CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE POTENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN:

Muchos autores coinciden en que la historia de la electrónica de potencia empezó en 1900, cuando el rectificador de arco de mercurio fue introducido, a partir de ahí se desarrollaron grandes dispositivos como el transistor de germanio o silicio, desarrollado en los Laboratorios Bell por Bardeen, Brattain y Shockley[1], este fue el inicio de la Electrónica de Potencia. Para 1958, se había desarrollado el tiristor por General Electric. A partir de ahí todos los rectificadores de arco de mercurio fueron reemplazados por rectificadores de silicio controlados.

La revolución de la electrónica de potencia está dando la capacidad de dar forma y controlar grandes cantidades de energía con una eficiencia cada vez mejor [3]. Así gracias a la fusión que existe entre la electrónica de potencia y la digital se tienen muchas aplicaciones tanto a nivel residencial como a nivel comercial, así como aplicaciones industriales, este último incluyen computadoras, transportación, procesamiento de información, telecomunicaciones, aplicaciones aéreas y/o espaciales. [1]

1.2 SISTEMAS DE ELECTRONICA DE POTENCIA

Para el control de sistemas de potencia, es necesario realizar la conversión de potencia de una a otra forma, y que las características de conmutación de los dispositivos permitan estas conversiones. La mayoría de los sistemas de potencia consiste en 2 partes o módulos principales [1]:

- Módulo de potencia.
- Módulo de control.

La parte de potencia maneja la transferencia de energía de la entrada hasta la salida, y los circuitos de control regulan la cantidad de energía (potencia) deseada a la salida [1].

Los circuitos electrónicos de potencia se pueden clasificar en 4 tipos y sus diferentes aplicaciones, los cuales se muestran en la tabla 1.1:

Convertidores	***Fuente de poder***	***Ejemplos prácticos de aplicación***
Rectificador (Convertidor CA-CD)	Fuente de voltaje CD	Fuente de bajo voltaje CD para circuitos electrónicos
	Fuente de corriente CD	Fuente de alto voltaje CD para rieles eléctricos
	Convertidor reversible	Convertidor reversible de alta potencia para transmisiones de CD
	Motor de CD (Control Estático de Leonard)	Control de velocidad de molinos de balanceo en trabajos de acero, de locomotoras eléctricas, y elevadores. Servocontrol de máquinas

		numéricamente controladas y de brazos de robots
Inversores (Convertidor CD-CA)	Voltaje constante frecuencia constante o CVCF (*Constant Voltage Constant Frequency* por sus siglas en inglés) fuente de poder	Fuente ininterrumpible (UPS) para computadoras y equipo de comunicación. Fuente de poder de emergencia para hospitales y hoteles
	Fuente de alta frecuencia	Inductor de calor para contenedores Máquinas para descargas eléctricas
	Sistemas de generación de energía	Celdas solares y de combustible
Convertidor CA - CA	Switch CA	Switch estático de CA
	Regulador de potencia CA	Ajustar la intensidad de la luz Control de calentamiento Control de potencia reactiva
	Variador de velocidad de frecuencia constante o VSCF (*Variable speed constant frecuency* por sus siglas en inglés) (Cicloconvertidor)	Fuente de frecuencia constante en aviones
Convertidor CD-CD	Fuente de CD	Regular voltaje en circuitos electrónicos Sistemas de ignición

Tabla 1.1. Diferentes tipos de convertidores y sus aplicaciones. [2]

En la Tabla 1.1 se puede observar las diferentes aplicaciones que existen para los convertidores de Corriente Alterna (CA)/Corriente Directa (CD), ya que en muchas aplicaciones industriales, de comunicaciones y otras áreas se necesita que la corriente sea continua, y la línea de alimentación entrega corriente alterna, por lo que se recurre a

este tipo de convertidores. Se tienen dos tipos de rectificadores, como se muestra en la Figura 1.1, que son los controlados y los no controlados.

