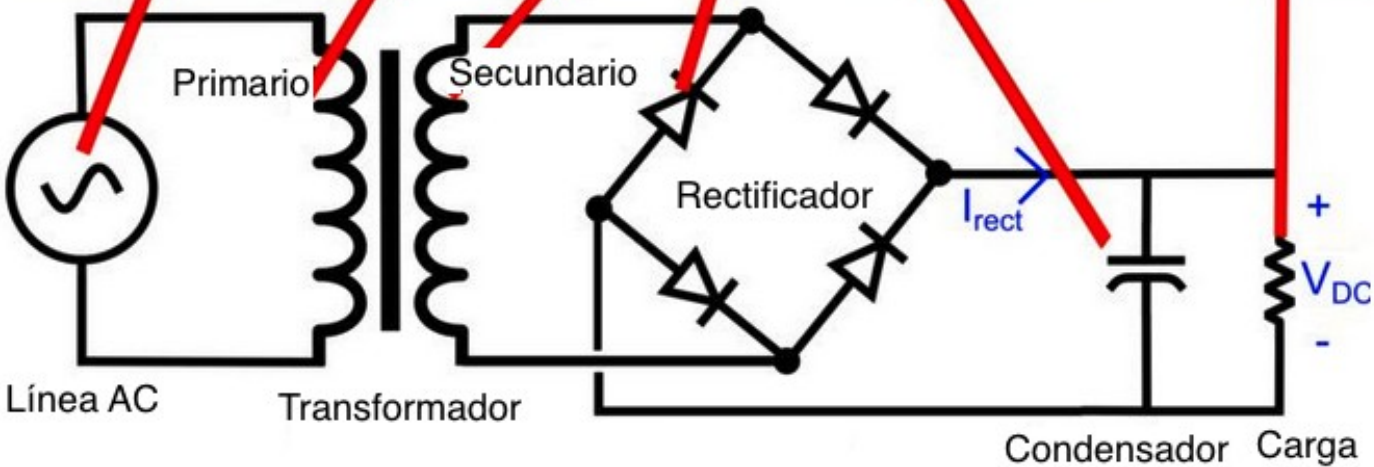
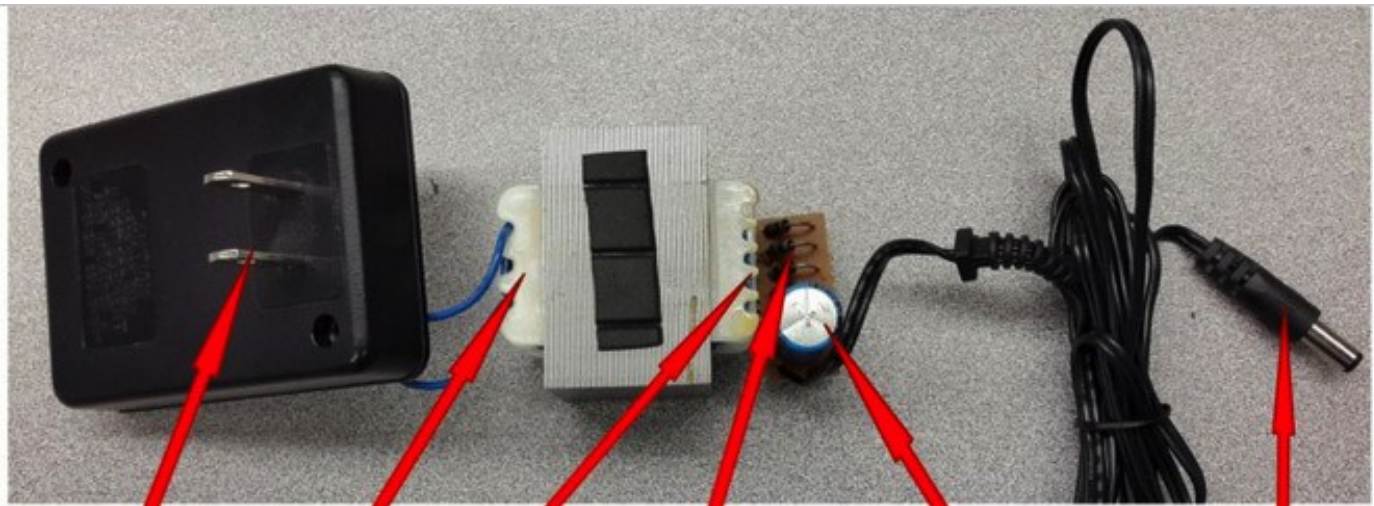


CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Alimentar un circuito electrónico con tensión DC a partir de la línea AC requiere por lo menos de una etapa de conversión AC/DC (rectificación) y una de filtrado DC.

La forma mas simple de implementar este circuito, que forma la primera etapa no regulada (el "pre-regulador") de casi todas las fuentes de alimentación de baja y media potencia, es con un transformador para adecuar los niveles pico de tensión, un puente rectificador de 4 diodos para realizar la conversión AC/DC a baja tensión y un condensador como elemento de filtrado DC de baja impedancia de salida.

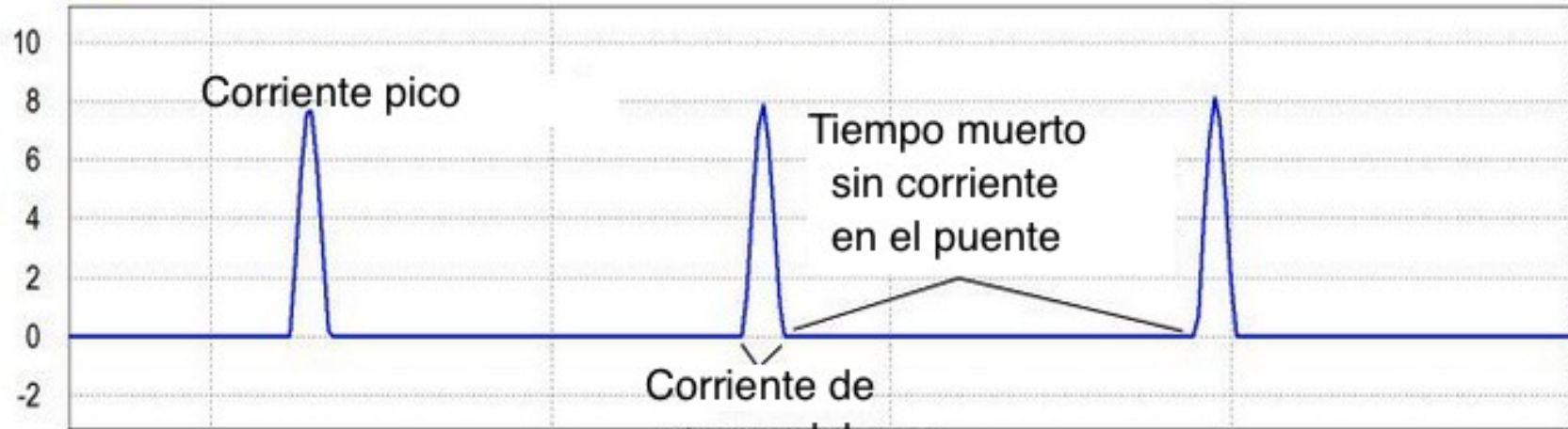


Despiece de un pre-regulador estándar.

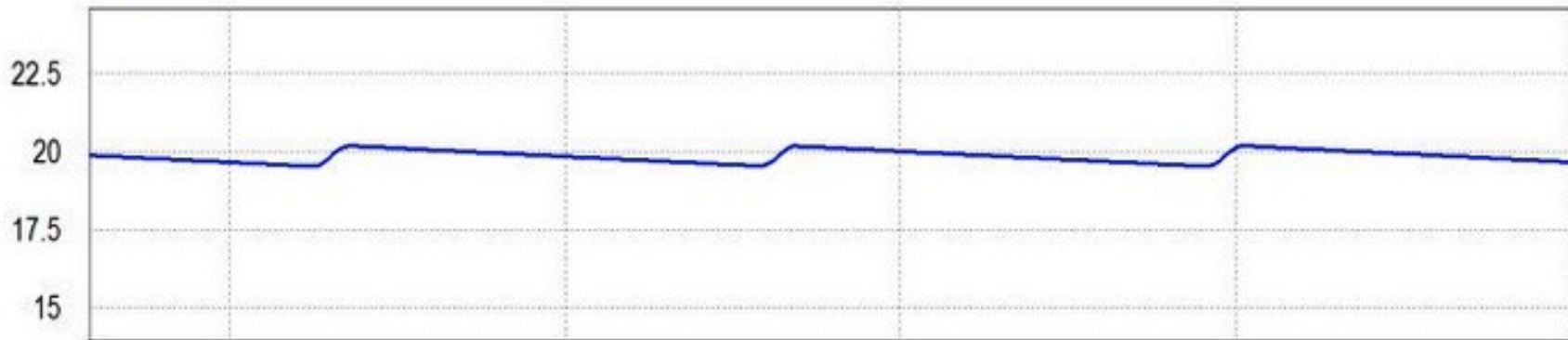
Esta configuración es simple y barata, cumple con su función pero tiene una limitación básica:

La acción del filtro capacitivo hace que la corriente que circula por el rectificador sea pulsante, con un tiempo muerto relativamente largo; el intervalo de conducción suele estar entre el 10 y el 20% del tiempo de ciclo, por lo que la corriente pico es entre 5 y 10 veces la corriente promedio.

