

# El Rectificador como corrector del Factor de Potencia

Por Ing. Erasmo Luis González Méndez, Especialista Principal,  
Departamento Nacional de Energética y Climatización, VPOR e Ing.  
Evelio Amor Galano, Especialista en Energética y Climatización,  
Dirección Territorial Matanzas, ETECSA  
luis.glez@etecsa.cu, diagenerg1@mtz.etecsa.cu

## Introducción

Aunque en no pocas ocasiones suele olvidarse por sus usuarios, los sistemas de alimentación de DC son de importancia capital en la garantía de la continuidad en el servicio de telecomunicaciones que las empresas del ramo brindan a sus clientes.

Algunos, todavía hoy, identifican el proceso de rectificación de la energía eléctrica suministrada por la red industrial de AC y su conversión en 48 VDC para alimentar las cargas constituidas por el equipamiento de telecomunicaciones, con el que se produce en las fuentes de alimentación de DC estudiadas en las primeras clases de electrónica general de los cursos de formación de técnicos e ingenieros, a saber: transformación, rectificación, filtrado y estabilización. Sin embargo y aun cuando los primeros rectificadores presentaban esta estructura extremadamente sencilla, barata y fiable, la demanda de corriente eléctrica que se impone a la red de distribución de AC, está bastante alejada de una senoide. Puede afirmarse que, en realidad, está formada por cortos e intensos picos de corriente que al circular por la impedancia inherente a la

red de distribución, originan caídas de tensión que afectan significativamente la calidad de la energía recibida por otros usuarios de la misma red. Se originan problemas como la circulación de distribuciones trifásicas de armónicos a través del neutro y de los conductores eléctricos en general, los cuales no pueden ser consumidos por las cargas produciendo sobrecalentamiento en los conductores y devanados de generadores y transformadores con pérdida del aislamiento.



Figura 1 Doble alimentación, supervisión y gestión de alarmas de los sistemas de rectificadores

La contaminación aportada por los sistemas de energía tradicionales de ETECSA a las redes de distribución, comienza a reducirse con la introducción de los rectificadores conmutados que acompañan a las nuevas tecnologías instaladas como resultado del proceso de digitalización. La figura 1 muestra algunas nuevas prestaciones que antes no disponían los rectificadores como son la doble alimentación de AC, la supervisión y la gestión de alarmas. Estos equipos de nueva generación se caracterizan por una alta eficiencia de conversión y por su comportamiento como correctores del factor de potencia. Este comportamiento será motivo de análisis en el presente trabajo, así como también las configuraciones básicas que los mismos presentan.

## Fuentes conmutadas: distintas topologías

Los rectificadores empleados hoy en el soporte de energía de las telecomunicaciones, no son otra cosa que las comúnmente denominadas fuentes conmutadas, cuyo diagrama en bloques se muestra en la figura 2.

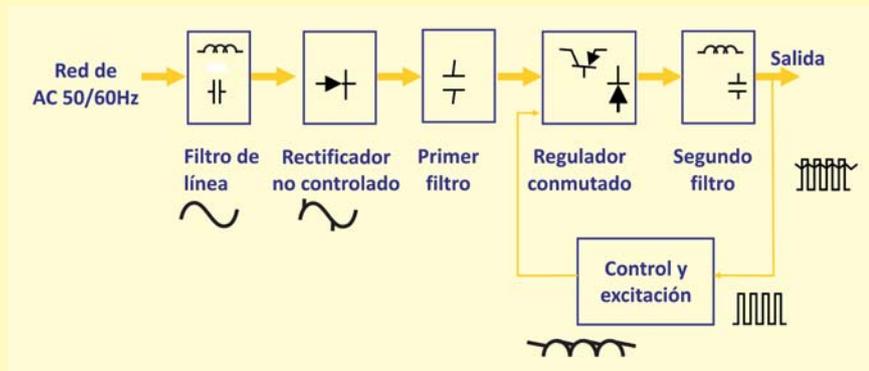


Figura 2 Diagrama en bloques de una fuente conmutada

La alimentación de AC es primeramente rectificada y luego filtrada por el capacitor almacenador de entrada para producir una fuente de DC no estabilizada, cuya capacidad de entrada debe ser regularmente grande para mantener la fuente de DC en caso de una caída severa en la alimentación principal.

