

CAPITULO XIII

RECTIFICADORES CON FILTROS

13.1 INTRODUCCION

En este Capítulo vamos a centrar nuestra atención en uno de los circuitos más importantes para el funcionamiento de los sistemas electrónicos: El rectificador con filtro, el cual es un elemento esencial de las Fuentes de Voltaje DC. La función de las Fuentes de Voltaje DC, cuyo diagrama de bloques podemos observar en la Figura 1, es proporcionar energía en la forma adecuada a la mayor parte de los sistemas electrónicos, tomándola del sistema AC comercial, el cual opera a una frecuencia de 60Hz y cuyo voltaje r.m.s. nominal fase - neutro en Venezuela es de 120 Vr.m.s. El rectificador con filtro cumple una función fundamental en la operación de las Fuentes de Voltaje DC.

La función del transformador es doble: Aisla la Fuente del sistema AC y ajusta el valor pico del voltaje al valor deseado (en este caso transforma la señal sinusoidal de 120 Vr.m.s. en otra señal sinusoidal de por ejemplo 15 Vr.m.s.).

El rectificador con filtro transforma la señal alterna en una señal de una sola polaridad (aunque todavía con variaciones considerables del nivel de voltaje).

Finalmente, el regulador produce el voltaje DC de salida requerido y reduce las fluctuaciones de dicha salida hasta mantenerlas dentro de los límites estipulados.

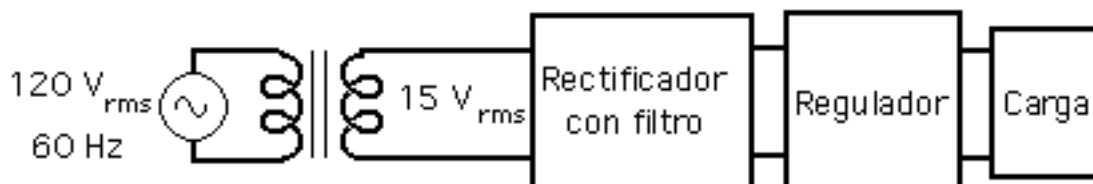


Fig. 1.- Diagrama de Bloques de una Fuente de Voltaje DC

En los próximos puntos vamos a definir un serie de parámetros que caracterizan a las Fuentes de Voltaje DC en su conjunto, para luego concentrarnos en el rectificador con filtro y su interacción con el transformador.

13.2 PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LAS FUENTES DE VOLTAJE

La salida de toda fuente de voltaje presenta la forma de onda mostrada en la Figura 2. Sobre esta señal, vamos a definir los parámetros característicos indicados en los próximos apartados.

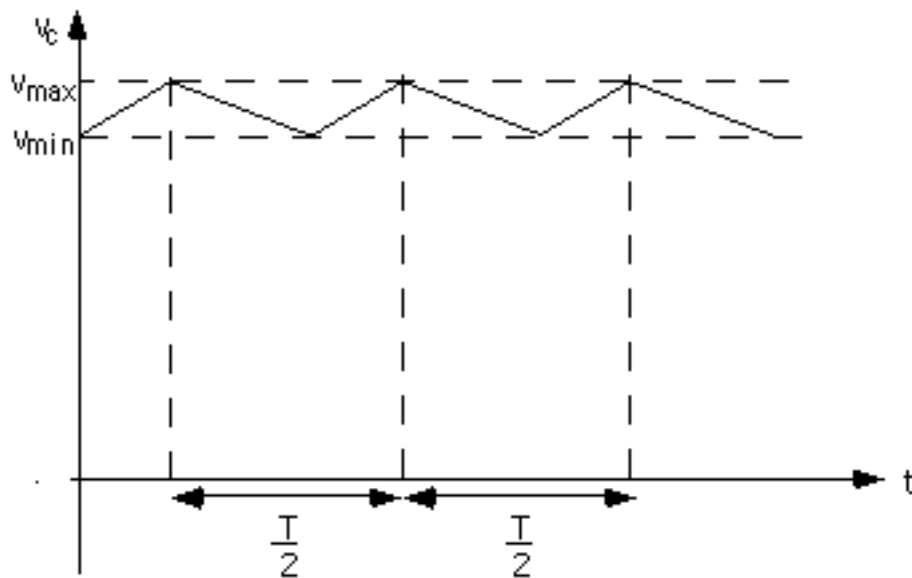


Fig. 2.- Forma de onda de salida de una Fuente de Voltaje DC

13.2.1 Voltaje de Rizado.

Se denomina Voltaje de Rizado a la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo de la forma de onda de salida de la fuente de Voltaje DC. Por lo tanto:

$$V_r = V_{max} - V_{min} \quad (13.1)$$

El Voltaje de Rizado debe especificarse indicando la carga de la Fuente con la que se ha realizado la medición, entendiendo por "carga" la cantidad de corriente que dicha Fuente debe suministrar al circuito conectado a ella. Usualmente el Voltaje de Rizado se especifica para la máxima carga que puede manejar la Fuente de Voltaje DC.

