
INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA RECTIFICACIÓN

Realizado por : Ing. Pablo Morcelle del Valle

El presente texto introduce el estudio de circuitos que incluyen dispositivos electrónicos, básicamente el *diodo* y el *tiristor*, elementos de la familia de los denominados *rectificadores*.

Conocer los fundamentos físicos del comportamiento y funcionamiento de dichos dispositivos traería aparejado el análisis microscópico de ciertos elementos utilizados en su fabricación (*semiconductores*), combinado con aplicaciones de la física cuántica; lo cual queda fuera del alcance del presente texto. Sólo bastará presentar las características corriente vs. tensión en bornes de los elementos y a partir de ello enunciar el comportamiento y la aplicación de las leyes fundamentales de la electrotecnia para el análisis y resolución de circuitos que contengan este tipo de dispositivos.

Básicamente, se estudiará cómo convertir una señal *bidireccional* (alterna senoidal), cuyo valor medio es cero, en una señal *unidireccional*, cuyo valor medio es distinto de cero. Esto muchas veces se conoce como *conversión CA/CC* (corriente alterna a corriente continua). Para lograr la conversión CC/CA se utiliza el dispositivo denominado *diodo rectificador* formando parte de un circuito llamado *rectificador*, del cual se estudian diversos tipos y su respectivo funcionamiento.

Más aún, se verá que es posible realizar el *control de la potencia* en una carga mediante la variación del valor medio obtenido, utilizando dispositivos que son variantes del diodo rectificador (*tiristor*), conformando circuitos denominados *rectificadores controlados*.

1. Semiconductores

Como se mencionó, no es objeto de este texto realizar el estudio microscópico que explica el funcionamiento detallado de los elementos semiconductor. Existe numerosa y variada bibliografía que trata con diferentes niveles de detalle este estudio.

No obstante, puede decirse que los semiconductores son elementos ubicados en el grupo IV de la tabla periódica, cuyas propiedades se encuentran en una región intermedia entre los materiales conductores y los materiales aislantes.

Los elementos semiconductores típicos más utilizados son el silicio y el germanio.

Se puede observar que la denominación *semiconductor* es bastante adecuada viendo simplemente los valores de conductividad del cobre (conductor, $0,59 \times 10^6$ S/cm), vidrio (aislante, 10^{-16} a 10^{-13} S/cm) y silicio (semiconductor, 10^{-8} a 10^{-1} S/cm).

2 Diodo

La Figura 1 muestra un diodo real y su símbolo eléctrico.

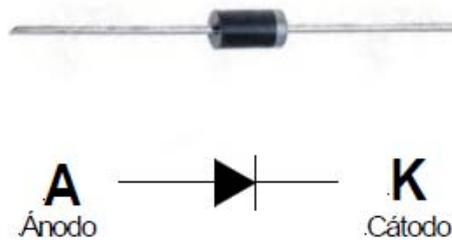


Figura 1 Diodo real y símbolo eléctrico

El símbolo eléctrico del diodo hace que resulte intuitivo su funcionamiento; se verá el por qué en los párrafos que siguen.

El diodo fue concebido como un dispositivo cuyo comportamiento depende de la polaridad de la tensión entre sus bornes.

Si dicha tensión es positiva en el ánodo respecto del cátodo, el diodo se comporta como una resistencia de muy bajo valor, idealmente cero. En esta condición se dice que el diodo se encuentra en *polarización directa* y permite la conducción, estableciéndose una corriente denominada *corriente directa*.

En cambio, si la tensión es positiva en el cátodo respecto del ánodo, su comportamiento se asemeja a una resistencia de muy alto valor, idealmente infinito. En esta condición el diodo se encuentra en *polarización inversa*, no permitiendo la conducción. En este caso, en un diodo real, se establece una corriente que se denomina *corriente inversa de saturación*, la cual es prácticamente constante y despreciable frente a la corriente directa.

Si la tensión inversa sigue aumentando, en algún momento se alcanzará un valor suficientemente grande, denominado *tensión de ruptura* U_R , como para provocar la destrucción del diodo.

En la práctica, y partir del estudio detallado del comportamiento del diodo que no se incluye aquí, surge la siguiente expresión, denominada *ecuación del diodo*:

$$i_D = I_0(e^{q_u_D / kT} - 1) \quad \text{Ec. 1}$$

en donde i_D : corriente directa
 I_0 : corriente inversa de saturación
 q : carga de un electrón
 u_D : tensión sobre el diodo
 k : constante de Boltzmann
 T : temperatura del elemento en [K]

Para tener una idea de las magnitudes, debe tenerse en cuenta que i_D puede ser del orden de 10^{-3} a 10^2 A, mientras que I_0 puede valer de 10^{-9} a 10^{-15} A.

La Figura 2 muestra una representación gráfica muy aproximada de la Ec. 1.

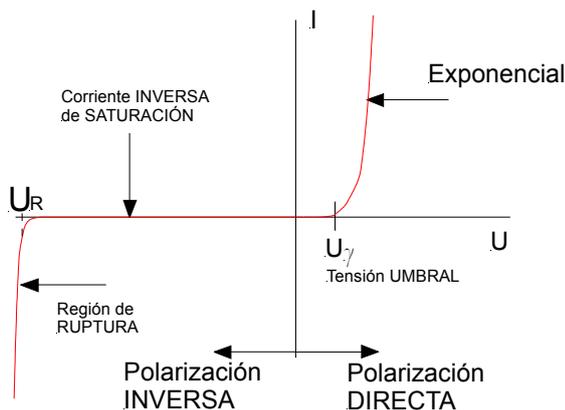


Figura 2 Representación de la Ec. 1

En la gráfica de la Figura 2 pareciera que la corriente inversa de saturación vale cero. En realidad, si la escala de corriente es la misma en ambos semiplanos (de polarización directa y de polarización inversa), no sería posible distinguir el valor de I_0 comparado con los valores de corriente directa; pero debe tenerse en mente que I_0 existe y es distinta de cero en un diodo real.

Debe observarse también que, en polarización directa, los valores de corriente comienzan a ser apreciables recién cuando la tensión toma valores, también apreciables, por encima de cero. Dicho valor de tensión que se suele denominar *tensión umbral* U_γ depende del tipo de material del que está constituido el diodo; para diodos de germanio, U_γ es del orden de 0,2 V, mientras que para diodos de silicio, $U_\gamma \approx 0,6$ V. A partir de la tensión umbral, el crecimiento exponencial de la corriente directa es muy rápido y resulta prácticamente lineal respecto de la tensión.

Respecto del comportamiento con tensión inversa, debe observarse que si se alcanza el valor U_R la gráfica presenta un codo y partir de dicha tensión, hacia valores más negativos, con pequeños incrementos de tensión la corriente crece abruptamente ingresando en lo que se denomina *zona de ruptura*. Esta zona de la característica es de funcionamiento indeseado, excepto en diodos especiales que están diseñados para funcionar en dicha zona de ruptura, denominados *diodos zener*, cuyo estudio queda fuera del alcance de este texto.

Para evitar el uso de la Ec. 1 y que las ecuaciones de resolución del circuito resulten muy tediosas, en la mayoría de los casos se pueden realizar aproximaciones utilizando modelos sencillos. Las gráficas de la Figura 3 presentan algunas de dichas aproximaciones.

Como se mencionara al inicio de la presente sección, el diodo fue concebido como un dispositivo cuyo funcionamiento depende de la polaridad de la tensión aplicada. En resumidas cuentas, y para un

diodo ideal, si el potencial del ánodo es mayor que el del cátodo, el dispositivo permite el paso de la corriente en el sentido $A \rightarrow K$, comportándose como un *cortocircuito* ($u_D = 0$ V) y el valor la corriente quedará establecido por el funcionamiento del resto del circuito. En cambio, si la polaridad de la tensión aplicada a los bornes del elemento es la opuesta, el diodo se comporta como un *circuito abierto* y el elemento bloqueará el paso de la corriente ($i_D = 0$ A); su tensión u_D en este caso quedará definida por el funcionamiento del resto del circuito.

Lo descrito en el párrafo anterior queda gráficamente expresado mediante el diagrama de la Figura 3a), con lo cual queda representado el *modelo ideal* del diodo.

El modelo de la Figura 3b) es similar al de la Figura 3a), sólo que tiene en cuenta la tensión umbral, representada en este caso por una fuente de tensión, tal cual se indica.

Como se mencionó más arriba, y observando la Figura 1, una vez que se supera la tensión umbral, la corriente directa del diodo crece rápidamente y en forma prácticamente lineal. En base a esto, el modelo aproximado de la Figura 3c) pone de manifiesto dicho fenómeno mediante una recta cuya pendiente se puede interpretar como la inversa de una resistencia R_D . Este modelo se completa conectando en serie con la fuente que representa la tensión umbral dicha resistencia R_D .