El voltaje de DC no estabilizado alimenta directamente al bloque fundamental de la fuente que es el llamado regulador conmutado ó etapa de conmutación de alta frecuencia. A la salida del mismo se obtiene también otro voltaje de DC por lo que se le conoce además por convertidor DC-DC. Los dispositivos semiconductores de potencia de conmutación rápida tales como el MOSFET, los BJT y los IGBT, son excitados para que enciendan y apaguen a una frecuencia relativamente grande, conmutando el voltaje de entrada a la salida, lo que puede hacerse a través de un transformador de potencia en las topologías aisladas o simplemente a través de regulador en las topologías no aisladas. Los pulsos que controlan la conmutación generalmente tienen frecuencia fija que está entre los 20 y los 200 kHz y se varía el ciclo de trabajo. De esta forma, un tren de pulsos de voltaje de magnitud adecuada y con una razón de trabajo, aparece a la salida del regulador conmutado. Este tren de pulsos es rectificado y filtrado en las topologías aisladas o simplemente filtrado en las no aisladas, por el filtro de salida que puede ser un arreglo capacitor-inductor o un solo capacitor, en dependencia de la topología utilizada.

Esta transferencia de potencia, como se verá más tarde, debe llevarse a cabo con las menores pérdidas posibles para mantener la eficiencia en un nivel adecuado. Por lo tanto, es crítico el diseño óptimo de todos los componentes.

La regulación /estabilización de las salidas para lograr una fuente estabilizada fija o variable según sea conveniente es desarrollada por el bloque de control o realimentación. Como regla, los reguladores conmutados son gobernados por una señal PWM —*Pulse Wide Modulation/Modulación por Ancho del Pulso*— a frecuencia fija, que varía ciclo a ciclo el tiempo de conducción del conmutador. Esto compensa las variaciones en la fuente de entrada y en la carga.

En las fuentes con acople por transformador y con el propósito de mantener intacta la barrera de aislamiento, se requiere en la alimentación de algún tipo de aislamiento electrónico. Esto usualmente se logra utilizando un transformador de pulsos pequeño ó un optoacoplador lo que hace que el número de componentes del sistema aumente.

La mayoría de las aplicaciones requieren de un transformador. Este proporciona aislamiento eléctrico, posibilidades de variación de voltaje a través de la relación de vueltas y la probabilidad de proporcionar múltiples salidas. Sin embargo, existen configuraciones aisladas tales como los convertidores reductores y elevadores en los que el procesamiento de la potencia se logra sólo por la transferencia de energía inductiva —la mayoría de los circuitos más complejos están basados en topologías no aisladas—.

## Clasificación de los reguladores conmutados

Existen varios criterios a la hora de clasificar a los reguladores conmutados. El primero está asociado a la relación entre el voltaje de salida respecto al voltaje de entrada, pudiendo ser:

- 1- Reductores (*Buck*).
- 2- Elevadores (*Boost*).
- 3- Reductores - Elevadores. (*Buck-Boost*).

En función del aislamiento eléctrico entre la salida y la entrada, pueden encontrarse convertidores aislados y no aislados.

Si la transferencia de energía a la carga ocurre cuando el conmutador conduce, serán convertidores directos (*forward*) y si dicha transferencia ocurre cuando el conmutador está abierto, serán de retroceso (*flyback*).

Si el convertidor manipula niveles de potencia superiores es necesario utilizar más de un elemento conmutador, en ese caso, existen además de las topologías mencionadas anteriormente las configuraciones:

- ♦ Contrafase (*Push-pull*).
- ♦ Semipuente (*Half-bridge*).
- ♦ Puente (*Full-bridge*).

En estas últimas configuraciones ocurre una transformación CD/CA en la operación del convertidor. Estos convertidores en general se estudian en la temática de los inversores o como también se le conoce en el lenguaje técnico de telecomunicaciones: onduladores.

## Convertidor Reductor (*Buck Converter*)

La familia de convertidores directos (*forward*) que incluye al *Push-pull* y los puentes, están basados en el convertidor *Buck* que se muestra en la figura 3, el cual es muy empleado en los rectificadores que alimentan a los sistemas de telecomunicaciones.

