

Análisis del contenido armónico y su problemática en redes de alimentación.



Ing. Rubén Bufanio
Ing. Alejandro De Villaflor
Ing. Germán Pablo García Motto
Ing. Andres Omar Persello
Grupo GESE FRH

Introducción

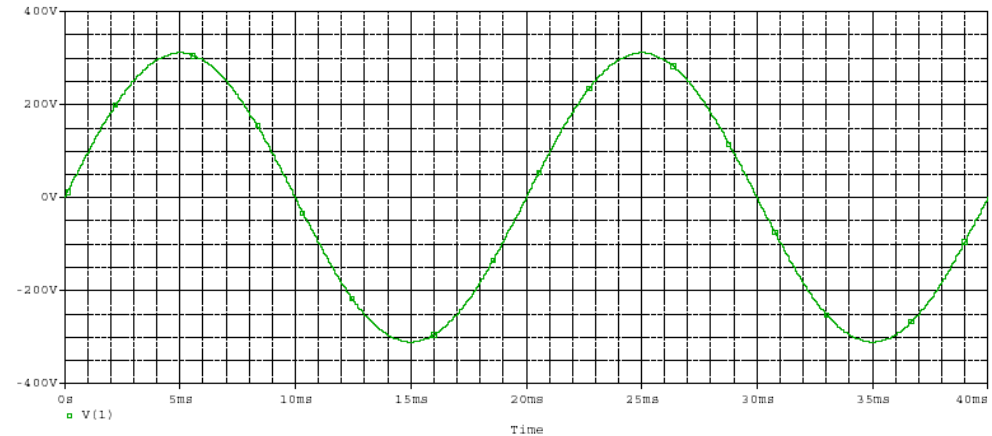
Red de alimentación:

Características:

- V_{RMS} (línea – neutro) = 220 V
- Frecuencia (50 Hz)
- $V_{(t)} = V_{MAX} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$

En un sistema trifásico las señales anteriores, son tres de la misma característica pero están desfasadas entre si 120°.

Sumando punto a punto dichas señales en el tiempo, se observa que el valor de tensión es cero. Por lo tanto el sistema esta equilibrado en tensión y por ende el conductor de neutro respecto a la referencia de tierra mantendría una diferencia de potencial de 0V. Esta situación solo será válida en el caso de un sistema sin consumo o con cargas lineales y perfectamente equilibradas.



Introducción

Sistema cargado:

Supongamos que alimentamos con nuestra señal monofásica (línea – neutro) a una carga dada. Circulará una corriente que será periódica, al igual que la tensión.

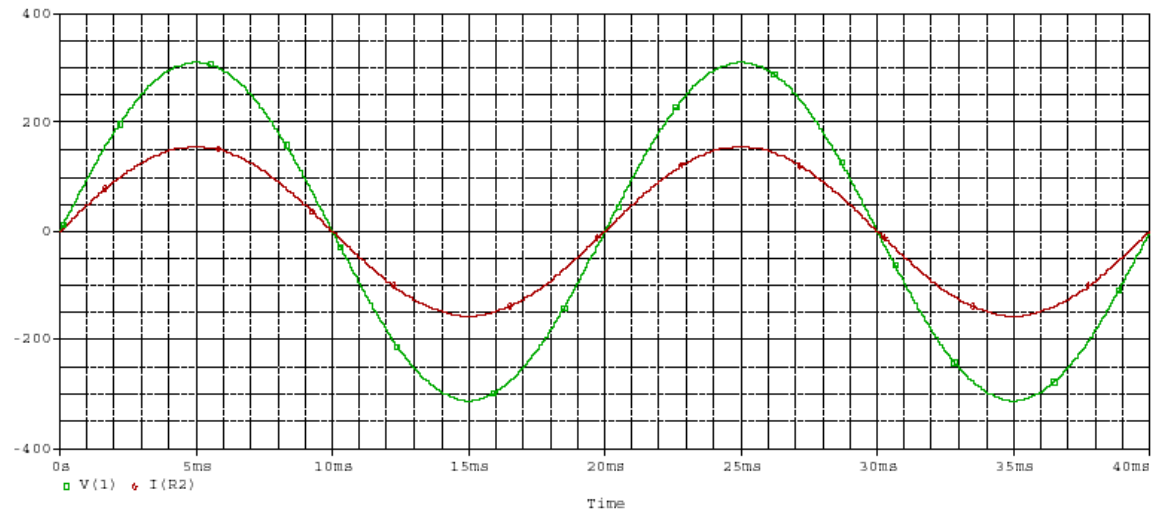
En el gráfico se observa que coinciden los máximos, mínimos y cruces por cero entre la tensión y la corriente. Es decir estamos en presencia de un sistema con una carga netamente resistiva. Si esto lo extendemos en un sistema trifásico y las amplitudes de las corrientes coinciden entre si, la suma de dichas señales en el tiempo es cero, **por lo tanto no tendríamos circulación de corriente por el conductor de neutro.**

$$P_{L1(t)} = V_{L1(t)} \cdot I_{L1(t)} = V_{Lmax} \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot I_{Lmax} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$P_{L1(t)} = \frac{1}{T} \int_0^t V_{Lmax} \cdot I_{Lmax} \cdot \text{sen}^2(\omega t)$$

$$P_{L1(t)} = \frac{V_{Lmax} \cdot I_{Lmax}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}$$

$$P_{L1(t)} = \frac{V_{Lmax}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{Lmax}}{\sqrt{2}} = \bar{V}_{L1} \cdot \bar{I}_{L1}$$



Introducción

Sistema lineal altamente reactivo:

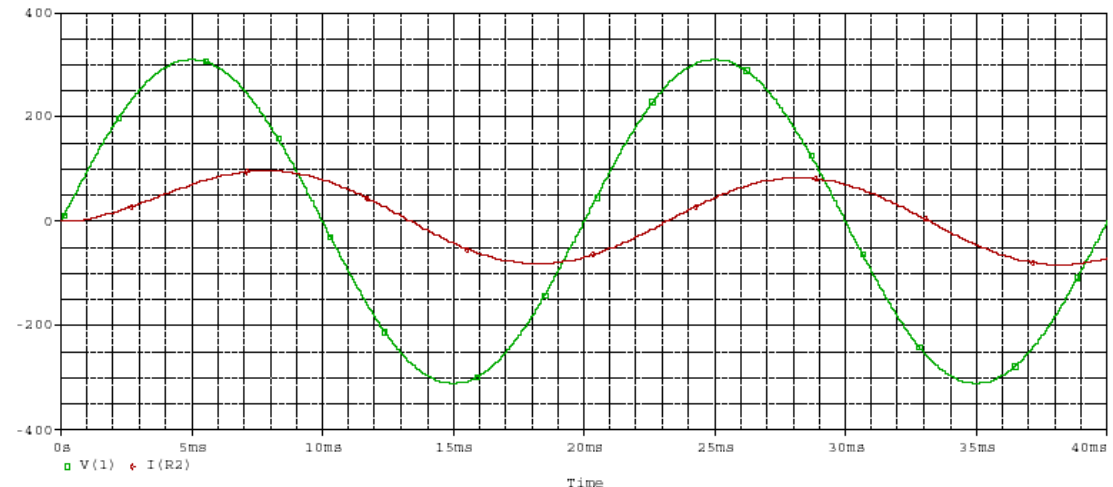
En un circuito altamente reactivo, **las señales de tensión y de corriente no están en fase**, es decir que hay un ángulo de corrimiento entre ellas. De la expresión de la potencia puesta en juego se observa que la misma es máxima cuando el ángulo de corrimiento es 0° y es nula si es de 90° . Esto quiere decir que **de toda la potencia que nos entrega la red solo una parte se transforma en trabajo**.

$$V_{(t)} = V_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$I_{(t)} = I_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi_d)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi_d) \cdot d\omega t$$

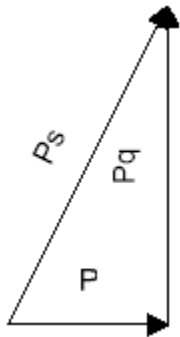
$$P = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{2\pi} \cdot \cos(\varphi_d) \cdot \frac{2\pi}{2} \Rightarrow P = \bar{V} \cdot \bar{I} \cdot \cos(\varphi_d)$$



Introducción

Problemática:

Se esta generando y entregando una energía que **no es transformada totalmente en trabajo**, es decir no estamos haciendo un uso eficiente de la energía que se genera. Además, parte de la energía que no es transformada en trabajo se pierde en forma de calor, en líneas de distribución, todo tipo de protecciones, interruptores, transformadores, etc. Si el sistema es trifásico y el corrimiento de la corriente se mantiene igual en las tres fases, seguiríamos con una corriente nula por el cable de neutro. Esto es prácticamente imposible de llevar a la práctica y siempre hay una circulación de corriente por dicho conductor. Cuanto mayor sea el desequilibrio de consumo entre las fases de un sistema trifásico mayor será la circulación de corriente por dicho conductor por lo tanto mayores las pérdidas por efecto Joule por el mismo.



$$P_S = \bar{V} * \bar{I}$$

Potencia Aparente.

$$P_S = \sqrt{P^2 + Pq^2}$$

$$P = \bar{V} * \bar{I} * \cos(\varphi_d)$$

Potencia Activa.

$$Pq = \bar{V} * \bar{I} * \sin(\varphi_d)$$

Potencia Reactiva.

$$F.P = P / P_S$$

Alimentación de sistemas alineales

Potencia Instantanea

Sistema alineal → la corriente no tiene la misma forma que la tensión

$$\left\{ \begin{aligned} v(t) &= V_{\max} * \sin(\omega t) \\ i(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n * \sin(m\omega t + \phi_n) \end{aligned} \right.$$

La $i(t)$ se puede representar por medio de un desarrollo en **series de Fourier** como la sumatoria de señales senoidales

A cada una de estas la denominaremos **armónicos**, en donde el primero será denominado fundamental (de la frecuencia de la tensión de red) y el resto de orden superior.

En donde la potencia instantánea será en todo momento : $P(t) = v(t) * i(t)$

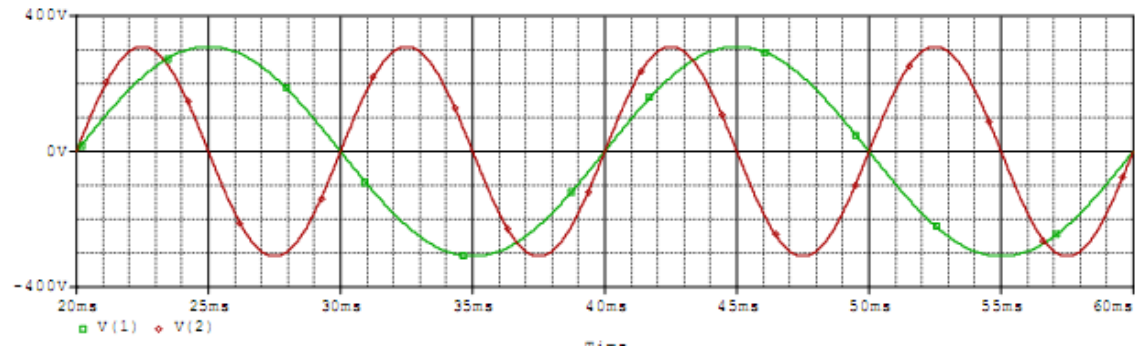
Reemplazando por la expresión de la corriente:

$$P(t) = v(t) * \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_n * \sin(m\omega t + \phi_n) \right]$$

Y calculando la potencia nos queda:

$$P = \bar{V} \times \bar{I} \times \cos \phi$$

La potencia depende del primer armónico de corriente y su ángulo de desfase respecto de la tensión



Alimentación de sistemas alineales

Factor de Potencia

Consumo desde punto de vista del generador

Potencia activa = $P = \bar{V} \times \bar{I} \times \cos \phi$

Potencia reactiva = $P = \bar{V} \times \bar{I} \times \text{sen} \phi$

Potencia aparente = $P_s = \bar{V} \times \bar{I} \neq \sqrt{P^2 + Pq^2}$ Distinta que sistema lineal !