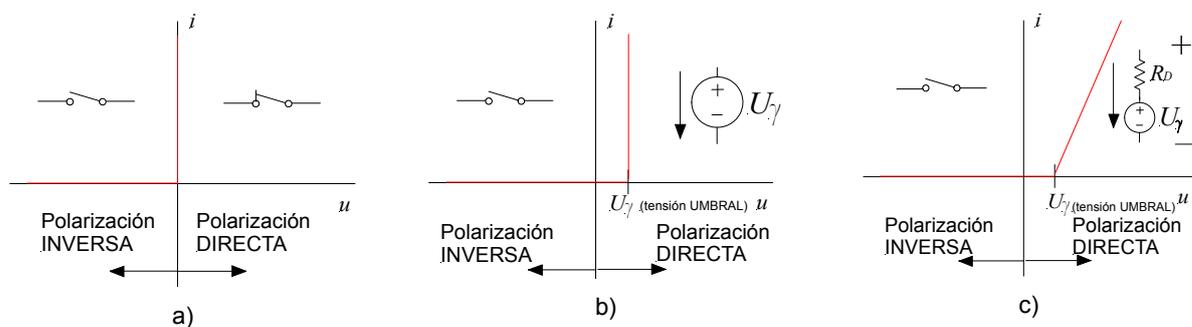


Figura 3 Diferentes modelos del diodo según la aproximación a la característica de la Figura 1

La elección de tales modelos en el análisis de circuitos dependerá de diversos factores.

Normalmente, cuando se comienza a analizar un circuito cualquiera, siempre es conveniente utilizar el modelo más simple de la Figura 3a); esto ayuda a una rápida comprensión del funcionamiento del circuito en cuestión. Estos modelos a menudo se denominan de *gran señal*.

Cuando se requiere una representación más exacta del funcionamiento de un circuito, se utilizan los modelos más complejos (Figuras 3b) y 3c)), llegando incluso en algunos casos a ser necesario utilizar el modelo representado por la Ec. 1 y la Figura 2. Estos modelos suelen denominarse de *pequeña señal*, que representan el comportamiento del diodo en detalle, en especial, ante pequeños cambios de tensión y corriente. Para estas situaciones muchas veces resulta conveniente y más adecuado emplear resoluciones gráficas que permitan un resultado aproximado con el objeto de localizar el entorno del punto de funcionamiento del circuito, para luego, por aproximaciones sucesivas, determinar el punto exacto. Esta forma de encarar el análisis escapa a los objetivos de este texto; por lo cual, a menos que se indique lo contrario, en este texto se utiliza el modelo de la Figura 3a).

3 Tiristor

El tiristor es un dispositivo similar al diodo, integrante de la familia de los denominados *SCR* (*Silicon Controlled Rectifier*), pero que posee un tercer terminal (de control) que permite comandar el inicio de la conducción del dispositivo. La Figura 4 muestra algunos tiristores reales y la Figura 5 presenta el símbolo eléctrico.



Figura 4 Diferentes tipos de tiristor

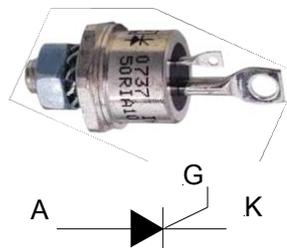


Figura 5 Símbolo del tiristor

Según se observa en la Figura 5, el símbolo del tiristor es similar al del diodo, sólo que se ha agregado un tercer terminal identificado **G**, que se denomina *puerta*, *compuerta* o *gate* (de acuerdo a su denominación de origen). Dicha compuerta se utiliza para realizar el control de la conducción del tiristor; es decir que el dispositivo no va a alcanzar dicho estado hasta que se aplique una señal adecuada en ese terminal, aún cuando la polarización del tiristor sea directa.

La sección siguiente describe en detalle el funcionamiento del tiristor.

3.1 Característica corriente vs. tensión del tiristor

La Figura 6 presenta la característica corriente vs. tensión del tiristor.

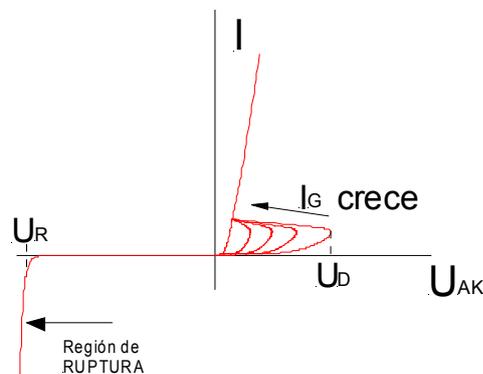


Figura 6 Característica I-U del tiristor

Se observa que para polarización inversa el comportamiento es similar al diodo, por lo cual no se va a entrar en detalles respecto del comportamiento en esta condición.

En polarización directa, y si la corriente del terminal G vale $I_G = 0$, el tiristor recién va a entrar en estado de conducción si la tensión entre terminales principales U_{AK} alcanza la tensión U_D . Al intentar superar dicha tensión, la característica $I-U$ del dispositivo muestra que la tensión entre terminales A-K desciende bruscamente y si continúa aumentando la tensión, la corriente se incrementará proporcionalmente. La curva muestra que dicha proporcionalidad es tal que su comportamiento es el de una resistencia de muy bajo valor.

Si, en cambio, la corriente de compuerta comienza a tomar valores mayores que cero, la conducción o *disparo* del dispositivo se iniciará para valores de U_{AK} menores que U_D . Cuanto mayor sea I_G , menor será la tensión de disparo U_{AK} ; si la corriente de compuerta es suficientemente grande, el inicio de la conducción ocurrirá ni bien el diodo ingresa en polarización directa.

A los fines prácticos, una vez que el tiristor se encuentra en conducción la resistencia del dispositivo se puede considerar nula.

4 Conversión CA/CC - Control de potencia

Muchas veces resulta necesario contar con fuentes de tensión continua, en particular cuando se trata de alimentar circuitos o dispositivos electrónicos. En general, las fuentes de alimentación primaria de tensión provienen de la red de distribución cuya forma de onda es alterna senoidal y su valor medio es cero.

A pesar de la idea generalizada sobre el tema, una tensión o corriente se puede considerar *continua* si su valor medio es distinto de cero, sin importar su forma. A partir de este concepto es posible obtener tensiones y corrientes continuas a partir de circuitos sencillos con diodo y tiristor. Por lo tanto, con dichos dispositivos, es posible realizar el análisis de una familia de circuitos denominados *convertidores de alterna a continua CA/CC*, que son ni más ni menos que circuitos que permiten obtener señales con valor medio distinto de cero a partir de señales con valor medio igual a cero.

En primera instancia todos los circuitos que se estudian en las secciones 5 y 6 comprenden sólo aquéllos cuyas cargas son puramente resistivas.

Posteriormente, en la sección 7, se extenderá el estudio brevemente a casos con cargas formada por combinaciones de resistor-inductor y resistor-capacitor. En el primer caso el estudio se relaciona con la importancia del control de potencia en máquinas rotantes, las cuales son posibles de modelar mediante sencillos circuitos RL. En el caso de combinación resistor-capacitor se destaca la necesidad de proveer el *filtrado* de las componentes de alta frecuencia, lo que permite obtener tensiones en la carga prácticamente independientes del tiempo.

5 Rectificadores

Un circuito rectificador es aquél que permite efectuar la conversión CA/CC.

El elemento básico que permite tal conversión es el diodo, estudiado en la sección 2. Es posible obtener este resultado mediante diversos circuitos con diferentes configuraciones de dichos elementos.

Más aún, es posible conseguir la variación del valor medio obtenido en la conversión CA/CC utilizando tiristores; tema que se estudia en la sección 6.

Las secciones que siguen presentan diferentes circuitos que permiten obtener señales continuas (es decir, con valor medio distinto de cero) de diferentes valores y características.

5.1 Rectificador monofásico de media onda

El circuito rectificador más simple y que ilustra el comportamiento de un diodo es el *rectificador monofásico de media onda* que se muestra en la Figura 7.

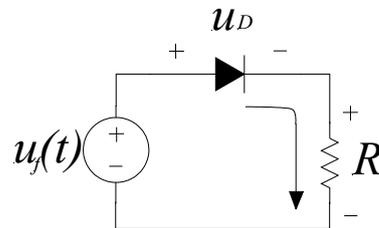


Figura 7 Rectificador monofásico de media onda

Teniendo en cuenta lo mencionado respecto de la conversión CA/CC, el análisis típico de este circuito implica suponer que la tensión de la fuente $u_f(t)$ es senoidal. Suponiendo además que el diodo es ideal, resulta evidente que ni bien la tensión de la fuente toma valores por encima de cero con la polaridad indicada, el diodo se polariza en directa; por lo tanto el diodo conduce sin restricciones de acuerdo al modelo de Figura 3a) y la tensión en el resistor es igual a la de la fuente. Transcurrido el medio ciclo completo, cuando la tensión $u_f(t)$ cruza por cero y comienza a tomar valores negativos, el diodo se polariza en inversa, no permitiendo que se establezca corriente en el circuito, por lo cual $u_R(t) = 0$ y $u_D(t) = u_f(t)$ durante todo el semiciclo negativo de la tensión de la fuente. La gráfica de las corrientes y tensiones se muestra en la Figura 8.

