

PROCEDIMIENTOS PARA EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS

- División PFC -

ÍNDICE

		página
1	Perturbaciones armónicas en nuestra instalación	5
1.1	Costes Técnicos	7
1.2	Costes Económicos	7
2	Efecto de los armónicos en el sistema de potencia	8
2.1	¿Qué son los armónicos?	9
2.2	¿Quién genera los armónicos?	10
2.3	Relación Corriente y tensión armónica	11
2.4	¿Qué efectos producen los armónicos?	12
3	¿Cómo analizar un problema de armónicos?	13
4	Normativas	15
5	Soluciones	16
6	Resumen	18
7	Notas / Observaciones	19

1. Perturbaciones armónicas en nuestra instalación

En los últimos años, el crecimiento sustancial de los dispositivos electrónicos, destinados a equipar nuestras instalaciones, ha dado lugar a un cambio significativo de los tipos de cargas conectadas al sistema de distribución eléctrico.

No ha pasado mucho tiempo desde que la única preocupación que había para utilizar la energía eléctrica en nuestros hogares, establecimientos y centros productivos era simplemente tener tensión, sin importarnos otra cosa que los diferentes equipos y dispositivos que teníamos funcionaran.

Estos dispositivos, en la actualidad, están equipados con una electrónica que de algún modo u otro consigue proporcionarnos un mayor rendimiento de las tareas, procesos productivos o actividades que desarrollamos. Todo el mundo utiliza ordenadores para uso personal, o para el proceso y control de cualquier sistema de producción con variadores de velocidad, aire acondicionado, ascensores que se ajustan lentamente al aproximarse a su planta de destino, etc. Estos dispositivos que están equipados con rectificadores, moduladores, etc., distorsionan la forma de onda de la corriente para su correcto funcionamiento.

