



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

EL3003 – Laboratorio de Ingeniería Eléctrica

Guía Teórica Rectificadores

Autor:
Fecha:

Felipe E. Sandoval A.
22 de Junio del 2019

Índice de contenidos

1	Rectificadores no Controlados	5
1.1	Estructura básica del diodo	5
1.2	Rectificador Monofásico de Media Onda	8
1.2.1	Rectificador de media onda – Carga Resistiva.....	9
1.2.2	Rectificador de media onda – Carga RC.....	13
1.2.3	Rectificador de media onda – Carga RL.....	15
1.3	Rectificador monofásico de onda completa	16
1.3.1	Rectificador de onda completa – Carga Resistiva.....	17
1.3.2	Rectificador de onda completa – Carga RC	20
1.3.3	Rectificador de onda completa – Carga RL	22
1.3.4	Rectificador de onda completa – Carga RLC.....	24
1.4	Rectificador trifásico de Media Onda.....	25
1.4.1	Rectificador trifásico de media onda – Carga resistiva	25
1.4.2	Rectificador trifásico de media onda – Carga RC	29
1.4.3	Rectificador trifásico de media onda – Carga RL	31
1.4.4	Rectificador trifásico de media onda – Carga RLC.....	33
1.5	Rectificador trifásico de Onda Completa.....	33
1.5.1	Rectificador trifásico de onda completa– Carga resistiva.....	34
1.5.2	Rectificador de onda completa – Carga RC	39
1.5.3	Rectificador de onda completa – Carga RL	41
1.5.4	Rectificador de onda completa – Carga RLC.....	42

Índice de figuras

Símbolo eléctrico.....	5
Estructura Física.....	5
Diodo en polarización directa.	5
Diodo en polarización inversa.....	6
Curva ideal de un diodo.....	6
Capa de agotamiento.	7
Representación circuital del diodo en polarización directa.....	7
Curva real de un diodo.....	8
Semiciclo positivo de la fuente CA.....	9
Semiciclo negativo de la fuente CA.....	9
Respuesta de un Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga resistiva.....	10
Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga R-C.....	13
Respuesta de un Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga R-C.....	14
Esquema de un Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga R-L.....	16
Rectificador de onda completa con carga resistiva.	17
Respuesta de un rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga Resistiva.....	18
Esquema de un Rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga R-C.....	21
Esquema Rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga R-L.....	22
Esquema de un Rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga R-L-C.....	24
Esquema rectificador trifásico de media onda con carga resistiva.....	25
Alimentación trifásica.....	26
Análisis de conducción de cada diodo en el circuito rectificador trifásico de media onda.....	26
Esquema de Respuesta de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga Resistiva.....	27
Esquema de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-C.....	30
Respuesta de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-C.....	30
Esquema de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-L.....	31
Esquema de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-L-C.....	33
Esquema de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga Resistiva.....	34
Alimentación trifásica circuito recitificador de Onda Completa.....	34
Análisis de conmutación en los diodos.....	35
Análisis de conmutación en los diodos.....	35
Cortocircuito en rectificador trifásico de onda completa.....	36
Respuesta de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga Resitiva.....	37
Esquema de Respuesta Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga R-C.....	40
Esquema de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga R-L.....	41
Esquema de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga R-L-C.....	43

Índice de tablas

Análisis de conmutación de los diodos 36

1 Rectificadores no Controlados

1.1 Estructura básica del diodo

El elemento más básico dentro de los rectificadores es el diodo. El diodo es un elemento de estado sólido compuesto por dos elementos semiconductores que entrelazados por una juntura conforman un dispositivo con características útiles para lograr rectificación de señales alternas.

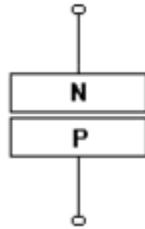


Figura 2.
Estructura Física



Figura 1. Símbolo
eléctrico

El diodo posee dos terminales; ánodo y cátodo, el ánodo está conectado en el terminal tipo p y el n corresponde al terminal cátodo.

En términos simples, podemos decir que el diodo permite el paso de corriente eléctrica en un solo sentido. Si conectamos el diodo a una fuente de voltaje tal como se muestra a continuación, se comportará como un interruptor cerrado y permitirá circulación de corriente en la resistencia cuando el terminal positivo de la fuente de voltaje coincida con el ánodo.

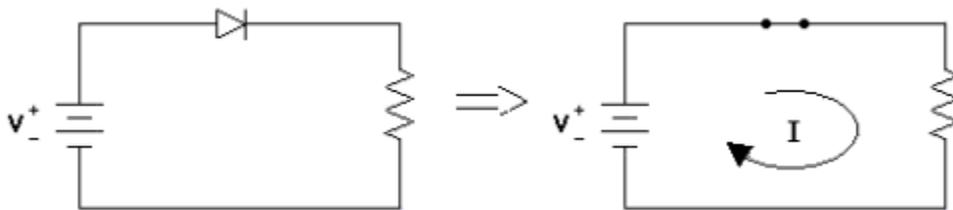


Figura 3. Diodo en polarización directa.

Por el contrario, si se invierte la fuente de voltaje o se invierte la polaridad del diodo, este actuará como un interruptor abierto, ya que está polarizado en forma inversa y no habrá circulación de corriente en el circuito.

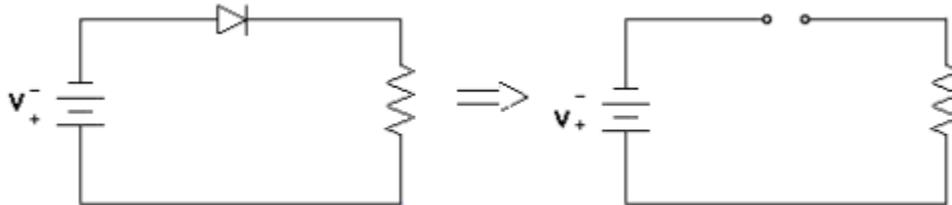


Figura 4. Diodo en polarización inversa.

De esta manera, podemos representar a un diodo ideal como lo ilustra la siguiente figura:

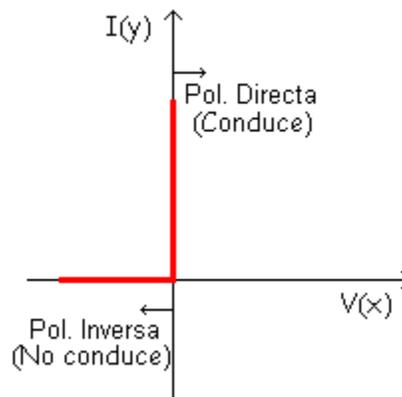


Figura 5. Curva ideal de un diodo

Debido a las características físicas de los elementos que componen un diodo, este posee una resistencia no lineal en modo de polarización directa y otra en modo de polarización inversa. La resistencia es no lineal pues su valor es variable y dependiente de la corriente circulante.

Además, la capa de agotamiento del diodo posee una tensión llamada “potencial de barrera” que es aproximadamente de 0.7 [V] para diodos de silicio y 0.3 [V] para diodos de germanio.

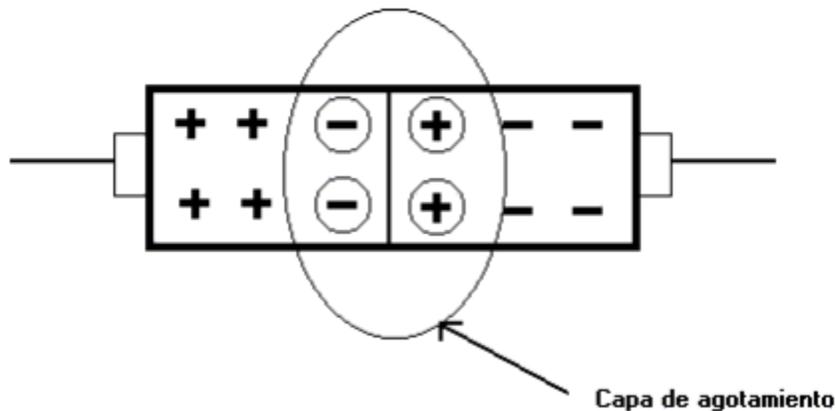


Figura 6. Capa de agotamiento.

Cuando el diodo es polarizado en forma directa, el potencial de barrera es un nivel de voltaje opuesto al aplicado en el diodo y debe ser superado para lograr la conducción. Así, es posible representar estas características en el siguiente circuito:

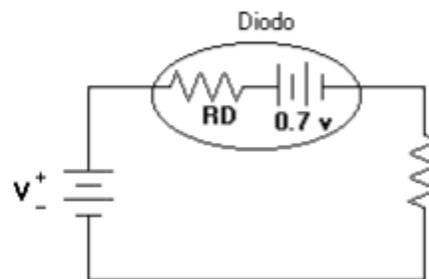


Figura 7. Representación circuital del diodo en polarización directa.

Habitualmente los niveles de resistencia y voltaje de barrera que posee el diodo son despreciables en comparación con los otros elementos principales del circuito y suelen realizarse los estudios sin considerar estos efectos.

De igual manera, el diodo posee una resistencia cuando se polariza en forma inversa, esta es de gran magnitud y no permite el paso de corriente (Salvo una corriente pequeñísima corriente de saturación del orden de los nano-amperios). Cuando se incrementa el voltaje de polarización inversa se puede llegar hasta el voltaje de ruptura del dispositivo, punto en el cual se pierde su condición de aislante y se produce una avalancha de electrones, luego la corriente se eleva bruscamente provocando la destrucción del diodo por su excesiva disipación térmica de potencia, este voltaje umbral es conocido como la **Tensión Inversa Máxima** del diodo.

