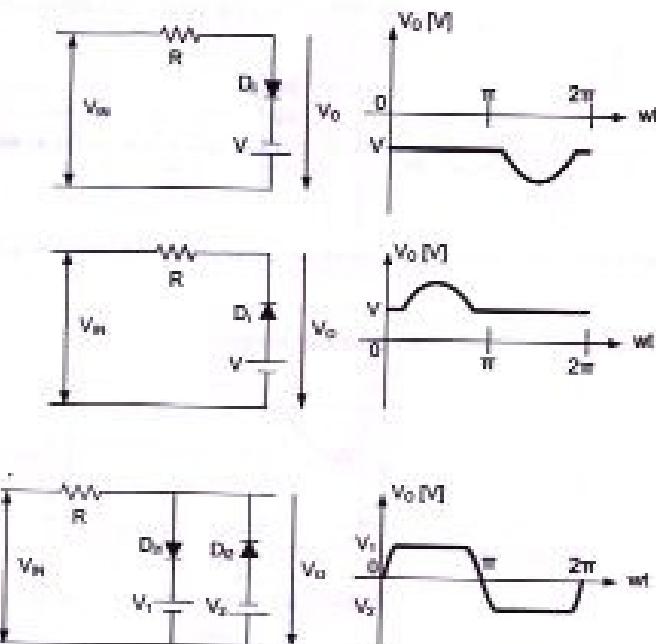


Figura 3.13 Circuitos Recortadores en paralelo polarizados

3.2. SUJETADORES O FIJADORES DE VOLTAJE

Los circuitos sujetadores tienen un mínimo requisito de tres elementos: un diodo, un condensador y una resistencia. A un circuito sujetador también puede aumentarse una batería DC.

Los circuitos sujetadores sujetan la forma de onda a un nivel DC diferente.

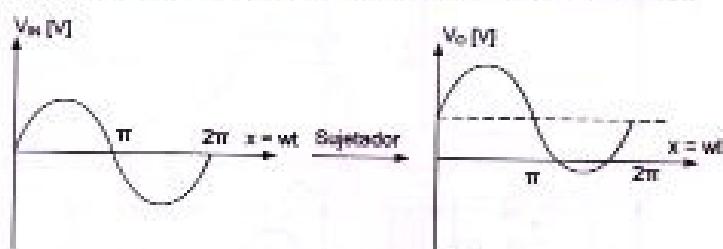


Figura 3.14 Señal de entrada y de salida en un circuito sujetador

En general las magnitudes de R y C pueden elegirse de tal manera que la constante de tiempo $\tau = RC$ sea suficientemente grande para garantizar que el voltaje a través del condensador no cambie significativamente durante el intervalo de tiempo determinado por la entrada.

Ejemplo

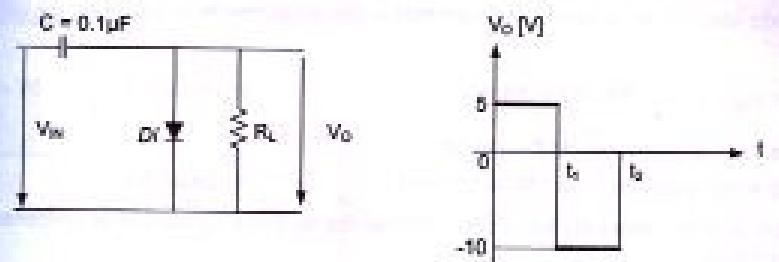
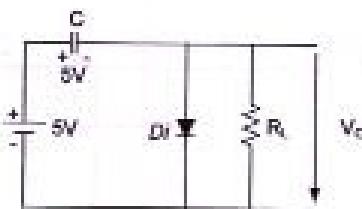


Figura 3.15 Circuito sujetador y señal de salida

- a) Consideraremos que la resistencia de carga R_L es muy grande por ejemplo $R_L = 100 \text{ [k}\Omega\text{]}$ y supondremos también que el capacitor C está inicialmente descargado.

- Si $V_{IN} = 5 \text{ [V]}$

Figura 3.16 Circuito sujetador con $V_{IN} = 5 \text{ [V]}$

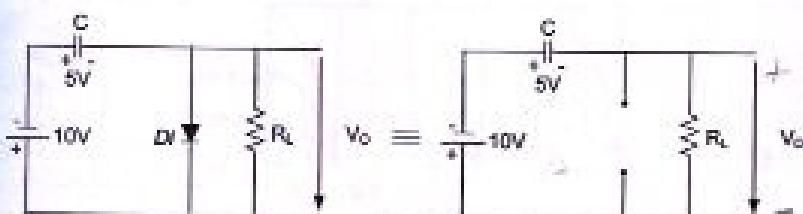
El diodo ideal D_1 se polariza directamente por lo tanto es un cortocircuito.

$\rightarrow r_m(B) = 0$ y $V_C = 0$, por lo tanto el voltaje de salida es $V_O = 0$; mientras que el condensador sin embargo se carga rápidamente a 5 V pues la constante de tiempo de la red es:

$$\tau_{RC} = 5 \text{ s}$$

$$\tau = RC \rightarrow \tau = r_m C = 0 \cdot C = 0 \text{ s.}$$

- Cuando la entrada comienza a $V_{IN} = -10 \text{ V}$ el circuito es:

Figura 3.17 Circuito sujetador con $V_{IN} = -10 \text{ [V]}$

El diodo ideal D1 se polariza inversamente y por tanto se comporta como un circuito abierto:

$$\rightarrow V_O = V_{IN} + V_C = (-10 - 5) = -15 \text{ [V]}. \quad (\text{Ecación 3.1})$$

En este caso la constante de tiempo es:

$$\tau = RC = 100 \text{ [k}\Omega\text{]} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ [F]} = 10 \text{ [ms]}. \quad (\text{Ecación 3.2})$$

Puesto que el condensador toma cinco constantes de tiempo para que el condensador se descargue.

Tiempo de descarga ó tiempo de apagado = 5τ

$$\rightarrow t_{sp} = 5 \cdot 10 \text{ [ms]} = 50 \text{ [ms]} \quad (\text{Ecación 3.3})$$

Puesto que el semiperíodo $T/2 = 0,5 \text{ [ms]}$ de la señal de entrada es menor que el t_{sp} , el condensador permanecerá cargado durante el semiperíodo de $t_1 \rightarrow t_2$.

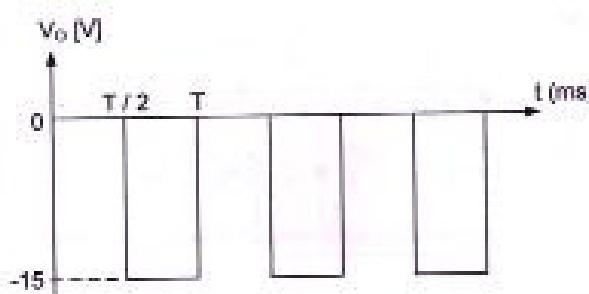


Figura 3.18 Forma de onda de la salida cuando el capacitor está cargado y R_c alta

b) Si consideramos una $R_c = 1 \text{ k}\Omega$, es decir pequeña, entonces la constante de tiempo $\tau = RC = 1 \text{ [k}\Omega\text{]} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ [F]} = 0,1 \text{ [ms]}$, por lo tanto $t_{sp} = 5 \tau = 0,5 \text{ [ms]}$ y $T/2 = t_{sp}$. En este caso el condensador se descarga durante el intervalo en el cual el voltaje es de 10 [V].

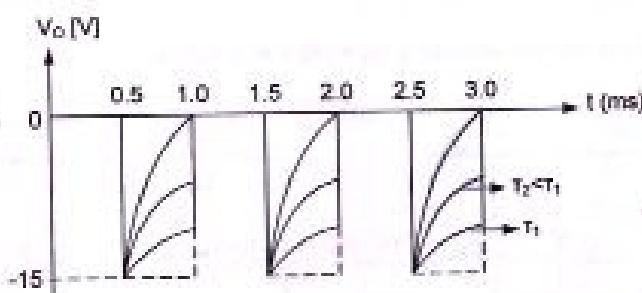


Figura 3.19 Forma de onda de la salida cuando el capacitor está cargado y R_c baja