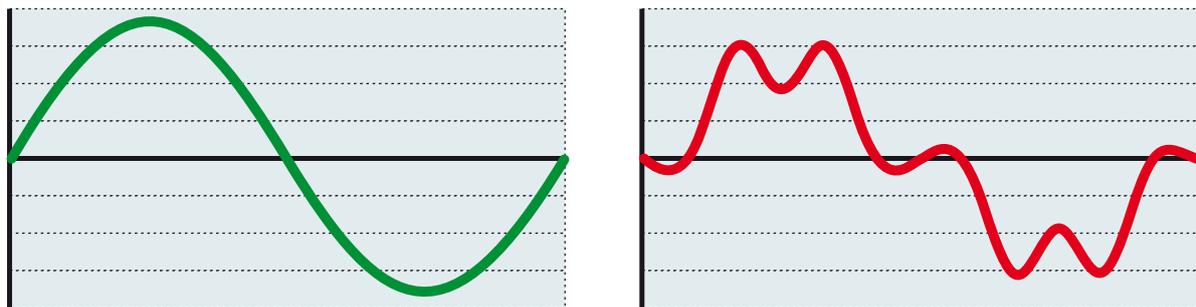
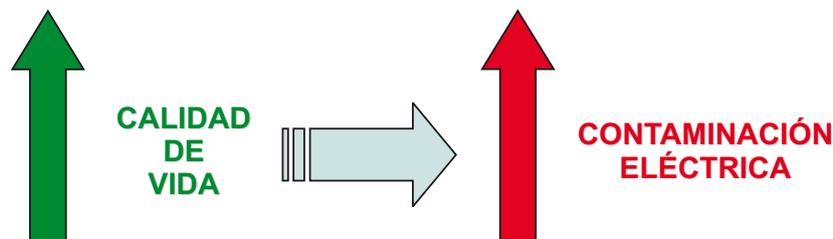
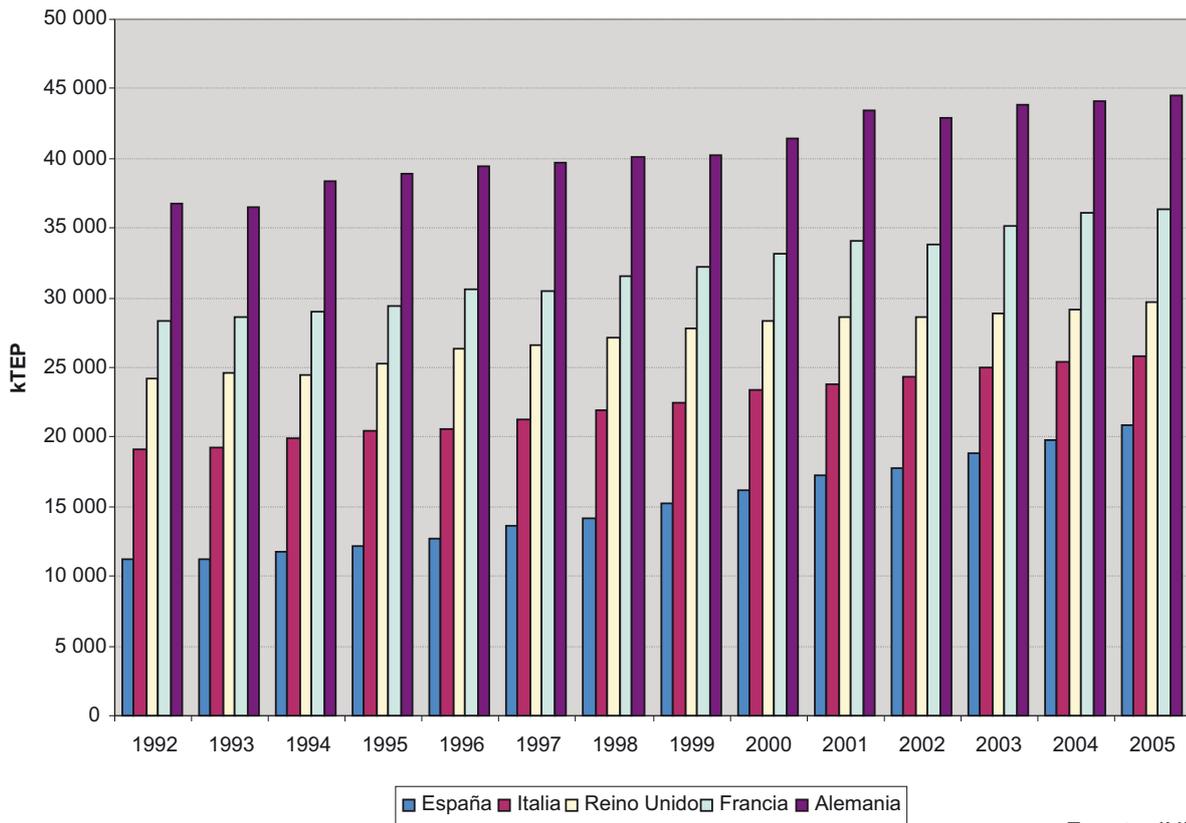


Fig. 1. Forma de onda ideal y forma de onda distorsionada

En definitiva, podemos afirmar que todos estos dispositivos y equipos han hecho mejorar **nuestra calidad de vida**, pero, por el contrario, conlleva **una mayor contaminación de nuestro sistema eléctrico**.





Fuente: INE, Eurostat

Fig. 2. Consumo final de electricidad por países

Esta mayor polución eléctrica es debida, en general, a los armónicos. Los armónicos pueden perturbar el correcto funcionamiento de numerosas máquinas y equipos.

Estas perturbaciones se traducen en costes que difícilmente podemos apreciar o valorar. Estos costes podemos diferenciarlos como:

- Costes Técnicos
- Costes Económicos

1.1. Costes Técnicos

Los **costes técnicos** son todos aquellos que comportan una pérdida de rendimiento de nuestra instalación.

Es decir:

- Pérdida de capacidad en líneas de distribución de energía
- Sobrecarga de transformadores
- Sobrecarga de conductores
- Caídas de tensión
- Descalificación de los transformadores
- Pérdidas por efecto Joule en líneas y máquinas
- Pérdidas magnéticas en máquinas eléctricas

Normalmente, todos los costes técnicos derivan en costes económicos. Aquí se halla la importancia del control de nuestra instalación.

