

Diodo: Circuitos rectificadores

Una aplicación típica de los diodos es en circuitos rectificadores los cuales permiten convertir una tensión alterna en una tensión continua. Los circuitos rectificadores forman parte de las fuentes de alimentación cuyo esquema básico se muestra en la Figura 1.

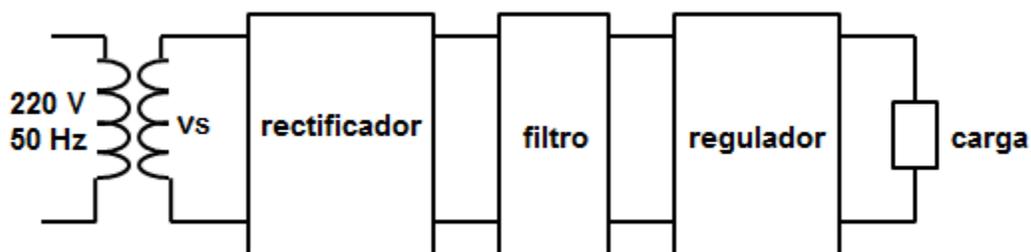


Figura 1

El circuito rectificador más simple es el rectificador de media onda, Figura 2, en el cual una fuente de tensión alterna, un diodo y un resistor de carga se conectan en serie. La fuente de tensión v_s de la Figura 2 está representando la tensión del secundario del transformador.

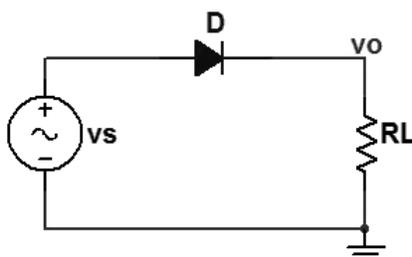


Figura 2

Para analizar en forma simple el circuito consideremos que el diodo se comporta en forma ideal ($V_\gamma = 0$, $R_D = 0$). La tensión de entrada $v_s(\omega t) = V_{sm} \sin \omega t$ será positiva en el intervalo $[0, \pi]$ y negativa en el intervalo $[\pi, 2\pi]$ marcando la diferencia en el comportamiento del diodo. Durante el semiciclo positivo de $v_s(\omega t)$ el diodo conduce y al reemplazarlo por su circuito equivalente, cortocircuito, la tensión $v_s(\omega t)$ queda aplicada sobre la carga, resultando $v_o(\omega t) = v_s(\omega t)$. Durante el semiciclo negativo el diodo queda polarizado en inversa y no conduce, circuito abierto. La corriente en el circuito será nula resultando $v_o(\omega t) = 0$. En este caso la tensión de entrada aparece soportada por el diodo.

Cuando la tensión de entrada llega a su valor máximo negativo el diodo debe permanecer en polarización inversa sin llegar a la región de ruptura. Esta tensión inversa máxima constituye un parámetro importante para la selección del diodo y se conoce como **tensión inversa de pico, TIP**. En la Figura 3 se muestra para un ciclo completo de $v_s(\omega t)$ la tensión $v_o(\omega t)$ en la carga y la tensión $v_d(\omega t)$ en el diodo.

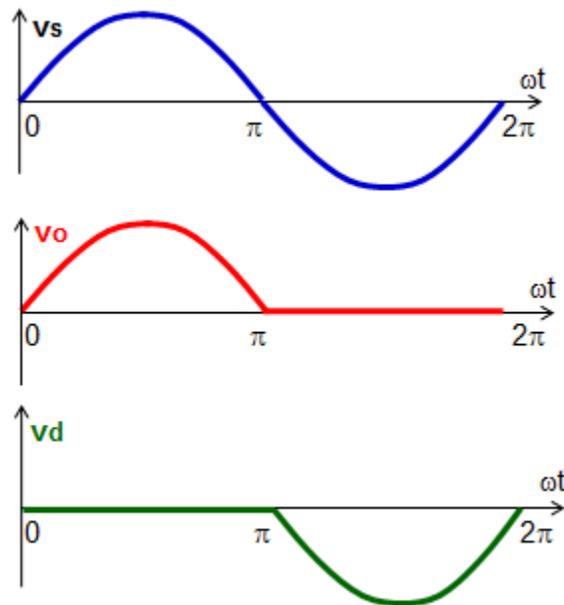


Figura 3

Un valor característico en los circuitos rectificadores es el valor de tensión o corriente continua (o promedio) sobre la carga:

$$V_{occ} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{sm} \text{sen}\omega t d(\omega t) = \frac{V_{sm}}{\pi}$$

La corriente continua por la carga:

$$I_{occ} = \frac{V_{occ}}{RL} = \frac{V_{sm}}{\pi RL} = \frac{I_{om}}{RL}$$

Otro parámetro de interés en el circuito rectificador de media onda es el valor eficaz:

$$V_{oef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t)^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{sm}^2 \text{sen}^2 d(\omega t)} = \frac{V_{sm}}{2}$$

$$I_{oef} = \frac{V_{oef}}{RL}$$

Del análisis de estos parámetros se observa que sólo una parte de la tensión de entrada se convierte en tensión continua a la salida. Por ello se utilizan filtros que mejoran esta característica como se analizará posteriormente.

