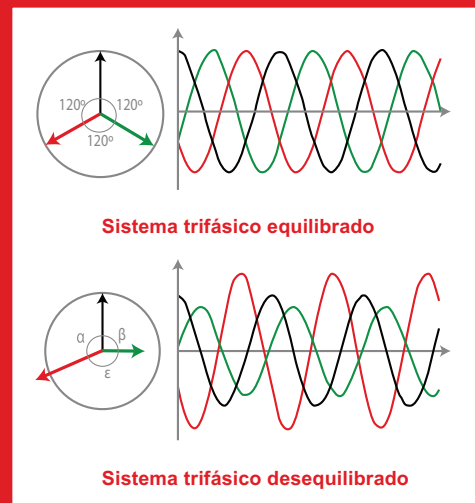


Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica



Jean-Baptiste Joseph Fourier,
matématico francés (1768-1830)



Calidad de la energía eléctrica

Los parámetros fundamentales que determinan un suministro de energía eléctrica son: la tensión de alimentación (U) y la corriente (I).

El correcto suministro de la tensión (U) y la capacidad de entregar a los usuarios la energía eléctrica necesaria en un determinado momento, depende de la compañía suministradora encargada de distribuir la energía eléctrica depende de las compañías suministradoras.

En España, la tensión se suministra a 400 voltios (V) en un sistema trifásico con una frecuencia de 50 Hz, considerando esta tensión como baja hasta el valor de 1000 V. A partir de los 1000 V y hasta los 25 kilovoltios (kV) se considera media tensión, la cual depende de las zonas y de las compañías suministradoras. Por último, desde los 25 kV se considera alta tensión y es utilizada, principalmente, para transportar la energía eléctrica a grandes distancias.

En la actualidad, se deben unificar los conceptos de **CALIDAD (correcto suministro de energía)** y de **EFICIENCIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA (obtener el máximo rendimiento de la misma)**. Por esta razón, hay que optimizar al máximo la energía consumida, así como su transporte y utilización, garantizando el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos en las instalaciones.

Un aspecto fundamental de la calidad y eficiencia energética, consiste en generar y transportar al máximo energía activa que produce trabajo útil, procurando compensar las cargas de energía fluctuante y no productivas, como la energía reactiva (ver el capítulo de **Compensación de Energía Reactiva**), así como la energía de distorsión que generan algunos equipos eléctricos con componentes no lineales: reactancias electrónicas no filtradas, variadores de velocidad, rectificadores y arrancadores electrónicos, entre otros muchos.

Aspectos negativos de la **CALIDAD** del suministro eléctrico según se recogen en la norma EN-UNE-60150:1996

- Sobretensión
- Interrupción de la alimentación
- Microcortes de tensión
- Fluctuación de la tensión
- Parpadeo (Flicker)
- Huecos de tensión



Perturbaciones de la red eléctrica

Tomando como referencia la norma UNE-EN-60150 citada anteriormente, se exponen a continuación algunas perturbaciones importantes en la red eléctrica.

LAS VARIACIONES DE LA FRECUENCIA

Son alteraciones de la frecuencia medidas en promedios de 10 segundos, estas variaciones provocan el incorrecto funcionamiento de los motores eléctricos, tanto asíncronos como síncronos; aparatos electrodomésticos, etc.

EL DESEQUILIBRIO EN EL SISTEMA TRIFÁSICO

El sistema trifásico de tensión o corriente está perfectamente equilibrado cuando sus tres fases (R, S y T) tienen un desplazamiento angular de 120° entre ellas y los módulos de sus vectores tienen la misma magnitud.

Cuando el sistema está desequilibrado puede ocurrir que los módulos vectoriales de cada una de las fases sean distintos, que el espacio angular (desfases) entre dos vectores sea diferente de 120° , o que ocurran ambas cosas a la vez.

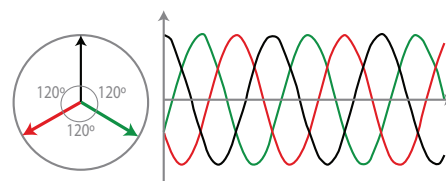
Esta forma de representar el sistema trifásico equilibrado o desequilibrado es válida, tanto si el sistema tiene solo tres hilos o cuatro hilos, neutro incluido.

Los desequilibrios no deben superar los siguientes parámetros:

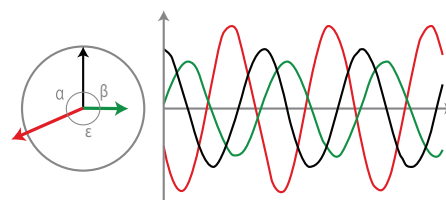
Intensidad $< 10\%$

Tensión $< 3\%$

Cuando el sistema está desequilibrado aumenta la corriente en el neutro.



