

Capítulo II

Sistemas de distribución de energía eléctrica trifásica

2.1 Introducción

La generación y distribución de energía eléctrica por lo general es trifásica. La generación consiste en la creación de tres fases de voltaje desfasadas 120 grados eléctricos entre si, como se muestra en la siguiente figura.

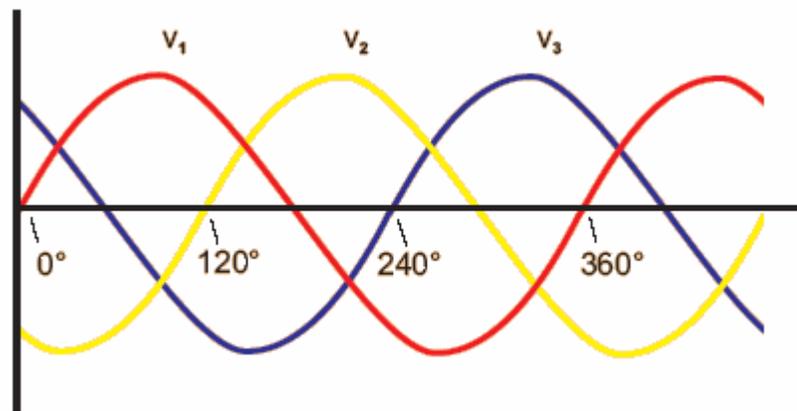


Figura 2.1 Energía trifásica

La energía trifásica generalmente es utilizada en industrias para motores trifásicos. En los automóviles este tipo de energía se genera en los alternadores, lo cual se explica con detalle en el capítulo III. Las principales razones de porqué la energía trifásica es más eficiente a la monofásica son las siguientes:

- ✓ La potencia de un motor trifásico es aproximadamente 150% mayor que la de uno monofásico.
- ✓ En un sistema de distribución trifásico, los cables son 75% menores a los de un sistema monofásico con la misma potencia. Esto ayuda a la disminución de disipación de potencia en el alambrado.

- ✓ La potencia instantánea en un sistema monofásico cae tres veces por ciclo, mientras que la potencia trifásica nunca es cero, esto se logra siempre y cuando los voltajes y las corrientes se encuentren en fase [9].

Para lograr que las corrientes y voltajes de las tres fases no se encuentren desplazadas por cierto ángulo, se requiere de un corrector de factor de potencia trifásico. Éste se basa en el funcionamiento de las distintas conexiones trifásicas, así como en la conversión de CA – CD y CD – CD. Es por esto que se requiere el estudio previo de los convertidores anteriores y de otros conceptos, con el objetivo de diseñar un corrector de factor de potencia eficiente.

2.2 Conexiones delta y estrella

Los devanados de un sistema trifásico, en los cuales se inducen los voltajes de línea, se pueden conectar mediante dos formas principales: delta (Δ) y estrella (Y). La conexión en estrella está constituida de la siguiente forma:

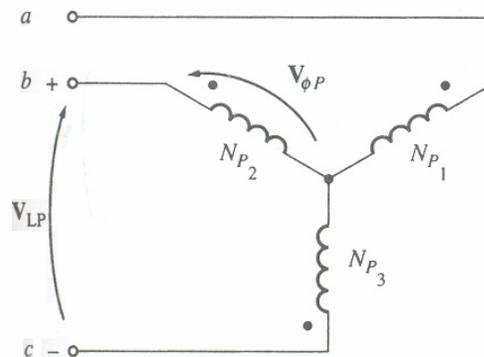


Figura 2.2 Conexión en estrella

Se puede observar que la corriente en cualquiera de las fases ($I_{\phi P}$) es igual a la corriente de línea (I_{LP}) y el voltaje de línea (V_{LP}) es el voltaje de una de las fases ($V_{\phi P2}$) menos el voltaje de otra ($V_{\phi P3}$). El valor de V_{LP} se encuentra mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{LP} = V_{\phi P_2} - V_{\phi P_3} = V_m \sin(\omega t) - V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.1)$$

Donde V_m es el voltaje pico de las fases de voltaje. Por medio de identidades trigonométricas, V_{LP} queda de la siguiente forma:

$$V_{LP} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (2.2)$$

Esto indica que la magnitud de V_{LP} es $\sqrt{3}V_{\phi P}$. Esta topología se utiliza generalmente en los devanados del estator de un alternador automotriz.

