

## Capítulo 3

# Convertidores CA/CC - Rectificadores

### 3.1 Introducción

Este apartado se inicia con una revisión de algunos conceptos básicos de los rectificadores. La distribución de energía eléctrica se hace, esencialmente, en corriente alterna, debido, principalmente, a la facilidad de adaptación del nivel de tensión por medio de transformadores.

Sin embargo, en muchas aplicaciones, la carga alimentada requiere una tensión continua. La conversión CA/CC es realizada por convertidores estáticos de energía, comúnmente denominados *rectificadores*. Por tanto, un rectificador es un sistema electrónico de potencia cuya función es convertir una tensión alterna en una tensión continua.

En una primera clasificación, podemos diferenciar los rectificadores de acuerdo con el número de fases de la tensión alterna de entrada (monofásico, bifásico, trifásico, hexafásico, etc.). Dentro de estos, podemos diferenciar los rectificadores en función del tipo de conexión de los elementos (media onda y de onda completa). Otra posible clasificación es según su capacidad de ajustar el valor de la tensión de salida, ello depende de si se emplean diodos o tiristores. Los rectificadores no controlados son aquellos que utilizan diodos como elementos de rectificación, en cuanto que los controlados utilizan tiristores o transistores.

### 3.2 Rectificadores no controlados

A la hora de llevar a cabo la rectificación, se han de utilizar elementos electrónicos que permitan el paso de la corriente en un sentido, permaneciendo bloqueado cuando se le aplique una tensión de polaridad inapropiada. Para ello, en los rectificadores no controlados, como ya se ha comentado, el componente más adecuado y utilizado es el diodo semiconductor.

Como se comentó en el capítulo dedicado a los dispositivos de electrónica de potencia, el diodo es un dispositivo semiconductor de dos terminales, ánodo y cátodo, que dejará pasar la corriente cuando el ánodo sea positivo respecto al cátodo, y no conducirá cuando la tensión

aplicada a sus extremos sea la contraria. Ello conlleva a que el diodo sea un componente adecuado para ser utilizado, solo o con otros diodos, como rectificador.

En estado de bloqueo, la corriente que circula por un diodo recibe el nombre de corriente de fugas y es prácticamente nula.

También se ha de tener en cuenta, además de la tensión directa (en conducción)  $V_F$ , la tensión inversa que soporta el diodo  $V_R$ .

### 3.2.1 Rectificador monofásico de media onda

Es el rectificador más sencillo que existe, y en consecuencia el más barato. Simplemente es necesario un diodo entre la alimentación de alterna y la carga, tal y como se muestra en la figura 3.2. Podría existir un transformador si se desea aislamiento galvánico entre la red eléctrica y la carga. Este circuito sólo rectifica la mitad de la tensión de entrada; o sea, cuando el ánodo es positivo con respecto al cátodo. Podemos considerarlo como un circuito en el que la unidad rectificadora está en serie con la tensión de entrada y la carga. Si modelamos la carga por una resistencia, el análisis es muy sencillo. El diodo conducirá si la tensión de entrada  $V_s$  es positiva. En ese caso, la tensión que verá la carga ( $V_o$ ), será aproximadamente la tensión de entrada, siempre y cuando despreciemos la caída de tensión del diodo en estado de conducción. Si la tensión de entrada es negativa, el diodo no puede conducir dado que ve una tensión ánodo cátodo negativa. La carga ve una tensión nula entre sus bornes, dado que no hay circulación de corriente.

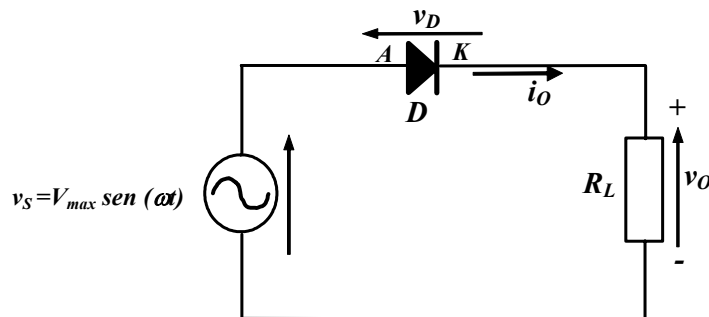


Figura 3.2. Rectificador monofásico de media onda (medio puente) con carga resistiva

La figura 3.3 muestra las formas de onda con carga resistiva para un rectificador monofásico con topología de media onda, también denominado de medio puente. El funcionamiento consiste en tomar de la red una señal sinusoidal de valor medio nulo, y proporcionar a la carga, gracias al diodo, una forma de onda unidireccional, pero no constante como se puede apreciar en la figura 3.3. El nombre de rectificador proviene del hecho de que se rectifica la onda y queda la salida siempre positiva o nula. Nótese que se rectifica simplemente media onda de la senoide completa, de ahí el nombre de rectificador de media onda. Obsérvese también que no se tiene control externo sobre el semiconductor de potencia, de ahí el nombre de rectificador no controlado.

