Tema 3

CIRCUITOS CON DIODOS.

1.- Aplicación elemental.

2.- Circuitos recortadores (limitadores).

2.1.- Resolución de un circuito recortador utilizando las cuatro aproximaciones del diodo.

2.1.1.- Resolución utilizando la primera aproximación.

2.1.2.- Resolución utilizando la segunda aproximación.

2.1.3.- Resolución utilizando la tercera aproximación.

2.1.4.- Resolución utilizando la aproximación de diodo ideal.

2.2.- Otros circuitos recortadores.

2.3.- Circuito recortador a dos niveles.

3.- Circuitos rectificadores.

3.1.- Rectificador de media onda.

3.1.1.- Cálculo de la corriente.

3.1.2.- Cálculo de la tensión en el diodo.

3.2.- Rectificador de onda completa.

3.2.1.- Circuito con dos diodos.

3.2.1.1.- Cálculo de las corrientes.

3.2.1.2.- Cálculo de las tensiones en los diodos.

3.2.2.- Circuito con puente de diodos.

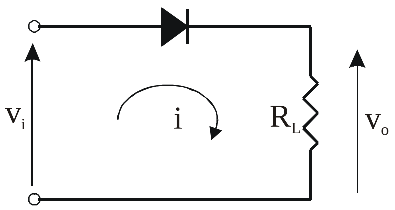
3.2.2.1.- Cálculo de las corrientes.

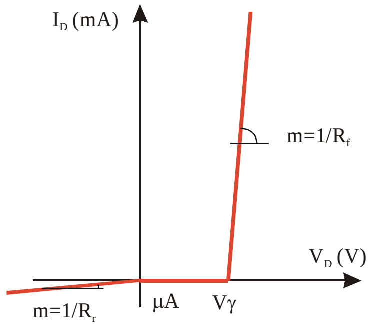
3.2.2.2.- Cálculo de las tensiones en los diodos.

4.- Filtrado de condensador.

1.- APLICACIÓN ELEMENTAL.

Supongamos el circuito del apartado 4 del tema anterior. La señal de entrada es $v_i = V_M$ sen ωt. Vamos a calcular la función de transferencia del circuito ($v_o = f(v_i)$) y la tensión de salida v_o.





Los pasos a seguir para la resolución de este tipo de circuitos serán los siguientes:

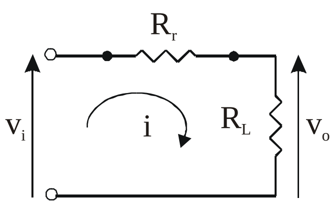
1.- Suponer un estado del diodo.

2.- Sustituir el diodo por su modelo y resolver el circuito (cálculo de tensiones e intensidades.

3.- Comprobar qué condición debe de cumplir la entrada para que el diodo esté en el estado supuesto.

a/.- *Suponemos que el diodo está en inversa ($v_D \leq 0$).*

Sustituimos el diodo por su modelo equivalente. En este caso una resistencia de valor R_r.



$$i = \frac{v_i}{R_L + R_r}$$

$$v_o = R_L \cdot i = R_L \cdot \frac{v_i}{R_L + R_r} = \frac{R_L}{R_L + R_r} \cdot v_i$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo esté en inversa es que la corriente circule en el sentido de cátodo a ánodo, es decir:

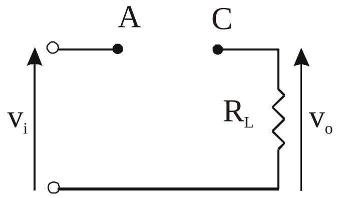
$$i \le 0 \qquad \frac{v_i}{R_L + R_r} \le 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \le 0$$

Por tanto:

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \le 0 \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{R_L}{R_L + R_r} \cdot v_i}$$

b/.- *Suponemos que el diodo está en directa pero no hay conducción* ($0 \le v_D \le V\gamma$)

Sustituimos el diodo por su modelo equivalente. En este caso un circuito abierto.



$$v_o = 0$$

La condición para que el diodo esté en corte es $0 \le v_D \le V\gamma$

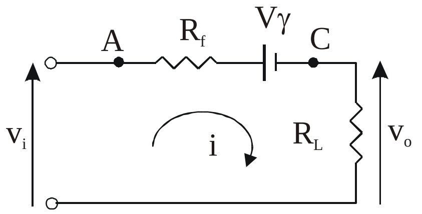
$$\left.\begin{aligned} v_D &= v_A - v_C \\ v_A &= v_i \\ v_C &= 0 \end{aligned}\right\} \quad v_D = v_i$$

Por tanto

$$\boxed{\text{Si} \quad 0 \le v_i \le V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = 0}$$

c/.- *Suponemos que el diodo está en conducción* ($v_D \ge V\gamma$)

Sustituimos el diodo por su modelo equivalente. En este caso una resistencia de valor R_f en serie con una fuente de tensión de valor $V\gamma$.



$$i = \frac{v_i - V_\gamma}{R_f + R_L}$$

$$v_o = R_L \cdot i = \frac{R_L}{R_f + R_L} \cdot (v_i - V_\gamma)$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo esté en conducción es que la corriente circule en el sentido de ánodo a cátodo, es decir:

$$i \geq 0 \qquad \frac{v_i - V_\gamma}{R_f + R_L} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq V_\gamma$$

Por tanto

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \geq V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{R_L}{R_L + R_f} \cdot (v_i - V_\gamma)}$$

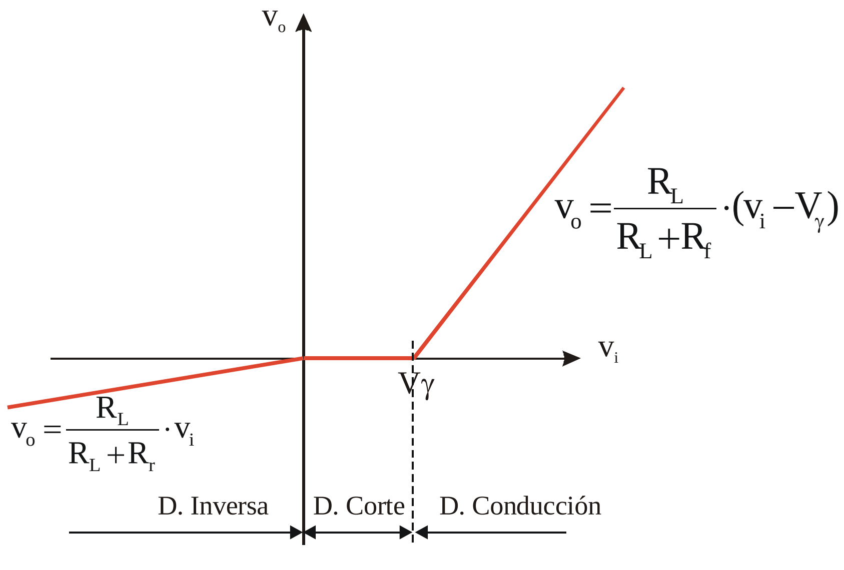
En resumen:

$$\text{Si} \quad v_i \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{R_L}{R_L + R_r} \cdot v_i$$

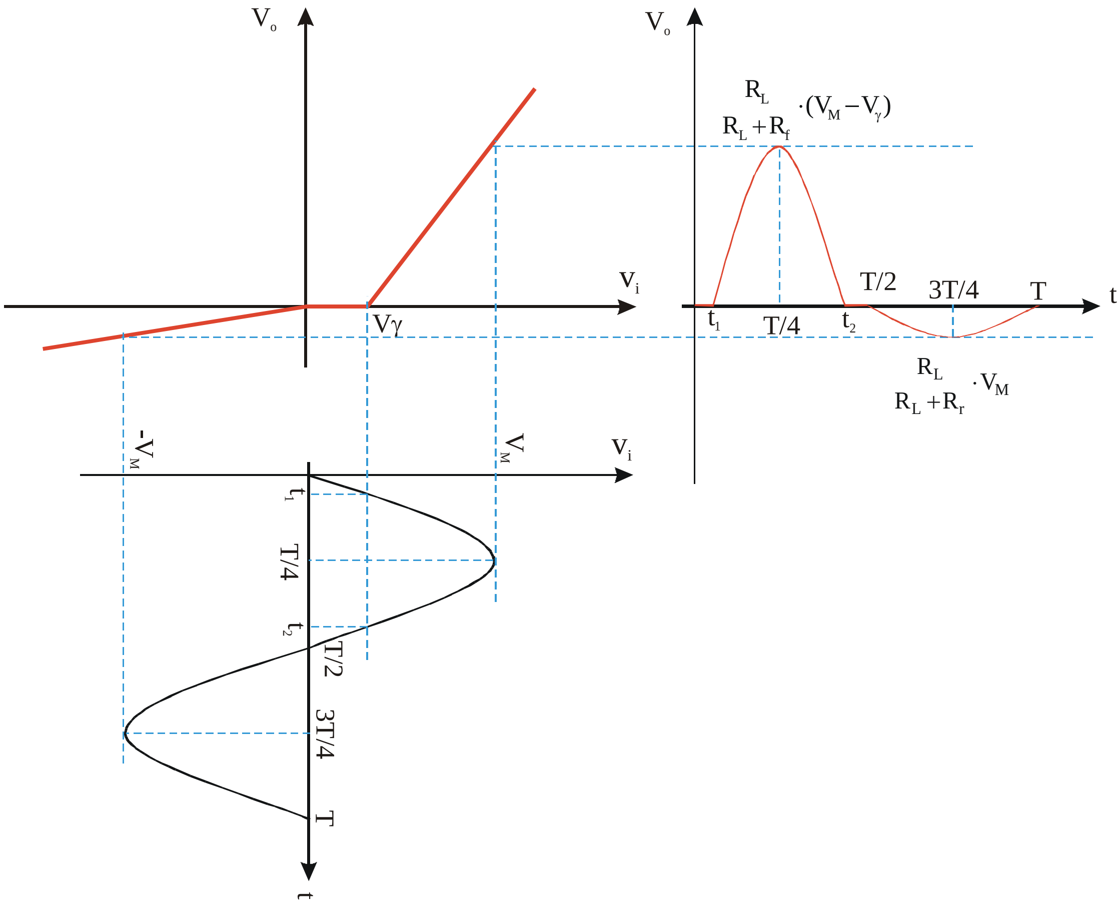
$$\text{Si} \quad 0 \leq v_i \leq V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = 0$$

$$\text{Si} \quad v_i \geq V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{R_L}{R_L + R_f} \cdot (v_i - V_\gamma)$$

La curva característica del circuito es la representada a continuación:



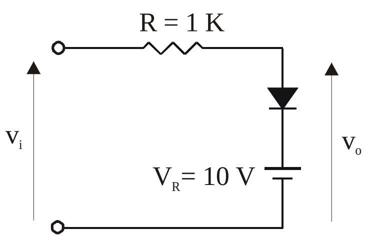
A continuación representamos la tensión de salida v_o (t) cuando la tensión de entrada es v_i =sen(ωt)



2.- CIRCUITOS RECORTADORES (LIMITADORES).

2.1.- Resolución de un circuito recortador utilizando las cuatro aproximaciones del diodo.

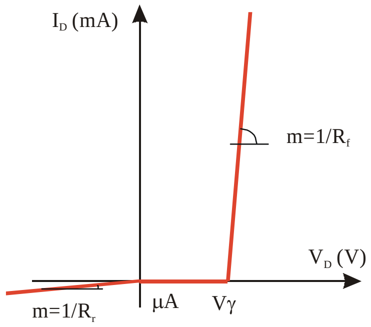
Vamos a resolver el circuito de la siguiente figura.



$$v_i = 20 \cdot \text{sen}\omega t$$

Y vamos a resolverlo para cada una de las cuatro aproximaciones del diodo.

2.1.1.- Resolución utilizando la primera aproximación

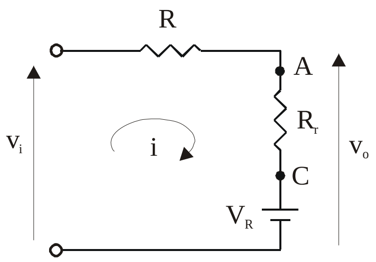


$R_f = 20\ \Omega$

$R_r = 100$ K

$V\gamma = 0{,}7$ V

a/.- *Suponemos que el diodo está en inversa ($v_D \leq 0$).*



$$i = \frac{v_i - V_R}{R + R_r}$$

$$v_o = V_R + R_r i = V_R + R_r \frac{v_i - V_R}{R + R_r}$$

$$v_o = \frac{R_r v_i + R \cdot V_R}{R + R_r}$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo esté en inversa es que la corriente circule en el sentido de cátodo a ánodo, es decir:

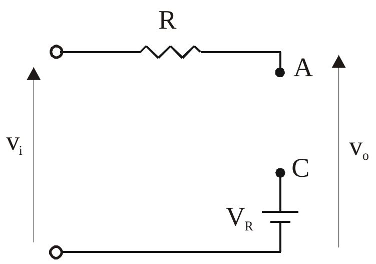
$$i \leq 0 \qquad \frac{v_i - V_R}{R + R_r} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq V_R$$

Por tanto, si $v_i \leq V_R \quad \Rightarrow \quad v_o = \dfrac{R_r v_i + RV_R}{R + R_r}$

Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \leq 10\text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{100 v_i + 10}{101}}$$

b/.- *Suponemos que el diodo está en directa pero no hay conducción ($0 \leq v_D \leq V\gamma$)*



$$v_o = v_i$$

La condición para que el diodo esté en corte es $0 \leq v_D \leq V\gamma$

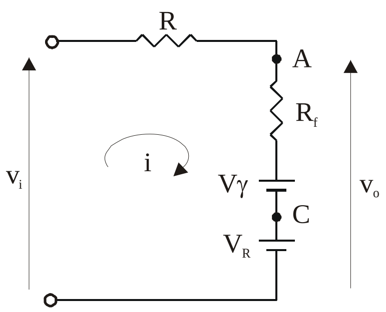
$$\left.\begin{array}{l} v_D = v_A - v_C \\ v_A = v_i \\ v_C = V_R \end{array}\right\} \quad v_D = v_i - V_R \begin{cases} v_D \geq 0 \\ v_i - V_R \geq 0 \quad \rightarrow \quad v_i \geq V_R \\ v_D \leq V_\gamma \\ v_i - V_R \leq V_\gamma \quad \rightarrow \quad v_i \leq V_R + V_\gamma \end{cases}$$