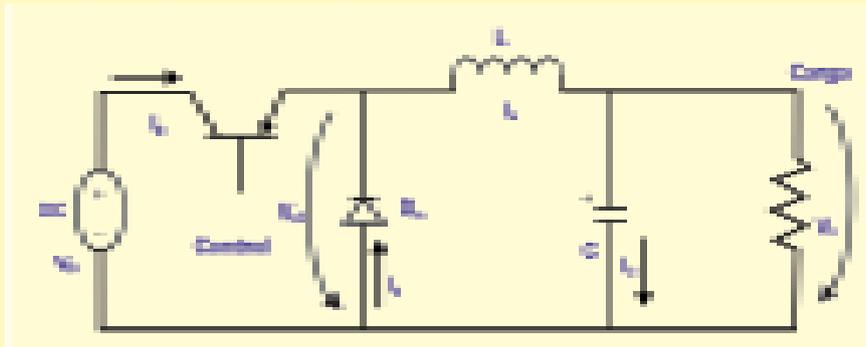


Figura 3 Convertidor Reductor (*Buck*)

En un regulador-reductor, el voltaje promedio de salida es menor que el de entrada de ahí su nombre. La operación del circuito puede dividirse en dos intervalos. El intervalo 1 (Figura 4) comienza cuando satura el transistor en  $t=0$ .

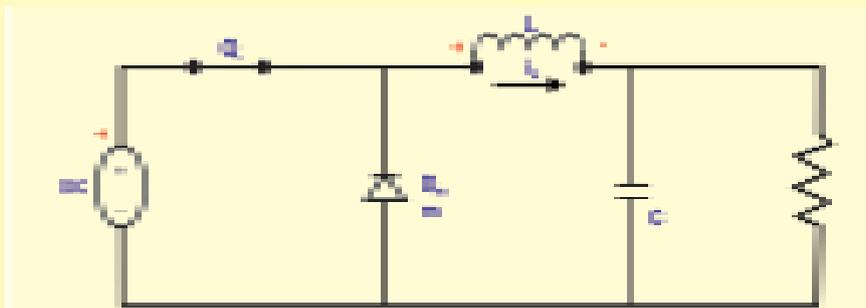


Figura 4 Circuito equivalente del *Buck* con el transistor en ON

La corriente de entrada es creciente e igual a la que circula a través del transistor y el inductor, y se divide en el paralelo formado por el capacitor del filtro y la carga.

El intervalo 2 (Figura 5) comienza cuando se corta el transistor en  $t=t_1$ .

El diodo de libre camino conduce debido a la energía almacenada en el inductor y la corriente a través del mismo, ahora decreciente, continúa fluyendo a través de  $L$ ,  $C$ , la carga y el diodo  $D_m$ .

Este intervalo termina cuando el transistor vuelve a saturar en el próximo ciclo.

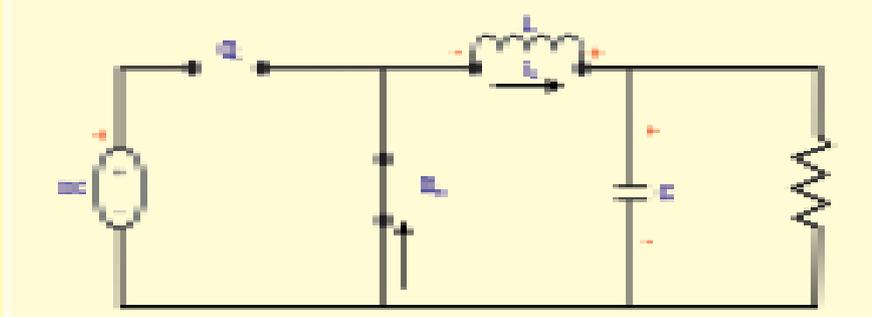


Figura 5 Circuito equivalente del Buck con el transistor en OFF.

El regulador tiene dos modos de conducción o de trabajo posibles:

- ♦ Continua
- ♦ Discontinua.

Puede demostrarse que si se define el factor de trabajo del conmutador o ciclo útil como la relación entre el tiempo en que está encendido el mismo, con respecto al período de conmutación.

$$\delta = \frac{t_{on}}{T}$$

Entonces  $V_o = \delta \cdot V_B$ ; lo cual significa que el voltaje de salida depende lineal y exclusivamente de  $\delta$ .

### Convertidor Elevador (*Boost Converter*)

Este convertidor no es muy empleado en el soporte de energía de las telecomunicaciones debido a que el voltaje medio de salida es mayor que el de entrada. Una variante del mismo que utiliza un MOSFET de potencia se muestra en la figura 6.