1.2. Costes Económicos

Los **costes económicos** son aquellos que podemos cuantificar económicamente, aunque en algunos casos puede ser difícil. Estos costes los podemos dividir en **costes visibles** y **costes ocultos**.

Costes visibles:

- Mayor consumo eléctrico
- Puntas de consumo eléctrico
- Recargo o pago de energía reactiva

Costes ocultos:

- Pérdidas de distribución
- Pérdidas de potencia y energía (por efecto Joule y magnéticas)
- Ampliación de instalaciones
- Paradas de procesos productivos

Todos estos fenómenos pueden encontrarse en mayor o menor proporción en función de la propia instalación y de las cargas conectadas.

2. Efecto de los armónicos en el sistema de potencia

No todos los problemas de calidad eléctrica que pueden sufrir una instalación son imputables a los efectos de los armónicos. Existe gran variedad de fenómenos y aspectos, no solo eléctricos, que pueden afectar al propio sistema. Como podemos ver en la Fig. 3 el fenómeno de los armónicos es tan solo una porción de las “no idealidades” de onda existente en una instalación y de la red.

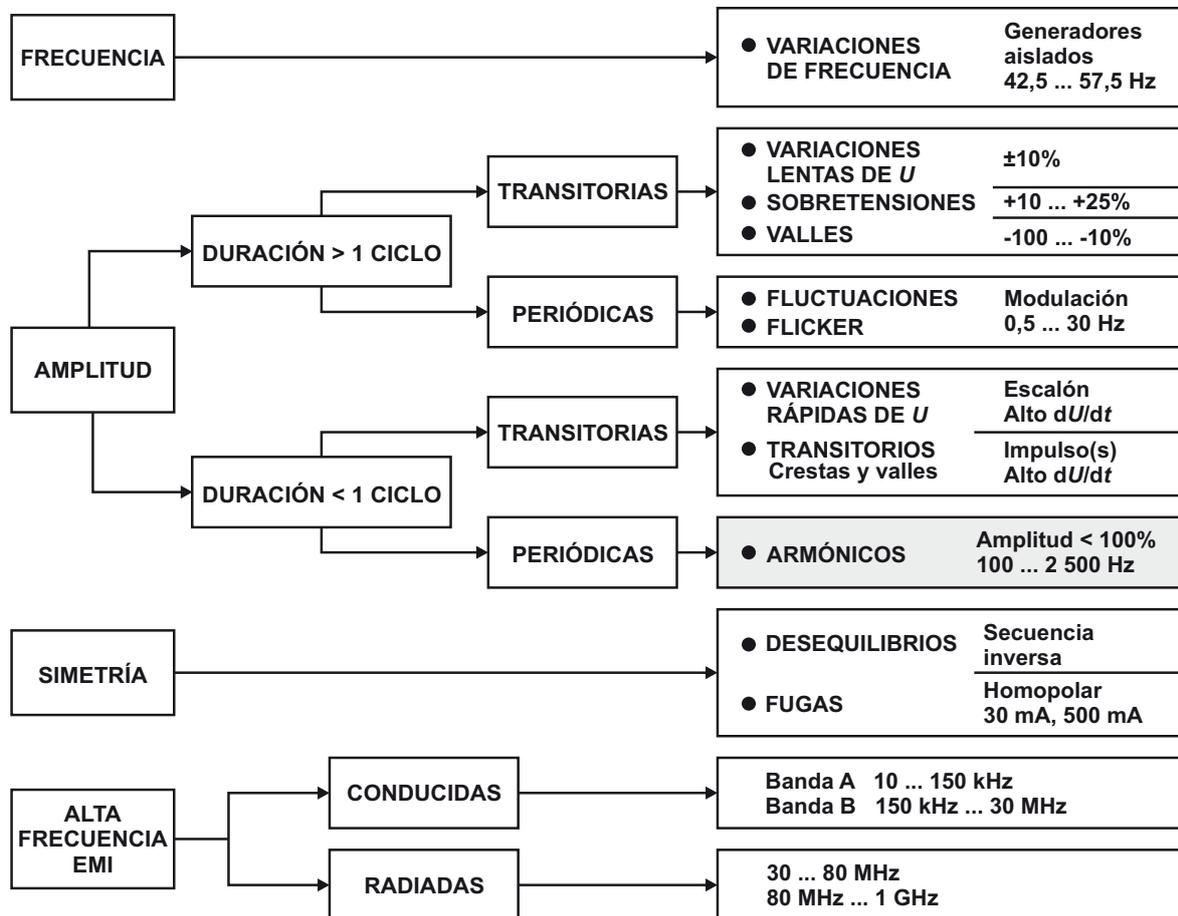


Fig. 3. Clasificación de las principales no idealidades de una instalación y de la red.

Los principales efectos de los armónicos de tensión y corriente en un sistema de potencia se pueden citar:

- La posibilidad de amplificación de algunos armónicos como consecuencia de resonancia serie y paralelo.
- La reducción en el rendimiento de los sistemas de generación, transporte y utilización de la energía.
- El envejecimiento del aislamiento de los componentes de la red y, como consecuencia, la reducción de la energía.
- Mal funcionamiento del sistema o de alguno de sus componentes.

Pero, para comprender mejor estos efectos debemos conocer la naturaleza de los armónicos.

2.1. ¿Qué son los armónicos?