Por tanto, si $V_R \leq v_i \leq V_R + V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i$

Dando valores:

$$\boxed{\text{Si} \quad 10 \leq v_i \leq 10,7\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i}$$

c/.- *Suponemos que el diodo está en conducción ($v_D \geq V\gamma$)*



$$i = \frac{v_i - V_R - V_\gamma}{R + R_f}$$

$$v_o = V_R + V_\gamma + R_f i = V_R + V_\gamma + \frac{R_f}{R + R_f}\left(v_i - V_R - V_\gamma\right)$$

$$v_o = \frac{R_f}{R + R_f} v_i + \frac{R}{R + R_f}\left(V_R + V_\gamma\right)$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo esté en conducción es que la corriente circule en el sentido de ánodo a cátodo, es decir:

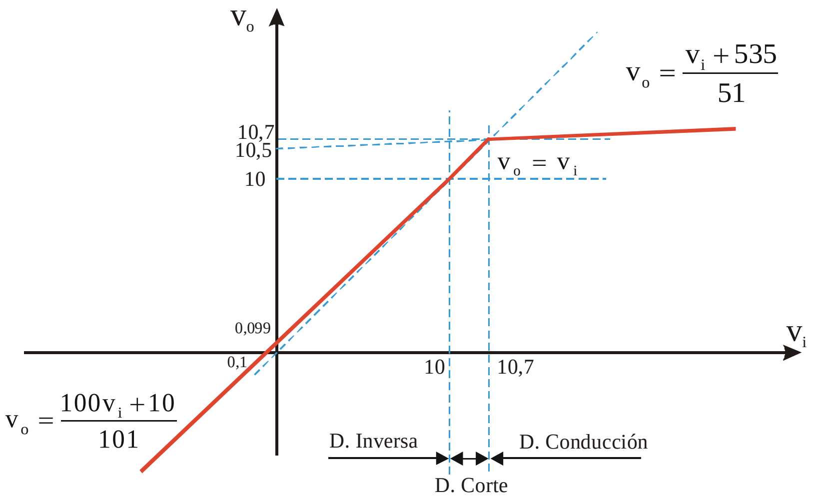
$$i \geq 0 \qquad \frac{v_i - V_R - V_\gamma}{R + R_f} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq V_R + V_\gamma$$

Por tanto, si $v_i \geq V_R + V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = \dfrac{R_f}{R + R_f} v_i + \dfrac{R}{R + R_f}\left(V_R + V_\gamma\right)$

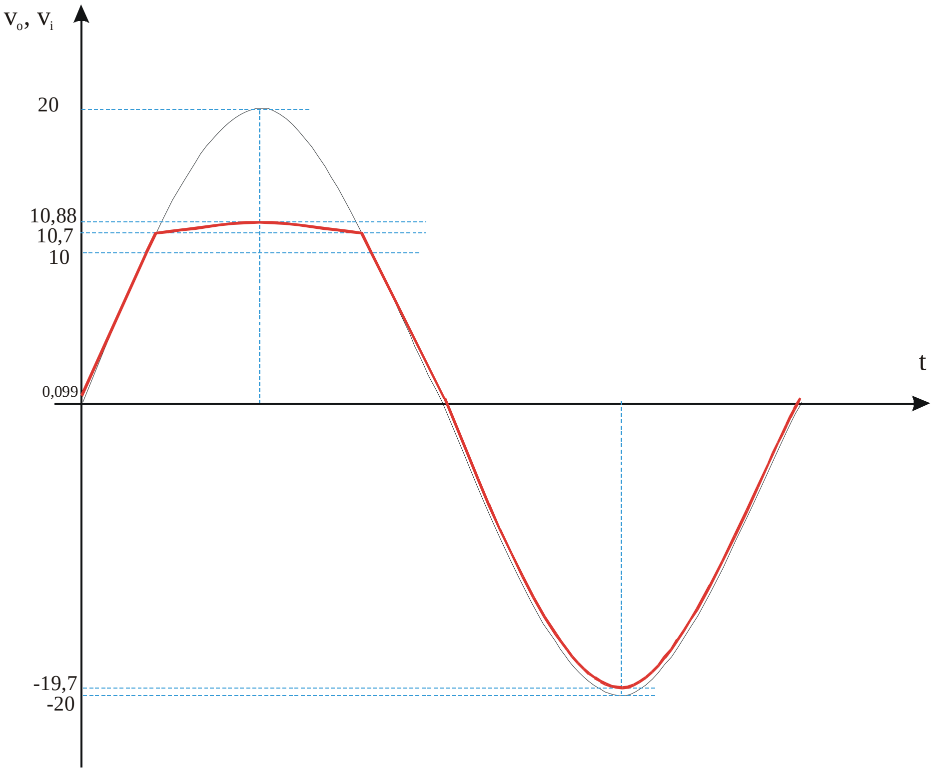
Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \geq 10,7\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{v_i + 535}{51}}$$

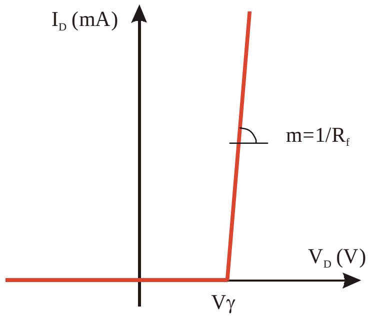
La curva de transferencia del circuito será:



Si representamos la tensión de salida v_o en función del tiempo



2.1.2.- Resolución utilizando la segunda aproximación.

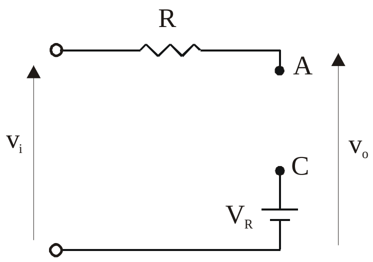


$R_f = 20\ \Omega$

$R_r = \infty$

$V\gamma = 0{,}7$ V

a/.- *Suponemos que el diodo está en corte ($v_D \le V\gamma$)*



$v_o = v_i$

La condición para que el diodo esté en corte es $v_D \le V\gamma$

$$\left.\begin{array}{l} v_D = v_A - v_C \\ v_A = v_i \\ v_C = V_R \end{array}\right\} \quad v_D = v_i - V_R \le V_\gamma \quad \rightarrow \quad v_i \le V_R + V_\gamma$$

Por tanto, si $v_i \le V_R + V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i$

Dando valores

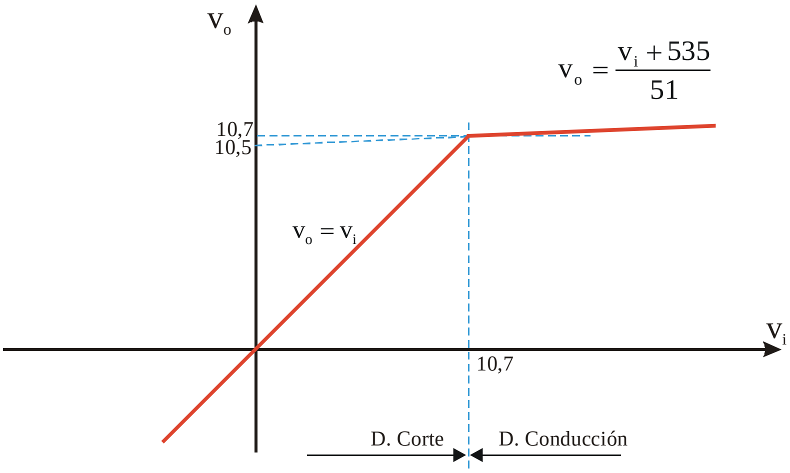
$$\boxed{\text{Si} \qquad v_i \le 10{,}7\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i}$$

b/.- *Suponemos que el diodo está en conducción ($v_D \ge V\gamma$)*

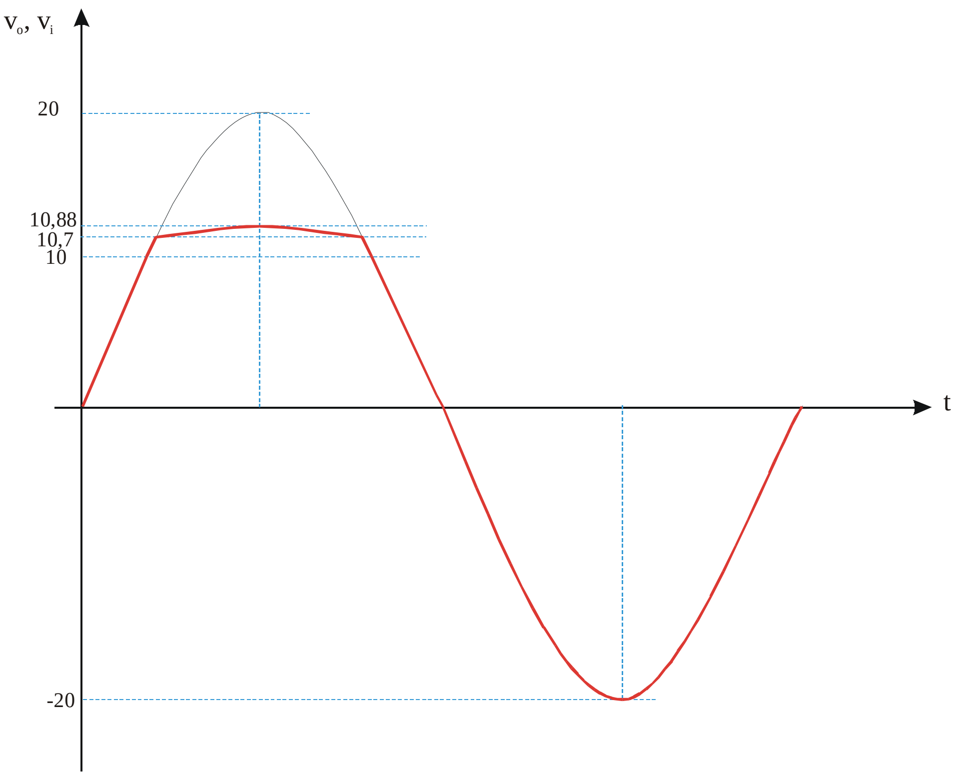
Este caso es exactamente igual que el visto en el apartado c del punto 2.1. Por tanto

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \geq 10,7\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad v_o = \frac{v_i + 535}{51}}$$

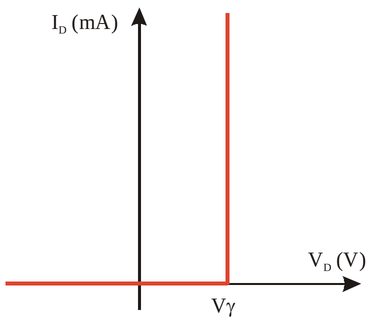
La curva de transferencia del circuito será:



Si representamos la tensión de salida v_o en función del tiempo



2.1.3.- Resolución utilizando la tercera aproximación.



$R_f = 0$

$R_r = \infty$

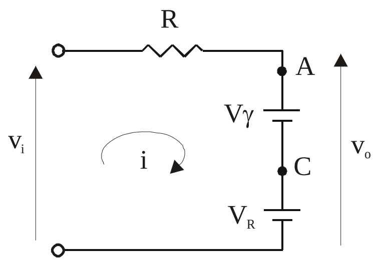
$V\gamma = 0{,}7$ V

a/.- *Suponemos que el diodo está en corte ($v_D \leq V\gamma$)*

Este caso es exactamente igual que el visto en el apartado a del punto 2.2. Por tanto

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \leq 10{,}7 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i}$$

b/.- *Suponemos que el diodo está en conducción ($v_D \geq V\gamma$)*



$$i = \frac{v_i - V_R - V_\gamma}{R}$$

$$v_o = V_R + V_\gamma$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo esté en conducción es que la corriente circule en el sentido de ánodo a cátodo, es decir:

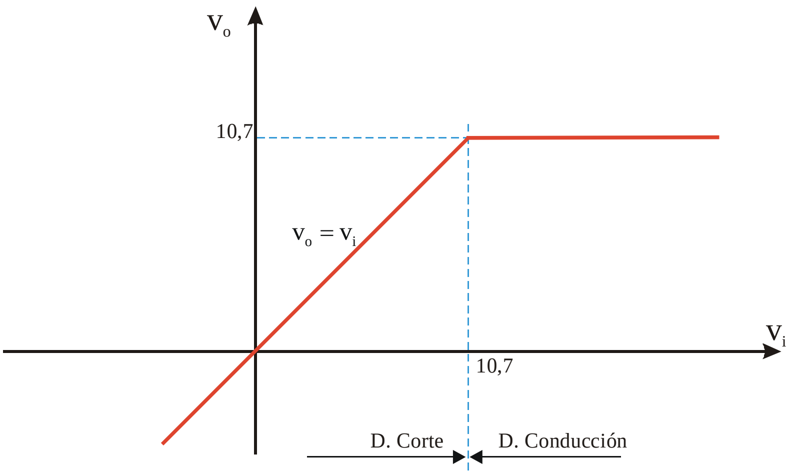
$$i \geq 0 \qquad \frac{v_i - V_R - V_\gamma}{R} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq V_R + V_\gamma$$

Por tanto, si $v_i \geq V_R + V_\gamma \quad \Rightarrow \quad v_i = V_R + V_\gamma$

