

## **7. Armónicos: Origen y Solución**

### **7.1 Origen de los armónicos**

Actualmente los elementos semiconductores están presentes prácticamente en todos los hogares e industrias. Con el fin de mejorar la producción es indispensable contar con elementos tales como: controladores de velocidad, circuitos rectificadores, computadores y otros elementos que se encuentran en mayor número cada día en los centros de consumo. Los beneficios de esta tecnología son innegables y van desde la comodidad de regular la luminosidad de una ampolla hasta el versátil control de máquinas rotatorias.

El inconveniente de los dispositivos mencionados es la contaminación que producen en el sistema eléctrico, ya que los elementos semiconductores modifican la naturaleza de la onda senoidal original y la convierten en señales deformadas, no sinusoidales y cuyas características no siempre son de fácil comprensión. Los conceptos aplicados para estudiar el comportamiento de sistemas lineales pierden validez, de la misma forma los elementos de protección y de medida ven mermada su efectividad frente a señales distorsionadas.

### **7.2 ¿Cómo se producen los armónicos?**

Una señal periódica no sinusoidal puede ser convertida mediante aplicación de serie de Fourier en una sumatoria de funciones sinusoidales. El sistema no lineal puede ser analizado realizando los cálculos de cada componente y así obtener la respuesta total de la señal distorsionada.

Las componentes armónicas aparecerán cada vez que se modifique la naturaleza de una señal senoidal. Tomemos el ejemplo un rectificador de media onda:

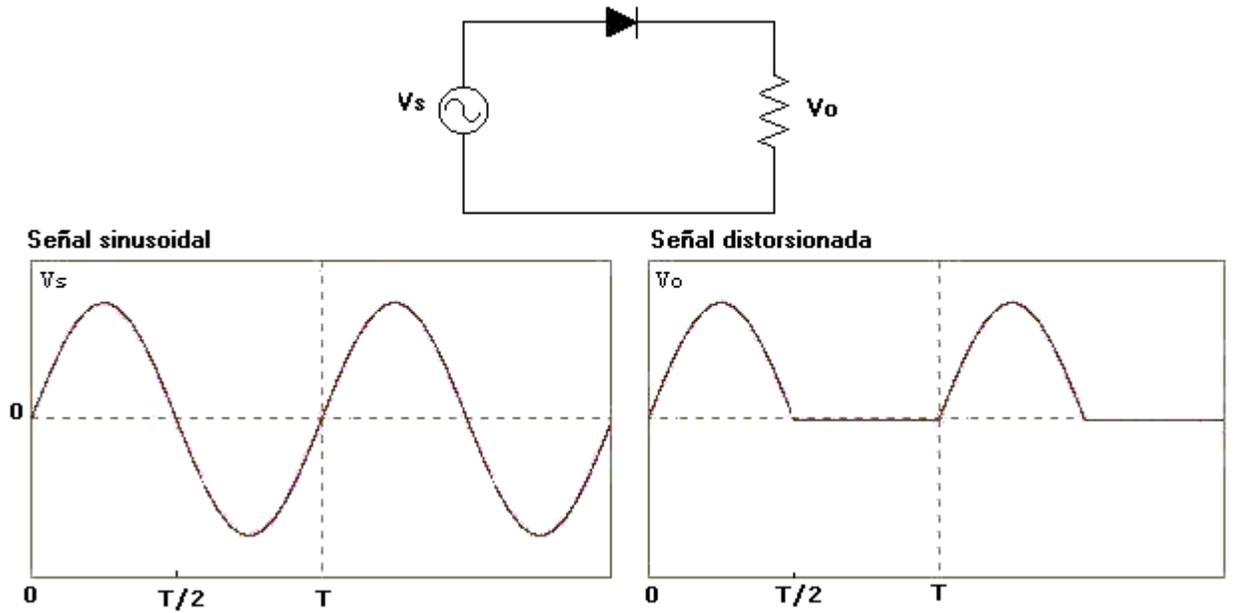


Figura 7.1

Alimentar una carga con una onda distorsionada es equivalente a alimentarla con múltiples fuentes senoidales de distinta frecuencia y magnitud pero relacionadas entre sí en forma armónica, vale decir frecuencias cuyo valor es un múltiplo de una frecuencia fundamental.