Sistema trifásico equilibrado



Sistema trifásico desequilibrado



Los armónicos

La norma UNE-EN-60150:1996 define la tensión armónica como “una tensión senoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación en el sistema”.

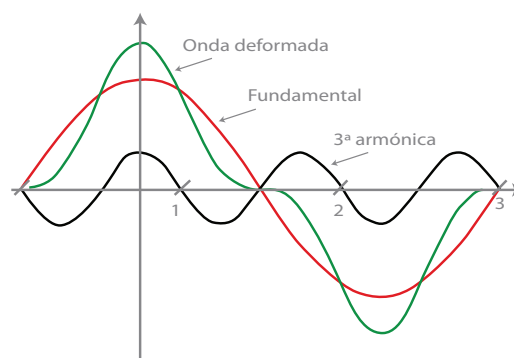
El matemático francés **Fourier**, definió este fenómeno afirmando que “cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental o de referencia”.

Desde el análisis de **RTR ENERGIA S.L.**, se piensa que esta es la definición más ajustada a la realidad práctica de lo que es un armónico; aunque no se va a entrar en el desarrollo de la serie matemática de Fourier porque se alejaría del objetivo de este manual.

Los armónicos generan cargas no lineales, que conectadas a la red eléctrica alterna y senoidal, absorben corrientes no lineales y cuya amplitud y frecuencia depende de la deformación de la onda de corriente al aplicar una tensión senoidal. Estas cargas no lineales son por lo general periódicas.



Jean-Baptiste Joseph Fourier,
matemático francés (1768-1830)



ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS

Entre otros muchos, los principales causantes de las distorsiones armónicas son:

- Las reactancias electromagnéticas y electrónicas de alumbrado.
- Equipos de soldadura eléctrica.
- Equipos electrónicos conectados a la red monofásica.
- Las reactancias electromagnéticas para lámparas de descarga.
- Arrancadores electrónicos.
- Variadores de velocidad.

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LA RED ELECTRICA

- Aumento de la potencia a transportar, empeorando el factor de potencia de la red.
- Disparo intempestivo de interruptores automáticos.
- Sobrecargas en los conductores.
- Vibraciones y sobrecargas en las máquinas.
- Creación de inestabilidad en el sistema eléctrico.
- Mal funcionamiento de los relés de protección.
- Disminución de la impedancia de los condensadores ($X_C = 1/\omega \cdot C$), lo que da lugar al fallo de la batería autorregulada instalada para la corrección del factor de potencia cuando aparece el **fenómeno RESONANTE** $X_L = X_C$, esta situación es explicada con más detalle en el apartado **D**.
- Mediciones erróneas en equipos de medida.
- Las compañías eléctricas, están analizando las penalizaciones a aplicar a las instalaciones industriales que sean generadoras de armónicos, de igual forma que lo hacen para aquellas que generan energía reactiva.
- Perturbaciones en equipos de control.

Parámetros de los armónicos

Los armónicos se clasifican por tres parámetros (Orden, Frecuencia y Secuencia) que definen perfectamente la función del armónico correspondiente en las redes eléctricas.

EL ORDEN DE LOS ARMÓNICOS

Partiendo de que la frecuencia fundamental en España es de 50 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7... orden natural de los números

También se define como la relación que hay entre la frecuencia del armónico (f_n) y la frecuencia fundamental (f_{50}).

$$n = \frac{f_n}{f_{50}}$$

LA FRECUENCIA

Se define como el resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la frecuencia fundamental (50 Hz), por ejemplo:

$$\begin{aligned} 3^{\text{a}} \text{ armónica } & 3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz} \\ 5^{\text{a}} \text{ armónica } & 5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz} \\ 7^{\text{a}} \text{ armónica } & 7 \times 50 \text{ Hz} = 350 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Los armónicos de orden impar son los que se encuentran en las redes eléctricas de la industria, edificios y explotaciones industriales, aeropuertos, etc. Los de orden par sólo aparecen cuando hay asimetría en la señal eléctrica.

LA SECUENCIA

La secuencia positiva o negativa de los armónicos no determinan un comportamiento concreto de los mismos en la redes eléctricas, son igual de perjudiciales unos que otros.

En el caso concreto de las baterías de condensadores para la corrección del factor de potencia son más perjudiciales los de secuencia negativa, y fundamentalmente el 5°.

Por el contrario, los de secuencia cero, al ser su frecuencia múltiplo eléctrico de la fundamental, se desplazan por el neutro, haciendo que por él circule la misma o más intensidad que por las fases con el consiguiente calentamiento del mismo, de ahí la necesidad de igualar la sección del neutro a las fases.