Finalmente, la curva característica del diodo resume en forma gráfica los conceptos explicados anteriormente, y se presenta a continuación.

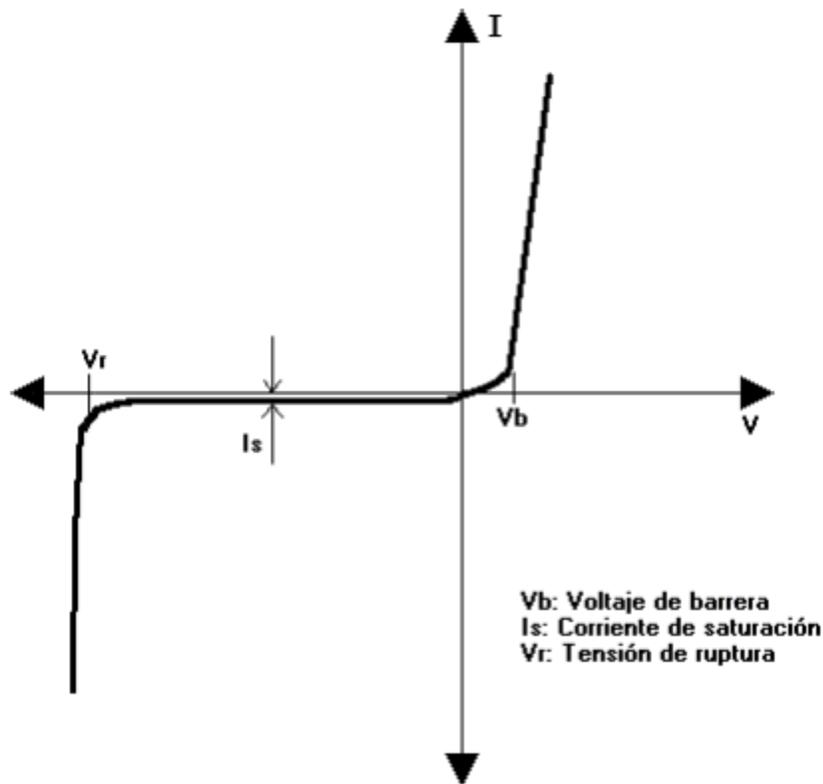


Figura 8. Curva real de un diodo

1.2 Rectificador Monofásico de Media Onda

Hemos revisado las características del diodo y su comportamiento a diferentes tipos de polarización. Ahora si incluimos un diodo en un circuito alimentado por una fuente de corriente alterna, podremos apreciar la utilidad de este elemento para la conversión de señales alternas a continuas.

En los siguientes casos se asumirá que los diodos son ideales, por lo cual no se considera su caída de tensión ni la corriente de saturación cuando está en modo de bloqueo, también se considerará que el diodo posee una conmutación instantánea.

El rectificador monofásico de media onda es la topología más simple y podremos comprender mejor el funcionamiento del diodo cuando se ve excitado por una señal de C.A.

Aunque la siguiente topología no es útil para sistemas de potencia, se usará para explicar en términos simples la variación de la señal de entrada y el comportamiento en diversos tipos de carga.

1.2.1 Rectificador de media onda – Carga Resistiva

Las siguientes figuras muestran una carga resistiva alimentada por una fuente sinusoidal, durante el semiciclo positivo el diodo es polarizado en forma directa por lo cual se comporta como un interruptor en estado de conducción, por el contrario, durante el semiciclo negativo tal como se ha presentado con anterioridad, el diodo es alimentado en forma inversa comportándose por ende como un circuito abierto. De esta manera, se puede apreciar que en la carga ya no habrá una señal alterna sino una señal periódica con una gran componente CC.

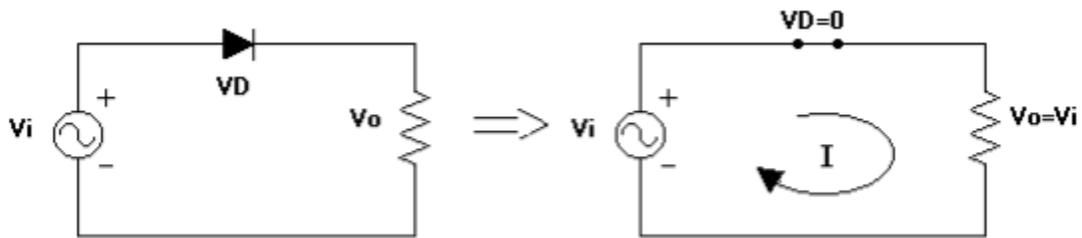


Figura 9. Semiciclo positivo de la fuente CA

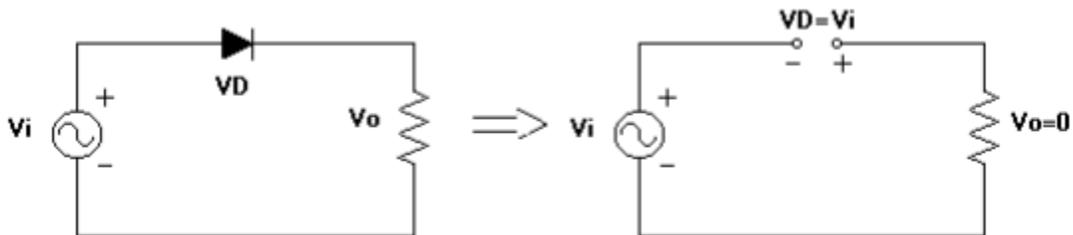


Figura 10. Semiciclo negativo de la fuente CA

Finalmente, la respuesta del circuito se aprecia en la siguiente figura:

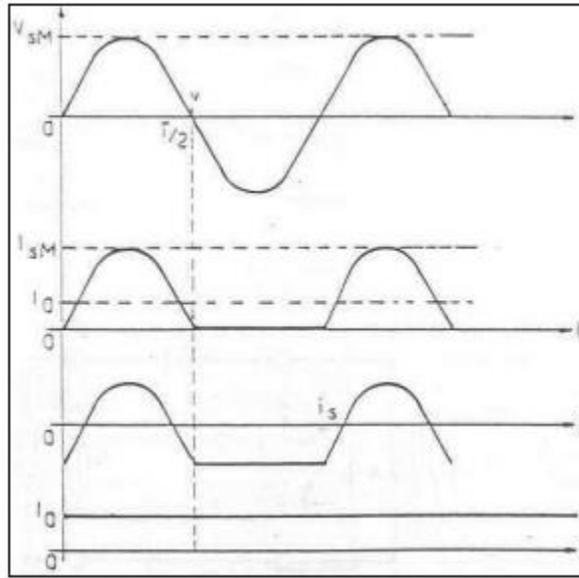


Figura 11. Respuesta de un Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga resistiva

1.2.1.1 Características esenciales.

Considerando el voltaje de alimentación como una sinusoidal pura de valor $V(t) = V_m \sin(\omega t)$, podemos obtener las siguientes características de interés.

1.2.1.1.1 Voltaje efectivo y corriente efectiva

El voltaje efectivo o RMS, V_{rms} , para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} \quad (1)$$

Donde T corresponde al periodo de la onda igual a 2π y V_r al voltaje por la resistencia, el cual sigue la siguiente tendencia:

$$V_r = V(t) = V_m \sin(\omega t) \quad \forall \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq (2n - 1)\pi$$

$$V_r = 0 \quad \forall \omega t \quad (2n - 1)\pi \leq \omega t \leq 2n\pi$$

Con n un número natural mayor o igual a 1.

De esta manera, el voltaje efectivo viene dado por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} + \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} 0^2 d\omega t} \quad (2)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m^2 \sin^2(\omega t) d\omega t = \frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^\pi \frac{(1 - \cos(2\omega t))}{2} d\omega t \quad (3)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \quad (4)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_{rms} = \frac{V_m}{2R} \quad (5)$$

1.2.1.1.2 Voltaje y corriente media

El voltaje medio V_0 para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt \quad (6)$$

Con periodo y voltaje por la resistencia definidos con anterioridad, se tiene que:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin(\omega t) d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} 0 d\omega t \quad (7)$$

$$V_0 = \frac{V_m}{2\pi} \int_0^\pi \sin \omega t d\omega t + 0 \quad (8)$$

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi} \quad (9)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_0 = \frac{V_m}{\pi R} \quad (10)$$

1.2.1.1.3 Tensión inversa máxima

La tensión inversa máxima en la carga corresponde al valor máximo del voltaje al cual se expone el diodo en polarización inversa. En este caso sería $-V_m$.

1.2.1.1.4 Rizado

La ondulación, ripple o rizado, es un índice que expresa la relación entre la tensión continua constante y la alterna. Esta se define en la siguiente relación:

$$r = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_0^2}}{V_0} \quad (11)$$

De lo cual, reemplazando para lo calculado precedentemente, se obtiene que:

$$r = \frac{\sqrt{\pi^2 - 4^2}}{2} \quad (12)$$

1.2.2 Rectificador de media onda – Carga RC

El condensador corresponde a un elemento pasivo dentro de un circuito, el cual tiene como rol principal oponerse a los cambios de campo eléctrico, y por consiguiente, a las variaciones de voltaje. Se puede modelar como una reactancia de valor $\frac{1}{j\omega C}$, donde es posible apreciar que corresponde a una reactancia de alta impedancia y valor complejo negativo, conectada en paralelo. En conclusión, al agregar una carga capacitiva en paralelo a una resistencia en un circuito rectificador, es considerable el aporte de ésta en la reducción del rizado de voltaje y por ende en la obtención de una mejor rectificación.