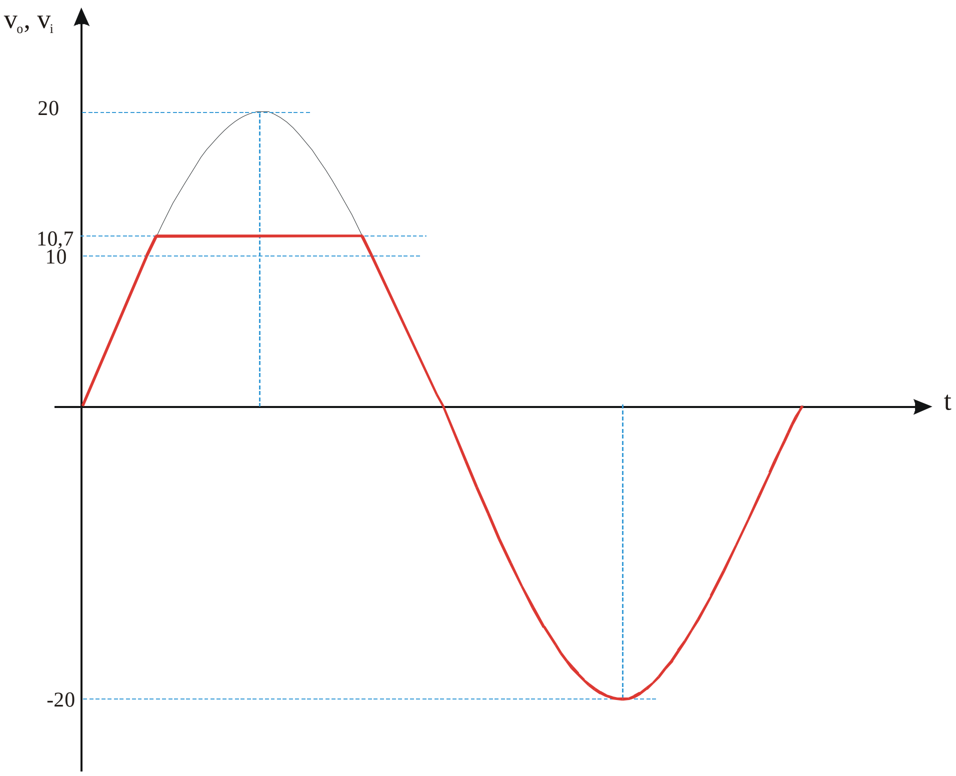
Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \quad v_i \geq 10{,}7 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_o = 10{,}7 \text{ V}}$$

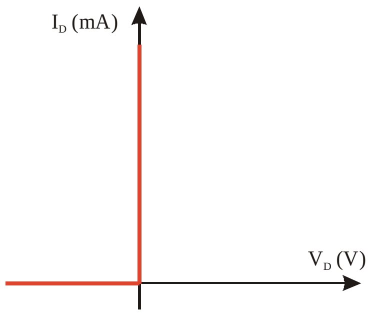
La curva de transferencia del circuito será:



Si representamos la tensión de salida v_o en función del tiempo



2.1.4.- Utilizando la aproximación de diodo ideal.

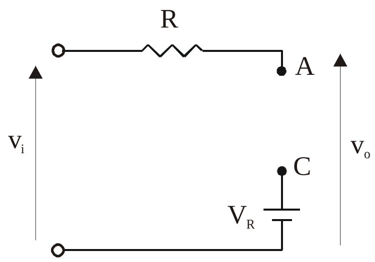


$R_f = 0$

$R_r = \infty$

$V\gamma = 0$

a/.- *Suponemos que el diodo está en corte ($v_D \leq 0$)*



$v_o = v_i$

La condición para que el diodo esté en corte es $v_D \leq 0$

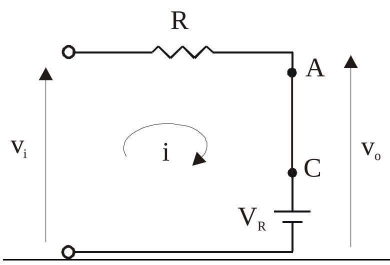
$$\left.\begin{array}{l} v_D = v_A - v_C \\ v_A = v_i \\ v_C = V_R \end{array}\right\} \quad v_D = v_i - V_R \leq 0 \quad \rightarrow \quad v_i \leq V_R$$

Por tanto, si $v_i \leq V_R \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i$

Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \qquad v_i \leq 10\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i}$$

b/.- *Suponemos que el diodo está en conducción ($v_D \geq 0$)*



$$i = \frac{v_i - V_R}{R}$$

$$v_o = V_R$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo esté en conducción es que la corriente circule en el sentido de ánodo a cátodo, es decir:

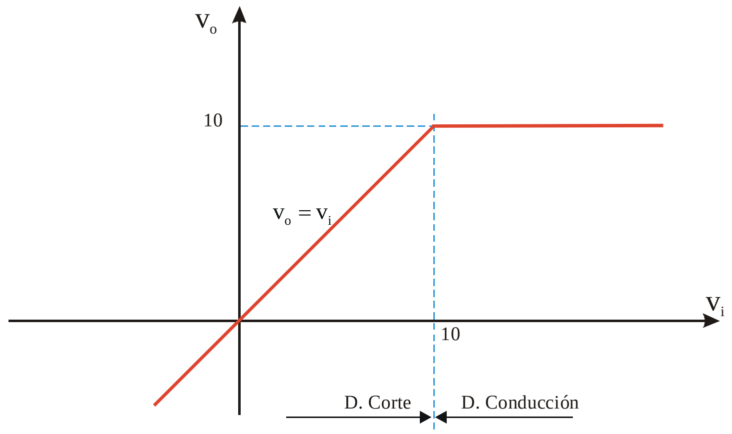
$$i \geq 0 \qquad \frac{v_i - V_R}{R} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq V_R$$

Por tanto, si $v_i \geq V_R \quad \Rightarrow \quad v_i = V_R$

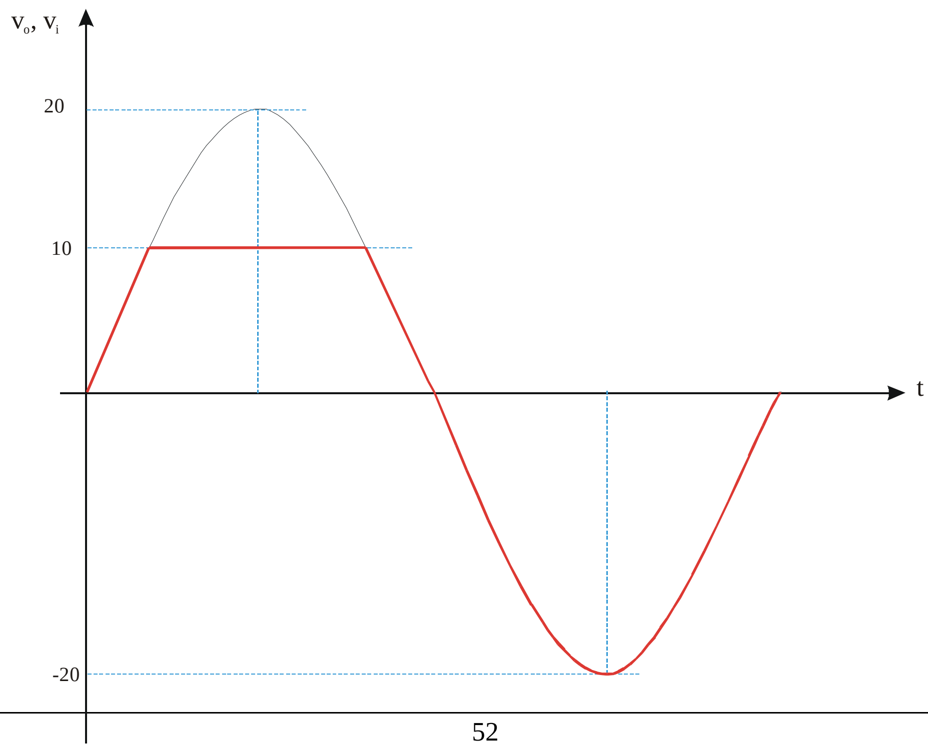
Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \qquad v_i \geq 10\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad v_o = 10\ \text{V}}$$

La curva de transferencia del circuito será:



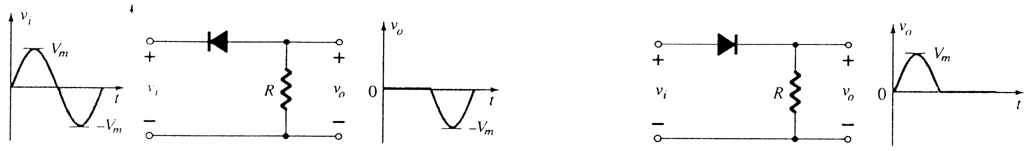
Si representamos la tensión de salida v_o en función del tiempo



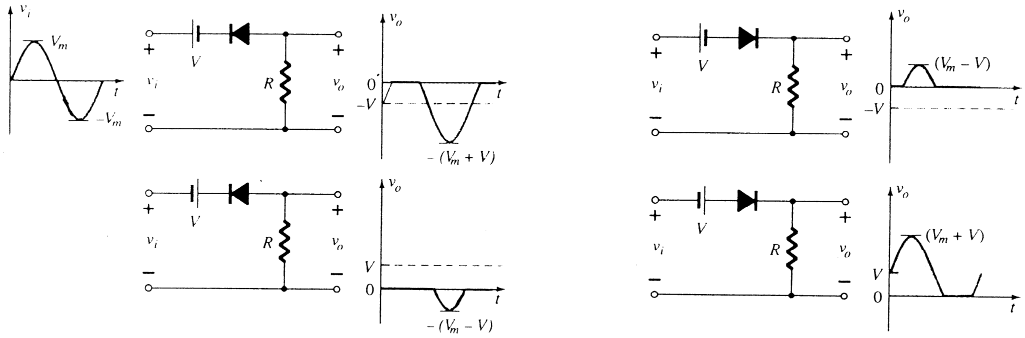
2.2.- Otros circuitos recortadores.

Recortadores simples en serie (diodos ideales)

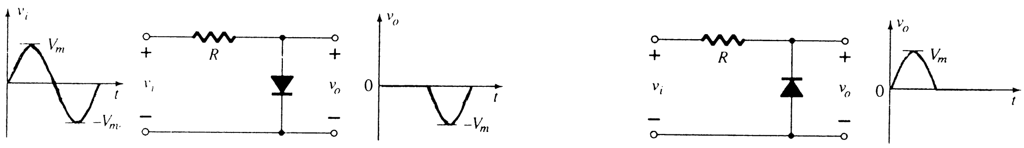
POSITIVO NEGATIVO



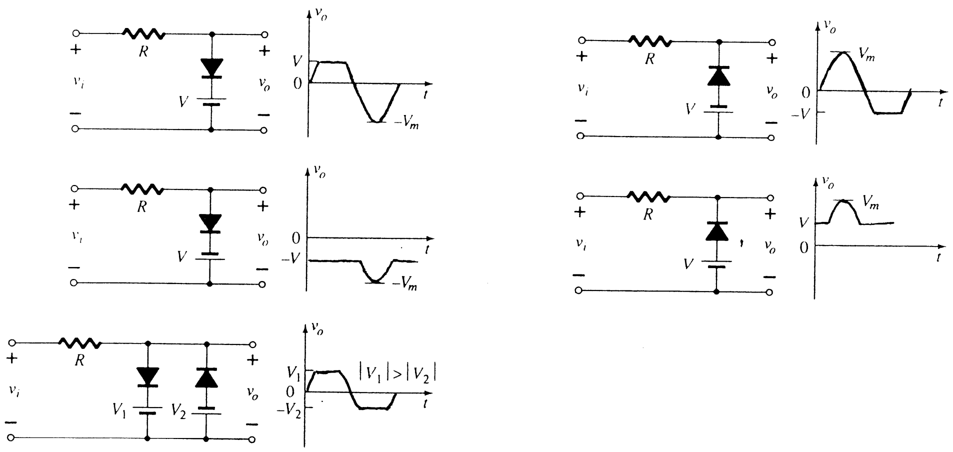
Recortadores polarizados en serie (diodos ideales)



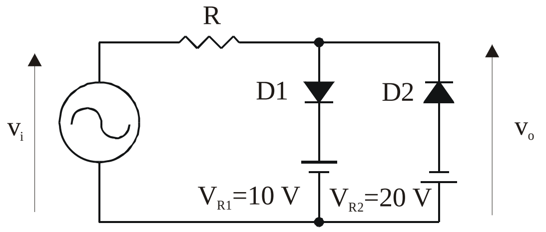
Recortadores simples en paralelo (diodos ideales)



Recortadores polarizados en paralelo (diodos ideales)



2.3.- Recortadores a dos niveles

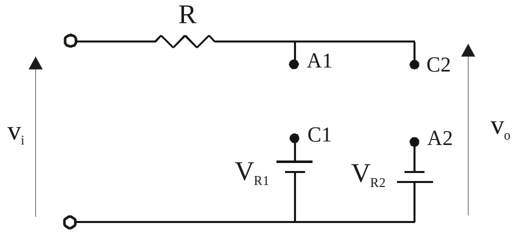


Suponemos diodos ideales

$v_i = 20 \cdot \text{sen}\omega t$

Como ahora tenemos dos diodos, en principio tendremos cuatro estados posibles.

a/.- *Suponemos que los dos diodos D1 y D2 están en corte.*



$v_o = v_i$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo D1 esté en corte

$$v_{D1} \leq 0$$

$$\left.\begin{array}{l} v_{D1} = v_{A1} - v_{C1} \\ v_{A1} = v_i \\ v_{C1} = V_{R1} \end{array}\right\} \quad v_i - V_{R1} \leq 0 \quad \rightarrow \quad v_i \leq V_{R1}$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo D2 esté en corte

$$v_{D2} \leq 0$$

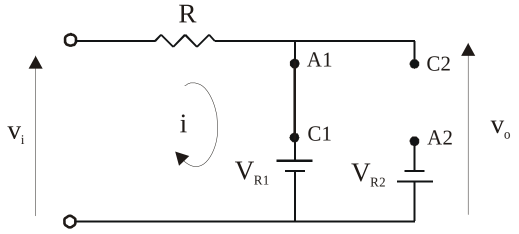
$$\left.\begin{array}{l} v_{D2} = v_{A2} - v_{C2} \\ v_{A2} = -V_{R2} \\ v_{C2} = v_i \end{array}\right\} \quad -V_{R2} - v_i \leq 0 \quad \rightarrow \quad v_i \geq -V_{R2}$$

Por tanto, si $-V_{R2} \leq v_i \leq V_{R1} \quad \Rightarrow \quad v_0 = v_i$

Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \qquad -20 \le v_i \le 10\text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_0 = v_i}$$

b.- *Suponemos que D1 está en conducción y D2 en corte.*



$$v_o = V_{R1}$$

$$i = \frac{v_i - V_{R1}}{R}$$

La condición que se debe de cumplir para que D1 esté en conducción es que la intensidad circule en el sentido de ánodo a cátodo, es decir:

$$i \ge 0 \qquad \frac{v_i - V_{R1}}{R} \ge 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \ge V_{R1}$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo D2 esté en corte

$$v_{D2} \le 0$$

$$\left.\begin{array}{l} v_{D2} = v_{A2} - v_{C2} \\ v_{A2} = -V_{R2} \\ v_{C2} = V_{R1} \end{array}\right\} \quad -V_{R2} - V_{R1} \le 0 \quad \rightarrow \quad \text{Se cumple siempre}$$

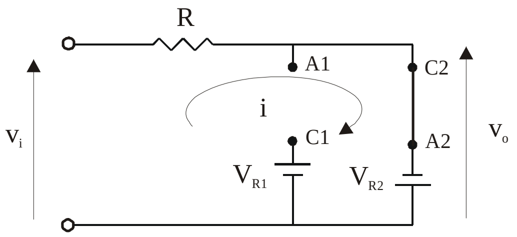
Esto quiere decir que siempre que el diodo D1 esté en conducción, es decir, siempre que vi ≥ V_{R1} el diodo D2 estará en corte. Por tanto ya podemos adelantar que no será posible el caso de que los dos diodos estén simultáneamente en conducción.

