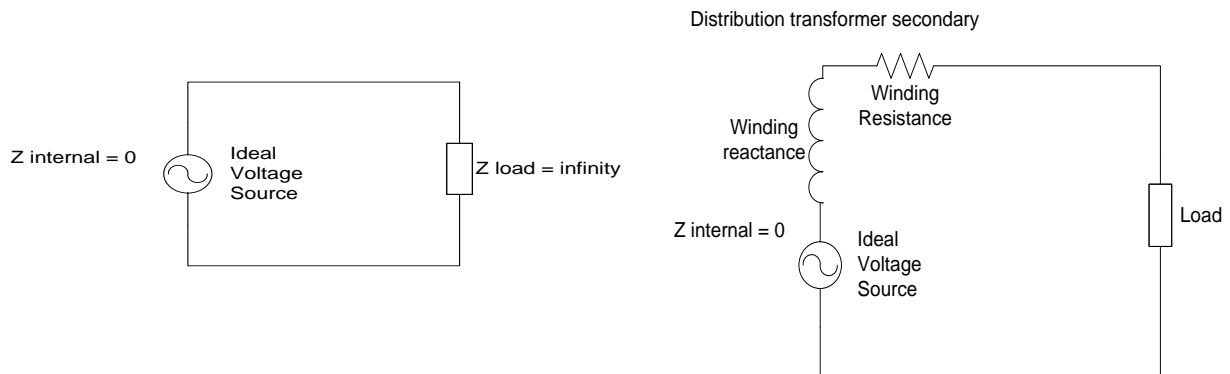


## Generalidades sobre Corrientes Armónicas en Sistemas de Potencia con CFP con Capacitores

Es de común aceptación que las Empresas de Utilidad Publica generan una onda de voltaje casi perfectamente sinusoidal. En la mayoría de las regiones el voltaje de los sistemas de distribución tiene una muy pequeña distorsión. Sin embargo, sin nos acercamos cada vez mas hacia las cargas, la distorsión de voltaje aumenta en forma notoria. La Empresa de Utilidad Publica, representada para el cliente como el Transformador de Distribución de Potencia es la fuente mas común de potencia para la industria. Este tipo de fuente de potencia es en realidad una fuente de voltaje y su objetivo principal es mantener un voltaje estable en los terminales secundarios del transformador. La impedancia de la carga debe ser mucho mas alta que la impedancia interna del transformador. Idealmente, la impedancia interna del transformador debiera ser cero. En la práctica, la impedancia interna del transformador varía entre el 5%-7% del valor a plena carga, debido a la reactancia de dispersión entre las bobinas, la resistencia óhmica de ellas y las pérdidas parásitas.



**figura 1 - fuente de Voltaje Ideal versus una fuente de Voltaje Real**

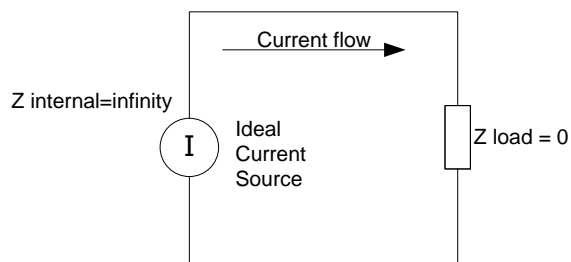
La calidad de la sinusoide de voltaje de un *transformador sin carga* depende de la calidad de la fuente de generación y de la interferencia que pueda tener con otras ramas del sistema de distribución.

Analizaremos un caso teórico, donde la potencia es generada exclusivamente por un transformador de distribución y el voltaje es una onda sinusoidal pura. En este caso, cualquier carga conectada en el secundario del transformador verá solo una sinusoide pura de voltaje y la corriente pedida al sistema estará determinada solo por el valor de su impedancia.

Cuando la impedancia de la carga es lineal (no cambia durante un ciclo de la red), la forma de onda de la corriente seguirá muy cercanamente a la forma de onda del voltaje. Si la impedancia de la carga cambia periódicamente, debido a cortes (chopping) o cualquier otra operación no lineal, la forma de onda de la corriente puede diferir notablemente de la onda sinusoidal del voltaje.