En la figura 12 se aprecia la configuración de este circuito, con un condensador en paralelo con la resistencia de carga; durante el semiciclo positivo, el condensador se carga y se descarga en la resistencia cuando el voltaje sobre el cátodo sea menor que el valor máximo cargado. Desde ese instante el condensador comienza a descargar, mientras la onda rectificada sigue disminuyendo su valor hasta cerca de cero, momento en el cual el diodo se polariza en inversa y deja de conducir.

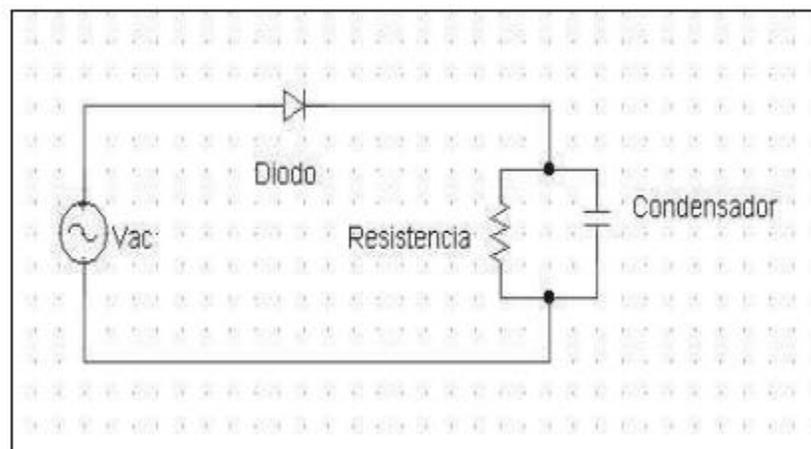


Figura 12. Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga R-C

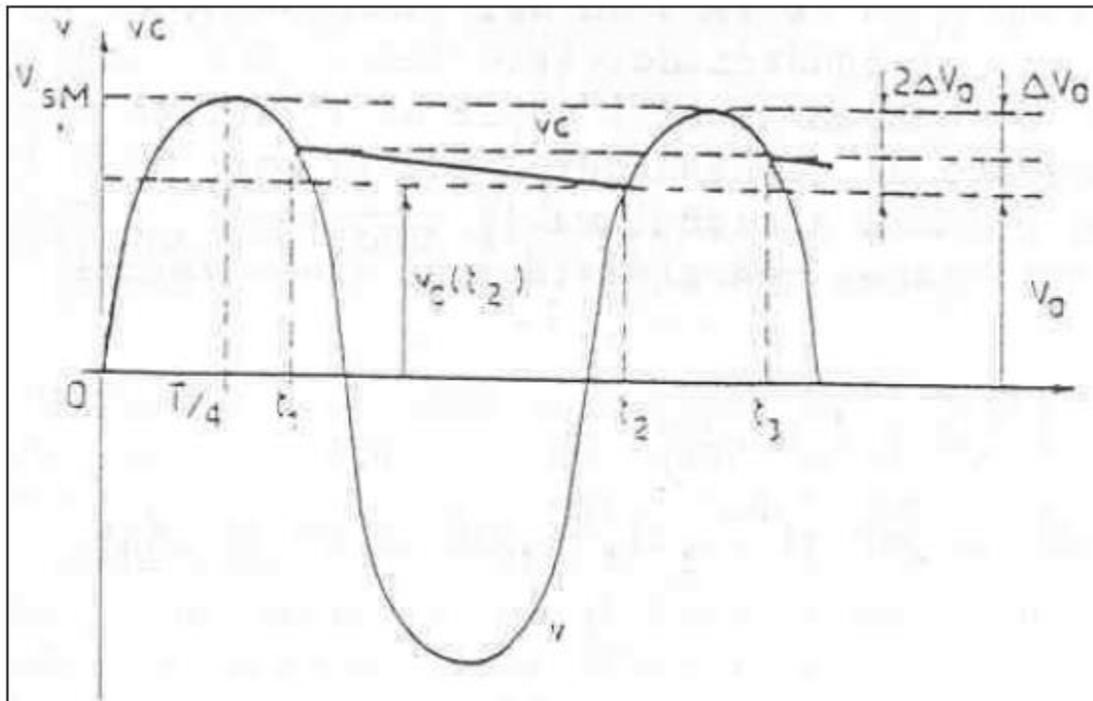


Figura 13. Respuesta de un Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga R-C

La descarga del condensador en este caso continua hasta que el voltaje de salida del rectificador vuelve a sobrepasar el valor de voltaje actual del condensador, instante en el cual comienza nuevamente la carga del condensador y de esta forma el ciclo. Se puede asumir que la descarga del condensador es en forma exponencial, por lo tanto, sería de la forma:

$$V_C = Cte * e^{\frac{t-t_1}{RC}} \quad (13)$$

Un ejemplo de esto se muestra en la figura 13.

El valor de la constante está dado por el voltaje del condensador en el instante que comienza a descargarse. Por lo que el voltaje en el condensador viene dado por:

$$V_C = V_m \sin(\omega t_1) * e^{\frac{t-t_1}{RC}} \quad (14)$$

El condensador se descargará hasta el instante t_2 por lo cual,

$$V_m \sin(\omega t_2) = V_m \sin(\omega t_1) * e^{\frac{t_2 - t_1}{RC}} \quad (15)$$

Suponiendo que $\omega RC \gg 1$, se puede afirmar que $t_2 - t_1 = T$, por lo tanto se podría considerar lineal la descarga y de la forma:

$$V_c(t_2) = V_m \left(1 - \frac{T}{RC}\right) \quad (16)$$

Ahora, el valor medio de la tensión rectificadora se obtiene calculando el promedio de las tensiones de los puntos $T/4$ y $5T/4$:

$$V_0 = \frac{V_m + V_c(t_2)}{2} = V_m - \frac{V_m}{2fRC} = V_m \left(1 - \frac{1}{2fRC}\right) \quad (17)$$

El valor rms del voltaje de salida será muy próximo al valor del voltaje medio, lo que da cuenta de un alto nivel de rectificación en términos de rizado. La tensión inversa máxima que se observa en el diodo es aproximadamente de $2V_m$.

La corriente de salida del recitificador $I_0 = V_0/R = V_m/R$, y el valor máximo de la corriente viene dada por $I_m = V_m/R = V_0/R$.

Finalmente, con los los valores presentados y aplicando la ecuación (11) se obtiene la ondulación en la presente carga:

$$r = \frac{V_m - V_0}{V_0} = \frac{1}{2fRC} \quad (18)$$

1.2.3 Rectificador de media onda – Carga RL

La inductancia corresponde a un elemento pasivo dentro de un circuito, el cual tiene como rol principal oponerse a los cambios de campo magnético, y por consiguiente, a las variaciones de voltaje. Se puede modelar como una reactancia de valor $j\omega L$. En efecto, la inductancia presenta una

reactancia elevada ante el paso de una corriente alterna y una baja resistencia ante el paso de corriente continua; es por esta razón que será posible limitar la ondulación de la tensión de salida.

A continuación, se presenta el circuito rectificador de media onda con carga RL:

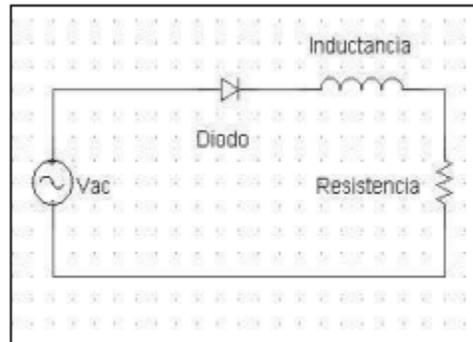


Figura 14. Esquema de un Rectificador Monofásico de Media Onda con Carga R-L

Cuando el diodo conduce se tiene la siguiente relación proveniente de una Ley de Voltajes de Kirchoff:

$$L \frac{de}{dt} + Ri = V_m \sin(\omega t) \quad (19)$$

De esta ecuación es posible deducir que la corriente instantánea que atraviesa la carga es:

$$i(t) = \frac{V_m}{R/\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \left[\sin(\omega\tau - \arctg(\omega\tau)) + \frac{\omega\tau}{R/\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} * e^{\frac{\omega t}{\tau}} \right] \quad (20)$$

Donde integrando se puede obtener la corriente media I_0 y el valor medio de la tensión en la carga viene dado por $V_0 = RI_0$.

1.3 Rectificador monofásico de onda completa

Los rectificadores de onda completa sirven para rectificar una señal de CA y convertirla en una señal CC con un valor medio mayor al obtenido en los rectificadores de media onda.

1.3.1 Rectificador de onda completa – Carga Resistiva

A continuación, se presenta el circuito rectificador de onda completa para carga resistiva y se analiza el estado de conducción de los diodos pertinentes.