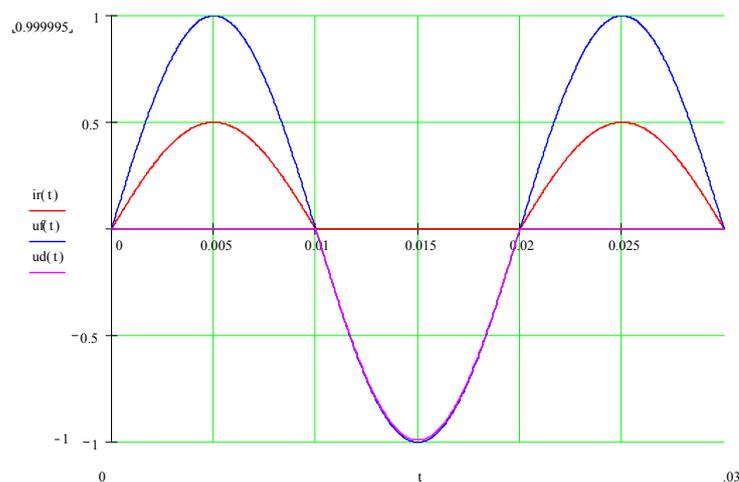


Figura 8 Formas de onda del rectificador monofásico de media onda

Se pueden observar en la Figura 8 las formas de onda de las tensiones y corriente del circuito rectificador monofásico de media onda.

En color azul se muestra la onda de tensión de la fuente $u_f(t)$, la cual habitualmente se toma como referencia. En color rojo se observa la corriente del circuito $i(t)$, en una escala adecuada. Vale agregar que la tensión en el resistor $u_R(t)$ coincide con $i(t)$, a través de la ley de Ohm, pero debiéndose asig-

nar un factor de escala diferente al de la corriente. Finalmente, en color magenta, se muestra la tensión de diodo $u_D(t)$.

A partir de los resultados del análisis de las formas de onda se pueden efectuar algunas evaluaciones numéricas y definir algunos parámetros de diseño.

Evaluaciones numéricas

Respecto del primer objetivo planteado al introducir este tipo de circuitos se encuentra la evaluación del valor medio de la señal resultante en el resistor de carga, tensión y/o corriente. Dicho valor medio será representativo del valor *de continua* de la señal.

Otra evaluación importante está constituida por el valor eficaz o valor medio cuadrático de $u(t)$ e $i(t)$; dicha importancia radica en la relación del valor eficaz con la potencia.

Recordando las definiciones de valor medio y de valor eficaz se pueden escribir las ecuaciones siguientes

$$I_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad \text{Ec. 2}$$

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad \text{Ec. 3}$$

En el caso del rectificador de media onda bajo estudio, queda como ejercicio para el lector verificar que la resolución de las Ec. 2 y Ec. 3 cuando $i_{Rc}(t) = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t)$, resultan

$$I_{medio} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\pi} \quad \text{Ec. 4}$$

$$I_{eficaz} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{2} \quad \text{Ec. 5}$$

Parámetros de diseño

La elección de un diodo en particular implica definir una serie de *parámetros de diseño*, los cuales surgen de las formas de onda y las evaluaciones numéricas vistas.

La *corriente máxima* o *de cresta* que debe soportar el diodo es uno de dichos parámetros. En general dicha corriente corresponde a la amplitud de la onda senoidal de corriente, según se vió en la Figura 5; no obstante, en ciertos casos dicha corriente puede resultar bastante mayor, como se verá.

La *potencia máxima admisible* en polarización directa es otro parámetro de diseño que no debe dejar de evaluarse. Si bien el análisis simplificado de circuitos con diodo considera su modelo más simple como una "llave cerrada" en polarización directa, por lo cual una rápida evaluación de la potencia en el mismo resulta cero debido a que $u_D(t) = 0$, recordando la característica $I-U$ del diodo real de la Figura 1 se puede observar que además de la corriente directa del diodo aparece una tensión, por lo que el producto $p(t) = u_D(t) \cdot i_D(t) \neq 0$. Por lo tanto valor medio de este producto debe ser tenido en cuenta en uso continuo.

La *tensión cresta inversa* también es un parámetro importante a considerar. Dicha tensión es la que aparece sobre el diodo en el intervalo de no conducción, y debe mantenerse por debajo de U_R , según el gráfico de la Figura 1.

5.2 Rectificador monofásico de onda completa con punto medio

Otro circuito rectificador muy utilizado es el *rectificador monofásico de onda completa con punto medio*, el cual se muestra en la Figura 9.

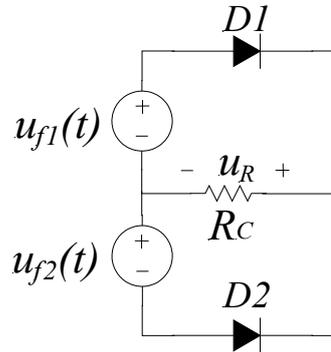


Figura 9 Rectificador monofásico de onda completa con punto medio

En el circuito de la Figura 9, $u_{f1}(t) = u_{f2}(t) = u_f(t)$.

Al igual que antes, el análisis típico implica suponer que la tensión de las fuentes es senoidal.

Este circuito puede verse un poco extraño al principio, teniendo en cuenta que el mismo tiene dos fuentes idénticas, las cuales además se encuentran en fase. En la práctica dichas fuentes generalmente se corresponden con el secundario de un transformador con punto medio como el de la Figura 10.

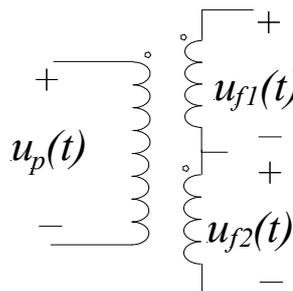


Figura 10 Transformador con punto medio

Como en el rectificador de media onda, los diodos se consideran ideales. Por lo tanto, observando la Figura 9, si la polaridad de las tensiones de las fuentes es la indicada es fácil verificar que el diodo $D1$ se encuentra en polarización directa, mientras que el diodo $D2$ se encuentra en inversa. En dicha situación, la tensión sobre el resistor u_R coincide con $u_{f1}(t)$ durante todo el semiciclo positivo, entregando esta última la correspondiente corriente a la carga, dado que $D1$ se encuentra en directa; mientras que la fuente $u_{f2}(t)$ no entrega corriente a la carga en dicho semiciclo por encontrarse $D2$ en inversa.

Cuando la polaridad de las tensiones de las fuentes se invierte en el segundo semiciclo, el funcionamiento de los diodos se invierte, encontrándose $D2$ en polarización directa, mientras que $D1$ se encuentra en inversa, u_R coincide con $u_{f2}(t)$ entregando esta última corriente a la carga.

La Figura 11 muestra la secuencia de conducción de los diodos en cada semiciclo; se puede verificar los sentidos de la corriente para cada uno. Se observa que la tensión sobre R tiene la misma polaridad en los dos semiciclos.

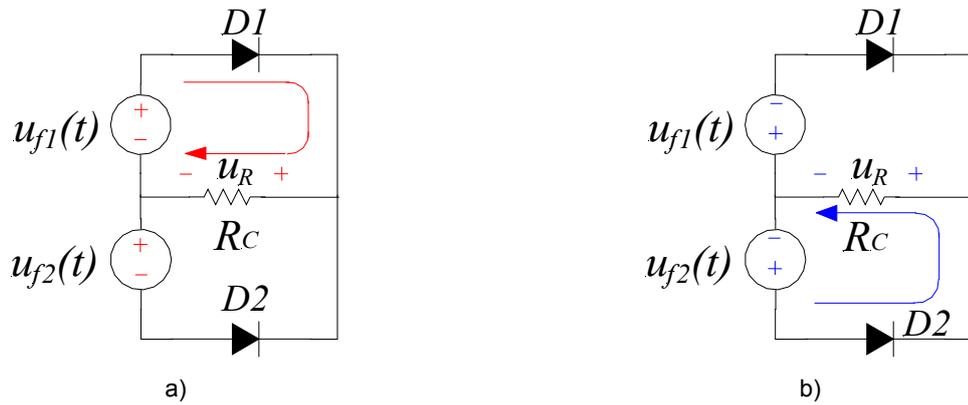


Figura 11 Sentidos de la corriente según el semiciclo: a) semiciclo positivo, b) semiciclo negativo.

A la vez, analizando por segunda ley de Kirchhoff las Figura 11a) y Figura 11b), claramente se puede apreciar que durante el primer semiciclo la tensión del diodo $D2$ (que está en inversa) es el doble que la tensión de la fuente, mientras que en el segundo semiciclo la tensión sobre $D1$ duplica a la de la fuente, por estar en inversa. Debe recordarse en este caso lo mencionado respecto de los parámetros de diseño y la tensión inversa de cresta en el diodo, siendo posible aplicar los mismo criterios que en el caso anterior.

La Figura 12 muestra las formas de onda resultantes.