Esta onda de corriente distorsionada, no sinusoidal, puede ser expresada como la sumatoria de ondas sinusoidales puras, de las cuales el primer componente es la frecuencia nominal y las otras ondas son números enteros de la frecuencia básica o fundamental. Cada múltiplo es llamado como una *armónica de la onda fundamental*. Todas las componentes (incluyendo la frecuencia fundamental) son denominadas simplemente como armónicas.

Las corrientes armónicas son creadas por cargas no lineales. Su frecuencia (numero de la armónica) y magnitud estarán determinadas por la naturaleza de la operación de la carga. Por ejemplo, la mayoría de convertidores de CC tienen rectificadores de seis pulsos los cuales generan mayormente armónicas del orden 5a y 7a. La armónica 5a tiene una frecuencia cinco veces mas rápida que la corriente básica o fundamental y la 7a, es siete mas rápida. Cada armónica es ahora una fuente de potencia a una frecuencia mayor. Debido a que las armónicas son creadas como corrientes, este tipo de fuente de potencia es una fente de corriente.

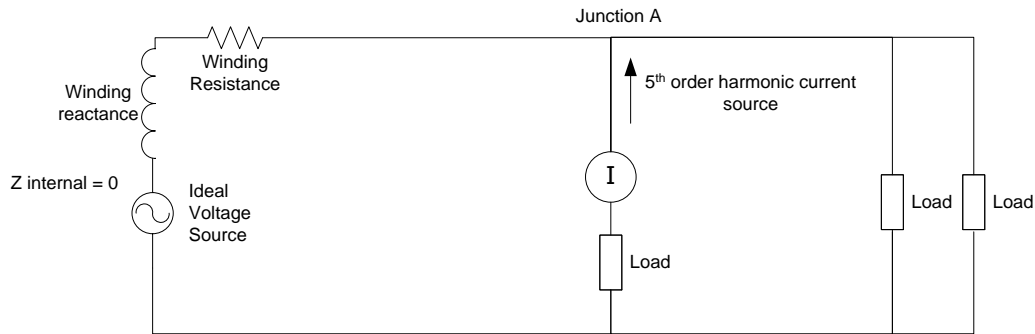


Al contrario de la fuente de voltaje, la fuente de corriente ideal tiene una impedancia interna infinita y por lo tanto prefiere circular por cargas con impedancias igual a cero, con el objetivo de para mantener estable la corriente.

**Figura 2 - Fuente Ideal**

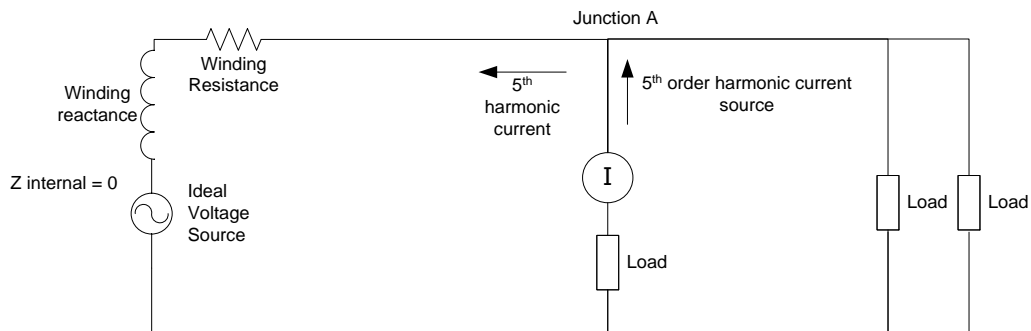
**de corriente**

La carga no lineal puede ser descompuesta en una carga lineal y una(s) fuente(s) de corriente(s) de alta frecuencia. Para simplificar, consideraremos una situación donde esta conectada una carga no lineal que genera solo corriente de 5a armónica.