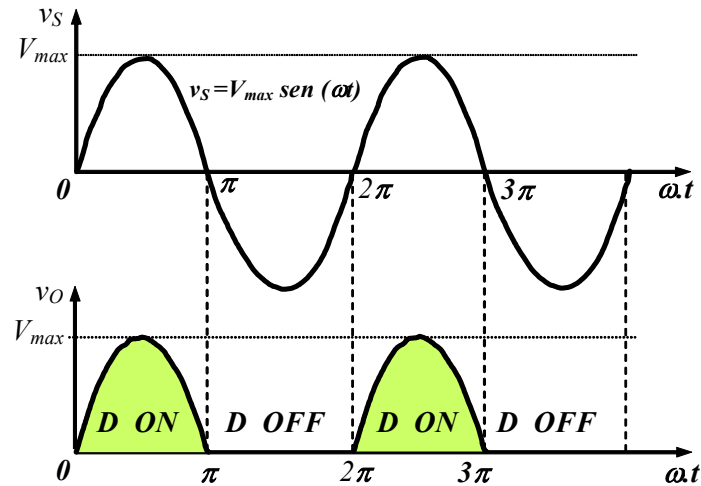


Figura 3.3. Formas de onda (carga resistiva) del rectificador monofásico no controlado, media onda.

Según sea la amplitud de la tensión de alimentación, tendremos un determinado nivel de tensión continua a la salida.

$$v_o = V_{\max} \text{sen} \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq \pi$$

$$v_o = 0 \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi$$

**Tensión media en la carga:** Este valor nos determina la componente continua de la tensión en la carga. Lo obtenemos calculando el promedio del voltaje de salida del rectificador:

$$V_{O_{dc}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \text{sen} \omega t d\omega t = \frac{V_{\max}}{\pi} = 0,318 V_{\max}$$

Obsérvese que tendremos una componente continua del orden del 30% del valor de pico.

**Tensión eficaz en la carga:**

$$V_{O_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_{\max} \text{sen} \omega t d\omega t)^2 d\omega t} = \frac{V_{\max}}{2}$$

Con carga resistiva las formas de onda de tensión y de corriente en la salida del rectificador y en la carga son las mismas, como se muestra en la figura 3.3. La corriente de entrada presenta la misma forma y fase que la tensión de salida.

**Valor medio de la corriente en la carga:**

$$I_{O_{dc}} = \frac{I_{\max}}{\pi}$$

**Valor eficaz de la corriente en la carga:**

$$I_{O_{rms}} = \frac{I_{\max}}{2}$$

Sabiendo que:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R_L}$$

Los valores de  $I_{O_{dc}}$  e  $I_{\max}$  deberán tenerse en cuenta a la hora de elegir un diodo semiconductor para el rectificador.

**Potencia media en la carga:**

$$P_{O_{dc}} = \frac{(V_{dc})^2}{R_L} = \frac{(0,318V_{\max})^2}{R_L}$$

**Potencia eficaz en la carga:**

$$P_{O_{ac}} = \frac{(V_{Orms})^2}{R_L} = \frac{(0,5 \cdot V_{\max})^2}{R_L}$$

**Rendimiento:**

$$\eta = \frac{P_{O_{dc}}}{P_{O_{ac}}} = \frac{\frac{(V_{Odc})^2}{R_L}}{\frac{(V_{Orms})^2}{R_L}} = \frac{(0,318 \cdot V_{\max})^2}{(0,5 \cdot V_{\max})^2} = \frac{0,101}{0,25} = 0,404 \rightarrow (40,4\%)$$

### 3.2.2 Rectificador con transformador de toma media

En este caso, para rectificar la onda completa, se utilizan 2 diodos, en una configuración denominada rectificador con transformador en toma media. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran el circuito y las formas de onda, respectivamente.

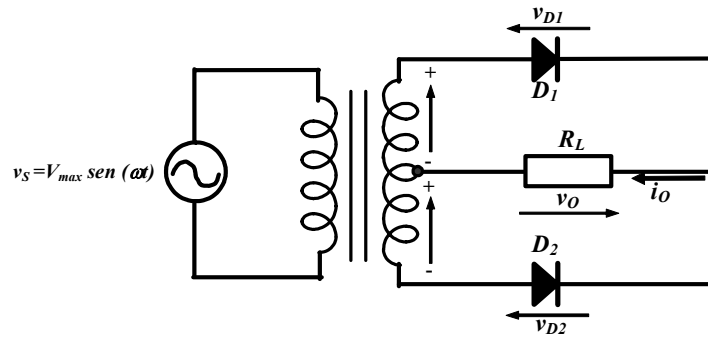


Figura 3.4. Rectificador monofásico con transformador de toma media y carga resistiva

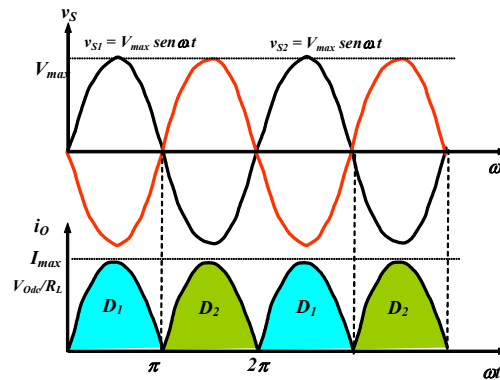


Figura 3.5. Formas de onda del rectificador monofásico no controlado, onda completa

El transformador con toma media será el encargado de proporcionarnos dos tensiones ( $v_{S1}$  y  $v_{S2}$ ), de igual magnitud y con un desfase entre ellas de  $180^\circ$ .