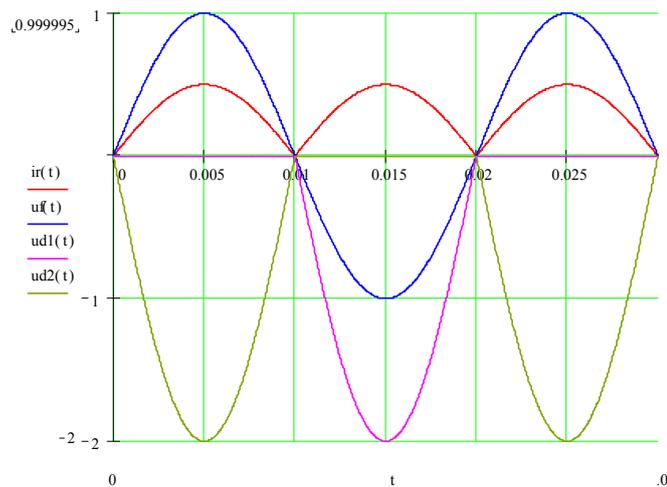


Figura 12 Formas de onda del rectificador monofásico de onda completa

En la Figura 12 la onda azul corresponde a $u_f(t)$, la roja a $i_R(t) \equiv u_R(t)$, la magenta a $u_{D1}(t)$ y la verde a $u_{D2}(t)$.

En forma similar al caso del rectificador de media onda, queda como ejercicio para el lector verificar que la resolución de las Ec. 2 y Ec. 3 cuando $i_{Rc}(t) = I_{m\acute{a}x}sen(\omega t)$, que resultan:

$$I_{medio} = \frac{2I_{m\acute{a}x}}{\pi} \tag{Ec. 6}$$

$$I_{eficaz} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \tag{Ec. 7}$$

Puede observarse en este caso que el período de la ondas de tensión y corriente en la carga resulta ahora igual a la mitad del período de la onda senoidal original.

5.3 Rectificador monofásico de onda completa con diodos en puente

En este circuito se utilizan cuatro diodos configurando un circuito puente, tal como se muestra en la Figura 13.

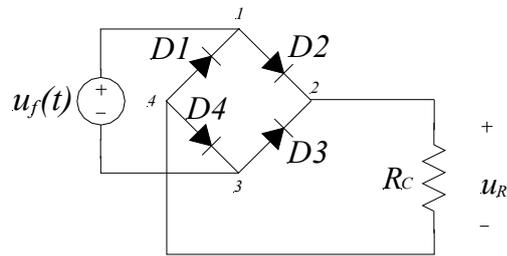


Figura 13 Rectificador monofásico de onda completa con diodos en puente

La orientación de los diodos en el puente es importante, como se verá en el análisis que sigue. Se han identificado los nodos del mismo para una mejor comprensión.

Al igual que en todos los casos vistos, el análisis típico implica suponer que la tensión de la fuente es senoidal y que los diodos son ideales y se comportan según el modelo de la Figura 3a).

Suponiendo, como siempre, que se inicia el análisis cuando la tensión de la fuente inicia el ciclo positivo en $t = 0$, debe verificarse qué diodo o diodos se encuentran en directa (estado de conducción).

En las condiciones mencionadas para la fuente durante el semiciclo positivo, el nodo 1 presenta la mayor tensión respecto de cualquiera de los demás nodos, con lo cual se puede asegurar que el diodo $D2$ está en directa, por lo tanto conduce. Luego, la tensión del nodo 2 es la misma que la del nodo 1 ; si se pretende aplicar la ley de Kirchhoff de corrientes en dicho nodo, la corriente que proviene de $D2$ no puede dirigirse hacia $D3$, estando éste en inversa, por lo cual dicha corriente pasa directamente por R y de allí se dirige hacia el nodo 4 . Al aplicar LKC en este último, se advierte que este nodo se encuentra a menor tensión que el nodo 1 y a mayor tensión que el nodo 3 (en rigor, el modelo del diodo ideal indica que $U_4 = U_3$), por lo cual $D1$ estará en inversa y $D4$ en directa; y en consecuencia la corriente se establecerá por este último con sentido al borne negativo de la fuente. La Figura 14a) ilustra el sentido de la corriente en el semiciclo positivo de la tensión de la fuente.

Siguiendo las pautas del párrafo anterior, el lector puede verificar que el sentido de la corriente para el semiciclo negativo es el indicado en la Figura 14b).

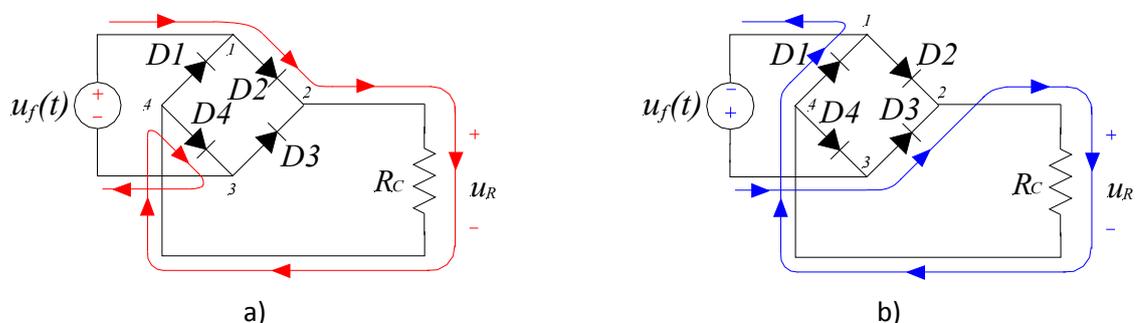


Figura 14 Rectificador monofásico de onda completa con diodos en puente: a) sentido de la corriente para el semiciclo positivo, b) sentido de la corriente para el semiciclo negativo.

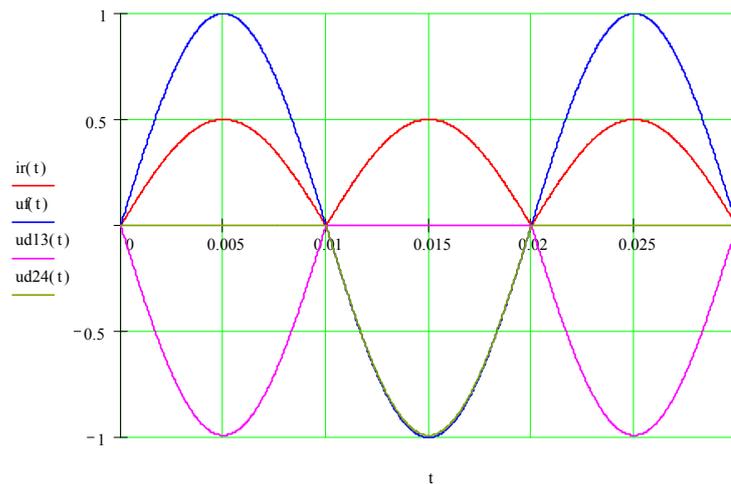


Figura 15 Formas de onda del rectificador monofásico de onda completa

Se puede observar que la polaridad de la tensión u_R resulta la misma para ambos semiciclos.

La gráfica de las formas de onda es similar a la de la Figura 12, excepto las tensiones inversas en los diodos, las cuales resultan iguales a las tensiones de la fuente, tal como se ve en la Figura 15.

En la Figura 15 la onda azul corresponde a $u_f(t)$, la roja a $i_R(t) \equiv u_R(t)$, la magenta a $u_{D1}(t) = u_{D3}(t)$ y la verde a $u_{D2}(t) = u_{D4}(t)$.

Dado que desde el punto de vista del resistor de carga las formas de onda de corriente y tensión son idénticas a las del rectificador con punto medio, la resolución de las Ec. 2 y Ec. 3 cuando $i_{Rc}(t) = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t)$ da como resultado las Ec. 6 y Ec. 7, y el período de las mismas también es la mitad del período de la onda original.

5.4 Rectificador trifásico de media onda

Otro de los circuitos simples con el cual se puede obtener señales con valor medio distinto de cero a partir de ondas con valor medio cero es el *rectificador trifásico de media onda* que se muestra en la Figura 16.

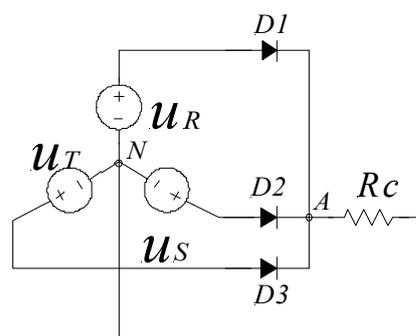


Figura 16 Rectificador trifásico de media onda

Para el análisis del circuito de la Figura 16, resulta útil dibujar las formas de onda de tensión de fase del generador trifásico, que se muestran en la Figura 17.