13.2.2 Factor de Rizado

Se denomina Factor de Rizado a la relación porcentual entre el Voltaje de Rizado y el valor máximo de la Fuente de Voltaje DC. Esto es:

$$F_r = \frac{V_r}{V_{\max}} \times 100\% = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100\% \quad (13.2)$$

Al igual que el Voltaje de Rizado, el Factor de Rizado se especifica para la máxima carga que puede manejar la Fuente de Voltaje DC.

13.2.3 Regulación de Carga

La Regulación de Carga es una medida de la capacidad de la Fuente de Voltaje DC de mantener constante su voltaje de salida cuando varía la carga conectada a ella, es decir, la cantidad de corriente que debe proporcionarle al circuito que está alimentando. Se define utilizando la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{V_{o\max} - V_{o\min}}{V_{o\max}} \times 100\% \quad (13.3)$$

Donde:

$V_{o\min}$ = Voltaje de salida a máxima carga

$V_{o\max}$ = Voltaje de salida sin carga (corriente cero)

Cuanto mejor es la calidad del regulador de la Fuente de Voltaje DC, menor es la Regulación de Carga. Una Fuente de Voltaje ideal tiene una Regulación de Carga igual a cero.

13.2.4 Regulación de Línea

La Regulación de Línea es una medida de la capacidad de la Fuente de Voltaje DC de mantener constante su voltaje de salida cuando varía el valor del voltaje AC máximo aplicado a la entrada del rectificador. Se define utilizando la siguiente expresión:

$$R_L = \frac{V_{oVimax} - V_{oVimin}}{V_{oVimin}} \times 100\% \quad (13.4)$$

Donde:

V_{oVimax} = Voltaje de salida cuando el voltaje AC pico a la entrada es máximo

V_{oVimin} = Voltaje de salida cuando el voltaje AC pico a la entrada es mínimo

Cuanto mejor es la calidad del regulador de la Fuente de Voltaje DC , menor es la Regulación de Línea. Una Fuente de Voltaje ideal tiene una Regulación de Línea igual a cero.

13.3 EL TRANSFORMADOR

Como mencionamos anteriormente, el transformador aísla la Fuente del sistema AC y ajusta el valor pico del voltaje al valor deseado, de acuerdo con los requerimientos de entrada de la Fuente de Voltaje.

A fin de determinar el transformador adecuado para una Fuente de Voltaje en particular, además de indicar la relación de transformación dada por el cociente entre el voltaje en el primario y el secundario, es necesario especificar la potencia aparente (volts-amperes) que va a manejar dicho transformador. Para determinar dicha potencia se multiplica el valor r.m.s. del voltaje en el secundario por el valor r.m.s. de la corriente en el secundario. Suponiendo que las pérdidas propias del transformador son despreciables, el valor calculado en el secundario es igual a la potencia que maneja el primario del transformador.

El cálculo del valor r.m.s. del voltaje en el secundario del transformador es simple y directo, ya que consideramos que la forma de onda del voltaje es sinusoidal (sin tomar en cuenta el efecto del ruido eléctrico existente en la línea), pero es necesario calcular cuidadosamente el valor r.m.s. de la corriente en el secundario, ya que debido a la operación del circuito rectificador con filtro, la forma de onda de dicha corriente dista mucho de ser sinusoidal, como veremos en los próximos puntos.

13.4 EL RECTIFICADOR CON FILTRO

En la Figura 3 podemos observar los bloques que constituyen lo que se denomina la fuente de Voltaje no regulada: La alimentación AC, el transformador y el rectificador con filtro.