Para una señal cuadrada después de calcular la serie de Fourier se puede sumar en forma gráfica cada componente obtenida:

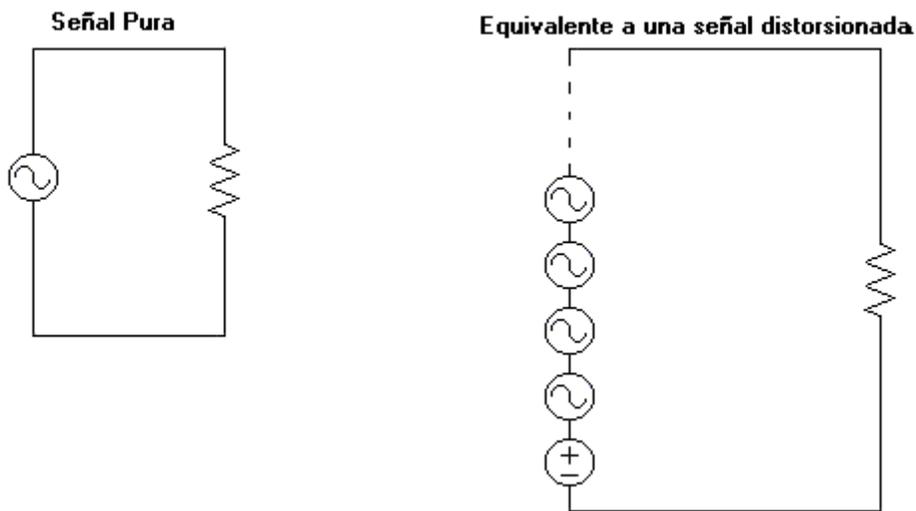


Figura 7.2

Al sumar señales sinusoidales diferentes se obtiene una nueva señal:

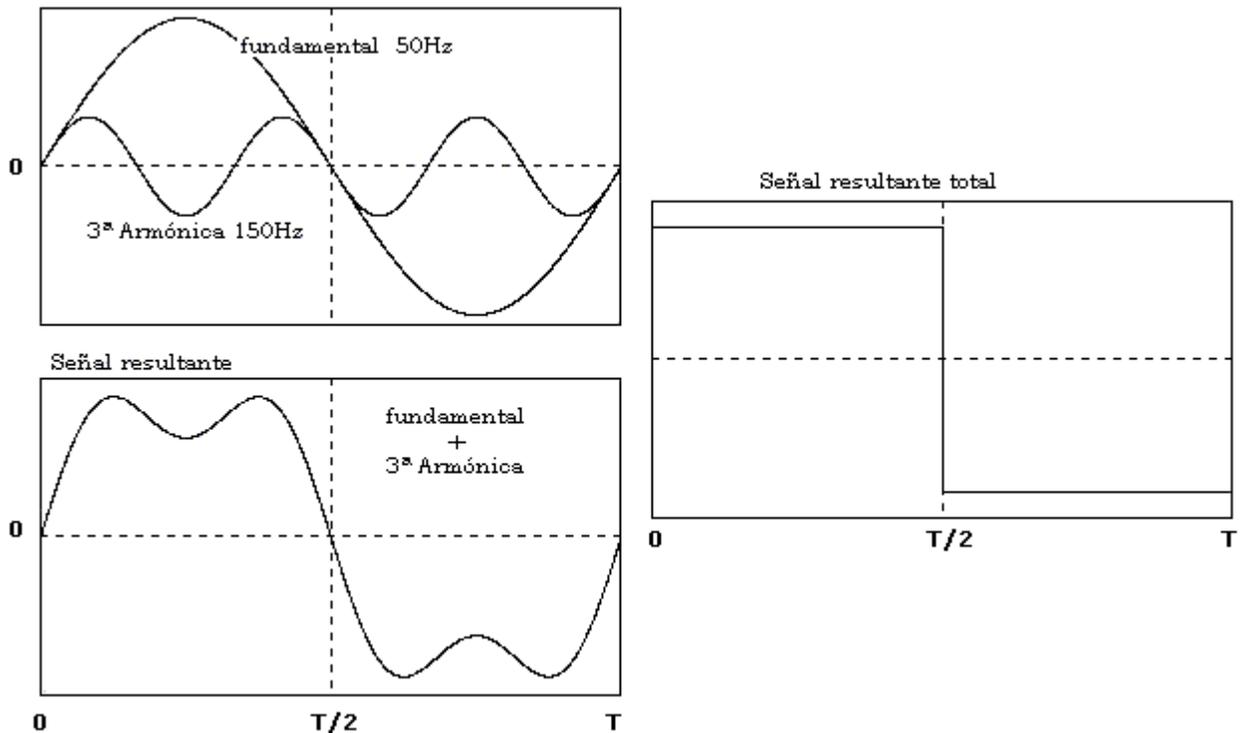


Figura 7.3

Si sumamos hasta el infinito todas las componentes armónicas obtendríamos la señal resultante total.

La señal resultante tiene la misma frecuencia que la fundamental, pero características muy distintas; diferente valor efectivo, diferente valor máximo, por lo tanto tratar una señal distorsionada de la misma forma que una señal sinusoidal es un error.

### 7.3 Algunos efectos y soluciones para el problema de los armónicos

En sistemas de distribución podemos encontrar cargas no lineales en redes monofásicas y trifásicas. En redes monofásicas es común encontrar distorsión armónica en edificios de oficinas donde existen redes computacionales y elementos de calefacción regulables. En sistemas trifásicos las plantas industriales poseen gran cantidad de elementos electrónicos que provocan contaminación armónica.