3.3 SUJETADORES SERIE - PARALELO

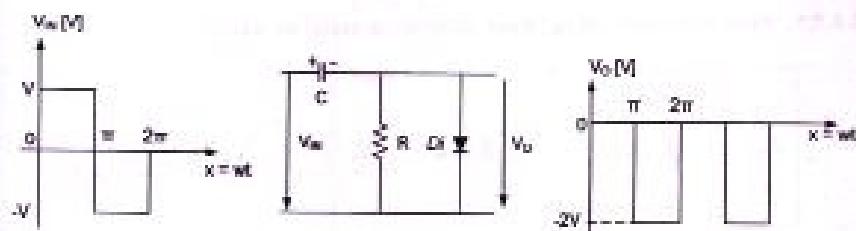


Figura 3.20 Circuito Sujetador, y señal de salida

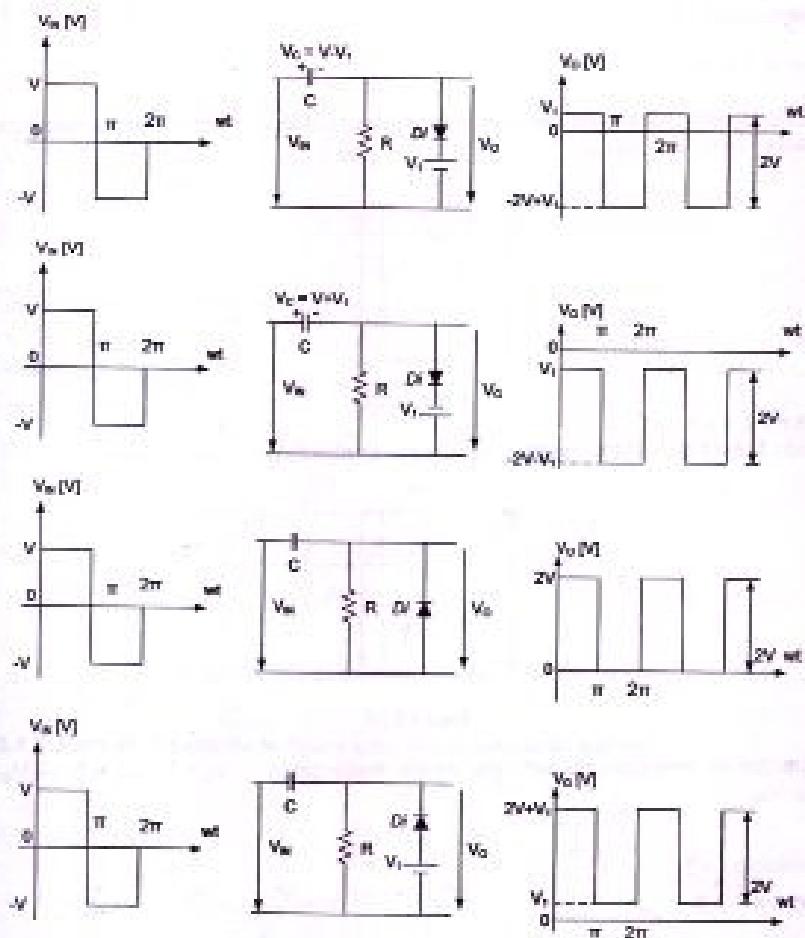


Figura 3.21 Circuitos Sujetadores con fuente a la salida y formas de onda

3.3.1. PROBLEMAS RESUELTOS

3.3.1.1. Para el circuito de la figura obtener la señal de salida.

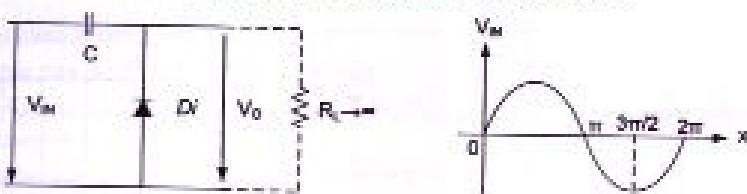


Figura 3.22 Circuito Sujecador

Análisis:

a) Semicírculo (-)

a1) $\pi < x < 3\pi/2$

El diodo D está polarizado directamente (cortocircuito) y el condensador empieza a cargarse hasta $V_C = V_{IN \text{ max}}$.

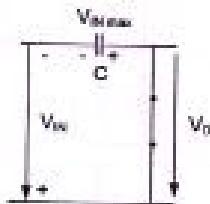


Figura 3.23

a.2) $3\pi/2 < x < 2\pi$

El diodo D está polarizado inversamente (circuito abierto).

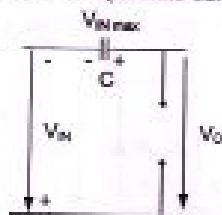


Figura 3.24

El capacitor en este caso no tiene por donde descargarse $\rightarrow V_O = V_{IN \text{ max}} = 0 \rightarrow V_O = V_{IN \text{ max}} - V_{IN}$

b) Semicírculo (+)

b1) $2\pi < x < 3\pi$

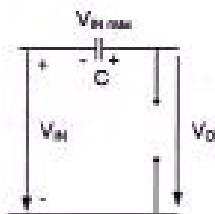


Figura 3.25

El diodo D en polarización inversa (se abre).

$$\rightarrow V_O = V_{IN,max} + V_{IN}$$

c) Semicírculo (-)

c1) $3\pi < x < 4\pi$

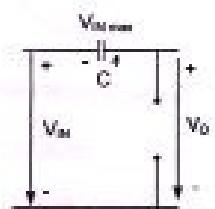


Figura 3.26

El diodo D en polarización inversa (se abre).

$$\rightarrow V_O = V_{IN,max} + V_{IN}$$

(Ecuación 3.4)

El voltaje de salida es:

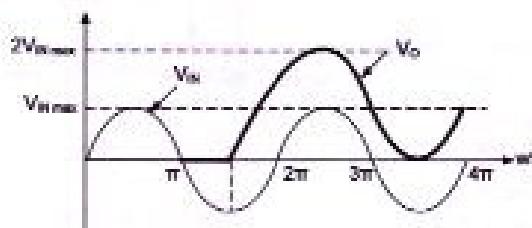


Figura 3.27 Forma de onda de la salida del circuito sujetador

3.3.1.2. Para el circuito de la figura calcular el voltaje de salida.

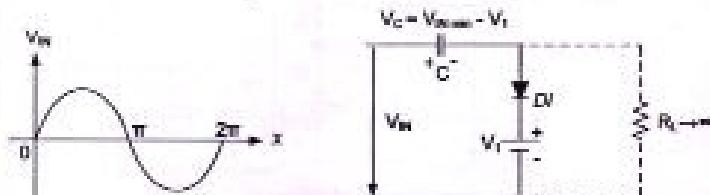


Figura 3.28 Circuito Sujetador

Análisis:

a) $0 < x < \pi / 2$

a1) Si $V_{IN} < V_1$, El D en PI (se abre) $\rightarrow V_O = V_{IN}$

a2) Si $V_{IN} > V_1$, El D en PD (cortocircuito) $\rightarrow V_O = V_1$ y $V_C = V_{IN \max} - V_1$.

b) $\pi / 2 < x < \pi$

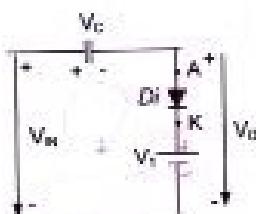


Figura 3.29

$$-V_{IN} + V_{IN \max} + V_{AK} + V_1 = 0$$

$$\rightarrow V_{AK} = V_{IN} - V_{IN \max} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

como $V_{IN} < V_{IN \max}$ para $\pi / 2 < x < \pi \rightarrow V_{AK} < 0 \rightarrow$ D se abre.

$$V_O - V_{IN} + V_{IN \max} - V_1 = 0$$

$$V_O = V_1 + V_{IN} - V_{IN \max} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

c) $\pi < x < 2\pi$

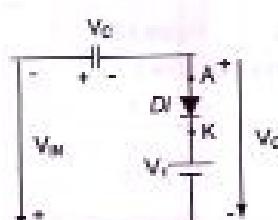


Figura 3.30

$$-V_{IN} + V_{IN \max} + V_{AK} + V_1 = 0$$

$$\rightarrow V_{AK} = -V_{IN} + V_{IN \max}$$

\rightarrow D en PI (cortocircuito).

$$V_O + V_{IN} + V_{IN \max} - V_1 = 0$$

$$V_O = V_1 - V_{IN} - V_{IN \max}$$

d) $2\pi < x < 5\pi / 2$

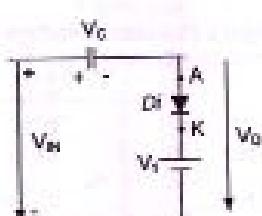


Figura 3.31

$$\rightarrow V_{IN} + V_{IN \text{ max}} + V_{AK} + V_1 = 0$$

$$\rightarrow V_{AK} = V_{IN} - V_{IN \text{ max}}$$

como $V_{IN} < V_{IN \text{ max}} \Rightarrow 2\pi - \pi/2 \rightarrow V_{AK} < 0 \rightarrow D \text{ se abre.}$

$$V_O = V_{IN} + V_{IN \text{ max}} - V_1 = 0$$

$$V_O = V_1 + V_W - V_{IN \text{ max}}$$

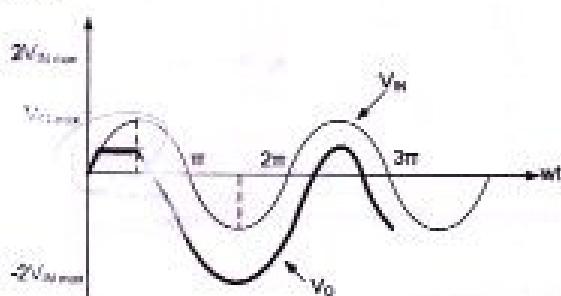


Figura 3.32 Forma de onda de salida

3.4. MULTIPLICADORES DE VOLTAJE.

Son dispositivos que utilizan la carga paralela de los capacitores para obtener un voltaje DC mayor que el voltaje de entrada. Existen dos clases de dobladores:

- a) Doblador de 1/2 onda
- b) Doblador clásico o doblador de onda completa.

3.5. DOBLADOR DE 1/2 ONDA.

Los dobladores son utilizados para obtener un voltaje de salida DC alto para una señal AC de entrada bajo para cargas pequeñas, es decir (R altos).