La diferencia entre la tensión de salida $v_o(\omega t)$ y la tensión continua V_{occ} se conoce como tensión de rizado $v_r(\omega t)$. Visto de otra forma, la tensión de salida está compuesta por una tensión continua y una tensión de rizado. La tensión de rizado $v_r(\omega t)$ se puede expresar:

$$v_r(\omega t) = v_o(\omega t) - V_{occ}$$

El valor eficaz de la tensión de rizado V_{ref} puede calcularse:

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (v_o(\omega t) - V_{occ})^2 d(\omega t)} = \sqrt{V_{oef}^2 - V_{occ}^2}$$

Generalmente, el efecto de la tensión de rizado se expresa por el factor de rizado r definido por:

$$r = \frac{V_{ref}}{V_{occ}}$$

Reemplazando y operando se obtiene:

$$r = \frac{\sqrt{V_{oef}^2 - V_{occ}^2}}{V_{occ}} = \frac{1.21 V_{occ}}{V_{occ}} = 1.21$$

El factor de rizado suele expresarse en porcentaje: $r = 121\%$. Este valor es válido para el rectificador de media onda.

La potencia total en la carga está dada por:

$$P_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t)^2 RL d(\omega t) = I_{oef}^2 RL = V_{oef} RL$$

La potencia de continua en la carga:

$$P_{occ} = V_{occ} I_{occ} = I_{occ}^2 RL$$

La eficacia del rectificador se tiene en cuenta mediante la eficiencia de rectificación $\eta\%$:

$$\eta\% = \frac{P_{occ}}{P_o} \times 100 = \frac{V_{occ} I_{occ}}{V_{oef} I_{oef}}$$

Para el rectificador de media onda $\eta \cong 40.6\%$ en las mejores condiciones, resistencia del diodo despreciable frente a la resistencia de carga.

Si se usa el modelo de diodo con $V_\gamma \neq 0$ ($V_\gamma = 0.7$ V para diodo de silicio) deberá considerarse que el diodo comenzará a conducir para el valor determinado por:

$$V_{sm} \text{sen}(\omega t_1) = V_{\gamma}$$

En las ecuaciones anteriores deberán hacerse las modificaciones correspondientes. En la mayoría de las aplicaciones suele considerarse el modelo ideal para $V_{sm} \geq 7 \text{ V}$. En la Figura 4 se muestra una simulación de un circuito rectificador de media onda realizado con el software LTSpiceIV. Se ha utilizado un diodo básico. Como puede observarse en la Figura 4 hay una pequeña caída de tensión debido al comportamiento real del diodo y en el semiciclo negativo de la entrada sobre el diodo aparece la máxima tensión en inversa igual al máximo de la tensión de entrada.

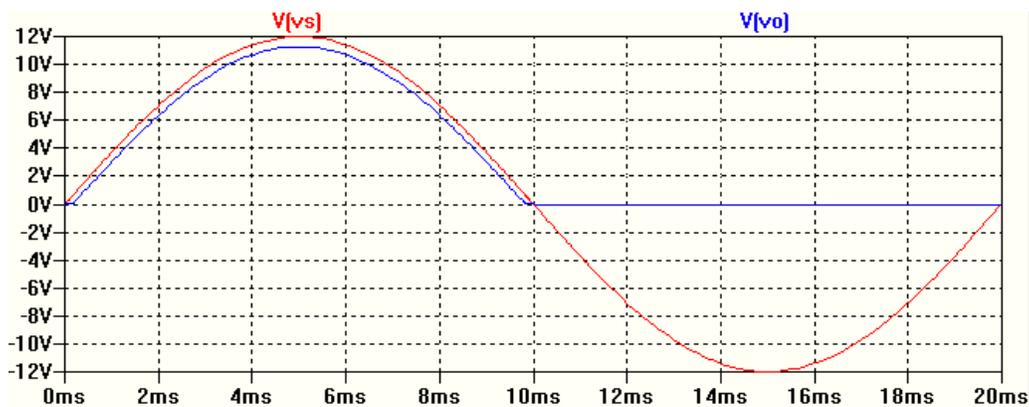


Figura 4

Debido al bajo rendimiento y alto valor de las componentes de rizado se utiliza la rectificación de onda completa. En forma sencilla un rectificador de onda completa está formado por dos rectificadores de media onda cada uno funcionando para un semiciclo de la tensión de entrada. Se dispone de dos configuraciones de rectificador de onda completa: rectificador con punto medio y rectificador puente.