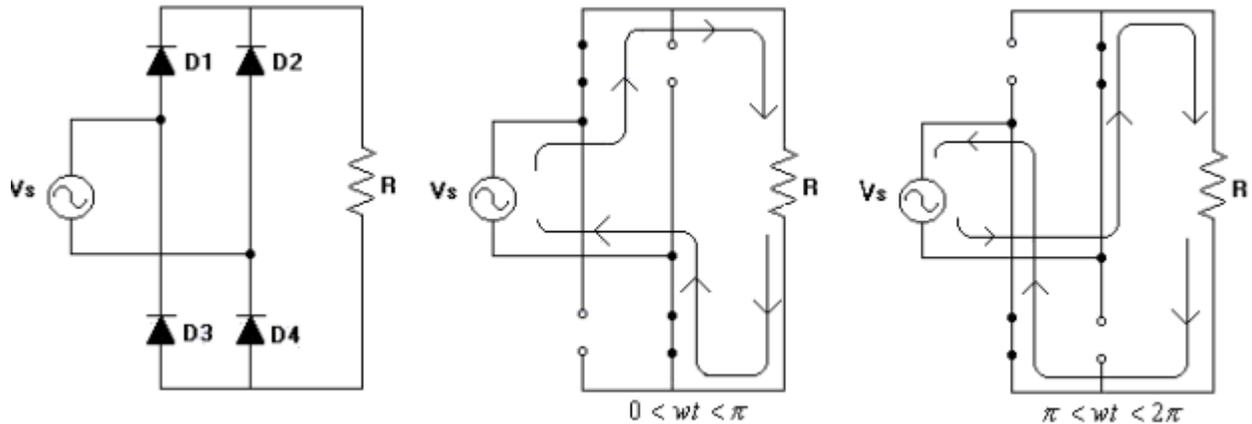


Figura 15. Rectificador de onda completa con carga resistiva.

Analizando el estado de los diodos según el voltaje de polarización que recibe cada uno, vemos que para el semiciclo positivo de la señal de entrada de los diodos D_1 y D_4 quedan en polarización directa, en cambio los diodos D_2 y D_3 están polarizados en forma inversa, así en carga se refleja el voltaje de entrada. Cuando se supera el ángulo π , la fuente cambia su polaridad y todos los diodos cambian de estado, los que conducían entran en estado de bloqueo y viceversa. Así, el voltaje en la carga nuevamente refleja la tensión de la fuente pero con polaridad inversa, la carga no cambia su polaridad ya que siempre la tensión aplicada a ella es positiva.

A continuación se presenta la respuesta de éste rectificador:

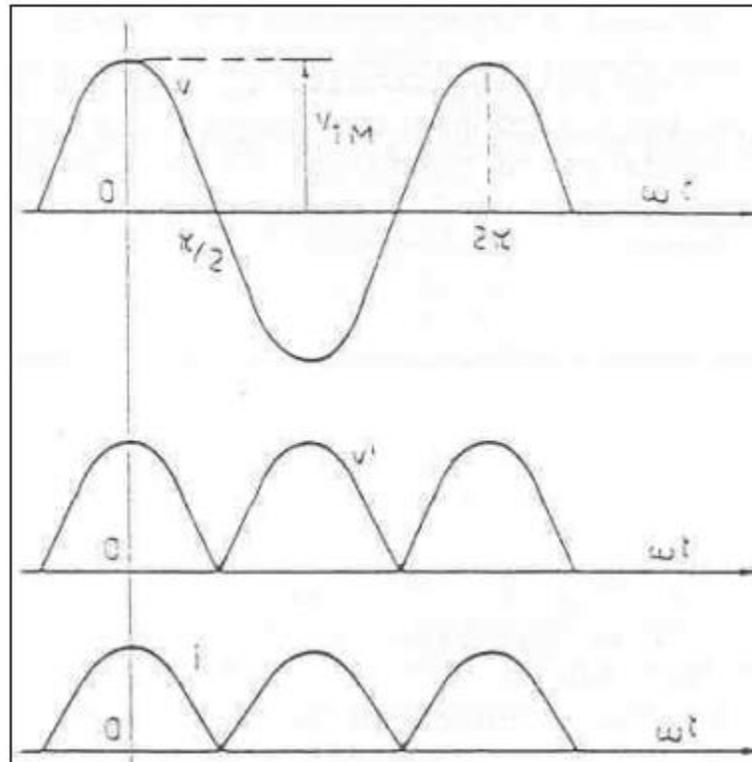


Figura 16. Respuesta de un rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga Resistiva

1.3.1.1 Características esenciales.

Considerando el voltaje de alimentación como una sinusoidal pura de valor $V(t) = V_m \sin(\omega t)$, podemos obtener las siguientes características de interés.

1.3.1.1.1 Voltaje efectivo y corriente efectiva

El voltaje efectivo o RMS, V_{rms} , para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} \quad (21)$$

Donde T corresponde al periodo de la onda igual a π y V_r al voltaje por la resistencia, el cual sigue la siguiente tendencia:

$$V_r = V(t) = V_m |\sin(\omega t)| \quad \forall \omega t$$

De esta manera, el voltaje efectivo viene dado por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (22)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m^2 \sin^2(\omega t) d\omega t = \frac{V_m^2}{\pi} \int_0^\pi \frac{(1 - \cos(2\omega t))}{2} d\omega t \quad (23)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}R} \quad (25)$$

1.3.1.1.2 Voltaje y corriente media

El voltaje medio V_0 para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt \quad (26)$$

Con periodo y voltaje por la resistencia definidos con anterioridad, se tiene que:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (27)$$

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t d\omega t \quad (28)$$

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \quad (29)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_0 = \frac{2V_m}{\pi R} \quad (30)$$

1.3.1.1.3 Tensión inversa máxima

La tensión inversa máxima en la carga corresponde al valor máximo del voltaje al cual se expone el diodo en polarización inversa. En este caso sería $2V_m$.

1.3.1.1.4 Rizado

Reemplazando los valores de voltaje efectivo y medio presentados con anterioridad y reemplazando en la ecuación (11), se obtiene:

$$r = \frac{\sqrt{\pi^2 - 8}}{4} \quad (31)$$

1.3.2 Rectificador de onda completa – Carga RC

Al tener un rectificador de onda completa y una carga modelada como R-C en paralelo, se puede intuir que debido a la ausencia de intervalos grandes de no conducción, el valor del voltaje de rizado disminuirá, lo cual es evidente; además el voltaje medio en la salida aumentará.

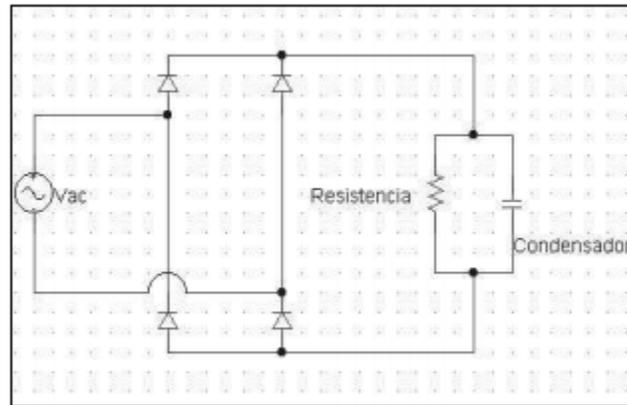


Figura 17. Esquema de un Rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga R-C

Considerando que $\omega RC \gg 1$, la tensión en la carga viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_c(t_2) = V_m \sin(\omega t_2) = V_m(1 - T/2RC)$$

$$t_2 - t_1 = T/2 \quad (32)$$

El valor medio de la tensión en el condensador viene dado por :

$$V_0 = \frac{V_c(t_2) - V_c(t_1)}{2} = \frac{V_m + V_c(t_2)}{2} = V_m - \frac{V_m}{4fRC} \quad (33)$$

Pero como $\omega RC \gg 1$, entonces $V_0 \approx V_m$.

La corriente media de salida se puede calcular como la división entre la tensión media V_0 y la carga R.

La ondulación se define como la variación de la tensión de salida respecto a su valor medio.

$$DV = \frac{V_m - V_c(t_2)}{2} = \frac{V_m}{4fRC} \quad (34)$$

1.3.3 Rectificador de onda completa – Carga RL

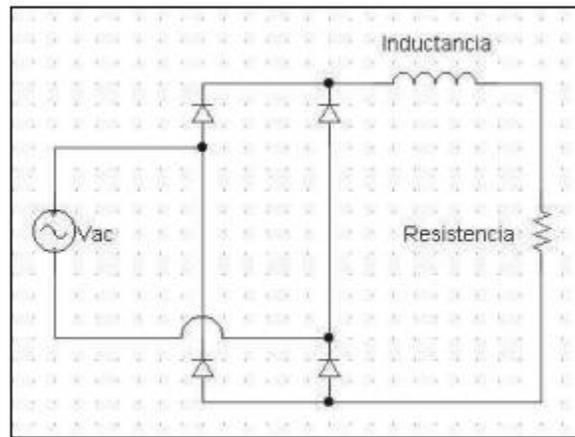


Figura 18. Esquema Rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga R-L

En este caso consideramos que el voltaje que circula por la carga se puede descomponer en los dos términos siguientes:

$$V = V_a + V_o \quad (35)$$

En donde la componente continua está dada por:

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \quad (36)$$

Valor que corresponde al voltaje medio considerando sólo una carga resistiva; ésta aproximación es bastante cercana a la realidad debido a que la resistencia de la inductancia es muy pequeña comparada con la resistencia. Esto de considerar sólo carga resistiva es porque una inductancia bajo corriente continua es sólo un corto circuito. Por lo cual, la corriente continua verá en la carga sólo una resistencia.