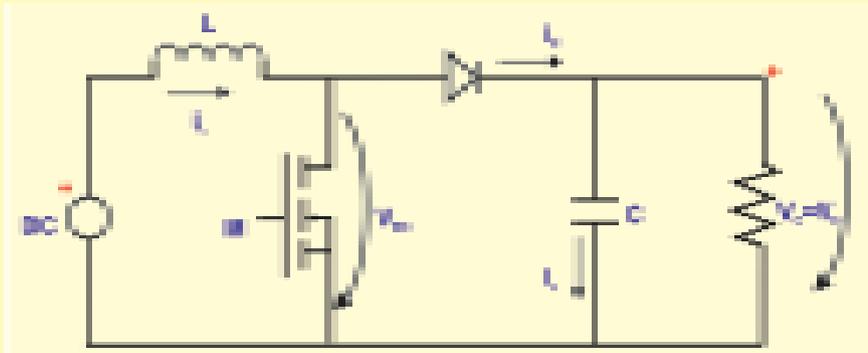


Figura 6 Convertidor Elevador (*Boost Converter*)

Al igual que en el *Buck*, la operación del circuito puede dividirse en dos intervalos.

En el intervalo 1 se activa el conmutador  $M$  en  $t=0$ . La corriente de entrada, que está creciendo, fluye por el inductor  $L$  y el MOSFET tal y como se ve en el circuito equivalente de la figura 7.

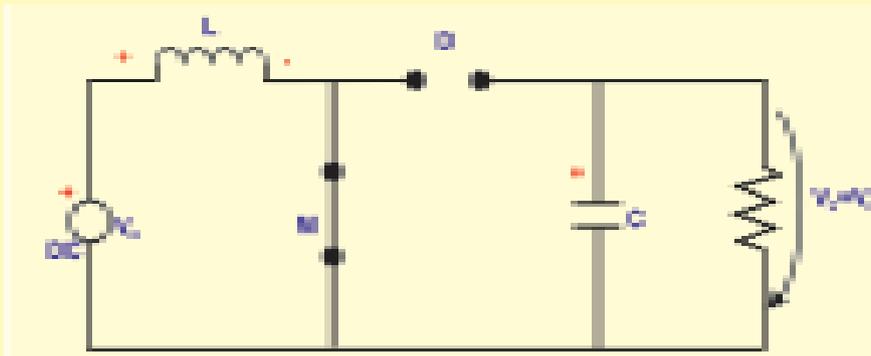


Figura 7 Circuito equivalente con el MOSFET en ON

El intervalo 2 comienza cuando se desconecta el conmutador (MOSFET)  $M$  en  $t=t_1$ . La corriente fluirá ahora a través de  $L$ ,  $D$ , y el paralelo del capacitor y la carga tal y como puede apreciarse en el circuito equivalente de la figura 8.

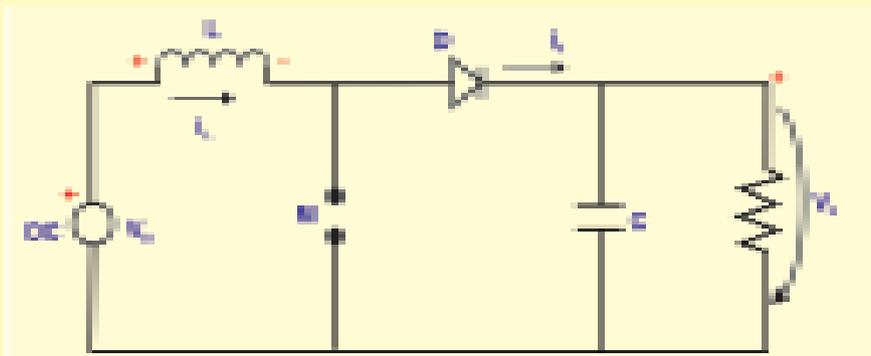


Figura 8 Circuito equivalente con el MOSFET en OFF

En este intervalo la corriente en el inductor decrece hasta que se active nuevamente al MOSFET. La energía que se almacenó en el inductor durante el intervalo 1, es transferida a la carga en el intervalo 2.

