

## LOS EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS y SUS SOLUCIONES

### Los armónicos provocan una baja calidad en el suministro de la energía eléctrica

Se ha observado un elevado nivel de corrientes armónicas múltiples impares de la fundamental de 60 Hz en los sistemas de distribución eléctrica, que se debe a la amplia difusión de reguladores de velocidad para motores, ordenadores personales y fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS). Otros equipos habitualmente generadores de armónicos son las lámparas de descarga, los circuitos rectificadores y los transformadores sobreexcitados.

Estas cargas no lineales no se ajustan a la marcha de las corrientes senoidales de las fuentes de suministro de corriente alterna. Por el contrario, recorren estas cargas escarpados pulsos de corriente, típicos de los rectificadores corriente alterna /corriente continua. Estas ondas de trazado no senoidal están constituidas por la suma de muchas componentes de más elevada frecuencia que son a las que se denomina corrientes armónicas”, como muestra la figura 1.

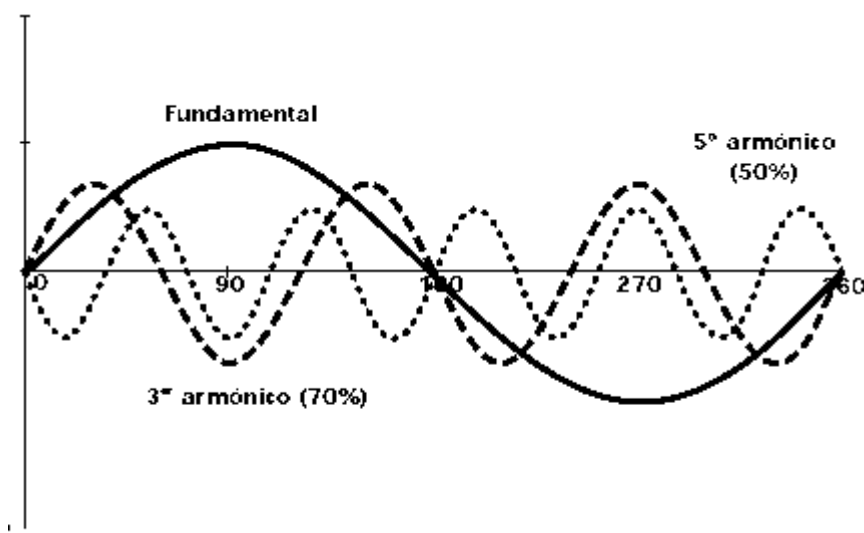


Figura 1 - Onda fundamental con 3º y 5º armónicos

Una forma de onda típica de la corriente con espectro armónico de un ordenador personal es la que se muestra en la figura 2. Las corrientes armónicas se clasifican en una de estas tres categorías: corrientes de secuencia positiva, negativa o cero. Estas últimas son las que se conocen con el nombre de armónicos triplens, cuyo orden es múltiplo de tres, como se puede observar en la tabla A.

En un sistema trifásico, con neutro distribuido a cuatro hilos, alimentado con cargas no lineales, se encuentran corrientes de secuencia armónica positiva, negativa y cero, mientras que si está distribuido a tres hilos, esto es, con el neutro no distribuido, solamente se observa la presencia de las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa.