V_a representa la componente alterna sobrepuesta a V_o y que está dada por:

$$V_a = \frac{4V_m}{\pi} * \frac{\cos(2\omega t)}{3} \quad (37)$$

Lo mismo es válido para la corriente, que se puede separar en una componente continua,

$$I_0 = V_0/R \quad (38)$$

y una alterna,

$$I_a = \frac{4V_m \cos(2\omega t + \phi)}{\pi R * 3 * \sqrt{1 + (2\omega t)^2}} \quad (39)$$

El valor efectivo de la corriente de salida está dado por la siguiente ecuación, donde I_0 representa el valor medio de la corriente en la carga e I_a representa el valor efectivo de la componente alterna de la corriente:

$$I = \sqrt{I_0^2 - I_a^2} \quad (40)$$

El valor máximo de la corriente por la carga viene dado por la suma de ambas componente

$$I_m = I_0 + I \quad (41)$$

Por lo tanto la componente máxima de voltaje está dada por: $V_m = I_m * R$

La ondulación en este caso se define como la razón entre el valor efectivo de la componente alterna V_a y el valor medio V_0 , con lo cual:

$$V_a/V_0 = \frac{4V_m}{3\pi} * \frac{\pi}{2V_m} = 2/3 \quad (42)$$

1.3.4 Rectificador de onda completa – Carga RLC

En el circuito de la figura 19 se puede apreciar la conexión de una carga R-L-C, en la cual R y C están en paralelo, y L está en serie con ellos. La conexión de la inductancia y del condensador reduce la ondulación de la tensión de salida: la inductancia recude la ondulación residual de la corriente y el condensador filtra la componente alterna de voltaje.

El valor de cada componente se debe elegir de tal forma que en la reactancia del condensador sea inferior a la resistencia y aquella de la inductancia sea mayor a la impedancia del conjunto R-C paralelo.

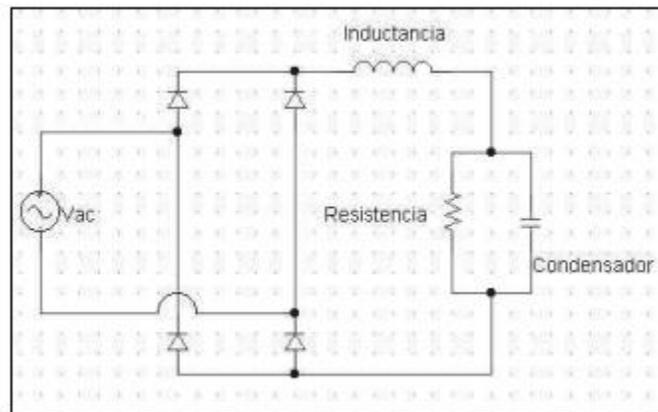


Figura 19. Esquema de un Rectificador Monofásico de Onda Completa con Carga R-L-C

Se considera la corriente que atraviesa por la carga como la suma de una componente continua y una alterna.

La tensión presente en los bornes de la resistencia puede considerarse como constante debido a la presencia del condensador y fijada en un valor aproximado a:

$$V_c = V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \quad (43)$$

El valor de las componentes de la corriente viene dado por:

$$I_0 = \frac{2V_m}{\pi R} \quad \text{e} \quad I_a = \frac{4V_m}{\pi} * \frac{\cos(2\omega t - \pi/2)}{3 * 2\omega L} \quad (44)$$

El valor máximo de la componente alterna está dado por la condición $\cos(\varphi) = 1$.

1.4 Rectificador trifásico de Media Onda

Un punto importante a considerar es que a menudo la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica se realiza a través de sistemas trifásicos, en los cuales las tres fases están “desfasadas” 120° . Los rectificadores trifásicos se pueden emplear para alimentar cargas CC que requieran gran cantidad de potencia. La red trifásica tiene ventajas en cuanto a términos de robustez y capacidad de entregar energía, sumado a que ésta configuración mejora el valor medio obtenido en la carga, ya que con una mayor cantidad de pulsos, el rizado en la salida del rectificador es inferior al rectificador monofásico.

1.4.1 Rectificador trifásico de media onda – Carga resistiva

Para comenzar analizaremos el rectificador trifásico de media onda. Al igual que en el caso monofásico este rectificador presenta un diodo para cada fuente y la corriente que circula por ella tiene una componente CC indeseada.

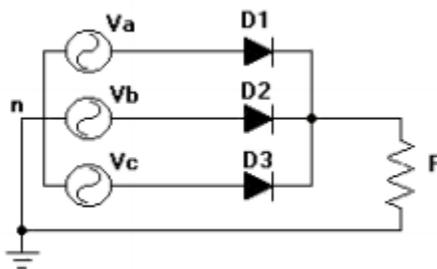


Figura 20. Esquema rectificador trifásico de media onda con carga resistiva

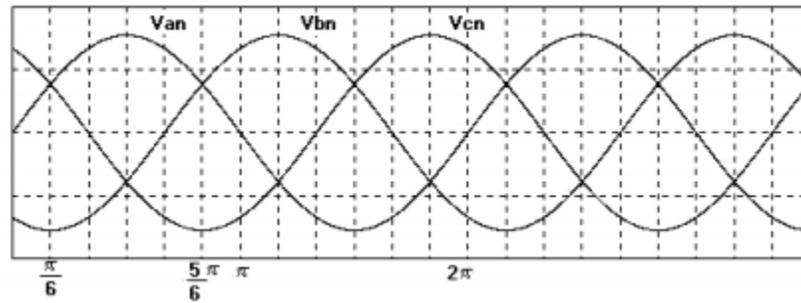


Figura 21. Alimentación trifásica

Se puede apreciar que cuando la fuente V_a tiene una magnitud mayor al resto de las fuentes, polariza directo al diodo D_1 , quedando los diodos D_2 y D_3 en estado de bloqueo. De la figura 21 se observa que en 150° el voltaje de la fuente V_b pasa a ser mayor que V_a , entrando en conducción el diodo D_2 , así sucesivamente en la carga siempre se refleja el voltaje de cada fuente entre fase y neutro.

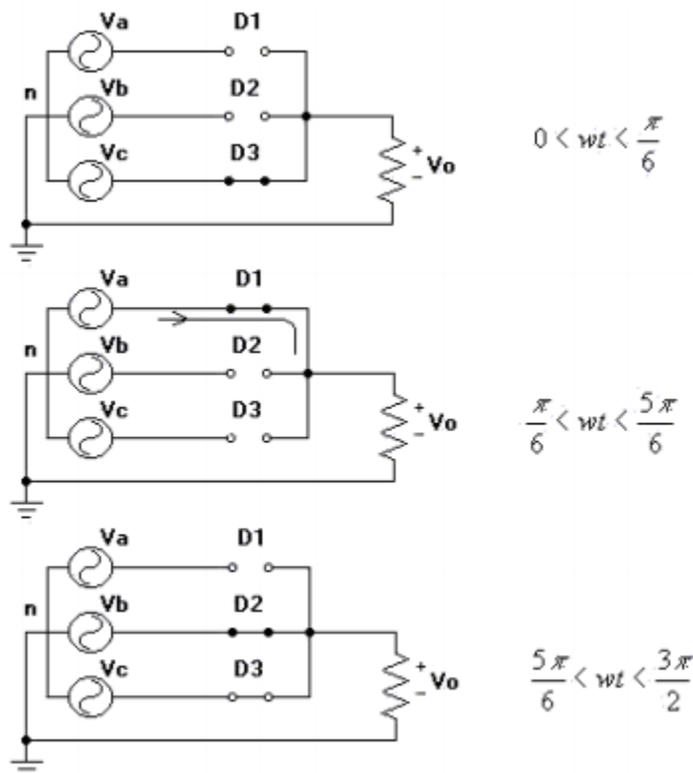


Figura 22. Análisis de conducción de cada diodo en el circuito rectificador trifásico de media onda.

La forma de onda obtenida en la carga se muestra a continuación:

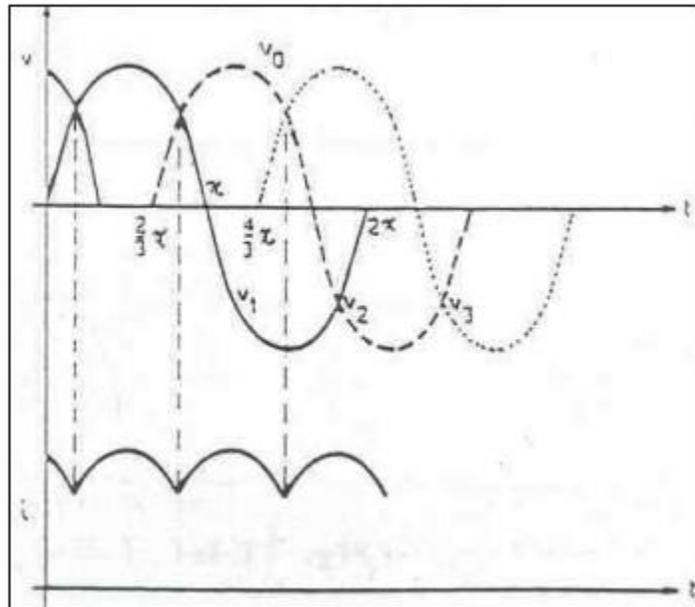


Figura 23. Esquema de Respuesta de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga Resistiva

1.4.1.1 Características esenciales.

1.4.1.1.1 Voltaje efectivo y corriente efectiva

El voltaje efectivo o RMS, V_{rms} , para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} \quad (45)$$

Donde T corresponde al periodo de la onda igual a $2\pi/3$ y V_r al voltaje por la resistencia, el cual sigue la siguiente tendencia:

$$V_r = V(t) = V_m |\sin(\omega t)| \quad \forall \omega t \frac{n\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5n\pi}{6}$$

Con n un número natural mayor o igual a 1.