## Capítulo 7 Armónicos: Origen y Solución

Cuando un sistema posee distorsión armónica es necesario encontrar algún método para mitigar sus efectos y lograr que los aparatos alimentados funcionen en forma adecuada.

Dependiendo de la contaminación armónica presente en un circuito específico, se tomarán en forma simultánea más de alguna opción. A continuación se presentan algunos efectos de la distorsión armónica y soluciones posibles

### Efectos en los instrumentos de medición

Si se realizan mediciones en un sistema donde existen cargas no lineales, se debe utilizar instrumentos capaces de registrar magnitudes reales del sistema, considerando la presencia de armónicos. Un multitester que mide respuesta de valor medio no sirve para obtener valores efectivos de señales distorsionadas y los estudios realizados no tendrán real validez. Un instrumento diseñado sólo para medición de señales sinusoidales dará una lectura errónea (normalmente inferior), provocando un “engaño” al analista.

Una señal distorsionada puede tener un valor efectivo bajo pero repentinos peaks de gran magnitud, tampoco estos son registrados por un instrumento común y corriente siendo útil utilizar un multímetro moderno que entrega valores efectivos reales, formas de onda y espectro armónico de la señal medida.

### Efecto sobre dispositivos de protección

Los interruptores de protección termo-magnéticos que utilizan un bimetálico para accionar su mecanismo, responden al calentamiento producido por la corriente que circula. La elevación de temperatura depende del valor de corriente efectiva que atraviesa el dispositivo, por lo tanto la protección tendrá la posibilidad de operar correctamente ante un calentamiento excesivo provocado por las componentes armónicas.

Un dispositivo de protección de tipo electrónico que responde en forma sensible ante los valores peak de corriente, probablemente no responderá de manera adecuada. Es usual que el valor máximo de la corriente sea mayor de lo normal y la operación operará en forma prematura aunque la corriente efectiva sea baja. Si el valor peak es menor de lo normal puede que el interruptor no opere incluso si la corriente eficaz es de gran valor.

Efecto en redes de telecomunicaciones

Los sistemas de comunicación se ven afectados por la distorsión armónica y probablemente el primer indicio de la existencia de armónicos. Habitualmente los cables de telefonía están cercanos a los conductores que transportan energía eléctrica. El conductor neutro se encuentra más cercano al conductor de telecomunicaciones, si hay presencia de corrientes armónicas por el conductor neutro existirá una interferencia que repercute en la línea telefónica y puede ser percibido en forma audible por los usuarios de la red.

Armónicos en el conductor neutro

Sabemos que en un sistema trifásico en estrella balanceado, las corrientes se anulan y la corriente por el neutro es cero, en un sistema desbalanceado, el vector resultante de las tres corrientes es una magnitud no nula que circula por el conductor neutro. Cuando alimentamos cargas no lineales, la corriente de neutro recibe la suma de todas las componentes armónicas de secuencia cero, que son los impares múltiplos de tres (3ª, 9ª 15ª etc.), esto ocurre incluso en sistemas balanceados. Esto ocurre porque las componentes armónicas que son múltiplo de tres están en fase y sus magnitudes se suman en forma directa, en cambio para la frecuencia fundamental las corrientes neutro se cancelan por ser tres vectores de igual magnitud y desfasados 120°.