El circuito rectificador de onda completa con punto medio tiene la disposición circuital de la Figura 5.

Figura

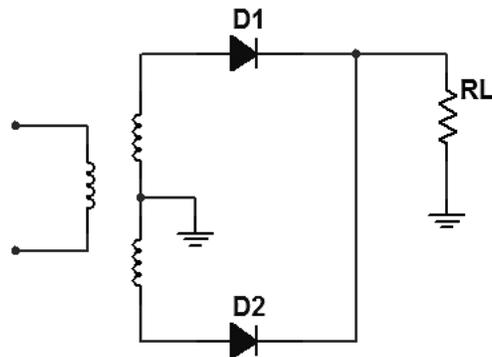


Figura 5

El análisis del circuito se puede dividir en dos intervalos correspondientes a cada semiciclo de la tensión de entrada $v_s(\omega t)$. Durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada $v_s(\omega t)$ el diodo D1 queda polarizado en directa y el diodo D2 en inversa. En esta situación el diodo D2 se comporta como circuito abierto, por lo que el circuito resultante es un rectificador de media onda, Figura 6. Se deberá tener en cuenta que la máxima tensión en inversa que debe soportar el diodo D2 es aproximadamente $2 V_{sm}$.

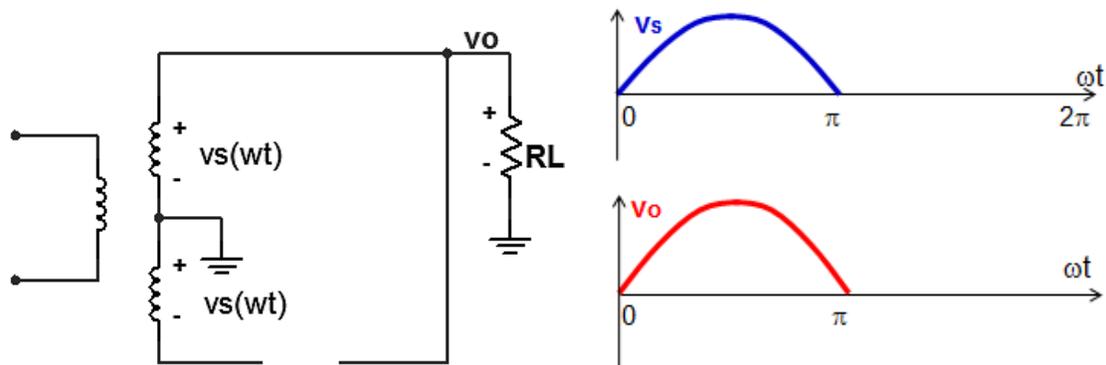


Figura 6

En el semiciclo negativo de la tensión de entrada $v_s(\omega t)$ el diodo D1 queda polarizado en inversa y el diodo D2 en directa. El circuito resultante es otro rectificador de media onda, Figura 7. El diodo D1 soportará $2 V_{sm}$ como máxima tensión en inversa.

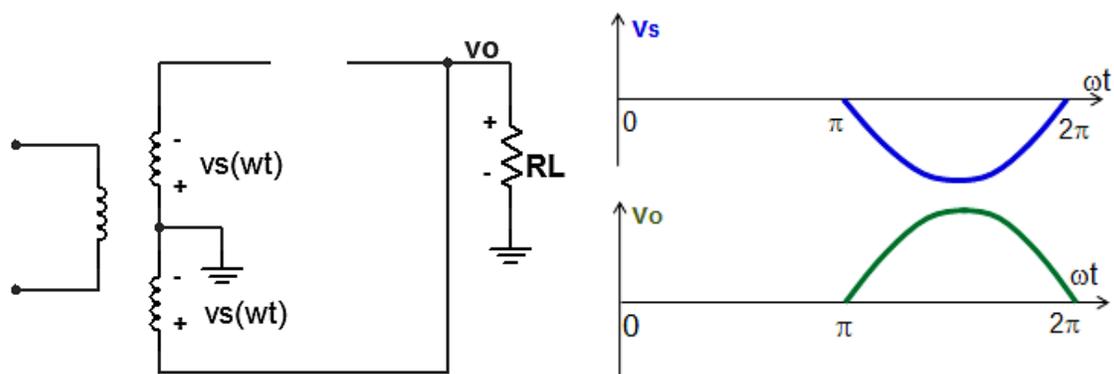


Figura 7

La tensión de salida $v_o(\omega t)$ resultará de la contribución de ambos circuitos rectificadores como se aprecia en la Figura 8. Se muestra también la tensión resultante sobre el diodo D1 suponiendo que el mismo se comporta como ideal.