Se define Potencia De Deformación $\longrightarrow PD = \bar{V} \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \bar{I}_n^2}$

Potencia aparente = $P_s = \sqrt{PD^2 + P^2 + Pq^2}$

Factor de potencia

$F.P. = \frac{P}{PS} = \frac{\bar{V}}{\bar{V}} \times \frac{I_1}{I} \cos \phi$

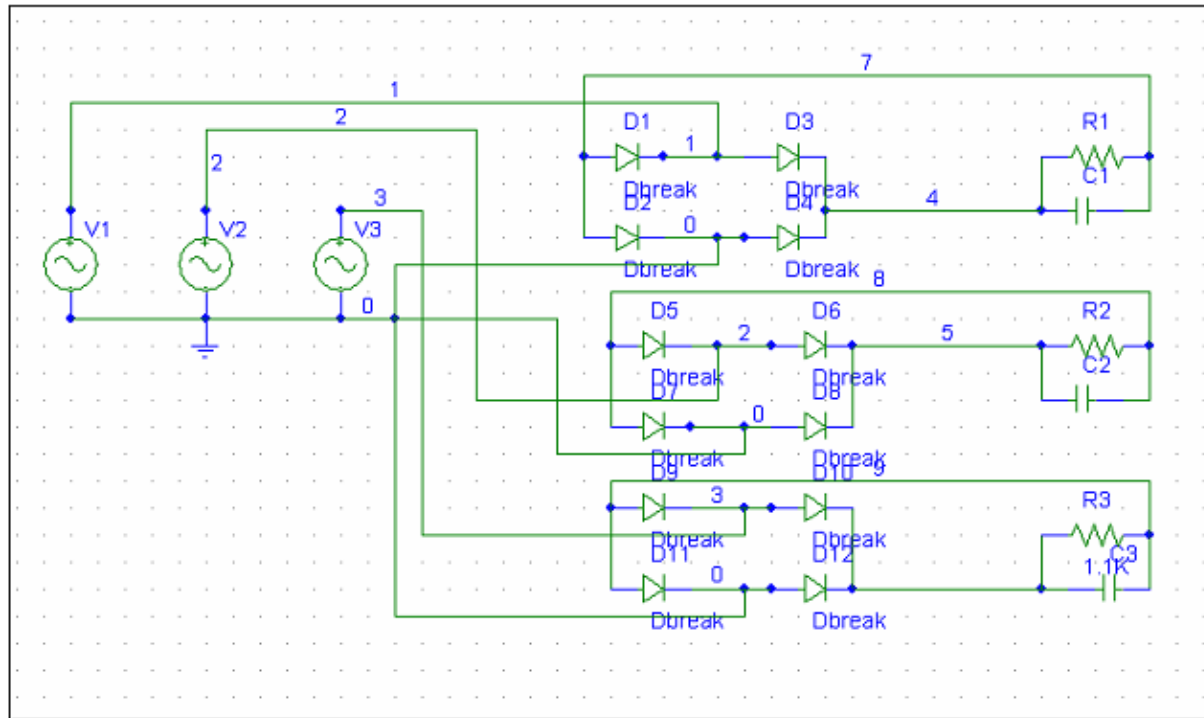
$F.P. = \frac{I_1}{I} \times \text{Cos} \phi$

Donde: $\frac{I_1}{I}$ se llama factor de deformación \rightarrow Indica cuanto se aleja de una senoidal

El FP no es más el $\text{Cos} \phi$, sino que aparece multiplicado por un factor de deformación que disminuye aún más su valor.

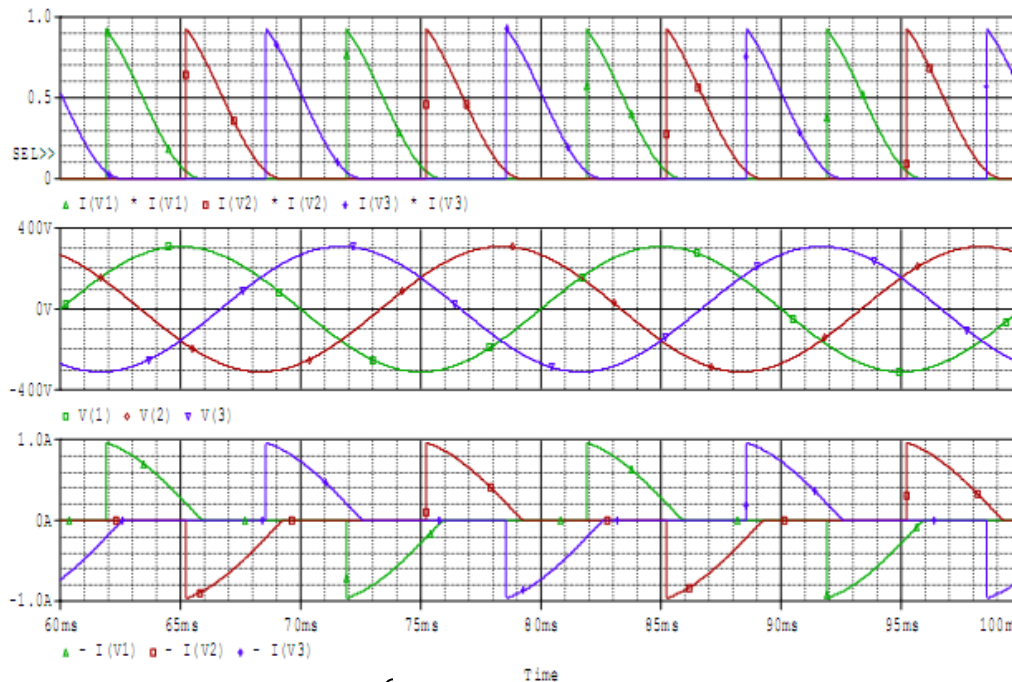
Alimentación de sistemas alineales

Sistema trifásico con carga equilibrada - Circuito



Alimentación de sistemas alineales

Sistema trifásico con carga equilibrada – Formas de onda



Suma cuadrática de la corriente del neutro

$$I_n^2 = \frac{3}{2\pi} \times \int_0^{2\pi} I_v^2(t) \times dt \Rightarrow I_n = \sqrt{3} \times \overline{I_v}$$

Tensión fase - neutro

Corriente por el neutro

Corriente del neutro:

- Alto contenido armónico
- Cerca del doble que la corriente de fase

→ **Elevadas pérdidas de energía**

Alimentación de sistemas alineales

Consecuencias – Factor FK

Factor de cresta señal senoidal pura → $FC = \frac{Im \acute{a}x}{I_{rms}} = \sqrt{2} = 1.4142$

Factor de cresta no senoidal → $FC(no_senoidal) = \frac{Im \acute{a}x}{I_{rms}} \cdot 2$

Consecuencias: Aparecen picos de corrientes de hasta 3 veces el valor de la corriente eficaz (se activan las protecciones)
Desclasifica el transformador

Desclasifica el transformador → **El transformador no entrega la potencia que informa la chapa.**
El factor FK que indica cuanto se reduce.

$$FK = \frac{Im \acute{a}x}{I_{rms} \cdot \sqrt{2}}$$

Esta degradación de la potencia se debe fundamentalmente a que la corriente esta compuesta por armónicos de orden superior que contribuyen a **aumentar las pérdidas de potencia tanto en el núcleo** (son función de la frecuencia al cuadrado) como por **efecto pelicular o Skin en los cables**.

Esto origina una sobreelevación de la temperatura por encima de los valores admisibles es por ello que **debemos trabajar a una corriente menor a la tabulada**, esta en algunos casos puede llegar a la mitad de la nominal.

Alimentación de sistemas alineales

Consecuencias – Distorsión armónica

Distorsión armónica o THD (válido para tensión o corriente)

Indica cuanto se aleja una señal de una senoide pura. Vale 0 si es una señal senoidal y aumenta a medida que se deforma.

$$THD_{V\%} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n\ rms}^2}}{V_{1\ rms}} \times 100 = \frac{\sqrt{V_{trms}^2 - V_{1\ rms}^2}}{V_{1\ rms}} \times 100$$

Para tensión no se debe superar el 5%

Donde:

V_{trms} = tensión eficaz total

$V_{1\ rms}$ = tensión eficaz de primer armónico

$$I_{trms} = \sqrt{THD_i^2 \times I_{1\ rms}^2 + I_{1\ rms}^2}$$

Se observa que **la corriente total eficaz es mayor que la del primer armónico cuando hay distorsión**. A medida que aumenta la distorsión por cargas alineales, visto esto último desde la red o aguas arriba, la corriente eficaz total aumenta para el mismo trabajo eléctrico

$$I_{trms} = I_{1\ rms} \sqrt{THD_i^2 + 1}$$

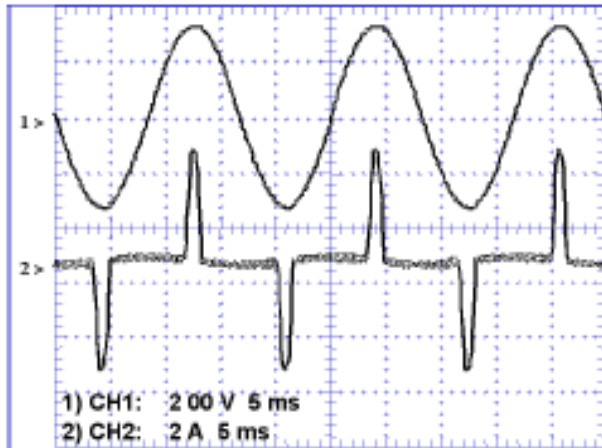
Aumento de la corriente eficaz total genera:

- Pérdidas de energía
- Caídas de tensión en cables mal dimensionados
- Armónicos de tensión en los puntos de conexión común o PCC → Genera cupla frenante en motores vibraciones y recalentamiento

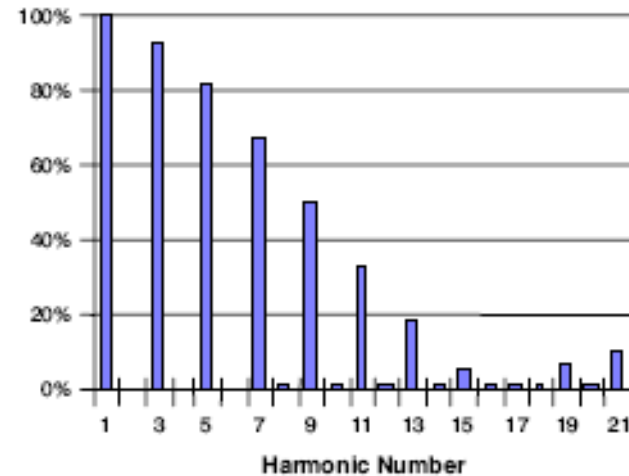
Alimentación de sistemas alineales

Caso típico

La mayoría de los dispositivos electrónicos presenta una impedancia de entrada no lineal. Los gráficos siguientes corresponden a un circuito rectificador ordinario que esta presente en la mayoría de los dispositivos electrónicos.



Tensión alimentación y Corriente consumo



Elevada distorsión armónica debido a la deformación de la corriente de consumo.

Pérdidas en los conductores debido a corrientes armónicas

Resistencia efectiva:

Para la corriente continua o a frecuencias bajas, por debajo de los 50Hz, la resistencia de un conductor se puede expresar como:

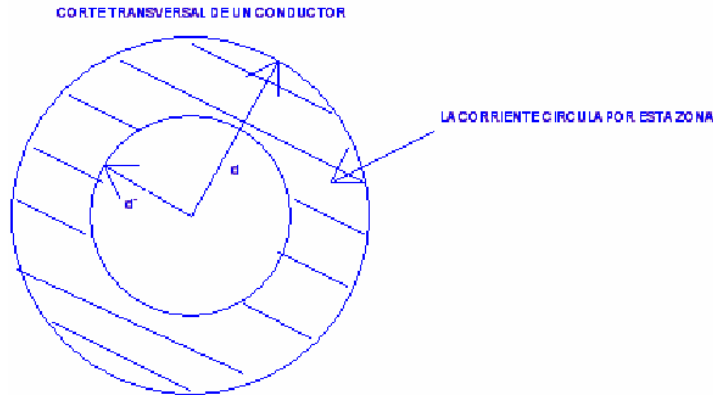
$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot 10^{-6} \quad [\Omega]$$

ρ Resistividad del material en $\Omega \cdot m$

l Longitud en metros m

S Superficie en mm^2

Se sabe que **a medida que aumenta la frecuencia** de la señal que se transporta por un conductor, la corriente tiende a concentrarse en una zona cercana a su periferia, por lo tanto **aumenta la resistencia efectiva del conductor**.



$$SUP_{total} = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad SUP_{corona} = \frac{\pi}{4} \times (d^2 - d'^2)$$

$$R_{ca} = R_{cc} \times \frac{d^2}{d^2 - d'^2}$$

Pérdidas en los conductores debido a corrientes armónicas

Problemas ocasionados:

Existen dos fenómenos físicos que determinan el aumento de la resistencia efectiva, el efecto pelicular y el efecto de proximidad. La expresión de la resistencia efectiva esta dada por:

$$Rca = Rcc \times (1 + Ys + Yp)$$

$$Ys = 3.28 \times \frac{f^2 \times S^2}{\rho^2 \times 10^8}$$

Ys= (Incremento debido al efecto pelicular)

Yp= (Incremento debido al efecto de proximidad)

f= frecuencia de la corriente en Hz

S= Sección efectiva del conductor en mm^2

ρ = resistividad del conductor a la temperatura de trabajo

De lo anterior se desprende que la resistencia a la señales alternadas **aumenta con el cuadrado de la frecuencia**, por lo tanto un tercer armónico generará una Rca, 9 veces mayor que ha 50Hz y un 5to armónico generará una Rca, 25 veces mayor que ha 50Hz.