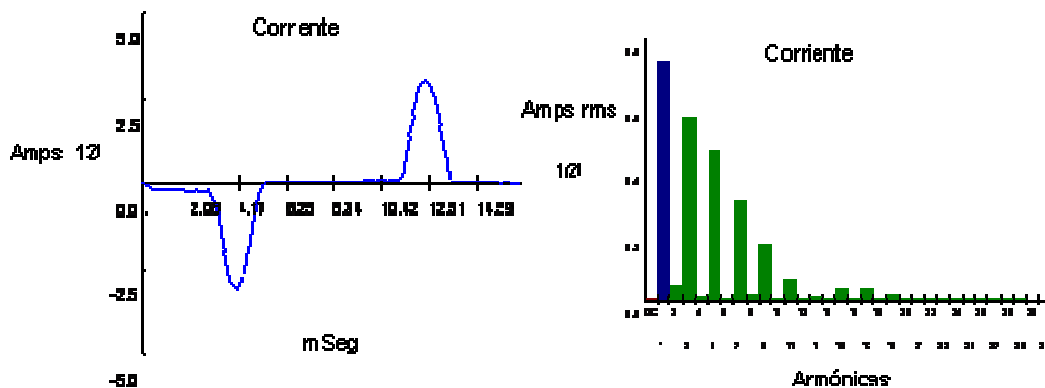


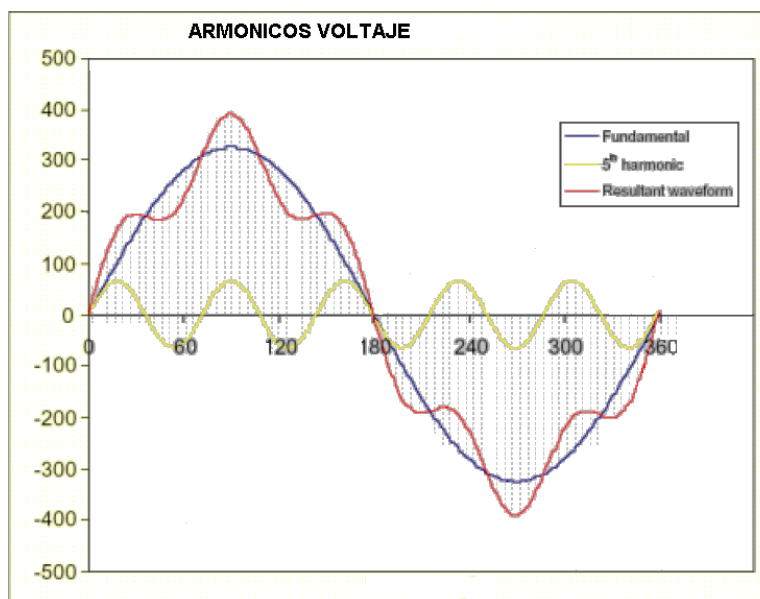
Figura 2: orma de la onda de corriente y sus armónicos, con su espectro de barra tomado de la pantalla de un analizador.

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frecuencia (	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tabla A: Órdenes de los armónicos de secuencia positiva, negativa y cero.

Las corrientes armónicas que fluyen a través de las impedancias de una red de distribución ocasionan unas caídas de tensión armónicas que distorsionan la forma de onda de tensión, como muestra la figura 3. Esta distorsión de la forma de onda es particularmente importante en los sistemas de distribución eléctrica de elevada impedancia. Esta desviación anormal de las fuentes de suministro causan disfunciones en los equipos y fallos prematuros que es lo que se denomina “**Baja calidad de la energía**”.

Figura 3: Generación de una forma de onda de tensión distorsionada.



## LAS CORRIENTES ARMÓNICAS

- **Un buen proyecto eléctrico es la clave para combatir el problema de armónicos**

Se presentan sucesos aparentemente misteriosos, que provocan costosas averías en los modernos edificios de oficinas y plantas industriales. Así, transformadores en condiciones normales de servicio que aparecen sobrecargados, conductores neutros en circuitos perfectamente equilibrados que se calientan de manera exagerada, interruptores automáticos que empiezan a saltar sin que se hayan modificado las condiciones de trabajo.

La causa de estos trastornos permanece oculta después de varios intentos de determinarla.

¿Dónde está el problema?

Se puede haber tropezado con una consecuencia de la existencia de los modernos equipos electrónicos:

### Problemas típicos ocasionados por las corrientes armónicas y sus Soluciones

#### 1 - Sobrecalentamientos de los conductores neutros

En un sistema trifásico equilibrado, con neutro distribuido, esto es, de cuatro conductores y con cargas lineales, la componente fundamental de 50 Hz de la corriente, que recorre cada una de las tres fases, se anula en el conductor neutro debido a que estas corrientes están desfasadas en el tiempo un tercio del periodo ( $120^\circ$ ) y por tanto vale cero la suma de dichas tres corrientes.