### El rectificador ideal

Las soluciones activas son las que permiten obtener los mejores resultados en lo que se refiere a la calidad de corriente demandada a la entrada del rectificador, aunque en general son más costosas y menos robustas que las pasivas, pero en cualquier caso, siempre es deseable que un rectificador presente una carga resistiva a la AC de la red industrial. La corriente de línea de AC así como el voltaje tendrán, entonces, la misma forma de onda y estarán en fase.

#### Resistor Libre de Pérdidas o Emulador de Resistencia

El resultado de lo anteriormente enunciado será entonces el de un factor de potencia unitario o cercano al mismo. A esta red de 2 puertos que es vista por el puente de diodos rectificador como una impedancia resistiva y por el puerto de salida como una fuente de potencia cons-

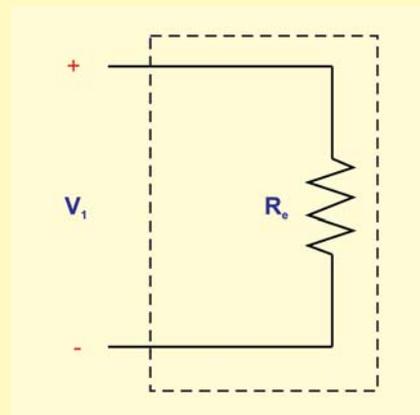


Figura 9 Puerto de entrada simulando una Resistencia Efectiva

tante, se le denomina: Emulador de Resistencia o Resistor Libre de Pérdidas —del inglés, *Loss Free Resistor* (LFR)—.

En estas condiciones, el puerto de AC y, a su vez, de entrada al convertidor DC-DC, se comporta como un resistor efectivo  $R_e$ , mientras que el puerto de DC a la salida del convertidor es una fuente de potencia  $P(t)$  igual a la consumida por el puerto de entrada. La magnitud del flujo de potencia es controlable a través de  $R_e$  y esto se hace a través de un lazo de control como se verá más adelante.

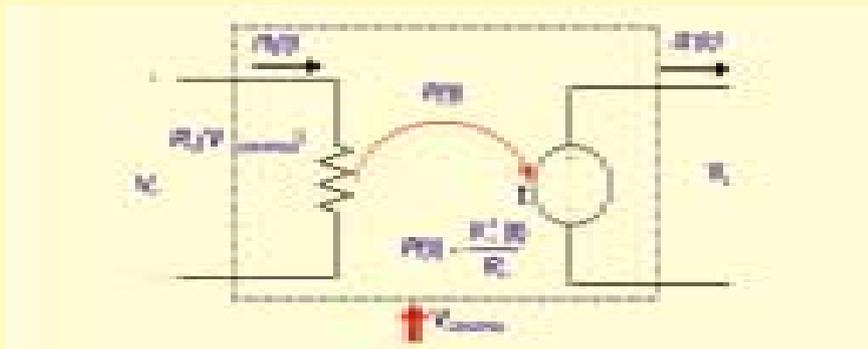


Figura 10 Comportamiento de fuente de potencia

Se requieren hacer dos consideraciones sobre la naturaleza del propio Emulador de Resistencia. En primer lugar, es un convertidor conmutado que en condiciones ideales, no presenta pérdidas. En segundo lugar, la frecuencia de conmutación es mucho mayor que la frecuencia de la red. Esta última siempre será de 50- 60 Hz con lo cual la frecuencia de variación de la señal a su entrada señal de AC rectificada será justamente el doble mientras que la frecuencia de conmutación estará entre los 50 y los 200 kHz como valores típicos. Por esta razón puede hablarse de “cuasiestatismo” a la hora de tratar el funcionamiento de un emulador de resistencia, o lo que es lo mismo, se puede afirmar que la tensión de entrada, prácticamente no varía en un ciclo completo de conmutación. Para que lo anterior se cumpla, es preciso señalar que los elementos reactivos del emulador son calculados en función de la frecuencia de conmutación y, por lo tanto, son capaces de almacenar energía en periodos del orden de la conmutación y no podrán almacenarla en periodos tan largos como los de la red. Con estas consideraciones, la potencia instantánea a la entrada del emulador será una función del tipo “seno elevado al cuadrado”, al igual que la potencia de salida y, en consecuencia, pulsante y de frecuencia igual al doble de la de la red. Como el objetivo final es lograr que la tensión en el bus de salida sea más o menos constante, debe haber un elemento que sea capaz de conseguir este objetivo. El elemento encargado de hacerlos será el condensador  $C$  al cual será denominado condensador de almacenamiento, entendiéndose que este es lo suficientemente grande como para que su tensión permanezca constante, por lo que todas las componentes de alterna que circulen por el emulador, lo harán a través de  $C$ , mientras que por la carga solo circulará la componente de DC.