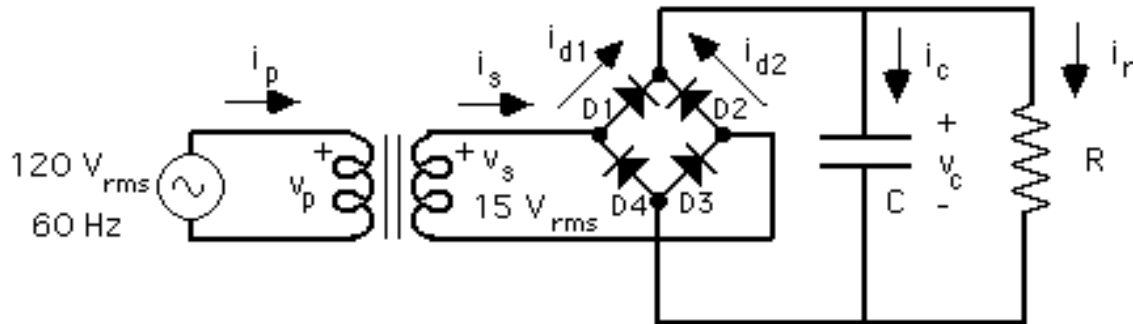


Fig. 3.- Fuente de voltaje no regulada

Al analizar la operación de este circuito, podemos observar en primer lugar que, debido al proceso de rectificación de onda completa, el voltaje de salida v_c , esto es, la señal sobre el condensador y la resistencia, mostrada en la Figura 4, presenta un período de $T/2$, es decir, la mitad del período de la señal sinusoidal de entrada, por lo tanto su frecuencia es el doble de la frecuencia original.

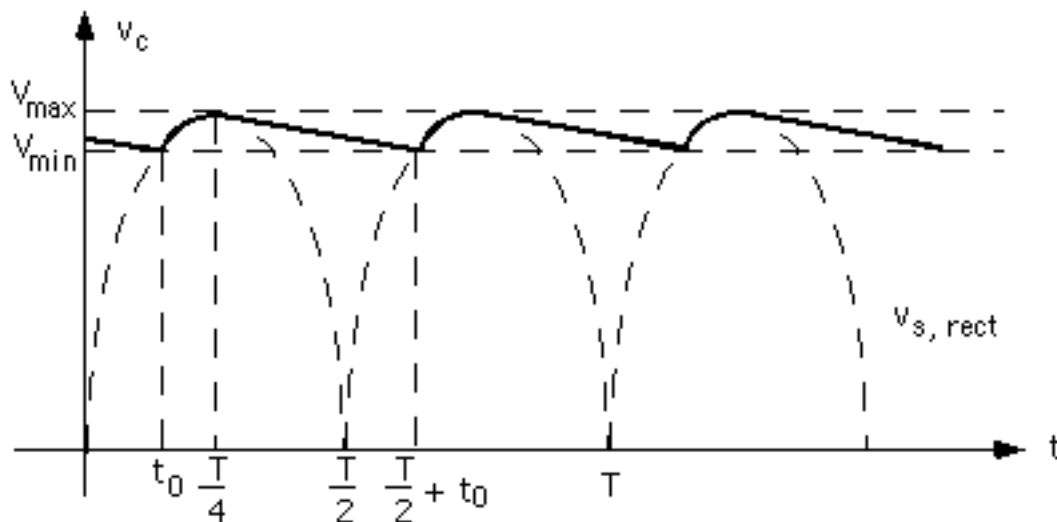


Fig. 4.- Forma de onda del voltaje de salida del rectificador con filtro.

Observando la Figura anterior también es posible deducir que el voltaje máximo y mínimo están relacionados mediante la ecuación:

$$V_{\min} = V_{\max} \text{ sen } t_0 \quad (13.5)$$

Por lo tanto, la ecuación para el Voltaje de Rizado es:

$$V_r = V_{\max} - V_{\min} = V_{\max} (1 - \text{sen } t_0) \quad (13.6)$$

Y el Factor de Rizado está dado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{V_r}{V_{\max}} \times 100\% = \frac{V_{\max} (1 - \text{sen } t_0)}{V_{\max}} \times 100\% = \\ &= (1 - \text{sen } t_0) \times 100\% \end{aligned} \quad (13.7)$$

Adicionalmente, en la Figura 4 podemos comprobar que la forma de onda de v_c está constituida por dos etapas bien diferenciadas: Un primer intervalo, comprendido entre t_0 y $T/4$, durante el cual el voltaje del secundario del transformador es ligeramente mayor que el del condensador, lo suficiente para que una de las dos parejas de diodos del puente rectificador esté polarizada en directo y por lo tanto sea posible la circulación de corriente por el secundario del transformador y por el par de diodos correspondiente, y un segundo intervalo, comprendido entre $T/4$ y $T/2 + t_0$, durante el cual el voltaje del secundario del transformador es menor que el del condensador, y por lo tanto ninguno de los cuatro diodos del puente rectificador puede entrar en conducción. En los próximos apartados vamos a analizar en detalle cada una de estas dos etapas.