Por otro lado, la conexión delta está formada por tres devanados asimilando a la letra griega Δ , la cual se muestra a continuación.

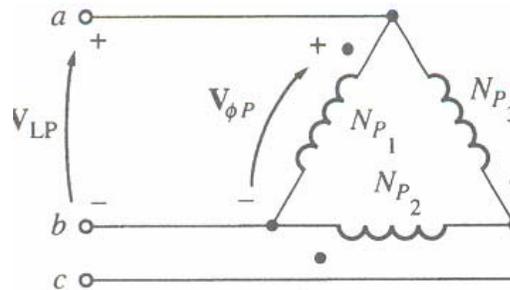


Figura 2.3 Conexión en delta

A partir de la figura anterior se puede observar que el voltaje de fase $V_{\phi P}$ es igual al voltaje de línea V_{LP} y la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces la corriente de fase. El factor de $\sqrt{3}$ se puede encontrar elaborando un análisis análogo a la conexión en estrella. Esta conexión se encuentra en alternadores de camiones o vehículos pesados ya que requieren más corriente, debido a que las cargas eléctricas son más pesadas que en los automóviles.

Las conexiones básicas descritas anteriormente se pueden combinar para dar lugar a nuevas conexiones. Dentro de estas nuevas topologías, se encuentran las siguientes:

- a) Delta – Delta
- b) Delta – Estrella
- c) Estrella – Delta
- d) Estrella – Estrella

Las conexiones anteriores se logran mediante tres transformadores monofásicos o un transformador trifásico, el cual consta de tres conjuntos de devanados enrollados sobre un núcleo común. La ventaja de un transformador trifásico es debido a que es más liviano, más barato y eficiente [1]. Esta es otra ventaja de los sistemas trifásicos balanceados a comparación de los monofásicos. Las combinaciones anteriores se utilizan ampliamente para la distribución de potencia trifásica en las líneas de transmisión, donde el devanado primario puede estar conectado en delta o estrella, al igual que el secundario. La elección de la topología depende si se quiere aumentar la corriente y sacrificar voltaje o viceversa. La desventaja principal de tener transformadores en las líneas de tensión, es que son muy robustos y ocupan gran cantidad de espacio. Es por esta razón que los transformadores no se utilizan en los alternadores de automóviles. Sin embargo la conexión de los devanados del estator del alternador puede ser en delta o en estrella.

2.3 Convertidores CA-CD trifásicos

La mayoría de los dispositivos electrónicos hoy en día son alimentados por medio de una fuente de CD unidireccional. Puesto que la energía eléctrica es generada y distribuida en CA, se requiere de un dispositivo que convierta dicha energía en CD. Los convertidores CA – CD son una buena opción para obtener energía que pueda ser utilizada por aparatos

electrónicos. Estos convertidores transforman la energía mediante un puente de diodos rectificadores, de ahí que también se les conoce como circuitos rectificadores. Dicha rectificación por lo general es de media onda u onda completa, monofásica o trifásica. Los rectificadores monofásicos se utilizan en aplicaciones de hasta un nivel de 15kW [10]. Para potencias mayores, se utilizan rectificadores trifásicos. Esto es otra ventaja de un sistema trifásico con respecto al monofásico, por lo tanto el análisis se enfoca únicamente en rectificadores trifásicos. Estos pueden trabajar con o sin transformadores en las líneas de tensión. Un convertidor CA – CD se puede visualizar como un diagrama a bloques:

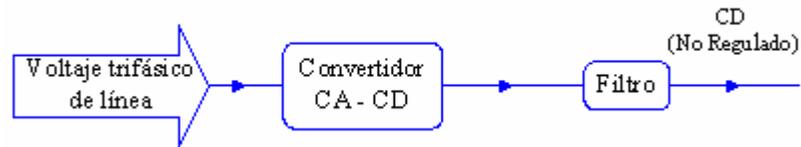


Figura 2.4 Diagrama a bloques del convertidor CA - CD

El rectificador de media onda trifásico, también conocido como rectificador trifásico en estrella, es una de las topologías para la conversión de CA trifásica a CD. Este se muestra en la siguiente figura

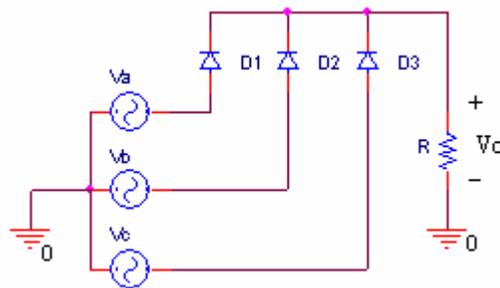


Figura 2.5 Rectificador de media onda trifásico

Este circuito como su nombre lo indica, rectifica los semiciclos positivos de los voltajes de fase. Los semiciclos negativos se quedan bloqueados en los diodos, evitando que estos pasen a la etapa de CD. Sin embargo el rizo de voltaje que se obtiene en la parte de CD es

muy grande y contiene una componente de 3er orden con respecto a la fundamental. La siguiente figura muestra el voltaje de salida durante un ciclo de línea.