Sin embargo, si se trata de cargas monofásicas no lineales, ciertos armónicos de orden impar a los que se denomina “triplens” –múltiplos impares del tercer armónico:  $3^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $15^\circ$ , etc.– no se anulan en el neutro sino que, por el contrario, se suman en dicho conductor (figura 4).

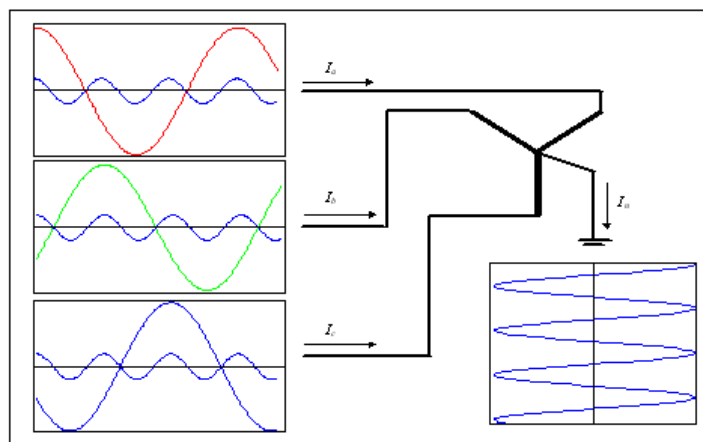


Figura 4:  
Las corrientes del tercer armónico se acumulan en el neutro.

En sistemas con muchas cargas monofásicas no lineales, la corriente del neutro puede, en la práctica, ser mayor que la corriente de cada una de las fases. El peligro que se presenta en estas circunstancias es un sobrecalentamiento excesivo del neutro, ya que no se dispone de un interruptor automático del circuito en dicho conductor, que limite la corriente, tal como ocurre con los conductores de fase. Una corriente excesiva en el neutro puede también ser causa de una diferencia de tensión excesiva entre el conductor neutro y tierra.

### Solución:

La sobrecarga de los conductores neutros puede evitarse dimensionando dichos neutros adoptando una sección suficiente que tenga en cuenta la eventual presencia de un medio ambiente eléctrico rico en armónicos. Puede ser una práctica aconsejable prever un neutro con una sección 1,7 veces mayor que la de los conductores de fase o simplemente doblar el neutro (figura 5) cuando el circuito final deba alimentar sistemas informáticos. También puede utilizarse un conductor neutro separado para cada fase. Otra alternativa para impedir el paso de los armónicos “triplens”, aguas arriba de los sistemas de suministro de corriente alterna, puede ser el empleo de transformadores de separación de circuitos con conexión triángulo-estrella.