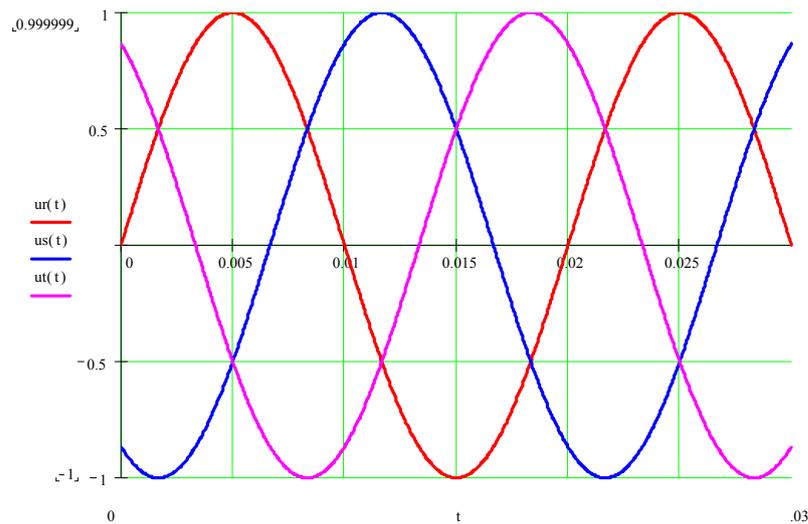


Figura 17 Tensiones de fase del generador trifásico

La onda roja representa u_R , la azul u_S y la magenta u_T .

Para iniciar el análisis debe tenerse en cuenta la onda con mayor valor de tensión en un instante dado. Por ejemplo, en el instante en que la onda u_R (roja) comienza a tomar valores mayores que u_T (magenta), el diodo $D1$ se pone en directa, pues u_R es mayor que u_S y u_T , por lo tanto $D2$ y $D3$ están en inversa. Entonces $D1$ conduce, se establece corriente en el resistor de carga u_{Rc} , siendo su tensión igual a u_R y la corriente tiene un sentido tal que se cierra a través del nodo N . Esta situación se mantiene hasta que u_S pase a ser mayor que u_R , donde el fenómeno se reinicia con $D2$ en directa y $D1$ y $D3$ en inversa, $D2$ conduce, $u_{Rc} = u_S$ y la corriente vuelve a cerrarse a través del nodo N . Nuevamente el fenómeno se repite cuando u_T sea mayor que u_S . La Figura 18 muestra el resultado final de la forma de onda de i_{Rc} que, en otra escala, también representa u_{Rc} .

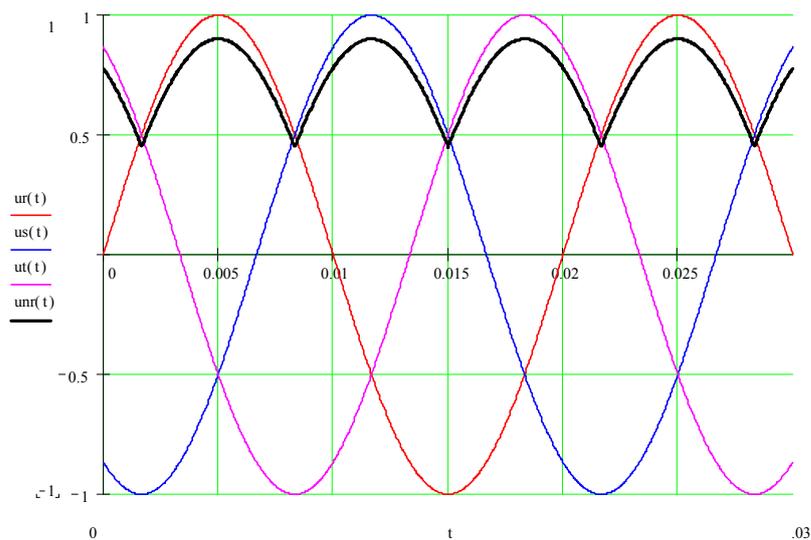


Figura 18 Tensión y corriente en la carga de un rectificador trifásico de media onda

Se puede verificar que la onda negra ($u_{Rc} \equiv i_{Rc}$) se corresponde con las crestas positivas de las tensiones de fase de las fuentes del sistema trifásico. Sólo resta indicar en qué intervalo conduce cada diodo, lo cual se deja como ejercicio para el lector.

De la resolución de las Ec. 2 y Ec. 3 cuando $i_{Rc}(t) = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t)$, se obtiene:

$$I_{medio} = \frac{3\sqrt{3}I_{m\acute{a}x}}{2\pi} \quad \text{Ec. 8}$$

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \text{sen} \frac{2\pi}{3} \right)} I_{m\acute{a}x} \quad \text{Ec. 9}$$

Puede observarse en este caso que el período de la ondas de tensión y corriente en la carga resulta ahora igual a un tercio del período de la onda senoidal original.

5.5 Ondulación

De la secuencia de estudios realizados sobre los rectificadores, se puede observar que los valores medios de las formas de onda de tensión y corriente en la carga aumentan progresivamente según el circuito analizado, mientras que las amplitudes de las mismas disminuyen, particularmente al pasar del rectificador monofásico al trifásico.

Es decir que se podría establecer una relación entre el aumento del valor medio y la disminución de la amplitud de dichas formas de onda con el objeto de definir la "calidad" de la rectificación, dado que el objetivo final muchas veces es conseguir una señal continua constante e independiente del tiempo.

Es así que se define el *factor de ondulación*, *factor de rizado* o *factor de ripple* (denominaciones que dependen de la bibliografía consultada), cuya expresión es:

$$r\% = \frac{U_{m\acute{a}x} - U_{m\acute{i}n}}{2U_{medio}} 100 \quad \text{Ec. 10}$$

Los parámetros de la Ec. 10 se relacionan observando la Figura 19.

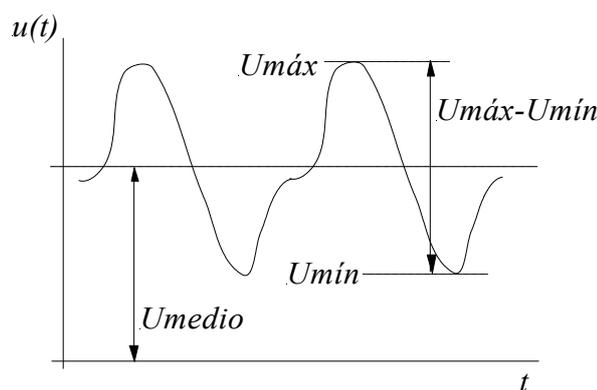


Figura 19 Parámetros de una señal que definen el factor de ondulación

Observando la Ec. 10 y la gráfica de la Figura 19, se puede advertir que resulta conveniente que el factor de ondulación sea lo más bajo posible; esto ocurre si U_{medio} es suficientemente grande o si $U_{m\acute{a}x} - U_{m\acute{i}n}$ es suficientemente pequeño. El caso extremo ($r\% = 0$) indica que la señal es una continua independiente del tiempo.

5.6 Conclusiones

En todos los casos de circuitos rectificadores estudiados hasta este punto podría determinarse su factor de ondulación. Es interesante observar que, en forma progresiva, dichos circuitos van "mejorando" el factor de ondulación de la onda obtenida. Se invita al lector a determinar $r\%$ de cada uno de tales circuitos para verificar esta afirmación.

6 Rectificadores controlados

Un circuito rectificador controlado es un conversor CA/CC que permite obtener la variación del valor medio de la variable de salida en la carga, variando de este modo la potencia.

El elemento básico que permite tal conversión es el tiristor, ya estudiado en la sección 3. Es posible obtener este resultado mediante diversos circuitos con diferentes configuraciones de dichos elementos.

Las secciones que siguen presentan algunos circuitos simples que permiten obtener señales continuas de valor medio variable a voluntad mediante una señal de control adecuada. Dichos circuitos son similares a algunos ya vistos en la sección 5.

Antes de iniciar al análisis de los circuitos propiamente dichos, se van a mencionar algunas cuestiones referidas al funcionamiento del tiristor, con el objeto de facilitar la comprensión de su comportamiento en este tipo de circuitos.

6.1 El tiristor en el control de potencia

Observando la característica I-U del tiristor (Figura 6) se puede ver que si se aplica en forma instantánea una tensión U_{AK} mayor que U_D el elemento inicia la conducción de forma inmediata, es decir se *dispara*; en caso contrario, el dispositivo se mantiene bloqueado. De la misma forma, si la tensión U_{AK} aplicada es positiva y no supera U_D , pero se aplica una corriente I_G en la compuerta G, el disparo ocurrirá en función de los valores de la tensión U_{AK} y de la I_G aplicada.

Según se advierte en el gráfico de la Figura 6, si la corriente I_G es suficientemente grande, la conducción del tiristor se inicia para tensiones U_{AK} levemente mayores que cero; por lo tanto, esta característica del funcionamiento es la que se aplica para realizar el disparo del tiristor independientemente del valor de la tensión U_{AK} , siempre y cuando ésta sea positiva. En otras palabras: si U_{AK} es positiva (aunque menor que U_D), el tiristor se disparará en un cierto instante si en dicho instante se aplica una corriente I_G grande (siempre que no se supere la I_G admisible por el dispositivo).