Se define, entonces, como resistencia vista por el emulador de resistencia,

$$r(\omega) = \frac{R_0}{2\text{Sen}^2(\omega t)} \quad 1$$

Donde  $R_0$  es la resistencia de carga o el cociente entre  $V_0$  e  $I_0$  si se hubiera conectado otro convertidor en cascada en vez de la carga.

Un circuito equivalente para el puerto de AC de un rectificador ideal, es mostrado en la figura 9. En la práctica el convertidor puede generar asimismo, armónicos en las conmutaciones, una no linealidad que puede reducir el factor de potencia si no es suficientemente filtrada.

Un circuito equivalente para un rectificador ideal en el puerto de AC es por consiguiente una resistencia  $R_e$ , de aquí que el valor de  $R_e$  dependa de una señal de control (Figura 6). Esto permite la variación de la potencia a través del rectificador, subsecuentemente, la potencia promedio consumida por  $R_e$  es

$$P_{AB} = \frac{V_L^2}{R_e} \quad 2$$

Al cambiar  $R_e$ , resulta un sistema variable en el tiempo con generación de armónicos. Para evitar la generación de una importante cantidad de armónicos y la degradación del factor de potencia, las variaciones en  $R_e$  y en el control a la entrada, deben ser lentas con respecto a frecuencia de la línea de AC.

En la medida en que el convertidor tenga bajas pérdidas y no contenga elementos internos independientes que sean almacenadores de energía, la potencia consumida por  $R_e$  debe aparecer en el puerto de salida del convertidor.

La potencia instantánea es

$$P(t) = \frac{V_1^2(t)}{R_e} \quad 3$$

Dependiente solamente de  $V_1(t)$  y de la entrada de control y es independiente del voltaje y la corriente en el puerto de salida. Por lo tanto, la salida se comporta como una fuente de Potencia constante que obedece a la relación.

$$P(t) = v_2(t)i_2(t) = \frac{V_1^2(t)}{R_e} \quad 4$$

El símbolo de la fuente de potencia de la figura 10 es usado para denotar tal característica de salida. Note que al contrario de la fuente de corriente o de voltaje básica, la fuente de potencia es un dispositivo no lineal. En ese sentido la fuente de potencia no debe estar abierta o en corto circuito de manera análoga a como se hace con las fuentes de corriente o de voltaje convencionales.

Un modelo no lineal de dos puertos para un factor de potencia unitario ideal en un rectificador monofásico es mostrado en la Figura 9. El modelo de dos puertos es asimismo llamado Resistor Libre de Pérdidas porque de acuerdo con (3) el puerto de entrada obedece a la Ley de Ohm y según (4) toda la potencia en el puerto de

entrada es transferida directamente al puerto de salida sin pérdida de energía. Las ecuaciones que definen el LFR son las siguientes:

$$i(t) = \frac{v_1(t)}{R_e(v_{control})} \quad 5$$

$$v_2(t)i_2(t) = P(t) \quad 6$$

$$P(t) = \frac{v_1^2(t)}{R_e(v_{control})} \quad 7$$

La expresión con la que se obtiene la  $R_e$  del Emulador de Resistencia depende de la topología empleada. Por ejemplo, para el caso de un rectificador *flyback* trabajando en el Modo de Conducción Discontinuo —del inglés, *Discontinuous Conduction Mode* (DCM) — se determina por la expresión 8.

$$R_e = \frac{2n^2L}{D^2T_s} \quad 8$$

donde:

$L$ : inductancia de magnetización referida al secundario del transformador del *flyback*.

$D$ : ciclo útil

$T_s$ : período de conmutación.

La variación de  $R_e$  en función del ciclo útil es lo que permite los elevados valores del factor de potencia.

La figura 11 muestra el lazo de realimentación a través del cual se regula el ciclo útil del elemento activo a través de un Modulador PWM, variando de esa manera la  $R_e$  del Emulador de Resistencia en función de la demanda de la carga, lo cual permite el logro de un comportamiento resistivo y con el mismo, la obtención de un elevado factor de potencia.