irect

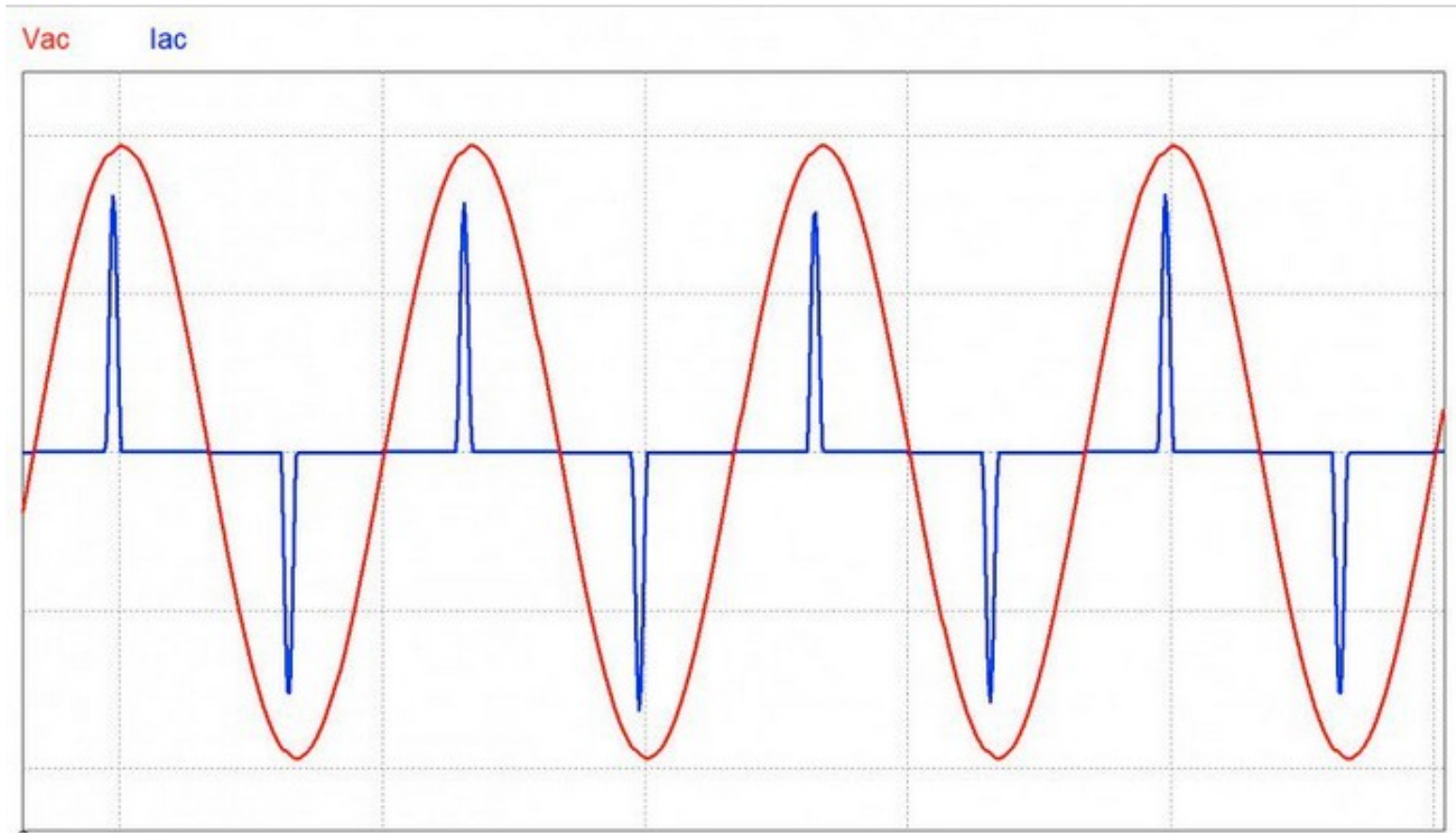


VDC

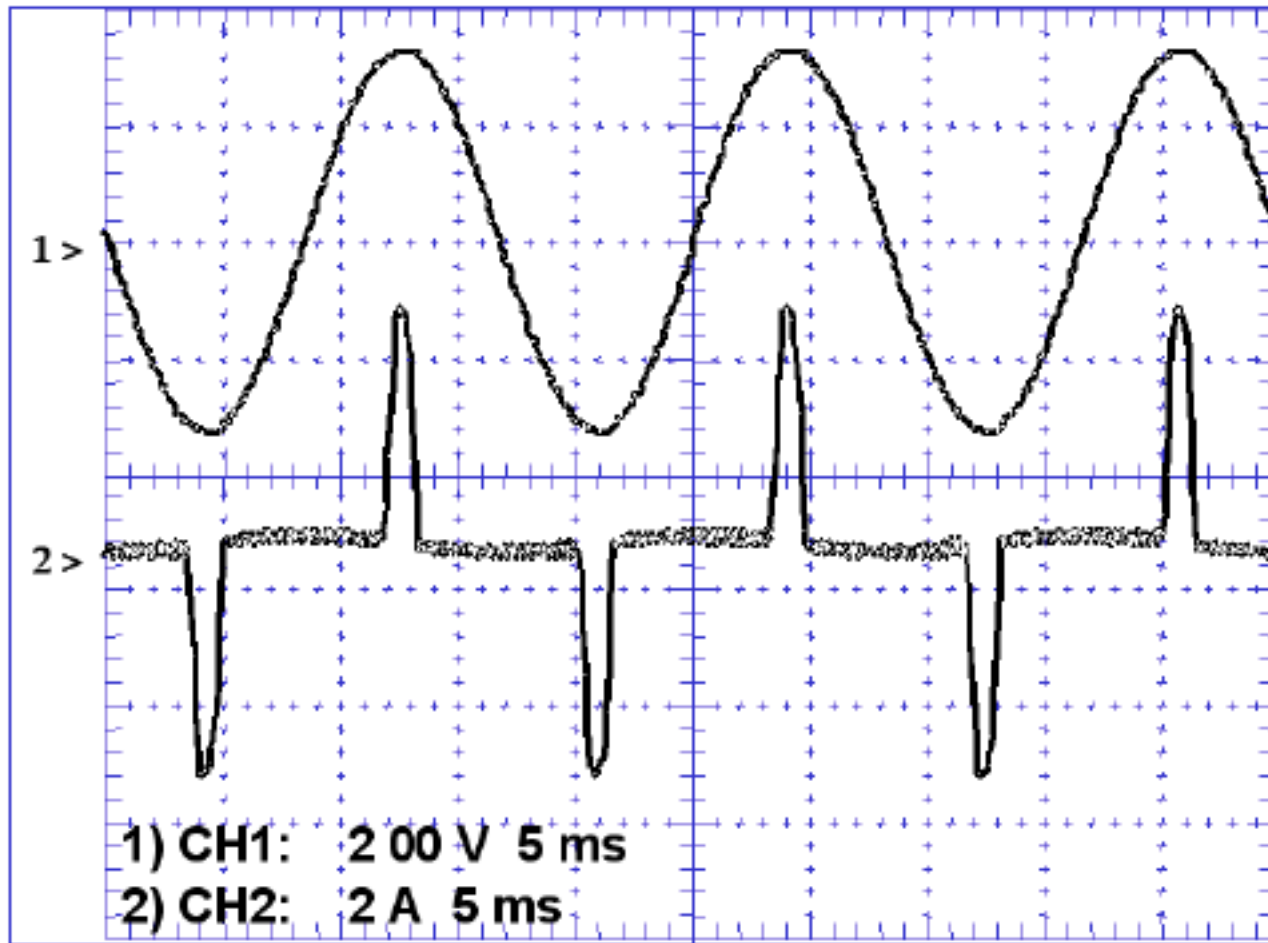


Formas de onda de corriente y voltaje en el filtro capacitivo.

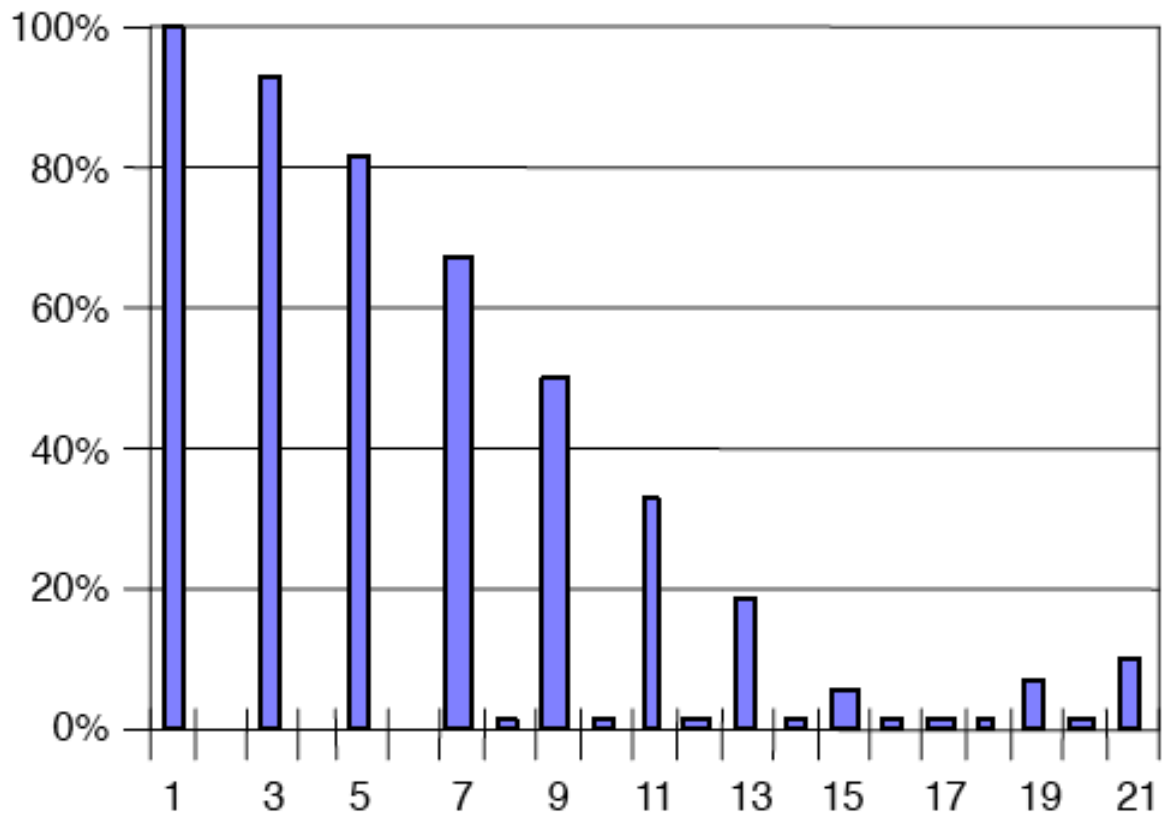
Esta corriente DC pulsante produce una corriente altamente no sinusoidal en el primario del transformador, lo que inyecta un nivel de armónicas en la línea, produciendo un factor de potencia menor que la unidad, aunque aparentemente la corriente y el voltaje están en fase.



Formas de onda de corriente y voltaje en la entrada del transformador, carga resistiva.



Formas de onda de corriente y voltaje en la entrada del transformador, carga activa tipo fuente conmutada.



Espectro de frecuencias de la forma de onda de corriente en la entrada del transformador, carga activa tipo fuente conmutada.

La presencia de armónicas en la corriente de línea hace que la definición mono-frecuencial del factor de potencia como el coseno del ángulo de fase entre corriente y voltaje no sea aplicable; para tener en cuenta a las armónicas se debe usar la definición multi-frecuencial del factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{|S|}$$

donde P es la potencia real entregada a la carga, y $|S|$ es el módulo de la potencia aparente total, incluyendo el aporte de todas las armónicas. En su forma mas general, la potencia real, P , es:

$$P = V_{1rms} I_{1rms} \cos \phi$$

Donde V_{1rms} es el valor rms de la componente fundamental de la tensión, I_{1rms} es el valor rms de la componente fundamental de la corriente y $\cos \phi$ es el ángulo de defasaje entre las componentes fundamentales del voltaje y la corriente.