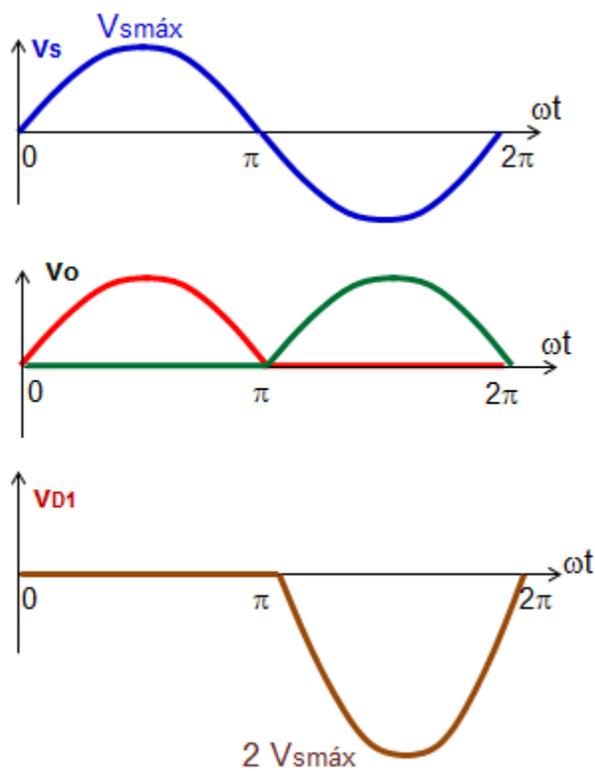


Figura 8

El valor medio de la tensión de salida queda determinado por:

$$V_{occ} = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} v_o(\omega t) d(\omega t) = \frac{2 V_{sm}}{\pi}$$

Nuevamente se ha supuesto modelo de diodo ideal. La corriente media en la carga será:

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

El valor eficaz de la tensión sobre la carga:

$$V_{oef} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} v_o(\omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{V_{sm}}{\sqrt{2}}$$

El factor de rizado puede determinarse por:

$$r = \frac{\sqrt{V_{oef}^2 - V_{occ}^2}}{V_{occ}} = 0.48$$

Expresado en porcentaje $r \cong 48\%$. Este valor expresa una notable mejora respecto del rectificador de media onda.

La eficiencia de rectificación se duplica:

$$\eta\% = \frac{P_{occ}}{P_o} \times 100 = \frac{V_{occ} I_{occ}}{V_{oef} I_{oef}} \cong 81\%$$

Es el máximo rendimiento en las mejores condiciones.

El mismo tipo de análisis puede hacerse para el circuito rectificador onda completa puente mostrado en la Figura 9.

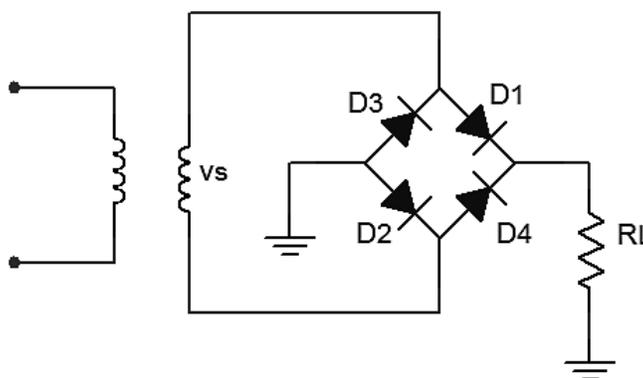


Figura 9

Si bien este tipo de rectificador utiliza cuatro diodos tiene como ventaja que no utiliza un transformador con punto medio resultando más económico. Analizando el circuito de la Figura 9 se observa que durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada conducen los diodos D1 y D2, mientras D3 y D4 quedan polarizados en inversa. Utilizando para los diodos un modelo de diodo ideal resulta en circuito de la Figura 10.