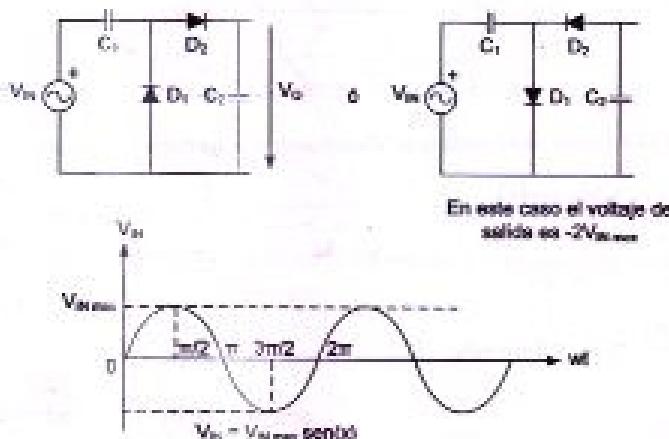


Figura 3.33 Circuitos dobladores de 1/2 onda y señal de salida

Análisis:

a). $\pi < x < 2\pi$

D1 PD (conduce) y D2 PI (se abre).

El circuito equivalente es:

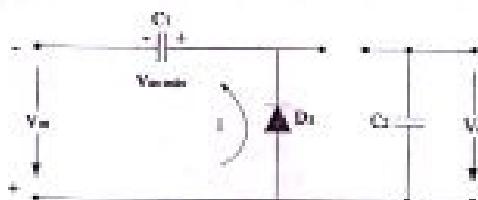


Figura 3.34

Cuando $x = 3\pi/2$ el condensador se carga $V_C = V_{in \max}$.

b). $2\pi < x < 3\pi$.

D1 PI (se abre) y D2 PD (conduce).

El circuito equivalente es:

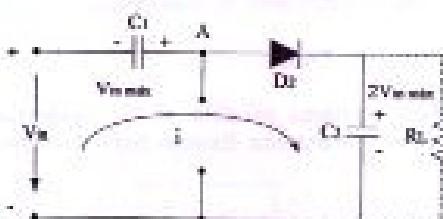


Figura 3.35

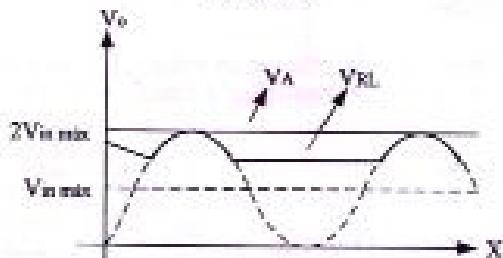


Figura 3.36 Forma de onda de la salida del circuito doblador de 1/2 onda

$$V_A = V_{in \max} + V_{in \max} \times \sin(x)$$

(Ecación 3.7)

$$\text{Si } x = \frac{5\pi}{2} \Rightarrow V_A = 2V_{in \max}.$$

$$\text{Si } x = 2\pi + \frac{0.9\pi}{2} \Rightarrow V_A < 2V_{in \max}$$

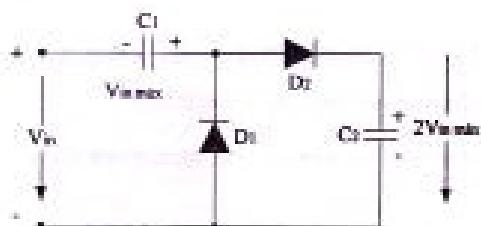


Figura 3.37

$$V_o = 2V_{in \text{ máx.}}$$

$$V_{ac}(D_1) = V_{in \text{ máx.}} - V_{in} - 2V_{in \text{ máx.}}$$

Si $V_{in} = 0 \Rightarrow V_{ac}(D_1) = -V_{in \text{ máx.}}$ entonces no conduce,
De $3\pi \rightarrow D_1$ y D_2 no conducen.

3.6. DOBLADOR DE ONDA COMPLETA.

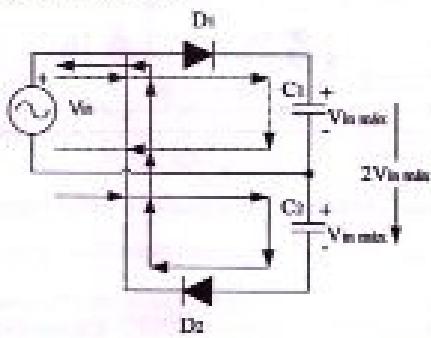


Figura 3.38 Análisis del circuito doblador de onda completa

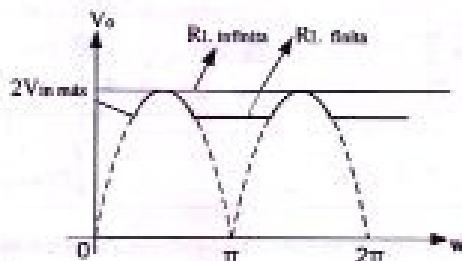


Figura 3.39 Forma de onda de salida del circuito doblador de onda completa

Análisis

- a). $0 < x < \pi$
D1 PD (conduce) y D2 PI (no conduce).
- b). $\pi < x < 2\pi$.
D1 PI (no conduce) y D2 PD (conduce).

c). $2\pi < x < 3\pi$.

D1 PI (no conduce) y D2 PI (no conduce)

De aquí en adelante Di y Da no conducen $V_o = 2V_{in}$.

Se recomienda en este circuito escoger los capacitores C1 y C2 capacitancia y de igual voltaje nominal.

Este circuito es utilizado para cargas más grandes (R bajas).

3.7. MULTIPLICADORES DE VOLTAJE EN CASCADA- TRIPLOICADORES

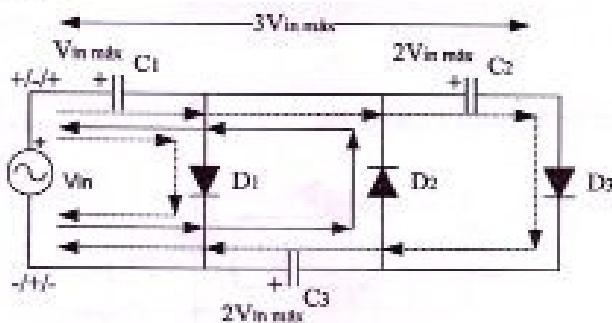


Figura 3.40 Circuito Multiplicador de Voltaje (Triplicador)

$V_o = 3V_{in \text{ máx}}$.

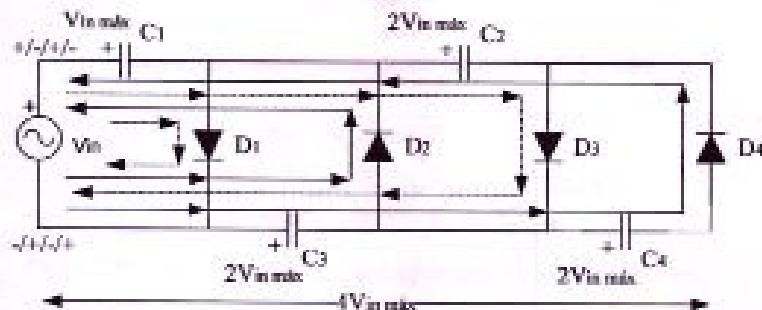


Figura 3.41 Circuito Multiplicador de Voltaje (Cuadriplicador)

$V_o = 4V_{in \text{ máx}}$.

Si el multiplicador es de orden n $\rightarrow V_o = nV_{in \text{ máx}}$.

Este método se emplea para obtener voltajes altos DC de voltajes bajos AC.

APLICACIÓN. Utilizados para generar altos voltajes en tubos de TV.

3.8. RECTIFICACIÓN.

Es el proceso mediante el cual se convierte energía AC en DC.

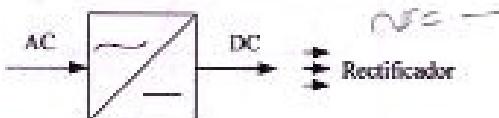


Figura 3.42 Esquema de un Rectificador

3.8.1 RECTIFICADOR DE MEDIA Onda (R 1/2 O) CON CARGA RESISTIVA.

Cualquier dispositivo eléctrico que presente una resistencia pequeña a la corriente en un sentido y una resistencia grande en el opuesto se denomina rectificador.

Este circuito es capaz de convertir una señal de entrada senoidal con valor medio igual a cero en una forma de onda unidireccional con un valor medio distinto de cero.

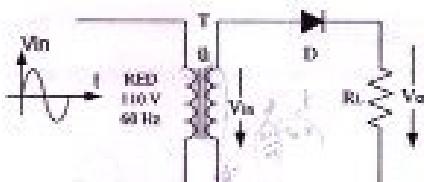


Figura 3.43 Circuito Rectificador de media onda

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \text{Voltaje primario} / \text{Voltaje secundario} \quad (\text{Ecación 3.8})$$

$$\alpha = \frac{N_p}{N_s} = \# \text{ vueltas primario} / \# \text{ vueltas secundario.} \quad (\text{Ecación 3.9})$$

$$\alpha = \frac{I_{sn}}{I_{pn}} = I \text{ secundario nominal} / I \text{ primario nominal.} \quad (\text{Ecación 3.10})$$

El circuito equivalente visto del secundario es:

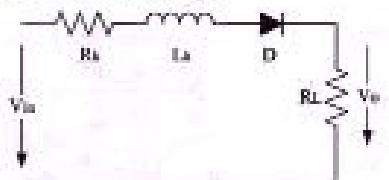


Figura 3.44 Circuito R 1 / 2 O visto desde el secundario

R_k: representa las pérdidas del transformador.

L_k: inductancia equivalente del transformador.