Por tanto, si $v_i \ge V_{R1} \quad \Rightarrow \quad v_o = V_{R1}$

Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \qquad v_i \ge 10\text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_o = 10\text{ V}}$$

c.- *Suponemos que D1 está en corte y D2 en conducción.*



$$v_o = -V_{R2}$$

$$i = \frac{v_i + V_{R2}}{R}$$

La condición que se debe de cumplir para que el diodo D1 esté en corte

$$v_{D1} \leq 0$$

$$\left.\begin{array}{l} v_{D1} = v_{A1} - v_{C1} \\ v_{A1} = -V_{R2} \\ v_{C1} = V_{R1} \end{array}\right\} \quad -V_{R2} - V_{R1} \leq 0 \quad \rightarrow \quad \text{Se cumple siempre}$$

La condición que se debe de cumplir para que D2 esté en conducción es que la intensidad circule en el sentido de ánodo a cátodo, es decir:

$$i \leq 0 \qquad \frac{v_i + V_{R2}}{R} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq -V_{R2}$$

Esto quiere decir que siempre que el diodo D2 esté en conducción, es decir, siempre que vi ≤-V_{R1} el diodo D1 estará en corte. Por tanto, volvemos a comprobar, al igual que en el caso anterior que no será posible el caso de que los dos diodos estén simultáneamente en conducción.

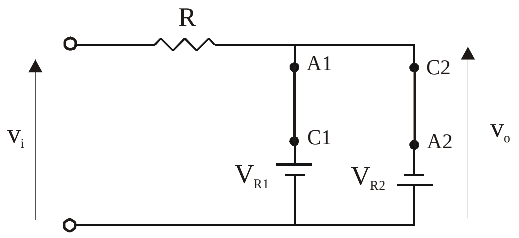
Por tanto, si $v_i \leq -V_{R2} \quad \Rightarrow \quad v_o = -V_{R1}$

Dando valores

$$\boxed{\text{Si} \qquad v_i \leq -20\text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_o = -20\text{ V}}$$

d.- *Suponemos que D1 está en corte y D2 en conducción.*

No sería necesaria la resolución de este caso, ya que con los tres anteriores tenemos completamente resuelto el problema. Lo vamos a resolver, de todas formas, para comprobar que es un caso imposible como ya hemos adelantado.

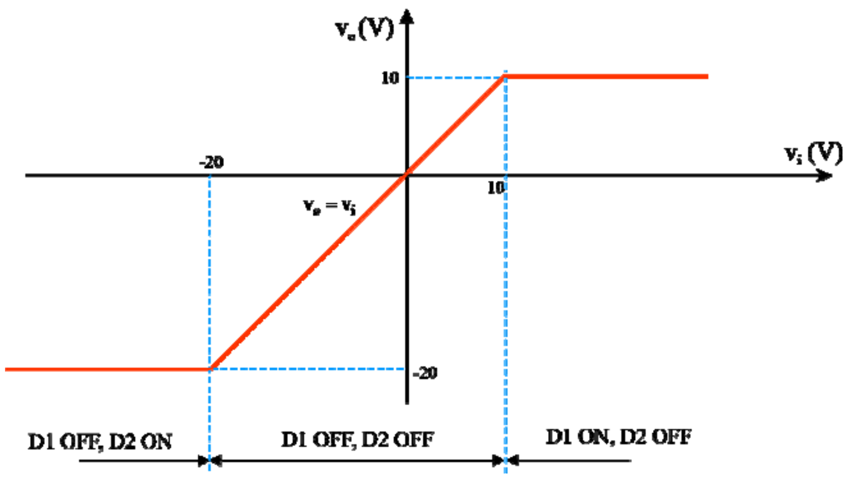


Se debería de cumplir que

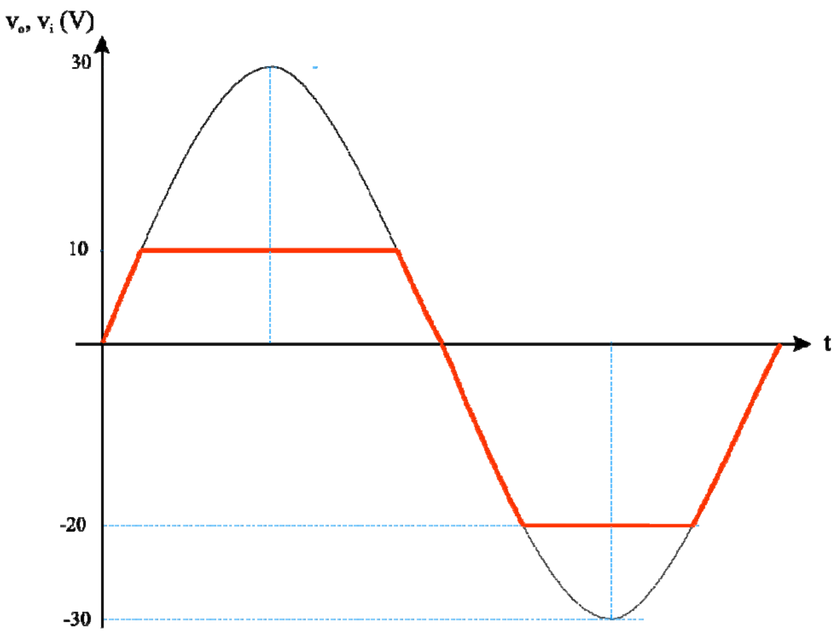
$$V_{R1} = -V_{R2}$$

Lo cual es imposible (10 ≠ -20)

Dibujamos la curva de transferencia del circuito.



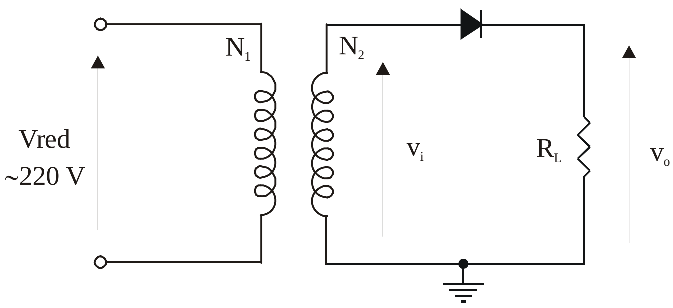
La tensión de salida será



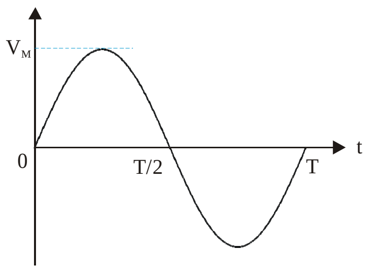
3.- CIRCUITOS RECTIFICADORES.

3.1.- Rectificadores de media onda.

El circuito de la figura es un típico rectificador de media onda. El circuito se alimenta de la red eléctrica (típicamente tensión alterna de 220 V eficaces y 50 Hz). A nosotros nos interesará la tensión v_i de entrada al rectificador propiamente dicho. Esta vendrá determinada por la relación de transformación del transformador.



$$\frac{V_{red}}{v_i} = \frac{N_1}{N_2}$$

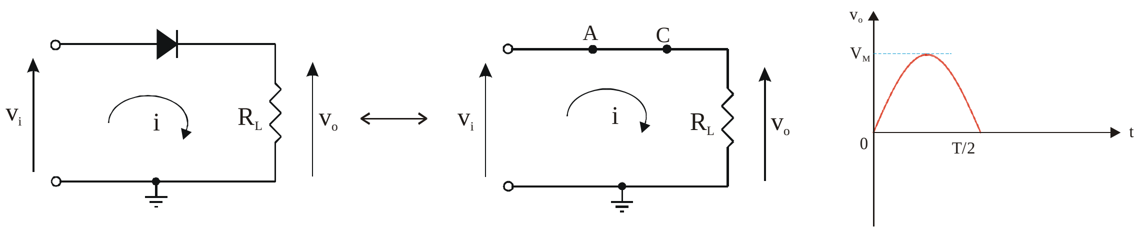


La tensión v_i será una tensión sinusoidal de valor máximo V_M.

Supondremos para la resolución de todos los circuitos rectificadores la aproximación de diodo ideal

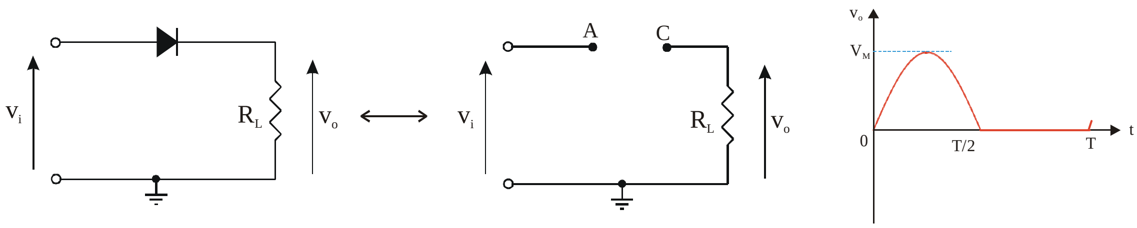
Vamos a resolver el circuito.

a.- *Suponemos que el diodo está en conducción.*



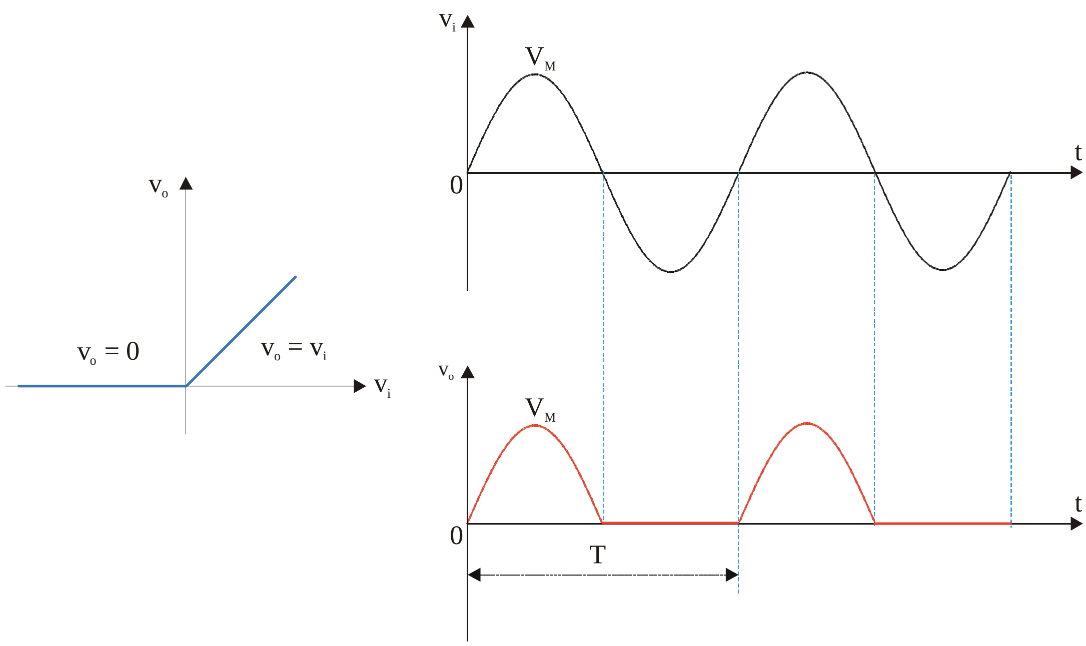
Obtenemos que si $v_i \geq 0$, es decir, si $0 \leq t \leq \dfrac{T}{2} \Rightarrow v_o = v_i$

b.- *Suponemos que el diodo está en corte.*

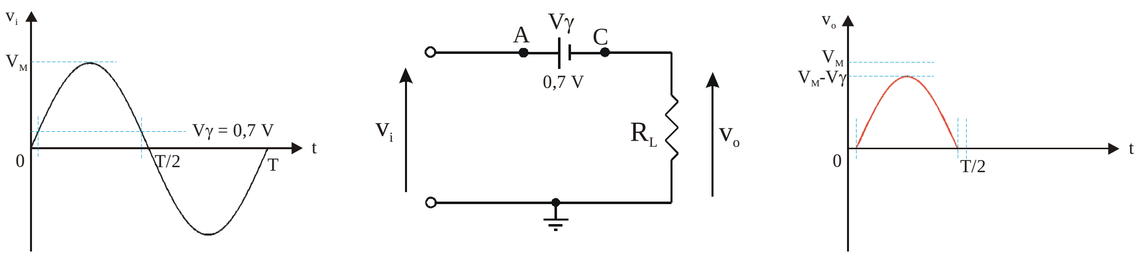


Obtenemos que si $v_i \leq 0$, es decir, si $\dfrac{T}{2} \leq t \leq T \quad \Rightarrow \quad v_o = 0$

Podemos observar como a partir de una tensión que tiene valores positivos y negativos obtenemos una que únicamente toma valores positivos. En esto precisamente consiste la *rectificación*.