Asumiendo, como es usual, que no existe distorsión en la forma de onda de tensión, la potencia real, P , es:

$$P = V_{rms} I_{1rms} \cos \phi$$

Donde V_{rms} es el valor rms de la tensión, I_{1rms} es el valor rms de la componente fundamental de la corriente y $\cos \phi$ es el ángulo de defasaje entre el voltaje y la fundamental de corriente.

Por su parte la potencia aparente S es, en todos los casos:

$$|S| = V_{rms} I_{rms}$$

donde I_{rms} es el valor rms de la corriente circulante total, tomando en cuenta los aportes de todas las armónicas.

Por lo tanto:

$$FP = \frac{V_{rms} I_{1rms} \cos \phi_1}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cos \phi_1$$

$$\frac{I_{1rms}}{I_{rms}}$$

Usualmente el cociente $\frac{I_{1rms}}{I_{rms}}$ se llama "factor de distorsión (de la corriente)", ya que indica el grado de distorsión que las armónicas introducen en la forma de onda de la corriente, y el término $\cos \phi_1$ se llama "factor de desplazamiento", de forma que el factor de potencia en presencia de armónicas de corriente resulta:

$$FP = \text{factor de distorsión} * \text{factor de desplazamiento}(\cos \phi).$$

En muchos casos el contenido armónico de la señal de corriente se especifica en términos de la "distorsión armónica total", o THD de la onda, la cual viene dada por:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}$$

En cuyo caso el factor de distorsión (f_{dis}) se puede escribir como:

$$f_{dis} = \sqrt{\frac{1}{1 + THD^2}}$$

Dado que el factor de desplazamiento es cercano a la unidad, en general se puede aproximar que el factor de potencia es esencialmente igual al factor de desplazamiento, lo que significa que la distorsión armónica total debe tender a cero si se desea que el factor de potencia tienda a 1.

Además de señalar que se están generando armónicas que contaminan la línea AC, un factor de potencia inferior a la unidad tiene también un efecto directo en la cantidad de potencia efectiva que el pre-regulador puede entregar a la carga en igualdad de las demás condiciones (eficiencia del circuito convertidor y valores rms de la tensión y de la corriente de entrada).

En general, si no se toman medidas para mejorarlo, el factor de potencia de un pre-regulador del tipo puente de diodos-condensador está en el rango de 0,6 a 0,7.

Por ejemplo, si se considera una fuente típica no compensada en factor de potencia, cuyo fp es del orden de 0,65, con una eficiencia de conversión del regulador, η , del 85%, alimentada con 120Vrms y consumiendo 12Arms, se tiene que la potencia entregada a la carga, P_o , es:

$$P_o = P_{linea}\eta = (V_{rms}I_{rms})\eta = (120V)(12A)0,85 = 796W$$

Por su parte, una fuente equivalente, pero compensada en fp, con un fp de 0,98 puede entregar a la carga una potencia máxima, P_{oM} :

$$P_{oM} = P_{linea}\eta = (V_{rms}I_{rms})\eta = (120V)(12A)0,98 = 1200W$$

Luego, si la carga requiere 796W, la corriente consumida con la segunda fuente será:

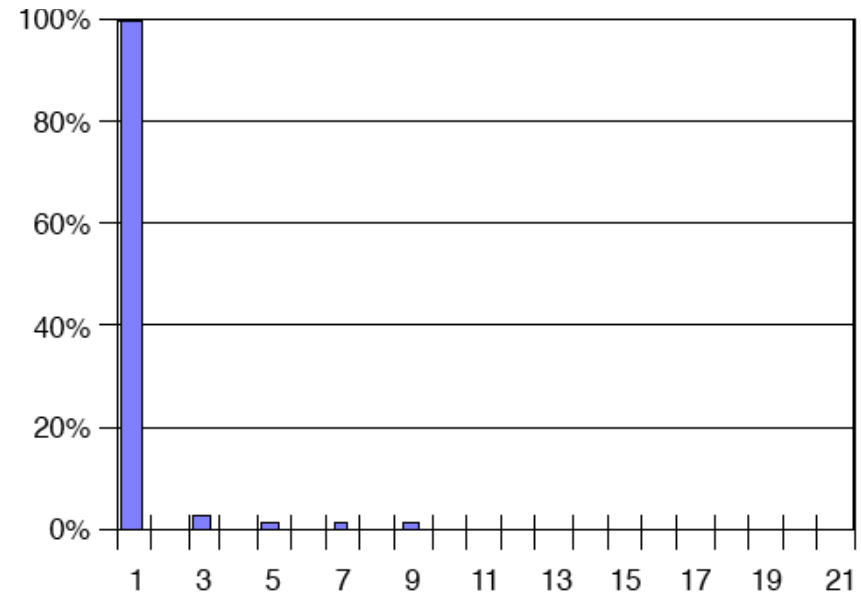
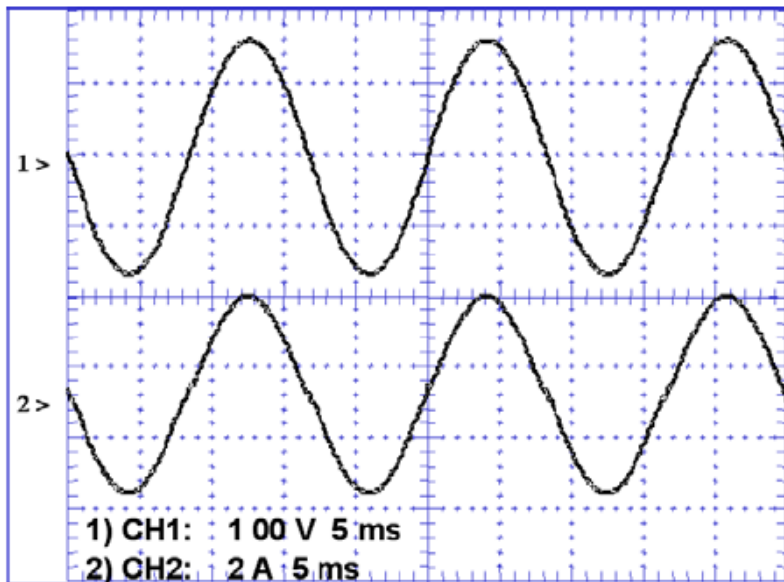
$$I = \frac{796W}{(120V)0,98} = 6,7687A$$

Lo que representa una reducción del 43% en el consumo de corriente respecto a la primera.

En el pasado el efecto del pobre factor de distorsión del convertidor AC/DC puente monofásico con filtro capacitivo no se consideraba importante salvo para fuentes de potencia elevada, y el circuito era de uso prácticamente universal en las fuentes DC de potencias bajas y medias; en la actualidad el aumento exponencial en el uso de equipos que requieren fuentes de poder, la preocupación por la eficiencia energética y la interferencia de radio frecuencia (RFI) han llevado a que se impongan normas muy estrictas sobre la cantidad de armónicas que se pueden inyectar en la línea.

Específicamente la norma IEC 61000 que regula estos asuntos establece los siguientes límites para fuentes:

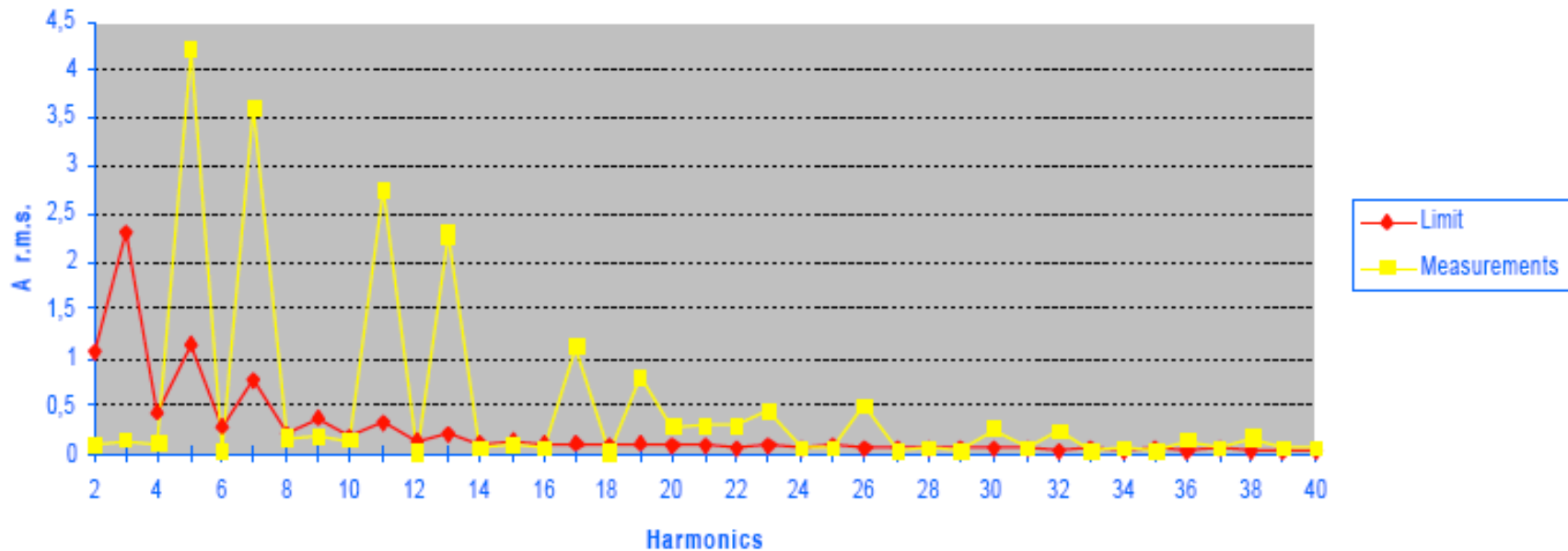
Armónica N°	75W<P<600W Corriente permitida (mA/W)	P>600W Corriente permitida A
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,4
11	0,35	0,22
13	0,296	0,21
15<=n<=391	3,85/n	2,25/n



Objetivo a lograr.

Izquierda: Formas de onda de corriente y voltaje en la entrada del transformador, carga activa tipo fuente conmutada con corrección del factor de potencia.