Corriente con alto contenido armónico ocasiona:

- Calentamiento y por lo tanto pérdidas de energía, por efecto Joule, en los conductores.
- Disparos intempestivos de protecciones magnetotérmicas por incremento de su resistencia.
- Fallas en fusibles por aumento de su densidad de corriente.
- Calentamiento adicionales en motores, transformadores, etc.

Pérdidas en los conductores debido a corrientes armónicas

Pérdidas en conductores cuantificadas en relación a la distorsión armónica:

Si la alimentación tiene un $THD_v < 5\%$ podemos aproximar a que dicha señal de tensión esta libre de contenido armónico o el mismo es despreciable para ser tenido en cuenta. Entonces podemos decir que:

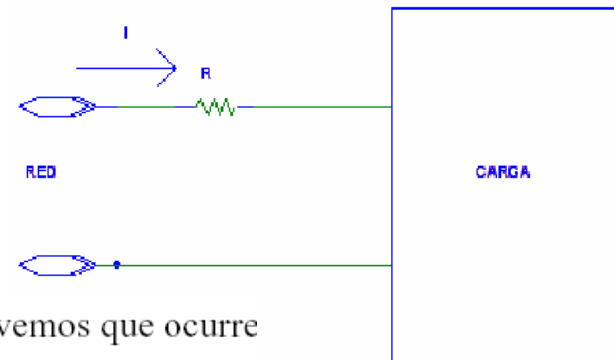
$$I_{rms} = I_{rms} \sqrt{THDi^2 + 1} \quad \text{Cuando el THDi es nulo (sistemas lineales) } I_{rms}=I_{rms}$$

Si concentramos en una R las pérdidas en nuestro conductor de acuerdo al siguiente ejemplo:

$$PR = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nrms}^2 \times R = I_{rms}^2 \times R$$

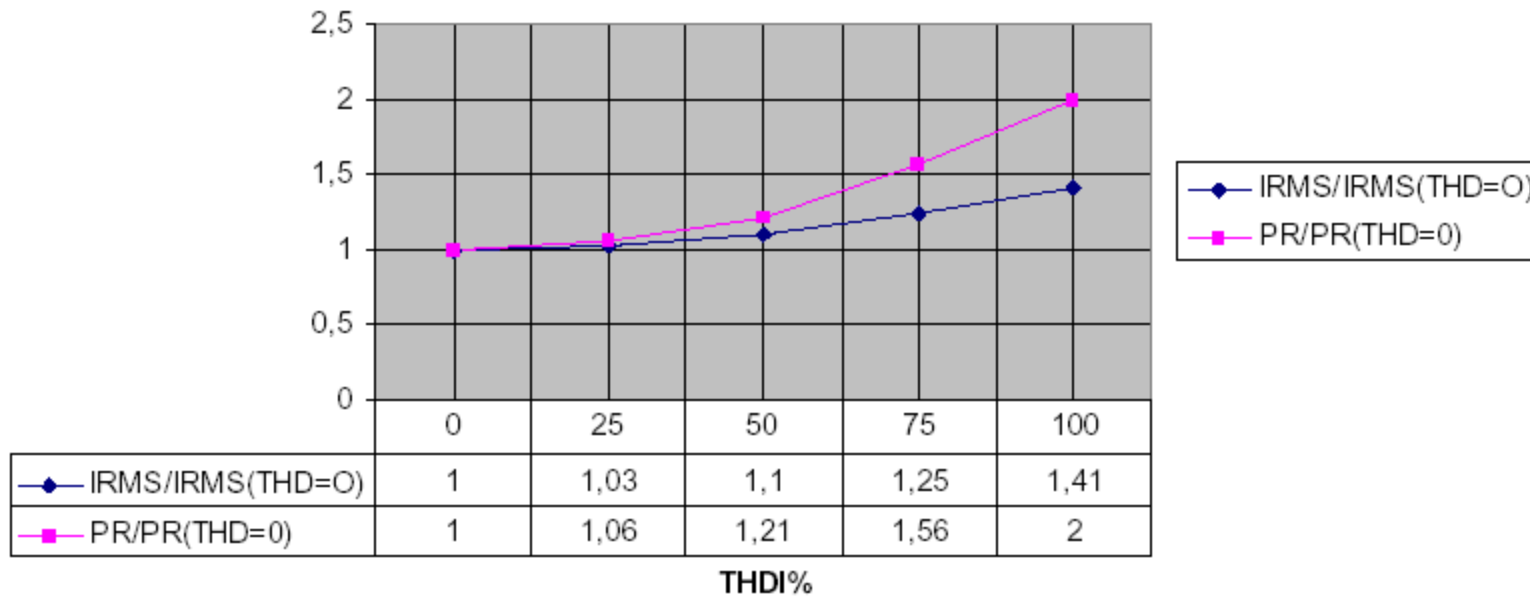
Quando el $THDi=0$

$PR = I_{rms}^2 \times R \Rightarrow$ usando dicho valor como de referencia , vemos que ocurre cuando crece el THDi.



Pérdidas en los conductores debido a corrientes armónicas

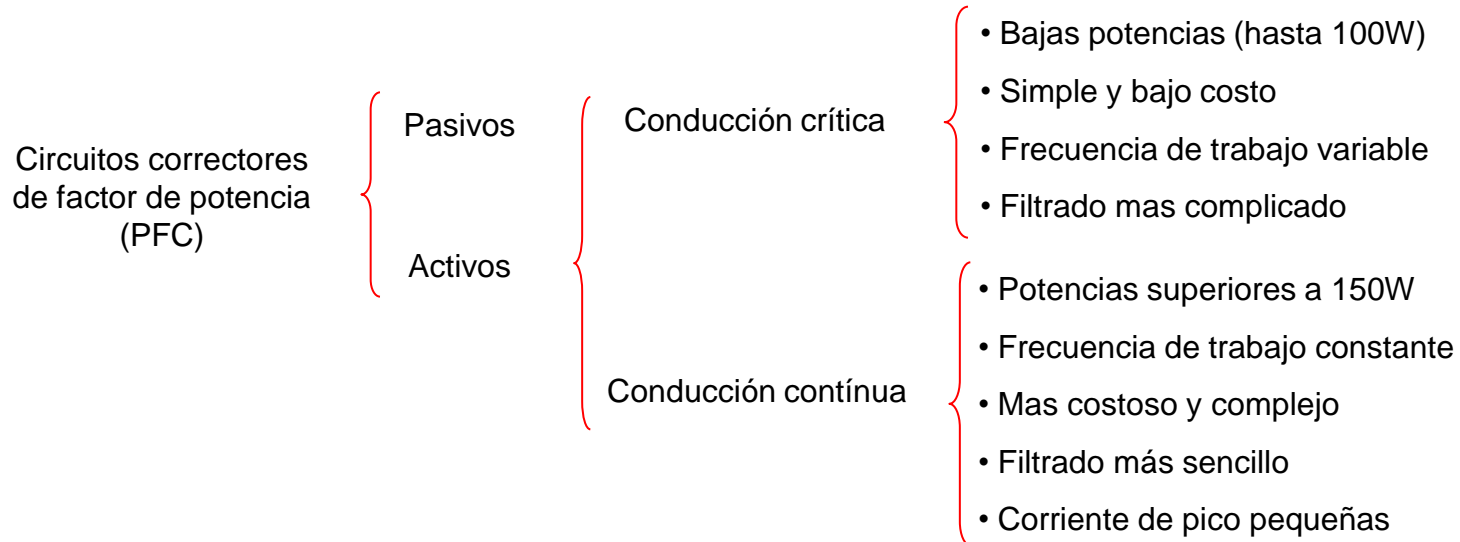
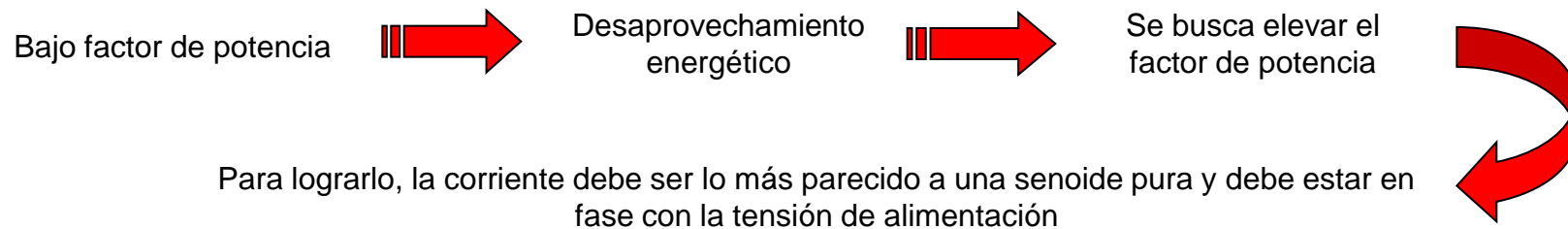
Perdidas en conductores cuantificadas en relación a la distorsión armónica:



Se puede observar que las pérdidas aumentan fuertemente **a medida que se incrementa el contenido armónico** en la corriente. Siendo un 10% mayor la relación de pérdidas de potencia respecto a la relación de corrientes para un THDI del 50%, llegando esta relación al 41.42% cuando el THDI llegue a un 100% . El aumento de las pérdidas de potencia será de un 21%, para una distorsión armónica del 50%.

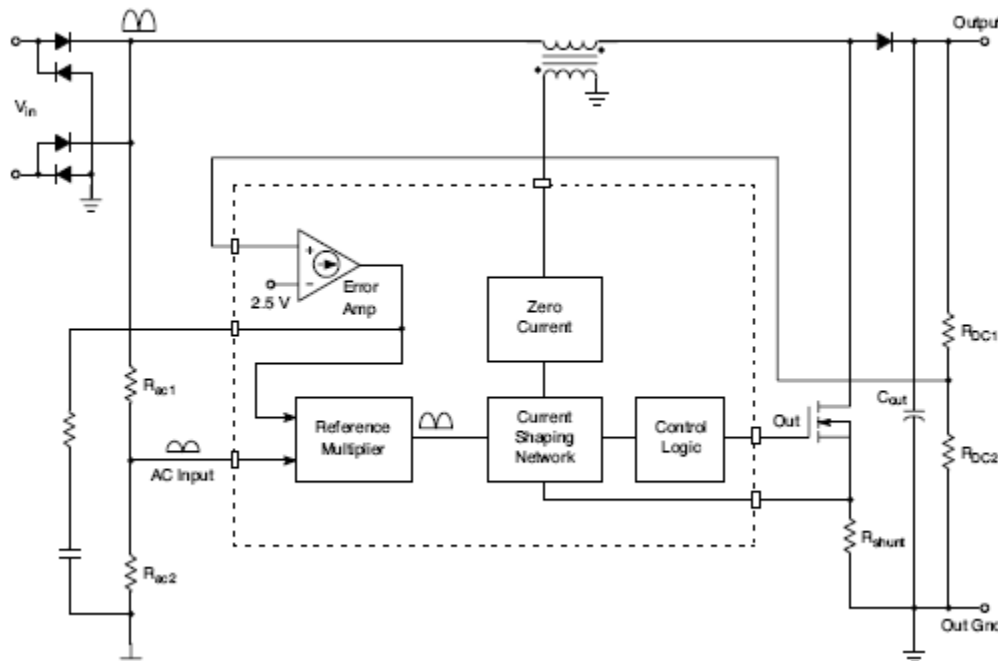
Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

Métodos de corrección:



Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

PFC en modo de conducción crítico:

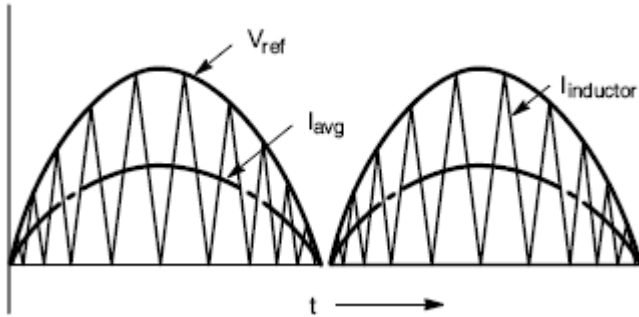


- Convertidor de DC – DC con control que permite lograr el objetivo
- Dicho circuito presenta un amplificador de error cuya salida en forma conjunta con una muestra de la tensión de entrada rectificada son aplicadas a un circuito multiplicador.
- La salida de este guarda la forma de la señal senoide rectificada de onda completa, ajustándose la amplitud de esta señal de manera de mantener la salida de tensión en su valor regulado.
- Red circuital que hace que la corriente siga a la señal de tensión rectificada en donde su valor medio se corresponderá con la mitad de la amplitud de la señal de tensión de referencia

Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

PFC en modo de conducción crítico:

Señales de control



Funcionamiento:

- 1) La señal de corriente se compara con la de tensión de referencia
- 2) Tr de potencia encendido hasta que no se igualen las señales (Ton)
- 3) Se igualan las señales, transistor cortado (Toff), rampa de pendiente negativa y continúa hasta corriente cero (es el límite)
- 4) Circuito de detección detecta cero corriente (por medio de la tensión del secundario)
- 5) Se fuerza nuevamente el encendido del tr y el ciclo se repite

Ventajas

- No hay pérdidas en el encendido del TR
- El diodo de salida trabaja a baja corriente

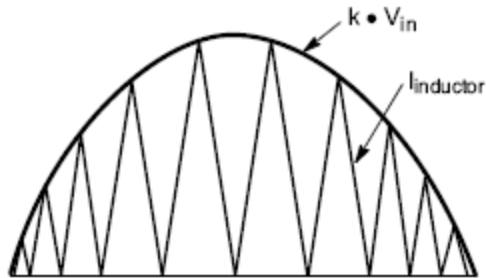
Desventajas

Trabaja a frecuencia variable por el cambio del tiempo Toff, de la amplitud de entrada o valor eficaz de la red y de la carga, esto genera un **máximo de frecuencia para cuando la tensión es máxima y la carga mínima**
Circuitos más complejos para minimizar interferencias EMI

Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

PFC en modo de conducción discontinuo sin multiplicador:

No se hace uso del multiplicador, la frecuencia varía por el cambio del Toff a lo largo del ciclo

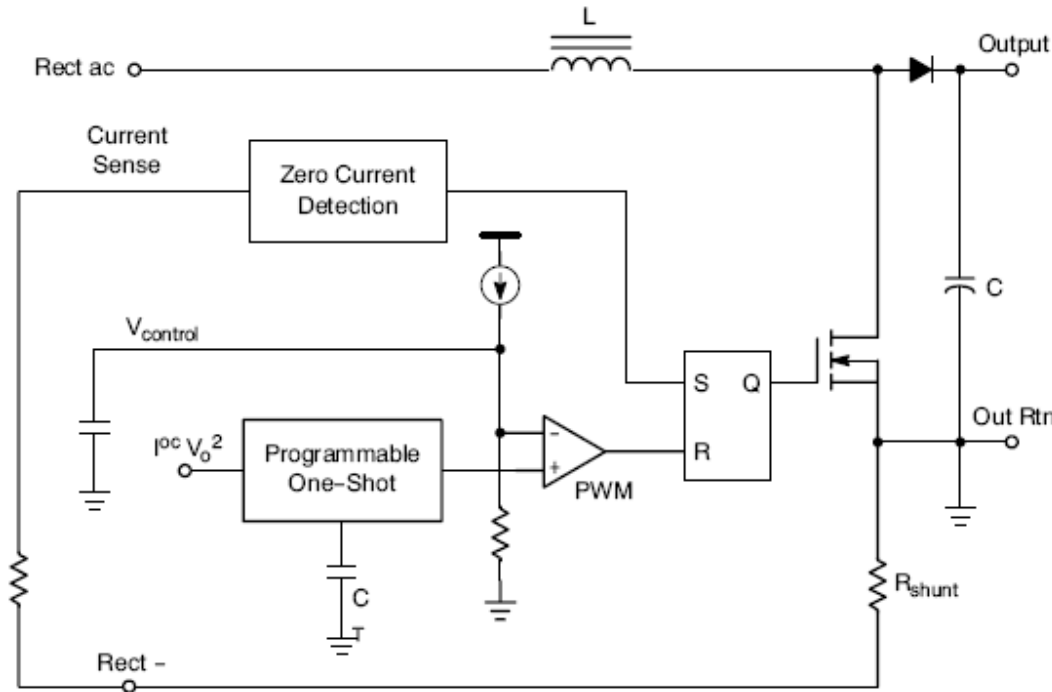


$$K \times Vin(t) = Ip = \Delta I = \frac{Vin(t)}{L} \times Ton \quad \text{por lo tanto} \quad K \times L = Ton = Cte \quad \text{para una dada Vin y carga}$$

Sin producir un censado de la tensión rectificada de entrada y programando un Ton es posible realizar una corrección como la del circuito anterior

Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

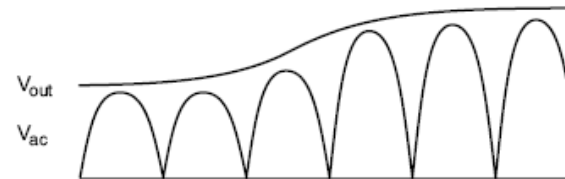
PFC en modo de conducción discontinuo sin multiplicador:



Funcionamiento

- Cuando el programable ONE-SHOT detecta que se alcanza el valor del Ton apaga al transistor
- El detector de corriente cero acciona nuevamente el transistor de salida para repetir una nueva rampa de corriente cuando esta cae al valor de cero
- Para mantener la tensión de salida hay una realimentación de la misma, vía un amplificador de error al circuito de Ton programable, de esta manera variando el mismo podemos trabajar para un amplio rango de tensiones de línea y carga

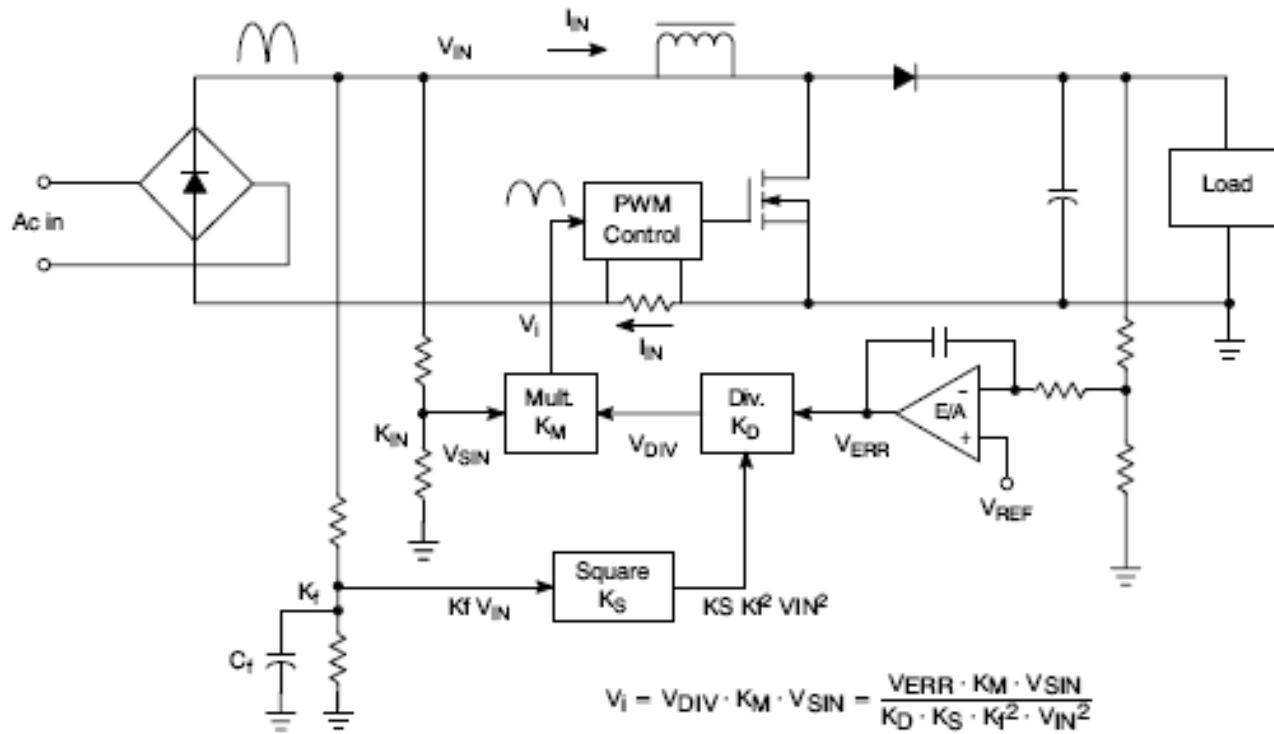
Existe la posibilidad de trabajo en modo Boost seguidor, (FOLLOWER BOOST) donde la salida se fija a un valor por encima del pico de la tensión de entrada o valor máximo



Útil para entrada conversor DC- DC

Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

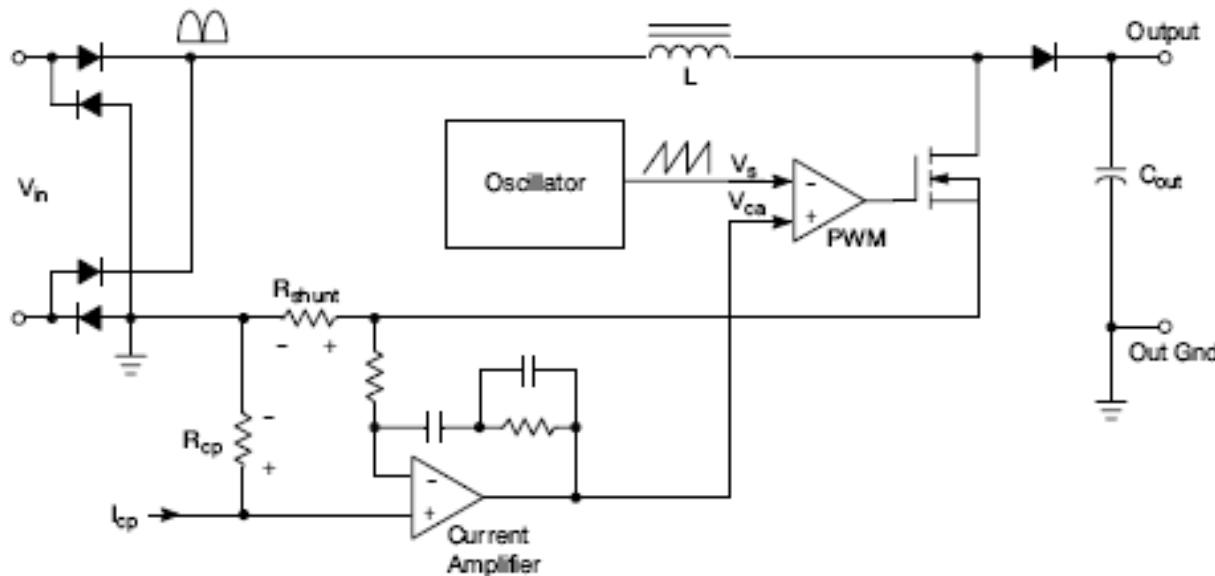
PFC en modo conducción continua:



- El sistema utiliza la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM) para generar la conmutación del dispositivo de potencia.
- El control PWM tiene dos señales de entrada. Una es función de la tensión de salida y la otra es función de la corriente de carga.
- La muestra de la señal de alterna de referencia V_i se compara con la media de la corriente de carga.

Mejora factor de potencia en circuitos electrónicos

PFC en modo conducción continua:



- Se compara la media de la corriente que circula sobre el shunt con la señal de referencia de entrada que a su vez tiene control sobre la tensión de salida
- El resultado de esta comparación entra a otro comparador en donde la referencia es un diente de sierra.
- Cuando la señal V_{ca} es mayor a la rampa el transistor conduce.
- La muestra de la señal de alterna de referencia V_i se compara con la media de la corriente de carga.

Ventajas

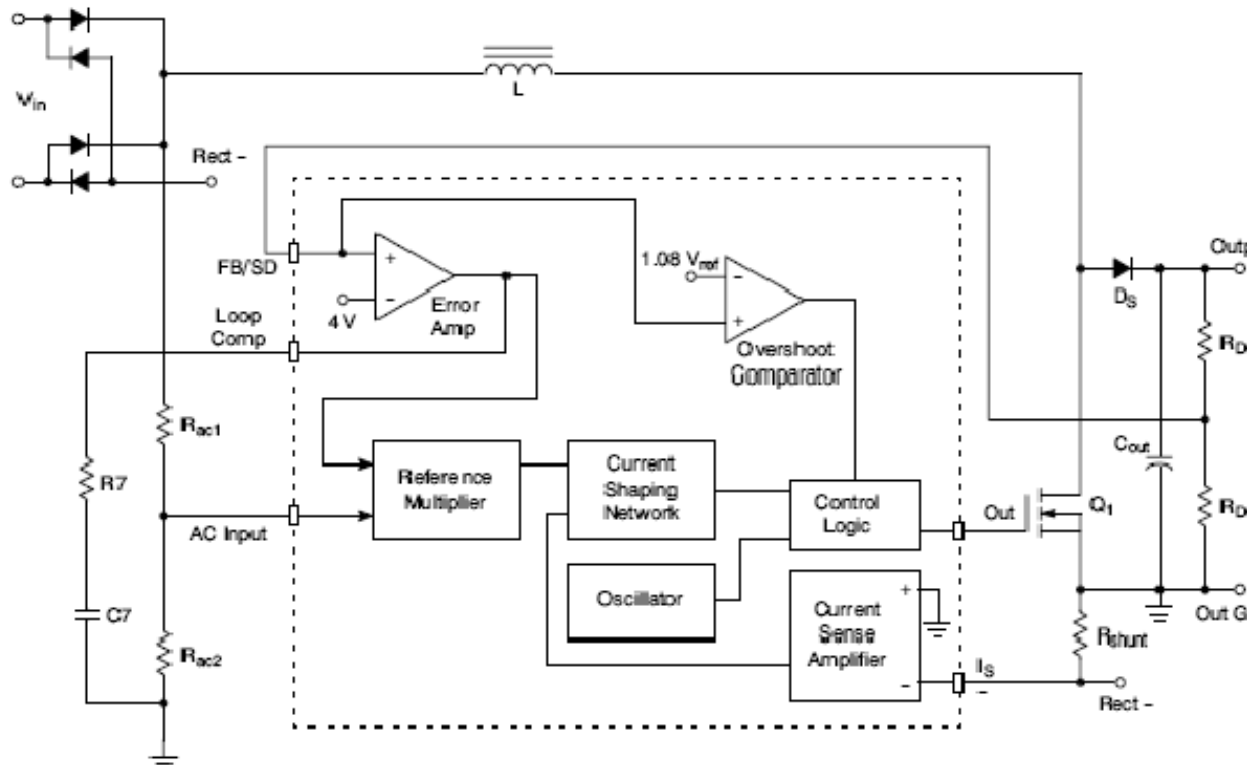
- Son útiles para potencias superiores a los 150W
- Trabajan a frecuencia fija
- Tienen bajos picos de corriente sobre los componentes y por ende flancos de menor contenido armónico y mas facil de filtrar.