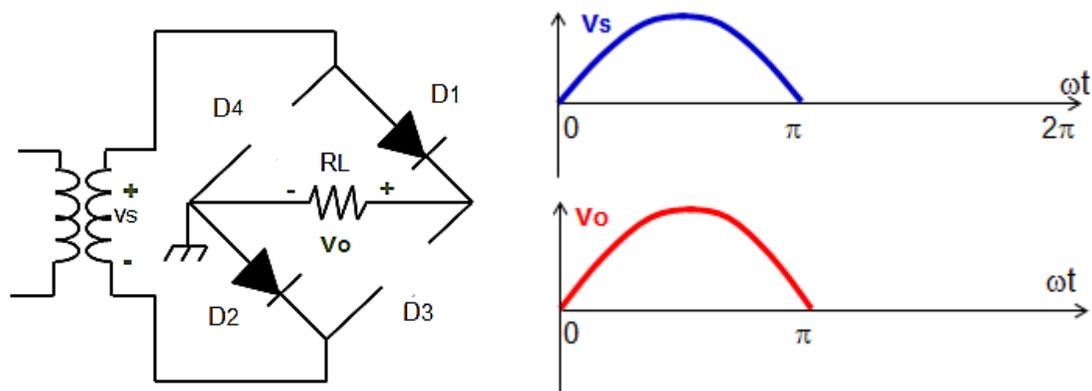


Figura 10

En el semiciclo negativo de la tensión de entrada D1 y D2 quedan polarizados en inversa mientras que D3 y D4 conducen. El comportamiento del circuito se muestra en la Figura 11.

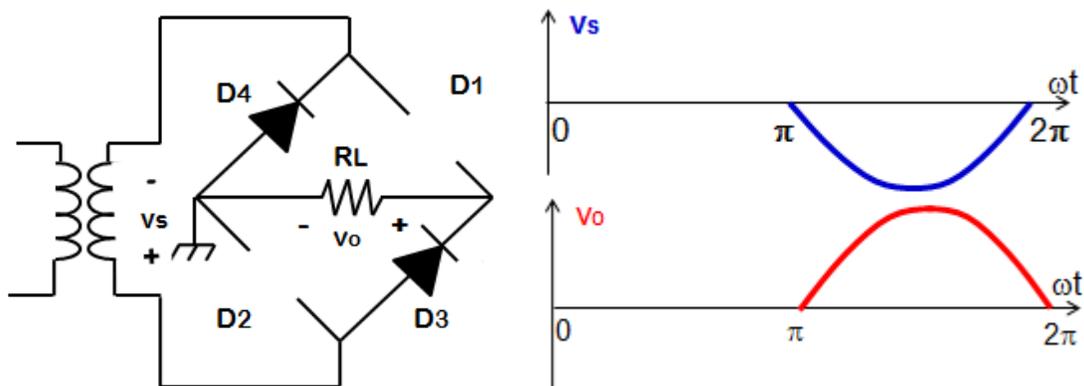


Figura 11

En este circuito como los diodos conducen de a pares, y en caso de no considerar el modelo ideal, la caída de tensión en los diodos será aproximadamente $2V_\gamma$. Por otra parte el valor de la tensión inversa de pico sobre cada diodo en el caso ideal es V_{sm} .

Rectificadores con filtros

Si bien la rectificación de onda completa permite mejorar la eficiencia y el factor de rizado, con el propósito de mejorar aún más la tensión continua sobre la carga se utilizan filtros. El filtro más utilizado en circuitos de baja potencia es un capacitor que se coloca en

paralelo con la carga. En la Figura 12 se muestra el circuito para un rectificador de media onda.

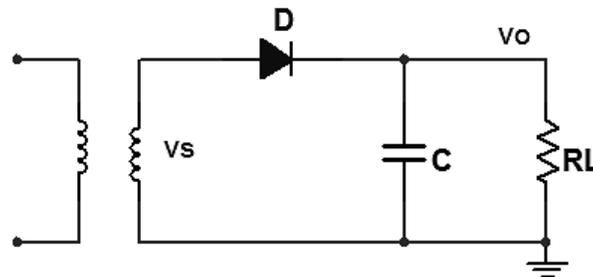


Figura 12

El funcionamiento es simple. En cada ciclo positivo de la tensión de entrada el capacitor almacena energía y se carga mientras el diodo esté polarizado en directa. En la Figura 13 se muestra la tensión de salida $v_o(\omega t)$ para un caso genérico comparada con la tensión de entrada $v_s(\omega t)$. Cuando la tensión de entrada disminuye por debajo de la tensión del capacitor el diodo queda polarizado en inversa y el capacitor se descarga sobre el resistor de carga R_L . Cuando el diodo conduce la forma de onda de tensión sobre la carga sigue a la tensión $v_s(\omega t)$. Cuando el diodo deja de conducir la forma de onda de tensión será de forma exponencial decreciente con una constante de tiempo $\tau = R_L C$.