En general, la corriente de disparo I_G es generada por un *circuito de control* cuyo diseño y análisis se deja fuera del análisis de este texto.

Debe aclararse que normalmente la corriente de disparo es mucho menor que cualquier otra corriente del circuito. Ésto debe ser así, puesto que se entiende que los circuitos adicionales de control y comando deben manejar potencias mucho menores que los circuitos principales para que estos sistemas tengan sentido.

6.2 Rectificador controlado de media onda con tiristor y carga resistiva

El circuito rectificador controlado más simple corresponde al rectificador de media onda con tiristor y carga resistiva, el cual se ilustra en la Figura 20.

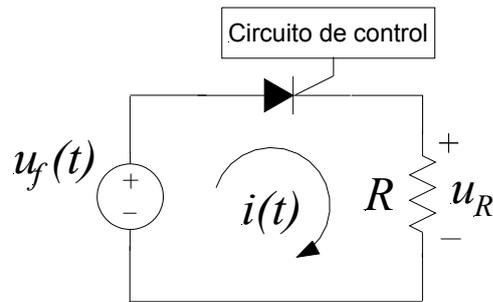


Figura 20 Rectificador monofásico de media onda

Teniendo en cuenta lo mencionado respecto de la conversión CA/CC, el análisis típico de este circuito implica suponer que la tensión de la fuente $u_f(t)$ es senoidal. Recordando lo mencionado en la sección 6.1 respecto del funcionamiento del tiristor, aún cuando la tensión de la fuente comience a tomar valores positivos y el dispositivo se encuentre polarizado en directa, éste no comenzará a conducir hasta que el circuito de control aplique la corriente correspondiente en la compuerta del tiristor.

De esta forma, si I_G se aplica en un determinado instante del período de la onda senoidal, el disparo del tiristor y la consecuente conducción ocurrirá a partir de dicho instante. Dada la correlación que existe entre el tiempo y el ángulo en una señal senoidal, se puede hablar de *tiempo de disparo* t_d o *ángulo de disparo* θ_d del tiristor, tal como se muestra en la Figura 21.

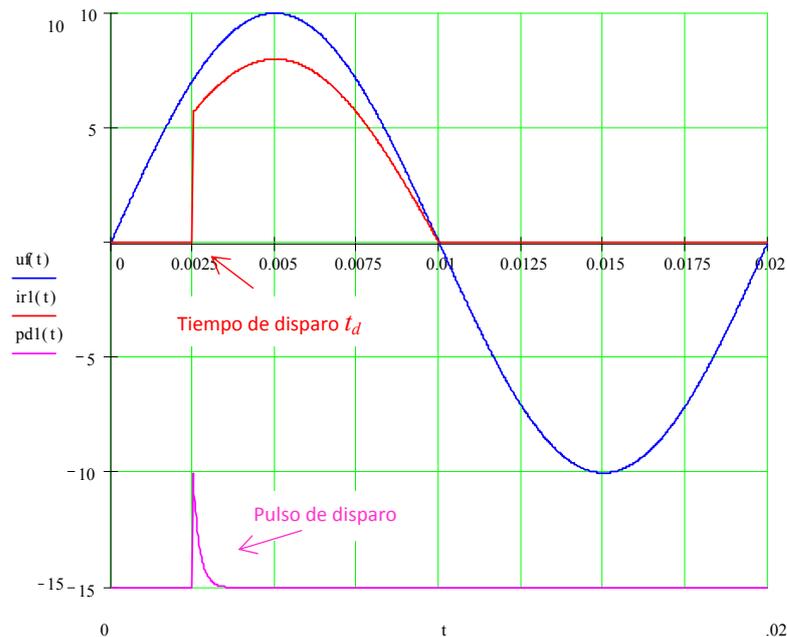


Figura 21 Formas de onda en el rectificador controlado monofásico de media onda con tiristor

Como se observa en la Figura 21, cuyo eje de abscisas representa al tiempo en segundos, la curva de color rojo es la tensión de la fuente y la de color azul corresponde a la corriente del circuito.

La curva de color magenta muestra un pulso de cierta amplitud pero de muy corta duración y corresponde a la corriente de compuerta I_G que provoca el disparo del tiristor. Debe observarse que no es necesario que el pulso sea muy largo, sólo se requiere que su amplitud sea suficiente para provocar el disparo del dispositivo; ya que una vez que se consigue la conducción, el tiristor queda en dicho estado y recién se bloquea cuando su tensión U_{AK} sea negativa.

De este modo, cambiando la ubicación del pulso de disparo es posible obtener diferentes tiempos (o ángulos) de disparo lo que dará lugar a diferentes valores medios de la corriente. Otro ejemplo se muestra en la Figura 22.

Claramente se observa que la corriente del circuito tiene un valor medio menor en la Figura 22 que en la Figura 21 y ésto se consigue simplemente eligiendo en qué instante se aplica el pulso de disparo en la compuerta.

Dado el carácter resistivo de la carga y, si se supone que el tiristor una vez que entra en el estado de conducción se comporta como una llave cerrada, se advierte que la tensión en R es idéntica a la de la fuente; por lo tanto la forma de onda de la corriente coincide con la de la tensión en la resistencia, salvo un factor de escala que depende de la ley de Ohm.

Para el cálculo del valor medio de la corriente se utiliza la expresión de la Ec. 2, que vuelve a escribir a continuación.

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

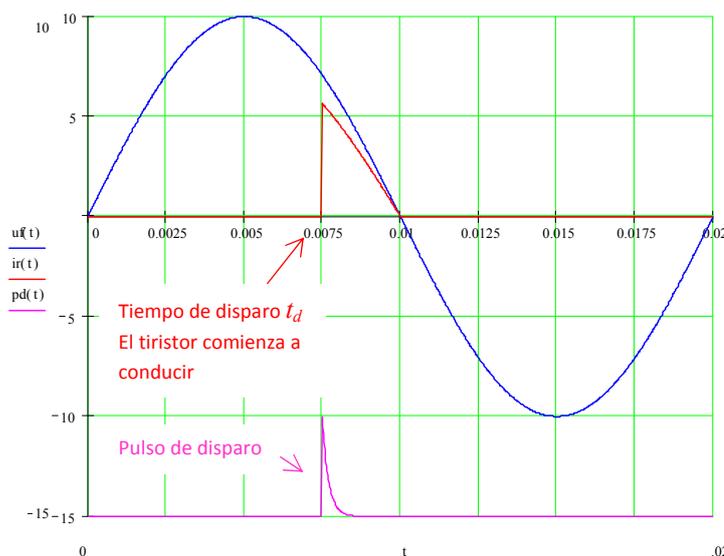


Figura 22 Formas de onda del circuito de Figura 17 con ángulo de disparo diferente al de Figura 18

Dicha expresión sigue siendo válida, aunque se puede especificar los límites de la integral teniendo en cuenta el ángulo o el tiempo del disparo, según convenga (Ec. 11).

$$I_{medio} = \frac{1}{T} \int_{t_d}^{T/2} i(t) dt \tag{Ec. 11}$$

Si fuera necesario calcular la potencia en la carga, la Ec. 3 se puede aplicar para obtener el valor eficaz de $i(t)$, según muestra la Ec. 12.

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_d}^{T/2} i^2(t) dt} \tag{Ec. 12}$$

Expresiones similares pueden aplicarse a la tensión en el resistor de carga.

Finalmente se puede mencionar que lo desarrollado en este apartado se puede aplicar a los circuitos rectificadores monofásicos de onda completa y trifásico de media onda, lo cual se sugiere como ejercicio para el lector.

7 Rectificadores con carga RL y RC

7.1 Rectificador de media onda con carga RL

La Figura 23 muestra un circuito rectificador de media onda con carga RL típico. Esta carga podría estar representando, por ejemplo, un motor eléctrico de continua mediante su modelo más simple.

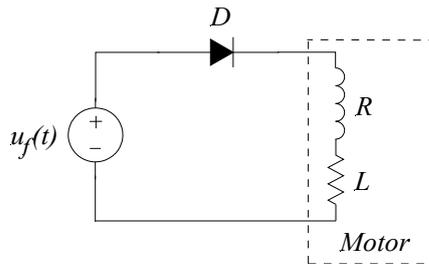


Figura 23 Rectificador monofásico con carga RL

Como siempre, se supone que la tensión de la fuente tiene forma senoidal, $u_f(t) = U_f \text{sen}(\omega t)$.

Conviene iniciar el análisis de este circuito suponiendo que el inductor se encuentra en condiciones iniciales nulas (descargado, sin corriente) y que cuando comienza el semiciclo positivo de la tensión de fuente y el diodo empieza a conducir la situación se asemeja a un circuito en régimen transitorio, donde el diodo representa a una llave que se cierra justo en el instante en que comienza dicho semiciclo ($t = 0$).