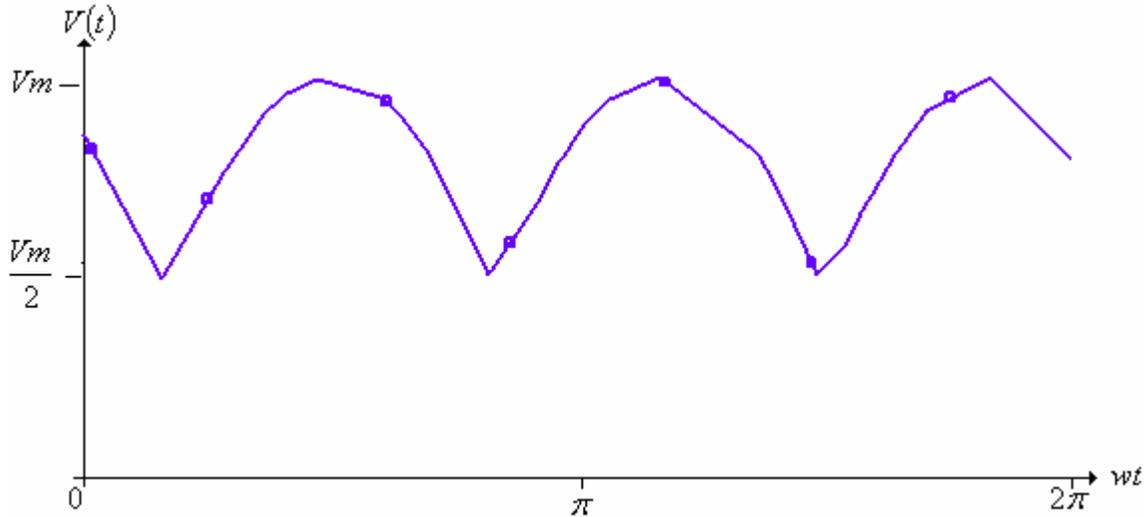


Figura 2.6 Voltaje de salida del rectificador de media onda trifásico

Donde V_m es el voltaje máximo de las señales de entrada. El voltaje RMS de salida es el siguiente:

$$V_{o_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_0^{\pi/3} V_m^2 \cos^2(wt) dwt} \quad (2.3)$$

$$V_{o_{rms}} = 0.84068V_m$$

Dado que la carga es puramente resistiva, la corriente RMS se obtiene por medio de la ley de Ohm:

$$I_{o_{rms}} = \frac{V_{o_{rms}}}{R} = \frac{0.84068V_m}{R} \quad (2.4)$$

Ya que un puente de diodos representa una carga no lineal para las fuentes de CA, surgen distorsiones en las corrientes de línea, como se muestra en la siguiente figura:

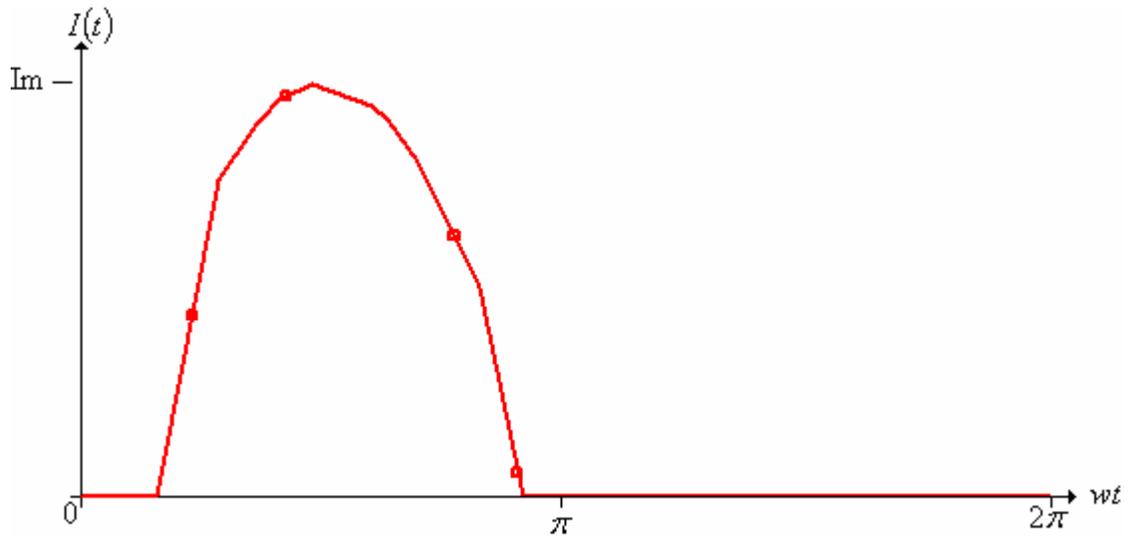


Figura 2.7 Corriente de entrada del rectificador de media onda trifásico

La figura anterior muestra la corriente de una de las fases en un ciclo de línea (2π). Como se puede observar, la corriente nunca es negativa, esto es debido a que la rectificación de media onda es positiva. La corriente RMS de línea en una de las fases ($I_{s_{rms}}$) se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$I_{s_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/3} I_m^2 \cos^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.5)$$

$$I_{s_{rms}} = 0.4853 I_m$$

Donde $I_m = V_m / R$ debido a que nuevamente la carga es puramente resistiva. El valor RMS del voltaje de entrada en una de las fases ($V_{s_{rms}}$) es $V_m / \sqrt{2}$, ya que se considera una señal senoidal pura. Sustituyendo los valores anteriormente encontrados en la ecuación (1.5) se obtiene el factor de potencia de este sistema.

$$FP = \frac{V_{o_{rms}} I_{o_{rms}}}{3(V_{s_{rms}} I_{s_{rms}})} = 68.6\% \quad (2.6)$$

Este valor indica que hay cierta distorsión armónica en la corriente de entrada de un rectificador de media onda trifásico, dicha distorsión se observa en la figura 2.7 ya que esta señal no es senoidal.

Puesto que el voltaje de salida (figura 2.6) no es completamente de CD, se requiere un filtro que suavice la componente ondulatoria. Ya que el filtro comúnmente se implementa con un capacitor en paralelo a la resistencia, provoca que la carga ya no sea completamente resistiva. Esto genera que el factor de potencia encontrado en (2.6) sea todavía más bajo.

Por otro lado está el rectificador de onda completa trifásico o rectificador trifásico en puente, el cual se muestra en la figura 2.8. Como su nombre lo indica, rectifica tanto semiciclos positivos como negativos.

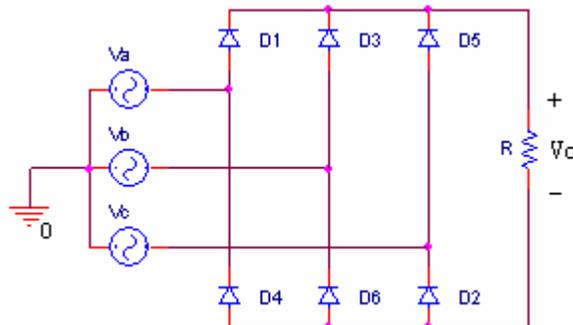


Figura 2.8 Rectificador de onda completa trifásico

Este tipo de rectificadores generalmente se encuentra en la etapa de conversión CA – CD de los alternadores automotrices [11], de ahí la importancia de este estudio para saber como se comportan y que tan eficientes son. El funcionamiento del alternador, así como del sistema eléctrico del automóvil se estudia con detalle en el capítulo III.

En la figura anterior, los diodos están numerados en orden de secuencia de conducción, cada uno de ellos conduce durante 120° , donde la secuencia de conducción es 12, 23, 34, 45 y 61 [10]. El voltaje que se presenta a la salida del rectificador contiene una componente de CD y otra de sexto orden debido a los seis pulsos causados por el circuito rectificador. Esta componente de orden superior presenta un voltaje de rizo menor al que existe en un circuito rectificador de media onda trifásico. El voltaje de salida de un rectificador trifásico en puente en un ciclo de línea se muestra en la siguiente figura.