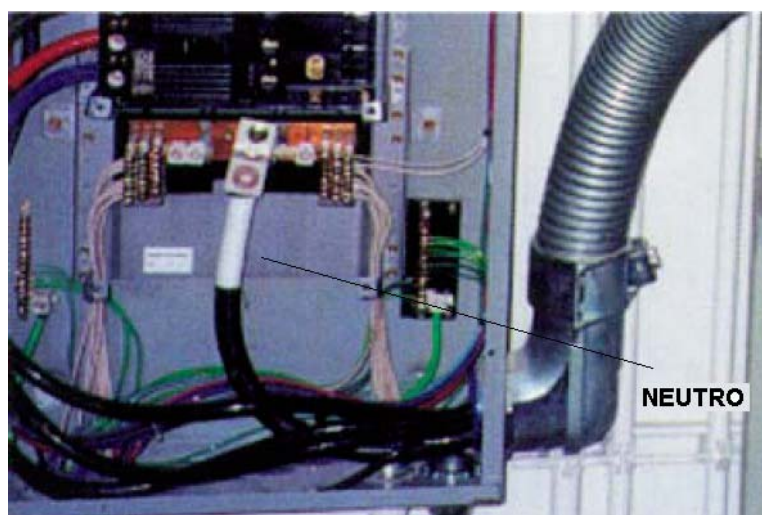


Figura 5: La sección del conductor neutro se ha ampliado al doble

## 2 – Sobrecalentamiento de los conductores y perturbaciones en los interruptores automáticos de los circuitos

La presencia de corrientes armónicas incrementa el valor eficaz de la corriente total que recorre la línea, aumentando las pérdidas y provocando calentamientos excesivos en la instalación. Por añadidura, la corriente alterna tiende a circular por la superficie exterior del conductor. Este fenómeno se conoce con el nombre de “efecto piel” y es más pronunciado en las frecuencias elevadas. El efecto piel se ignora habitualmente debido a su escasa importancia en los suministros de energía a 50 Hz. Sin embargo, por encima de los 300 Hz, esto es, en el caso del 7º armónico y superiores, el efecto piel adquiere una notable importancia provocando pérdidas adicionales y calentamientos excesivos.



Los interruptores magneto-térmicos convencionales utilizan un mecanismo que consiste en una lámina bimetálica, que se deforma con la temperatura y, por tanto, actúa de acuerdo con el calentamiento ocasionado por el paso de la corriente. Este mecanismo se ha diseñado para responder al verdadero valor eficaz de la forma de onda de la corriente y por consiguiente el efecto de calentamiento adicional ocasionado por los armónicos puede provocar disparos prematuros aparentemente inexplicables.

Un interruptor electrónico sensible al valor del pico de corriente responde al valor del pico de la forma de onda de corriente. En consecuencia, no siempre responde adecuadamente a las corrientes armónicas. Como quiera que el valor del pico de las corrientes armónicas es superior al normal, este tipo de interruptores puede dispararse prematuramente con corrientes bajas. Si el valor del pico es menor que el normal, el interruptor puede no disparar cuando debiera.

#### **Solución:**

Se deberán utilizar cables de sección superior a la indicada en los catálogos técnicos, para evitar calentamientos excesivos debidos a la presencia de armónicos, separar las cargas no lineales de las restantes cargas "limpias" y colocar cuadros e interruptores adecuados para cargas no lineales donde sea necesario.

### **3 – Sobrecaentamiento y vibraciones en los motores de inducción**

Los motores de inducción son cargas lineales que no generan corrientes armónicas cuando se alimentan con una tensión senoidal pura. Pero un motor alimentado por una tensión distorsionada sufrirá un calentamiento excesivo provocado por el efecto piel o por las corrientes de Foucault, incrementado por las elevadas frecuencias de las corrientes armónicas presentes. Además, si alguno de los armónicos es de secuencia negativa – tales como el 5º y el 11º– el campo rotatorio que generan se opone al sentido de giro del motor, reduciendo en consecuencia el par y la eficiencia del motor. Por otro lado, se generan pares pulsantes que ocasionan vibraciones mecánicas producidas por la interacción de los campos magnéticos rotatorios de los armónicos con el campo fundamental.

#### **Solución:**

Utilizar circuitos separados, para alimentar a los equipos generadores de armónicos tales como los equipos informáticos y los variadores de velocidad, de los que alimenten cargas sensibles a los armónicos tales como los motores de inducción. Es conveniente limitar la distorsión total armónica de la tensión a menos de un 5%.