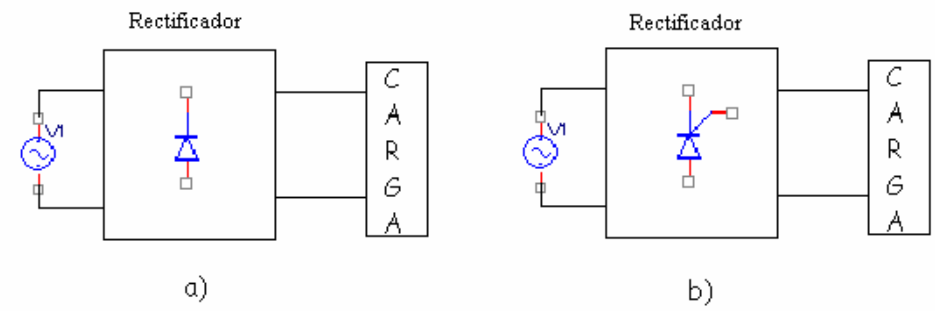

Figura 1.1. Diagrama a bloques de convertidores CA/CD, a) no controlado, b) controlado.

En la Figura 1.1a se observa un rectificador no controlado, el cual está formado exclusivamente por un puente de diodos. La relación entre la tensión de CA y CD es constante. Al no haber semiconductores controlados no hay circuito de control, por lo que la simplicidad y fiabilidad de estos equipos son muy grandes. No hay problemas de bloqueo. En régimen estacionario los diodos van entrando y saliendo de conducción de una forma natural obligados por la fuente de alimentación.

Ventajas:

- Costo mínimo
- No sensibles al valor de la tensión de salida

Algunos ejemplos:

- Entrada de fuentes de alimentación
- Alimentación de motores CD

En la Figura 1.1b se observa un rectificador controlado el cual puede estar formado por SCR's. El SCR es un semiconductor que presenta dos estados estables: en uno conduce, y en otro está en corte. El objetivo del SCR es retardar la entrada en conducción del

mismo, ya que como se sabe, un SCR conduce no sólo cuando el voltaje en sus terminales se hace positivo (tensión de ánodo mayor que tensión de cátodo), sino cuando siendo este voltaje positivo, se envía un pulso a la compuerta. El parámetro principal de los rectificadores controlados es el ángulo de retardo α.

1.3 DISPOSITIVOS DE CONTROL PARA SISTEMAS DE POTENCIA

La mayoría de los sistemas como lámparas fluorescentes con balastros, motores con drivers de estado sólido, PCs, y aparatos electrodomésticos utilizan dispositivos de control, los cuales les ayuda a controlar el flujo de energía que se transfiere a la carga. Estos tipos de dispositivos nos entregan alta eficiencia y variando el ciclo de trabajo del dispositivo de control se puede regular el voltaje de salida. Para realizar la parte de conmutación, existen varios dispositivos semiconductores, en la tabla 1.2 se muestran algunas propiedades de estos dispositivos.

Dispositivo	**Capacidad de Potencia**	**Velocidad de conmutación**
BJT / MD	Media	Media
MOSFET	Baja	Rápida
GTO	Alta	Lenta
IGBT	Media	Media

Tabla 1.2 Propiedades relativas de los dispositivos de conmutación. [10]

Dependiendo de la aplicación que se requiera, se utilizará el dispositivo adecuado a esta aplicación. Los MOSFETs de potencia son muy populares para aplicaciones de bajo voltaje, baja potencia y conmutación a altas frecuencia, así como en fuentes de potencia

conmutadas, motor de CD sin escobillas, relevadores de CD de estado sólido y aplicaciones automotrices. Por otro lado, esta el IGBT, que tienen las características de conmutación y conducción de un BJT, pero es controlado por voltaje al igual que el MOSFET. Este dispositivo es una alternativa, debido a que combina las propiedades del BJT y del MOSFET, además de que su capacitancia de entrada Ciss es menor que la del MOSFET. Los IGBT son usados en motores de CA, Sistemas UPS (*Uninterruptible power supplies* por sus siglas en inglés), compesador de armónicos y de cargas reactivas, fuentes conmutadas.