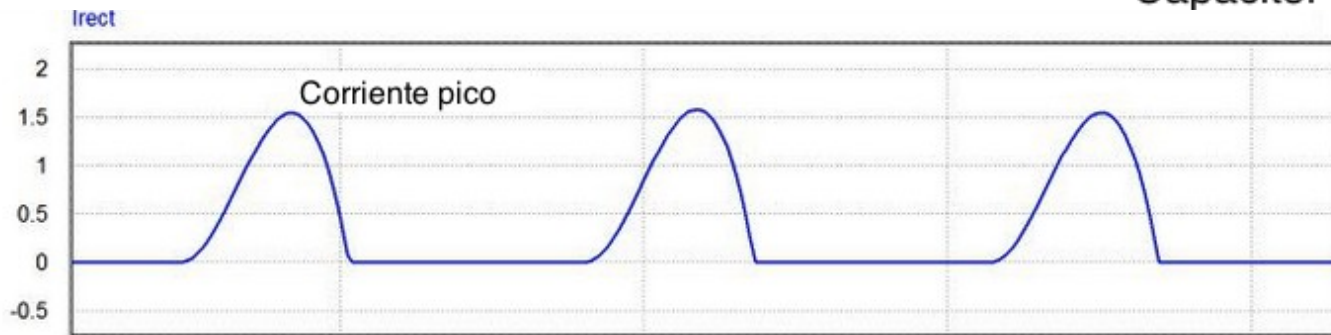
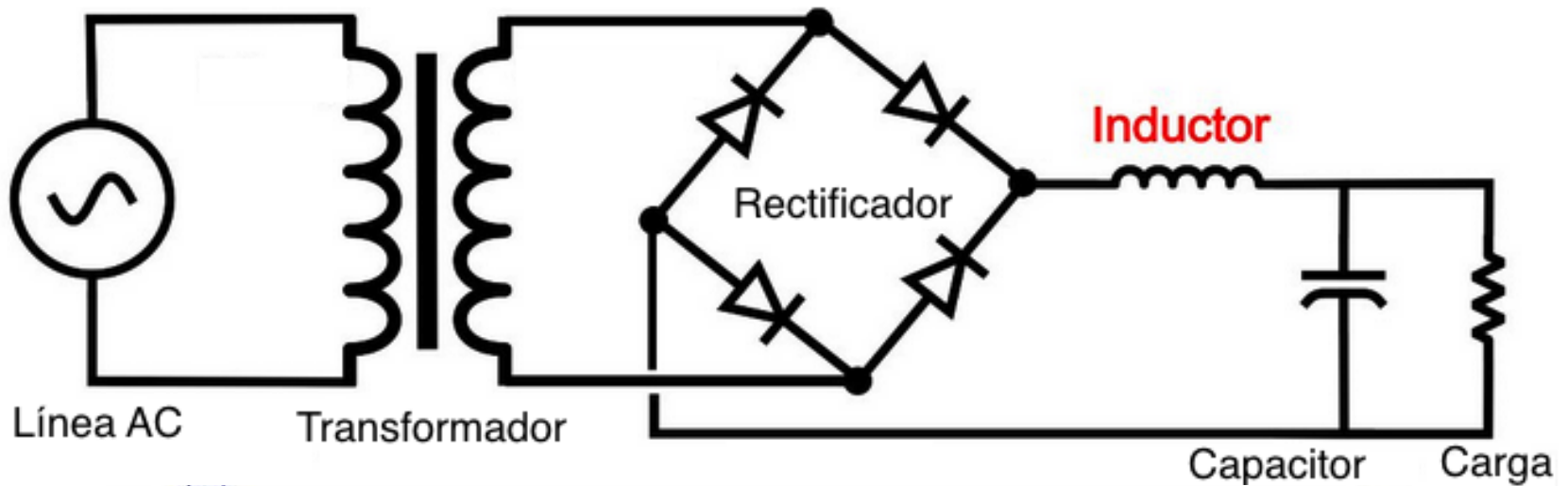
Derecha: Espectro de frecuencias de la forma de onda de corriente en la entrada del transformador, carga activa tipo fuente conmutada con corrección del factor de potencia.

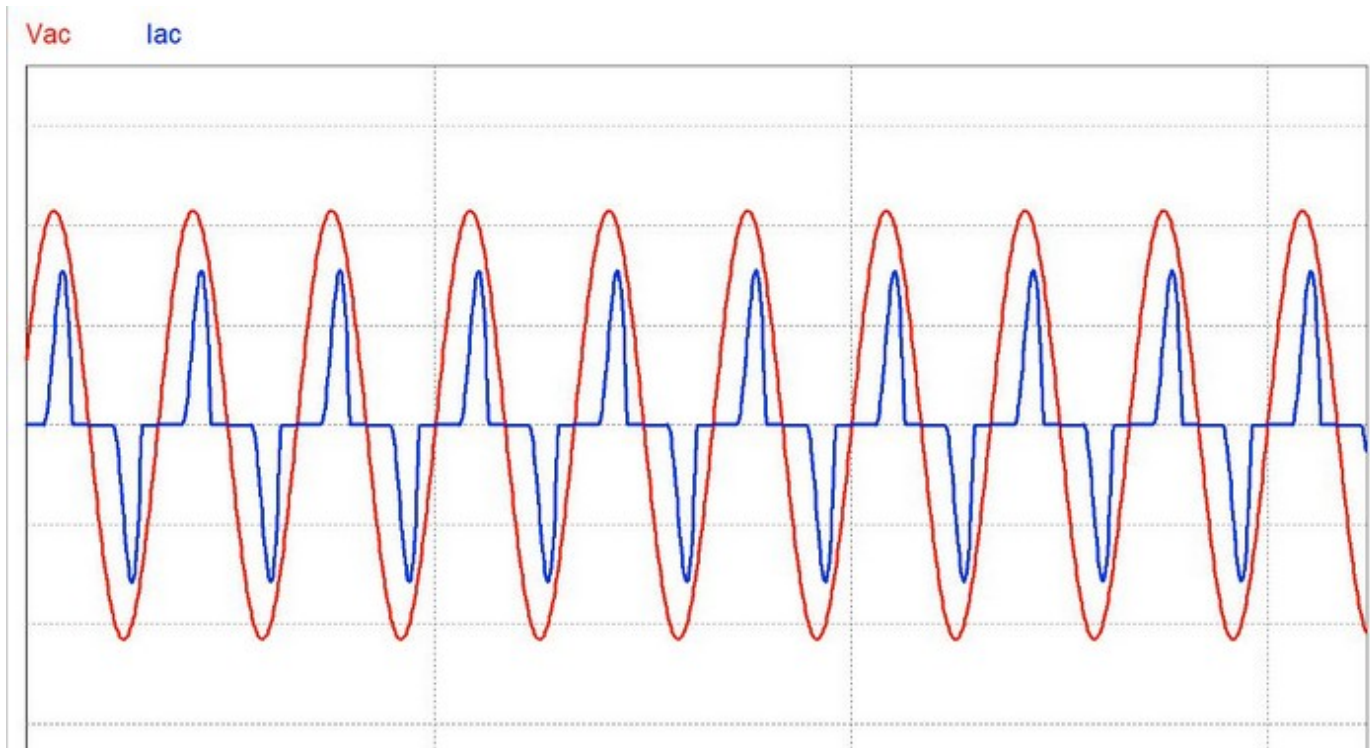


Comparación entre el contenido armónico de una fuente trifásica con rectificador y filtro capacitivo y el contenido armónico permitido por la norma (en una fuente trifásica la forma de onda de corriente no contiene armónicas múltiplos de tres).
 Formas de mejorar el factor de distorsión.

A lo largo del tiempo se han propuesto tres alternativas básicas, de complejidad y efectividad crecientes, que han permitido superar el problema a medida que las disposiciones normativas se han ido endureciendo:

1.- Corrección pasiva con filtro LC en la salida del rectificador.

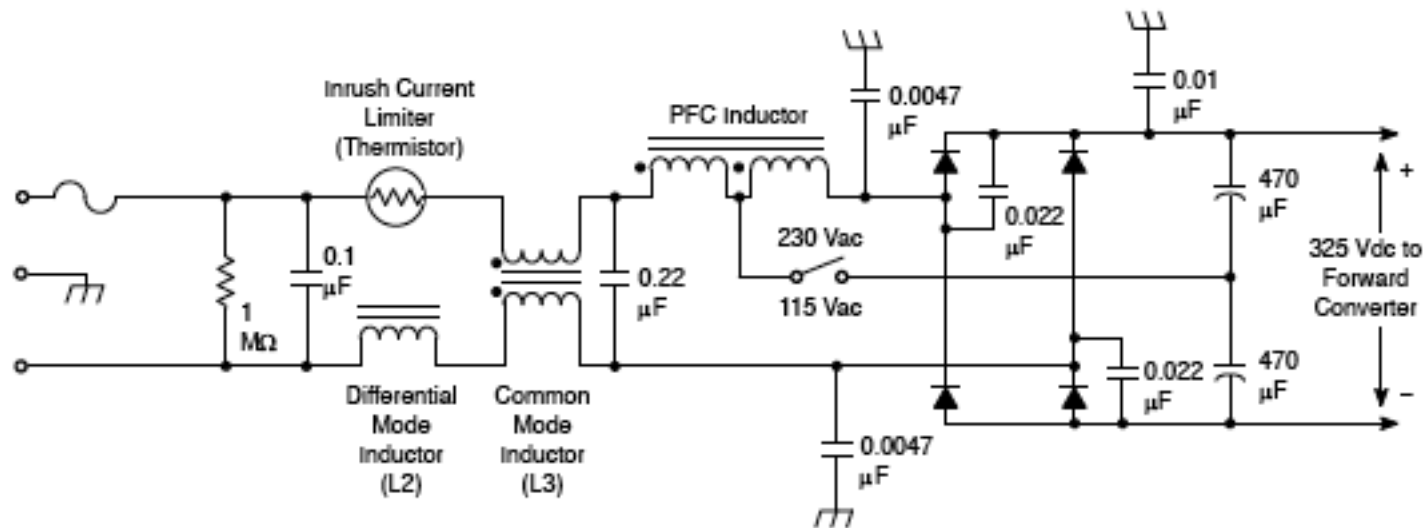




Esto aumenta la duración de los pulsos de corriente DC, y acerca la forma de onda cuadrada producida en un rectificador con carga inductiva pura.

El contenido armónico mejora, y en el límite (onda cuadrada) la amplitud de la n -sima armónica de corriente tiende a ser $1/n$ de la amplitud de la fundamental.