**figura 3 - Diagrama unilineal de una planta que tiene una carga que genera 5ª armónica.**

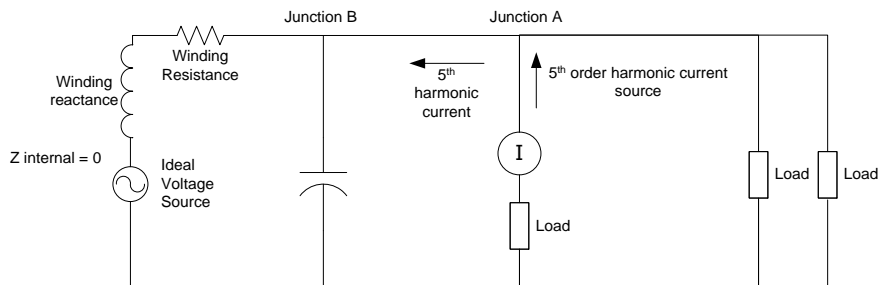
La corriente de 5a armónica esta representada como una fuente de corriente y es una parte de los elementos operativos del sistema. Esta armónica de corriente es introducida a la red en el punto de conexión A. En este punto, la corriente escogerá para circular el camino que represente la menor impedancia para ella. La impedancia de la izquierda esta compuesta por la impedancia interna del transformador de distribución y la impedancia de la línea. La impedancia total del lado izquierdo del circuito es mucho menor que las impedancias de las cargas del lado derecho. Por lo tanto, la mayor parte de la corriente armónica circulara hacia el transformador de distribución.



**figura 4 - el circuito de la 5a armónica**

Esta corriente, circulando a través de las impedancias de la línea y del transformador generara fluctuaciones del mismo orden de frecuencia en la sinusoide de voltaje. Estos serán los armónicos de voltaje. Además, esta corriente circulando por el secundario del transformador, inducirá armónicas en el lado primario, o sea, hacia la Empresa de Utilidad Publica. En todo caso, estas fluctuaciones serán relativamente pequeñas.

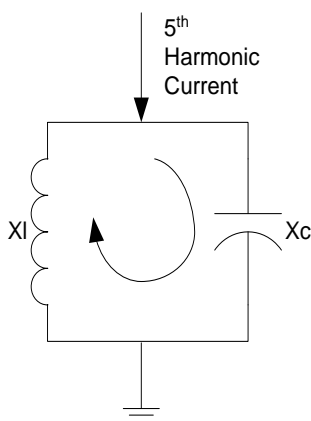
Ahora, asumamos que nuestra planta requiere corregir el factor de potencia debido a un bajo factor de potencia a la frecuencia fundamental o nominal. Por lo tanto, un banco de capacitores (CFP), correctores del factor se conecta al circuito para corregir esta situación.



**figura 5- agregando un banco CFP**

La corriente armónica que circula hacia la conexión B encuentra un circuito paralelo con una rama que el capacitor y otra rama que incluye una resistencia y una reactancia en serie. La parte resistiva es despreciable en la mayoría de los casos por lo que, básicamente, el circuito queda convertido en un circuito resonante paralelo para la corriente de 5a armónica.

En el caso de que  $X_L$  sea igual a  $X_C$ , tendremos un circuito resonante en paralelo.



**figura 6 - resonancia paralela**

La resonancia paralelo incrementa hasta dramáticamente la impedancia del circuito, valores infinitos. La corriente queda circulando entre el capacitor y la inductancia, sin pasar al terminal de tierra. Con una resonancia paralela o muy cercana a ella, el circuito del CFP capacitivo y el transformador representa una alta impedancia a la corriente de la frecuencia armónica. El camino anterior, a partir del punto de conexión A, ya no es más el de menor impedancia para esta corriente armónica. En condición de resonancia paralela, la corriente armónica esta forzada a circular hacia el lado de la planta.

Como la impedancia del circuito se ha incrementado dramáticamente, también el voltaje armónico se incrementa en la misma proporción. La resonancia paralelo entre el banco CFP y los devanados del transformador es una situación extremadamente peligrosa para todo el sistema eléctrico. Esta situación puede causar graves danos a la infraestructura eléctrica. Normalmente, el punto mas débil, que es el banco CFP, será el primero en fallar. El banco CFP no será capaz de soportar las altas corrientes armónicas que están circulando entre el banco CFP y el transformador de distribución. En unos pocos casos, cuando los capacitores resisten las corrientes armónicas, las consecuencias pueden ser mucho mas costosas. En esta situación, el transformador de distribución o algunas de las cargas pueden ser dañados en forma irreparable.