1.4 CONCEPTOS BASICOS DE POTENCIA

La potencia es una indicación de cuanto trabajo (conversión de energía de una forma a otra) puede efectuarse en una cantidad específica de tiempo. La unidad eléctrica de medición para la potencia es el watt (W), definido por [15]:

1 watt (W) = 1 joule/segundo (J/s)

La potencia es determinada por [15]:

$$P = \frac{W}{t} \qquad (1.1)$$

Donde: P = Potencia

W = Trabajo (Joules)

t = Tiempo (segundos)

La potencia entregada a cualquier dispositivo en función del tiempo está dada por el producto del voltaje instantáneo a través del dispositivo y la corriente instantánea que pasa por él, la cual se denomina Potencia instantánea y esta determinada por:

$$p(t) = v(t) * i(t) \qquad (1.2)$$

La potencia puede ser entregada o absorbida según sea la polaridad del voltaje y la dirección de la corriente.

La cantidad de energía almacenada se define como:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt \qquad (1.3)$$

Donde W = Trabajo.

p(t) = Potencia instantánea.

La Potencia Promedio se define como:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t)dt \qquad (1.4)$$

Donde P= Potencia promedio.

T = Periodo

p(t) = Potencia instantánea.

1.4.1 Potencia eléctrica en corriente alterna

La potencia entregada a una carga en cualquier instante está definida por el producto del voltaje aplicado y la corriente resultante, es decir, p = v(t)*i(t). Pero en corriente alterna, dado que *v* e *i* son cantidades senoidales, se establece que:

$$v = Vm\ sen(\omega t + \varphi_v)$$

$$i = Im\ sen\ (\omega t + \varphi_i)$$

Si la carga es resistiva φ = 0°, si la carga es reactiva (inductiva o capacitiva), φ = 90° o – 90°. Para obtener la potencia instantánea se tiene la siguiente ecuación:

$$p(t) = v(t)i(t) = \text{VmIm sen}(\omega t + \varphi_v) \text{ sen } (\omega t + \varphi_i) \qquad (1.5)$$

- **Potencia activa (P),** es la energía consumida, capaz de producir trabajo útil, y es similar a la energía consumida por una resistencia eléctrica; su símbolo es **P,** sus unidades son los **Watts (W)**. Sustituyendo la ecuación (1.5) en la ecuación (1.4) y resolviendo, se obtiene la Potencia promedio la cual se expresa como:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos\varphi \qquad (1.6)$$

Donde Vm e Im son los valores pico del voltaje y la corriente.

También puede expresarse como:

$$P = V \times I \cos\varphi \qquad (1.7)$$

Donde V e I son los valores eficaces del voltaje y la corriente, además se considera el ángulo de fase φ o desfasamiento entre el voltaje y la corriente.

- **Potencia aparente (S)** Potencia entregada a una carga sin considerar los efectos de un ángulo de factor de potencia de la carga, se obtiene con la siguiente fórmula [15]:

$$S = V_{rms} x\, I_{rms} \qquad (1.8)$$

Y su valor se expresa en voltamperes (VA). Si el voltaje y la corriente hubiesen sido cantidades de CD, la potencia promedio simplemente sería el producto de estas cantidades. Pero al aplicar esta fórmula al problema senoidal, debería obtenerse un valor para la potencia absorbida que "aparentemente" esta dada por $V_{rms}I_{rms}$. Sin embargo, el producto de los valores eficaces de la corriente y voltaje no son la potencia promedio, lo cual se define como potencia aparente. [17]

- **Potencia reactiva (Q),** se caracteriza por la acumulación de energía, durante una mitad de ciclo y la devolución de la misma durante la otra mitad. No produce un trabajo físico directo, es necesario para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares [15]. Está dada por la expresión:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \qquad (1.9)$$

Donde V e I con valores eficaces del voltaje y la corriente y φ es el ángulo de fase entre V e I, se mide en voltamperes reactivos (VAR).