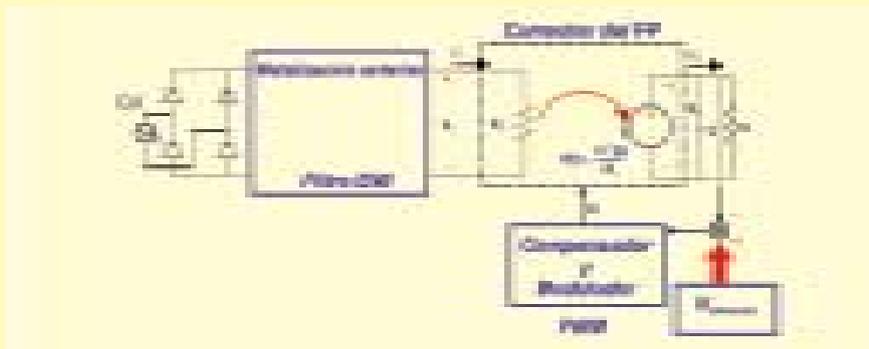


Figura 11 Realimentación y regulación del ciclo útil en función de la demanda hecha a la red de AC

### Aplicación en Cuba

Un ejemplo dentro de ETECSA lo constituye el rectificador Emerson del tipo HD4825-3 (Figura 12), empleado en los sistemas de energía PS48300/25 para la alimentación de las centrales de conmutación automáticas C&C de HUAWEI, y el equipamiento de transmisión de este proveedor, que se caracteriza por un factor de potencia de un 0,99, y un rango permisible para el puerto de AC entre 90 y 290 VAC y una eficiencia > 90 %.

Los sistemas de DC que alimentan al equipamiento de telecomunicaciones, instalado como parte del proceso de modernización, presentan características similares. Pueden mencionarse los SMR 48/34 de SAFT, los Flatpack de ELTEK y los rectificadores HPSmV 48/25 de los muy extendidos sistemas RAD.

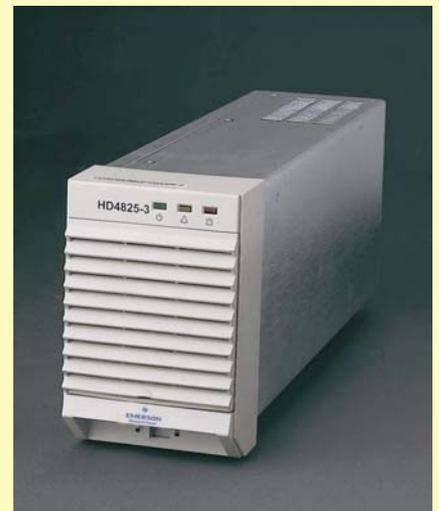


Figura 12 Rectificador Emerson HD4825- 3

### Conclusiones

El empleo de rectificadores conmutados en sistemas de energía, favorece decisivamente el factor de potencia que se obtiene. Esto no sólo contribuye a un empleo más racional de la energía suministrada, sino que disminuye los costos por concepto de penalización debido a bajo factor de potencia y, también, disminuye la contaminación de la AC suministrada a otras cargas. El comportamiento de los rectificadores como Emulador de Resistencia permite el alcance de estos objetivos. 

### Referencias bibliográficas

- [1] De Souza, Alexandre y Barbi de Ferrari, Ivo. "Comparative Análisis of Three High Power Factor Single Phase 200 W Rectifiers". Florianópolis – SC – Brazil: Federal University of Santa Catarina – Electrical Engineering Department INEP – Power Electronics Institute. Disponible en: <http://www.inep.ufsc.br>. (Consulta: diciembre/2007).
- [2] Sebastián J.; Villegas, P.J. y Hernando, M.M. "Corrección del Factor de Potencia en sistemas de alimentación monofásicos". Ponencia presentada en el Congreso Brasileiro de Electrónica de Potencia, 1997. págs. 14-27.
- [3] Ericsson, R.; Madigan, M. and Singer, S. "Design of a Simple High- Power Rectifier Based on the Flyback Converter." IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990, págs. 792-801.
- [4] User Manual Energy System PS48300/25. Emerson Network Company, 2005.
- [5] Skvarenina, Timothy L. "The Power Electronics Handbook". CRC Press, 2002, págs. 121-133.