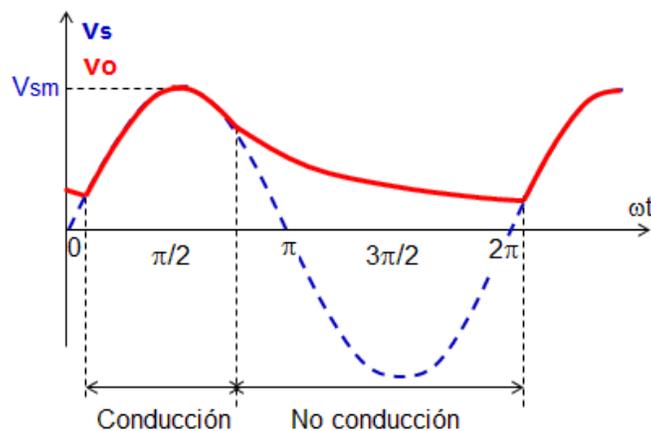


Figura 13

Si el diodo es ideal el capacitor se carga al pico de la tensión de entrada V_{sm} .

En la Figura 14 se muestra la tensión sobre la carga considerando una constante de tiempo $\tau = R_L C \gg T$. En ese caso la exponencial de descarga puede aproximarse a un comportamiento lineal, Figura 14. La tensión de descarga total del capacitor es V_r .

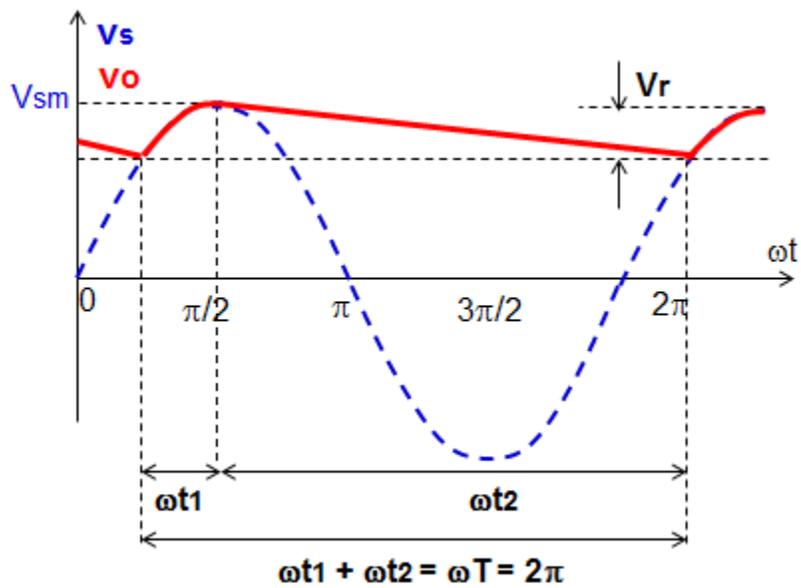


Figura 14

La corriente por el diodo toma la forma de pulsos que permiten recuperar la carga perdida por el capacitor en cada ciclo de descarga, Figura 15. Si el valor de la capacitancia es grande el capacitor C debe recuperar la carga en un tiempo pequeño y la amplitud pico del pulso de la corriente por el diodo puede ser muy elevado. Este valor debe tenerse en cuenta en el diseño del circuito para la selección del diodo. Dado que el pulso se repite periódicamente este valor de pico recibe el nombre de **corriente de pico repetitiva**.

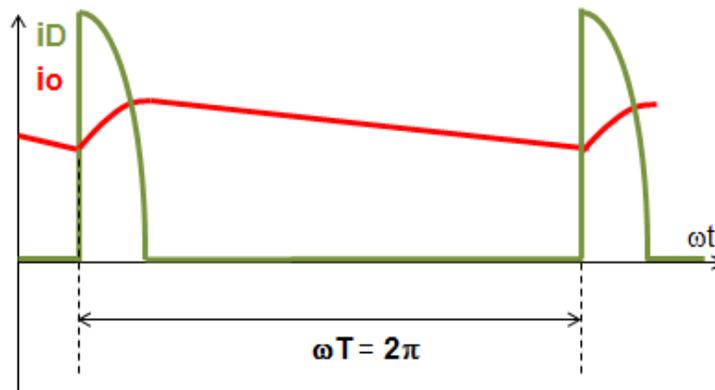


Figura 15

Si en el momento inicial de encendido de la fuente el capacitor no posee carga, $v_c(0) = 0$, la corriente por el diodo toma un valor muy elevado ya que queda limitada por la resistencia de la fuente y, en un diodo real, por la pequeña resistencia del diodo. Este

valor inicial de corriente se denomina **corriente pico inicial** y es un parámetro de selección del diodo.

La tensión sobre la carga puede dividirse en dos intervalos. En la Figura 16 el tiempo t_1 es el tiempo de carga del capacitor y t_2 el tiempo de descarga del capacitor. Para el caso del rectificador de media onda $t_1 + t_2 = T$. Si el rectificador es de onda completa $t_1 + t_2 = T/2$.