De esta manera, el voltaje efectivo viene dado por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (46)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m^2 \sin^2(\omega t) d\omega t = \frac{3V_m^2}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \frac{(1 - \cos(2\omega t))}{2} d\omega t \quad (47)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{3V_m^2}{2\pi} \left(\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right)_{\pi/6}^{5\pi/6} \quad (48)$$

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\left[4\pi/6 + \left(\cos\left(\frac{5\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) \right]} \quad (49)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{3}V_m}{2R\sqrt{\pi}} \sqrt{\left[4\pi/6 + \left(\cos\left(\frac{5\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) \right]} \quad (50)$$

1.4.1.1.2 Voltaje y corriente media

El voltaje medio V_0 para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt \quad (51)$$

Con periodo y voltaje por la resistencia definidos con anterioridad, se tiene que:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \sin \omega t d\omega t \quad (52)$$

$$V_0 = \frac{3V_m}{2\pi} (-\cos(\omega t)) \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \quad (53)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_0 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi R} \quad (54)$$

1.4.1.1.3 Tensión inversa máxima

La tensión inversa máxima en la carga corresponde al valor máximo del voltaje al cual se expone el diodo en polarización inversa. En este caso sería $\sqrt{3}V_m$.

1.4.1.1.4 Rizado

Es posible calcular el rizado reemplazando los valores efectivos y medios calculados en la ecuación (11)

1.4.2 Rectificador trifásico de medio onda – Carga RC

El esquema de este rectificador se muestra en la figura 24; el funcionamiento de éste es similar al de un rectificador monofásico de onda completa con carga R-C y se observa en la figura 25.

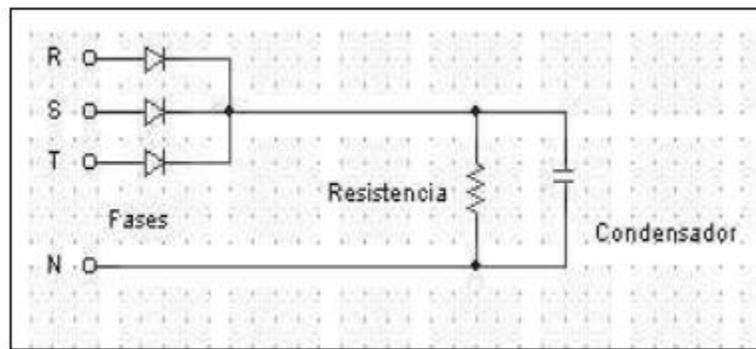


Figura 24. Esquema de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-C

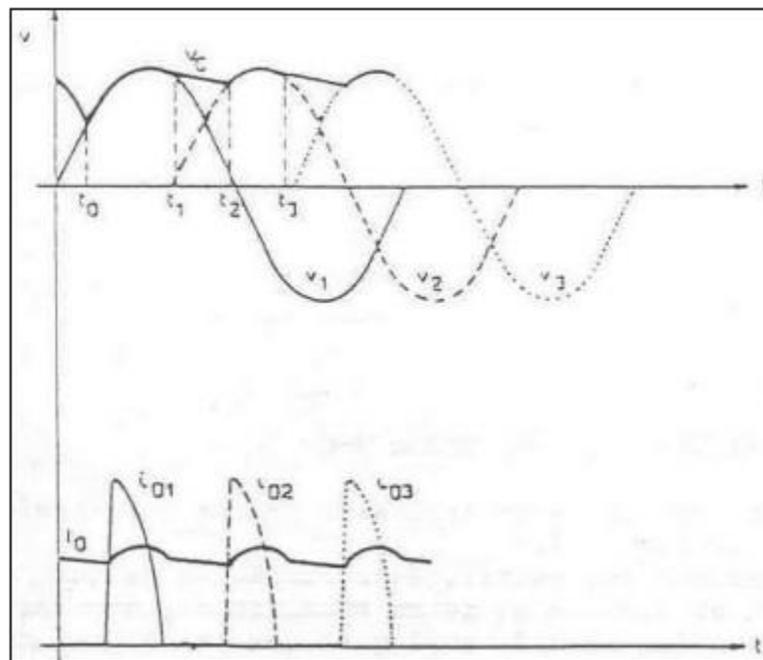


Figura 25. Respuesta de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-C

El valor de la tensión continua de salida se determina calculando el valor medio de la tensión del condensador.

$$V_0 = \frac{V_m - V_m(1 - T/3RC)}{2} \tag{55}$$

En lo que respecta a la corriente de salida, esta viene dada por

$$I_0 = V_0/R \quad (56)$$

La ondulación máxima viene dada por

$$r = \frac{V_m - V_0}{V_0} \quad (57)$$

1.4.3 Rectificador trifásico de medio onda – Carga RL

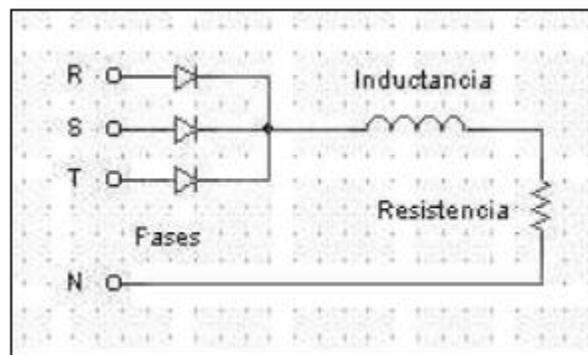


Figura 26. Esquema de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-L.

La tensión que está presente en los extremos de la carga se puede descomponer en un término continuo, dado por el valor medio y uno alterno, correspondiente a la variación en torno a este valor continuo.

La componente continua está dada por:

$$V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \quad (58)$$

Mientras que la componente alterna está dada por:

$$V_a = \frac{\sqrt{2}V_m}{4} * \frac{\cos(2\omega t)}{\sqrt{3}} \quad (59)$$

De forma análoga se puede definir para la corriente, siendo la componente continua,

$$I_0 = V_0/R = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi R} \quad (60)$$

Y en la alterna, su valor efectivo viene dado por

$$I_a = I_{am}/\sqrt{2} \quad (61)$$

Donde I_{am} es el valor máximo de $I_a = f(v_a, t)$.

Y su valor efectivo total viene dado por,

$$I = \sqrt{I_0^2 - I_a^2} \quad (62)$$

El valor máximo de la corriente viene dado por la suma del máximo de la componente alterna y continua. Y por último, la ondulación está dada por:

$$r = \frac{V_m - V_0}{V_0} \quad (63)$$

1.4.4 Rectificador trifásico de medio onda – Carga RLC

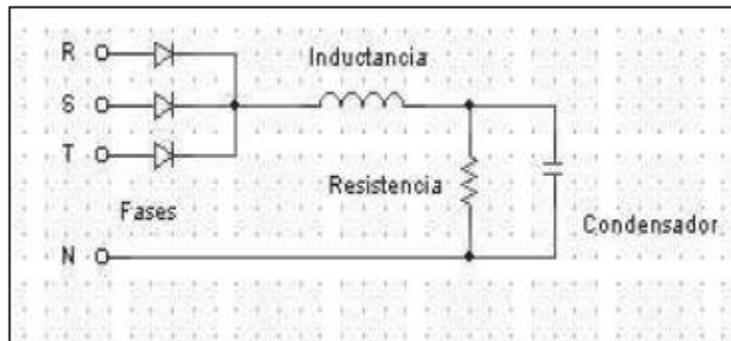


Figura 27. Esquema de un Rectificador Trifásico de Media Onda con Carga R-L-C

Igual que en el caso monofásico, la inductancia reduce la ondulación residual de la corriente, mientras que el condensador filtra la componente alterna de la tensión. Se puede observar que la tensión en la carga permanece casi constante debido a la presencia del condensador que la mantiene en un valor fijo.

$$V_c = V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \quad (64)$$

Por lo que la componente continua de la corriente viene dada por:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi R} \quad (65)$$

Con respecto a las demás características, su análisis matemático se hace bastante complejo por lo que se prefiere optar por el análisis sólo experimental.

1.5 Rectificador trifásico de Onda Completa

El rectificador trifásico de onda completa o rectificador tipo puente Graetz, es un rectificador trifásico de seis pulsos, su funcionamiento es análogo al monofásico de onda completa estudiado con anterioridad, ya que se utilizan ambas polarizades de la señal alterna a rectificar, aunque ahora se trate de una red trifásica. La ventaja de esta configuración consiste en un voltaje de salida con un valor medio elevado, bajo rizado y corriente alterna en la entrada del rectificador.

1.5.1 Rectificador trifásico de onda completa– Carga resistiva

A continuación, se presenta el diagrama del rectificador y la onda de alimentación.