El banco CFP tiene una impedancia lineal. El no genera armónicos. Sin embargo, siempre cambia la respuesta a la frecuencia del circuito. Sin tomar en consideración el aspecto de la resonancia paralela, el banco CFP puede incrementar o filtrar en el sistema las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales.

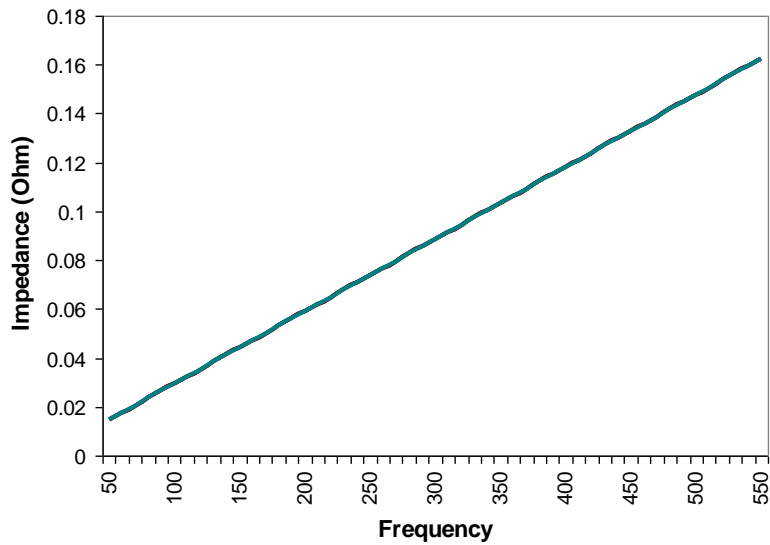
La condicion de resonancia esta determinada por la capacidad total (una capacidad total  $XC$ ), influenciada por el numero de capacitores conectados y la impedancia inductiva del sistema. Una pequeña fuente de corriente armónica puede ser suficiente para generar una distorsión de voltaje notable y potencialmente ser causa de danos potenciales al sistema eléctrico.

Con el fin de prevenir una resonancia paralelo, Elspec y otros fabricantes de bancos CFP recomiendan firmemente el uso de bancos CFP desintonizados, como la configuración estándar en la aplicación de bancos de CFP.

Demostraremos la aplicación de esta solución en un sistema de una planta de las siguientes características:

1. Transformador 1 000 kVA con 7% de impedancia
2. Banco de Capacitores 6 pasos de 100 kVAr a 400 V, 50 Hz
3. La Empresa de Utilidad Publica genera exclusivamente para el transformador de la planta.

En el caso de que los capacitores no estén conectados, la impedancia del sistema sigue la respuesta pura de la frecuencia de la inductancia.