### Tensión media en la carga:

$$V_{Odc} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{\max} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{2V_{\max}}{\pi} = 0,636V_{\max}$$

### Tensión eficaz en la carga:

$$V_{Orms} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (V_{\max} \sin \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707V_{\max}$$

### Corriente en los diodos:

$$I_{Odc(D_1)} = I_{Odc(D_2)} = \frac{I_{\max}}{\pi}$$

$$I_{Orms(D_1)} = I_{Orms(D_2)} = \frac{I_{\max}}{2\sqrt{2}}$$

**Potencia aparente en el secundario (S):**

$$S = 2 \cdot V_S \cdot I_S = (2) \cdot (0,707) \cdot V_{\max} \cdot \frac{V_{\max}}{2R_L}$$

**Potencia media en la carga:**

$$P_{O_{dc}} = \frac{(0,636V_{\max})^2}{R_L}$$

**Potencia eficaz en la carga:**

$$P_{O_{ac}} = \frac{(0,707V_{\max})^2}{R_L}$$

**Rendimiento:**

$$\eta = \frac{(0,636V_{\max})^2 / R_L}{(0,707V_{\max})^2 / R_L} = 0,81 \rightarrow (81\%)$$

Después de este análisis hemos podido observar que el rendimiento de este tipo de transformador es el doble del monofásico de media onda, lo cual, unido a la duplicación de la intensidad media, y a la notable reducción del rizado, implica una clara mejora.

Cabe destacar que si consideramos que el rectificador está conectado a la red eléctrica doméstica de 50 períodos, la tensión de salida del rectificador en onda completa presenta un rizado de 100Hz, frente a los 50Hz que aparecen en un rectificador de media onda. En electrónica de potencia, estos rectificadores se suelen utilizar frecuentemente en etapas donde la frecuencia de entrada es elevada, puesto que en éste caso se consigue reducir el tamaño del transformador.

Si hubiera que destacar un inconveniente en la topología del rectificador con transformador en toma media, éste sería el hecho de que los diodos deben soportar una tensión inversa doble al que soportaban para el rectificador de media onda.

**3.2.3 Rectificador en puente**

En este caso, para rectificar la onda completa, se utilizan 4 diodos, en una configuración denominada puente completo o puente de Graetz. Recibe el nombre de puente rectificador, por estar formado por cuatro diodos conectados en puente y su principal ventaja respecto al rectificador de onda completa con toma media es que no necesita transformador.

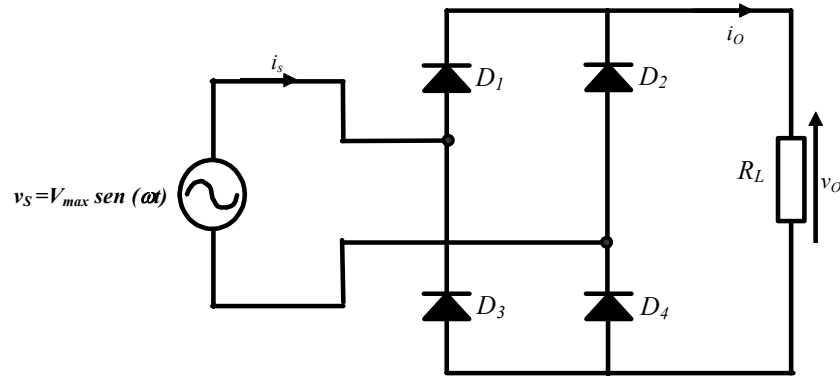


Figura 3.6. Puente rectificador monofásico no controlado de onda completa.

Nótese que en este caso, conducen siempre dos diodos simultáneamente. Si la tensión en la entrada del rectificador es positiva (semiciclo positivo), conducirán  $D_1$  y  $D_4$  mientras que  $D_2$  y  $D_3$  estarán polarizados inversamente y, por tanto, estarán bloqueados (OFF). Si por el contrario, la tensión es negativa (semiciclo negativo), conducirán  $D_2$  y  $D_4$ . En general, para saber qué diodo puede conducir hay que analizar cual de los cuatro tiene mayor tensión en su ánodo y cual de ellos tiene menos tensión en su cátodo. La figura 3.7 muestra las formas de onda del rectificador en puente completo con carga resistiva.

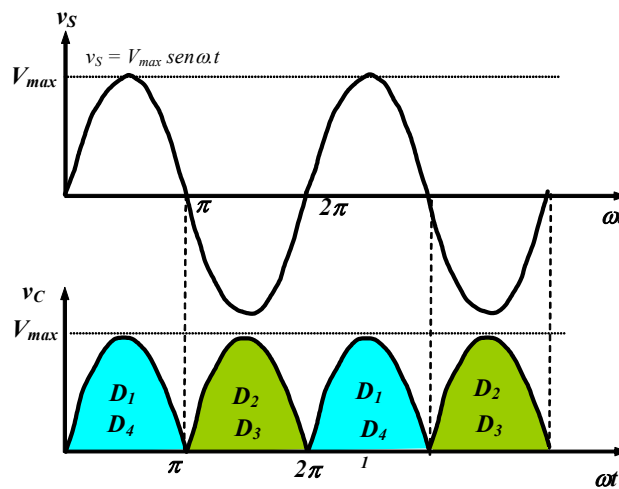


Figura 3.7. Tensión en la carga para el puente rectificador monofásico no controlado.

Como se puede observar, se obtiene en la carga la misma forma de onda que en el caso del rectificador con transformador de toma media.

Los parámetros característicos son iguales que para el rectificador con transformador de toma media, excepto la máxima tensión inversa que soporta cada diodo, que en este caso será  $V_{max}$ .