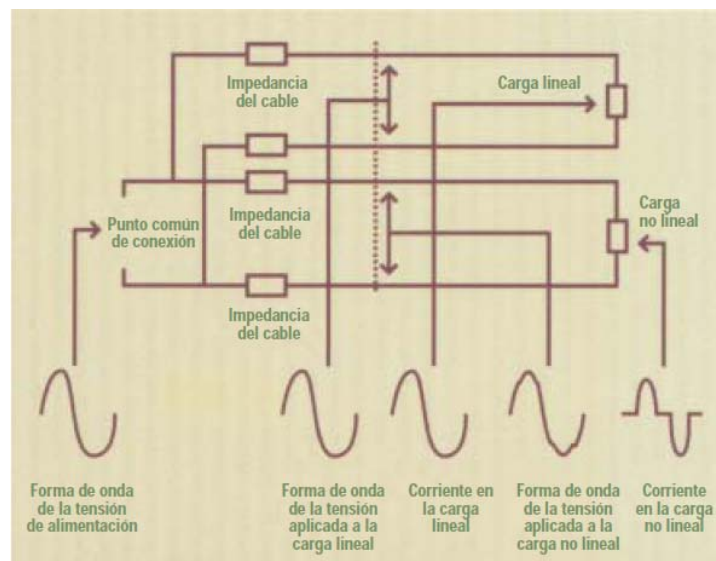


Figura 6:  
Generación de un circuito limpio de un circuito deformante.

#### 4 – Sobrecargas de los condensadores de corrección del factor de potencia

Como quiera que el valor de la reactancia de un condensador es inversamente proporcional a la frecuencia, las corrientes armónicas, de mayor frecuencia que la fundamental, circulan con más facilidad a través de los caminos de baja impedancia de los condensadores en lugar de retroceder hacia los transformadores de distribución. En consecuencia estos condensadores se sobrecargan y se calientan debido a las corrientes armónicas. Puede presentarse un problema más grave cuando los condensadores y las inductancias del sistema de distribución de energía forman un circuito paralelo resonante, con una frecuencia de resonancia próxima a una de las frecuencias armónicas presente, que sea de cierta importancia. La corriente armónica resultante puede alcanzar un valor muy elevado, sobrecargando los condensadores y quemando sus fusibles.

#### Solución:

Puede evitarse la presencia de resonancias añadiendo una inductancia (un inductor de línea) en serie con el condensador para desintonizar la frecuencia de resonancia de la respuesta característica del sistema o, alternativamente, instalar un dispositivo de corrección de la corriente reactiva (kVAR) especialmente diseñado.

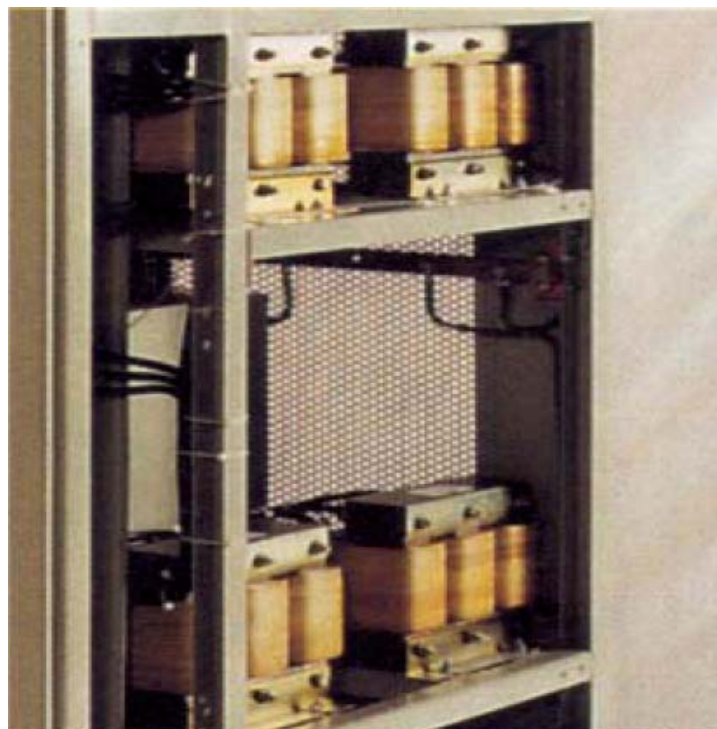


Figura 7: Inductores en el recinto de un condensador.

## 5 – Sobrecarga de los transformadores de distribución

Los armónicos afectan negativamente a los transformadores de distribución, que alimentan cargas no lineales. El aumento del valor eficaz de la corriente debido a la forma de onda distorsionada provoca pérdidas adicionales en el cobre del bobinado de las fases. Las corrientes armónicas de alta frecuencia también ocasionan pérdidas mayores en los núcleos, como consecuencia de las corrientes de Foucault, en las carcasas metálicas y en los bobinados. Estas mayores pérdidas reducen la capacidad de carga del condensador.