En estas condiciones se puede aplicar la ecuación diferencial del circuito:

$$u_f(t) = iR + L \frac{di}{dt} \quad \text{Ec. 13}$$

Además, como se sabe del estudio de circuito en régimen transitorio, la respuesta total o completa de la corriente es la suma de las componentes natural y forzada $i_n(t)$ e $i_p(t)$, respectivamente:

$$i_t(t) = i_n + i_p \quad \text{Ec. 14}$$

que a su vez corresponden a las soluciones de las ecuaciones diferenciales homogénea y particular que surgen de la Ec. 13, respectivamente. Por lo tanto, se puede decir que, al menos en los primeros instantes de conducción del diodo, la corriente tiene la expresión de la Ec. 15.

$$i_t(t) = \frac{U_f}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \text{sen}\theta \cdot e^{-\frac{t}{L/R}} + \frac{U_f}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \quad \text{Ec. 15}$$

$$\text{con } \theta = \text{arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

Esta ecuación es válida a partir del inicio de la conducción del diodo y hasta que la corriente se haga cero, puesto que en dicho momento la tensión de la fuente ya habrá cambiado de polaridad quedando el diodo en inversa y no permitiendo por tanto la conducción.

Todo el análisis realizado se sintetiza en la gráfica de la Figura 24.

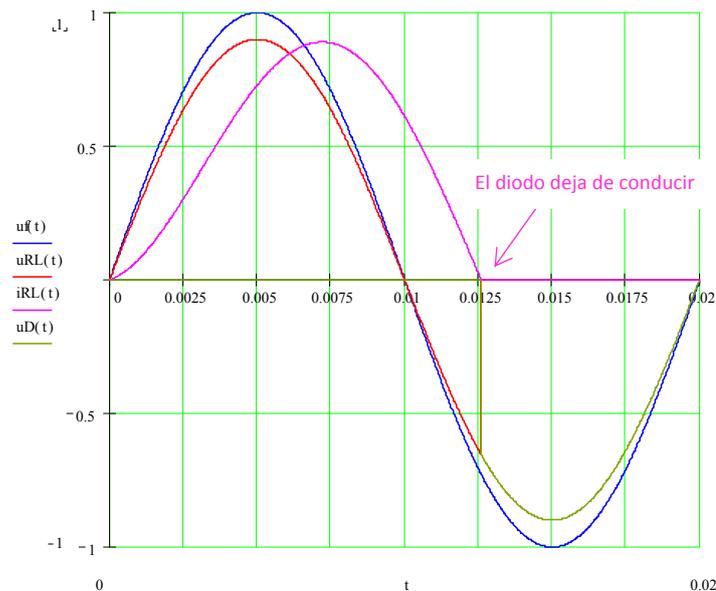


Figura 24 Formas de onda en el rectificador monofásico con carga RL

Debe tenerse en cuenta que mientras el diodo conduce, y dado que éste se supone ideal, las tensiones de la fuente y de la carga RL son iguales; mientras que en el intervalo en el que el diodo no conduce, la tensión de la fuente es igual a la tensión inversa del diodo. En la Figura 24, debe observarse que las escalas de las tensiones del diodo y de la carga son las mismas, pero diferentes de la escala de tensión de la fuente al solo efecto de poder visualizar todas las formas de onda.

La Figura 25 muestra las formas de onda de la Figura 24 y se incluyen las componentes forzada y natural que dan lugar a la corriente total en la carga RL.

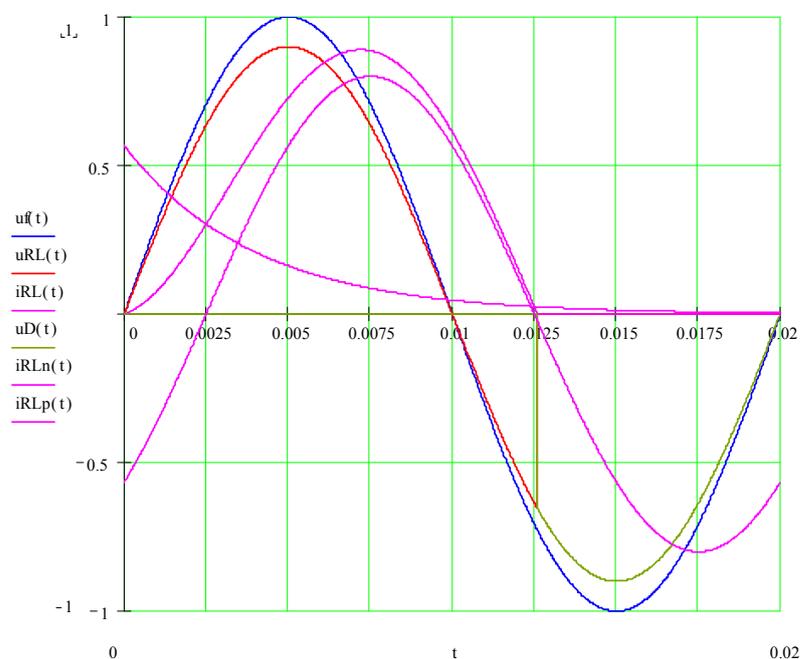


Figura 25 Formas de onda en el rectificador monofásico con carga RL incluidas las componente natural y forzada de la corriente en la carga RL

7.2 Rectificador de media onda con carga RC

La Figura 26 muestra un circuito rectificador de media onda con carga RC típico. Este circuito, en el que se conecta un capacitor en paralelo con la carga R , es muy utilizado cuando se requiere disminuir la ondulación en R .

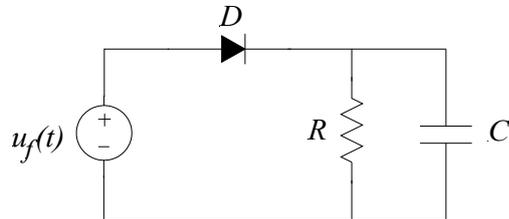


Figura 26 Rectificador monofásico con carga RC

Igual que antes, se supone que la tensión de la fuente tiene forma senoidal, $u_f(t) = U_f \text{sen}(\omega t)$.

En este caso, y por simplicidad, también se supone que el capacitor se encuentra descargado y la aplicación de la tensión de la fuente se inicia en $t = 0$; es decir que cuando comienza el semiciclo positivo de la tensión de fuente y el diodo empieza a conducir, la situación se asemeja a un circuito en régimen transitorio, donde el diodo representa a la llave que se cierra justo en el instante en que comienza dicho semiciclo ($t = 0$).

En estas condiciones, y dado que el diodo se supone ideal, hay una única tensión en el circuito; es decir que $u_f(t) = u_R(t) = u_C(t)$. Por lo tanto, se establecerá una corriente por el resistor, cuyo valor surge de la ley de Ohm; y otra corriente por el capacitor cuyo valor estará dado por la ecuación constitutiva

$i_C(t) = C \frac{du_f}{dt}$. Esta situación se mantendrá hasta que la tensión de fuente alcance la cresta. Si el

diodo no estuviese, la corriente del capacitor entraría en el semiciclo negativo; pero, en cambio, el diodo queda polarizado en inversa, impidiendo que la corriente del capacitor retorne a la fuente, descargándose a través del resistor.

Dependiendo del valor de la constante de tiempo que resulte del producto $R \cdot C$, la descarga del capacitor terminará o no (en términos prácticos) antes de que finalice el ciclo. Suponiendo el primer caso, al iniciar el ciclo siguiente, el proceso se repite; lo cual se muestra en la Figura 27, donde la curva azul muestra la tensión de la fuente y la roja la corriente en el resistor. Para esta última, en el gráfico se trazó una línea punteada negra que separa el tramo de $i_R(t)$ correspondiente a la conducción del diodo (hacia la izquierda) del correspondiente a la descarga del capacitor (a la derecha).

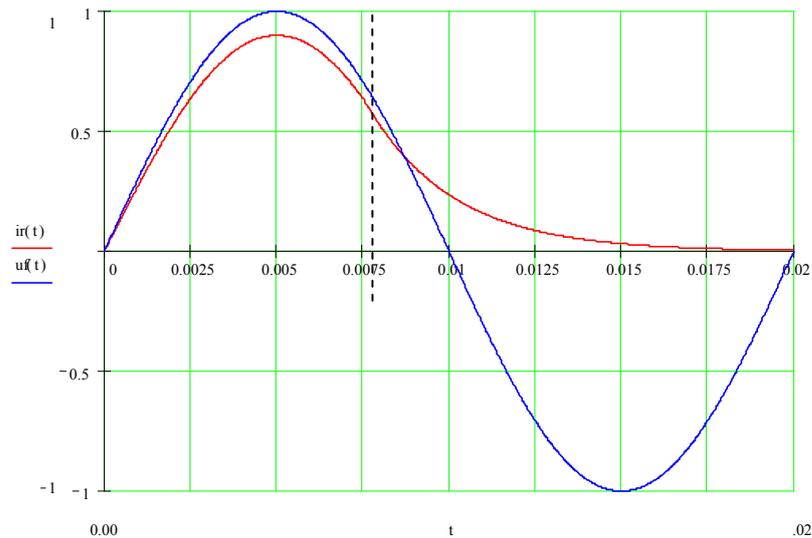


Figura 27 Formas de onda en el rectificador monofásico con carga RC y constante de tiempo baja

En el caso que la constante de tiempo sea suficientemente grande, la descarga se prolongará sobre el siguiente ciclo y así siguiendo en los sucesivos ciclos. La Figura 28 ilustra este caso.