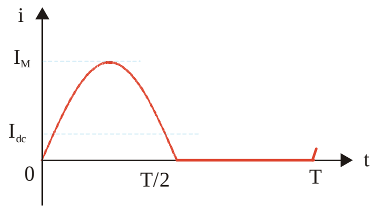
Si hubiésemos elegido la tercera aproximación, es decir, si hubiésemos tenido en cuenta la tensión umbral, el resultado hubiese sido el siguiente



3.1.1.- Cálculo de la corriente.

Conocida como es la tensión de salida v_o, será fácil conocer la corriente que circula por la resistencia que, en este caso es, evidentemente, la misma que circula por el diodo.

$$i = \frac{v_o}{R_L} \qquad \begin{cases} 0 \le t \le \dfrac{T}{2} & \rightarrow \quad i = \dfrac{V_M}{R_L} \cdot \text{sen}\,(\omega t) \\ \dfrac{T}{2} \le t \le T & \rightarrow \quad i = 0 \end{cases}$$



A la hora de realizar el circuito deberemos colocar un diodo cuya corriente máxima rectificada promedio sea superior a la que debe de soportar el diodo en el circuito.

$$I_{dc} = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} i\ dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} i\ dt\right] = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} I_M \cdot \text{sen}\ (\omega t)\ dt = \frac{I_M}{T} \cdot \frac{(-1)}{\omega}\ \left[\cos\ (\omega t)\right]_0^{\frac{T}{2}}$$

Teniendo en cuenta que $\omega = 2\pi f = \dfrac{2\pi}{T} \quad \Rightarrow \quad \omega T = 2\pi \quad y \quad \omega\dfrac{T}{2} = \pi$

$$\boxed{I_{dc} = \frac{I_M}{\pi} \qquad\qquad V_{dc} = \frac{V_M}{\pi}}$$

El valor eficaz de esta corriente será:

$$I^2 = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} i^2 dt\right] = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} I_M^2\ \text{sen}^2(\omega t)\ dt = \frac{I_M^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen}^2(\omega t)\ dt =$$

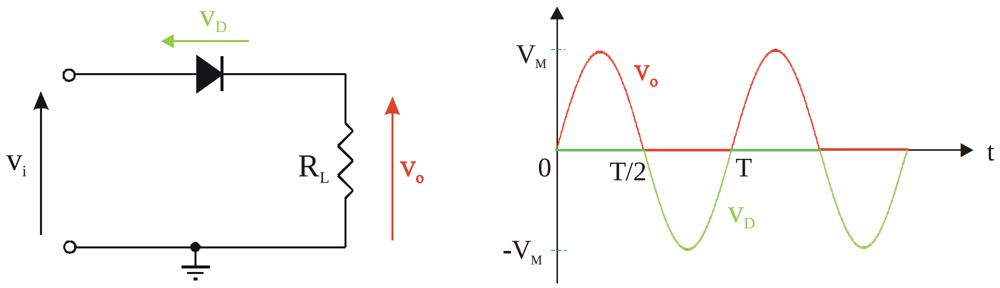
$$= \frac{I_M^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1-\cos\ (2\omega t)}{2}\ dt = \frac{I_M^2}{2\,T}\left[t - \frac{1}{2\omega}\text{sen}\ (2\omega t)\right]_0^{\frac{T}{2}} =$$

$$= \frac{I_M^2}{2\,T}\left[\frac{T}{2} - 0 - \frac{1}{2\omega}\text{sen}\ 2\pi + \frac{1}{2\omega}\text{sen}\ 0\right] = \frac{I_M^2}{4}$$

$$\boxed{I = \frac{I_M}{2} \qquad\qquad V = \frac{V_M}{2}}$$

3.1.2.- Cálculo de la tensión en el diodo.

Tendremos que calcular la tensión a la que está sometido el diodo, fijándonos sobre todo, en el valor máximo de la tensión que soporta el diodo cuando está polarizado en inversa.



Si observamos el circuito, en todo momento se cumple $v_D = v_i - v_o$

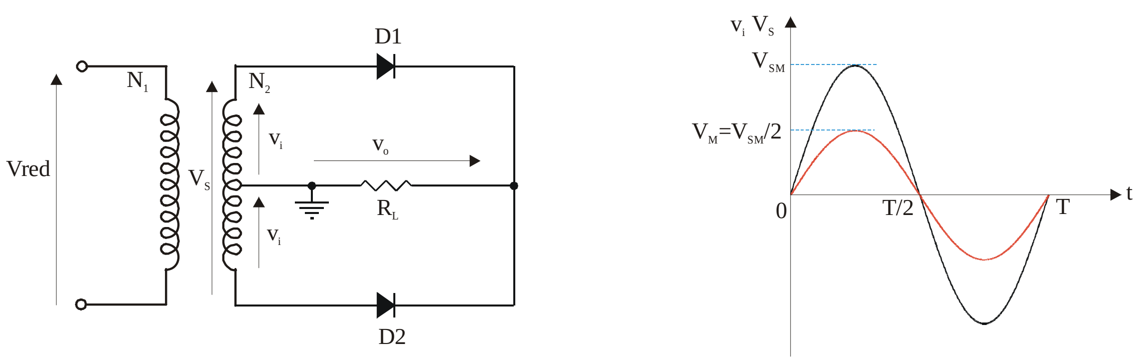
Por tanto

$$v_D = v_i - v_o \begin{cases} 0 \leq t \leq \dfrac{T}{2} & v_o = v_i \quad \Rightarrow \quad v_D = 0 \\ \dfrac{T}{2} \leq t \leq T & v_o = 0 \quad \Rightarrow \quad v_D = v_i \end{cases}$$

En consecuencia vemos que el diodo debe ser capaz de aguantar la tensión $V_{M.}$

3.2.- Rectificadores de onda completa.

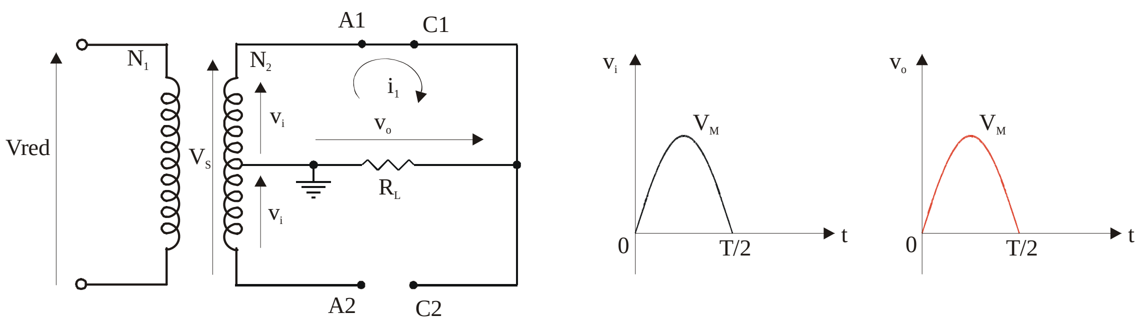
3.2.1.- Circuito con dos diodos.



En la figura aparece el circuito para obtener un rectificado de onda completa utilizando únicamente dos diodos. Notar que para poder hacer este tipo de rectificado se necesitan dos tensiones idénticas v_i, lo cual se consigue fácilmente con un transformador que tenga una toma central en el secundario. De tal forma que si la tensión que tenemos en el secundario es de la forma $V_S = V_{SM}\ \mathrm{sen}\ (\omega t)$ la tensión de entrada al rectificador será $v_i = \dfrac{V_{SM}}{2}\ \mathrm{sen}\ (\omega t)$

Para resolver el circuito,

a.- *Suponemos que el diodo D1 está en conducción y el diodo D2 en corte.*



En este caso vemos como $v_o = v_i$

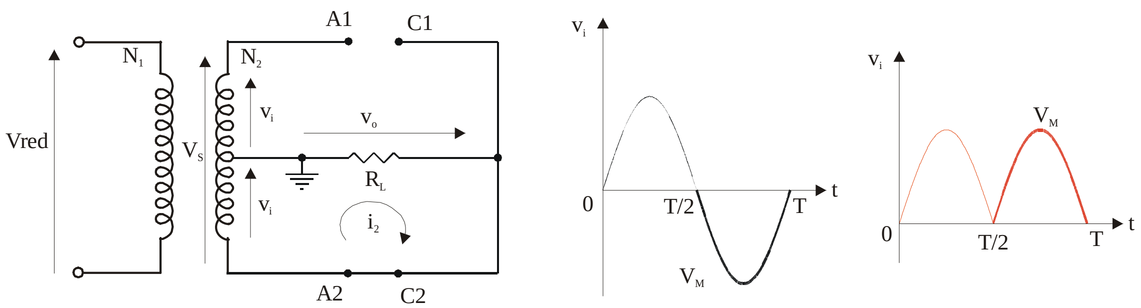
Para que D1 esté en conducción $i_1 = \dfrac{v_i}{R_L} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq 0$

Para que D2 esté en corte $v_{D2} = v_{A2} - v_{c2} \leq 0 \quad \rightarrow \quad -v_i - v_i \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq 0$

Por tanto

$$\boxed{0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i}$$

b.- *Suponemos que el diodo D1 está en corte y el diodo D2 en conducción.*



Ahora vemos como $v_o = -v_i$

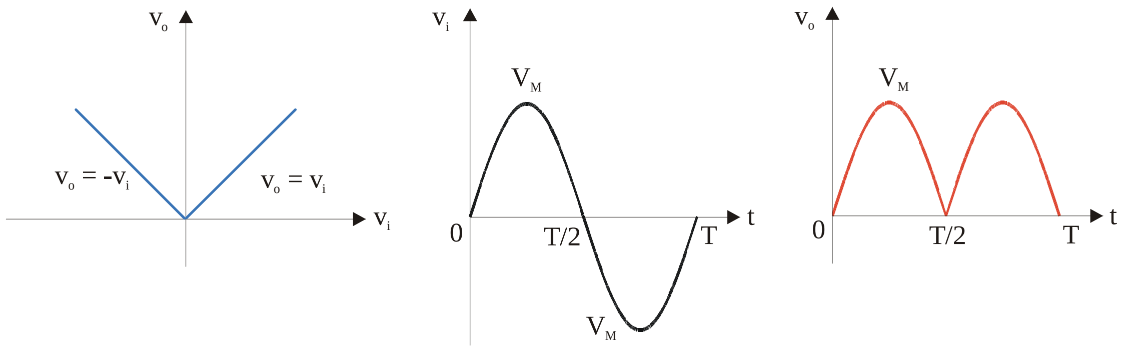
Para que D1 esté en corte $v_{D1} = v_{A1} - v_{C1} \leq 0 \quad \rightarrow \quad v_i - (-v_i) \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq 0$

Para que D2 esté en conducción $i_2 = \dfrac{v_i}{R_L} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq 0$

Por tanto

$$\boxed{\frac{T}{2} \leq t \leq T \quad \Rightarrow \quad v_o = -v_i}$$

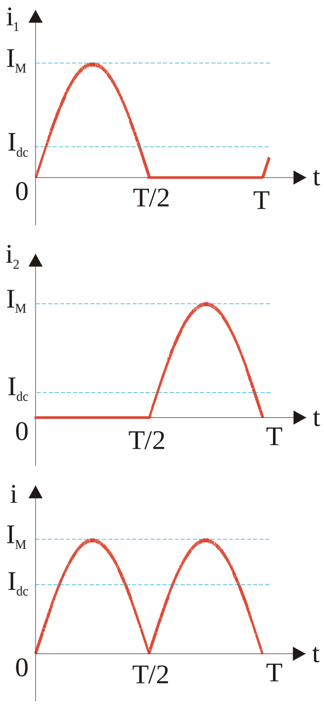
Ahora estamos en condiciones de representar la curva de transferencia del circuito así como las tensiones de entrada y de salida.



3.2.1.1.- Cálculo de las corrientes.

Cada uno de los diodos está en conducción un semiperiodo, mientras que por la carga circula corriente durante el periodo completo.

Como se puede apreciar en la gráfica, el valor de las corrientes i_1 e i_2 que circulan por D1 y D2 respectivamente es igual que en el caso anterior del rectificado de media onda. Por tanto vamos a centrarnos en calcular los valores de la intensidad en la carga. Calcularemos como hemos hecho en el caso anterior tanto el valor máximo como el valor medio o de continua y su valor eficaz.



$$I_M = \frac{V_M}{R_L} \qquad I_{dc} = \frac{I_M}{\pi} \qquad I = \frac{I_M}{2}$$

$$I_M = \frac{V_M}{R_L} \qquad I_{dc} = \frac{2I_M}{\pi} \qquad I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

Para el cálculo del valor medio de la corriente en la carga:

$$I_{dc} = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} i\,dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} i\,dt\right] = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} I_M \cdot \text{sen}\,(\omega t)\,dt = \frac{2\,I_M}{T}\cdot\frac{(-1)}{\omega}\left[\cos\,(\omega t)\right]_0^{\frac{T}{2}}$$

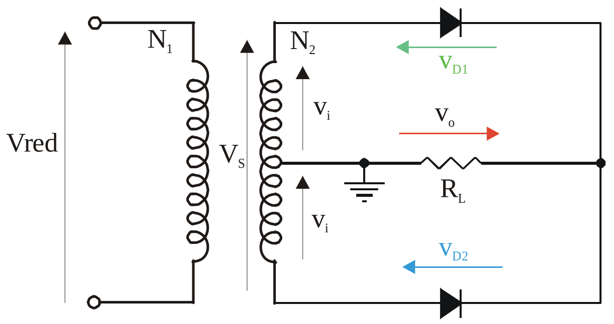
$$\boxed{I_{dc} = \frac{2\,I_M}{\pi} \qquad\qquad V_{dc} = \frac{2\,V_M}{\pi}}$$

El cálculo del valor eficaz de la corriente será:

$$I^2 = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} i^2 dt\right] = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} I_M^2\ \text{sen}^2(\omega t)\,dt = \frac{2\,I_M^2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen}^2(\omega t)\,dt = \frac{I_M^2}{2}$$

$$\boxed{I = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \qquad\qquad V = \frac{V_M}{\sqrt{2}}}$$