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

Parámetros de los armónicos más usuales

TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL EN TENSIÓN (U) E INTENSIDAD (I)

La tasa de distorsión armónica se define como la relación en tanto por ciento (%) de la tensión (o de la intensidad) en valor eficaz de la frecuencia del armónico correspondiente y la tensión (o intensidad) en valor eficaz de la tensión correspondiente a la frecuencia fundamental.

$$HD U_n \% = \frac{U_{ca\ f_n}}{U_{ca\ f_{50}}} \cdot 100$$

$$HD I_n \% = \frac{I_{ca\ f_n}}{I_{ca\ f_{50}}} \cdot 100$$

TASA TOTAL DE DISTORSION ARMONICA: THD_U - THD_I

Se llama así a la tasa de distorsión armónica total referenciada a la frecuencia fundamental:

$$THD_{f_{2-n}} = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + \dots + h_n^2}}{h_1} \cdot 100$$

Para una mejor comprensión se va a referenciar el THD a los dos valores fundamentales: la tensión eficaz (U_{ca}) y la corriente eficaz (I_{ca}).

$$THD_{U_{2-n}} = \frac{\sqrt{U_{ca2}^2 + U_{ca3}^2 + U_{ca4}^2 + \dots + U_{can}^2}}{U_{ca1}} \cdot 100$$

$$THD_{I_{2-n}} = \frac{\sqrt{I_{ca2}^2 + I_{ca3}^2 + I_{ca4}^2 + \dots + I_{can}^2}}{I_{ca1}} \cdot 100$$

Como norma de consulta, en la IEC-555 el valor "n" se limita al armónico número 40.

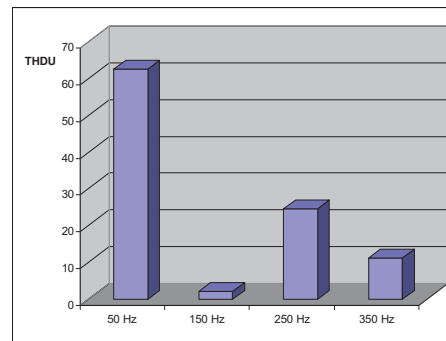
La THD_I es generada por las cargas de circuitos no lineales en la instalación;

La THD_U es generada por las fuentes, como resultado de una corriente en el circuito muy distorsionada.

EL ESPECTRO ARMÓNICO

El espectro armónico es la descomposición de una señal en sus armónicos en el dominio de la frecuencia. Así se representa en un diagrama de barras el porcentaje de cada una de las señales armónicas, cuya suma produce la señal total analizada.

En la figura adjunta se observa un espectro armónico donde el 5º armónico alcanza un valor próximo al 25% en tensión.



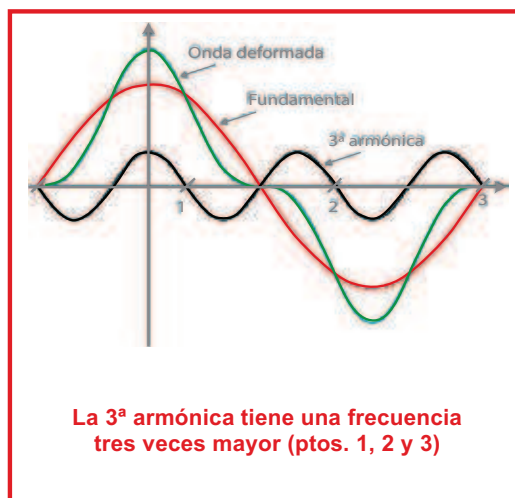
La 3ª y la 5ª armónica

LA 3ª ARMÓNICA

En la figura se representa la forma de onda deformada y su valor de pico como suma grafica de las dos ondas senoidales.

La onda fundamental tiene una amplitud igual a tres veces la 3ª armónica y ambas tienen su valor de pico en el mismo instante.

La 3ª armónica tiene la particularidad de que su frecuencia es múltiplo eléctrico de la frecuencia fundamental, y tiene secuencia cero, por lo que en el sistema trifásico de cuatro hilos (R, S, T y N) entra en anillo con las tres fases (R, S, T) desplazándose por el neutro (N). Igual ocurre con la 6ª, 9ª, etc. Su influencia sobre el neutro lo trataremos mas adelante.