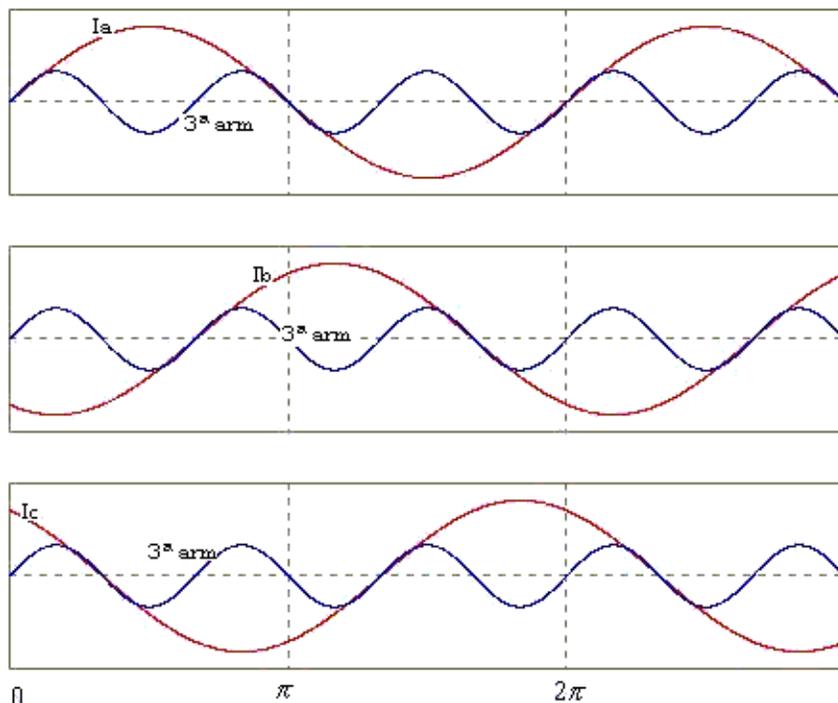


Figura 7.4

## Capítulo 7 Armónicos: Origen y Solución

Si tenemos cargas desequilibradas y además con distorsión, la corriente por el conductor neutro será mucho mayor de lo normal. La consecuencia inmediata de esto es el calentamiento excesivo en el conductor, además aumenta la diferencia de potencial entre neutro y tierra.

Incrementando la sección del conductor neutro se reduce la impedancia del conductor minimizando el nocivo efecto de los armónicos. Utilizando conductores en paralelo también es una solución útil.

### Reducción de carga en transformadores

Cuando un transformador alimenta consumos no lineales se pierde eficiencia ya que la máquina sufre pérdidas adicionales ocasionadas por las componentes armónicas. Estas se asocian con las corrientes parásitas e histéresis en el núcleo, además de las pérdidas por efecto Skin en los devanados debido a la frecuencia elevada de los armónicos. El resultado de todo esto es un calentamiento excesivo y pérdida de aislamiento en los devanados.

Para resolver el problema que causan los armónicos, se puede trabajar con el transformador a una capacidad inferior de su valor nominal. Expertos estiman que un transformador funcionando a un 60% de su capacidad nominal reduce el efecto de cualquier corriente con armónicos.

Si no es posible reducir la carga del transformador se puede instalar otro conectado en paralelo o simplemente cambiarlo por uno de mayor capacidad.

### Transformadores con factor K

Estos transformadores tienen ciertas cualidades especiales, ya que su construcción difiere de los transformadores comunes. Están diseñados para operar con señales contaminadas y a plena capacidad. Algunas características constructivas son: Devanado primario con conductor ampliado, para soportar las corrientes armónicas, doble sección del conductor neutro en el secundario para tolerar armónicos de secuencia cero. El diseño del núcleo magnético con una menor densidad de flujo usando mayores grados de hierro, además se utiliza conductores con mejor aislación en el secundario y puestos en forma paralela y transpuesta con el fin de reducir el calentamiento.

*Cálculo del factor K.*

Se requiere un método para incorporar las magnitudes de carga desde un análisis armónico determinado o bien desde el contenido armónico de una corriente en particular. Para desclasificar la capacidad nominal de un transformador se ha desarrollado una ecuación para obtener el factor k adecuado:

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{h^2 \cdot I_h^2}{I_{rms}^2} \dots\dots\dots(7.1)$$

$$I_{m\acute{a}x} \text{ (pu)} = \sqrt{\frac{1.15}{1 + 0.15 \cdot K}} \dots\dots\dots(7.2)$$

Donde:

$I_h$  = Corriente armónica (valor máximo)

$h$  = Número del armónico

$I_{rms}$  = Corriente efectiva total

$I_{m\acute{a}x}$  (pu) = Corriente máx que podría circular por el transformador expresada en por unidad.

Ejemplo:

Tenemos un transformador que alimenta una carga no lineal, el espectro armónico de la corriente se muestra a continuación:

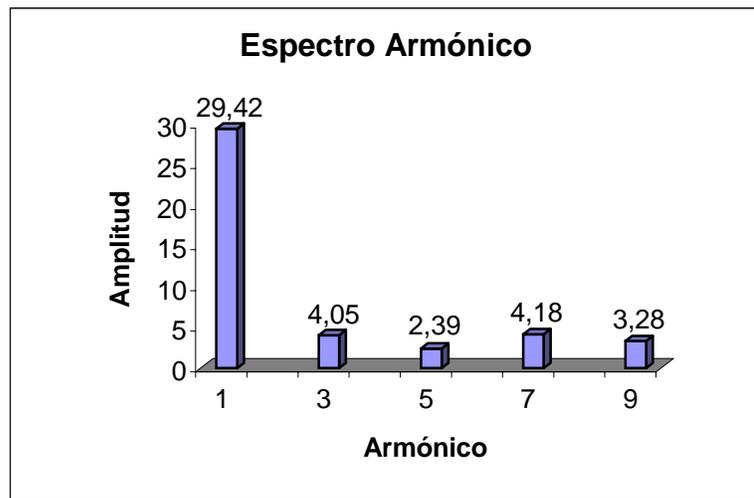


Figura 7.5

Así calculando la corriente rms:

$$I_{rms} \approx \sqrt{\frac{29.42^2}{2} + \frac{4.05^2}{2} + \frac{2.39^2}{2} + \frac{4.18^2}{2} + \frac{3.28^2}{2}}$$