En un transformador triángulo-estrella, las corrientes armónicas “triplens”, que se suman algebraicamente en el neutro del bobinado del secundario en estrella, se presentan como una corriente de circulación en el bobinado en triángulo del primario y ocasionan sobrecalentamientos que pueden provocar fallos en el transformador (figura 8 ).

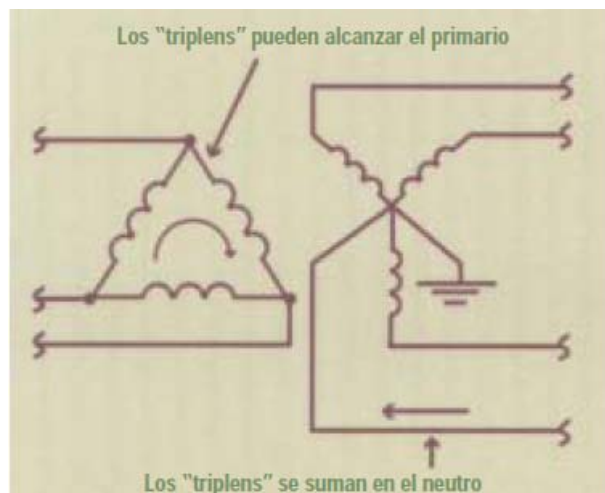


Figura 8:  
Corriente circulante en el bobinado de transformador.

### Solución:

Una forma de proteger un transformador de los armónicos es limitar su carga a valores inferiores a su valor nominal. Los transformadores standard se encuentran, en algunas ocasiones, incapacitados para soportar el calentamiento adicional que les ocasionan los armónicos. Dependiendo de las condiciones presentes, se pueden dar casos en los que es necesario limitar las cargas que alimenta un transformador hasta un 50% de la potencia nominal. Esto puede ayudar a resolver el problema de los armónicos, pero disminuye notablemente la eficiencia efectiva del transformador.

Alternativamente, pueden utilizarse transformadores de categoría K. Se trata de unos transformadores especialmente diseñados para alimentar cargas con armónicos. El diseño de un transformador K puede incluir una o varias de las modificaciones siguientes: sobredimensionado del bobinado del primario para soportar las corrientes circulantes armónicas triplens, doblar la sección del conductor neutro del secundario para soportar las corrientes armónicas triplens, diseñar los núcleos magnéticos con una baja densidad de flujo para utilizar categorías superiores de hierro, emplear varios conductores en paralelo de pequeña sección en el bobinado del secundario para reducir el efecto piel y/o diseñar bobinados múltiples en el secundario que cambien la fase a secuencia cero para cancelar las corrientes armónicas triplens.





Figura 9: Transformador de interior de categoría K.

## 6 – Otras soluciones:

### Instalar reactores de línea en los variadores de velocidad

Cuando el sistema incluye variadores de velocidad de c.a., un método sencillo de filtrado de los armónicos consiste en colocar una inductancia (reactor de línea) en cada fase de la línea de alimentación en serie con los conductores. Esto tiene el efecto de alisar los pulsos escarpados de la corriente y por lo tanto reducir el nivel del contenido de armónicos. Los reactores de línea también se utilizan para cargas tales como los equipos UPS (equipos de alimentación ininterrumpida).