13.4.1 Etapa de conducción de los diodos

En esta etapa, la fuente de entrada proporciona toda la energía necesaria para alimentar la carga del circuito, en este caso la resistencia R , y cargar el condensador C hasta el máximo valor posible.

Durante el semiciclo positivo, la corriente en el secundario del transformador i_s , tiene la dirección indicada como positiva en la Figura 3, y lo mismo ocurre con la corriente en el primario del transformador, i_p . Durante este semiciclo, la corriente circula por el diodo $D1$, continúa por C y R en la dirección indicada como positiva para ambas corrientes, i_c e i_r , por lo que aumenta la carga eléctrica almacenada en el

condensador y le suministra a la resistencia la corriente necesaria, sigue por D3 y por el secundario del transformador para cerrar el lazo de corriente.

Durante el semiciclo negativo, la corriente i_s circula por el secundario en la dirección opuesta, pasa por D2, luego por C y R en la misma dirección que en el semiciclo positivo (con lo cual se obtiene el efecto de rectificación de onda completa, se aumenta igualmente la carga eléctrica almacenada en el condensador y se le suministra a la resistencia la corriente necesaria), sigue por D4 y por el secundario del transformador para cerrar el lazo de corriente.

De acuerdo con la ecuación para los condensadores, la corriente en el condensador está dada por la relación:

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad (13.8)$$

Ahora bien, para este caso, si consideramos que tanto el transformador como los diodos del puente rectificador tienen un comportamiento similar al de los dispositivos ideales, el voltaje en el condensador es igual al voltaje en el secundario del transformador, por lo tanto:

$$v_c = V_{\max} \sin t \quad (13.9)$$

En consecuencia, la corriente en el condensador está dada por la relación:

$$i_c = C V_{\max} \cos t \quad (13.10)$$

Y la corriente tanto en los diodos que están conduciendo como en el secundario del transformador es:

$$i_s = C V_{\max} \cos t + i_r \quad (13.11)$$

Para simplificar, vamos a considerar que las variaciones en la corriente que circula por la resistencia R, debidas a las variaciones del voltaje en el condensador, son despreciables frente a las variaciones que sufre la corriente en el condensador, por lo tanto podemos suponer que la corriente por la resistencia R permanece esencialmente

constante y es igual a I_R . De acuerdo con esto, la corriente en el secundario del transformador está dada por la ecuación:

$$i_s = C \quad V_{\max} \cos \quad t + I_R \quad (13.12)$$

En consecuencia, durante el intervalo de tiempo en el que conducen un par de diodos, la forma de onda de la corriente en el secundario del transformador y en los diodos correspondientes está compuesta por una señal cosenoidal sumada a una señal continua.

Como ya hemos mencionado, los diodos D1 y D3 conducen durante los semiciclos positivos del voltaje en el secundario. La Figura 5 muestra el voltaje en el secundario del transformador ya rectificado $v_{s,rect}$ (dibujado con línea punteada para que sirva como referencia, ya que esta forma de onda no aparece como tal sobre ningún componente del circuito), el voltaje sobre el condensador v_c , y la corriente por el diodo D1 (la cual es igual a la corriente por el diodo D3). El intervalo de conducción de los diodos se acostumbra a identificar como t_c , donde:

$$t_c = \frac{T}{4} + t_0 \quad (13.13)$$

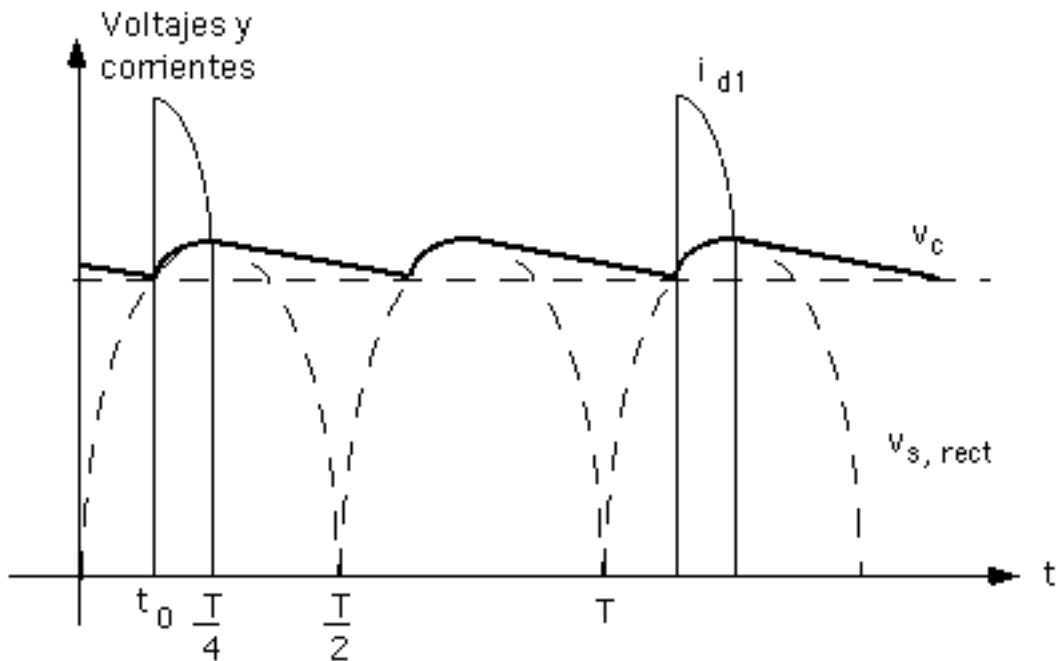


Fig. 5.- Formas de onda del voltaje rectificado en el secundario del transformador, del voltaje sobre el condensador y de la corriente en D1.

En la Figura 6 podemos observar la corriente por los diodos D2 y D4, relacionada con la forma de onda del voltaje en el condensador y con la forma de onda de referencia del voltaje del secundario rectificad. El intervalo de conducción está identificado con t_c .

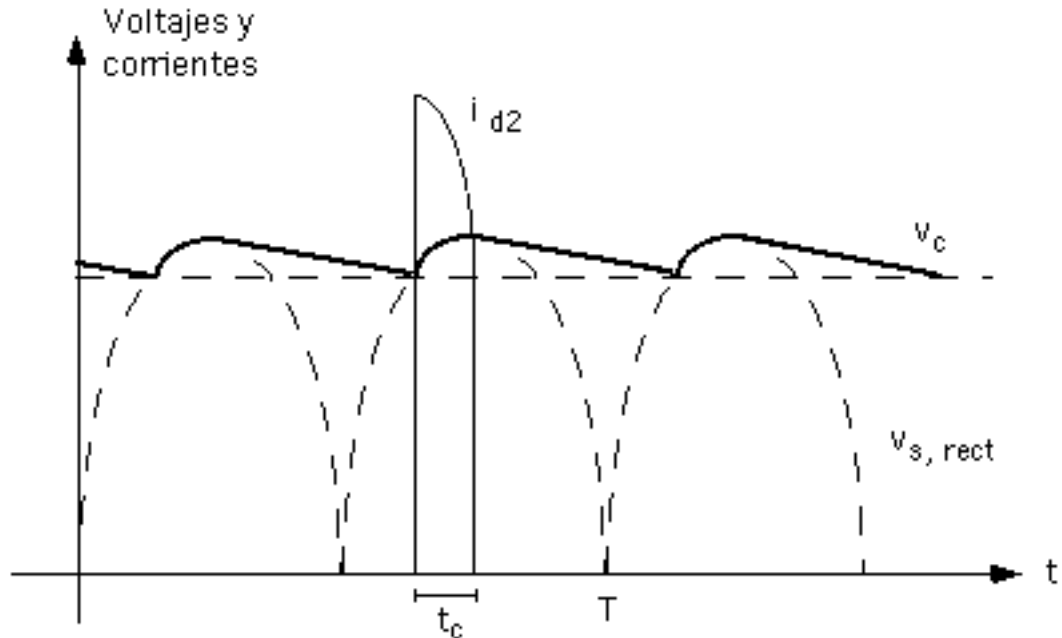


Fig. 6.- Forma de onda de la corriente por el diodo D2 relacionada con las formas de onda del voltaje rectificado en el secundario del transformador y del voltaje sobre el condensador .

Dos de los parámetros fundamentales en el análisis y diseño de un rectificador con filtro son el valor promedio de la corriente que circula por los diodos del puente rectificador y la potencia disipada por éstos. Para calcular la corriente promedio debemos aplicar la definición correspondiente, dada por la siguiente ecuación:

$$I_{dprom} = \frac{1}{T} \int_0^t i(t) dt \quad (13.14)$$

Para simplificar los cálculos, podemos aproximar los pulsos cosenoidales de la forma de onda de la corriente en los diodos a pulsos cuadrados cuya amplitud es el valor máximo de la corriente por los diodos, I_{dmax} . Podemos calcular el valor pico de la corriente en los diodos utilizando la ecuación (13.12). Como podemos observar en la Figura 5, la corriente es máxima para el instante t_0 . Por lo tanto:

$$I_{dmax} = C \quad V_{max} \cos \quad t_0 + I_{Rmax} \quad (13.15)$$

Con la aproximación propuesta, la corriente en los diodos D1 y D3 es la mostrada en la Figura 7.