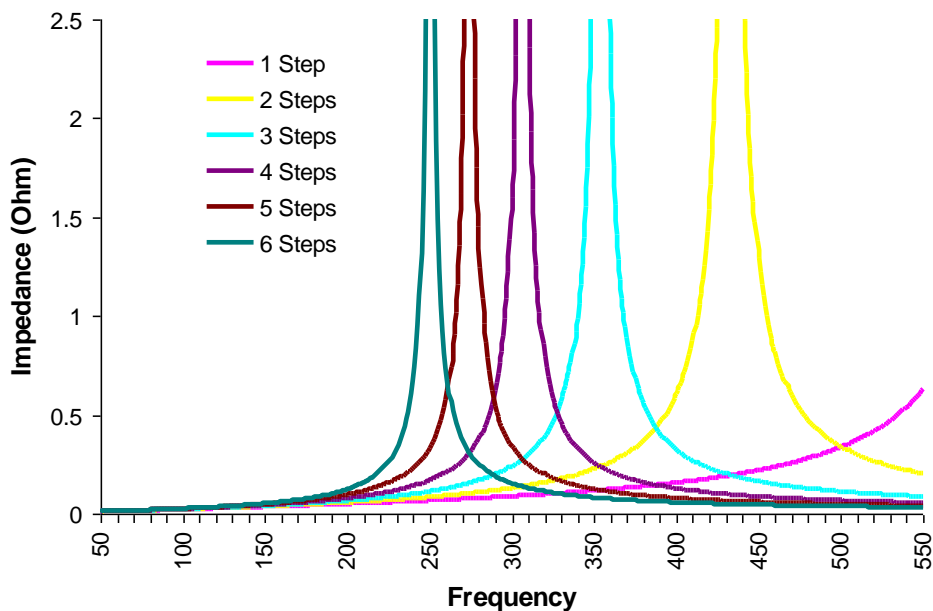


*figura 7- inductancia pura en un sistema sin capacitores*

La impedancia, desde el punto de vista de las fuentes de armónicos, es lineal. Empieza de un valor cercano a 0.02  $\Omega$  para 50 Hz y sube linealmente hasta 0.16  $\Omega$  a 550 Hz (H11).

**Nota:** estos valores son validos solo para este caso especifico.

Ahora, conectamos los capacitores;

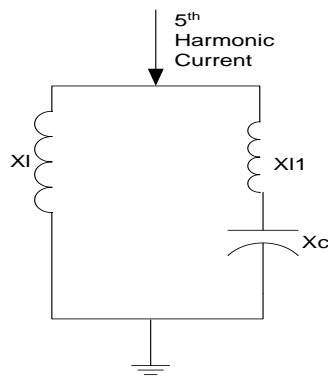


*figura 8 - Impedancia del sistema con los capacitores conectados*

La impedancia del sistema ha cambiado dramáticamente. Se observan unos pocos puntos de resonancia paralela pura, dependiendo del numero de capacitores conectados.

Por ejemplo, existe una condicion de resonancia pura a 250 Hz (H5) cuando todos los seis grupos de 100 kVAR están conectados. Las polleras de los gráficos de resonancia no son muy abruptas por lo que aun en puntos fuera del área de resonancia pura, la impedancia se ve incrementada significativamente. Cuando se conectan solamente 5 grupos capacitores a esa frecuencia (H5), ocurrirá aun una mayor perturbación en el sistema ya que la impedancia del sistema se vera incrementada de 0.06  $\Omega$  hasta 0.40  $\Omega$  (casi 7 veces mayor!)

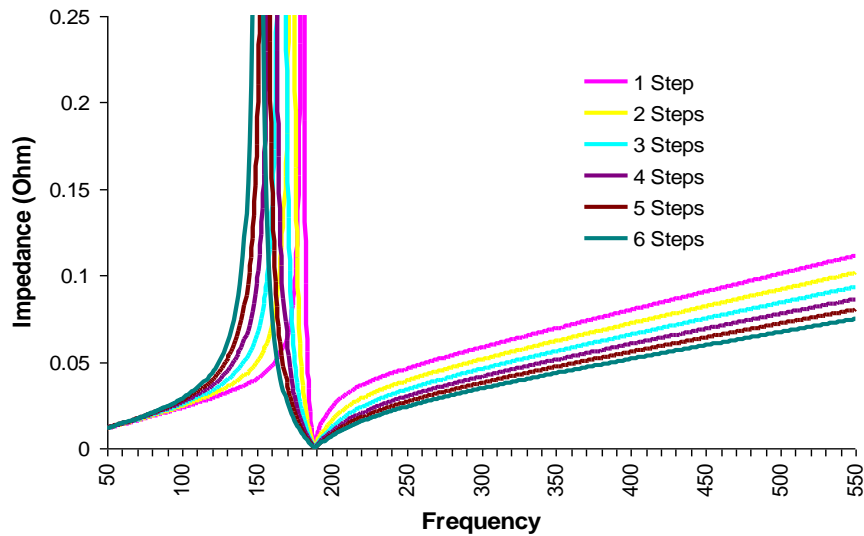
Si queremos crear una mayor perturbación, solo es necesario tener una condicion de resonancia paralelo en cualquier parte del área cubierta por las fuentes de frecuencias armónicas.



Dondequiera que se utilicen capacitores para la corrección del FP, habrá una frecuencia donde el circuito entrara en resonancia (resonancia paralelo). La única forma de prevenir la ocurrencia de una resonancia paralelo es asegurarse de que la frecuencia de resonancia quede localizada en el área de frecuencia donde no exista inyección de fuentes armónicas. Esto puede ser logrado agregando reactores en serie con los capacitores del banco CFP. Esta es el principio fundamental detrás de la configuración con bancos CFP desintonizados.