$$I_{rms} \approx 21.4(A)$$

$$K = \frac{1^2 * 29.42^2}{21.4^2} + \frac{3^2 * 4.05^2}{21.4^2} + \frac{5^2 * 2.39^2}{21.4^2} + \frac{7^2 * 4.18^2}{21.4^2} + \frac{9^2 * 3.28^2}{21.4^2}$$

$$K = 1.889 + 0.32234 + 0.3118 + 1.869 + 1.903$$

$$K = 6.295$$

$$I_{m\acute{a}x} (pu) = \sqrt{\frac{1.15}{1 + 0.15 \cdot 6.295}}$$

$$I_{m\acute{a}x} (pu) = 0.769$$

Debemos utilizar el transformador a un 76.9% de la capacidad nominal cuando alimenta una carga con las características tratadas.

*Observación: El cálculo del factor K debe realizarse con la mayor cantidad de armónicos posible, ya que si sólo utilizamos los primeros armónicos presentes en la corriente, la capacidad permitida calculada será mayor y podemos sufrir de todos modos el efecto de los armónicos.*

Es importante que el cálculo del factor k sea correcto ya que un factor k excesivo crea problemas similares al sobredimensionamiento de transformadores. Cuando se utiliza un transformador de gran capacidad, su impedancia es reducida y esto implica corrientes de gran magnitud en caso de cortocircuito, obligando a los componentes de la instalación tener la capacidad de soportar la condición de falla.

Otro inconveniente del transformador con factor K, es que sólo es aplicable a las cargas que poseen el contenido armónico con el cual se calcula. Si se cambia el tipo de carga o se agregan nuevos consumos contaminantes, el transformador nuevamente presentará efectos provocados por la distorsión armónica.

Cuando se encuentran transformadores con el factor K se denominan por: K-1,K-4,K-9, K-13,K-20,K-30,K-40. Cada uno de ellos indica un nivel de distorsión que pueden soportar sin sobrecalentarse; K-1 significa que el transformador es de tipo convencional, preparado sólo para las pérdidas de corrientes parásitas y las que se originan para la frecuencia de trabajo nominal, un factor K-40 nos dice que el transformador puede alimentar cargas con gran distorsión sin sufrir percance alguno.

### Armónicos en redes de distribución

En un sistema de distribución podemos encontrar múltiples tipos de consumo, cargas lineales y no lineales. Cuando un transformador alimenta carga no lineales, se producen perturbaciones en el voltaje de alimentación que perjudican también a las cargas no contaminantes.

Las corrientes armónicas demandadas por las cargas provocan un voltaje armónico en la impedancia del transformador o el conductor alimentador. Si tenemos una corriente armónica de 5(A) sobre una impedancia de  $0.1\Omega$ , existirá un voltaje armónico de 0.5(v). Estos voltajes armónicos afectan la calidad del servicio en el sistema de distribución.

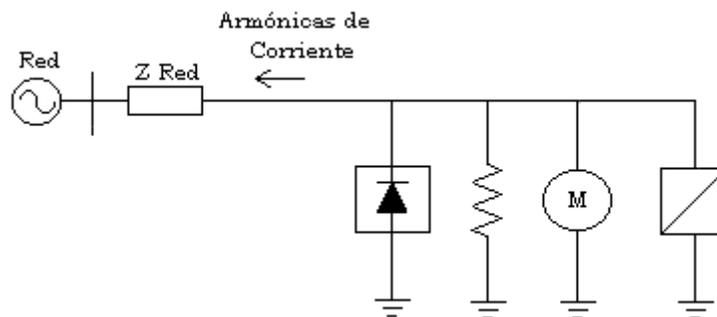


Figura 7.6

Algunos efectos sobre el voltaje de alimentación pueden ser que la señal original adopta forma de onda senoidal con “punta plana”, esto causa problemas en los circuitos que alimentan redes computacionales, provocando en algunos casos un mal funcionamiento en los equipos cuya fuente de alimentación está compuesta por sistemas rectificadores de tipo diodo-condensador que dependen del valor máximo de la señal de entrada.

A continuación se muestran algunas irregularidades en el voltaje provocadas por cargas no lineales.