3.2.1.2. Cálculo de las tensiones en los diodos.



Del circuito observamos que en todo momento se cumple

$$v_{D1} = v_i - v_o$$
$$v_{D2} = -v_i - v_o$$

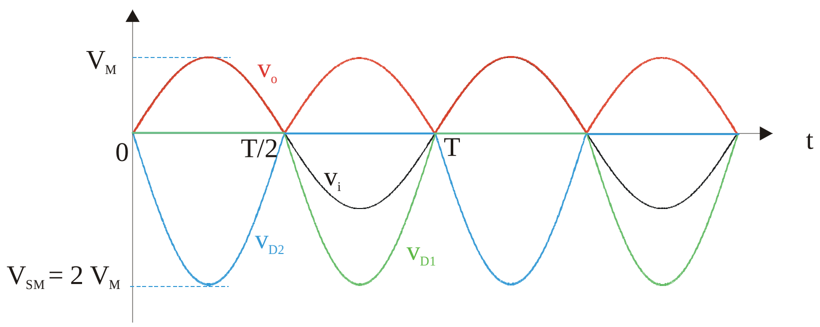
En el primer semiperiodo:

$$0 \le t \le \frac{T}{2} \rightarrow v_o = v_i \Rightarrow \begin{cases} v_{D1} = v_i - v_o = 0 \\ v_{D2} = -v_i - v_o = -2\ \ v_i \end{cases}$$

En el segundo semiperiodo

$$\frac{T}{2} \le t \le T \rightarrow v_o = -v_i \Rightarrow \begin{cases} v_{D1} = v_i - v_o = 2\ \ v_i \\ v_{D2} = -v_i - v_o = 0 \end{cases}$$

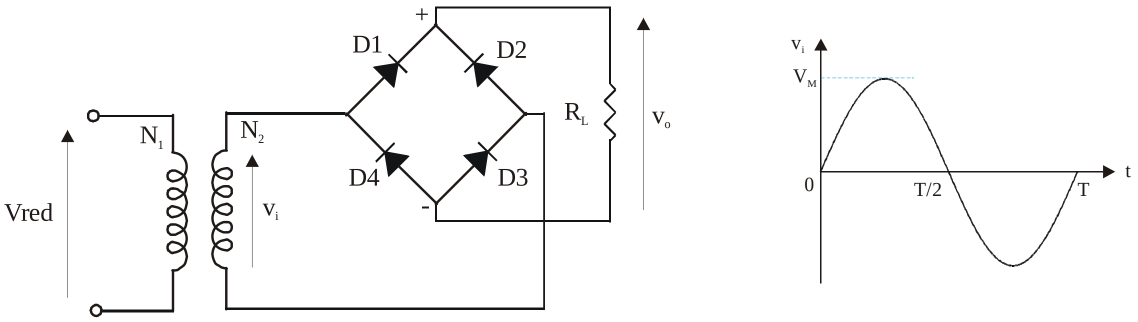
Si las representamos gráficamente



Es importante observar como cuando los diodos están en inversa deben soportar una tensión máxima de valor 2 V_M. Es decir, deben de soportar toda la tensión del secundario del transformador, mientras que a la carga llega una tensión de valor máximo V_M o, lo que es lo mismo, la mitad de la tensión del secundario.

3.2.2.- Circuito con puente de diodos.

En la figura se representa un circuito rectificador de onda completa utilizando un puente de diodos. A diferencia del caso anterior no necesitamos dos tensiones vi idénticas, por tanto no necesitaremos un transformador con toma intermedia. Por otra parte, podemos observar como ahora necesitamos 4 diodos en una configuración típica conocida como *puente de diodos.*

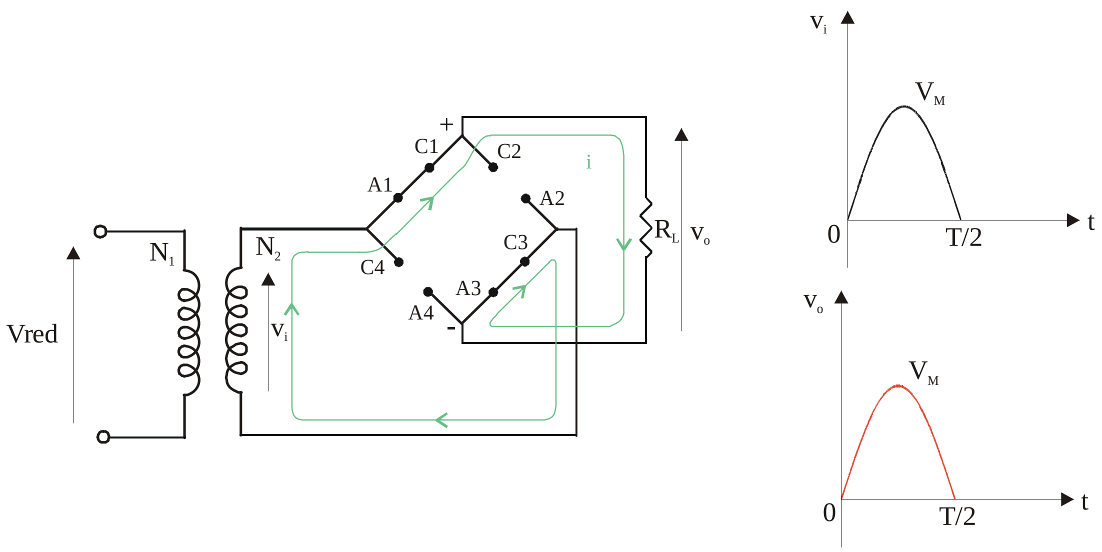


La tensión de entrada al circuito rectificador es una sinusoidal de valor máximo V_M.

$v_i = V_M \text{ sen } (\omega t)$

Resolvemos el circuito. Los casos posibles son:

a.- *Suponemos que los diodos D1 y D3 están en conducción y D2 y D4 en corte.*



Para este caso $v_o = v_i$

Para que D1 y D3 estén en conducción $i = \dfrac{v_i}{R_L} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq 0$

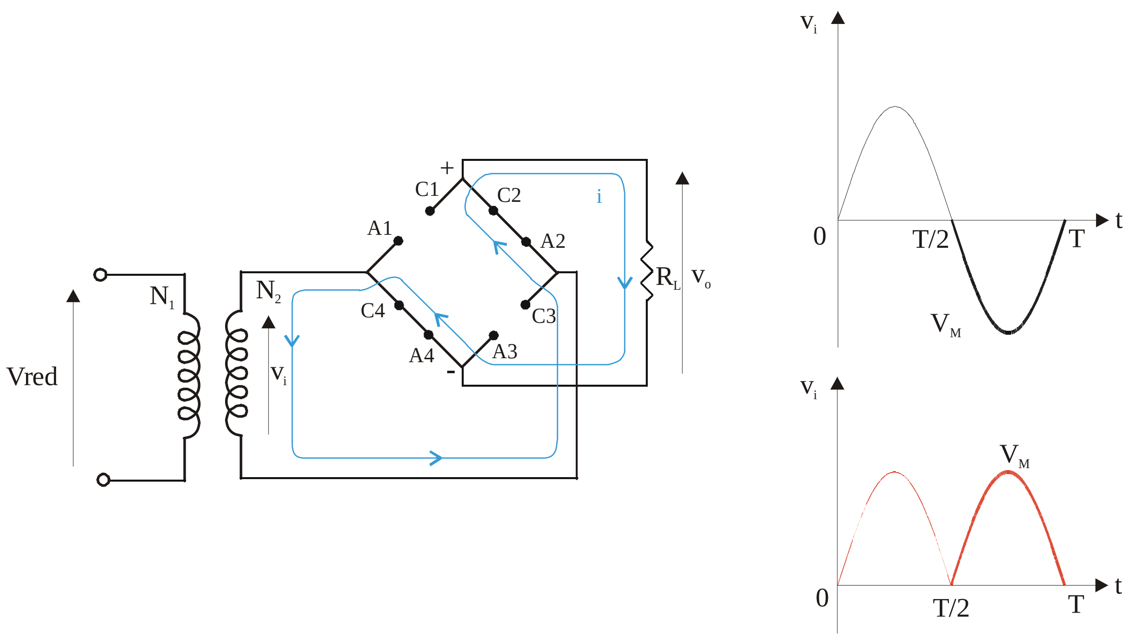
Para que el D2 esté en corte $v_{D2} = v_{A2} - v_{C2} \leq 0 \quad \rightarrow \quad 0 - v_i \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq 0$

Para que el D4 esté en corte $v_{D4} = v_{A4} - v_{C4} \leq 0 \quad \rightarrow \quad 0 - v_i \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \geq 0$

Por tanto

$$\boxed{0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_i}$$

b.- *Suponemos que los diodos D1 y D3 están en corte y D2 y D4 en conducción.*



Para este caso $v_o = -v_i$

Para que D2 y D4 estén en conducción $i = \dfrac{-v_i}{R_L} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq 0$

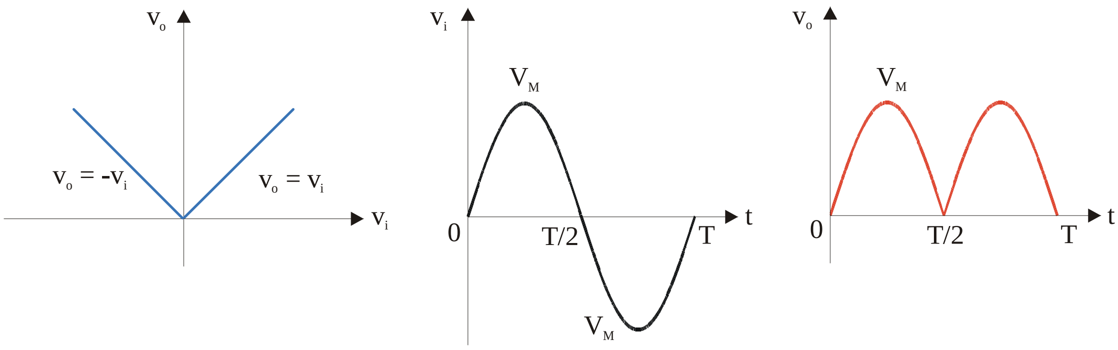
Para que el D1 esté en corte $v_{D1} = v_{A1} - v_{C1} \leq 0 \quad \rightarrow \quad v_i - 0 \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq 0$

Para que el D3 esté en corte $v_{D3} = v_{A3} - v_{C3} \leq 0 \quad \rightarrow \quad v_i - 0 \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_i \leq 0$

Por tanto

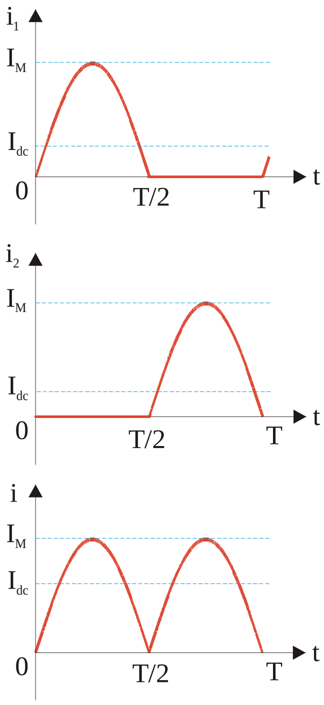
$$\boxed{\frac{T}{2} \leq t \leq T \quad \Rightarrow \quad v_o = -v_i}$$

Tanto la curva de transferencia del circuito como la tensión en la carga son exactamente iguales a las que teníamos en el apartado anterior.



3.2.2.1.- Cálculo de las corrientes.

Si las tensiones son iguales a las del caso anterior, lo mismo ocurrirá con las intensidades. (Obviamos su cálculo por haber sido realizado en el apartado anterior).



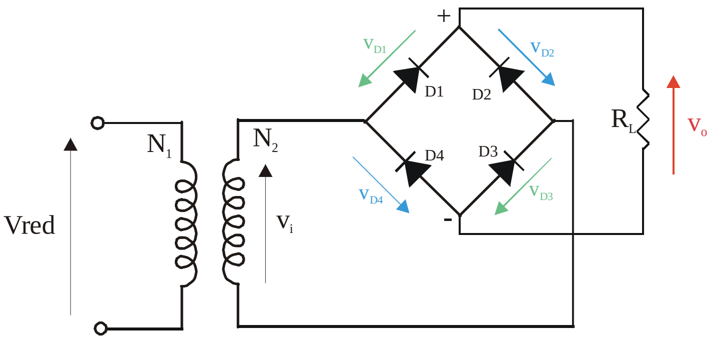
$$I_M = \frac{V_M}{R_L} \qquad I_{dc} = \frac{I_M}{\pi} \qquad I = \frac{I_M}{2}$$

$$I_M = \frac{V_M}{R_L} \qquad I_{dc} = \frac{2I_M}{\pi} \qquad I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

$$\boxed{I_{dc} = \frac{2\,I_M}{\pi} \qquad V_{dc} = \frac{2\,V_M}{\pi}}$$

$$\boxed{I = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \qquad V = \frac{V_M}{\sqrt{2}}}$$

3.2.2.2. Cálculo de las tensiones en los diodos.



Podemos observar como:

$$v_i = v_{D1} + v_o + v_{D3}$$
$$v_i = -\left(v_{D4} + v_o + v_{D2}\right)$$

$$\text{Como} \begin{cases} v_{D1} \equiv v_{D3} & \Rightarrow \quad v_{D1} \equiv v_{D3} = \frac{1}{2}\left(v_i - v_o\right) \\ v_{D2} \equiv v_{D4} & \Rightarrow \quad v_{D2} \equiv v_{D4} = -\frac{1}{2}\left(v_i + v_o\right) \end{cases}$$

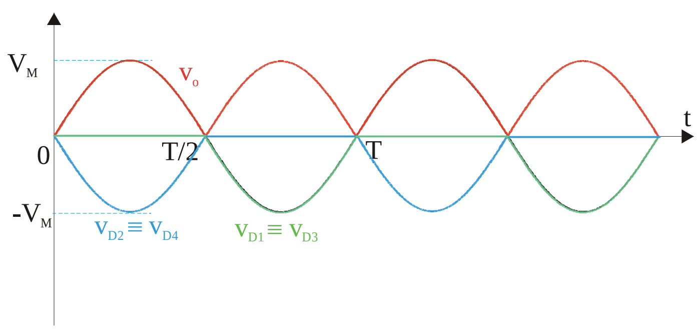
En el primer semiperiodo

$$0 \le t \le \frac{T}{2} \quad \rightarrow \quad v_o = v_i \quad \Rightarrow \begin{cases} v_{D1} \equiv v_{D3} = 0 \\ v_{D2} \equiv v_{D4} = -v_i \end{cases}$$

En el segundo semiperiodo

$$\frac{T}{2} \le t \le T \quad \rightarrow \quad v_o = -v_i \quad \Rightarrow \begin{cases} v_{D1} \equiv v_{D3} = v_i \\ v_{D2} \equiv v_{D4} = 0 \end{cases}$$

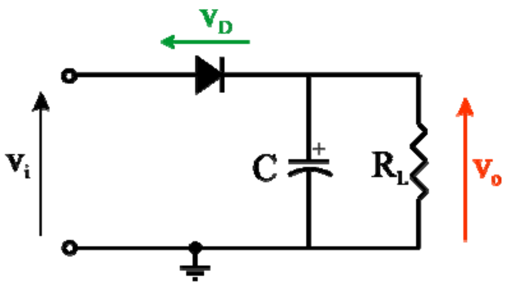
Si lo representamos gráficamente.