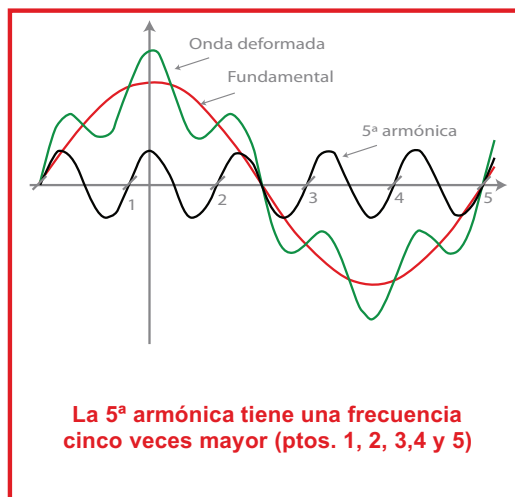


LA 5ª ARMÓNICA

En la figura se muestra la forma de onda de la 5ª armónica, en la misma aparece la onda deformada con su correspondiente valor de pico, como suma grafica de la onda fundamental y armónica.

Igual que en el caso anterior la onda fundamental tiene una amplitud igual a cinco veces la 5ª armónica, y ambas tienen su valor de pico en el mismo instante.

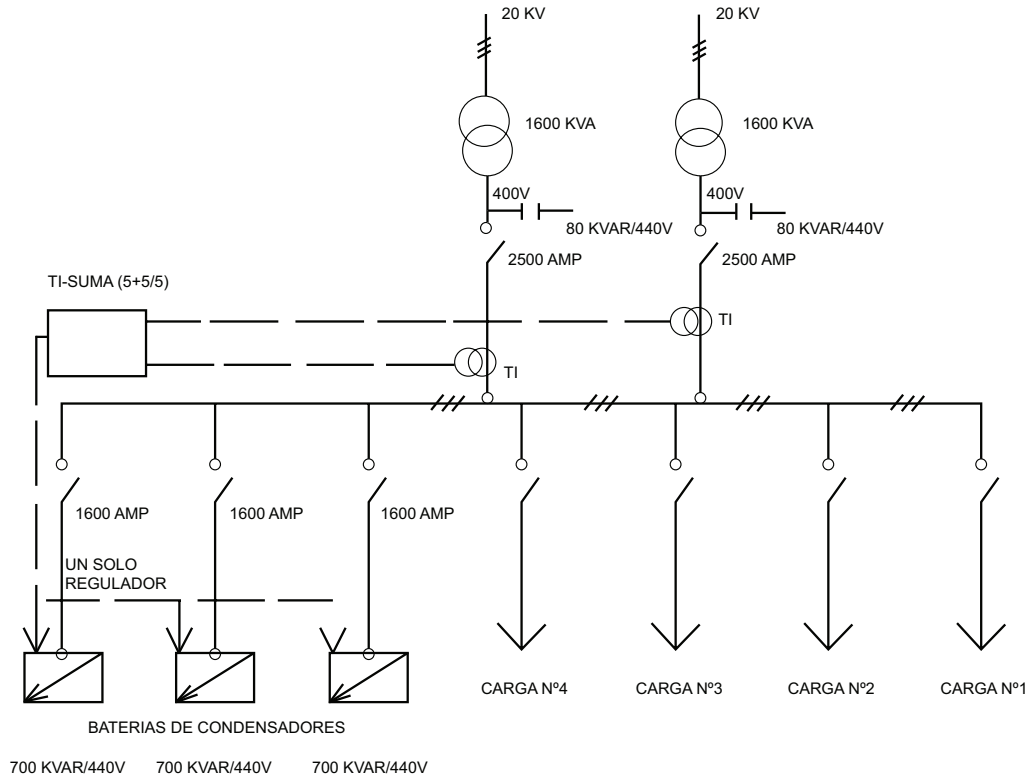
La 5ª armónica, a diferencia de la 3ª armónica, NO es múltiplo eléctrico de la fundamental por lo que se desplaza por las tres fases R, S y T y es la primera armónica que afecta a los condensadores y al sistema trifásico, al igual que la 7ª, 11ª etc.



Para **RTR ENERGIA S.L.** estas dos distorsiones armónicas (3ª y 5ª) son las más importantes a la hora de determinar la corrección del factor de potencia en instalaciones industriales, puesto que los condensadores deben instalarse formando filtros pasivos (L-C), como se explicará en el apartado D.

Compensación de la energía reactiva en redes distorsionadas por armónicos

En un circuito complejo similar al mostrado a continuación, como el que se presenta de manera habitual en cualquier instalación industrial, suelen aparecer diferentes tipos de cargas (lineales y no lineales) así como una batería de condensadores para la compensación del factor de potencia de la instalación.



Si se sospecha de la presencia de distorsiones armónicas en la red eléctrica de la instalación, se debe efectuar un análisis de la red eléctrica con un analizador de red debidamente calibrado.