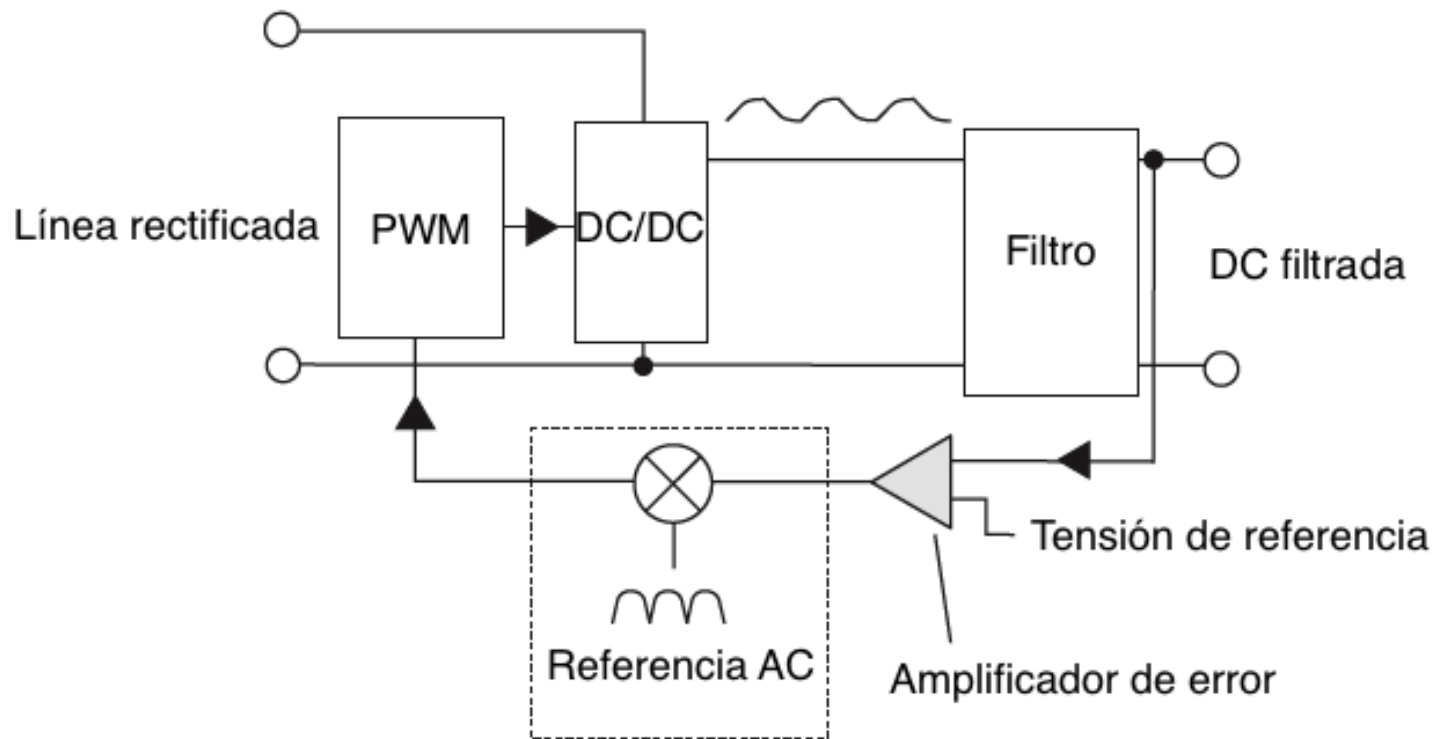
2.- Corrección pasiva con inductor de corrección del factor de potencia en la entrada AC.



Configuración estándar de pre-regulador empleada en fuentes de conmutación de 160W para PCs.

Esta configuración además de mejorar el factor de potencia busca reducir la interferencia de alta frecuencia generada por las armónicas de corriente.

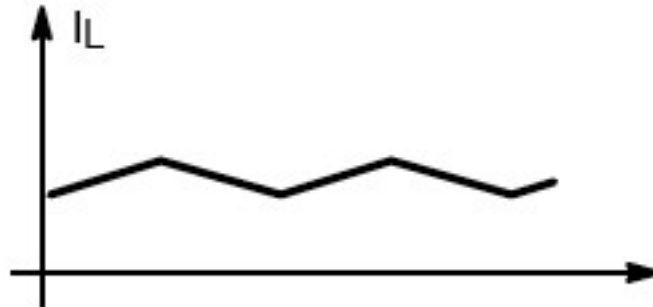
3.- Corrección activa del factor de potencia mediante una etapa convertora DC-DC en la salida del rectificador.



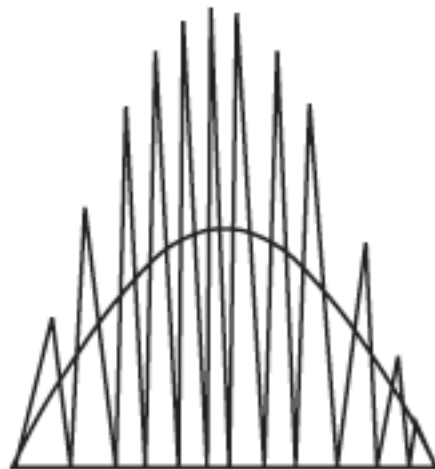
Se usa una estrategia de PWM para modular la corriente entrante a la fuente, imponiéndole una envolvente sinusoidal en fase con la tensión de línea.

Modos de operación:

- 1.- Modo "corriente continua", en el cual la corriente en la inductancia de entrada no se interrumpe en cada semiciclo.

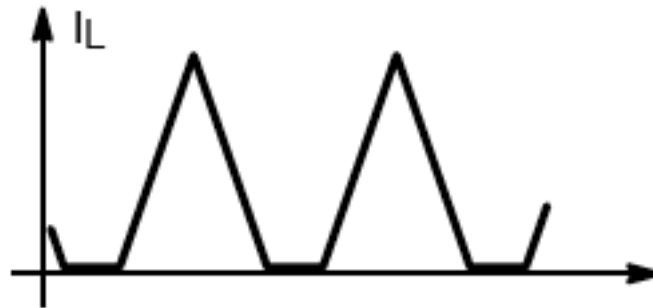


2.- Modo de corriente discontinua, en el cual la corriente en la inductancia de entrada se interrumpe repetidas veces en cada semiciclo.



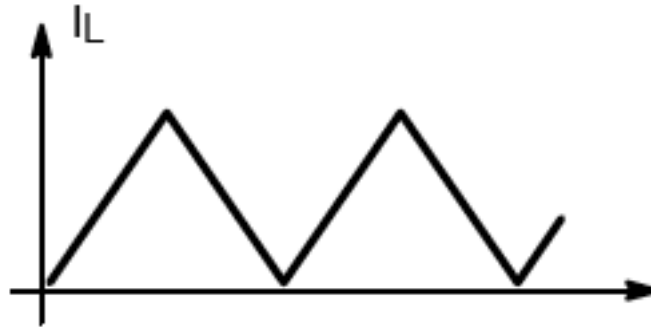
El modo discontinuo, a su vez se divide en dos:

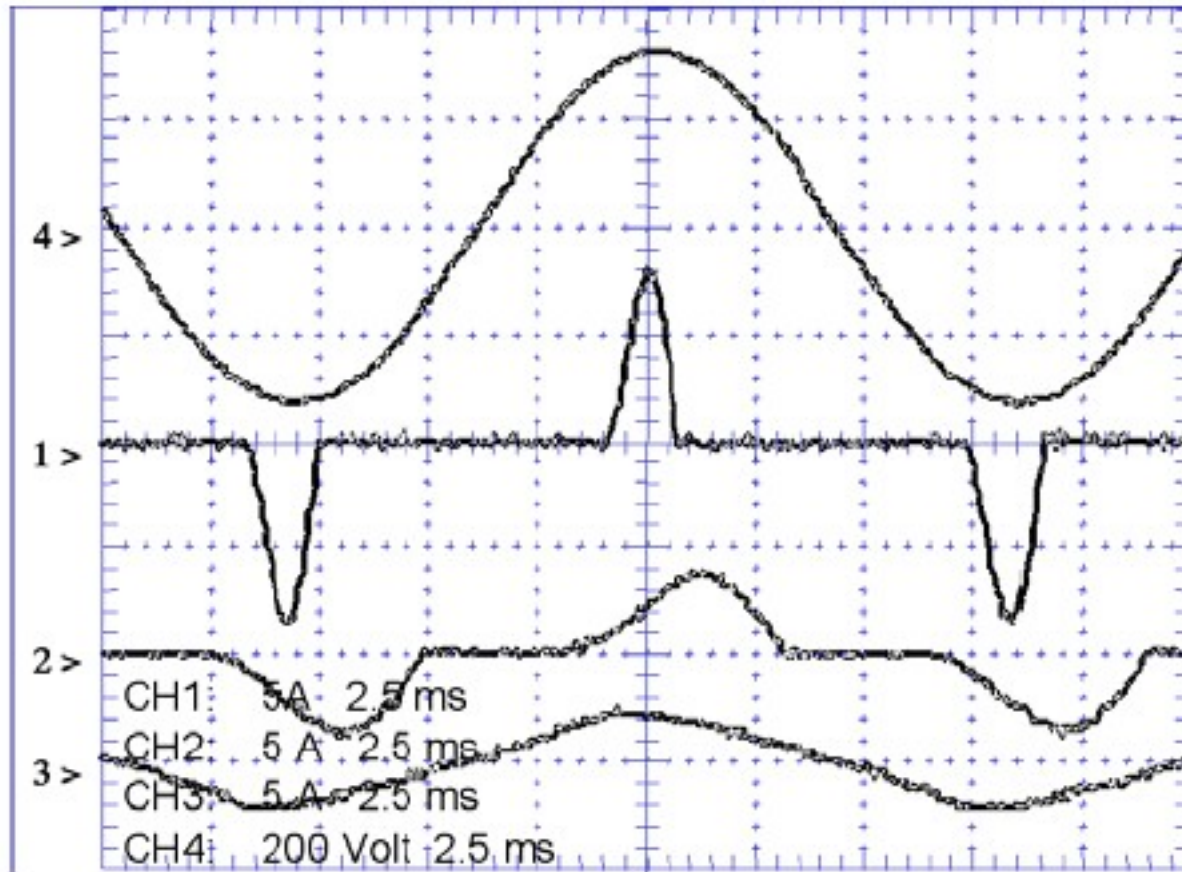
A.- El modo de conducción discontinua (DCM) propiamente dicho, en el cual hay un intervalo de corriente nula cada vez que la corriente en el inductor de entrada llega a cero.



B.- El modo de "corriente discontinua crítica" (CrM), en el cual la corriente en el inductor de entrada se hace cero e inmediatamente vuelve a crecer, esto es,

el tiempo muerto es teóricamente nulo. Este método también se conoce como "Modo transicional" (Transitional Mode) o "modo de conducción en frontera" (Borderline Conduction Mode, BCM).