Si consideráramos a un transformador ideal:

- Pérdidas eléctricas = 0 (R_k = 0)
- Pérdidas de magnetización = 0 (L_k = 0).

Un transformador de baja potencia podría considerarse como transformador ideal.

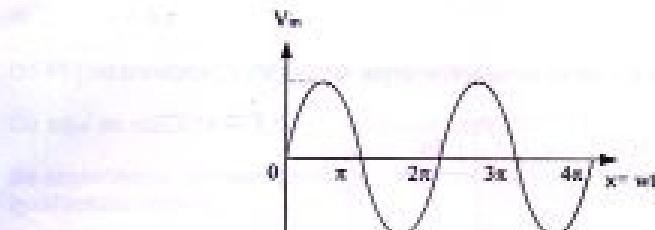


Figura 3.45 Señal de entrada para un circuito Rectificador

Análisis con diodo ideal:

a). Secuencia (+).

D en PD conduce (cortocircuito).

$$V_o = V_{in} \rightarrow \frac{V_{in}}{R_L} = 1$$

b). Secuencia (-).

D en PI no conduce (circuito abierto).

$$V_o = 0V.$$

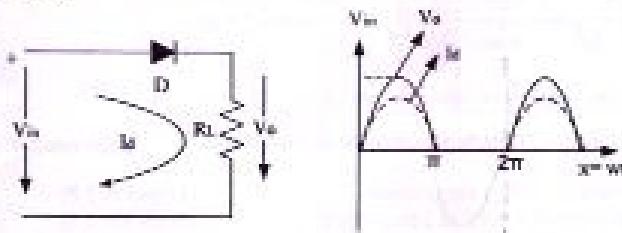


Figura 3.46 Circuito Rectificador con diodo ideal y señal de salida

Análisis con diodo no ideal.

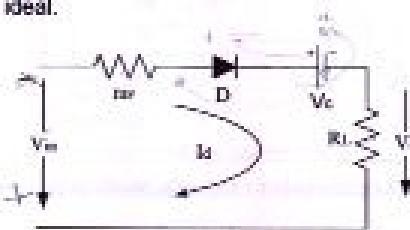


Figura 3.47 Circuito Rectificador con diodo no ideal

a). Si $V_{in} \geq V_C \Rightarrow$ el diodo conduce.

$$iD = \frac{V_{in} - V_C}{R_L + r_{ov}} \quad (\text{Ecación 3.11})$$

$$V_o = \frac{R_L(V_{in} - V_C)}{R_L + r_{ov}} \quad (\text{Ecación 3.12})$$

NOTA: Para el caso de un rectificador no se toma en cuenta la región inversa del diodo.

$$I_{dmáx} = \frac{V_{in\max} - V_C}{R_L + r_m} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

$$V_O = \frac{R_L (V_{in\max} - V_C)}{R_L + r_m} \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

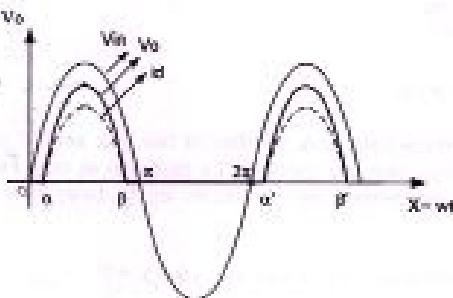


Figura 3.48 Forma de onda de salida del circuito Rectificador

Si $V_C \ll V_{in\max}$ entonces no cometemos mayor error si hacemos:

$$I_{dmáx} = \frac{V_{in\max}}{R_L + r_m} \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

$$V_O = \frac{R_L (V_{in\max})}{R_L + r_m} \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

$\rightarrow \alpha \approx 0$ por tanto: $\pi - \beta \approx 0 \rightarrow \mu = \beta - \alpha \approx \pi$ donde:
 μ es el ángulo de conducción.

La corriente tiene la misma forma de onda que el V_O pero con otra escala.

3.8.2. COMPONENTES MEDIAS.

Constituye la lectura de un amperímetro o voltímetro DC.

Por definición:

$$\text{Valor Medio} = V = \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T v(t) dt \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

$$V = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad \begin{cases} x = wt \\ \omega = 2\pi f \\ T = \frac{1}{f} \end{cases}$$

$$I_{oc} = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi} i(x) dx = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi} I_{máx} \sin(x) dx$$

$$\begin{aligned} I_{DC} &= \frac{1}{2\pi} I_{máx} (-\cos(x)) \Big|_0^{\pi} \\ I_{DC} &= \frac{1}{2\pi} I_{máx} [-\cos(\pi) - (-\cos(0))] \\ I_{DC} &= \frac{1}{\pi} I_{máx} \end{aligned} \quad (Ecuación 3.18)$$

$$\begin{aligned} V_{DC} &= \frac{I_{DC} \times R_L}{\pi} = \frac{V_{D, mdc}}{\pi} \\ V_{DC} &= I_{DC} \times R_L \end{aligned} \quad (Ecuación 3.19)$$

En los terminales del diodo.

Cuando el diodo conduce tiene una resistencia r_{av} y la tensión entre sus bornes es: $I_d \times r_{av}$. Cuando el dispositivo no conduce. La corriente es nula es decir. $I_d = 0$; por lo tanto la tensión en los terminales del diodo es la tensión en el secundario del transformador V_{in} .

Así: $V_{diodo} = I_d \times r_{av} = I_{máx} \times r_{av} \times \operatorname{sen}(x) \quad \} 0 < x < \pi$

$V_{diodo} = V_{in} \operatorname{sen}x \quad \} 0 < x < 2\pi$

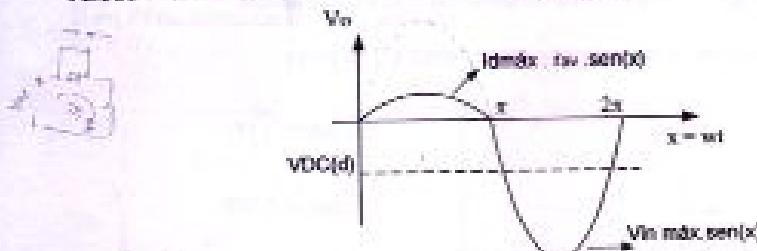


Figura 3.49 Señal de salida de un circuito Rectificador

El valor medio de la tensión en los terminales del diodo (que es la lectura de un voltímetro DC) es:

$$V_{DC(diodo)} = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\int_0^\pi I_{máx} r_{av} \operatorname{sen}(x) dx + \int_\pi^{2\pi} V_{in} \operatorname{sen}(x) dx \right]$$

$$V_{DC(diodo)} = \left(\frac{1}{\pi} \right) [I_{máx} r_{av} + V_{in, mdc}]$$

$$V_{DC(diodo)} = \left(\frac{1}{\pi} \right) [I_{máx} r_{av} - I_{máx} d \cdot (r_{av} + R_L)]$$

$$V_{DC(diodo)} = - \left[I_{máx} d \cdot \frac{R_L}{\pi} \right]$$

$V_{DC(diodo)}$ es negativo.

(Ecuación 3.20)

3.8.3. COMPONENTES rms.

Constituye la lectura de un amperímetro ó voltímetro de la componente AC.

Por definición

$$\begin{aligned} V^2_{\text{rms}} &= \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T V^2(x) dx \\ P_{\text{rms}} &= \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi} I^2 \sin^2(x) dx \\ \text{pero } \sin^2(x) &= \frac{1 - \cos(2x)}{2} \\ P_{\text{rms}} &= \left(\frac{1}{4\pi} \right) I^2 \int_0^{2\pi} (1 - \cos(2x)) dx \\ V_{\text{rms}} &= \left(\frac{1}{4\pi} \right) I^2 \int_0^{2\pi} \left[x - \frac{\sin(2x)}{2} \right] dx + \\ P_{\text{rms}} &= \left(\frac{1}{4} \right) I^2 \text{rms} \\ I_{\text{rms}} &= \frac{I_{\text{max}}}{2} \end{aligned} \tag{Ecuación 3.21}$$

$$\Rightarrow V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} \times R_L \tag{Ecuación 3.22}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{max}} \times R_L}{2} = \frac{V_{\text{max}}}{2}$$

$$\text{si } r_o = 0 \Rightarrow Id_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{max}}}{R_L}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{R_L (Id_{\text{rms}})}{\pi} \tag{Ecuación 3.23}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{R_L (V_{\text{max}})}{\pi \times R_L} \tag{Ecuación 3.24}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{max}}}{\pi} \tag{Ecuación 3.25}$$

$$Id_{\text{rms}} = \frac{Id_{\text{max}}}{\pi} \tag{Ecuación 3.26}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{R_L (Id_{\text{max}})}{2} \tag{Ecuación 3.27}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{R_L (V_{\text{max}})}{2R_L} \tag{Ecuación 3.28}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{R_L (V_{\text{max}})}{2} \tag{Ecuación 3.29}$$

$$Id_{\text{rms}} = \frac{Id_{\text{max}}}{2} \tag{Ecuación 3.30}$$

RESUMEN

si $r_{ce} \ll R_L$

$$Id_{DC} = \frac{Id_{máx}}{\pi}$$

$$V_{DC} = \frac{V_{máx}}{\pi}$$

$$V_{DCs} = \frac{R_L(Id_{máx})}{\pi}$$

$$V_{rms} = \frac{R_L(Id_{máx})}{2}$$

$$V_{DC} = \frac{V_{máx}}{\pi}$$

$$V_{rms} = \frac{V_{máx}}{2}$$

$$Id_{DC} = \frac{Id_{máx}}{\pi}$$

$$Id_{rms} = \frac{Id_{máx}}{2}$$

Donde: $I_{máx}$ = corriente máxima o pico que circula a través del diodo. I_{DC} = componente DC o media de la corriente. I_{rms} = componente eficaz de la corriente.