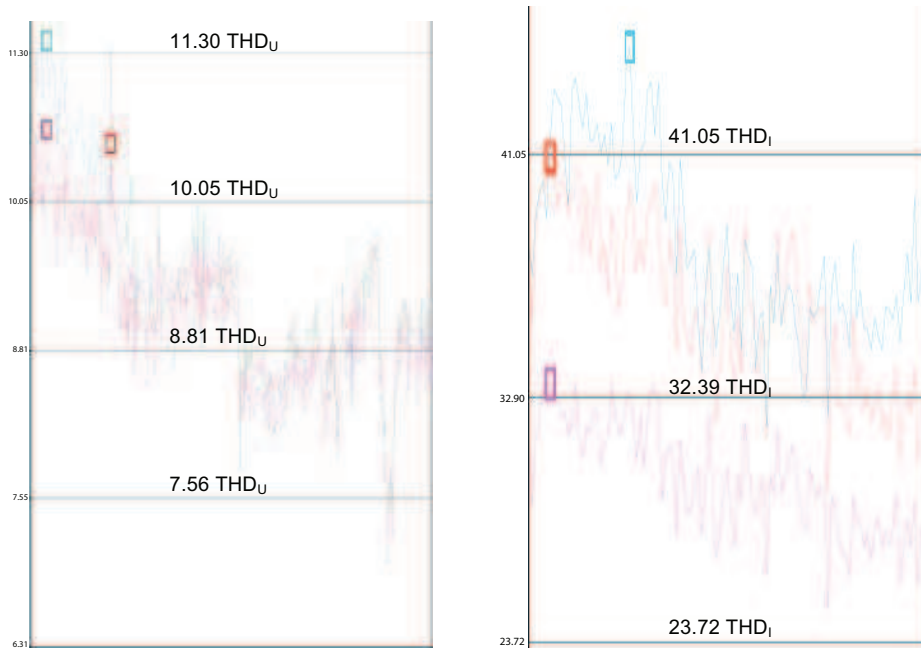
RTR Energía S.L. efectúa este tipo análisis de redes, con sus equipos debidamente calibrados, cuando sus clientes así lo requieren

Una vez efectuado el análisis de la red, que debe durar aproximadamente 4-5 días procurando pasar un fin de semana, se obtendrán los datos necesarios para diagnosticar las necesidades eléctricas de la instalación.

- Tensión de alimentación " U_{ca} "
- Corriente que circula " I_{ca} "
- Frecuencia
- Potencia de la instalación
- Factor de potencia
- Energía capacitiva que demanda la instalación.
- Corriente en el neutro
- Desequilibrio de la instalación por consumo.
- THD_U desde el 3º, 5º, 7º, ... armónico (total y por armónico).
- THD_I desde el 3º, 5º, 7º, ... armónico (total y por armónico).
- El armónico preponderante en la red tanto en tensión como en corriente.

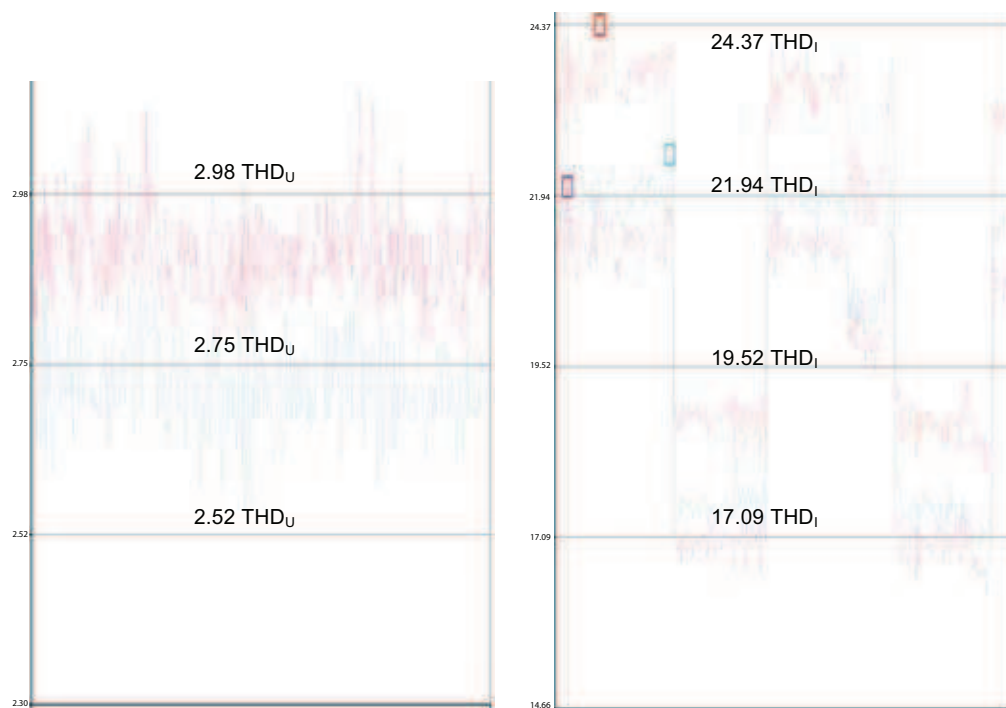
En algunas ocasiones, para comprobar la presencia de armónicos en la instalación es suficiente con realizar el análisis durante un breve espacio de tiempo para decidir cual es la batería de condensadores más adecuada para la instalación.