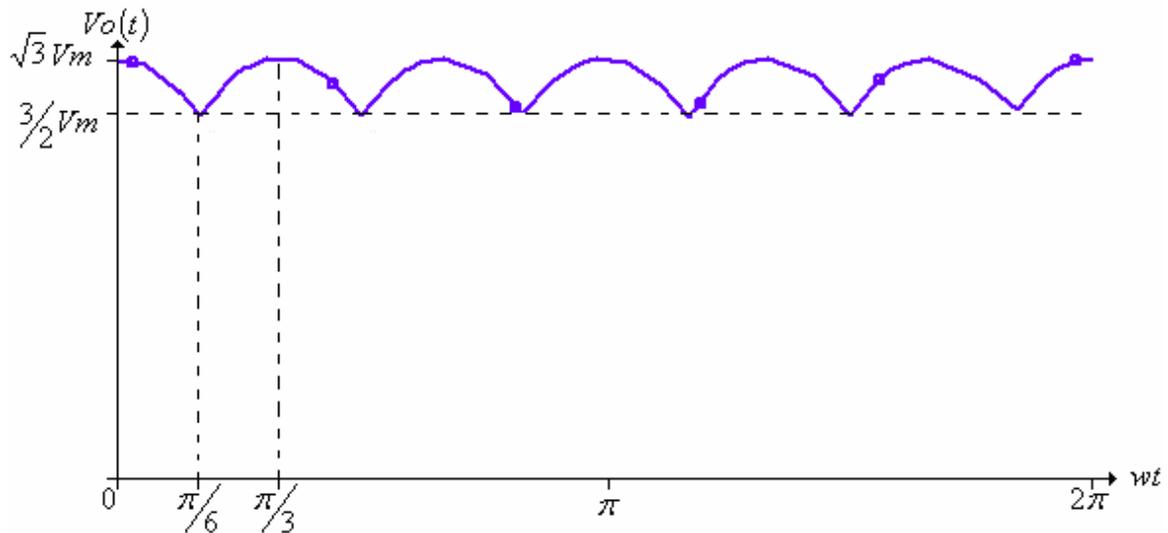


Figura 2.9. Voltaje de salida del rectificador de onda completa trifásico

Debido a que los devanados trifásicos están conectados en estrella, el voltaje máximo de fase a fase es $\sqrt{3}V_m$ donde V_m es el voltaje pico en una de las fases. Para encontrar el factor de potencia de este sistema, se deben encontrar nuevamente los voltajes y corrientes RMS tanto de entrada como de salida. El voltaje RMS de salida es el siguiente:

$$V_{o_{rms}} = \sqrt{\frac{2}{\pi/3} \int_0^{\pi/6} 3V_m^2 \cos^2(wt) dwt} \quad (2.7)$$

$$V_{o_{rms}} = 1.6554V_m$$

Ya que la carga es puramente resistiva, la corriente RMS está dada por:

$$I_{o_{rms}} = \frac{V_{o_{rms}}}{R} = \frac{1.6554V_m}{R} \quad (2.8)$$

Como en el caso del rectificador monofásico de media onda, la corriente de entrada se encuentra distorsionada, sin embargo se asemeja a más a una onda senoidal, como se muestra en la siguiente figura.