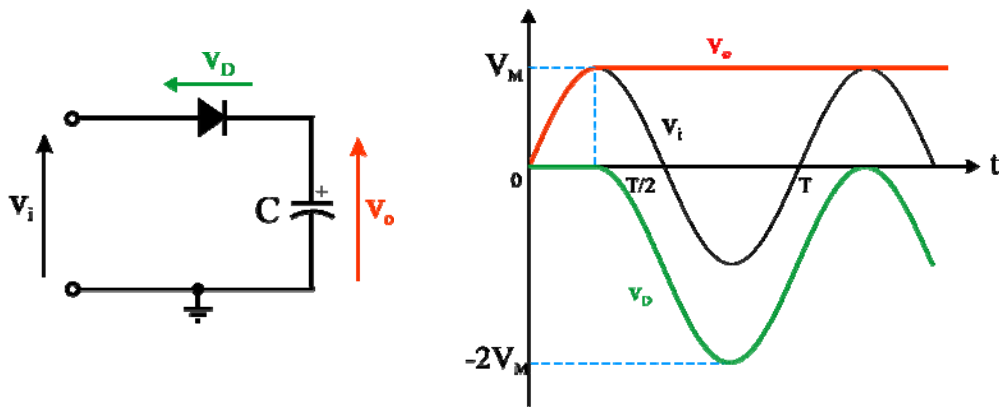
A diferencia del caso anterior, ahora toda la tensión del secundario llega a la carga. Los diodos, en inversa, deberán de ser capaces de aguantar una tensión V_M.

4.- FILTRADO DE CONDENSADOR.

A los circuitos rectificadores vistos hasta ahora, vamos a añadirles un condensador en paralelo con la carga.



Vamos a suponer en un primer análisis que no existe resistencia de carga. Es decir, suponemos que $R_L = \infty$. Supondremos también diodo ideal.



En el instante inicial todas las tensiones son cero, $v_i = 0$ y $v_o = 0$. A medida que aumenta v_i tendríamos:

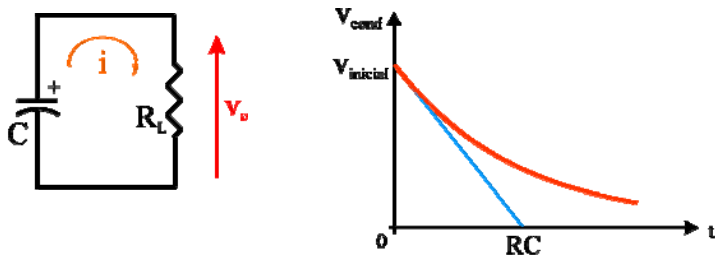
$$\left.\begin{array}{l} v_{Anodo} = v_i \\ v_{Cátodo} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \text{ Diodo en conducción } \Rightarrow v_o = v_i$$

En el instante t = T/4 la tensión de entrada alcanza su valor máximo V_M. En este instante el condensador estará cargado con una tensión igual a V_M. A partir de este instante v_i comienza a disminuir. Sin embargo, la tensión en bornes del condensador se mantiene, ya que éste no tiene un camino a través del cual pueda descargarse. Por tanto:

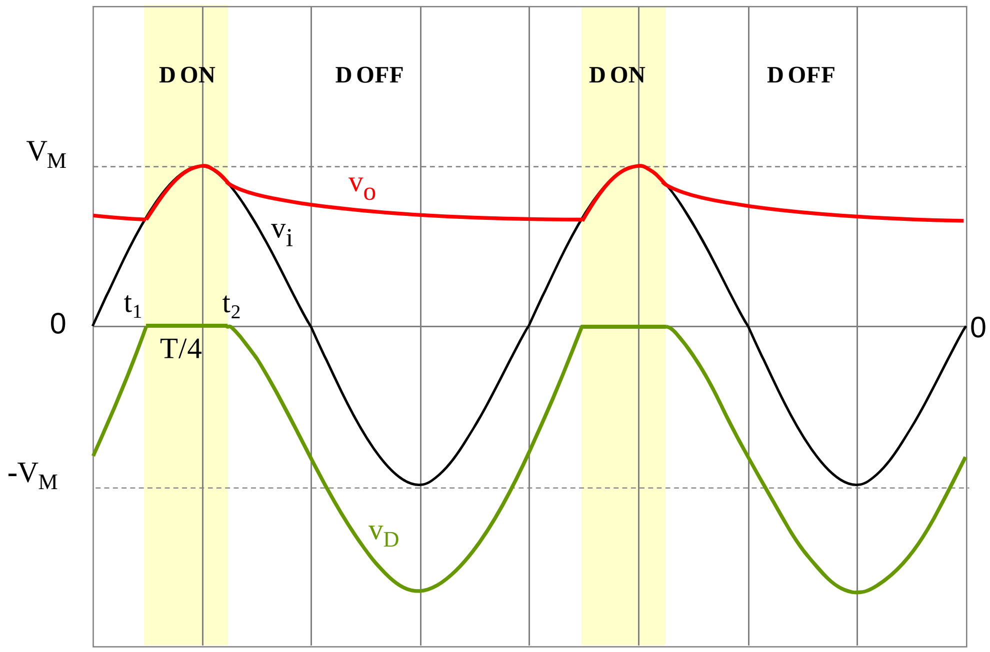
$$\left.\begin{array}{l} v_{Anodo} = v_i(< V_M) \\ v_{Cátodo} = V_M \end{array}\right\} \quad v_{Anodo} < v_{Cátodo} \quad \Rightarrow \quad \text{Diodo en corte} \quad \Rightarrow \quad v_o = v_{condensador} = V_M$$

Esta situación se mantendrá indefinidamente ya que la tensión de entrada nunca podrá tener un valor superior a V_M que haga que el diodo se ponga en conducción.

Si ahora colocásemos la resistencia en paralelo con el condensador le estamos proporcionando un camino de descarga al condensador.

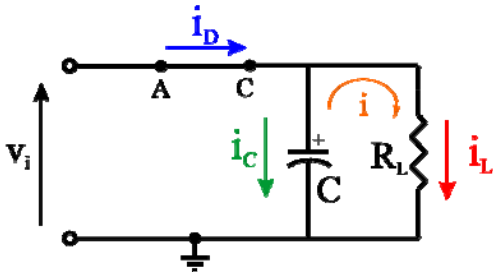


Al ir descargándose el condensador su tensión decrece a un ritmo exponencial. Esta situación se mantendrá mientras el diodo se mantenga en corte, es decir, mientras $v_{ánodo} < v_{cátodo}$. En el momento en el que $v_{ánodo} > v_{cátodo}$ el diodo se pone nuevamente en conducción de forma que la tensión en el condensador se iguala a la de entrada ($v_O = v_i$). En resumen, el condensador se carga cuando el diodo esta en conducción y se descarga a través de la resistencia cuando el diodo está en corte, de forma que ahora siempre habrá tensión en la salida.



En cuanto a las corrientes que van a circular por el circuito, podemos distinguir igualmente dos casos en función del estado del diodo.

Así, cuando el diodo está en conducción



$i_D = i_C + i_L$

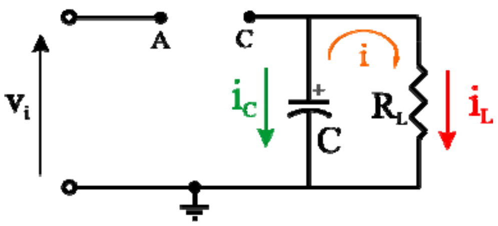
Como conocemos la tensión en los bornes de la resistencia y del condensador

$$i_L = \frac{v_O}{R_L} = \frac{V_M}{R_L} \cdot \text{sen}\, \varpi t$$

$$i_C = C\frac{dv_O}{dt} = C \cdot \varpi \cdot V_M \cdot \cos \varpi t = 2\pi f \cdot C \cdot V_M \cdot \cos \varpi t$$

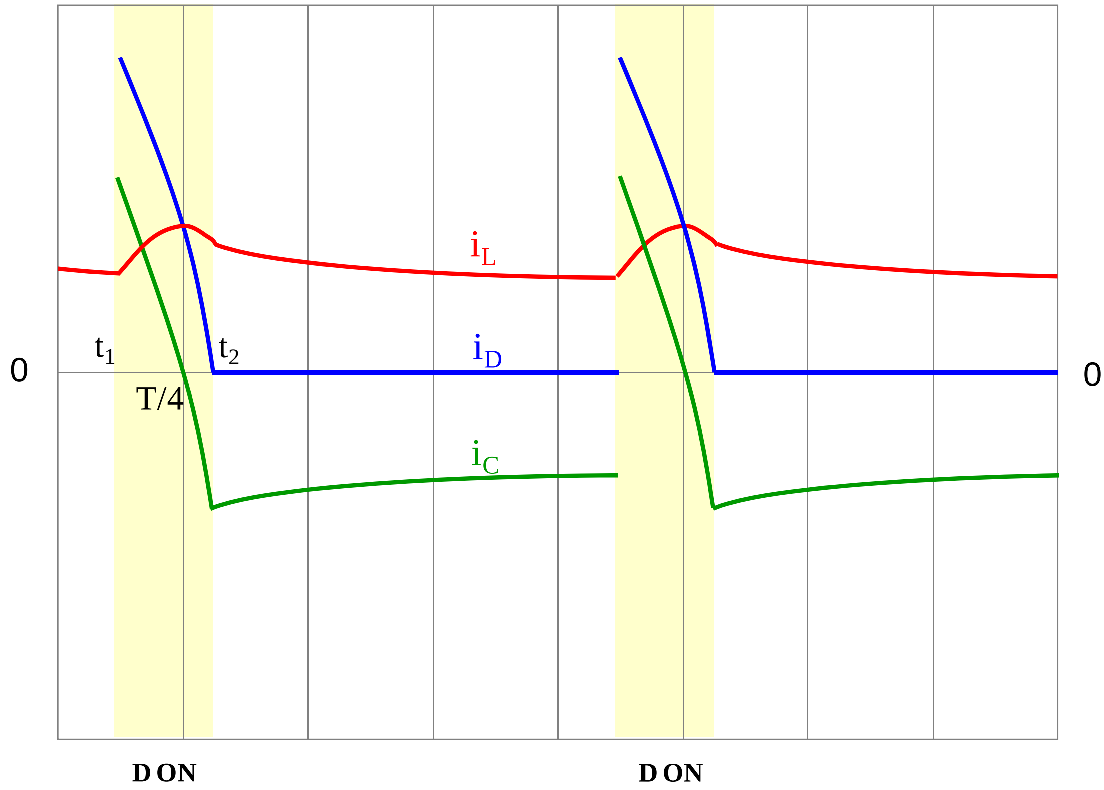
Directamente proporcional a C cuanto mayor sea la capacidad del condensador que pongamos para realizar el filtrado, la tensión de salida será más continua (menor rizado) pero como contrapartida, la tensión por el condensador y, por tanto, la corriente por el diodo será mayor.