POTENCIA MEDIO O PROMEDIO

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(x) u(x)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (Id^2(x) R_L dx) \quad (\text{Ecuación 3.27})$$

REGULACIÓN.

Se define como la cantidad de cambio en el voltaje DC de salida sobre el rango de operación del circuito.

$$\% \text{ regulación} = \frac{100(V_{DCs} \text{ vacío} - V_{DCs} \text{ carga})}{V_{DCs} \text{ carga}} \quad (\text{Ecuación 3.28})$$

Donde: V_{DCs} vacío si $R_L \rightarrow \infty$ ($id = 0$) V_{DCs} carga si R_L es finito ($id \neq 0$)

$$V_{DCs} = I_{DCs} \times R_L = \frac{Id_{máx} \times R_L}{\pi} \quad \text{pero} \quad Id_{máx} = \frac{V_{máx}}{r_{ce} + R_L}$$

$$V_{DCs} = \frac{V_{máx} \times R_L}{\pi(r_{ce} + R_L)}$$

$$V_{DCs} = \frac{V_{máx} \times (R_L + r_{ce} - r_m)}{\pi(r_{ce} + R_L)}$$

$$V_{DCs} = \frac{V_{máx} \times 1 - \frac{r_m}{(r_{ce} + R_L)}}{\pi}$$

$$V_{DCs} = \frac{V_{máx}}{\pi} - \frac{V_{máx}}{\pi} \times \frac{r_m}{(r_{ce} + R_L)}$$

$$V_{DCo} = \frac{V_{in\max}}{\pi} - I_{DCo} r_o \quad (\text{Ecuación 3.29})$$

Donde I_{DCo} depende de la carga R_L :

Si $R_L \uparrow \rightarrow I_{DCo} \downarrow$

Si $R_L \downarrow \rightarrow I_{DCo} \uparrow$

$$\text{Si } r_o \rightarrow 0 \Rightarrow V_{DCo} = \frac{V_{in\max}}{\pi} \quad (\text{VDCo(vacio)})$$

$$\% \text{ regulación} = \left(\frac{V_{in\max}/\pi - V_{in\max}/\pi}{V_{in\max}/\pi} \right) \times 100 = 0\% \quad (\text{Ecuación 3.30})$$

El % regulación = 0 significa que el circuito de rectificación de 1/2 onda se comporta como una fuente de alimentación ideal, es decir, que el voltaje de salida es independiente de la corriente drenada por la fuente.

El voltaje de salida de la mayoría de las fuentes disminuye cuando la corriente drenada por la fuente. Entre más pequeña sea la reducción de voltaje menor es el porcentaje de regulación.

$$V_{DCo} = \frac{V_{in\max}}{\pi} - I_{DCo} r_o$$

Si graficamos la Ecuación 3.29

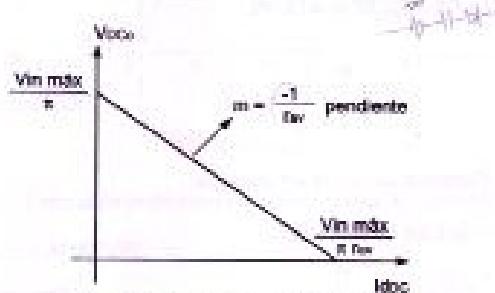


Figura 3.50 Voltaje de salida DC

Es decir, teniendo el gráfico de V_{DCo} vs I_{DCo} permite obtener gráficamente la R_{av} . Experimentalmente tenemos:

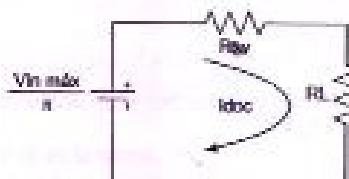


Figura 3.51 Circuito equivalente DC de circuito Rectificador

Para el caso de que el transformador presente pérdidas eléctricas, $R_s = R_k + r_{av}$

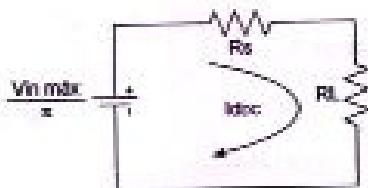


Figura 3.52 Circuito equivalente DC con pérdidas eléctricas

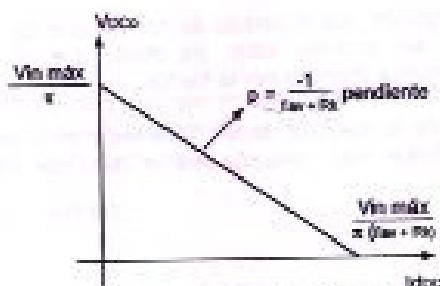


Figura 3.53 Voltaje de salida DC

3.8.4. EFICIENCIA DE RECTIFICACIÓN.

Se define como:

$$\eta_r = \frac{P_{DCo}}{P_{TOTAL}} \quad (\text{Ecuación 3.31})$$

Donde: P_{DCo} = Potencia continua en la carga.

P_{TOTAL} = Potencia total de entrada.

$$P_{DCo} = V_{DCo} \times I_{DCo} = I^2_{DCo} \times R_L \quad (\text{Ecuación 3.32})$$

$$P_{TOTAL} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (Vin \times Id)^2 dx$$

$$\text{pero } Vin = id(R_s + r_{av}) \quad 0 \leq x \leq \pi$$

$$P_{TOTAL} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I^2 id^2 (R_s + r_{av}) dx$$

$$P_{TOTAL} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I^2 d \sin x \sin^2(x) (R_s + r_{av}) dx$$

$$P_{TOTAL} = I^2 \sin x (R_s + r_{av})$$

$$\eta_r = \frac{\frac{I^2 d \sin x}{\pi} \times 100}{\frac{I^2 \sin x (R_s + r_{av})}{2\pi}}$$

$$\eta_r = \frac{4R_i}{\pi^2(R_L + r_{av})} \times 100 \quad (\text{Ecación 3.34})$$

Si el diodo es ideal $\rightarrow r_{av} = 0$

$$\eta_r = 40,5\%$$

$$\eta_{max} = 40,5\%$$

Para rectificador de media onda.

3.8.5. FACTOR DE RIZADO (r)

Aunque la misión de un rectificador es convertir la corriente alterna en continua, con ninguno de los circuitos rectificadores más complejos se obtiene una salida realmente constante.

El factor de rizado r es una medida de las componentes alternas y se define como:

$r = \text{valor rms de las componentes alternas} / \text{valor medio en la carga}$.

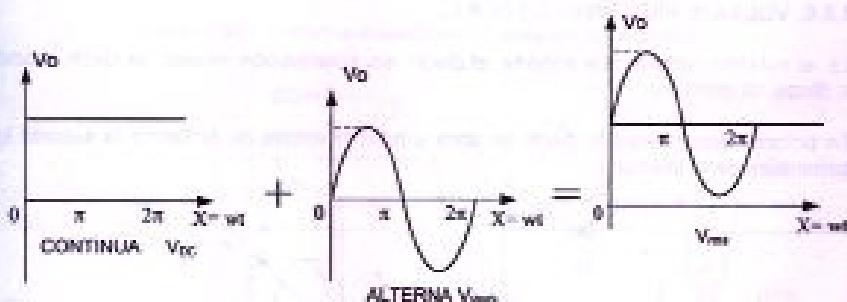


Figura 3.54 Formas de onda continua, alterna y rms de un Rectificador

Usando el teorema de PARSEVAL.

$$V^2_{rms} = V^2_{DC} + V^2_{AC} \quad (\text{Ecación 3.35})$$

Donde: V_{rms} = valor eficaz total

V_{DC} = valor de continua

V_{rms} = valor eficaz de alterno

$$\Rightarrow r = \frac{V_{rms}}{V_{DC}} \quad (\text{Ecación 3.36})$$

donde : V_{rms} = valor eficaz de la componente alterna.

V_{DC} = valor de continua en la carga.

$$\tau = \frac{\sqrt{V_{DC}^2 - V_{AC}^2}}{V_{DC}} = \sqrt{\left(\frac{V_{DC}}{V_{AC}}\right)^2 - 1}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{\frac{Idmax \cdot R_L}{2}}{\frac{Idmax \cdot R_L}{\pi}}} - 1 = 1.21 \rightarrow 121\%$$

Este resultado nos indica:

Si $\tau > 1$ el rectificador de 1/2 onda es malo ya que la componente AC es grande comparada con la componente DC.

Si $\tau < 1$ el rectificador de 1/2 onda es de buena calidad puesto que la componente AC es más pequeña comparada con la componente DC.

3.8.6. VOLTAJE PICO INVERSO (V.P.I.)

Es el máximo voltaje que soporta el diodo en polarización inversa, es decir, cuando el diodo no conduce.

En polarización inversa el diodo se abre y todo el voltaje de la fuente lo soporta los terminales de la misma.