A continuación se muestran unos ejemplos.



Espectro de distorsiones armónicas en tensión (THD_U) y en intensidad (THD_I) obtenidas mediante un analizador de redes. Puede observarse, como las distorsiones son muy elevadas, y como se verá más adelante, la solución adoptada para la instalación de la batería de condensadores para la compensación de la energía reactiva fue la instalación de filtros pasivos con un 14% de sobretensión.

En un caso como este, se aprecia claramente la presencia de distorsiones armónicas aunque el análisis de la red se realizara durante un breve periodo de tiempo; no así en el ejemplo que se analiza a continuación.



En este caso, el espectro de distorsiones armónicas en tensión (THD_U) y en intensidad (THD_I) se encuentra en los límites admisibles. Así podría optarse por la instalación de una batería con condensadores reforzados RTF del catálogo de **RTR Energía S.L.** o bien, por la instalación de filtros pasivos con un factor de sobretensión del 7%. Para poder tomar la decisión más adecuada, el análisis de red debe comprender un periodo amplio de tiempo, para verificar cual es la evolución de dicho contenido armónico.

RESONANCIA

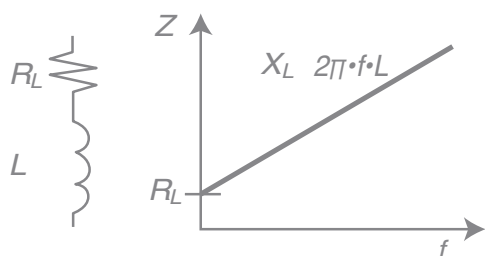
El fenómeno de resonancia se produce cuando $X_L = X_C$ en un circuito donde hay colocados en serie o en paralelo cargas no lineales, condensadores, y cargas inductivas.

$$\left. \begin{array}{l} X_L = \omega \cdot L \\ X_C = 1/\omega \cdot C \end{array} \right\} \Rightarrow \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

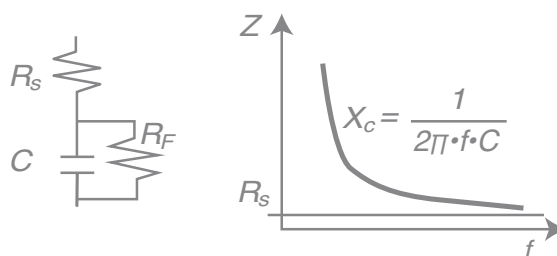
La frecuencia para la cual los valores X_L y X_C se igualan, se denomina frecuencia de resonancia f_R .

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow 2\pi \cdot f_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Las dos impedancias son función de la frecuencia (f), pero X_L es directamente proporcional a la frecuencia y X_C es inversamente proporcional a la frecuencia. Por lo tanto, cuando aumenta la frecuencia, aumenta X_L y disminuye X_C .



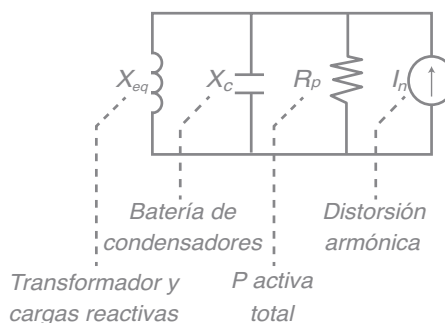
Impedancia de una bobina no ideal



Impedancia de un condensador no ideal

Por lo general en las instalaciones industriales los condensadores están situados en paralelo, como puede observarse en el circuito equivalente que se muestra a la derecha.