En el caso en el que el diodo está en corte, la corriente que circula por la resistencia proviene de la descarga del condensador

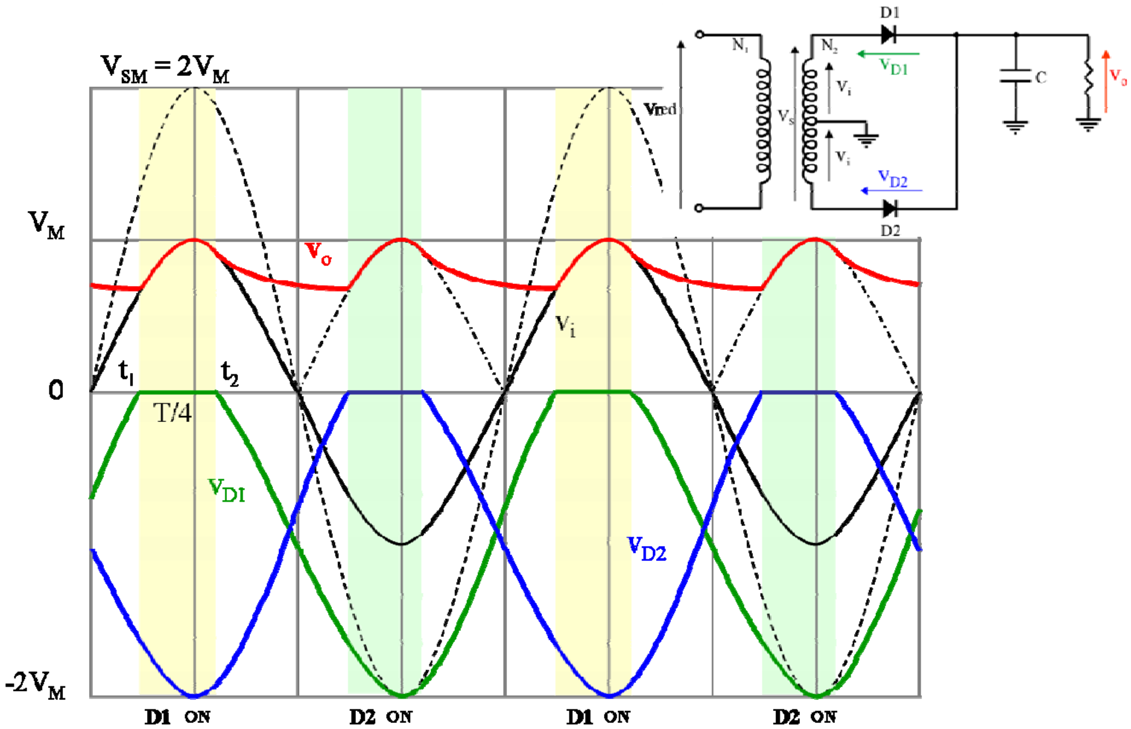


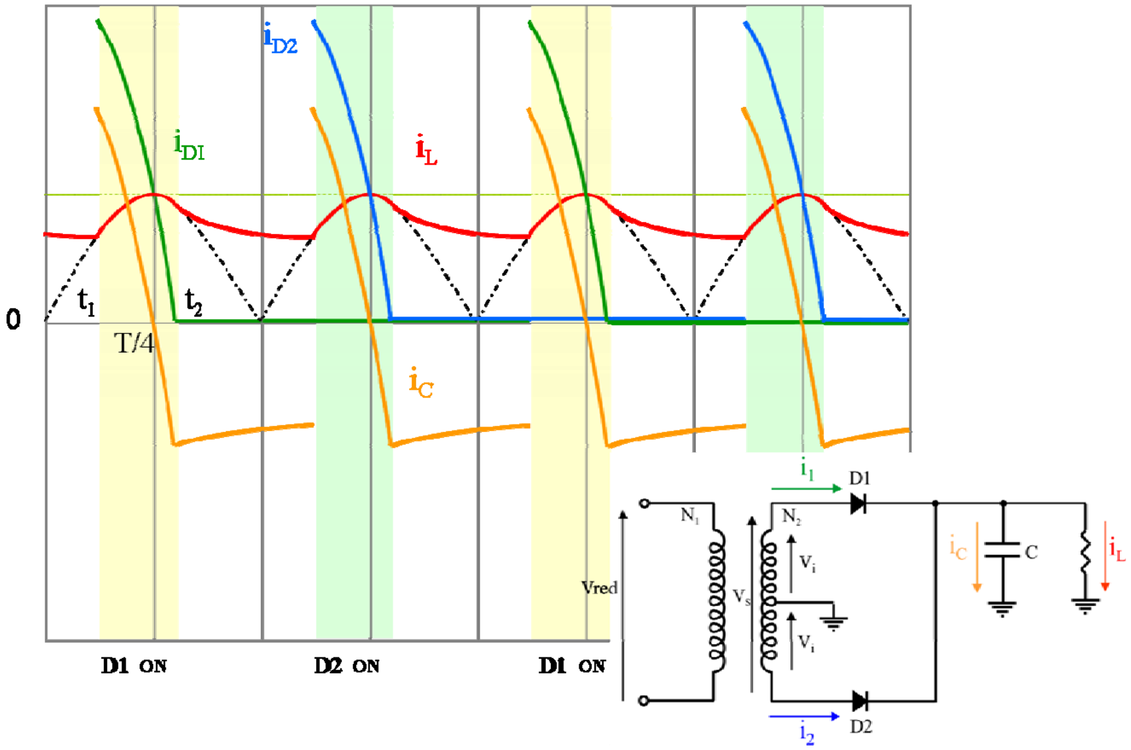
$i_C = - i_L$

$$i_L = \frac{v_O}{R_L} = \frac{V_M}{R_L} \cdot \exp\frac{-t}{RC}$$

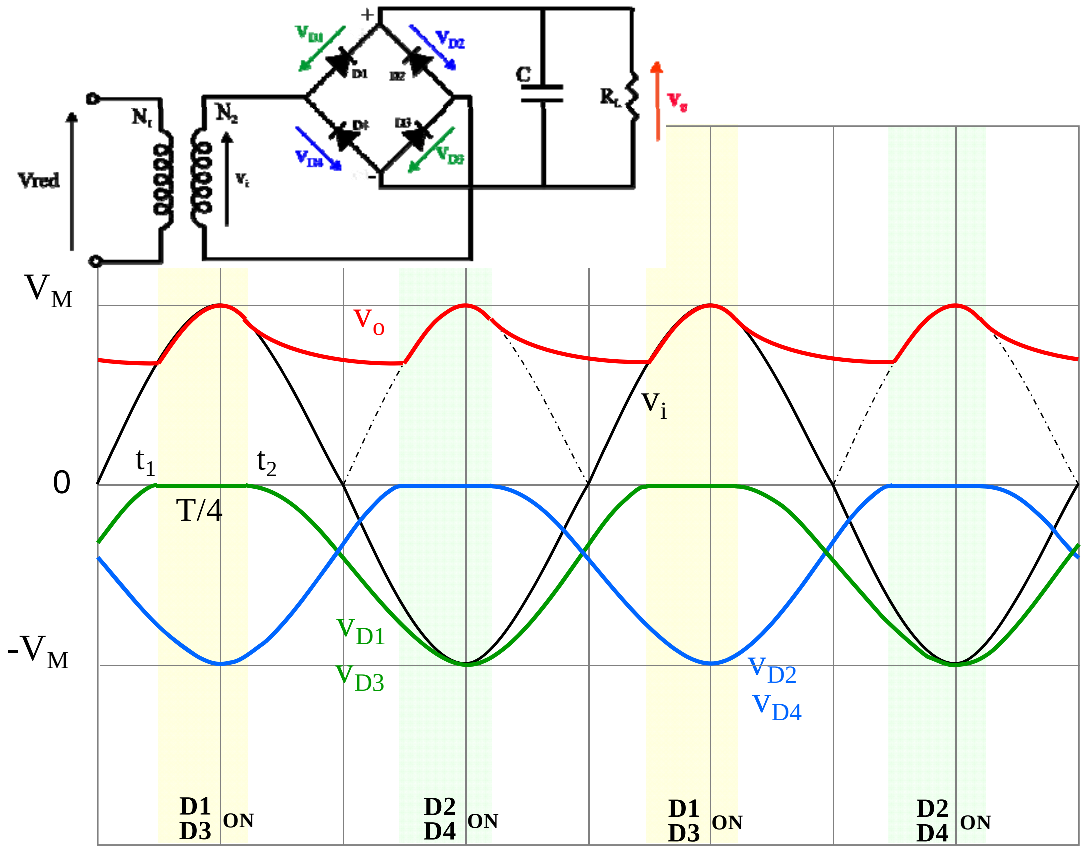


Un resultado similar obtendríamos si hubiésemos analizado el caso de un circuito rectificador de onda completa. En las figuras siguientes se presentan las tensiones y corrientes para los dos casos de rectificadores de onda completa analizados en este tema (circuito con dos diodos y puente de diodos





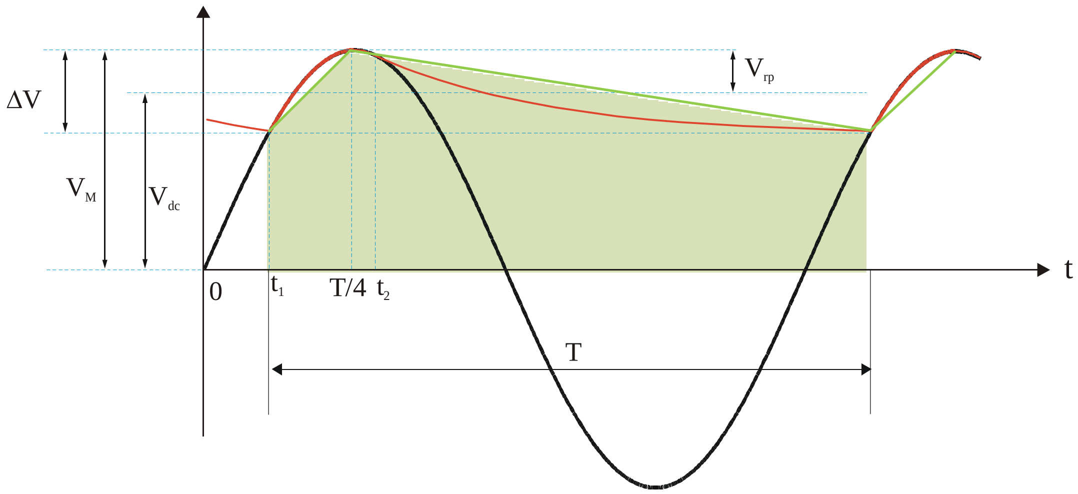
iD2
iDI
iL
0
t1
t2
T/4
iC
D1 ON
D2 ON
D1 ON
i1
D1
N1
N2
Vi
Vred
Vs
Vi
iC
C
iL
i2
D2



Vred
N1
N2
Vi
VD1
VD2
D1
D2
D4
D3
VD4
VD3
C
RL
Vo
VM
Vo
Vi
t1
t2
0
T/4
-VM
VD1
VD3
VD2
VD4
D1 D3 ON
D2 D4 ON
D1 D3 ON
D2 D4 ON

Una vez que hemos visto de forma cualitativa las tensiones y corrientes por los circuitos con filtrado, vamos a pasar a analizar cuantitativamente los valores de dichas magnitudes.

En primer lugar, para simplificar, se aproxima la tensión de salida por una onda triangular.



El valor medio de esta tensión triangular será:

$$V_{dc} = \frac{1}{T}\int_T v_O \, dt \quad \text{Donde} \quad \int_T v_O \, dt = \text{Area encerrada por la curva}$$

$$V_{dc} = \frac{1}{T}\left[\left(V_M - \Delta V\right)T + \frac{1}{2}\Delta V \cdot T\right] = V_M - \frac{\Delta V}{2}$$

Definimos para la onda de salida los siguientes parámetros:

V_{rp} = *Tensión de pico o de cresta de ondulación o rizado*

$$V_{rp} = \frac{\Delta V}{2}$$

V_r = *Tensión eficaz de rizado o de ondulación*

$$V_r = \frac{V_{rp}}{\sqrt{3}}$$

γ = *Factor de ondulación*

$$\gamma = \frac{V_r}{V_{dc}} \cdot 100 \quad (\%)$$

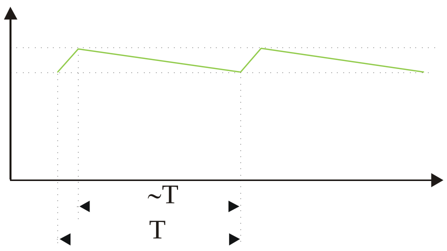
Este factor de ondulación nos da una idea de lo bueno o malo que es el rizado, es decir, de lo que se aproxima la tensión de salida a una tensión continua.

Por otra parte, cuando el condensador se descarga, la carga proporcionada por el mismo es

$$Q_C = C \cdot \Delta V$$

El condensador se está descargando desde el instante $\frac{T}{4}$ durante un tiempo $T - \left(\frac{T}{4} - t_1\right)$, es decir, aproximadamente durante el tiempo en el que el diodo está en corte.

Si tenemos en cuenta que el diodo está en conducción durante un tiempo t_2-t_1 (o aproximadamente $\left(\frac{T}{4} - t_1\right)$) y que este tiempo es muy pequeño frente al periodo, podemos suponer que el condensador se descarga en un tiempo igual al periodo.



Cuando el condensador se descarga, lo hace a través de la resistencia. La carga en la resistencia viene dada por

$$Q_L = \int_T i \, dt = I_c \cdot T$$

(ya que hemos supuesto que el condensador se descarga en un tiempo T).

Si suponemos, que toda la carga que llega a la resistencia la proporciona el condensador. Es decir, si despreciamos la carga que llega a la resistencia durante el intervalo de tiempo en el que los diodos están en conducción. Tendremos

$$Q_C = Q_L \qquad \rightarrow \qquad C \cdot \Delta V = I_{dc} \cdot T$$

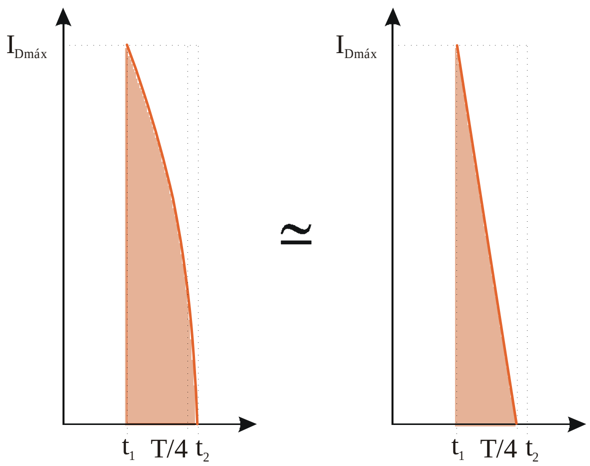
Donde C = Capacidad del condensador (F)

ΔV = Tensión de descarga del condensador (V)

I_{dc} = Valor medio o de continua de la intensidad. $I_{dc} = \dfrac{V_{dc}}{R_L}$ (A)

T = Periodo de la tensión de entrada (s)

Por otra parte, toda la carga ha tenido que pasar previamente por el diodo.



La carga que atraviesa el diodo será

$$Q_D = \int_T i_d \, dt = \int_{t_1}^{\frac{T}{4}} i_d \, dt = \text{Area sombreada}$$

$$Q_D = \frac{1}{2} I_{D\max} \left(\frac{T}{4} - t_1 \right)$$

Donde t_1 es el instante tras la descarga en que $v_o = v_i$.

$$\text{Para} \quad t = t_1$$

$$\left. \begin{array}{l} v_o = V_M - \Delta V \\ v_i = V_M \text{ sen } \omega t_1 \end{array} \right\} \qquad t_1 = \frac{1}{\omega} \text{arc sen} \frac{V_M - \Delta V}{V_M}$$

$$t_1 = \frac{1}{2\pi f} \text{arc sen} \frac{V_M - \Delta V}{V_M}$$

Para calcular la intensidad máxima por los diodos (I_{Dmax}) haremos:

$$Q_D = Q_L \qquad \text{o} \qquad Q_D = Q_C$$