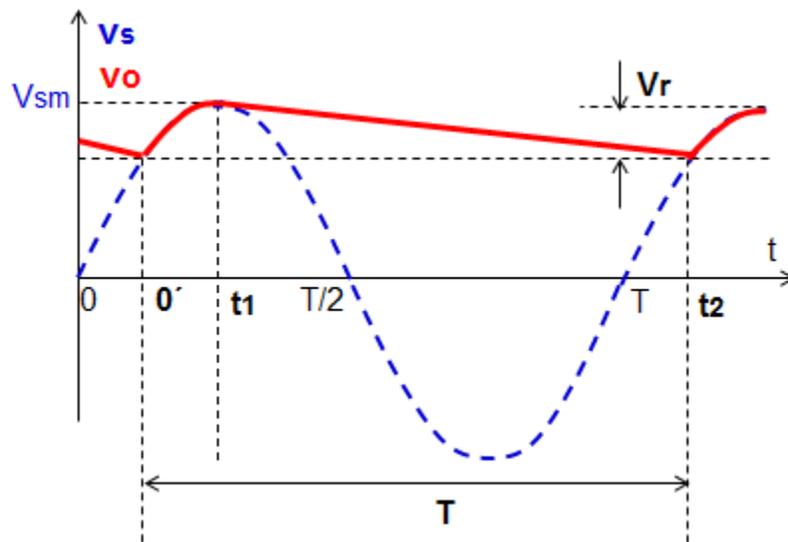


Figura 16

Si realizamos el análisis para el rectificador de media onda para el caso del diodo ideal, cuando el capacitor se carga la tensión de salida sigue a la tensión de entrada. Considerando el origen, $t = 0'$, en el punto indicado en la Figura 16, la tensión de salida $v_o(\omega t)$ durante el intervalo correspondiente entre $0'$ y t_1 será de la forma:

$$v_o(\omega t) = V_{sm} \operatorname{sen} \omega t$$

Entre t_1 y t_2 la tensión de salida puede expresarse:

$$v_o(\omega t) = V_{sm} e^{-(t-t_1)/RLC}$$

La variación de tensión en el capacitor se corresponde con la tensión de rizado V_r . En este caso ideal y según puede verse en la Figura V_r puede calcularse por:

$$V_r = V_{sm} - V_{sm} e^{-(t_2-t_1)/RLC}$$

Si la constante de tiempo es grande comparada con el tiempo de descarga t_2 y el tiempo de carga t_1 es mucho menor que t_2 se puede considerar que $t_2 \cong T$. En el caso de un rectificador de onda completa vale el mismo análisis pero en este caso $t_2 \cong T/2$, donde T es el período de la señal de entrada. Con la consideración anterior:

$$V_r = V_{sm} - V_{sm} e^{-T/RLC}$$

En la ecuación anterior si se desarrolla la exponencial en serie y se toma el término lineal:

$$e^{-T/RLC} \cong 1 - \frac{T}{RLC}$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación de la tensión de rizado se obtiene:

$$Vr \cong Vsm \frac{T}{RLC}$$

Relacionando el periodo T con la frecuencia de la señal de entrada: $T = 1/f$ resulta:

$$Vr \cong Vsm \frac{1}{fRLC}$$

Este es un valor estimativo de la tensión Vr de rizado en función del valor de la capacitancia de C. De esta relación puede calcularse un valor aproximado del valor de C para una tensión de rizado en particular.

$$C = \frac{Vsm}{fRLVr}$$

Como se dijo anteriormente en el caso del rectificador de onda completa $T = 1/2f$ resultando:

$$Vr \cong Vsm \frac{1}{2fRLC}$$

Ejemplo: efecto de la capacitancia sobre la tensión de salida

Para analizar el efecto del valor de la capacitancia C sobre la tensión de salida vo se utiliza el circuito de la Figura 17 para realizar una simulación con LTSpiceIV. Se realizará un análisis temporal para dos ciclos de la tensión de entrada variando el valor de la capacitancia. Como puede observarse en el gráfico de la tensión vo(ωt), Figura 18, a medida que aumenta el valor de C, y por lo tanto también lo hace la constante de tiempo $\tau = RLC$, aumenta el valor medio de la tensión en la carga, área bajo la curva evaluada en un periodo de la señal de entrada.