En la Figura 1.2 se ilustra la relación existente entre las distintas potencias:

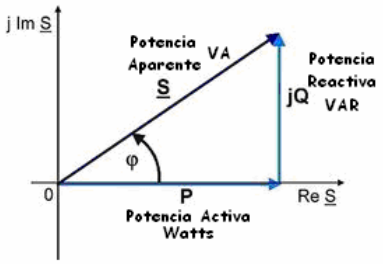

Figura 1.2.- Relación entre potencias activas, aparentes y reactivas

A partir del triángulo de potencias (Figura 1.2) se puede obtener:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad (1.10)$$

$$Cos\phi = \frac{P}{S} \qquad (1.11)$$

$$Tan\phi = \frac{Q}{P} \qquad (1.12)$$

Como se observa, la potencia aparente es la suma geométrica de las potencias real y reactiva.

Por definición, el Factor de Potencia de entrada es la potencia activa dividida entre la potencia aparente. El Factor de Potencia deberá tener un valor aproximado a 1 cuando la forma de onda de la corriente concuerde con la forma de onda del voltaje y está expresado como:

$$FP = \frac{Potencia\ Activa}{Potencia\ Aparente} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \qquad (1.13)$$

En el caso senoidal, el factor de potencia simplemente es **cos φ**, donde φ es el ángulo de desfasamiento entre el voltaje y la corriente.

Para aprovechar toda la energía que se sumistra, la industria eléctrica procura que todas las instalaciones tengan un factor de potencia máximo, por lo tanto, la potencia reactiva será mínima. A pesar de lo dicho anteriormente, por razones de seguridad en la red eléctrica se aconseja que el Factor de potencia sea próximo a 1 pero sin llegar a este valor, ya que en este caso se produce el fenómeno denominado resonancia, que da lugar a la aparición de valores peligrosos de voltaje y corriente.[7]

La Distorsión Armónica Total o *THD* (*Total Harmonic Distortion* por sus siglas en inglés), es un parámetro nos indica la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental. En casi todos los casos, se desea que un sistema sea lineal e invariante en el tiempo, pero si el sistema cuenta con un dispositivo no lineal, entonces contenido adicional es sumado a la frecuencia original, y se expresa como:

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots\ldots + I_N^2}}{I_1} \qquad (1.14)$$

El THD usualmente es expresado en porcentaje, como factor de distorsión o en decibeles, como atenuación de la distorsión.

1.5 Importancia del Factor de Potencia.

El uso de computadoras, balastros, televisiones, controladores de motores, cargadores de batería y muchas aplicaciones industriales de corriente directa se van incrementando. Para alimentar dichos aparatos se utilizan convertidores CA/CD, que pueden estar fabricados a través de puentes de diodos (rectificador de onda completa) y un filtro para obtener un voltaje de CD constante. Pero bien se sabe que los rectificadores generan armónicos al momento de la conversión además de que desfasan la corriente y voltaje de entrada. Una distorsión armónica elevada provoca problemas tanto en la línea de alimentación, así como en sistemas de telecomunicaciones cercanos. Además de que estos nuevos dispositivos tienen una corriente eléctrica diferente, la cual puede causar problemas en la capacidad de utilidad eléctrica de estos.

Desde 1996 se creo el estándar IEC 1000-3-2 [9], el cual especifica el máximo contenido armónico permitido, de acuerdo a la clasificación de equipo, el cual se muestra en la Tabla 1.3.