Desventajas

- Más costoso
- Más complejo que el de modo de conducción crítica

Análisis familia NCP1650 de ON Semiconductor

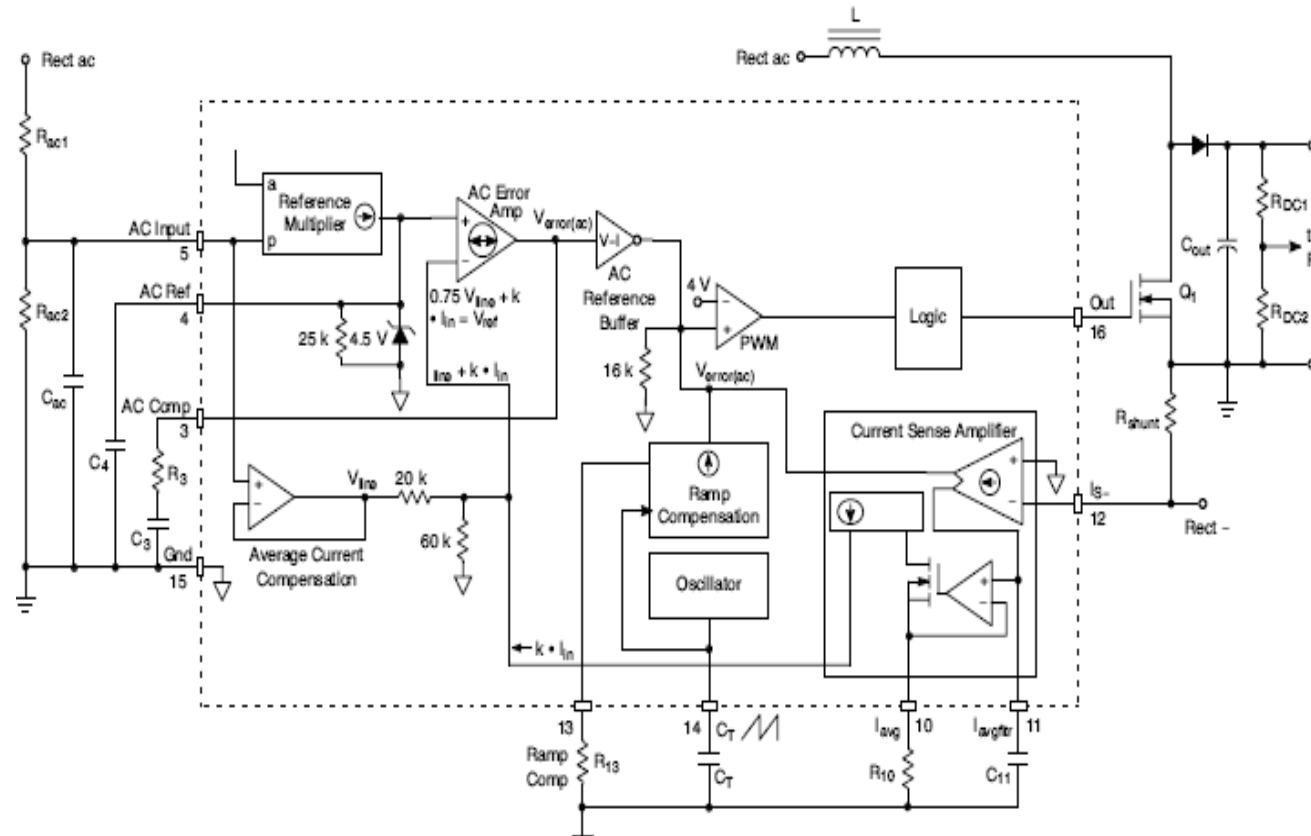
Diagrama en bloques general:



- El multiplicador de referencia es alimentado por dos entradas una proveniente de un amplificador de error con un ancho de banda de 10hz y otra proviente del divisor resistivo que toma una muestra de la señal de onda completa.
- La salida del multiplicador de referencia es una copia en escala de la señal rectificada de onda completa.
- Esta servirá para que el módulo Current Shaping Network fuerce una corriente de entrada tal que su forma y magnitud genere un adecuado factor de potencia y una adecuada tensión de salida.

Análisis familia NCP1650 de ON Semiconductor

Bloque Current Shaping Network:

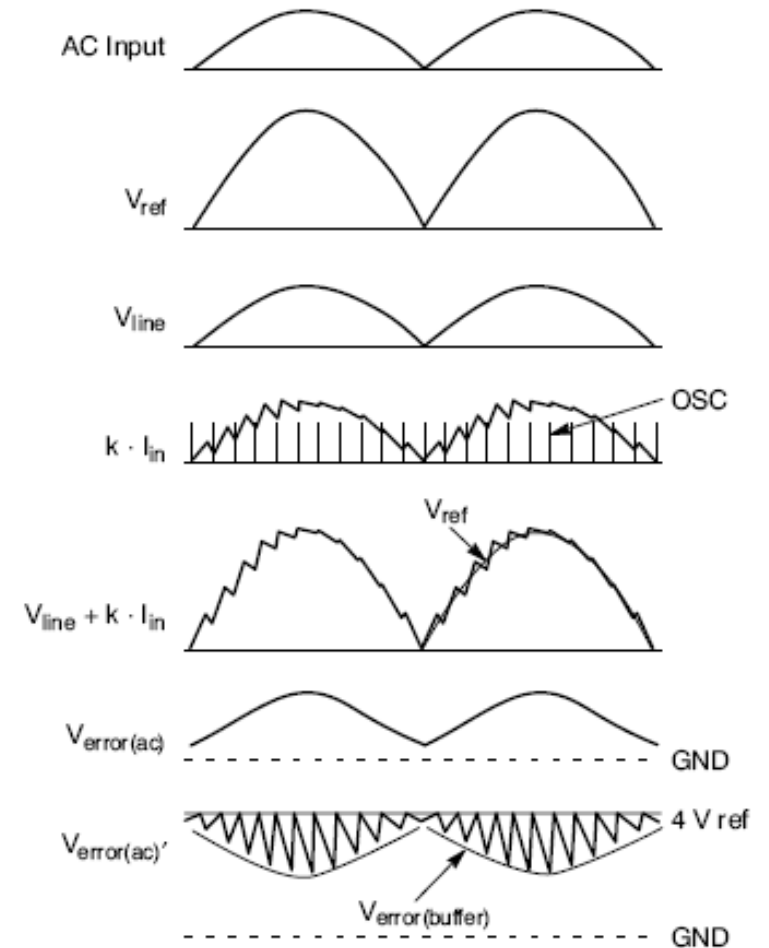
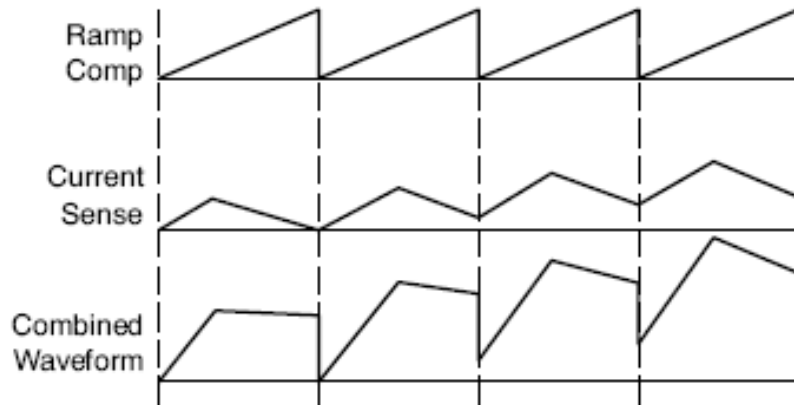


- La función general de este circuito es que la media de la corriente por el inductor copie la referencia de la señal rectificada
- La corriente de consumo es muestreada por medio un SHUNT.
- El módulo Current Sense amplifier tiene dos salidas una alimenta al PWM (sumándose en un nodo con la salida del amplificador de error). La otra salida se conecta a un capacitor vía la pata 11 generando una red RC con la resistencia interna del chip.
- La corriente media en escala es sumada con la referencia de la señal de tensión de entrada y a su vez alimentan al AC amplificador de error.
- Este amplificador de error es clave para mantener un correcto factor de potencia, una de sus entradas proviene de la señal rectificada de entrada, la otra sigue a esta última, pero está relacionada con la corriente media del inductor.

Análisis familia NCP1650 de ON Semiconductor

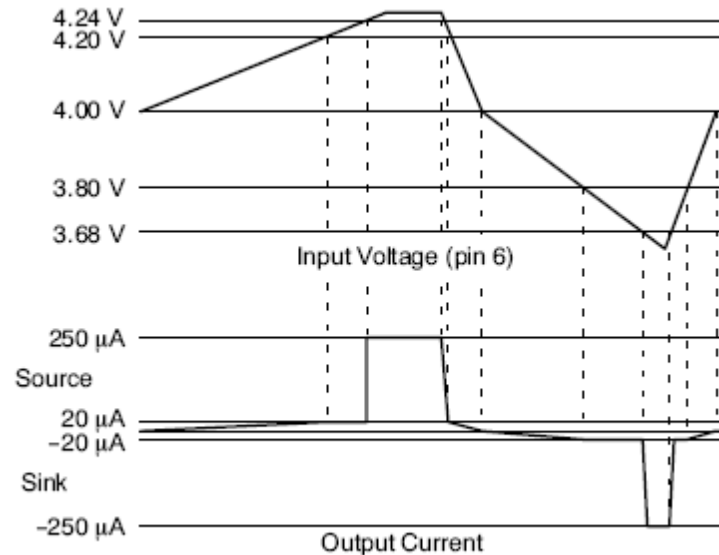
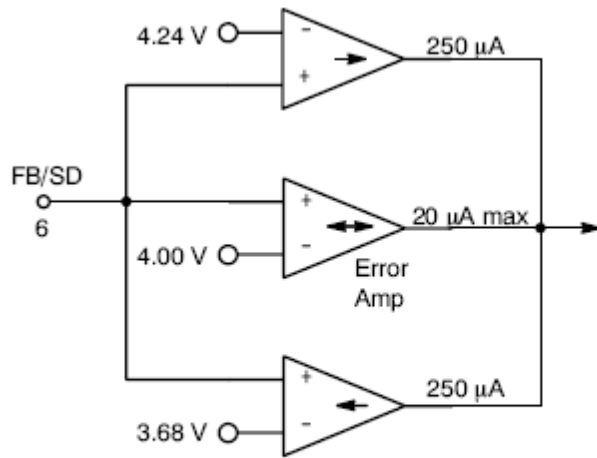
Comparador de control de PWM:

- Hay cuatro señales que se usan para actuar sobre el PWM y determinar cuando el transistor se apague.
- La entrada inversora del comparador que controla el PWM es una tensión de 4v.
- En la entrada no inversora de este comparador luego hay tres señales que se suman, la salida del buffer del AC error amplifier, la rampa del compensador y la corriente instantánea, cuando la suma de las tres llega a cuatro volt se apaga el interruptor de potencia.



Análisis familia NCP1650 de ON Semiconductor

Características adicionales:



- Este integrado tiene además una muy buena respuesta a los transitorios.
- Cuando la tensión en el amplificador de error supera los 4,2V (porque cae el consumo) actúa un lazo de compensación inyectando una corriente del orden de los 250uA.
- Por el contrario si cae por algún motivo debajo de los 3,7V toma corriente en ese mismo orden.
- Cuando se normaliza la situación los lazos dejan de funcionar y se vuelve a la situación de balance o ganancia normal.