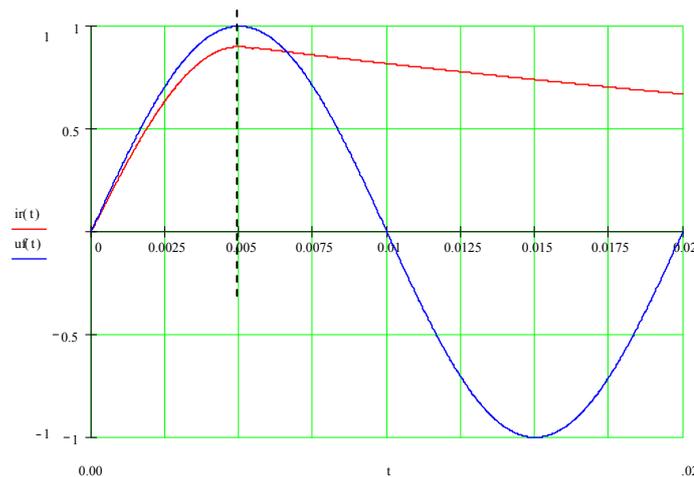


Figura 28 Formas de onda en el rectificador monofásico con carga RC y constante de tiempo alta

Puede observarse como conclusión y por simple inspección de las Figuras 27 y 28, que cuanto mayor sea la constante de tiempo, menor será la ondulación de la forma de onda de tensión y corriente en la carga R .

Como información adicional, se puede agregar la forma de onda de la corriente en el capacitor, Figura 29; la curva azul es la tensión de la fuente, la roja es la corriente en el resistor y la verde en el capacitor.

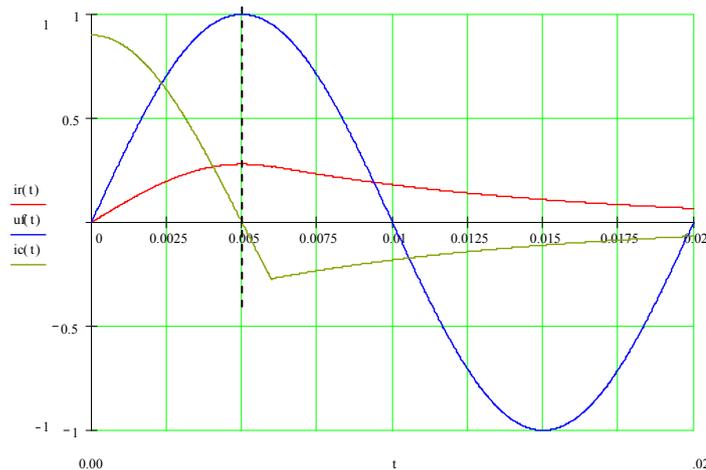


Figura 29 Formas de onda de corriente en el rectificador monofásico con carga RC

En forma similar a los casos anteriores, las componentes de las corrientes se pueden separar en tramos mediante una recta vertical punteada de color negro. A la izquierda, la curva roja ($i_R(t)$) representa la corriente en el resistor durante la carga del capacitor y a la derecha se representa la descarga del mismo. Para la curva verde ($i_C(t)$), a la izquierda se ve la corriente de carga del capacitor y a la derecha la de descarga.

Puede verificarse que la corriente de descarga del capacitor es igual y de signo contrario a la corriente del resistor en el mismo intervalo.

7.3 Rectificador controlado de media onda con carga RL

La Figura 30 muestra un circuito rectificador de media onda controlado con tiristor y carga RL. La tensión de la fuente es senoidal, $u_f(t) = U_f \text{sen}(\omega t)$.

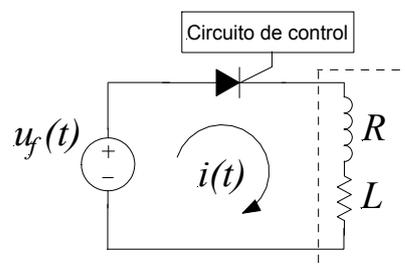


Figura 30 Rectificador monofásico con tiristor y carga RL

Recordando lo indicado en la sección 7.1, conviene iniciar el análisis del circuito suponiendo que el inductor se encuentra en condiciones iniciales nulas (descargado, sin corriente). Cuando el tiristor se dispara durante el semiciclo positivo de la tensión de fuente y comienza a conducir, nuevamente la situación se asemeja a un circuito en régimen transitorio, donde el tiristor representa a una llave que se cierra justo en el instante del disparo ($t = t_d$).

Luego, es posible aplicar la ecuación diferencial del circuito Ec. 13. Además, teniendo en cuenta la Ec. 14, al menos en los primeros instantes de conducción del tiristor, la corriente tiene la expresión de la Ec. 15 ya vista. Todo lo mencionado se puede observar gráficamente en la Figura 31; en la cual, por cuestiones de simplicidad, no se dibujó el pulso de disparo.

En la Figura 31 se han dibujado las tensiones en la carga RL y en el tiristor con una escala levemente diferente de la de la tensión de la fuente con el objeto de visualizar mejor las formas de onda. Pero debe observarse que, dado que se supone que el tiristor se comporta como una llave cerrada durante todo el intervalo de conducción, la tensión en RL es igual a la de la fuente en dicho intervalo. Asimismo, cuando el tiristor no conduce, la tensión de la fuente queda aplicada a este último.

La Figura 32 muestra las formas de onda de la Figura 31 y se incluyen, además, las componentes forzada y natural que dan lugar a la corriente total en la carga RL a partir del instante en que se aplica el pulso de disparo.

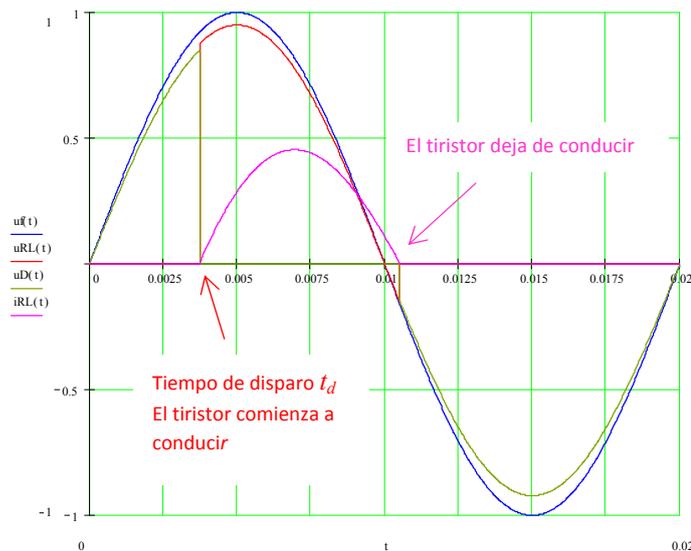


Figura 31 Formas de onda en el rectificador controlado monofásico con carga RL

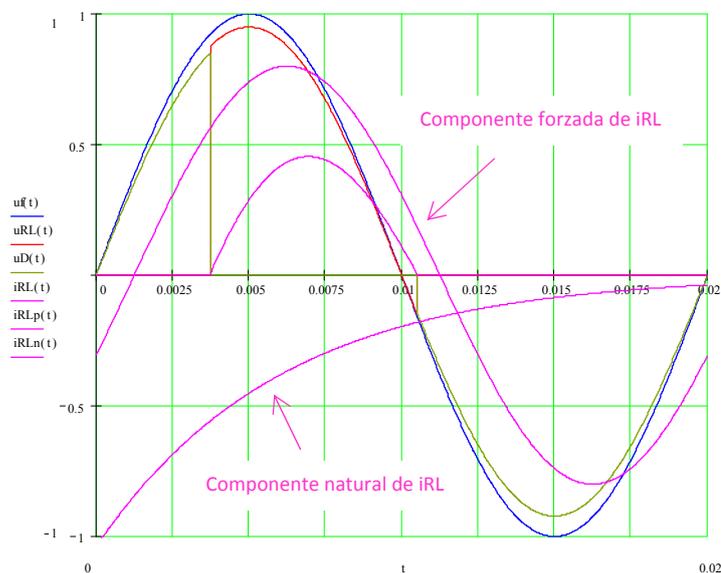


Figura 32 Formas de onda en el rectificador controlado monofásico con carga RL incluidas las componente natural y forzada de la corriente en la carga RL

8 Bibliografía

"Rectificación de potencia con diodos de silicio", M. Dayal. Editorial FAPESA

"Principios y aplicaciones de ingeniería eléctrica"; G. Rizzoni. Editorial McGraw-Hill.

"Electrónica de potencia"; Daniel W. Hart. Editorial Prentice Hall.

"Power Electronics. Converters, Applications and Design"; N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins. Editorial John Wiley & Sons, Inc.