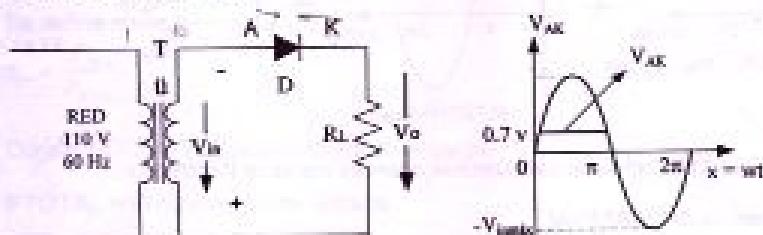


Figura 3.55 Forma de onda (V_{AK}) de un Rectificador 1/1 onda

$$VPI = V_{in \max}$$

$$(Ecuación 3.37)$$

Se debe garantizar que: $VPI < V_{RUPTURA}$

3.9. RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.

Existen dos tipos de rectificadores de onda completa:

- Rectificador de 1/1 onda con toma central (TAP CENTRAL), este utiliza dos diodos.
- Rectificador de 1/1 onda tipo puente, utiliza cuatro diodos.

3.9.1. RECTIFICADOR DE 1/1 ONDA CON TOMA CENTRAL.

Transformador con toma central y dos diodos rectificadores.

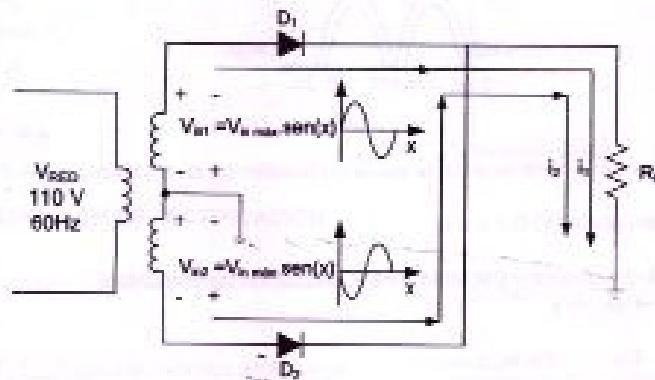


Figura 3.56 Circuito Rectificador de 1/1 onda con toma central

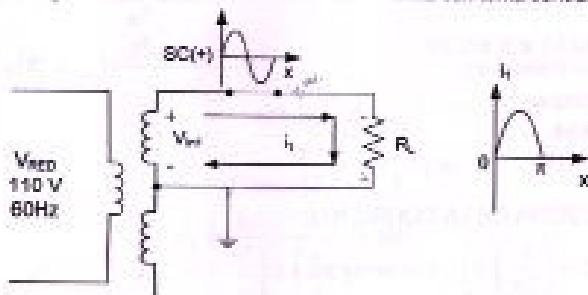


Figura 3.57 Análisis de polarización del Rectificador de 1/1 onda con toma central sc(+)

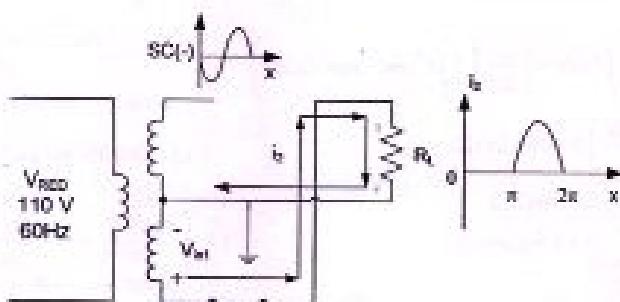


Figura 3.58 Análisis de polarización del Rectificador de 1/1 onda con toma central sc(-)

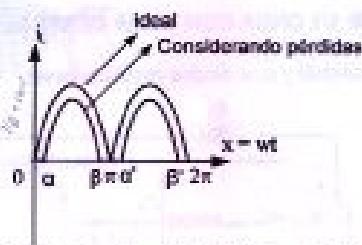


Figura 3.59 Forma de onda de salida del Rectificador de 1/2 onda con toma central

Para la secuencia (+) $0 \leq x \leq \pi$

D1 en PD \rightarrow conduce y por tanto existe circulación de corriente i_L
D2 en PI \rightarrow se abre.

$$\Rightarrow i_L = \frac{V_m}{R_L + r_{eq}} = \frac{V_m \text{máx} \cdot \text{sen}(x)}{R_L + r_{eq}} \quad (\text{Ecuación 3.38})$$

$$i_L = i_L \text{máx} \cdot \text{sen}(x)$$

Para la secuencia (-) $\pi \leq x \leq 2\pi$

D1 en PD \rightarrow conduce.
D2 en PI \rightarrow se abre.
 $\Rightarrow i_L = i_L \text{máx} \cdot \text{sen}(x)$

COMPONENTE MEDIA DE LA CORRIENTE

$$I_{Lm} = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{2\pi}_0 i_L dx = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left(2 \int_0^{\pi} i_L \text{máx} \cdot \text{sen}(x) dx \right)$$

$$I_{Lm} = \frac{2 I_{Lmáx}}{\pi} \quad (\text{Ecuación 3.39})$$

COMPONENTE EFICAZ rms DE LA CORRIENTE

$$I_{Lmáx}^2 = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{2\pi}_0 i_L^2 dx = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left(2 \int_0^{\pi} i_L^2 \cdot \text{máx} \cdot \text{sen}^2(x) dx \right)$$

$$I_{Lmáx}^2 = \frac{I_{Lmáx}^2}{2\pi} \int_0^{\pi} (1 - \cos(2x)) dx$$

$$\text{pues } \text{sen}^2(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2}$$

$$\Rightarrow I_{Lmáx} = \frac{I_{Lmáx}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ecuación 3.40})$$

En base a los resultados obtenidos podemos encontrar:

$$V_{rms} = I_{Lmáx} \cdot R_L$$

$$V_{rms} = \frac{I_{max} R_L}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ecación 3.41})$$

$$V_{DCs} = I_{DCs} R_L$$

$$V_{DCs} = \frac{2I_{max} R_L}{\pi} \quad (\text{Ecación 3.42})$$

Si $r_m = 0$

$$V_{DCs} = \frac{2V_{in \ max}}{\pi} \quad (\text{Ecación 3.43})$$

3.9.2. RENDIMIENTO DE RECTIFICACIÓN

$$\eta_r = \frac{P_{DCs}}{P_{total}} \times 100 \quad (\text{Ecación 3.44})$$

Donde: PDCs = Potencia continua en la carga.
PTOTAL = Potencia total de entrada.

$$P_{DCs} = I^2_{DCs} \times R_L = \frac{4I^2_{max} R_L}{\pi^2} \quad (\text{Ecación 3.45})$$

$$P_{total} = I^2_{in \ max} (R_L + r_m) = \frac{I^2_{in \ max} (R_L + r_m)}{2} \quad (\text{Ecación 3.46})$$

$$\eta_r = \frac{4I^2_{max} R_L}{I^2_{in \ max} (R_L + r_m)} \times 100$$

$$\eta_r = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{r_m}{R_L}\right)} \times 100$$

$$\eta_r = \frac{81.1}{\left(1 + \frac{r_m}{R_L}\right)}$$

Si $r_m \rightarrow 0 \rightarrow \eta_{max}$

$$\eta_{max} = 81.1\%$$

Para rectificador de 1/1 onda.

3.9.3. FACTOR DE RIZADO (τ)

$$\tau = \sqrt{\frac{V_{rms}^2 - V_{DCs}^2}{V_{DCs}^2}} = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{DCs}}\right)^2 - 1} \quad (\text{Ecación 3.47})$$

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{I_{max} R_L}{\frac{\sqrt{2}}{\pi} 2 I_{max} R_L}\right)^2 - 1} = 0.48$$

3.9.4. VOLTAJE PICO INVERSO (V.P.I.)

$$VPI = 2V_{in \text{ máx}}$$

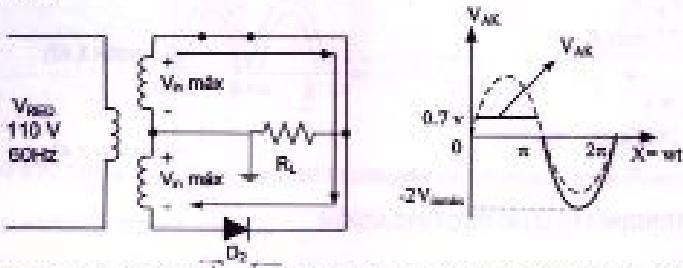


Figura 3.60 Análisis de polarización del Rectificador de 1/1 onda con toma central

$$-V_{in \text{ máx}} - V_{in \text{ máx}} - V_{AK} = 0$$

$$V_{AK} = -2V_{in \text{ máx}}$$

3.9.5. ÁNGULO DE CONDUCCIÓN (μ)

$\mu = 180^\circ$ si el diodo es ideal.