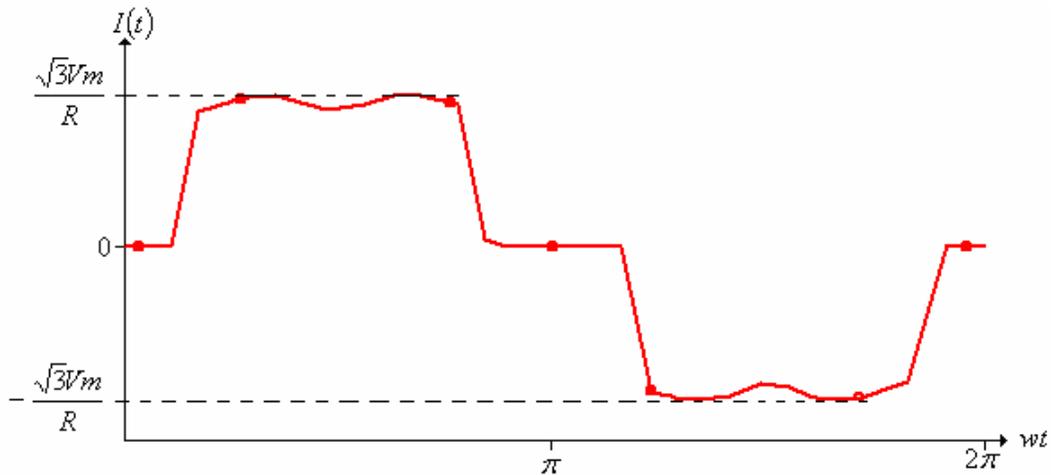


Figura 2.10 Corriente de entrada del rectificador de onda completa trifásico

Donde $\sqrt{3}V_m/R = I_m$. La corriente RMS se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$I_{s_{rms}} = \sqrt{\frac{8}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m^2 \cos^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.9)$$

$$I_{s_{rms}} = 0.7804I_m$$

Nuevamente, la señal de voltaje de entrada se considera una senoidal pura, por lo tanto el valor RMS de ésta es $V_m/\sqrt{2}$. Al sustituir los valores anteriores en (1.5), se obtiene el factor de potencia.

$$FP = \frac{V_{o_{rms}} I_{o_{rms}}}{3(V_{s_{rms}} I_{s_{rms}})} = 95.5\% \quad (2.10)$$

Como era de esperarse, el factor de potencia en un circuito rectificador trifásico de onda completa es mayor que en el de media onda.

El voltaje que se presenta en la figura 2.9 presenta rizos en su forma de onda. Esta señal contiene una componente de CD y otra de 6to orden. Para eliminar la componente de 6to orden, se requiere colocar un capacitor a la salida del rectificador de onda completa, como se muestra en la siguiente figura.

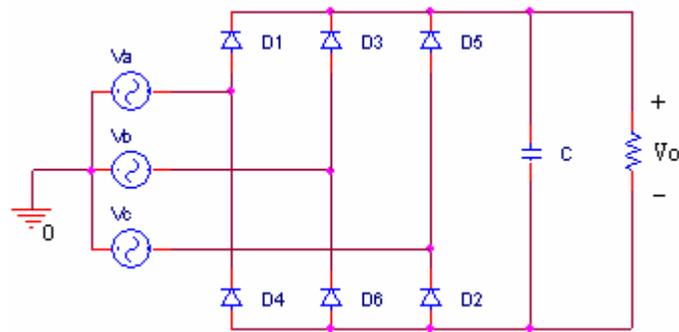


Figura 2.11 Rectificador de onda completa trifásico con carga no resistiva

Al colocar este capacitor, la corriente de fuente se distorsiona debido a que el capacitor requiere de energía reactiva. Esta energía es la que ocasiona que el factor de potencia disminuya considerablemente. Por esta razón las corrientes de fuente presentan una distorsión considerable, como se muestra en la siguiente figura.

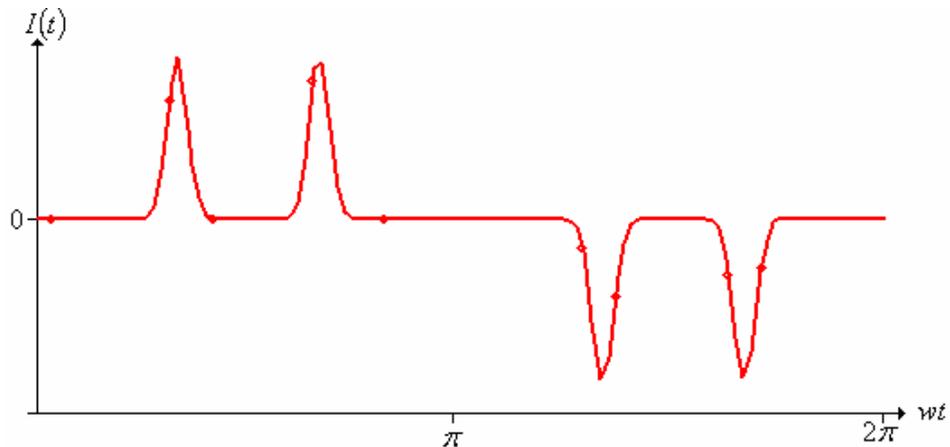


Figura 2.12 Forma de onda de la corriente de entrada en una de las fases con carga no resistiva

El circuito de la figura 2.11 es el que generalmente se utiliza para la conversión CA-CD. Sin embargo presenta un factor de potencia alrededor del 50% [2]. $FP \approx 0.5$