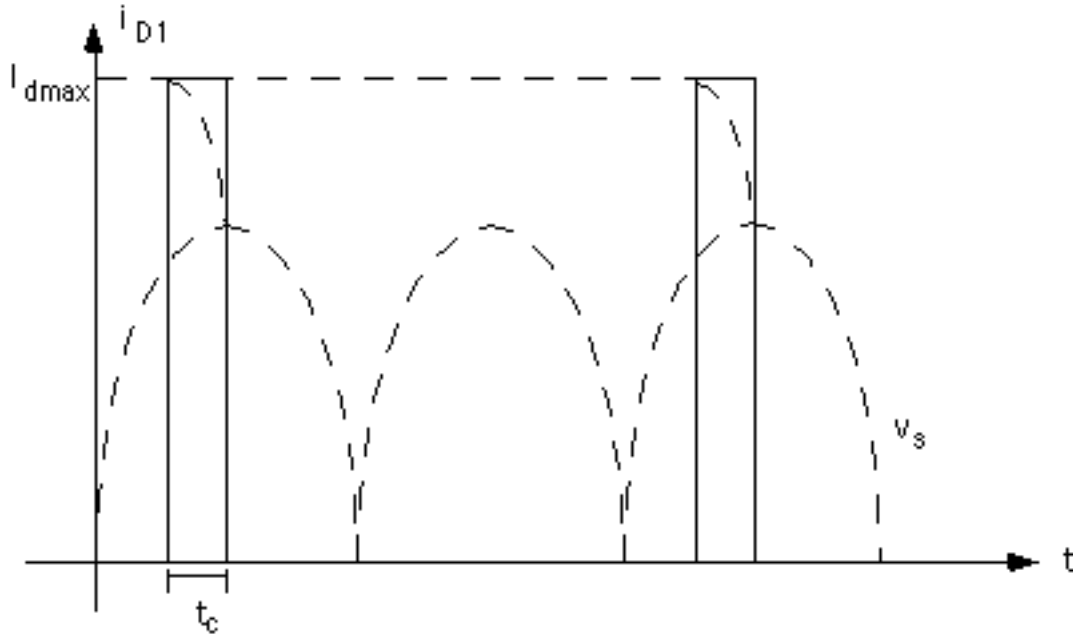


Fig. 7.- Forma de onda aproximada de la corriente en los diodos D1 y D3.

Aplicando la definición de valor promedio a estos pulsos rectangulares de corriente obtenemos:

$$I_{dprom} = \frac{I_{dmax} \quad t_c}{T} \quad (13.16)$$

Por otra parte, la potencia promedio disipada por los diodos del puente rectificador está dada por la relación siguiente:

$$P_{dprom} = \frac{1}{T} \int_0^t i(t)v(t)dt \quad (13.17)$$

Considerando que el voltaje en los diodos durante su intervalo de conducción es un valor constante, V_d , y que la corriente tiene la forma de onda presentada en la Figura 7, la potencia promedio de los diodos está dada por la ecuación:

$$P_{dprom} = \frac{I_{dmax} V_d t_c}{T} \quad (13.18)$$

Por último, para finalizar el análisis de la etapa de conducción de los diodos, la cual coincide con la de conducción por el transformador, podemos calcular el valor de la corriente r.m.s. en el secundario, valor necesario para calcular la potencia aparente del transformador. La Figura 8 presenta las formas de onda del voltaje y de la corriente en el secundario.