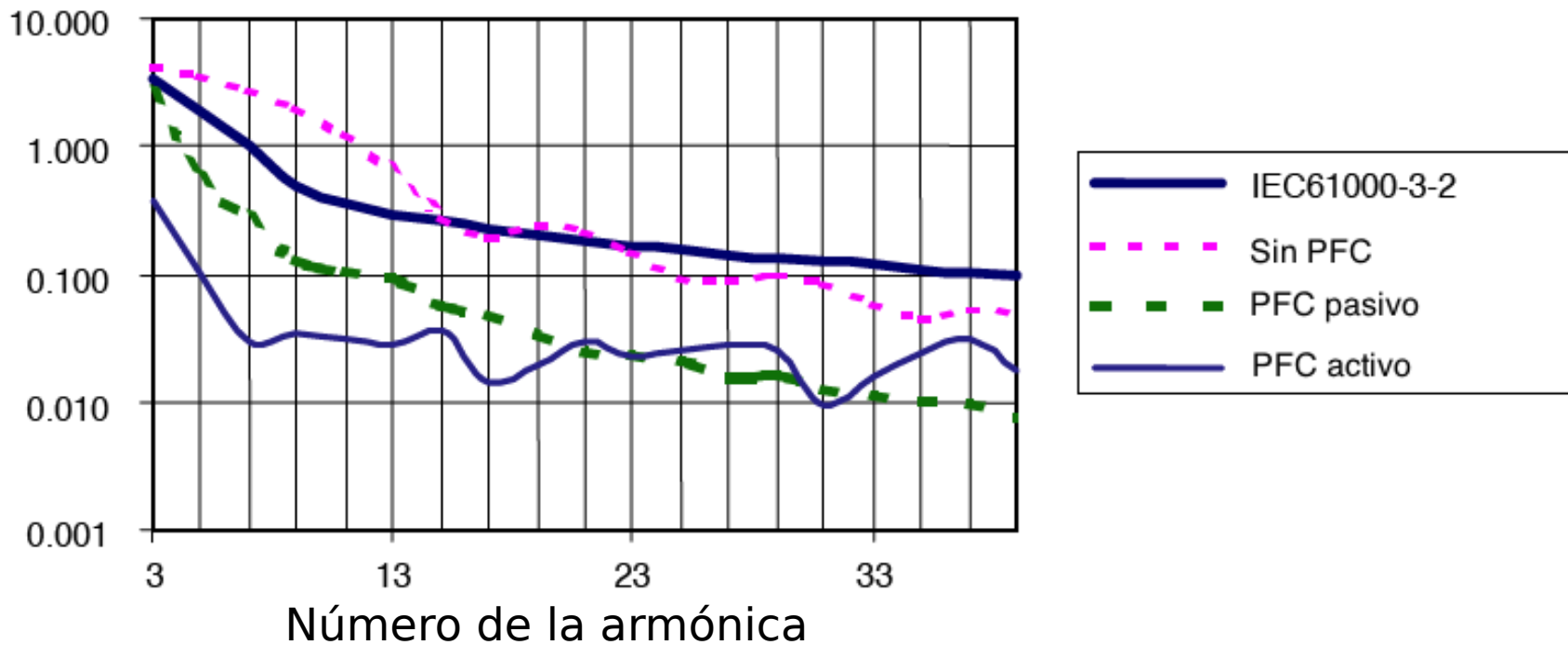




La figura compara las formas de onda de corriente medidas en tres fuentes de la misma potencia

nominal, la primera (CH1) corresponde a un pre-regulador básico sin corrección de factor de potencia, la segunda (CH2) a una con PFC pasivo y la tercera(CH4) a una con PFC activo.

El cuarto canal muestra la tensión de línea común a las tres fuentes.



La figura muestra el contenido armónico de la corriente de entrada en los tres casos.

Con corrección pasiva es posible cumplir con la norma relativa al contenido armónico pero se requiere del uso de inductores de tamaño y peso considerables, que aumentan significativamente al aumentar la potencia de salida deseada (el margen de cumplimiento en la tercera armónica es además marginal).

Por otra parte el valor pico de la corriente es en el circuito con compensación pasiva es significativamente mayor (33%) que en el PFC activo, por lo que la tendencia moderna es usar configuraciones PFC activas.

Adicionalmente hay nuevas normativas que exigen un factor de potencia de 0,9 o mejor, lo que no se puede cumplir con corrección pasiva.

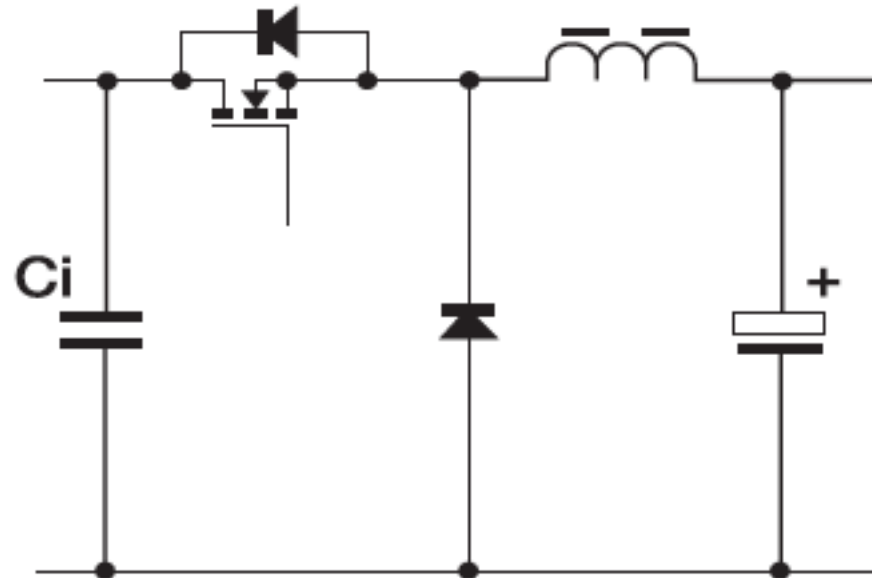
Existen tres configuraciones distintas en el conversor DC/DC para la corrección activa del factor de potencia, basadas en las tres configuraciones conversoras DC-DC con un solo interruptor controlado:

I.- Reductora (Buck)

II.- Elevadora (Boost)

III.- Reductora-elevadora (Buck-Boost)

I.- Configuración elevadora (Buck).

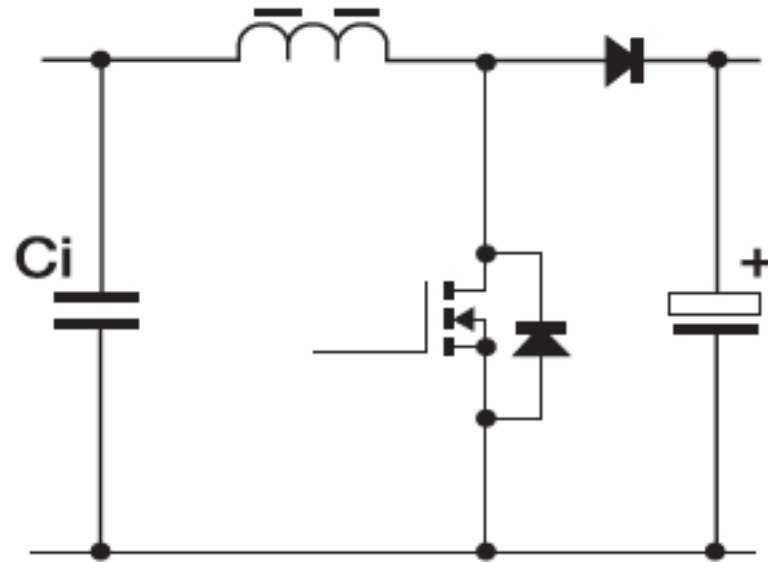


- A.- La tensión de salida es menor que la tensión de entrada.
- B.- El conmutador debe ser capaz de soportar la tensión de entrada.
- C.- Se requiere un condensador de filtrado grande.
- D.- Proporciona protección contra cortocircuito en la salida.
- E.- Proporciona limitación de la corriente de encendido.

F.- La salida no está aislada eléctricamente de la entrada.

G.- El rango de corrección del factor de potencia es pequeño.

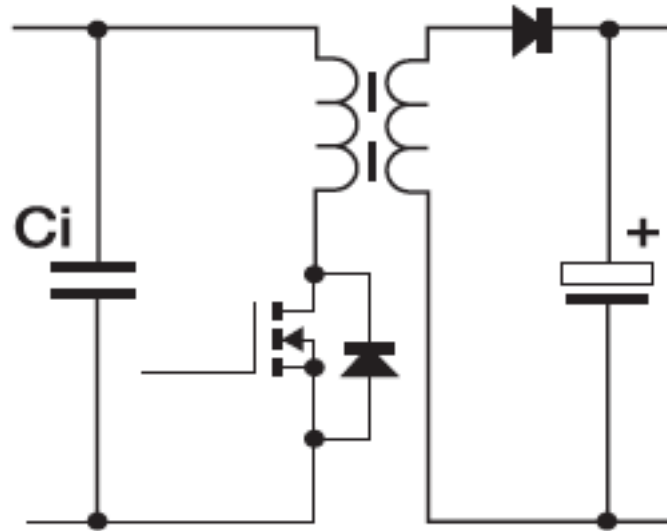
II.- Configuración elevadora (Boost)



- A.- La tensión de salida es mayor que la tensión de entrada.
- B.- El conmutador debe ser capaz de soportar la tensión de salida.
- C.- Se requiere un condensador de filtrado pequeño.
- D.- No proporciona protección contra cortocircuito en la salida.
- E.- No proporciona limitación de la corriente de encendido.
- F.- La salida no está aislada eléctricamente de la entrada.

G.- El rango de corrección del factor de potencia es grande.

III.- Configuración reductora-elevadora co transformador (Buck-Boost)



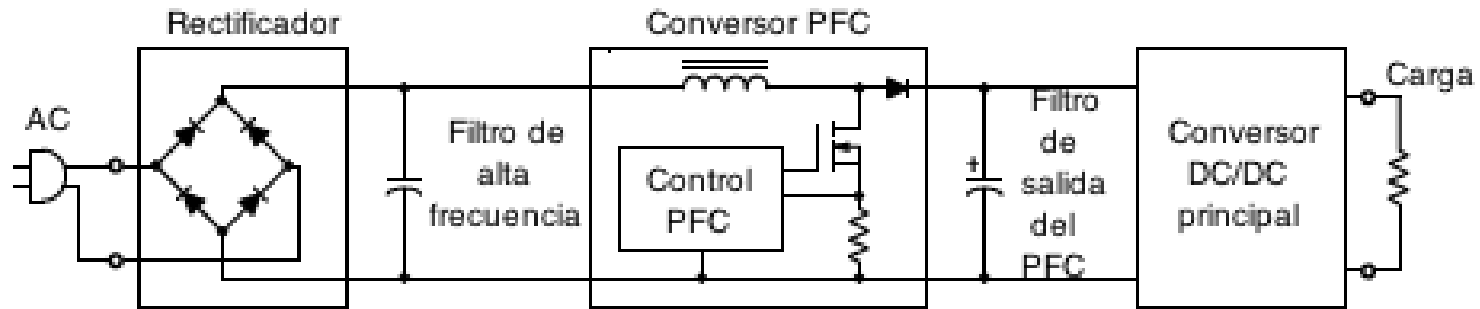
- A.- La tensión de salida puede ser mayor o menor que la de entrada.
- B.- El conmutador debe ser capaz de soportar la suma de las tensiones de entrada y salida.
- C.- Se requiere un condensador de filtrado grande.
- D.- Proporciona protección contra cortocircuito en la salida.
- E.- Proporciona limitación de la corriente de encendido.