[Análisis familia NCP1650 de ON Semiconductor](#)

Características adicionales:

Circuito limitador de potencia

El circuito limitador testea la potencia de entrada del PFC, y regula la potencia de salida para no superar el límite establecido. Ya que este circuito es un BOOST, es decir elevador, la tensión de salida será siempre mayor al pico de la tensión de onda completa rectificadora. Para este caso dejaría de funcionar el interruptor de potencia, apareciendo la onda completa rectificadora a la salida. Esto permitirá limitar la potencia. El diseño está hecho para suministrar un 20% más de la potencia nominal.

Overshoot Protection

Este circuito evita que en caso de pérdida de carga aparezcan sobre tensiones a la salida, muy perjudiciales para los circuitos que siguen luego del PFC. Por ejemplo salidas de 400v pueden llegar a los 800v en caso de sacar repentinamente la carga. Para que no ocurran estos eventos que pueden ser destructivos, hay una realimentación de la tensión de salida, cuando esta supera el 8% de su valor nominal se produce un apagado del interruptor de salida y el PFC deja de funcionar, reanudando la operación cuando la tensión vuelva a estar dentro de los límites.

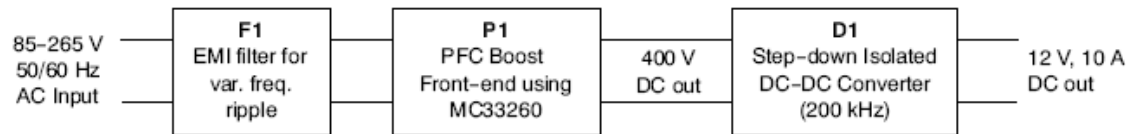
Métodos de comparación de los diferentes PFC activos

Configuraciones:

- < 100 W PFC modo de conducción discontinuo o CRM
- > 200 W PFC modo de conducción continuo

Entre 100 y 200 W ambos pueden usarse con similares características, se analizarán las topologías

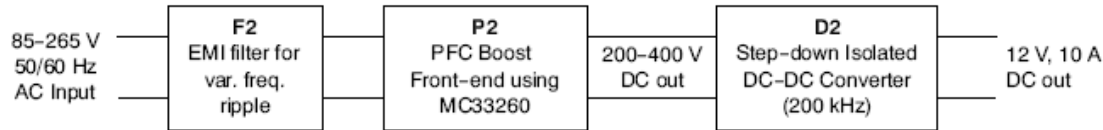
Filtro EMI + PFC Boost + Convertidor DC – DC reductor



PFC BOOST con modo de conducción crítico, tensión fija a la salida, alrededor de 400 V

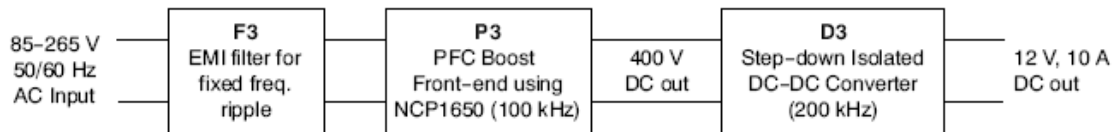
Métodos de comparación de los diferentes PFC activos

Filtro EMI + PFC Boost + Convertidor DC – DC reductor



PFC BOOST con modo de conducción crítico, y tensión variable a la salida 200 – 400 V.
PFC más sencillo pero convertidor más complejo.

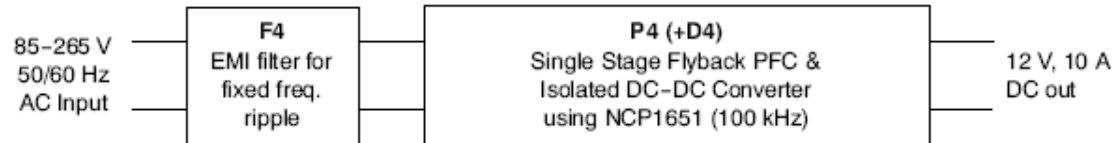
Filtro EMI + PFC Boost Converter + Convertidor DC – DC reductor



PFC BOOST con tensión fija a la salida 400 V.

Métodos de comparación de los diferentes PFC activos

Filtro EMI + Convertidor FlyBack con PFC en una etapa con asilamiento



Realiza todo en un paso de conversión.

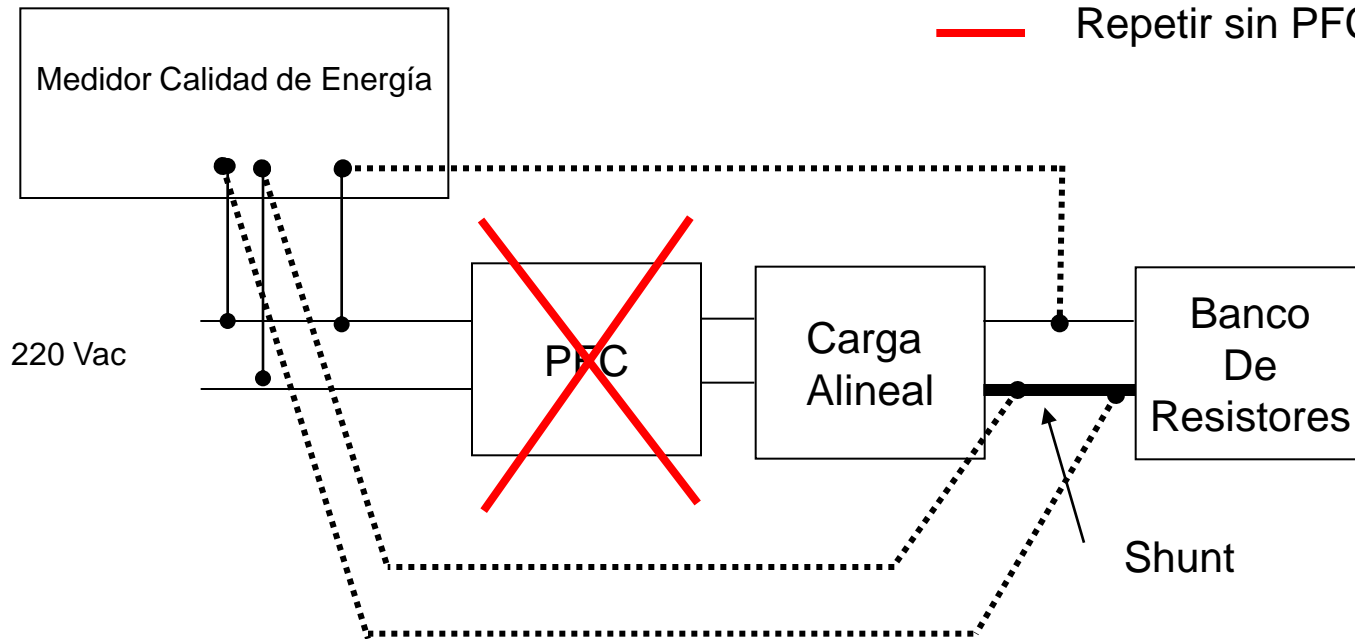
Dificultad en que su filtro de salida al guardar toda la energía de la línea tendrá un ripple montado del doble de la frecuencia de línea

Método de testeo

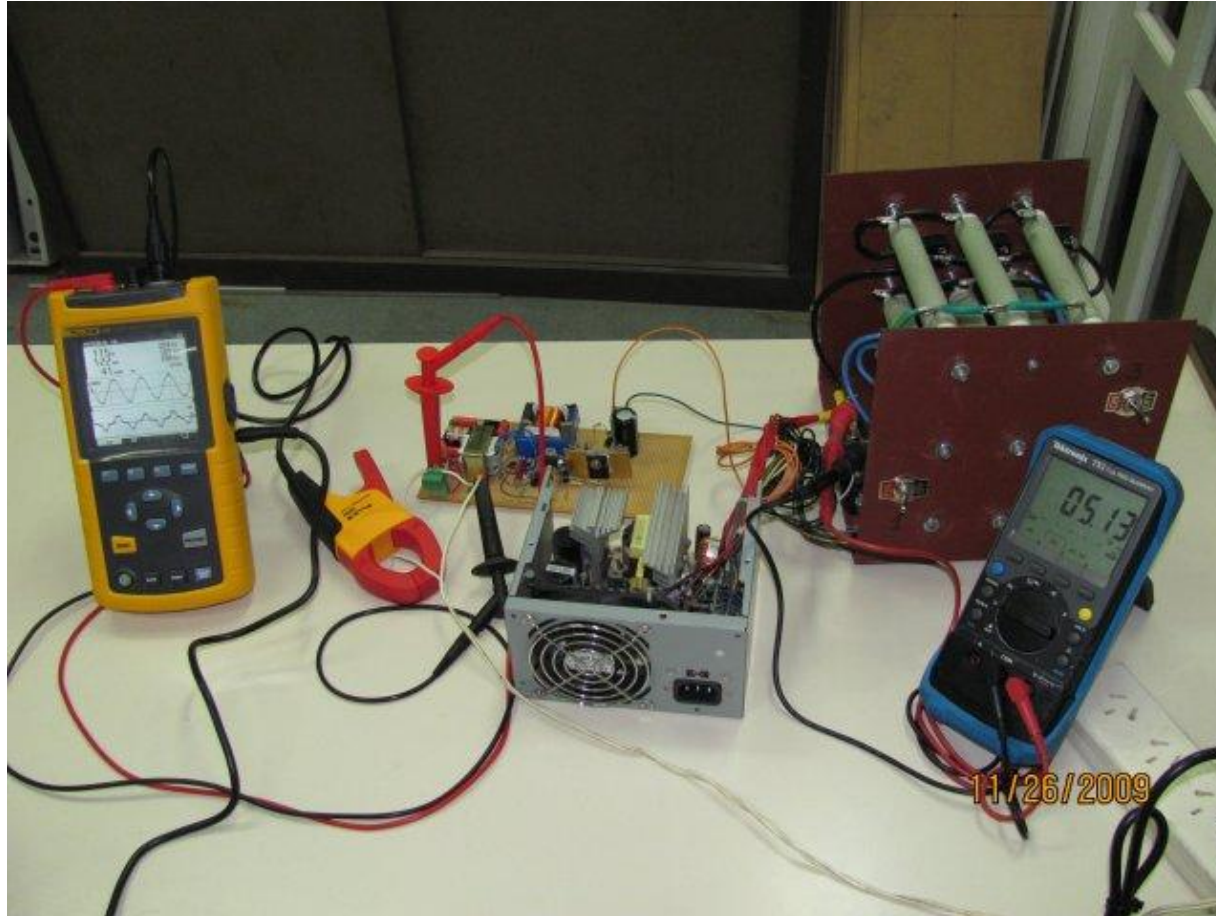
Objetivos:

- Medir y comparar I, V, P, S, Q y THD

- Primer Paso
- Segundo Paso
- Repetir sin PFC



Método de testeo



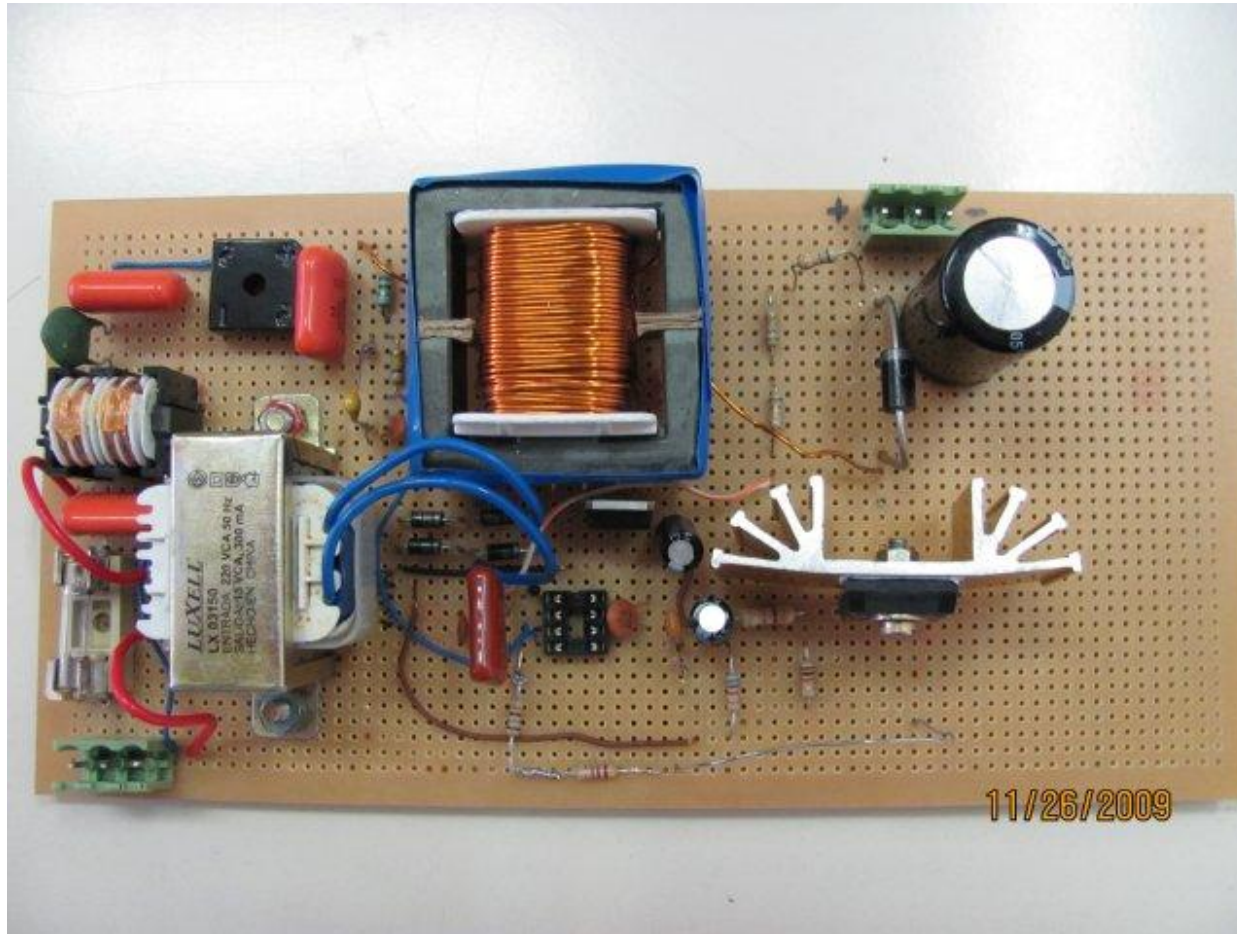
PFC Proyectado

NCP1653 en topología BOOST de On- Semiconductor

Características principales

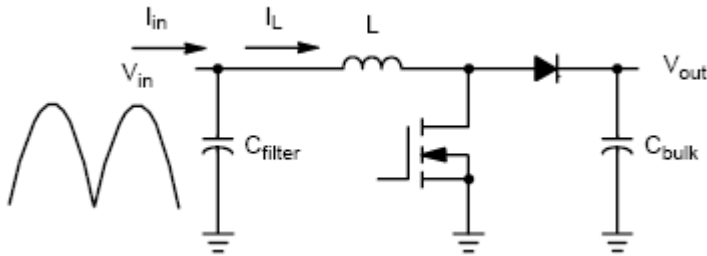
- Frecuencia fija 100KHZ → **Facilita el filtrado EMI**
- Modo de conducción continuo
- Operación en modo tensión constante y modo seguidor
- Cumple IEC-61000-3-2.
- Protección contra sobre corrientes
- Límite de potencia de salida → **Variación del ciclo de actividad**
- Protección contra sobre tensión de salida 107%
- Desconexión por debajo del 8% de la tensión de salida
- Salida de hasta 1.5 A → **Puede manejar drivers de alta potencia**
- Modo seguidor → **Permite trabajar con inductores y Mosfet de menor potencia por menor variación de la corriente
La tensión de salida se acomodará según la tensión RMS de entrada y el consumo.**

PFC Proyectado

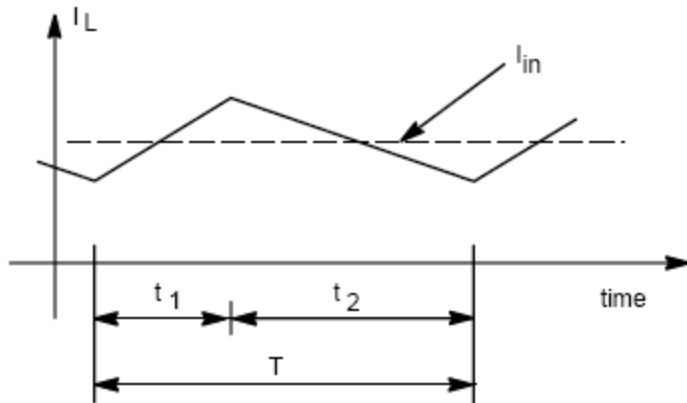


PFC Proyectado – Topología BOOST

Descripción de funcionamiento:



La señal de alterna de 50Hz es rectificadada, y es conmutada a través de un MOSFET en alta frecuencia del orden de los 100KHz. Por lo tanto la corriente sobre el inductor tendrá componentes de alta y baja frecuencia, las primeras serán filtradas por el capacitor Cfilter que es de bajo valor del orden de los 100nf.



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{t_1 + t_2}{t_2} = \frac{T}{T - t_1}$$

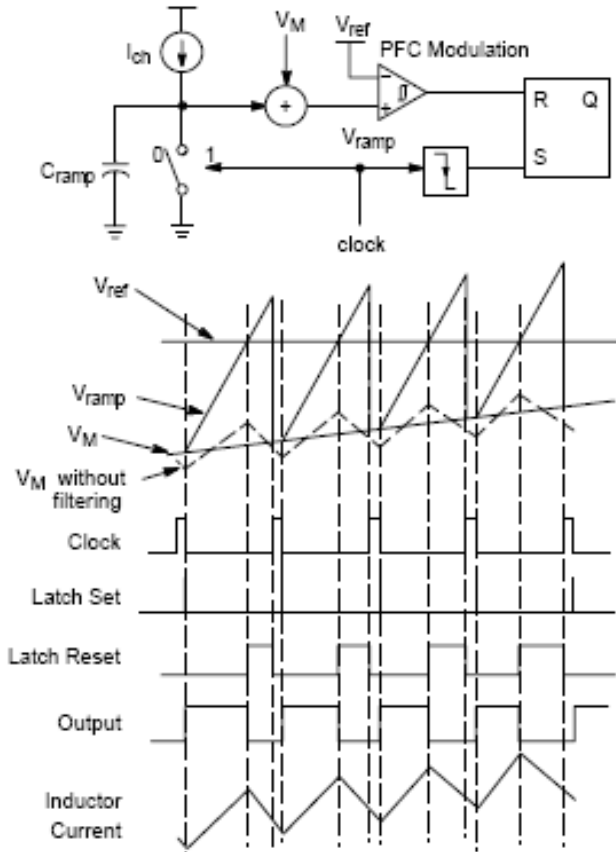
$$V_{in} = \frac{T - t_1}{T} V_{out}$$

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{T - t_1}{T} \frac{V_{out}}{I_{L-50}}$$

Para poder corregir el factor de potencia, la impedancia de entrada debe permanecer prácticamente constante.

PFC Proyectado – Topología BOOST

Generación del ciclo de actividad:



La modulación del ciclo de actividad se realiza en base a la comparación de una tensión de referencia con la suma de una rampa generada internamente y una tensión denominada VM que surge de la realimentación de tres señales.

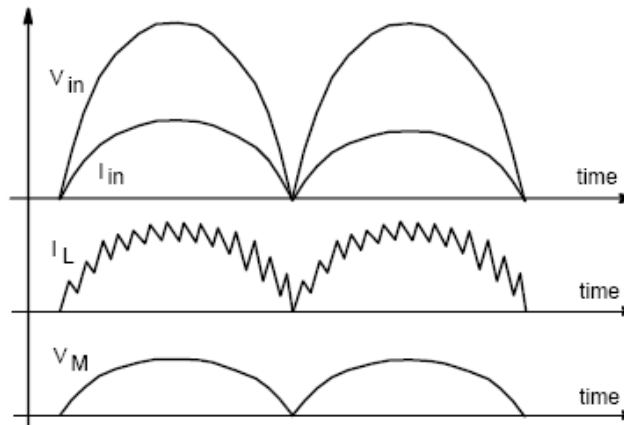
Is: Muestra de corriente del inductor

Icontrol: Surge de la muestra de la tensión de salida a través de la corriente IFB.

Ivac: Surge de la muestra de la señal rectificada.

RM: Resistencia externa.

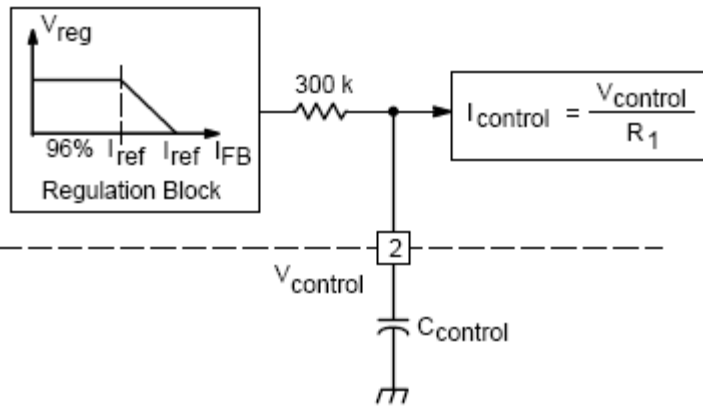
$$V_M = \frac{R_M I_{vac} I_S}{2 I_{control}}$$



La corriente sobre el inductor tiene componentes de baja y alta frecuencia.

PFC Proyectado – Topología BOOST

Modo de funcionamiento: Follower Boost



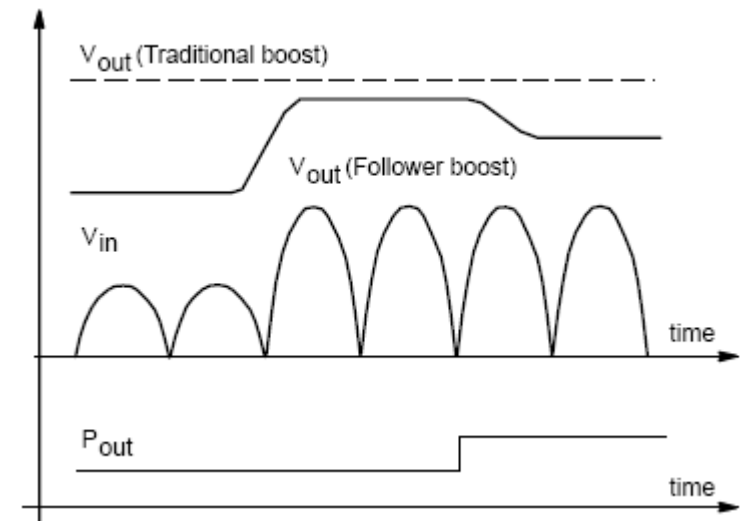
Una de las ventajas de esta característica de trabajo es la reducción del Ton, esto reduce las pérdidas sobre el MOSFET y el inductor.

Este método de trabajo se dará cuando la corriente de realimentación $I_{FB} < 96\%$ de una corriente $I_{ref} = 200\mu A$, que surge de dividir la tensión nominal de salida y las resistencias de realimentación.

El PFC operará en este modo cuando la $I_{control}$ es constante.

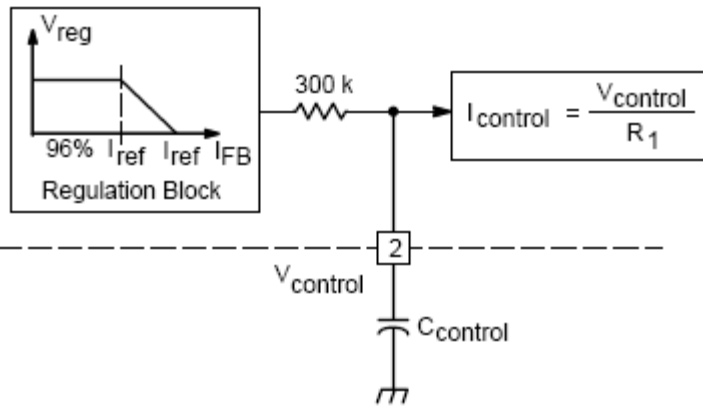
Dada una determinada demanda la tensión de salida seguirá a la entrada, tener en cuenta que esta etapa es seguida por otra de regulación que admitirá dicha posible variación.

Además se observa en este modo que también la tensión de salida decae cuando la demanda aumenta es decir sigue a esta como se observa en las siguientes figuras.