Clase	Descripción
Clase A	Equipo trifásico equilibrado y cualquier otro equipo excepto los que puedan estar mencionados en cualquiera de las 3 clases restantes
Clase B	Herramientas eléctricas portátiles, las cuales son sujetas con la mano durante su operación normal y son usados por poco tiempo solamente
Clase C	Equipo de Iluminación incluyendo *dimmers*
Clase D	Equipo con una corriente de entrada con una "forma de onda especial" y una entrada activa de potencia 600W

Tabla 1.3 Clasificación de equipo. [7]

Los estándares para el control de armónicos se crearon para tener mejor rendimiento en sistemas, no contaminar sistemas cercanos y aumentar el Factor de potencia, ya que el tener un bajo Factor de Potencia representa un desperdicio de energía tanto para los usuarios como para la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La corriente que demanda un sistema, será mayor entre más bajo sea su factor de potencia, esto puede ocasionar que sus transformadores, cables y otros equipos de distribución se sobrecarguen, con un incremento tanto de las pérdidas por calentamiento como de las caídas de tensión; además de requerirse invertir en nuevos equipos si la corriente rebasa el límite de los existentes.

Para tener mayor eficiencia, no sólo en el suministro de energía, si no en la operación de los equipos se procurará mantener un Factor de Potencia (FP) tan aproximado a 100 % como lo sea posible. [7].

Para poder cumplir con los estándares IEC 1000-3-2, IEEE 519 [8] [9], aumentar el Factor de Potencia y tener mayor eficiencia, una de las soluciones que se ha desarrollando, son los Correctores de Factor de Potencia (CFP).

La necesidad de estos circuitos es debido a que en ciertos sectores industriales, así como para ciertos equipos como las fuentes de alimentación, se realizan conversiones de CA a CD, algunos de los dispositivos que realizan estas rectificaciones son no lineales (como los diodos, SCR y TRIAC) por lo que distorsionan la forma de onda de la corriente de entrada y esto a su vez provoca pérdida de energía.

En la Figura 1.3a se tiene un rectificador de onda completa de puente de diodos con carga RC, como se explicó anteriormente, las cargas que utilizan algunos sistemas son de tipo reactivas lo cual hacen que exista un desfasamiento entre el voltaje y la corriente de entrada, además al utilizar elementos no lineales como los diodos la forma de onda de la corriente de entrada se distorsiona considerablemente causando pérdidas de energía, como se observa en la Figura 1.3b.