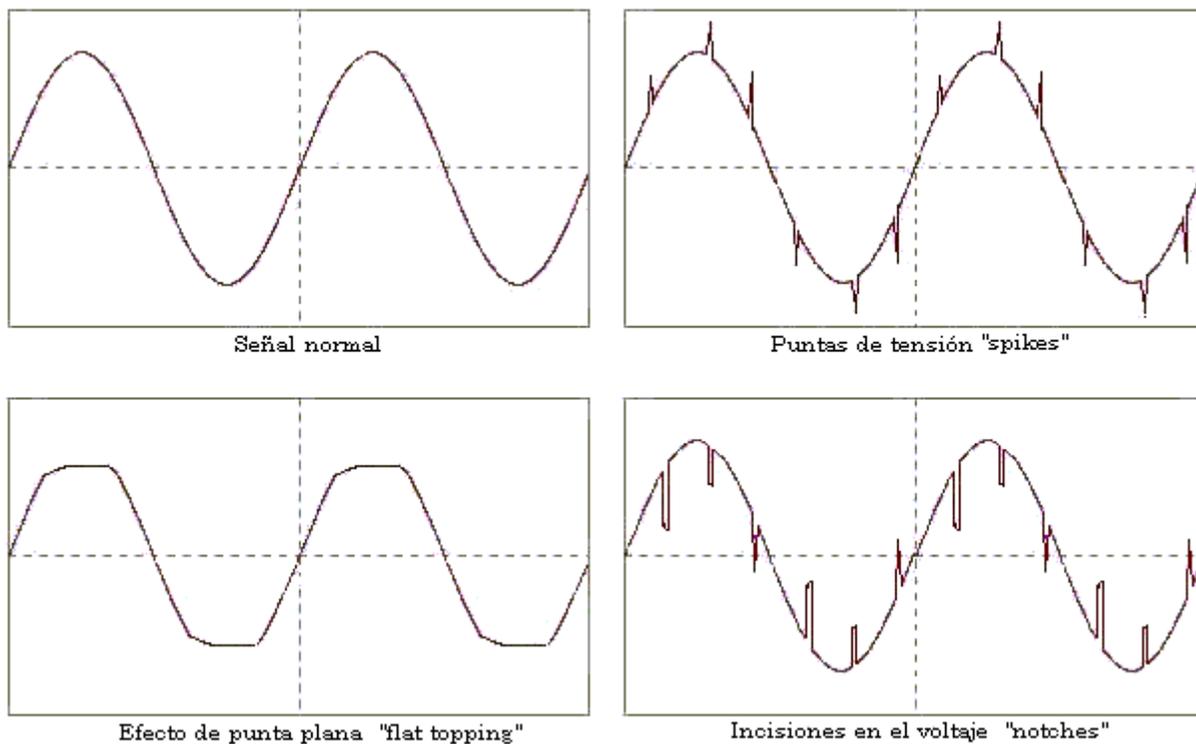


Figura 7.7

### Notches en la señal de voltaje

Se producen ciertas irregularidades en la señal de voltaje de red por causa de la distorsión armónica, una de estas es la aparición de incisiones en la señal sinusoidal denominados “notches”. Comúnmente se producen cuando se alimentan circuitos compuestos por diodos controlados. Cuando se produce la conmutación pueden haber diodos simultáneamente en estado de conducción y por un pequeño lapso de tiempo se presenta un cortocircuito que reduce drásticamente la tensión de entrada. Los cortes en la señal pueden aparecer en distintos ángulos, dependiendo del tipo de control que tenga el convertidor.

En algunos casos el voltaje puede caer a valor cero o bien cambiar de polaridad. Durante un ciclo normal de una señal sinusoidal tenemos dos cruces por cero. Algunos aparatos electrónicos están diseñados para accionar cuando detectan un cruce por cero, otros elementos utilizan la señal para regular un temporizador interno. También algunos sistemas de control utilizan los cruces por cero para determinar los pulsos de disparo en diodos controlados, si existen diferentes convertidores en un mismo sistema, pueden afectarse entre sí.

## Capítulo 7 Armónicos: Origen y Solución

Para eliminar este fenómeno se requiere que el elemento causante sea aislado de otros equipos sensibles en un mismo sistema de distribución. El método más sencillo es utilizar transformadores de aislamiento o bien reactores de línea. Cuando el sistema de distribución tiene baja impedancia (sistema robusto) el efecto de los notches no será severo, en sistemas de gran impedancia el caso será grave y existen mayores posibilidades de afectar otros equipos.

### Efectos en máquinas rotatorias

En ambientes industriales también afecta los motores de inducción por la presencia de armónicos de secuencia negativa ( $5^\circ$ ,  $11^\circ$  etc.). Como se analizó en el capítulo de inversores, un motor alimentado por convertidores de estado sólido está expuesto a una tensión no sinusoidal, con distintos grados de distorsión dependiendo del tipo de convertidor. La presencia de armónicos de secuencia negativa provoca torques opuestos al torque producido por la señal fundamental y esto se refleja en pérdidas adicionales que afectan el rendimiento y la vida útil de la máquina. No sólo los motores controlados por elementos semiconductores pueden presentar problemas, ya que si un sistema de distribución tiene problemas de distorsión armónica afectará a las demás cargas entre ellas las máquinas que no reciben una tensión sinusoidal para funcionar.

### Efecto sobre bancos de condensadores

Los condensadores que corrigen el factor de potencia pueden formar circuitos resonantes con las partes inductivas del sistema de distribución cuando las armónicas de voltaje caen en sintonía con el grupo LC. Al producirse este efecto la componente de armónica de corriente incrementa su valor en forma considerable sobrecargando los condensadores y muy probable que las protecciones del banco operen. Si las protecciones actúan y desconectan los condensadores, el efecto resonante desaparece.