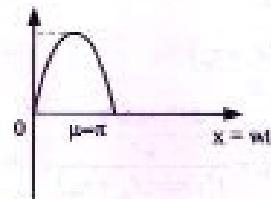


Figura 3.61 Forma de onda de salida de un Rectificador de 1/1 onda

3.9.6. RECTIFICADOR DE 1/1 ONDA TIPO PUENTE.

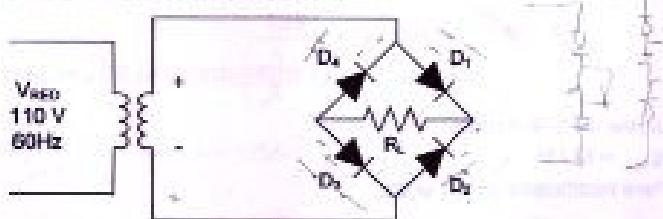


Figura 3.62 Circuito Rectificador de 1/1 onda tipo puente

En el semicírculo (+)

D1 y D3 conducen, mientras que D2 y D4 se abren

En el semicírculo (-)

D1 y D3 se abren, mientras que D2 y D4 conducen

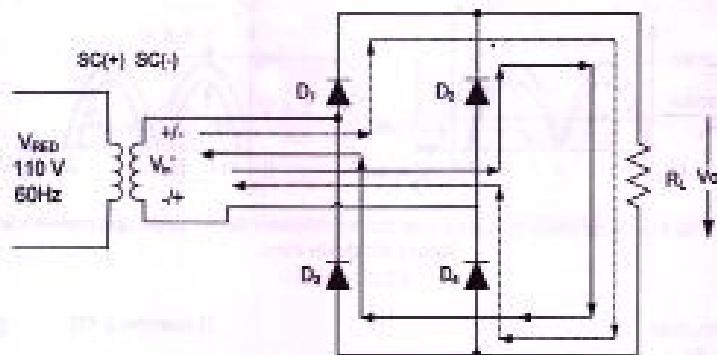


Figura 3.63 Análisis de polarización del Rectificador de 1/1 onda tipo puente

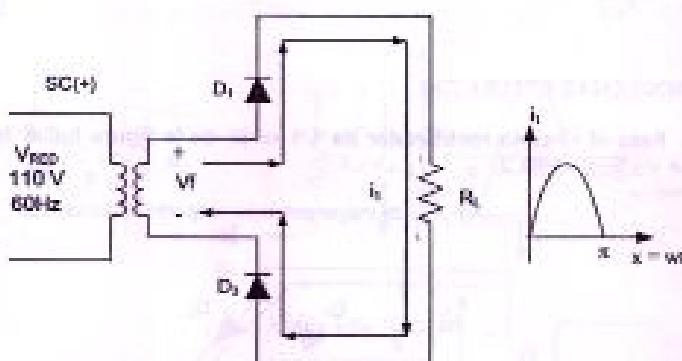


Figura 3.64 Forma de onda de salida para el sc(+)

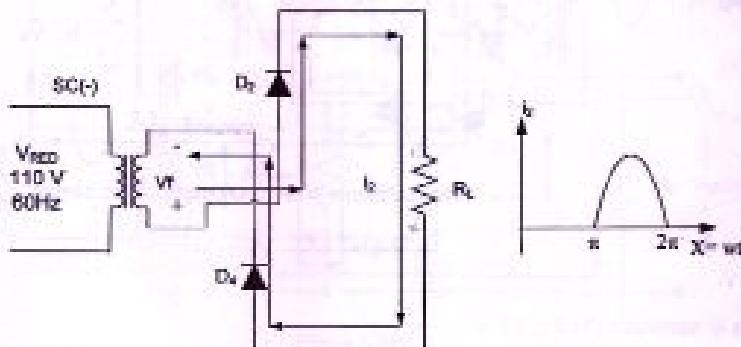


Figura 3.65 Forma de onda de salida para el sc(-)

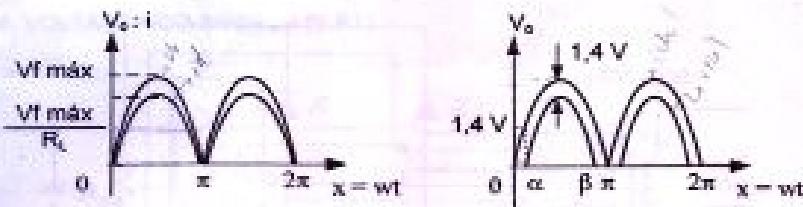


Figura 3.66 Forma de onda de salida total del Rectificador de 1/1 onda tipo puente con diodo ideal y sin diodo ideal

$$VPI = V_{in \max}$$

(Equación 3.48)

$$\eta_r = \left(\frac{81.1}{1 + 2 \frac{r_m}{R_L}} \right) \times 100$$

(Equación 3.49)

3.10 PROBLEMAS RESUELTOS

3.10.1. Para el circuito rectificador de 1/1 onda de la figura hallar la forma de onda de V_o . $V_{o2} = V_{RL2}$.

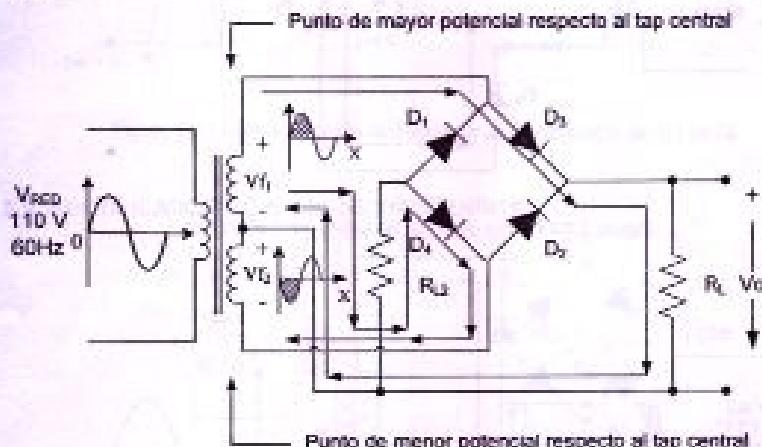


Figura 3.67

Para el semiciclo (+) $0 \leq x \leq \pi$

Para v_f1 ,

D_3 en PD y por tanto conduce, mientras que D_1 , D_2 , D_3 en PI y por tanto no conducen.

$\Rightarrow V_{o1} = V_{f1}$.

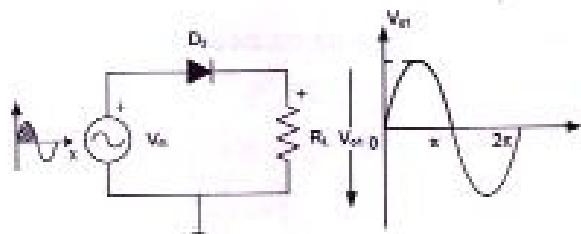


Figura 3.68

Para v_{f2} .

D_4 en PD y por tanto conduce, mientras que D_1, D_2, D_3 en PI y por tanto no conducen.

$$\rightarrow V_{o2} = v_{f2}.$$

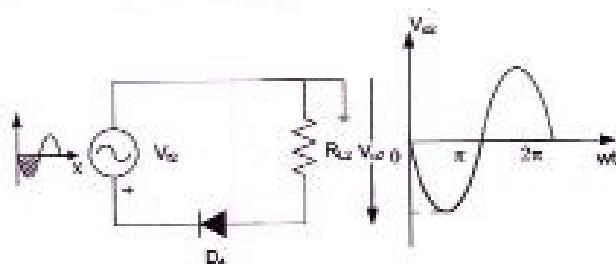


Figura 3.69

Para el semiciclo (-) $\pi \leq x \leq 2\pi$

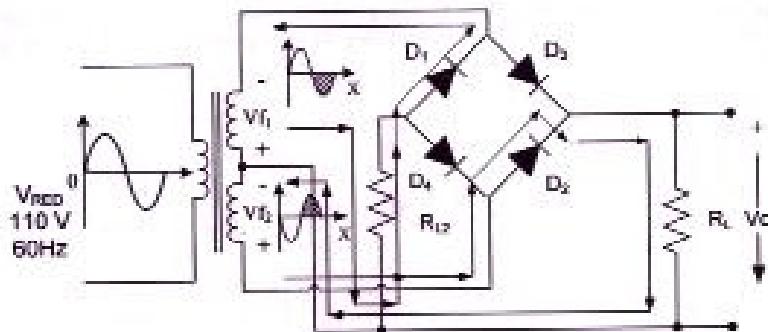


Figura 3.70

Para v_f2

D1 en PD \rightarrow conduce, mientras que D2, D3, D4 en PI \rightarrow se abren
 $\rightarrow V_{o1} = v_f1$.

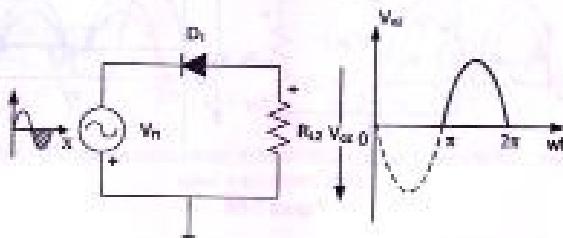


Figura 3.71

Para v_f2 .

D2 PD \rightarrow conduce, mientras que D1, D3, D4 en PI \rightarrow se abren.
 $\rightarrow V_{o2} = v_f2$

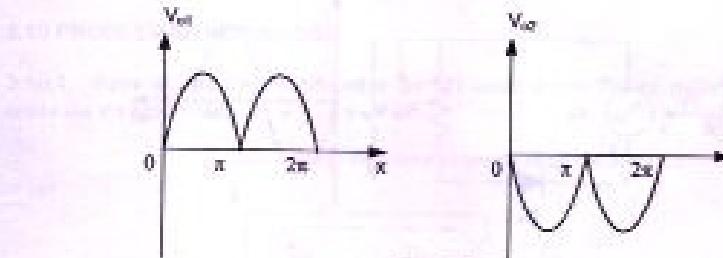


Figura 3.72

3.10.2. Para el circuito de la figura determinar el voltaje de salida V_o y los valores respectivos de voltajes y ángulos de conducción. Además calcule la potencia promedio disipada en el diodo D_{es} si es de silicio ($V_c = 0,7[V]$) y es ideal (D_1, D_2, D_3, D_4 son ideales).