**figura 9 - agregando un reactor desintonizado**

La frecuencia de sintonía, en este caso, es la frecuencia de la resonancia serie entre el reactor desintonizado (XL1) y el capacitor (XC). Esta frecuencia es siempre mayor que la frecuencia de la resonancia paralelo. La solución mas popular para desintonizar el circuito es utilizar reactores de 7% en serie con los capacitores. El factor 7% significa que la inductancia del reactor a la frecuencia fundamental (50 Hz en nuestro caso) es 7% de la impedancia de los capacitores a la misma frecuencia. Los reactores de 7% resonaran en serie con los capacitores a una frecuencia de 189 HZ, lo que significa una impedancia cero en la rama reactor-capacitor a esa frecuencia. Desde esta frecuencia y hacia arriba, el reactor deviene mas dominante y por lo tanto la impedancia de esa rama se incrementa, siguiendo la forma de respuesta de frecuencia del reactor.

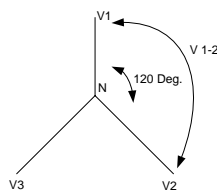


*figura 10 - impedancia de un sistema con capacitores y reactores de 7%*

La resonancia paralelo no puede ser evitada. Solo podemos desplazarla aguas debajo de la frecuencia. La frecuencia de la resonancia paralelo aun depende del numero de capacitores conectados, pero ahora debe ser menor que el punto de resonancia serie (189 Hz). La frecuencia de sintonía se elige normalmente mas baja que la frecuencia de cualquier fuente de armónicas. Las únicas fuentes potenciales de resonancia bajo los 189 Hz son H2 y H3. Normalmente H2 (100 Hz) no existe ya que es una armónica par. Las armónicas pares son generadas solamente por cargas no simétricas. La mayoría de las aplicaciones de potencia eléctrica son aplicaciones simétricas que generan solo armónicas impares y por lo tanto H2, así como también H4, H6, ... no están presentes en los sistemas industriales.

H3, que en nuestro caso cae directamente en la respuesta de frecuencia paralelo, es también un caso especial.

La frecuencia de H3 es tres veces mas rápida que la frecuencia fundamental (50 Hz). Cuando H3 existe en el circuito fase-neutro de voltaje y corriente, la representación fase-fase será la siguiente:



$$V_{1(H3)} = A_1 \times \sin(3 \times \omega \times t + 3 \times 0)$$

$$V_{2(H3)} = A_2 \times \sin(3 \times \omega \times t + 3 \times 120)$$

$$V_{1-2(H3)} = A_1 \times \sin(3 \times \omega \times t + 3 \times 0) - A_2 \sin(3 \times \omega \times t + 3 \times 120)$$

Ya que  $3 \times 120 = 360$  grados que es lo mismo que 0 grados, en los casos donde  $A_1 = A_2$   
 $V_{1-2} = 0 !!!$

Esto significa que cuando H3 esta balanceada (magnitudes similares:  $A_1 = A_2 = A_3$ ) y los capacitores están conectados en Delta, H3 se anula por si sola en los terminales de la carga. El mismo comportamiento se aplica a todas las armónicas triplen, o sea, múltiplos impares de tres, H3, H9, H15, ...

En la mayoría de los casos H3 esta balanceada y la configuración de conexión de los capacitores esta en Delta y por lo tanto H3 es invisible para los capacitores y no pueden crear una condición de resonancia paralela.

Los reactores de 6%-7% es la solución de uso mas popular para bancos de capacitores conectados en Delta. Para sistemas de capacitores monofásicos y para los casos donde H3 no esta compensada o balanceada, la frecuencia de sintonía debe estar bajo los 150 Hz.

## **Sumario**

Los bancos capacitivos correctores del Factor de Potencia (CFP) *siempre cambian la impedancia del sistema para todas las fuentes armónicas*. La impedancia final depende directamente del número de capacitores conectados (pasos conectados) y del punto de sintonía de los reactores.

La correcta selección de la curva de impedancia es la clave para impedir problemas con corrientes armónicas, principalmente, de resonancia paralela.