Para evitar este problema existen condensadores antiresonantes que tienen una reactancia conectada en serie con el capacitor para modificar la frecuencia en la cual se alcanza la resonancia.

## 7.4 Filtro de armónicos

La solución más efectiva es la aplicación de filtros entre la fuente de alimentación y la carga. Con este método se minimizan las componentes armónicas y se elimina el problema de raíz. Básicamente existen dos tipos de filtros; pasivos y activos.

### *Filtros Pasivos*

Los filtros pasivos se forman con elementos reactivos (bobinas y condensadores) que están conectados en paralelo con la carga. La idea es que los elementos instalados entre en resonancia a la frecuencia del armónico que queremos eliminar, así la componente indeseada encontrará una rama de mínima impedancia y se irá a tierra. Para la frecuencia fundamental el filtro debe tener una impedancia de gran valor, con el fin de no incrementar demasiado la corriente adicional provocada por este nuevo elemento.

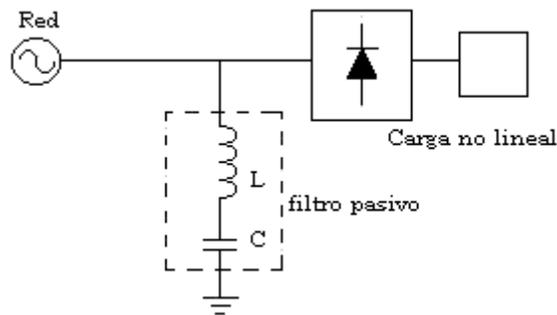


Figura 7.8

Este tipo de filtro tiene cualidades como son: simplicidad, fiabilidad y robustez, también posee múltiples desventajas, como son el gran tamaño de bobinas y condensadores necesarios, pobre respuesta dinámica ante cambios de carga, influencia de la impedancia de red en el filtrado, además es posible sintonizar el filtro para la eliminación de un sólo armónico.

*Filtros Activos*

Están compuestos por elementos pasivos y transistores controlados, son capaces de eliminar prácticamente todos los armónicos de baja frecuencia y no tienen los inconvenientes de los filtros pasivos.

Los filtros activos pueden ser conectados en serie o en paralelo. Los filtros serie actúan como fuente de voltaje, proporcionan una alta impedancia para los armónicos e impedancia reducida para la frecuencia de la red. Los filtros activos en paralelo, actúan como fuente de corriente en paralelo con la carga, inyectando o absorbiendo corriente según sea necesario.

Existe la posibilidad de combinar filtro activo y pasivo, formando un filtro híbrido.

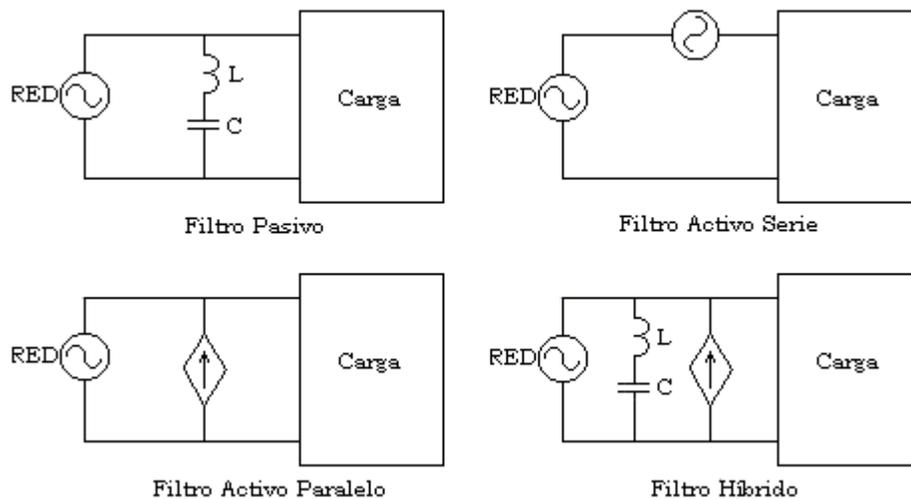


Figura 7.9

Entre los filtros activos podemos analizar los siguientes:

- Reductor de Armónicos CC.
- Reductor de Armónicos CA
- Reductor de Armónicos Trifásico

Reductor de armónicos CC (Harmonic reducer DC)

Este convertidor se conecta en paralelo con la carga, como se muestra en la siguiente figura.