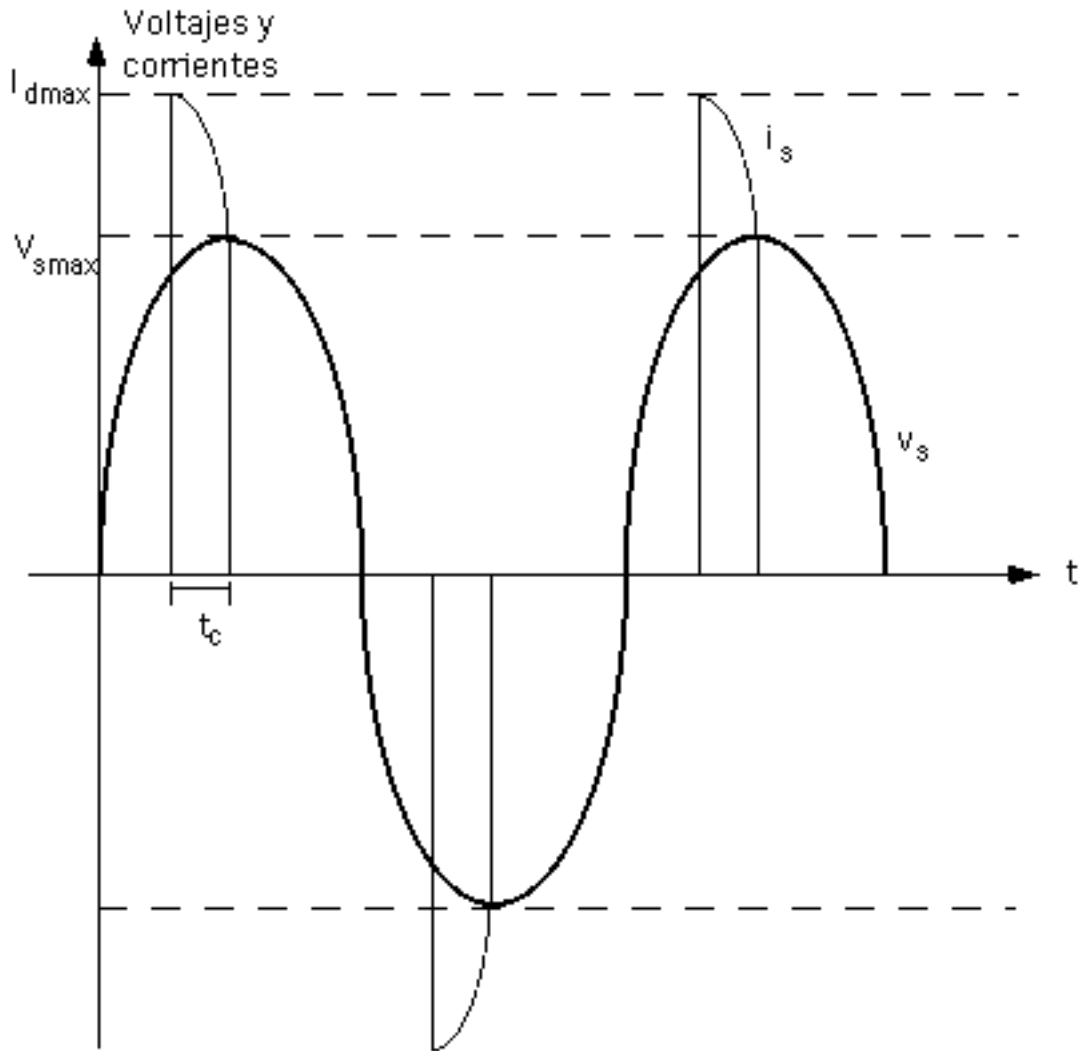


Fig. 8.- Formas de onda del voltaje y la corriente en el secundario.

Como podemos observar, la forma de onda de la corriente no es sinusoidal, pero es periódica y bipolar. Esta última característica es

importante, porque hay otros tipos de rectificadores, (como por ejemplo los de media onda) en los que la corriente por el transformador es unipolar, lo cual es fuente de problemas, ya que la característica de magnetización no es simétrica.

El valor r.m.s. de la corriente en el secundario del transformador está dada por la ecuación:

$$i_{r.m.s} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t i_s(t)^2 dt} \quad (13.19)$$

Utilizando la aproximación anterior, la corriente en el secundario elevada al cuadrado es la mostrada en la Figura 9. Con esta simplificación, el valor r.m.s. de la corriente en el secundario del transformador está dada por la siguiente simplificación:

$$i_{r.m.s} = \sqrt{\frac{2}{T} I_{dmax}^2 t_c} \quad (13.20)$$

Y la potencia aparente del transformador es:

$$S = v_{r.m.s} i_{r.m.s} = \sqrt{\frac{2}{T} I_{dmax}^2 t_c} \frac{V_{smax}}{\sqrt{2}} \quad (13.21)$$