PFC Proyectado – Topología BOOST

Modo de funcionamiento: Tensión de salida constante



Es una región de trabajo en donde se debe cumplir: $96\% I_{ref} < I_{FB} < I_{ref}$

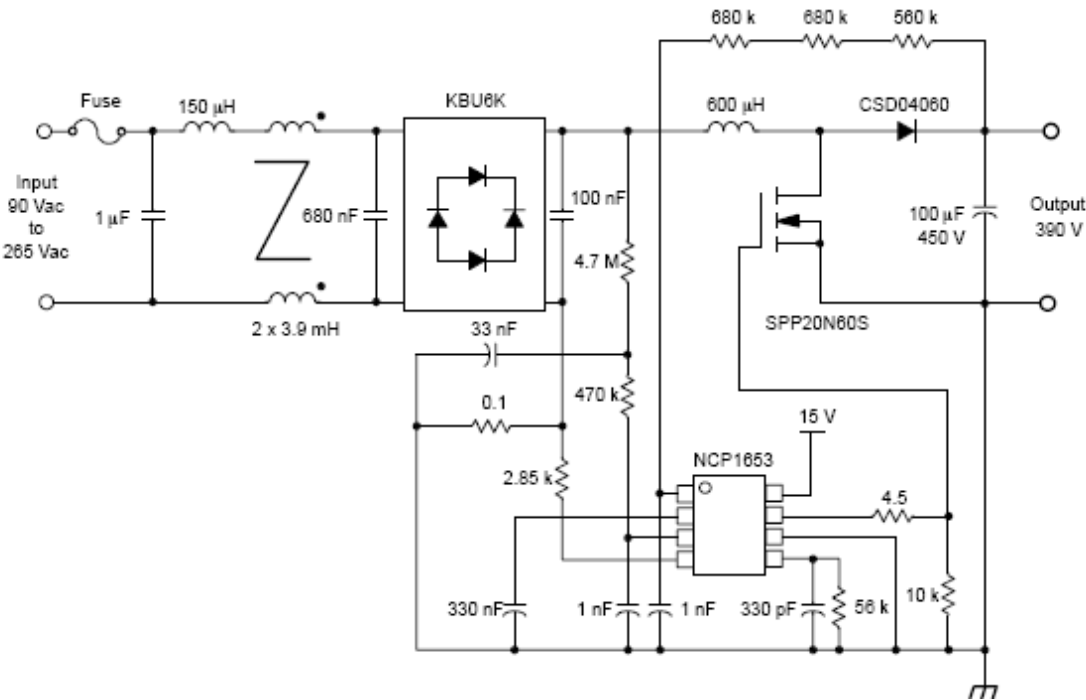
Aquí el PFC opera con tensión de salida constante. En si el funcionamiento es similar al seguidor pero hay una brecha estrecha en donde la tensión de salida se mantiene constante frente a las variaciones de entrada y demanda.

Cabe aclarar que si $I_{FB} > I_{ref}$, es decir $V_{out} > R_{FB} \cdot I_{ref}$, el dispositivo deja de trabajar, el ciclo de actividad se hace cero por aumento de VM a la tensión de referencia Vref.

Una vez que por caída de la tensión de entrada o suministro de carga dicha condición desaparece el dispositivo se restaura nuevamente a uno de los modos de trabaja enunciados anteriormente.

PFC Proyectoado – Mediciones Efectuadas

Fabricación de prototipo PFC:



Se utilizó el esquema Follower Boost con el siguiente circuito general, el mismo nos permite operar aproximadamente entre 30 y 160w de carga.

Fabricación de una carga calibrada variable:

Se construyó una carga con resistores los cuales se montaron en un bastidor metálico totalmente construido en el grupo GESE.

Carga alineal:

Para manifestar el fenómeno buscado se cargo al PFC con un convertidor DC-DC comercial de hasta unos 200w de salida, el cual a su vez fue sometido a una carga dada por el banco de resistores.

PFC Proyectado – Mediciones Efectuadas

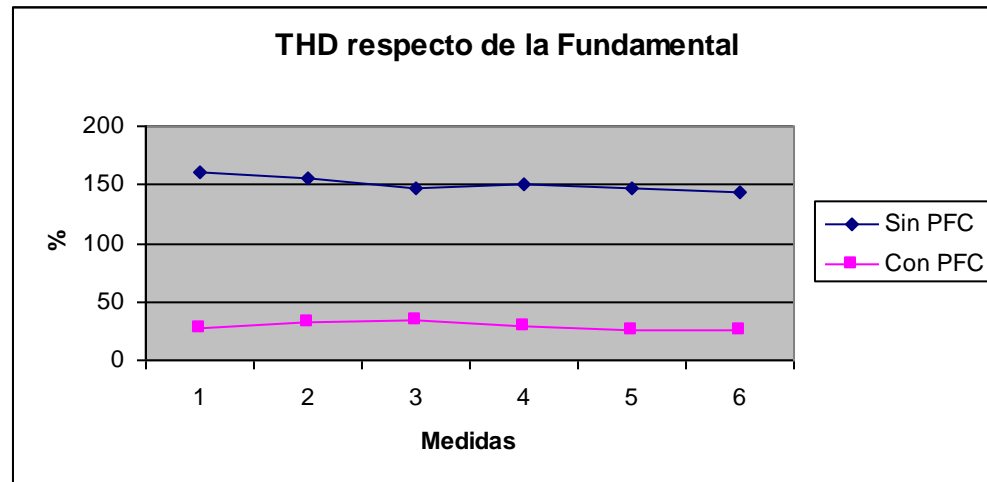
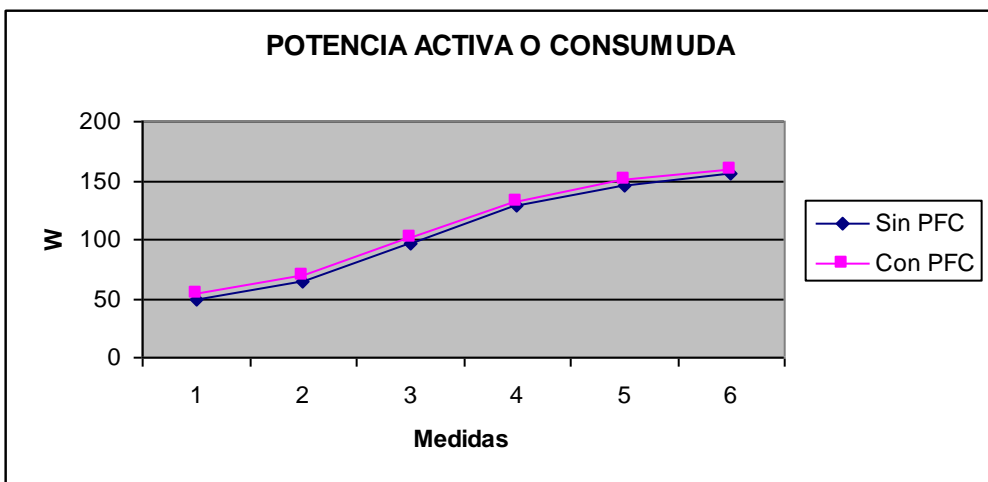
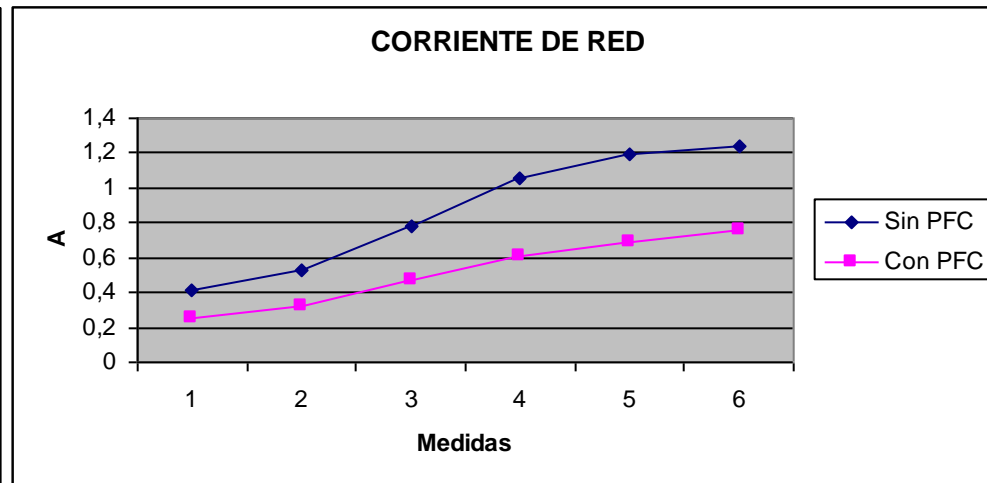
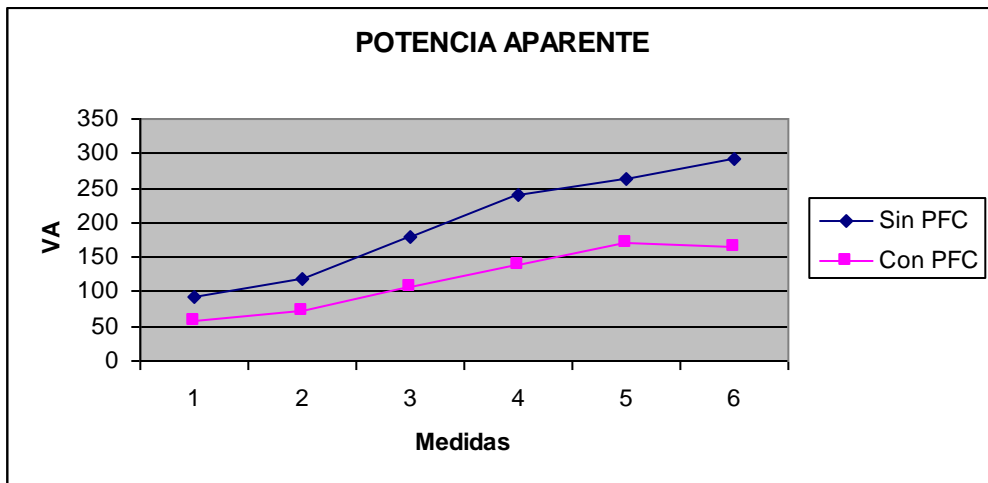
Mediciones efectuadas sin el corrector de factor de potencia:

Medición	Entrada Fuente								Salida Fuente			
									5 VCC		12 VCC	
	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia activa [W]	Potencia aparente [VA]	Potencia reactiva [VAR]	Factor de potencia	Coseno de FI	THD [%]	Tensión [V]	Corriente [A]	Tensión [V]	Corriente [A]
1	227,9	0,415	49	93	80	0,52	0,99	160,7	5,125	0	11,506	3,035
2	227,9	0,529	64	118	99	0,53	0,99	154,9	5,098	2,474	11,569	3,057
3	228,1	0,78	97	180	152	0,53	0,98	147	5,045	7,569	11,688	3,089
4	227,6	1,051	128	240	203	0,53	0,98	150,8	4,997	12,231	11,797	3,114
5	227,9	1,196	146	264	220	0,55	0,98	147	5,078	7,632	11,53	6,246
6	227,6	1,242	156	291	246	0,53	0,98	143,5	5,163	2,533	11,254	9,064

Mediciones efectuadas con el corrector de factor de potencia:

Medición	Entrada BOOST								Salida BOOST / Entrada Fuente		Salida Fuente			
											5 VCC		12 VCC	
	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia activa [W]	Potencia aparente [VA]	Potencia reactiva [VAR]	Factor de potencia	Coseno de FI	THD [%]	Tensión [V]	Corriente [A]	Tensión [V]	Corriente [A]	Tensión [V]	Corriente [A]
1	227,9	0,249	54	57	20	0,94	1	27	356,59	0,1415	5,123	0	11,51	3,067
2	226,9	0,32	69	73	23	0,94	1	32	354,9	0,1846	5,097	2,511	11,572	3,078
3	227,4	0,471	102	108	36	0,94	1	34,5	341,5	0,2807	5,045	7,573	11,688	3,1
4	227,2	0,611	132	139	40	0,96	1	28,7	322,6	0,392	4,997	12,231	11,796	3,125
5	227,6	0,688	151	172	41	0,94	1	25,4	315,15	0,455	5,078	7,65	11,28	6,246
6	227,7	0,759	160	166	44	0,96	1	25,25	313,95	0,48	5,168	2,507	11,23	9,035

PFC Proyectado – Mediciones Efectuadas



PFC Proyectado – Mediciones Efectuadas

Conclusiones:

- El factor de potencia no depende del $\cos \varphi$ para cargas fuertemente alineales, sino del contenido armónico de la señal.
- Con el PFC desarrollado y con la carga ensayada se logra elevar el factor de potencia de 0.52 a 0.95 aproximadamente.
- Al corregir el factor de potencia y disminuir el contenido armónico se logra bajar fuertemente el valor de la corriente eficaz.
- Según los ensayos realizados, la corriente eficaz sin corrector es aproximadamente un 70% mayor que con dicho corrector.
- Las pérdidas por efecto Joule dependen del cuadrado de la corriente eficaz, por lo tanto la utilización de un PFC disminuye fuertemente las pérdidas en conductores.
- Dichas pérdidas son considerables si se tiene en cuenta el recorrido de la red eléctrica partiendo desde el generador.
- Según los ensayos realizados, la relación entre las pérdidas por efecto Joule en conductores sin corrector y con corrector son mayores a 2.5 veces.
- La reducción de emisiones de gas CO_2 dependerá fuertemente de la disminución de las pérdidas en los conductores de las líneas de distribución de energía.