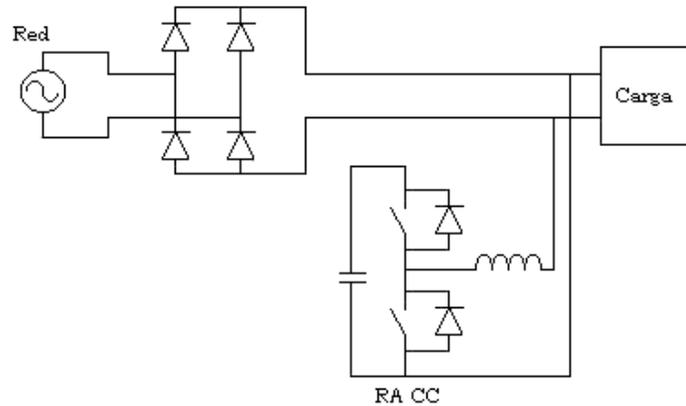


Figura 7.10

En esta configuración el filtro actúa como fuente de corriente, la tensión del condensador debe ser mayor a la tensión máxima de entrada.

Los transistores se controlan de manera tal que la corriente sea senoidal, para que el RA inyecte corriente se cerrará el switch superior y se impulsará una corriente creciente ya que el voltaje del condensador es mayor a la tensión de red. Cuando queremos que la corriente disminuya, cerramos el interruptor inferior. Así la corriente sigue una referencia senoidal gracias al control de los transistores.

Reductor de Armónicos CA

Se conecta en el lado de alterna. Básicamente funciona igual que el RA CC, pero tiene dos interruptores adicionales para controlar las tensiones negativas.

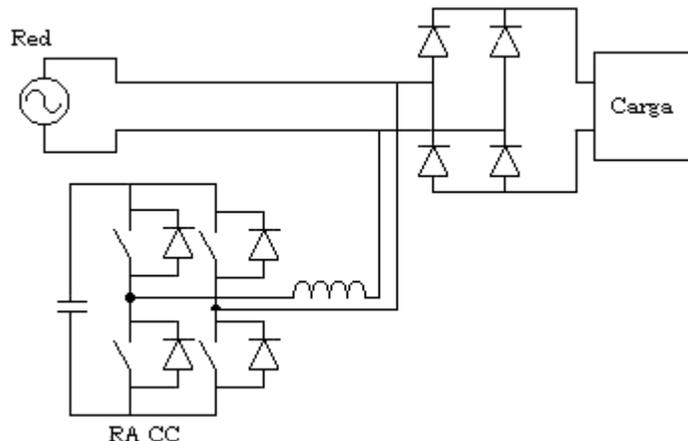


Figura 7.11

### Reductor Armónico Trifásico

El convertidor se conecta en paralelo con la red, logra que la corriente de red sea sinusoidal, además tiene la capacidad de corregir factor de potencia anulando la componente reactiva que entrega la red, también puede balancear la carga de las fases en caso de alimentas un consumo desequilibrado.

Existen muchas topologías posibles, se estudiará la configuración tipo puente inversor trifásico con conexión de neutro.

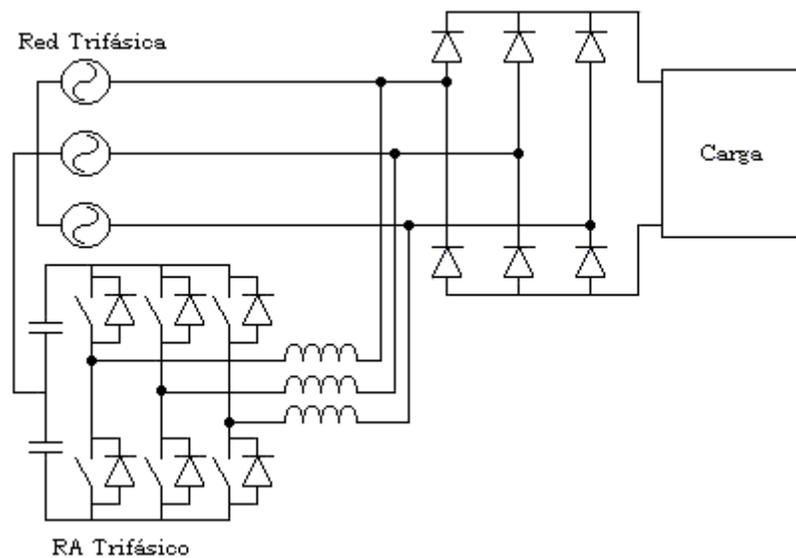


Figura 7.12

El funcionamiento es muy sencillo debido a que cada rama del RA se controla en forma independiente ya que existe un punto común con la red en el neutro. Se genera una señal de referencia senoidal para cada fase desplazadas  $120^\circ$ , logrando que la corriente de red siga esta referencia. La tensión de cada condensador debe ser mayor al voltaje máximo entre fase y neutro de la red.

Para inyectar corriente a la red, se debe cerrar los transistores superiores, así el voltaje en el condensador formará un circuito con la bobina correspondiente y existirá una corriente creciente hacia el sistema. Para reducir la inyección de corriente se debe cerrar el transistor inferior y la bobina recibe ahora un voltaje opuesto.