F.- La salida está aislada eléctricamente de la entrada.

G.- El rango de corrección del factor de potencia es grande.

Como se ve, ninguna de las tres configuraciones es perfecta; en general se considera mejores a las que ofrecen mayor rango de corrección del factor de potencia y dentro de estas, a las que requieren menor capacidad de bloqueo de voltaje, lo que tiende a hacer que la configuración elevadora (boost) sea la más empleada.

En este caso, si se requiere aislamiento galvánico entre la entrada y la salida se proporciona colocando un transformador a la entrada del rectificador; de lo contrario la conexión a la línea AC es directa.



PFC activo tipo boost sin transformador de entrada.

I.-PFC tipo Boost, operación en el modo de corriente discontinua crítica.

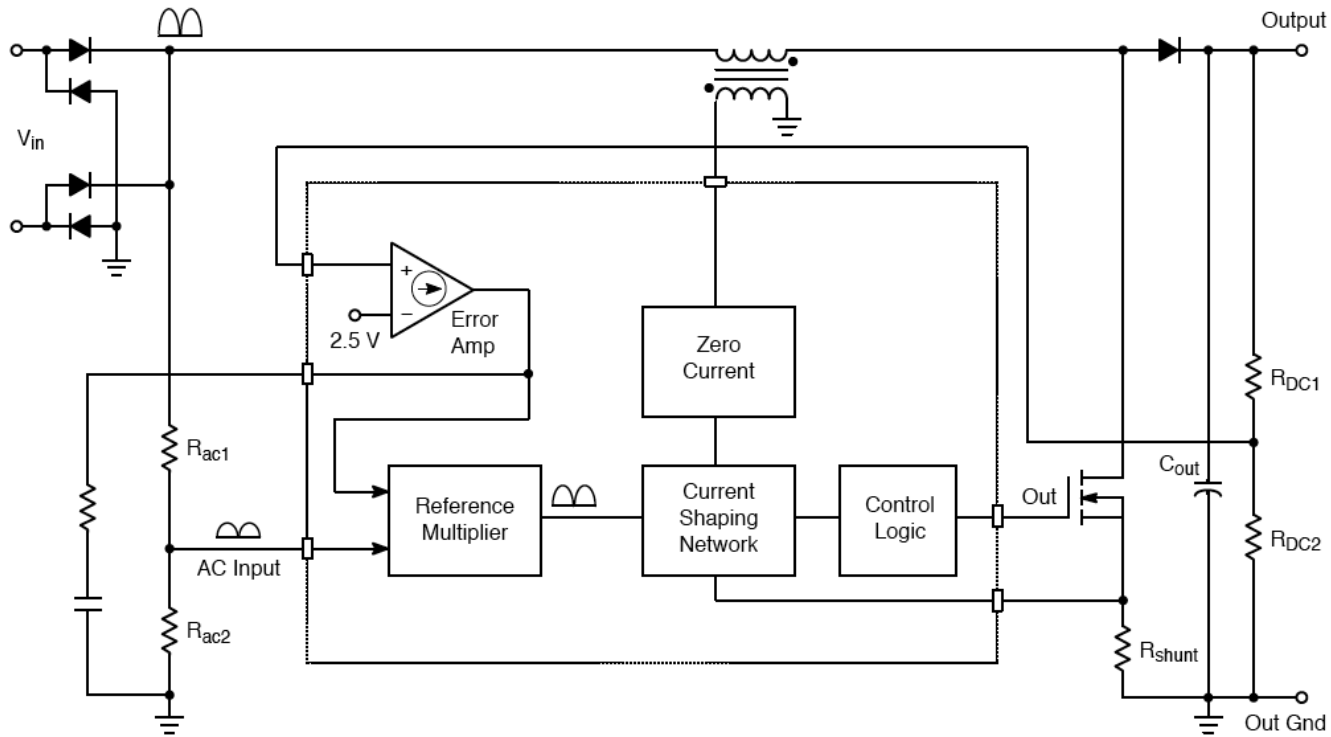


Diagrama de bloques genérico de un circuito PFC tipo Boost con control CCM

Un amplificador de error con un polo de baja frecuencia (filtro pasa bajo) proporciona la señal de error al multiplicador de referencia; la otra entrada del multiplicador es una versión escalada de la forma de onda de salida del rectificador.

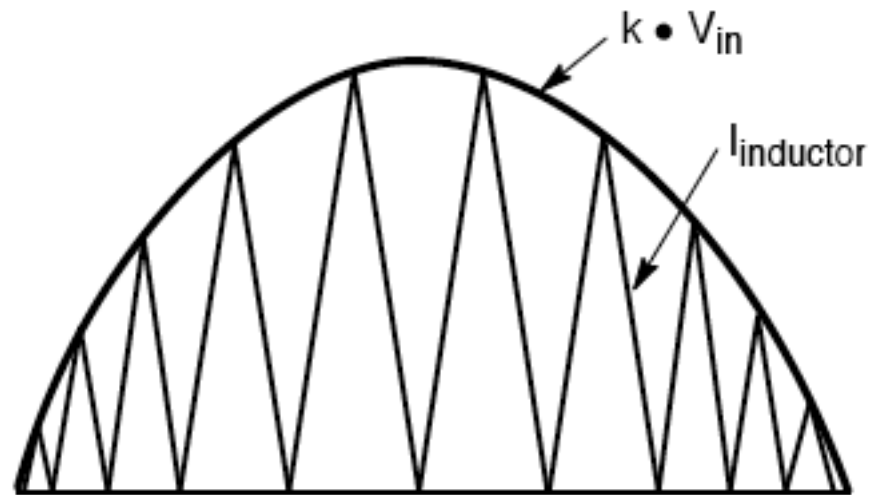
La salida del multiplicador es el producto de la señal quasi-DC producida por el amplificar/filtro de error y la señal completamente rectificadas de salida del rectificador puente.

En el circuito conformador de la corriente, esta señal se compara con el valor de la corriente, y el transistor de paso permanece encendido mientras la corriente es menor que la señal de referencia. Cuando la corriente alcanza el valor de la referencia, el transistor se apaga, y

permanece apagado hasta que el detector de cero de corriente detecta el cero, y procede a encender el transistor para el siguiente ciclo, manteniendo la operación en el modo de conducción crítico (sin tiempo muerto en la corriente).

La forma de onda de la corriente es siempre triangular equilátera, por lo que su valor promedio es conocido y siempre igual a la mitad de su amplitud.

En este sistema la frecuencia de conmutación es variable, tanto con el nivel de corriente de carga en la salida como con el nivel de tensión instantáneo de la forma de onda del rectificador.



Comparación entre la forma de onda de voltaje escalada y la de corriente.

Se cumple:

$$I_{pk} = k v_{in}(t)$$

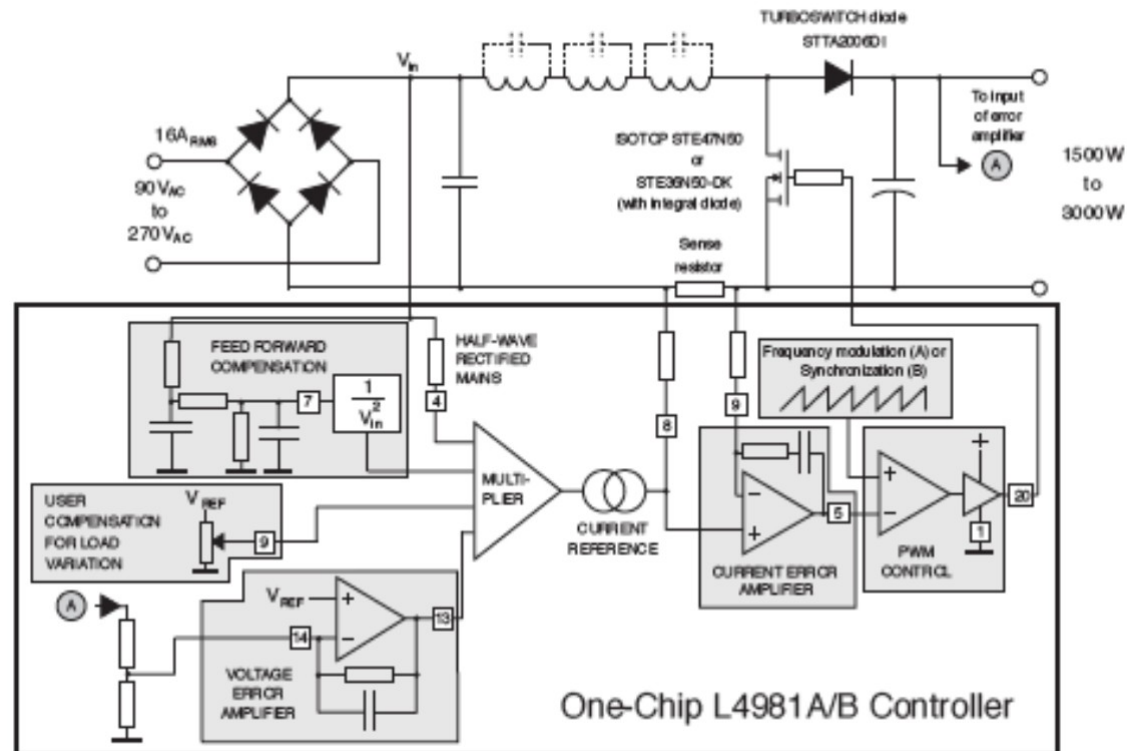
$$I_{pk} = DI = \frac{v_{in}(t)}{L} t_{on}$$

de donde:

$$k v_{in}(t) = \frac{v_{in}(t)}{L} t_{on} \Rightarrow t_{on} = kL$$

El tiempo de encendido es constante, y por lo tanto el de apagado es variable, así como la frecuencia de conmutación.