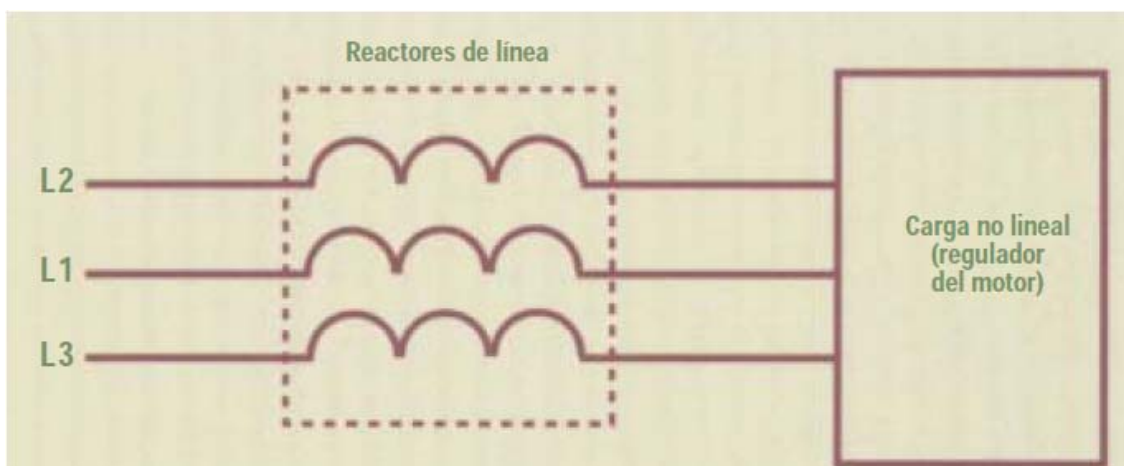


Figura 10:

Inductores de línea en serie con un regulador de velocidad de un motor.

## 7 – Instalar filtros para los armónicos

Los filtros son una solución efectiva en aquellas ocasiones en las que el recableado es muy caro o dificultoso. Se utilizan para bloquear o atrapar las corrientes perjudiciales, disminuyendo las cargas armónicas del cableado. Ahora bien, el diseño del filtro depende del equipo en el cual se va a instalar y puede volverse ineficaz si se cambia una determinada parte de dicho equipo. Las características del filtro deben ser cuidadosamente diseñadas para una instalación dada, por lo que se recomienda una previa inspección por un profesional especializado.

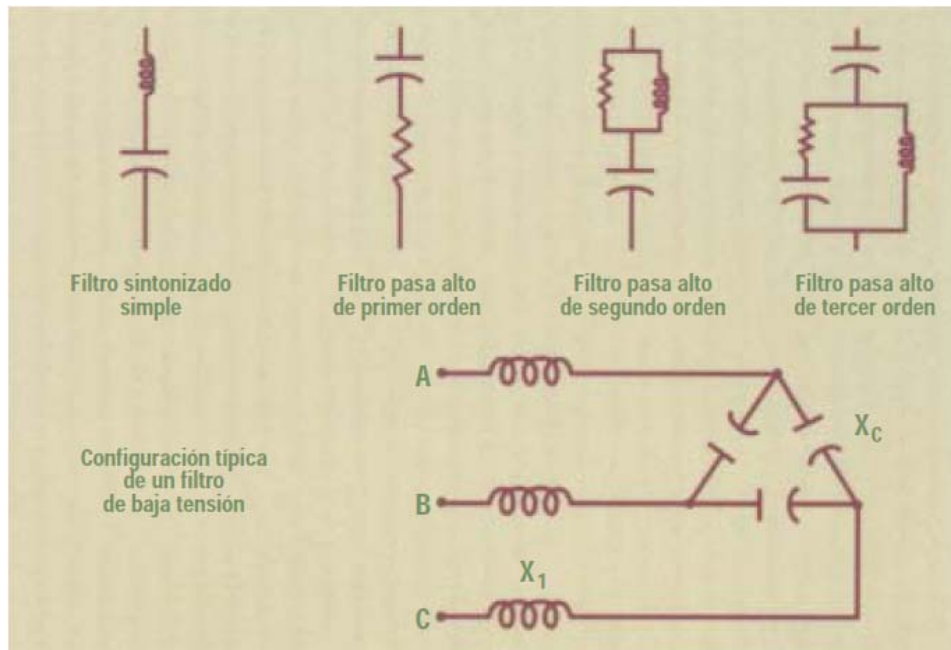


Figura 11: Configuraciones típicas de filtros pasivos.