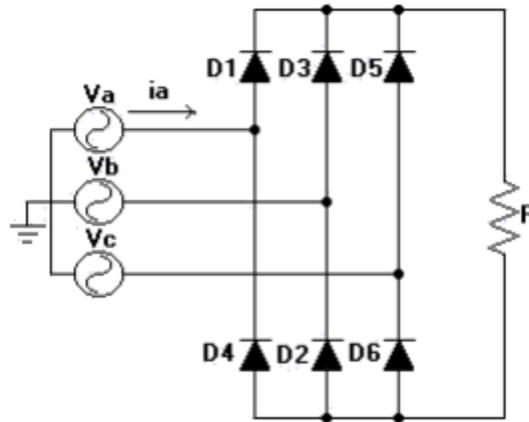


Figura 28. Esquema de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga Resistiva.

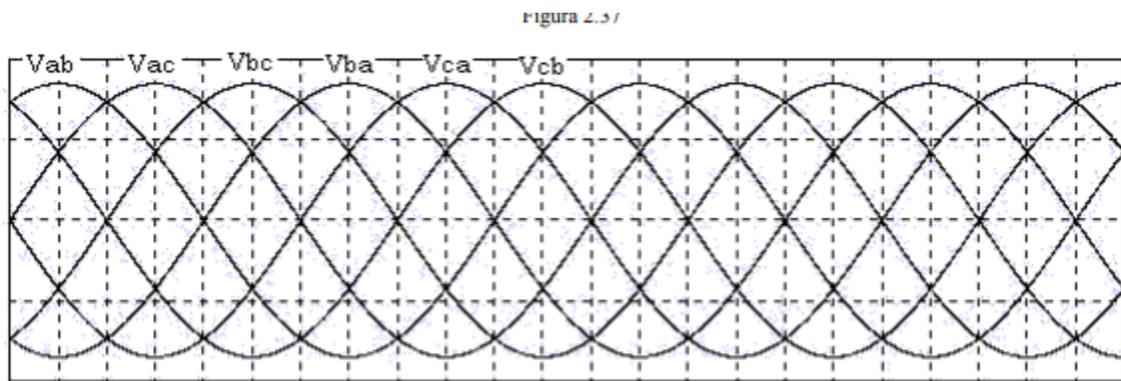


Figura 29. Alimentación trifásica circuito recitificador de Onda Completa.

Con esta configuración, el voltaje que se refleja en la carga será el de la fuente de voltaje que posee mayor magnitud, sea positiva o negativa, la fuente de mayor magnitud polarizará sus diodos correspondientes para formar una trayectoria cerrada.

En la figura 29 se han graficado las tensiones de línea, tanto para los valores positivos y negativos de la señal, así se visualiza de forma más convincente que el voltaje de salida del rectificador es la tensión entre líneas de la red.

A continuación, se procede a realizar un análisis de la conmutación en los diodos.

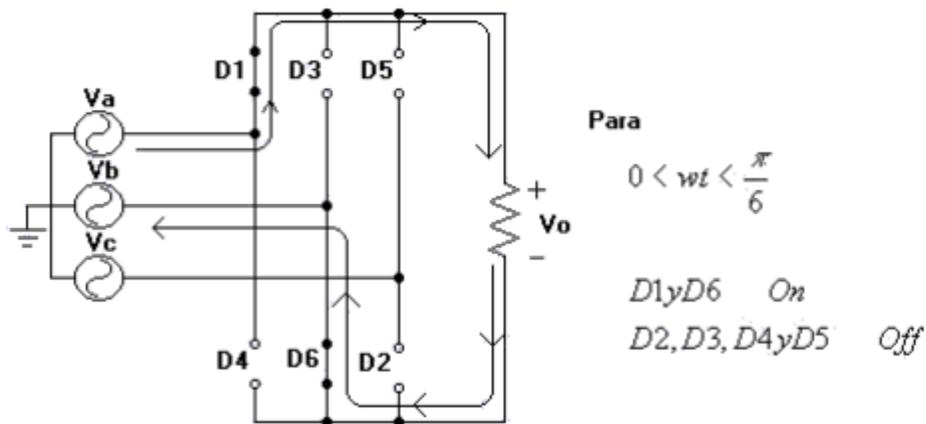


Figura 30. Análisis de conmutación en los diodos

El diodo D_1 conduce ya que es polarizado por la fuente V_a , en la carga llega un voltaje de líneas entre la fuente V_a y V_c . Dado que la fuente V_b es “más negativa” que la fuente V_c , el retorno de la corriente será por el diodo D_6 .

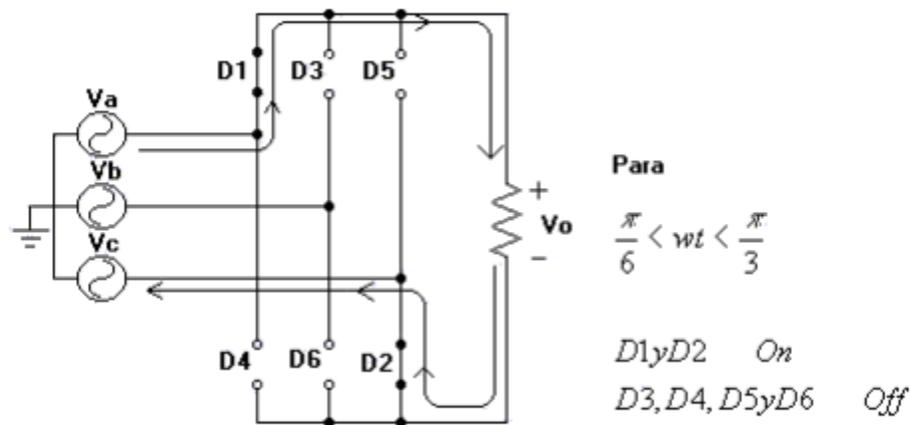


Figura 31. Análisis de conmutación en los diodos

El diodo D_1 sigue conduciendo ya que V_a sigue siendo mayor en magnitud, el retorno de la corriente es a través del diodo D_2 , ya que ahora la magnitud de la fuente V_c es “más negativa” que V_b . La siguiente tabla muestra el estado de cada diodo para los distintos ángulos de la señal de corriente alterna.

Tabla 1. Análisis de conmutación de los diodos

Intervalo en grados	D1	D2	D3	D4	D5	D6
$0 < \omega t < 30$	On	Off	Off	Off	Off	On
$30 < \omega t < 60$	On	On	Off	Off	Off	Off
$60 < \omega t < 90$	Off	On	On	Off	Off	Off
$90 < \omega t < 120$	Off	Off	On	On	Off	Off
$120 < \omega t < 150$	Off	Off	Off	On	On	Off
$150 < \omega t < 180$	Off	Off	Off	Off	On	On
$180 < \omega t < 210$	On	Off	Off	Off	Off	On
$210 < \omega t < 240$	On	On	Off	Off	Off	Off
$240 < \omega t < 270$	Off	On	On	Off	Off	Off
$270 < \omega t < 300$	Off	Off	On	On	Off	Off
$300 < \omega t < 330$	Off	Off	Off	On	On	Off
$330 < \omega t < 360$	Off	Off	Off	Off	On	On

Una observación importante en este rectificador es que no se deben entrar en modo de conducción los dos diodos de una misma rama del puente, ya que se presentaría un cortocircuito, anulando la tensión en la carga. Si además de esta condición existe otro diodo que entre en conducción, el cortocircuito afectará a la red de alimentación.

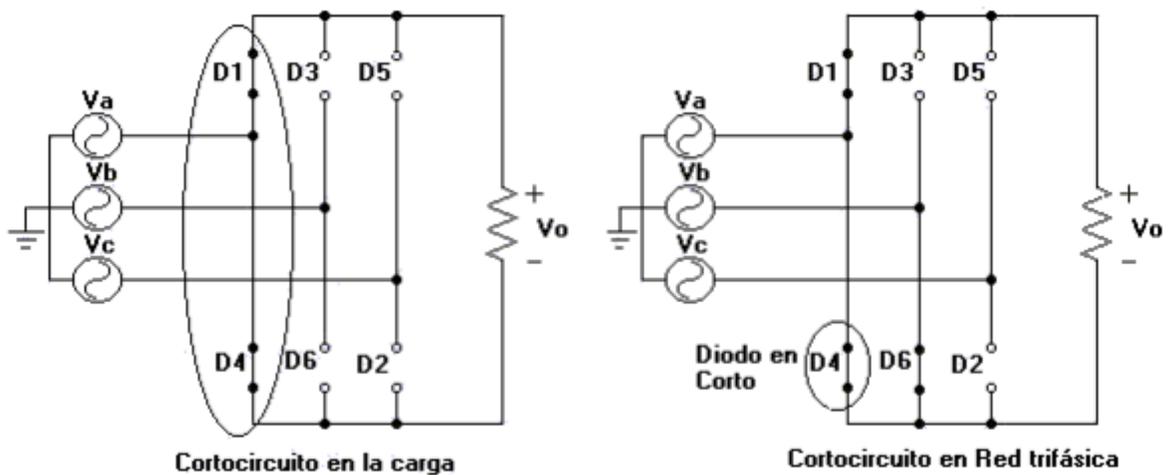


Figura 32. Cortocircuito en rectificador trifásico de onda completa

La tensión en la carga corresponde al voltaje entre líneas de la entrada entre 60° y 120° con un periodo de $T/6$, siendo T el periodo de la señal alterna de entrada.

En la siguiente imagen, se presenta la respuesta de este circuito.