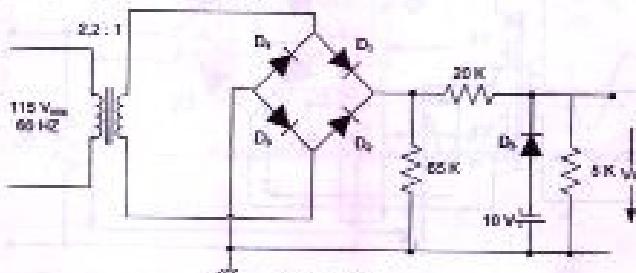
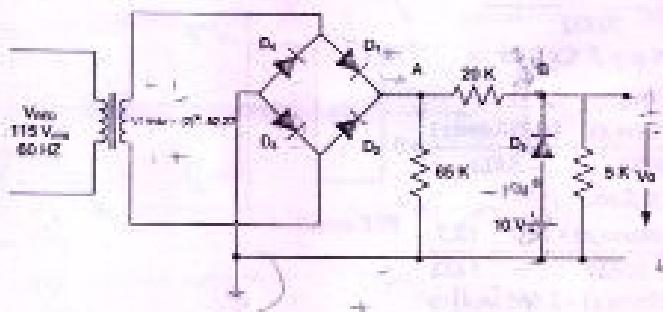


Figura 3.73

$$V_{I \max} = 73.924 \text{ V}$$



a) $0 \leq x \leq \pi$

$$V_s = -73.924 \sin(x) [\text{V}]$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{dmax}} \times 5 \text{k}\Omega}{25 \text{k}\Omega} = 14.7848 [\text{V}]$$

$$\Rightarrow V_d = -14.7848 \sin(x) [\text{V}]$$

a.1) $|V_d| \leq 10 [\text{V}]$

D_1 en PI, se activa \Rightarrow

$$V_d = -14.7848 \sin(x) [\text{V}]$$

a.2) $|V_d| \geq 10 [\text{V}]$

D_1 en PD, conduce \Rightarrow

$$V_d = -10.7 [\text{V}]$$

$$14.784 \sin(\alpha) = 10.7$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{10.7}{14.784}\right) = 46.36$$

$$\beta = 180 - 46.36 = 133.63$$

* $0 \leq x \leq \alpha \Rightarrow V_d = -14.7848 \sin(x) [\text{V}]$

$$I_{\text{max}} = \frac{(V_s - V_d)}{20} = \frac{59.14 \sin(x)}{20} [\text{A}]$$

* $\alpha \leq x \leq \beta \Rightarrow V_d = -10.7 [\text{V}]$

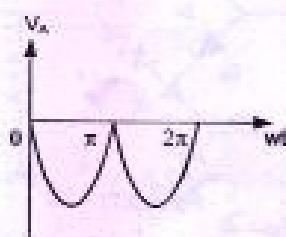


Figura 3.76

$$i_{\text{seno}} = \frac{-73.924 \sin(x) + 10.7}{20K\Omega}$$

Para $0 \leq x \leq \alpha$ y $\beta \leq x \leq 2\pi \Rightarrow$

$$id = i_{\text{seno}} - i_{\text{sen}}$$

$$id = \frac{-59.14 \sin(x) + 14.784 \sin(x)}{20K\Omega} = 0$$

Para $\alpha \leq x \leq \beta \Rightarrow$

$$id = \frac{-73.924 \sin(x) + 10.7}{20K\Omega} - \frac{10.7}{5K\Omega}$$

$$id = -3.6962 \sin(x) - 1.605 \text{ [mA]} \Rightarrow$$

$$P = \frac{1}{T} \int id \times Vd dt = -\frac{1}{\pi} \int_{45.6^\circ}^{135.6^\circ} (-3.6962 \sin(x) - 1.605) 0.7 dt$$

$$P = 1.67 \text{ [W]}$$

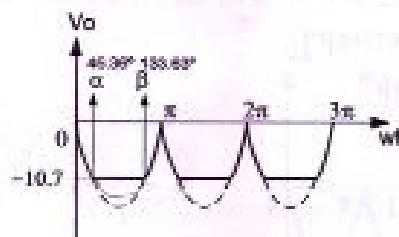


Figura 3.76

3.11. PROBLEMAS PROPUESTOS:

3.11.1. Analice los recortadores de onda expuestos al final de la teoría de este capítulo para una señal senoidal, triangular o cuadrada, de valor arbitrario. Emplee la segunda aproximación del diodo con: $V_B=0.6$ [V], $r_{av}(B)=15$ [Ω] Q, $V_R=12$ [V], $r_{av}(C)=16$ [MΩ], y $r_Z=40$ [Ω].

3.11.2. Obtener la forma de onda a la salida del siguiente circuito:

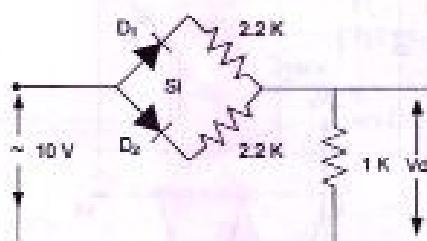


Figura 3.77

3.11.3. Realice un diseño tal que, a partir de la forma de onda de entrada, se pueda obtener la forma de onda sugerida para la salida.

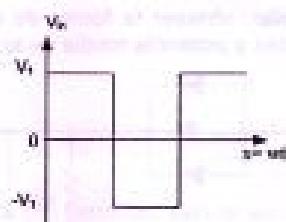


Figura 3.78

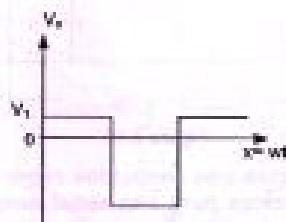


Figura 3.79

3.11.4. Determinar las corrientes y los voltajes para los diodos de los siguientes circuitos.

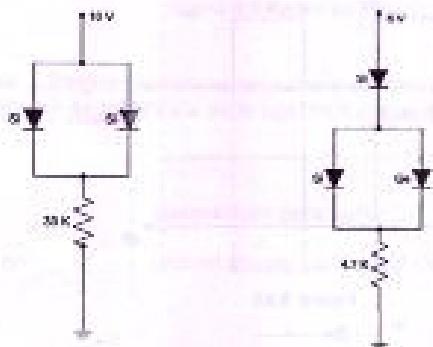


Figura 3.80

3.11.5. Considerando el siguiente circuito, determine el Valor de V_o , y de las corrientes en las resistencias de 2,2 [kΩ].

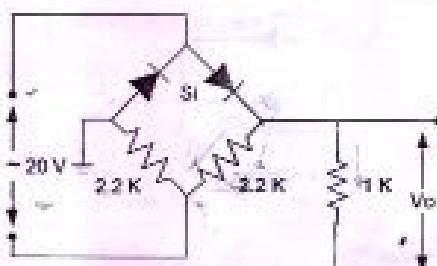


Figura 3.81

3.11.6. En el siguiente circuito, obtener la forma de onda a la salida. Calcular también los voltajes, corrientes y potencia media en los diodos.

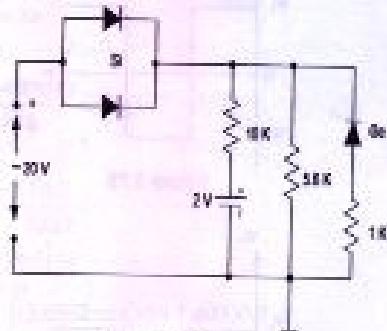


Figura 3.82

3.11.7. Los siguientes circuitos son conocidos como compuertas lógicas OR y AND respectivamente. Analícelos para una señal cuadrada de valores +10[V] y 0[V]. Consideré que en polarización directa, el voltaje en los diodos es 0.7[V]. ¿Qué utilidad pueden tener estos circuitos?

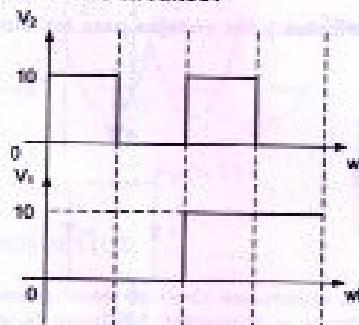


Figura 3.83

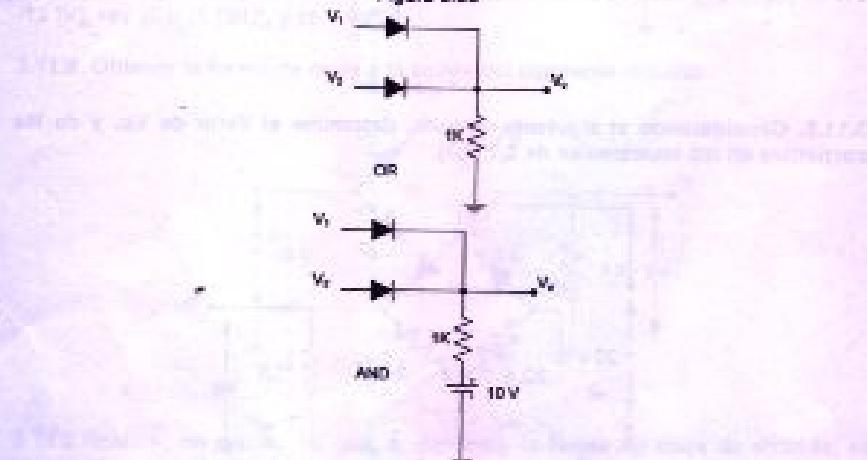


Figura 3.84