### 3.2.4 Rectificador trifásico de onda completa no controlado con carga resistiva

De forma análoga a los casos anteriores, se puede implementar un rectificador trifásico utilizando diodos.

Los rectificadores trifásicos se utilizan normalmente en la industria para producir tensión y corriente continuas para grandes cargas. En la Figura 3.8 se muestra el rectificador trifásico en puente completo. El generador trifásico de tensión está equilibrado y la secuencia de fases es a-b-c. En el análisis inicial del circuito se supondrá que el generador y los diodos son ideales.

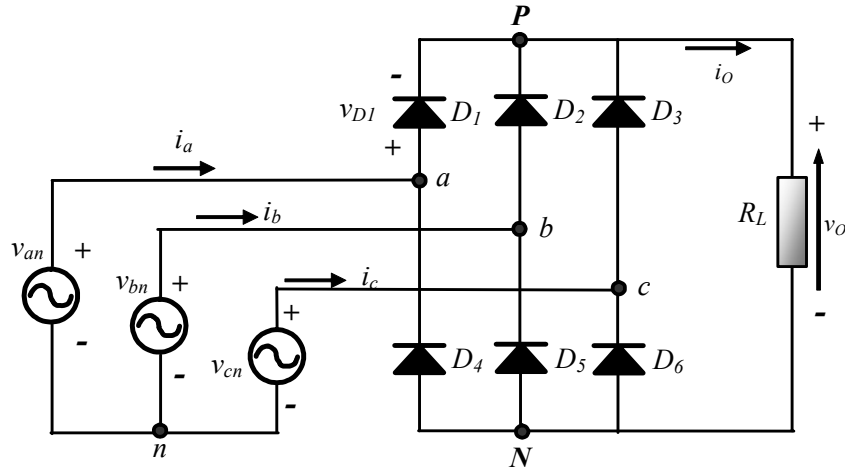


Figura 3.8. Rectificador trifásico en puente

He aquí algunas observaciones básicas sobre el circuito:

1. La ley de Kirchhoff para las tensiones aplicada al circuito muestra que sólo puede conducir un diodo a la vez en la mitad superior del puente ( $D_1$ ,  $D_2$  o  $D_3$ ). El diodo en estado de conducción tendrá su ánodo conectado a la tensión de fase de mayor valor en ese instante.
2. La ley de Kirchhoff para las tensiones también muestra que sólo puede conducir un diodo a la vez en la mitad inferior del puente ( $D_4$ ,  $D_5$  o  $D_6$ ). El diodo en estado de conducción tendrá su cátodo conectado a la tensión de fase de menor valor en ese instante.
3.  $D_1$  y  $D_4$  no podrán conducir al mismo tiempo como consecuencia de las observaciones 1 y 2. De la misma manera, tampoco podrán conducir simultáneamente  $D_2$  y  $D_5$ , ni  $D_3$  y  $D_6$ .
4. La tensión de salida en la carga es una de las tensiones de línea del generador. Por ejemplo, cuando  $D_1$  y  $D_5$  conducen, la tensión de salida es  $v_{ab}$  ( $v_{an} - v_{bn}$ ). Además la tensión de línea de mayor valor instantáneo determinará los diodos que estarán en conducción. Por ejemplo, cuando el valor instantáneo mayor de la tensión de línea sea  $v_{CA}$ , la salida será  $v_{CA}$ .
5. Existen seis combinaciones de tensiones de línea (tres fases combinadas de dos en dos). Si consideramos que un período del generador son  $360^\circ$ , la transición de la tensión de línea de mayor valor deberá producirse cada  $360^\circ/6 = 60^\circ$ . El circuito se denomina rectificador de seis pulsos debido a las seis transiciones que se producen en cada período de la tensión del generador.



6. La pulsación fundamental de la tensión de salida es  $6\omega$ , donde  $\omega$  es la pulsación del generador trifásico.

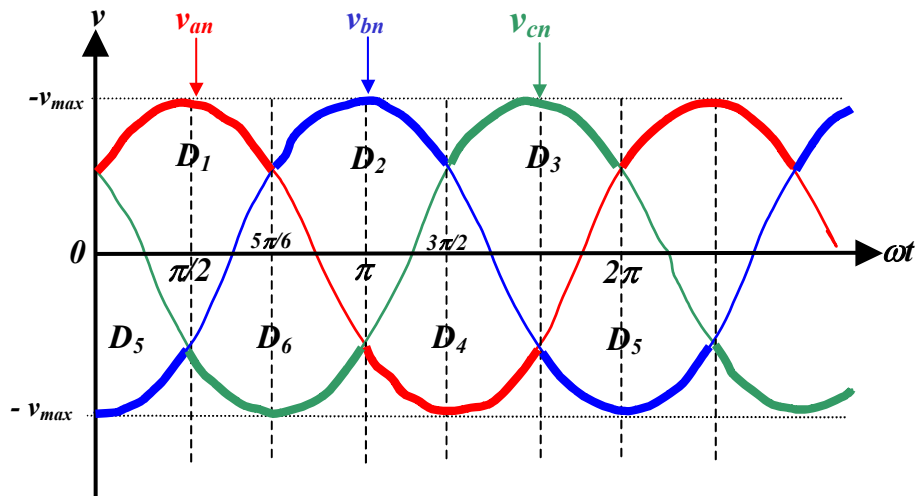


Figura 3.9. Tensión trifásica de entrada al rectificador.