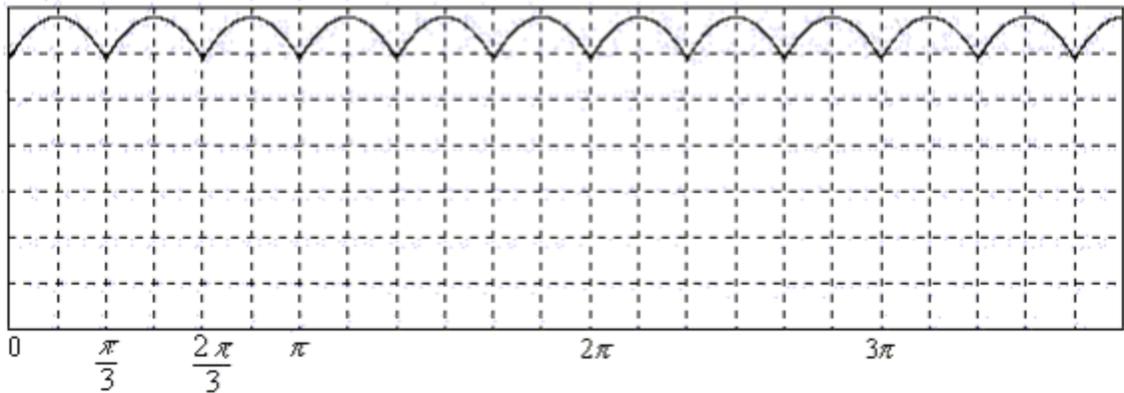


Figura 33. Respuesta de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga Resistiva.

1.5.1.1 Características esenciales.

1.5.1.1.1 Voltaje efectivo y corriente efectiva

El voltaje efectivo o RMS, V_{rms} , para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt}$$

Donde T corresponde al periodo de la onda igual a $\pi/3$, los límites de integración serán $\pi/3$ y $2\pi/3$ y V_r el voltaje por la resistencia, el cual sigue la siguiente tendencia:

$$V_r = V(t) = V_m |\sin(\omega t)| \quad \forall \omega t$$

De esta manera, el voltaje efectivo viene dado por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_r^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (66)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m^2 \sin(\omega t)^2 d\omega t = \frac{3V_m^2}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \frac{(1 - \cos(2\omega t))}{2} d\omega t \quad (67)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{3V_m^2}{\pi} \left(\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right)_{\pi/3}^{2\pi/3} \quad (68)$$

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{3}V_m}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{4} (\sin(2\pi/3) - \sin(4\pi/3)) \right)} \quad (69)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{3}V_m}{R\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{4} (\sin(2\pi/3) - \sin(4\pi/3)) \right)} \quad (70)$$

1.5.1.1.2 Voltaje y corriente media

El voltaje medio V_0 para la salida del presente circuito rectificador, es calculado como sigue:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt$$

Con periodo y voltaje por la resistencia definidos con anterioridad, se tiene que:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_r dt = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (71)$$

$$V_0 = \frac{3V_m}{\pi} \left(-\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (72)$$

Por consiguiente, aplicando ley de ohm, la corriente efectiva viene dada por:

$$I_0 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R} \quad (73)$$

1.5.1.1.3 Rizado

La ondulación máxima viene dada por:

$$r = \frac{V_m - V_0}{V_0} \quad (74)$$

1.5.2 Rectificador de onda completa – Carga RC

El modelo de este tipo de rectificador es idéntico al anterior pero introduciendo un condensador en paralelo con la resistencia. En la figura 34 se muestra la evolución de la tensión de salida.

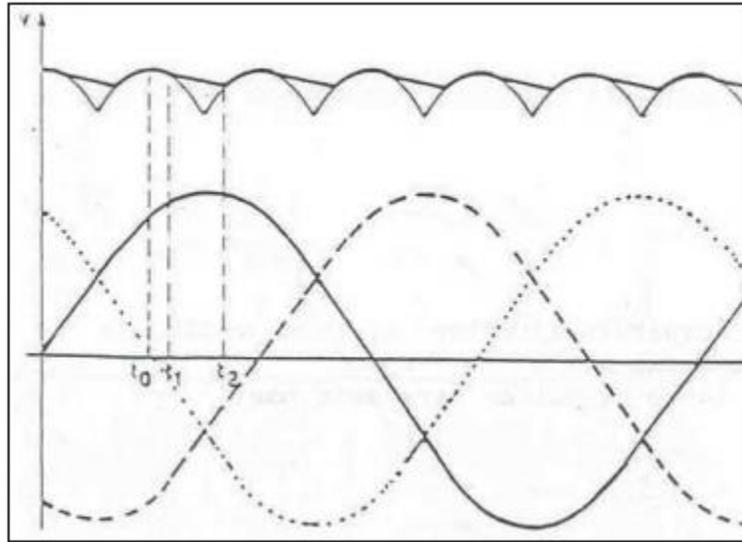


Figura 34. Esquema de Respuesta Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga R-C.

$$V_0(t_2) = V_{am} \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{RC} \right) = V_{am} \left(1 - \frac{1}{6fRC} \right) \quad (75)$$

$$V_0 = \frac{V_{am} + V_0(t_2)}{2} = V_{am} - \frac{V_{am}}{12fRC} \quad (76)$$

La tensión efectiva se puede calcular como se ha realizado en el presente apunte y la tensión máxima puede deducirse de las relaciones conocidas. La corriente máxima está dada por:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (77)$$

La tensión inversa máxima de los diodos la proporciona el valor de pico a pico de la tensión de cada fase. Y la ondulación está dada por:

$$r = \frac{V_m - V_0}{V_0} = \frac{1}{12fRC} \quad (78)$$

1.5.3 Rectificador de onda completa – Carga RL

Para el funcionamiento de esta carga se puede observar el esquema de la figura 35.

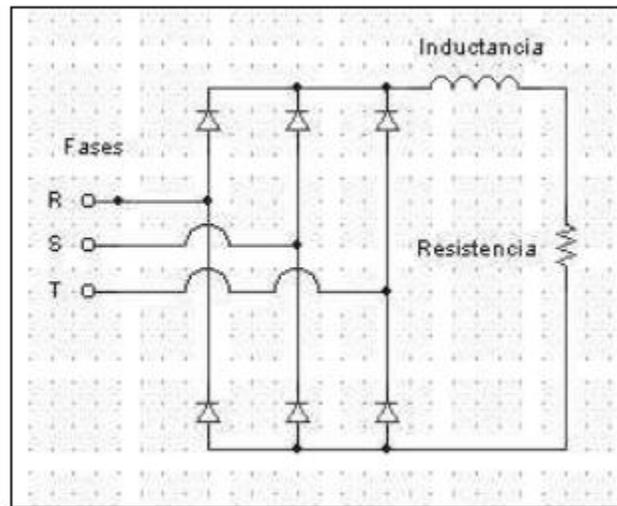


Figura 35. Esquema de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga R-L.

Descompondremos la tensión considerando una componente continua y una alterna.

$$V = V_a + V_0$$

Donde V_0 corresponde al valor continuo de la tensión en la resistencia y dada por

$$V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (79)$$

Y V_a la componente alterna dada por

$$V_a = \frac{\sqrt{2}V_m}{4} * \frac{\cos(2\omega t)}{\sqrt{3}} \quad (80)$$

Y de la misma forma se tiene una componente continua y alterna de la corriente,

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad e \quad I_a = f(V_a, t) \quad (81)$$

Por lo tanto el valor efectivo será

$$I = \sqrt{I_0^2 - I_{aeff}^2} \quad (82)$$

En donde I_{aeff} es el valor efectivo de la componente alterna I_a .

Y la ondulación máxima será:

$$r = \frac{V_m - V_0}{V_0} \quad (83)$$

1.5.4 Rectificador de onda completa – Carga RLC

El esquema general se muestra en la figura 36, y su evolución es muy similar al rectificador de media onda con carga RLC. En este también se puede considerar que hay una componente continua y una alterna.

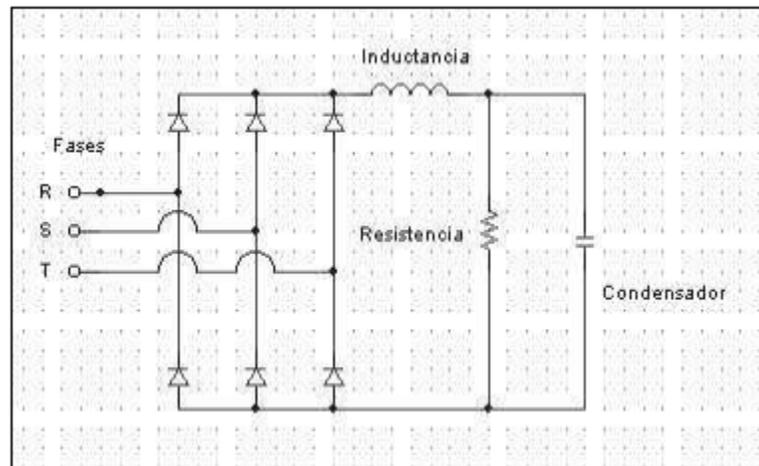


Figura 36. Esquema de un Rectificador Trifásico de Onda Completa con Carga R-L-C.

Por otro lado la tensión en la resistencia permanece casi constante debido al condensador y con un valor igual a

$$V_c = V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \quad (84)$$

Y el valor de la corriente en su componente continua está dada por:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi R} \quad (85)$$