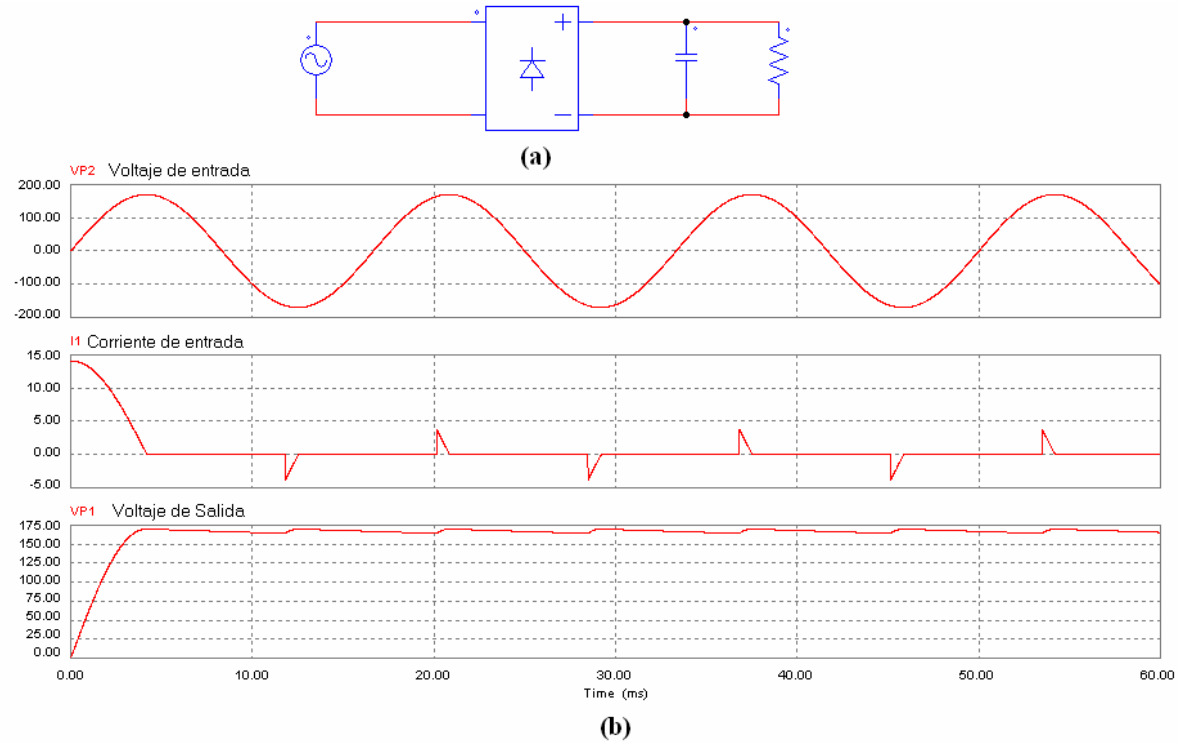

Figura 1.3. (a) Circuito rectificador de puente completo con carga RC, (b) Gráficas de entrada y salida de voltaje y corriente de entrada.

Es por esto que se ha diseñado los Correctores de Factor de Potencia, los cuales a partir de una fuente de CA proporcionan un voltaje de CD a una carga específica, sin distorsionar la forma de onda del voltaje y la corriente de entrada. Además ponen en fase la corriente con el voltaje. Respecto a la calidad que presenta la forma de onda de la corriente, se pueden considerar 3 tipos los cuales se muestran en la Figura 1.4.

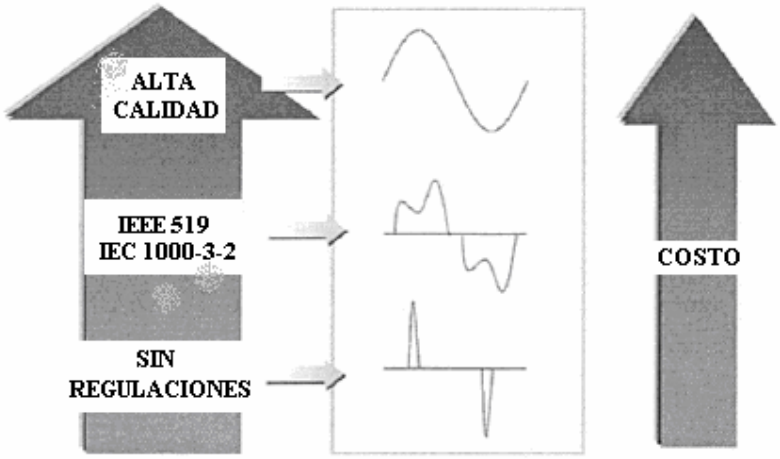

Figura 1.4. Relación entre la forma de onda de la corriente de la línea y el costo. [3]

Como se observa en la Figura 1.4 la forma de onda senoidal, hace que el circuito a implementar tenga un costo y calidad muy alta; una calidad intermedia son aquellos circuitos que cumplen con los estándares pero no se tiene un Factor de Potencia alto. Y el último son aquellos que sólo compensan el defasamiento con elementos reactivos, por lo cual su FP es bajo y no cumple con los estándares establecidos.

1.6 Corrector de Factor de Potencia

Para poder realizar la corrección del factor de potencia existen dos tipos de Correctores de Factor de Potencia:

- ***Corrector de Factor de Potencia Pasivo***: Es la manera más común de corregir el FP, y es utilizado en aplicaciones de alta potencia. Se realiza a través de cargas reactivas, como bancos de capacitores a la entrada de la señal, esto para que el defasamiento existente entre voltaje y corriente sea menor.