Ya que el diodo es un dispositivo no lineal, influye en la distorsión de la corriente de línea (Figura 2.12), lo cual provoca la generación de componentes armónicas. Una alternativa para eliminar las componentes armónicas es utilizar un filtro LC pasa-bajas, el cual se conecta en la parte de CA del rectificador. Sin embargo no es la solución adecuada, ya que tanto el inductor como el capacitor que componen al filtro son robustos y caros, debido a que requieren almacenar grandes cantidades de corriente. Una solución viable es la utilización de correctores de factor de potencia activos, descritos en la sección 1.4.2. Estos operan mediante técnicas de conmutación a altas frecuencias, lo que hace que los componentes pasivos disminuyan tanto en valor como en tamaño y puedan ser instalados en cualquier instalación eléctrica. De esta forma, un PFC activo puede colocarse en el sistema eléctrico del automóvil, haciendo que el alternador sea más eficiente. Esto se ve con detalle en el siguiente capítulo.

2.4 Convertidores CD-CD

Como ya se ha visto en la sección anterior, un voltaje de CD se obtiene a partir de un convertidor CA – CD. Este voltaje de CD se le considera como una señal, cuya frecuencia eléctrica es 0. En esta sección se analizan los distintos convertidores CD – CD, los cuales se utilizan para convertir la magnitud de un voltaje de CD no regulado a un voltaje de salida de CD regulado. Esta conversión por lo general se realiza mediante la conmutación de algún dispositivo semiconductor. Dichos dispositivos pueden ser transistores bipolares de unión (BJT), de efecto de campo de metal óxido semiconductor (MOSFET) o transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT). Estos dispositivos operan como

interruptores, dicha conmutación se consigue aplicando un ancho de pulso (PWM) a la base o compuerta de los transistores. La frecuencia de conmutación debe ser alta, con el objetivo de que el sistema adquiera una buena resolución y sea eficiente. La conversión CA – CD y posteriormente CD – CD se puede visualizar como un diagrama de bloques.

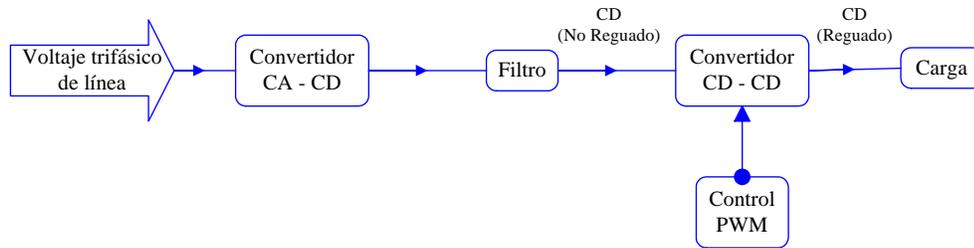


Figura 2.13 Diagrama a bloques de la conversión de energía eléctrica

Al igual que los CFP's mencionados en el capítulo anterior, los convertidores CD – CD se clasifican de la misma manera:

- ✓ Reductores (*Buck*)
- ✓ Elevadores (*Boost*)
- ✓ Reductores – Elevadores (*Buck – Boost*)

En un convertidor reductor, el voltaje promedio de salida (V_o) es menor que el voltaje de entrada (V_s).

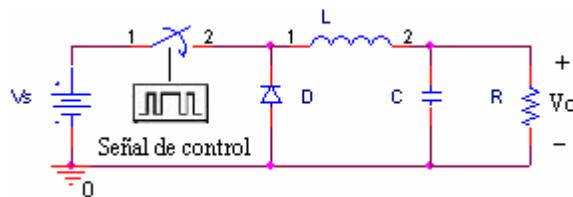


Figura 2.14 Convertidor reductor

El principio de operación de este convertidor se divide en dos partes. La primera consiste en el cierre del interruptor, esto provoca que la corriente de la fuente se incremente y fluya

a través del inductor L , el capacitor C y la resistencia R . La segunda parte comienza cuando el interruptor se abre, provocando que la corriente que se encuentra almacenada en el inductor, fluya a través del diodo, L y C . Dicho de otra forma, L se comporta como una fuente temporal de corriente hasta que ésta se reduce. Nuevamente se cierra el interruptor y L se abastece de corriente.

En un convertidor elevador, el voltaje promedio de salida es mayor al voltaje de entrada.