Otra manera de estudiar o analizar el rectificador trifásico es dividiéndolo en dos partes:

- **Rectificador tipo P:** Sería la parte de circuito compuesta por los diodos  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$ , funcionando como un detector de máximo. En cualquier instante permitirá conectar a la carga la mayor de las tensiones trifásicas.
- **Rectificador tipo N:** Estaría compuesto por los diodos  $D_4$ ,  $D_5$  y  $D_6$ , funcionando como un detector de mínimo. En cualquier instante permitirá conectar a la carga la menor de las tensiones trifásicas.

Con la unión de ambas partes conseguimos que durante todo el tiempo se conecte el mayor de las tres tensiones a uno de los terminales de la carga y al otro terminal el menor de dichas tensiones.

En la figura 3.9 podemos observar como la parte superior de la forma de onda es la del grupo tipo P, y la inferior la del tipo N. Así, la tensión en la carga puede considerarse como la suma de las tensiones de dos rectificadores de media onda trifásicos, con relación al neutro “n”.

En la figura 3.10, para la tensión en la carga vemos seis pulsos con una duración de  $\pi/3$ , provocando en cada período una secuencia de conducción de los diodos tal que:

$$D_3D_5; D_5D_1; D_1D_6; D_6D_2; D_2D_4; D_4D_3;$$

La secuencia de conducción se corresponde con las seis tensiones senoidales por ciclo, y cuya diferencia de tensión es:

$$V_{cn}-V_{bn}; V_{an}-V_{bn}; V_{an}-V_{cn}; V_{bn}-V_{cn}; V_{bn}-V_{an}; V_{cn}-V_{an};$$

La máxima tensión será  $\sqrt{3}V_{max}$ .

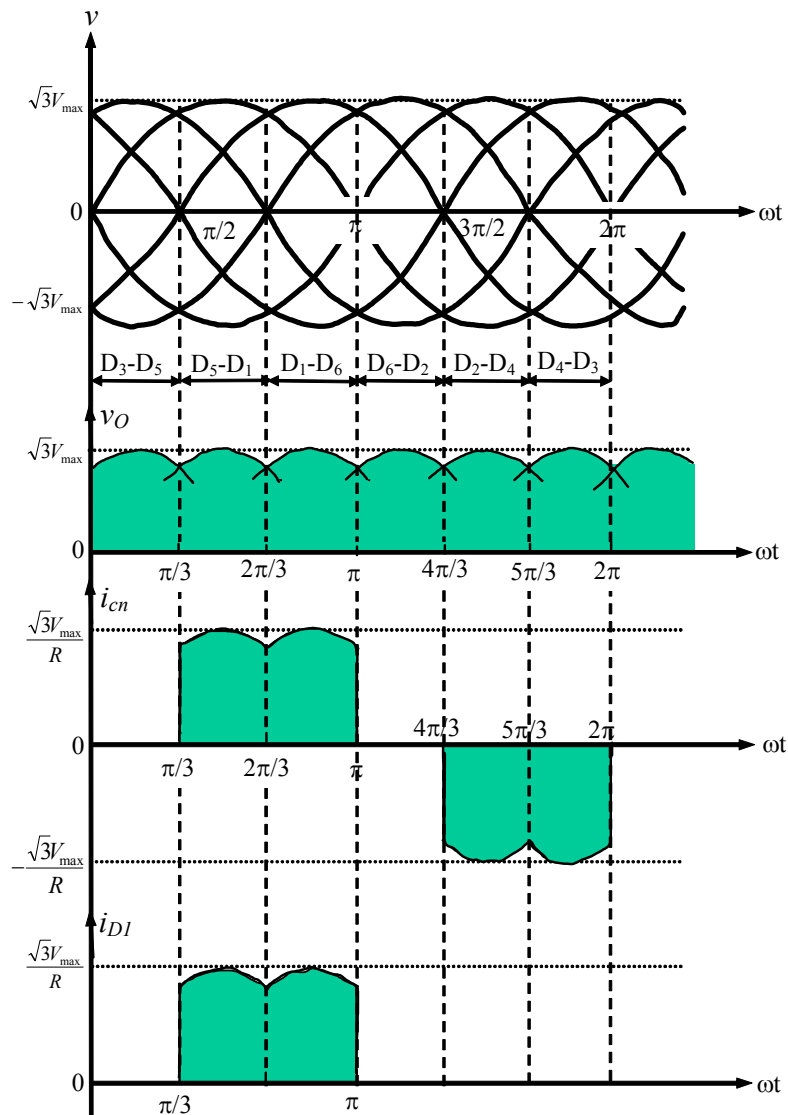


Figura 3.10. Formas de onda del rectificador trifásico no controlado de onda completa.