Al funcionar esta configuración como un divisor de corriente y ser X_C el valor más pequeño, la intensidad pasa principalmente por los condensadores, **siendo esta la razón por la que fallan los condensadores.**

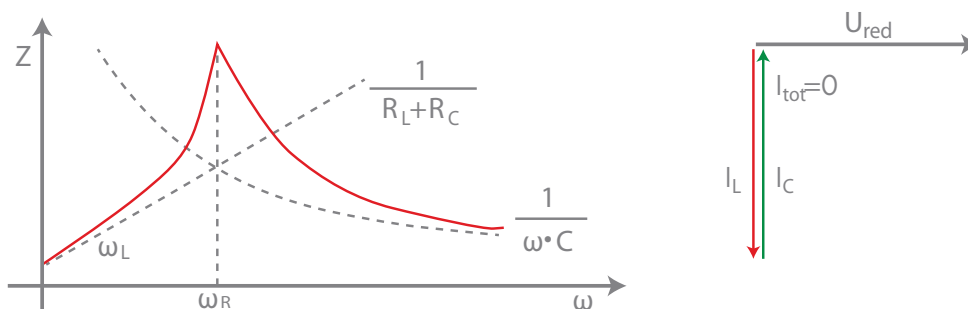


RESONANCIA EN PARALELO

Se produce resonancia en un circuito en paralelo cuando la corriente resultante y la tensión de la línea están en fase. En el circuito (L-C) paralelo, cuando a una determinada frecuencia de resonancia ($\omega_R = 150$ Hz, frecuencia del 5º armónico) el circuito es inductivo ($\omega < \omega_R$) la corriente está retrasada con respecto a la tensión, por el contrario si el circuito es capacitivo ($\omega > \omega_R$) la corriente está adelantada con respecto a la tensión.

En el circuito L-C la corriente resultante de la "L" (bobinas...) es igual a la corriente resultante de la "C" (condensadores...) pero de signo contrario por lo que la suma algebraica y vectorial de ambas da como resultado que la corriente resultante sea cero y la impedancia su valor máximo (al revés que sucede en el circuito serie).

En estas circunstancias la corriente en ambas ramas L-C se hace extremadamente altas, con el consiguiente peligro para el condensador, por tener la X_C el valor más bajo del todo el circuito.



En el gráfico se aprecia claramente como se eleva la impedancia “Z” hasta alcanzar valores máximos.

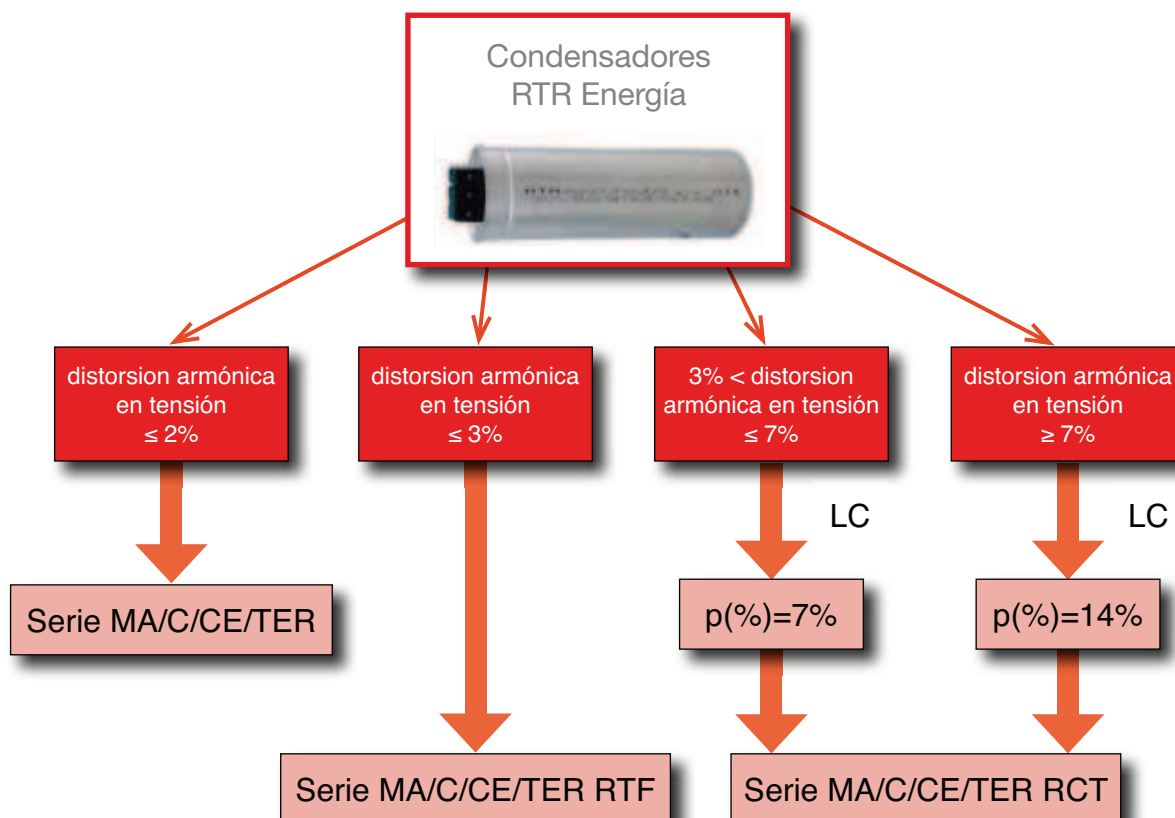
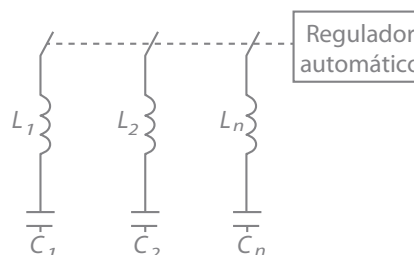
Por este motivo surge la necesidad de proteger los condensadores cuando están instalados en paralelo en circuitos con un alto contenido de armónicos.