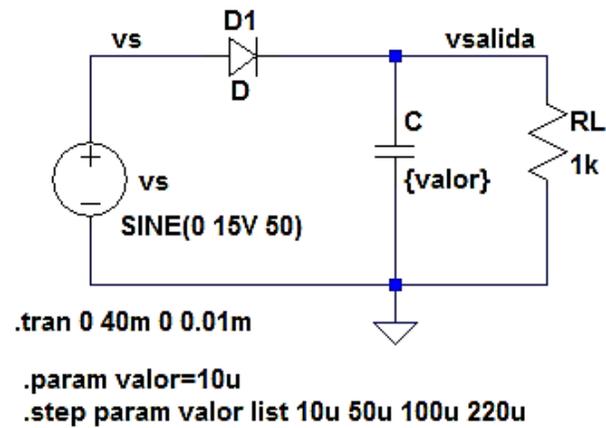


Figura 17

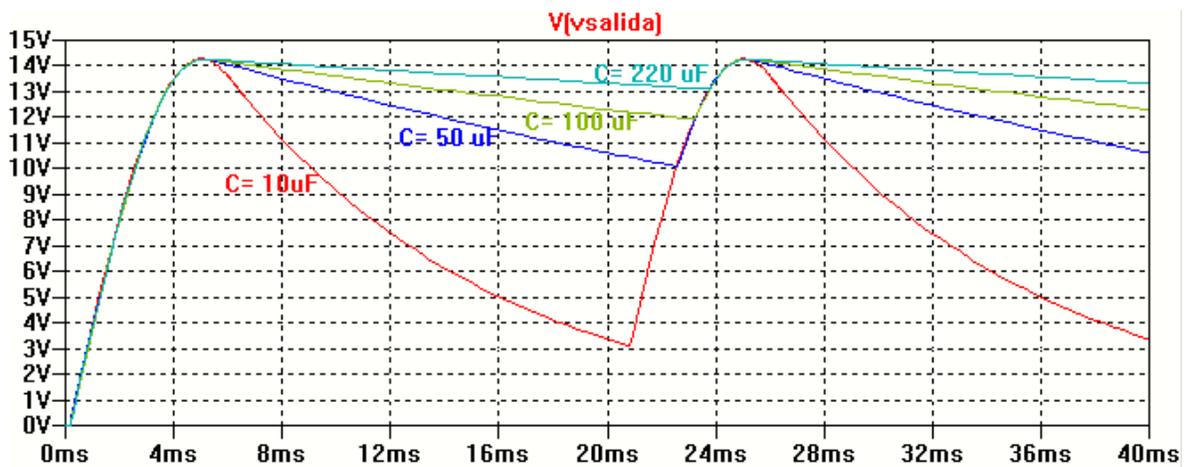


Figura 18

En la Figura 19 se aprecia la variación de la corriente por el diodo para los distintos valores de capacitancia del ejemplo. Se observa la diferencia entre el valor de la corriente pico inicial y la corriente pico repetitiva.

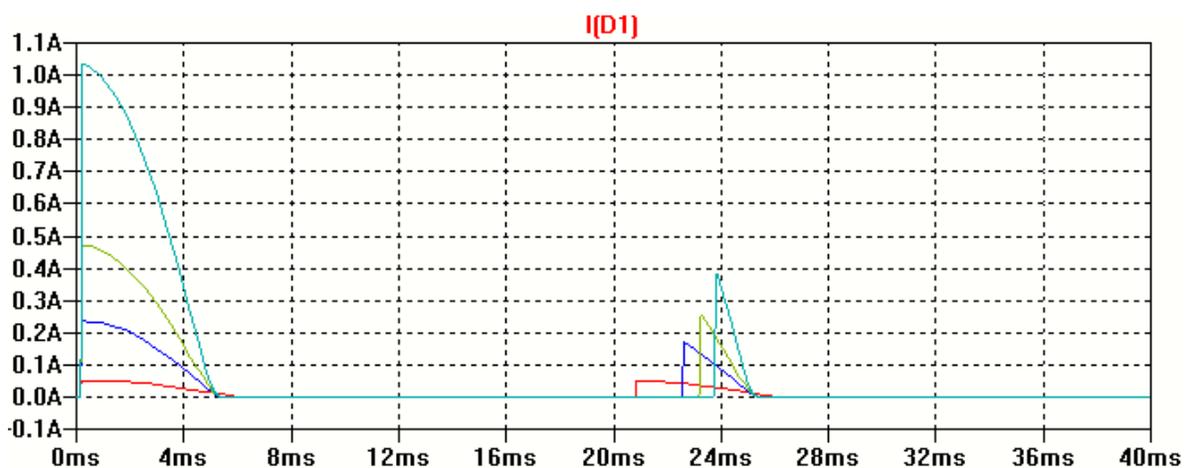


Figura 19

Bibliografía

Floyd T., Dispositivos electrónicos, Ed. Pearson (Octava Edición)

Boylestad R. - Nashelsky L., Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, Ed. Pearson (Décima Edición)

Malvino A. - Bates D., Principios de Electrónica, Ed. Mc Graw Hill (Séptima Edición)

Rashid M., Circuitos Microelectrónicos: Análisis y diseño, Ed. International Thomson Editores