### Tensión media en la carga

Se puede calcular obteniendo la tensión media que entrega cada rectificador de media onda (tipo P y tipo N) que compone el puente:

$$V_{dc(P)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_{max} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3V_m}{\pi} \text{sen} \frac{\pi}{3} = V_{dc(N)}$$

$$V_{dc(TOTAL)} = V_{dc(P)} + V_{dc(N)} = 2 \cdot \frac{3V_{max}}{\pi} \text{sen} \frac{\pi}{3} = 1,654V_{max}$$

Otra posible manera de calcularlo sería:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} V_{\max} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} = 1,654 V_{\max}$$

### Tensión eficaz en la carga

$$V_{Orms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} 3(V_{\max})^2 (\cos \omega t)^2 \, d\omega t} = \left( \frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right) V_{\max} = 1,6554 V_{\max}$$

### Corriente media en la carga

La corriente de pico en los diodos es  $\frac{\sqrt{3} V_{\max}}{R}$ , que se corresponde con la corriente máxima de línea. Además cabe destacar que en los diodos circula la intensidad que atraviesa la carga, durante T/3.

$$I_{D(dc)} = \frac{4}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} I_{\max} \cos \omega t \, d\omega t = I_{\max} \frac{2}{\pi} \operatorname{sen} \left( \frac{\pi}{6} \right) = 0,3183 I_{\max}$$

### Corriente eficaz en los diodos

$$I_{D(rms)} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} (I_{\max})^2 (\cos \omega t)^2 \, d\omega t} = I_{\max} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \operatorname{sen} \frac{2\pi}{6} \right)} = 0,5518 I_{\max}$$

Con el rectificador trifásico se obtiene un rizado de tensión menor a la salida y se puede transferir más energía, si lo comparamos con el rectificador monofásico.

### 3.2.5 Rectificadores con filtro

Si se quiere mejorar la forma de onda que aparece a la salida de un rectificador es necesario el empleo de un filtro, básicamente, basado en un condensador. El condensador permite mantener la tensión de salida casi constante, reduciendo el rizado de tensión final. La figura 3.11 muestra un esquema de un rectificador monofásico con filtro basado en condensador y la figura 3.12 muestra las tensiones de entrada (vs) y de salida VO

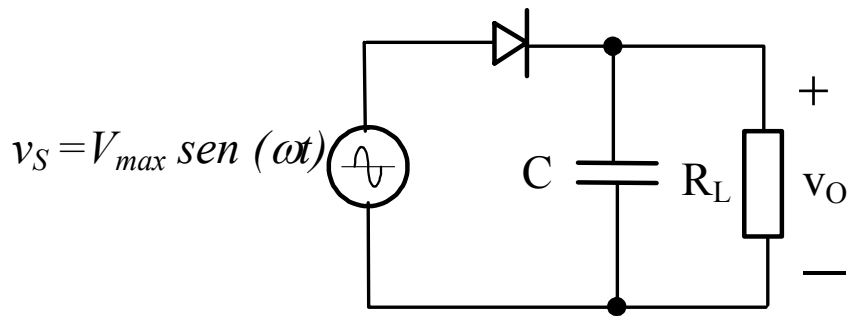


Figura 3.11. Circuito rectificador media onda con filtro condensador.

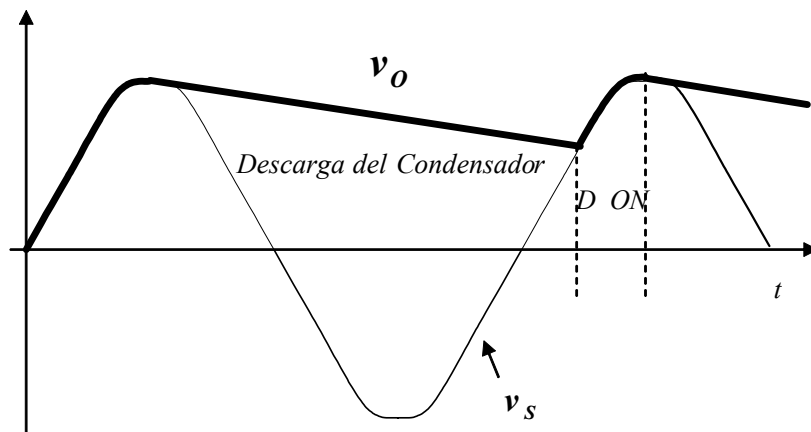


Figura 3.12. Tensión de entrada ( $v_S$ ) y de salida ( $v_O$ ) de un rectificador monofásico con filtro.

### 3.3 Rectificadores controlados

Los rectificadores que hemos visto hasta ahora estaban basados en diodos, semiconductores sobre los cuales no tenemos ningún control ni de encendido (puesta en conducción) ni de apagado (bloqueo). Si queremos controlar la tensión de salida de un rectificador, es necesario utilizar semiconductores de potencia que puedan ser controlados. Lo más usual es utilizar dispositivos de la familia de los tiristores.

Por tanto, se puede decir que los rectificadores controlados reciben este nombre por que utilizan un dispositivo de control, en este caso el tiristor. Se utilizan las mismas topologías que en el caso de los rectificadores no controlados, pero sustituyendo los diodos por tiristores. La ventaja de utilizar tiristores viene dada por la capacidad de éstos de retardar su puesta en conducción, sucediendo ésta cuando la tensión ánodo-cátodo sea positiva y además reciba un pulso adecuado de tensión y corriente en su puerta.

Al retardar el ángulo de disparo es posible variar la tensión rectificada de salida, de ahí el calificativo de “controlados”.

En los rectificadores controlados, por lo tanto, se controla la puesta en conducción del tiristor y el bloqueo se realiza de forma natural cuando se anula la corriente por el dispositivo.

### 3.3.1 Rectificador monofásico controlado de media onda y carga resistiva

La figura 3.13 muestra la topología de un rectificador monofásico de media onda controlado.

Durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada, la tensión ánodo-cátodo es positiva, de manera que el SCR puede entrar en conducción. Si en el instante  $\alpha$  respecto al paso por cero de la tensión de entrada el circuito de control genera un pulso en la puerta del SCR, éste empezará a conducir, haciendo que circule corriente por la carga. En el instante  $\pi$ , la tensión en la carga se anula, provocando que la corriente sea nula y en consecuencia, bloqueando de forma natural el SCR. El ángulo de disparo  $\alpha$  o ángulo de fase se expresa en grados, para que su valor sea independiente de la frecuencia, si bien en la realidad equivale a unos ciertos milisegundos.

Controlando el ángulo de disparo de los tiristores somos capaces de enviar más o menos energía a la carga, con lo que estamos controlando el valor medio de la tensión de salida del rectificador. La figura 3.14 muestra las formas de onda de la tensión de entrada, la tensión en la de carga, la corriente en la carga y la tensión ánodo-cátodo del SCR.

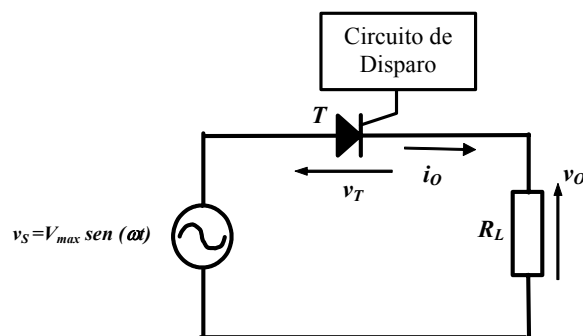


Figura 3.13. Circuito rectificador controlado monofásico de media onda

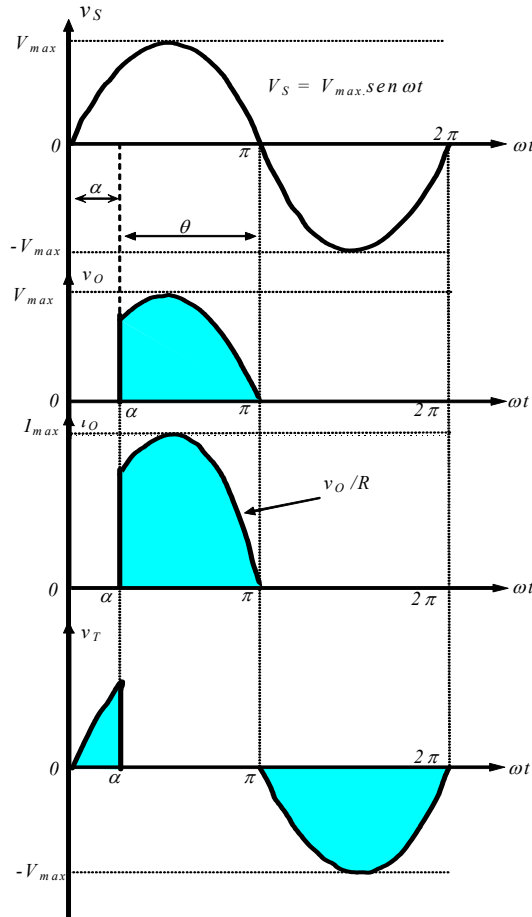


Figura 3.14. Formas de onda de un rectificador monofásico controlado de media onda: tensión en la entrada ( $v_s$ ), tensión en la carga ( $v_o$ ), intensidad en la carga ( $i_o$ ) y tensión ánodo-cátodo del SCR ( $v_T$ ).

**Tensión media en la carga:** Si  $V_{\max}$  es el valor de pico de la tensión de entrada, tenemos que:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \text{sen} \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{\max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Para  $\alpha=0^\circ$ , la tensión media en la carga será:  $V_{dc} = \frac{V_{\max}}{\pi}$ , valor que corresponde a un rectificador monofásico de media onda no controlado.

**Tensión eficaz en la carga:**

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{\max} \text{sen} \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, d\omega t} = \\ &= \frac{V_{\max}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{\omega t - \frac{1}{2} \text{sen} 2\omega t} \right] = \frac{V_{\max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha)} \end{aligned}$$

Para  $\alpha=0^\circ$ , la tensión eficaz será  $V_{rms} = \frac{V_{max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi} = \frac{V_{max}}{2}$ , valor que corresponde a un rectificador monofásico de media onda no controlado.

**Tensión inversa máxima soportada por el tiristor ( $V_R$ ):** Esta tensión será la máxima de entrada para  $\alpha = \pi/2$ , por lo tanto:

$$V_R = V_{max}$$

**Corriente media en la carga:**

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_{max} \text{sen} \omega t \, d\omega t = \left( \frac{I_{max}}{2\pi} \right) (1 + \cos \alpha) \rightarrow I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

**Corriente eficaz en la carga:**

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (I_{max} \text{sen} \omega t)^2 \, d\omega t} = \left( \frac{I_{max}}{2} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{\pi} \right) + \left( \frac{\text{sen} 2\alpha}{2\pi} \right)} \rightarrow I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

El uso en la industria de este tipo de rectificador es casi nulo debido a que la tensión de salida presenta un excesivo rizado de baja frecuencia.

### 3.3.2 Rectificador monofásico totalmente controlado

En este montaje, los diodos que formaban el puente rectificador no controlado se sustituyen por tiristores tipo SCR, haciendo posible el control de fase de una onda completa de la señal de entrada. El circuito se puede ver en la figura 3.13.