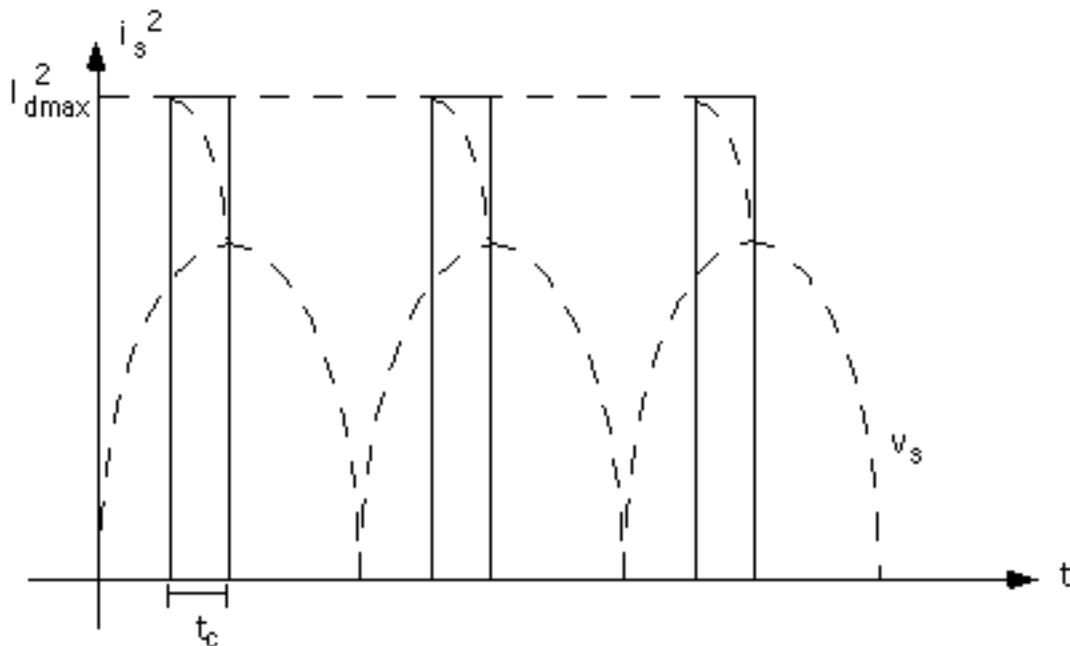


Fig. 9.- Forma de onda de la corriente en el secundario elevada al cuadrado.

13.4.2 Etapa de no conducción de los diodos

En esta etapa, el condensador C proporciona la energía que alimenta a la carga R. Al no conducir ninguno de los diodos, debido a la polarización inversa existente entre los terminales de todos ellos, el circuito queda reducido al condensador con la resistencia en paralelo, como podemos observar en la Figura 10. La corriente circula en la dirección indicada en dicha figura, por lo tanto la corriente por el condensador es negativa, lo cual indica que éste se está descargando, suministrándole a la carga R la corriente requerida.

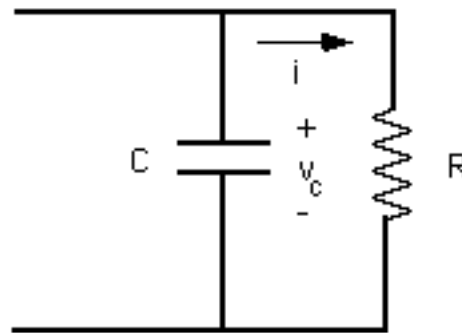


Fig. 10.- Etapa de no conducción de los diodos.

Aunque la relación que gobierna la variación de la corriente en la resistencia es exponencial, dado que la variación del voltaje en los terminales del condensador y por lo tanto sobre la resistencia es pequeña cuando se compara con el valor máximo de dicho voltaje, podemos simplificar el problema considerando que la corriente en la resistencia permanece prácticamente constante (I_{rmax}) y por lo tanto la descarga del condensador es lineal. Aplicando la ecuación fundamental de la corriente en el condensador tenemos:

$$I_{rmax} = C \frac{v}{t} \quad (13.22)$$

Donde:

I_{rmax} = Corriente máxima en la carga.

v = Rango de variación del voltaje en el condensador durante el intervalo en el que este modelo es válido: $V_{max} - V_{min}$

t = Intervalo de tiempo durante el cual este modelo es válido: De $T/4$ a $T/2 + t_0$.

Por lo tanto:

$$t = \frac{T}{2} + t_0 - \frac{T}{4} = \frac{T}{4} + t_0 \quad (13.23)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (13.21) obtenemos:

$$I_{rmax} = C \frac{V_{max} - V_{min}}{\frac{T}{4} + t_0} = C \frac{V_{max} (1 - \text{sen } t_0)}{\frac{T}{4} + t_0} \quad (13.24)$$

De donde:

$$\frac{T}{4} + t_0 = C \frac{V_{max}}{I_{rmax}} (1 - \text{sen } t_0) \quad (13.25)$$

Esta es la ecuación que relaciona el tiempo t_0 , correspondiente al instante donde se alcanza el voltaje mínimo, con el valor del condensador, el voltaje máximo y la corriente máxima en la carga. Como podemos observar, es una ecuación trascendental, debido a la función seno presente en uno de sus términos.