Cuando la instalación industrial con alto contenido de armónicos posee transformador de potencia (Media/Baja) para su suministro, es necesario que los condensadores de compensación del transformador instalados en la parte de baja estén protegidos igualmente de la presencia de armónicos (ver el apartado **G** del capítulo de **Compensación de Energía Reactiva**).

PROTECCIÓN DE LOS CONDENSADORES

Ante la presencia de distorsiones armónicas, la solución es utilizar filtros de rechazo (L-C) que tienen como función principal proteger el condensador. La recomendación de este tipo de filtrado lo establece la norma UNE-EN-61642, como dato práctico **RTR Energía S.L.** establece que en instalaciones con distorsiones en la 5ª armónica en tensión superiores al 3% es necesario la instalación de filtros L-C y para distorsiones armónicas en corriente de la 5ª armónica superiores del 30% también es necesario.

RTR Energía S.L., fabrica dos tipos de condensadores: **Standard** que soportan distorsiones armónicas en tensión menores al 2% y distorsiones en corriente inferiores al 25% y **Reforzados** que soportan distorsiones en tensión menores al 3% y en corriente mientras no superen el 30%.



Filtros pasivos de rechazo

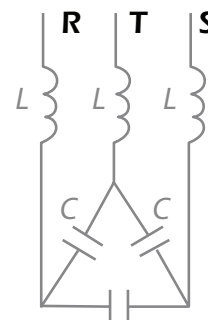
El objetivo de los filtros de rechazo es evitar la amplificación del armónico preponderante de la instalación, generalmente el 5º, bien sea de tensión o de corriente e impedir la resonancia paralelo entre las cargas inductivas “L” (transformadores, motores arrancadores...) y los condensadores “C”; evitando así la sobrecarga y posible destrucción de los condensadores de la batería autorregulada de compensación de reactiva.

El filtro en sí es un acoplamiento en serie, debidamente calculado y sintonizada previamente, formado por:

- una reactancia trifásica/monofásica
- un condensador trifásico/monofásico de la potencia en kVAr que requiera la instalación.

A esta situación se llama **rama de compensación**, cada rama debe estar diseñada con su correspondiente protección.

La distintas ramas (L-C) conforman la batería autorregulada de condensadores que sería el filtro completo que tiene como misión compensar el factor de potencia de la instalación y cuya potencia total será la suma de las potencias de cada una de las ramas de.



CÓMO SE SELECCIONA UNA BATERÍA DE CONDENSADORES (L- C)

A partir del análisis de la red donde se analizan los armónicos que hay en la instalación, se determina el armónico preponderante, por lo general es el 5º armónico (250 Hz frecuencia). Una vez conocida la frecuencia del armónico, se establece la frecuencia de resonancia del filtro (ω_R), que nunca debe coincidir con ningún múltiplo entero de la frecuencia de la red (50–60 Hz) y su valor debe ser inferior la frecuencia del armónico preponderante, de esta forma la resonancia con otro armónico es imposible.

La frecuencia de resonancia (ω_R) se determina a través del factor de sobretensión ($p\%$) que establece la relación entre la tensión de la reactancia y la del condensador:

$$p(\%) = 100 \cdot \frac{U_{C_c} - U_L}{U_L} = 100 \cdot \left(\frac{\omega_{red}}{\omega_{resonancia}} \right)^2 = 100 \cdot \left(\frac{f_{red}}{f_{resonancia}} \right)^2$$

RTR Energía S.L., diseña sus condensadores para filtros pasivos de forma que soporten una sobretensión del 15% sobre la sobretensión introducida por el propio filtro. Por ejemplo, un condensador a 440V instalado con una reactancia con un valor de $p(\%)=7$ podrá soportar una tensión de: $440 \cdot 1.07 \cdot 1.15 = 540$ V.



THDu	p[%]	f _{red}	f _{resonancia}
3-7%	7	50 Hz	189 Hz
		60 Hz	227 Hz
>7%	14	50 Hz	134 Hz
		60 Hz	160 Hz