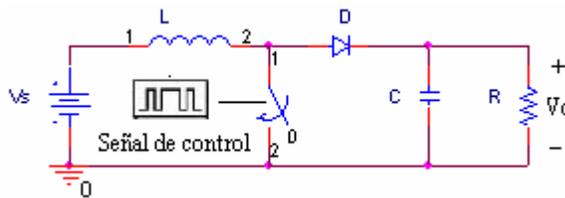


Figura 2.15 Convertidor elevador

La operación del circuito es similar a la de un reductor. También esta constituida por dos partes. La primera comienza cuando el interruptor se cierra. La corriente de la fuente fluye hacia L y el interruptor, debido a que éste representa una menor impedancia con respecto a D , C y R . La segunda etapa comienza cuando el interruptor se abre y la corriente almacenada en L ahora fluye hacia D , C y R . La corriente de L disminuye hasta que empieza el otro ciclo de conmutación. Este tipo de convertidores puede incrementar el voltaje sin la necesidad de transformadores. La corriente de salida es muy sensible y depende del ciclo de trabajo (d) del transistor.

El convertidor reductor elevador, puede entregar voltajes de salida superiores o inferiores a los de entrada. Sin embargo, la polaridad del voltaje de salida es inversa a la de entrada.

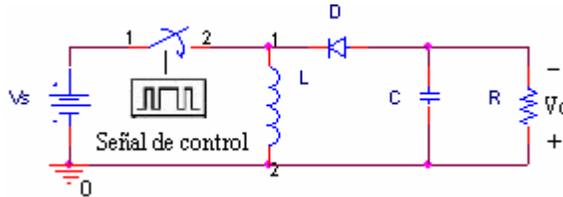


Figura 2.16 Convertidor reductor - elevador

Dado que el circuito está constituido a la entrada por un reductor, y a la salida por un elevador, conectados en cascada, el principio de operación es el mismo.

2.4.1 Modos de conducción

En los convertidores mencionados anteriormente, el inductor se carga y descarga de corriente de acuerdo a la etapa de operación. Esta corriente puede llegar a ser nula o no. Cuando la corriente alcanza el valor de 0A, se dice que el convertidor opera en modo discontinuo de conducción (DCM). Si la corriente del inductor (I_L) mínima tiene cierto valor superior a 0A, el convertidor opera en modo continuo de conducción (CCM). Una de las principales ventajas de operar en DCM, es que se conocen las condiciones iniciales ($I_L = 0$) durante un ciclo de conmutación. Esto facilita el diseño de cualquier convertidor CD – CD. Sin embargo, estos están limitados para operar con potencias no mayores a los 250W [12]. Esto es debido a que los dispositivos que operan en DCM deben de soportar altas tensiones, por lo que tienden a sobrecalentarse. Para que los convertidores soporten potencias mayores a 250W, se requiere que trabajen en CCM. Un circuito convertidor tiende a operar en modo discontinuo cuando:

1. La frecuencia de conmutación de un transistor decrementa.
2. El ciclo de trabajo del transistor reduce.
3. La carga resistiva incrementa.
4. La inductancia utilizada tiene un valor pequeño [12].

Por otro lado, la ganancia de voltaje (M) se ve modificada, esto depende del modo de conducción del convertidor.

	Elevador	Reductor	Reductor – Elevador
M (CCM)	$\frac{1}{1-d}$	d	$\frac{d}{1-d}$
M (DCM)	$\frac{1 + \sqrt{1 + 2d^2 R / Lf_s}}{2}$	$\frac{2}{1 + \sqrt{1 + 8Lf_s / d^2 R}}$	$\frac{d}{\sqrt{2Lf_s / R}}$

Tabla 2.1 Ganancias de voltaje para los distintos convertidores [2], [27]

2.5 Conclusiones

Dado que la mayoría de los aparatos electrónicos funcionan con CD, se necesita convertir la energía eléctrica trifásica, ya que ésta es generada en CA. Los convertidores CA – CD representan cargas no lineales debido a la naturaleza de los diodos. Es por esto que el factor de potencia se reduce considerablemente. Además de esto, produce un voltaje de CD no regulado. Por otro lado, un convertidor CD – CD regula el voltaje de salida, lo cual compensa la no regulación del convertidor CA –CD. Sin embargo el problema del bajo factor de potencia aún persiste. Para incrementar el factor de potencia, se requiere de un convertidor CA – CD que genere la menor cantidad de componentes armónicos y que no desfase la componente fundamental de corriente con respecto al voltaje, además de proporcionar un voltaje regulado.