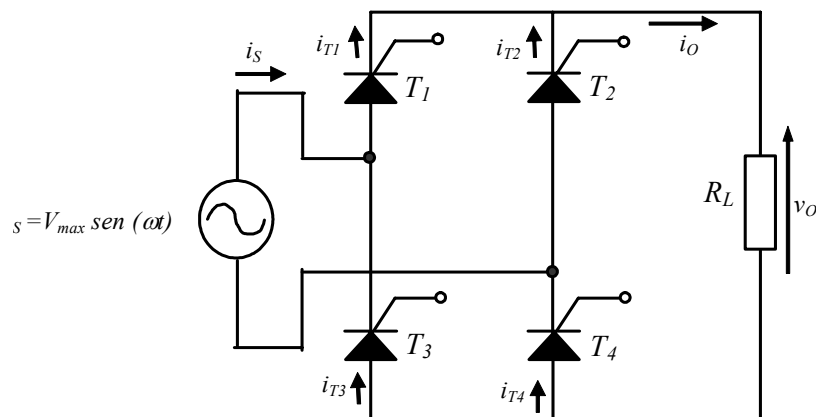


Figura 3.13. Rectificador monofásico totalmente controlado.

Los tiristores  $T_1$  y  $T_4$  conducirán durante el semiciclo positivo de la entrada, y los tiristores  $T_2$  y  $T_3$  en el negativo. Eso quiere decir que los tiristores se dispararán de dos en dos con un ángulo de fase  $\alpha$  retardado a partir del paso por cero de la tensión de entrada. La figura 3.14 muestra las formas de onda de la corriente de entrada y de la tensión de salida del rectificador.

### Tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \text{sen } \omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi} V_{max} (-\cos \pi + \cos \alpha) = \frac{V_{max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

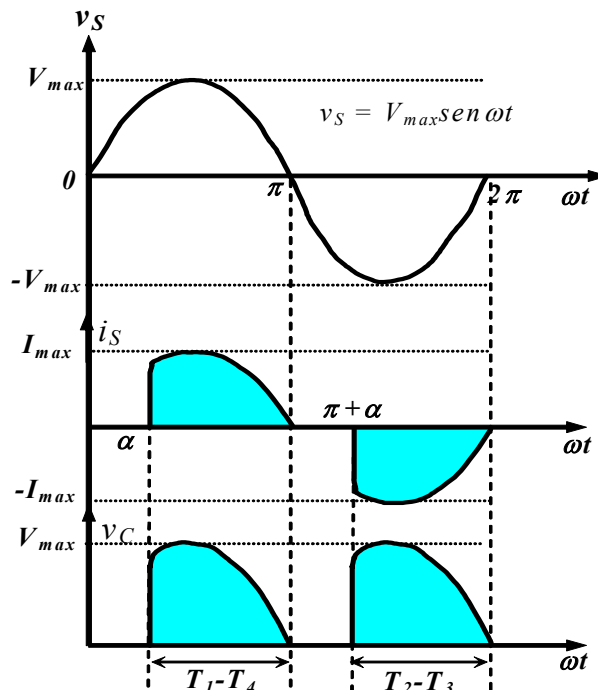


Figura. 3.14. Formas de onda del puente rectificador totalmente controlado, con carga resistiva.

Para  $\alpha=0^\circ$ , la tensión media en la carga será:  $V_{dc} = \frac{2V_{max}}{\pi}$

### Tensión eficaz en la carga:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{max} \text{sen } \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}\sqrt{\pi}} \sqrt{\left[ (\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{sen} 2\alpha \right]}$$

### Intensidad media en la carga:



$$I_{dc} = \frac{I_{max}}{\pi}(1 + \cos \alpha)$$

### 3.3.3 Cargadores de baterías.

Una de las aplicaciones más comunes de los rectificadores son los cargadores de baterías. La idea es transformar energía de CA (red monofásica o trifásica) en CC para cargar baterías. La figura 3.15 muestra un esquema de un típico cargador de baterías. El rectificador puede ser de cualquier tipo, controlado, no controlado, monofásico, trifásico, de media onda o de onda completa, etc., dependiendo de las disponibilidades y necesidades de energía. En el caso de la figura 3.15 se trata de un cargador de batería controlado, puesto que dependiendo del ángulo de disparo de cada uno de los SCR, se controla la corriente de carga de la batería. Se suele añadir una impedancia entre la batería y el rectificador, típicamente una bobina, para limitar la corriente y reducir el rizado. Para mejorar la vida de las baterías es necesario realizar un control complejo del sistema, ya sea, en modo tensión o modo corriente, de manera que se optimice el ciclo de carga y se alargue la vida de las baterías.

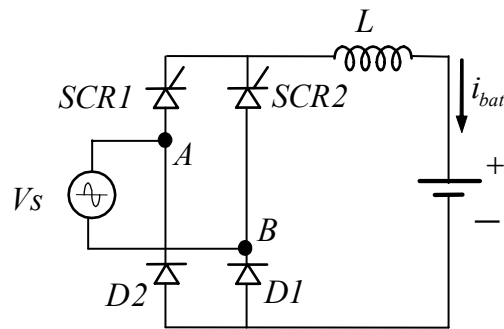


Figura 3.15. Cargador de baterías monofásico en puente completo controlado.

## 3.4 Bibliografía

- “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, Mohan, Undeland y Robbins, John Wiley & Sons, 2ª Ed, Nueva York, 1995.
- “Eletrónica de Potência”, J. A. Pomilio, Universidade Estadual de Campinas, SP - Brasil.
- “Electrónica de Potencia”, D. W. Hart, Valparaíso University, Valparaíso Indiana. Prentice Hall.