Existen métodos que nos pueden ayudar a la reducción de armónicos y optimizar el factor de potencia los cuales son:

- Proveedor de armónicos.
- Proveedor de resonancia.
- Selección de capacitancia.
- Corrección estática.
- Inversor.

- ***Corrector de Factor de Potencia Activo***: Es la manera más eficiente de corregir el FP, para realizar esto emplean un circuito de control de alta frecuencia para controlar el flujo de corriente a la carga; lo cual tiene el efecto de sincronizar la corriente demandada para que el desfasamiento entre corriente y el voltaje sea menor. Se utiliza para aplicaciones de media potencia.

Los correctores de Factor de Potencia activos son más eficientes ya que pueden alcanzar un FP de 95%. A continuación se mencionarán algunos ejemplos de correctores de Factor de Potencia activos:

- **Corrector de Factor de Potencia con dos Etapas [5]:** El método utilizado para la corrección del Factor de Potencia consta de dos etapas como se muestra en la Figura 1.6:

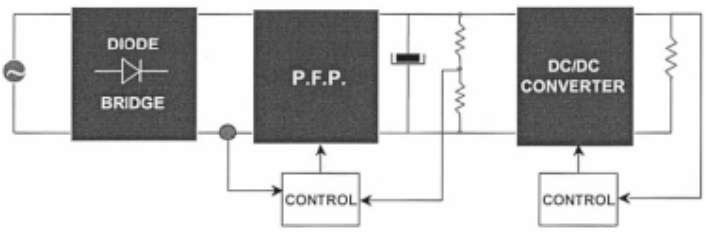

Figura 1.6. Diagrama a bloques de un CFP de 2 etapas. [4]

La primera etapa es donde se realiza la conversión CA/CD, así como la corrección de factor de potencia, la rectificación se realiza con un circuito de puente de diodos; y la corrección del Factor de Potencia pone en fase el voltaje y la corriente, esto lo realiza con un convertidor CD/CD. La segunda etapa se implementa con un convertidor CD/CD el cual es requerido para regular el voltaje de salida. Desde que este método tiene dos etapas, el tamaño y costo se elevan y la eficiencia se ve disminuida debido a la transferencia de energía entre una etapa y otra. Sin embargo, esta podría ser una buena opción para convertidores CA/CD debido a las siguientes razones:

- Forma de onda senoidal de la corriente garantiza el cumplimiento de cualquier estándar.
- Buen funcionamiento en voltajes de línea universal.
- El hecho de tener un voltaje constante en la entrada permite un buen diseño de la segunda etapa.
- Ofrece la posibilidad de aislar la línea de la carga.
- La penalidad que existe en la eficiencia debido al procesamiento doble de energía es parcialmente compensada, por el hecho de que el voltaje es controlado por un capacitor de almacenamiento.

- **Corrector de Factor de Potencia con una Etapa**: En este método se realiza la Corrección del Factor de Potencia a través de una sola etapa como se muestra en la *Figura 1.7*.

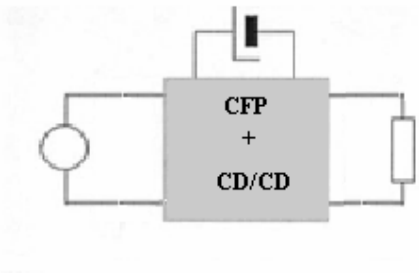

Figura 1.7. Diagrama a bloques de un CFP de una etapa, modificando un CD/CD para que trabaje como CA/CD. [4]

En la Figura 1.7 se observa que una sola etapa es la que realiza ambas cosas, la conversión de CA/CD y la corrección del Factor de Potencia, además de tener un voltaje de salida regulado. Esto se obtiene modificando un convertidor CD/CD, para que trabaje como un convertidor CA/CD y además ponga en fase el voltaje y la corriente y no distorsione sus formas de onda. Por lo cual se reducen costos, debido a que se utiliza un solo circuito y se reducen las pérdidas que podría ocasionar la transferencia de energía de una etapa a otra. [4]