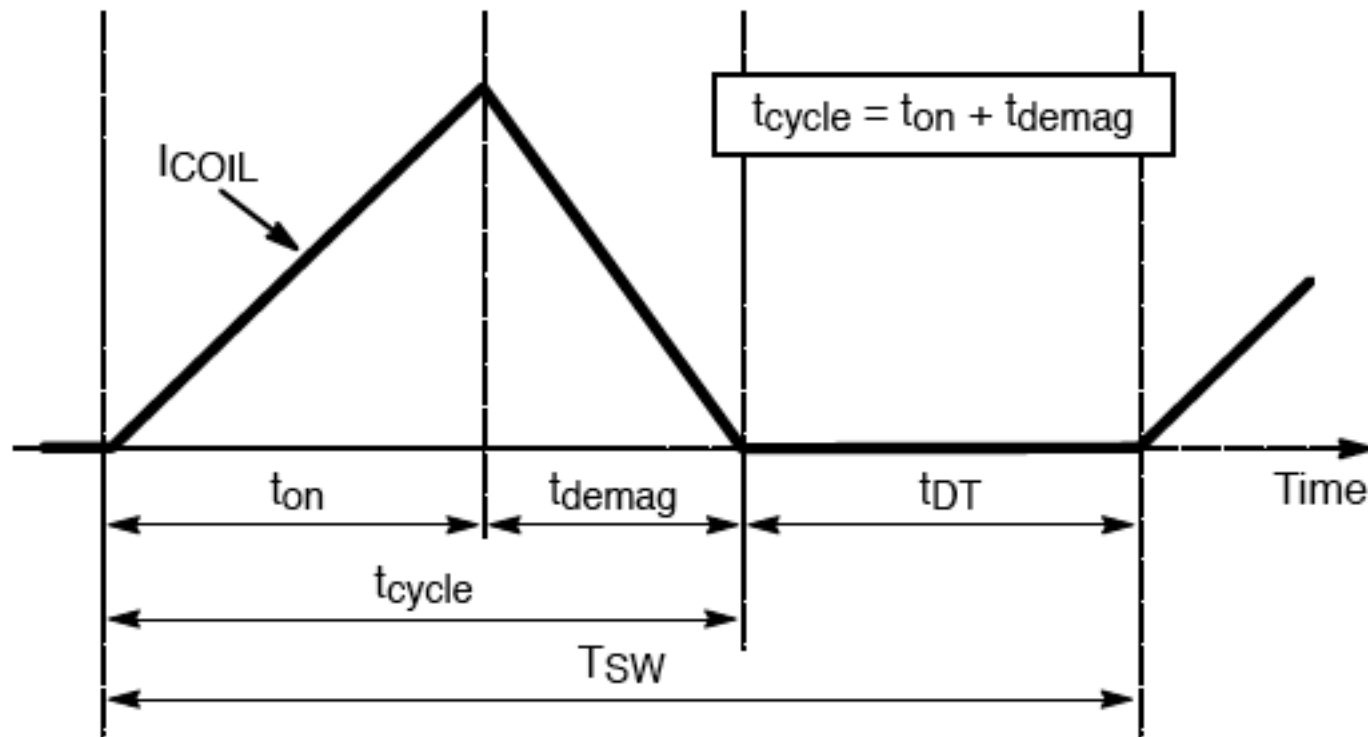
La implementación exacta del circuito de control es compleja, por lo que usualmente se emplea alguno de los diversos modelos de controladores integrados ofrecidos en el mercado.



Operar a frecuencia de conmutación variable tiene el problema de que la frecuencia de conmutación puede alcanzar valores muy altos cuando la corriente de carga es baja, y también cerca de los cruces por cero de la salida del rectificador.

Algunos fabricantes ofrecen la opción de limitar la frecuencia, pero eso reduce el rango de control efectivo del circuito PFC.

II.-PFC tipo Boost, operación en el modo de corriente discontinua.



Como en el caso anterior, la corriente pico es:

$$I_{pk} = \frac{v_{in}(t)}{L} t_{on}$$

La corriente promedio en el ciclo de conducción considerado es:

$$\bar{I}_{Tsw} = \frac{I_{pk}}{2} \frac{t_{cycle}}{Tsw} = i_{in}(t)$$

de donde:

$$i_{in}(t) = \frac{v_{in}(t)}{2L} \left(t_{on} \frac{t_{cycle}}{T_{sw}} \right)$$

Y si se cumple $\left(t_{on} \frac{t_{cycle}}{T_{sw}} \right) = K$

para cada combinación de corriente de carga y tensión de línea la corriente de línea será sinusoidal y con factor de potencia unitario.

La implementación del algoritmo para mantener el factor K no es simple, pero existen controladores integrados que la ejecutan, tales como el NCP1605 de On Semiconductor.

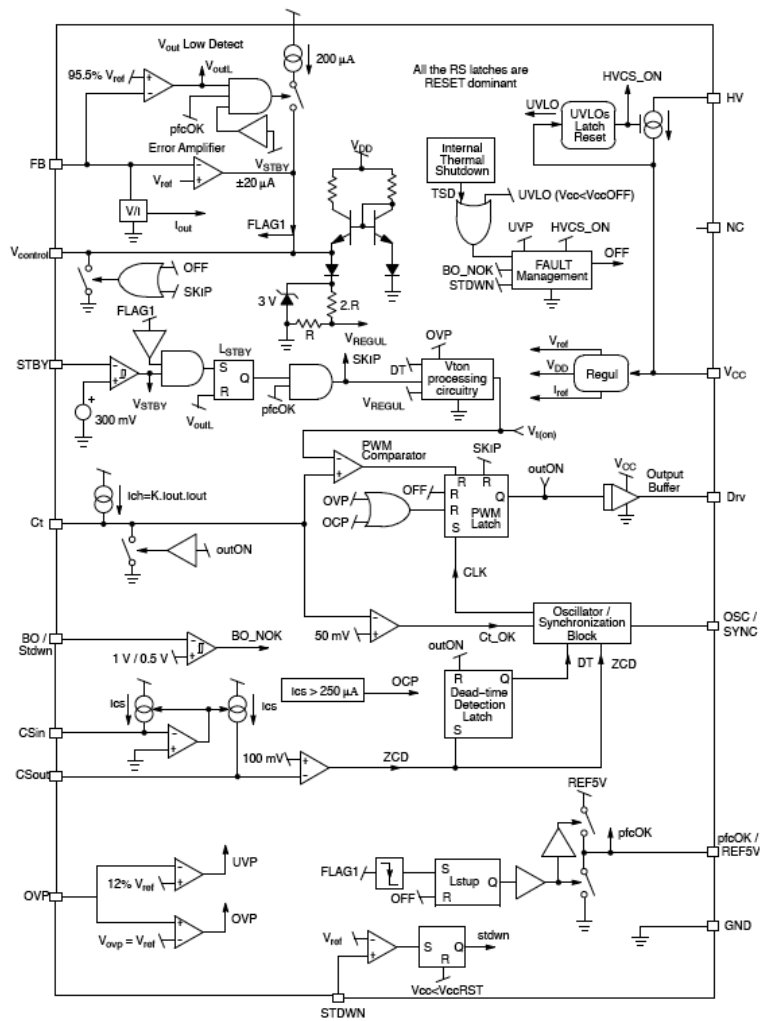
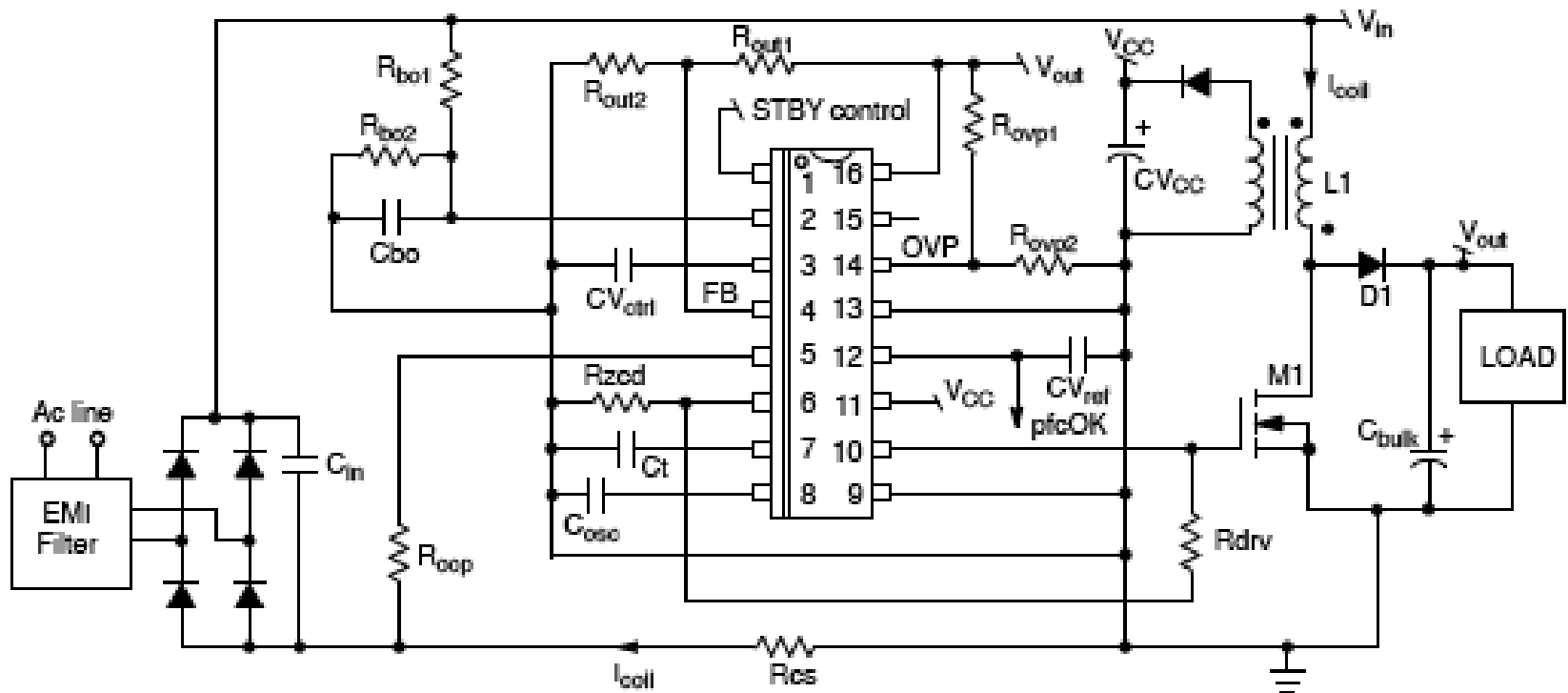


Diagrama de bloques funcional del NCP1605



Implementación de un circuito PFC con el controlador NCP1605

La operación con corriente discontinua ofrece el mayor rango de estabilidad en la función PFC, pero con el mayor valor de corriente pico.

III.-PFC tipo Boost, operación en el modo de corriente continua.