Toda forma de onda periódica no-sinusoidal puede ser representada como la suma de ondas sinusoidales cuyas frecuencias son enteros múltiplos de la frecuencia fundamental, que denominamos armónicos.

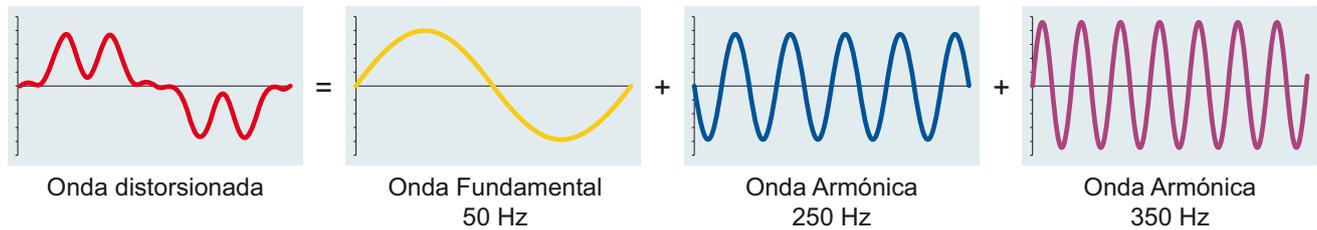


Fig.4 Descomposición de forma de onda distorsionada

Orden	Fund.	2	3	4	5	6	7
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	350
Secuencia	↻	↻	↑	↻	↻	↑	↻

Fig. 5 Orden y comportamiento de los armónicos

CONCEPTOS BÁSICOS

Conviene definir algunos términos sobre el tema armónicos que son fundamentales para la interpretación de cualquier medida y estudio:

- **Frecuencia fundamental (f_1):** Frecuencia de la onda original (50/60 Hz)
- **Orden de un armónico (n):** Número entero dado por la relación de la frecuencia de un armónico a la frecuencia fundamental. Con el orden se determina la frecuencia del armónico (Ejemplo: 5º armónico $\rightarrow 5 \cdot 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$)
- **Componente fundamental (U_1 o I_1):** Componente sinusoidal de orden 1 del desarrollo en serie de Fourier de frecuencia igual a la onda periódica original.
- **Componente armónica (U_n o I_n):** Componente sinusoidal de orden superior a 1 del desarrollo en serie de Fourier de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia origen.
- **Tasa de distorsión individual ($U_n\%$ o $I_n\%$):** Relación en % entre el valor eficaz de la tensión o corriente armónica (U_n o I_n) y el valor eficaz de la componente fundamental (U_1 o I_1).

$$U_n\% = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \quad I_n\% = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100$$

- **Valor eficaz total (TRMS):** Es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todos los componentes que forman la onda.

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots} \quad I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

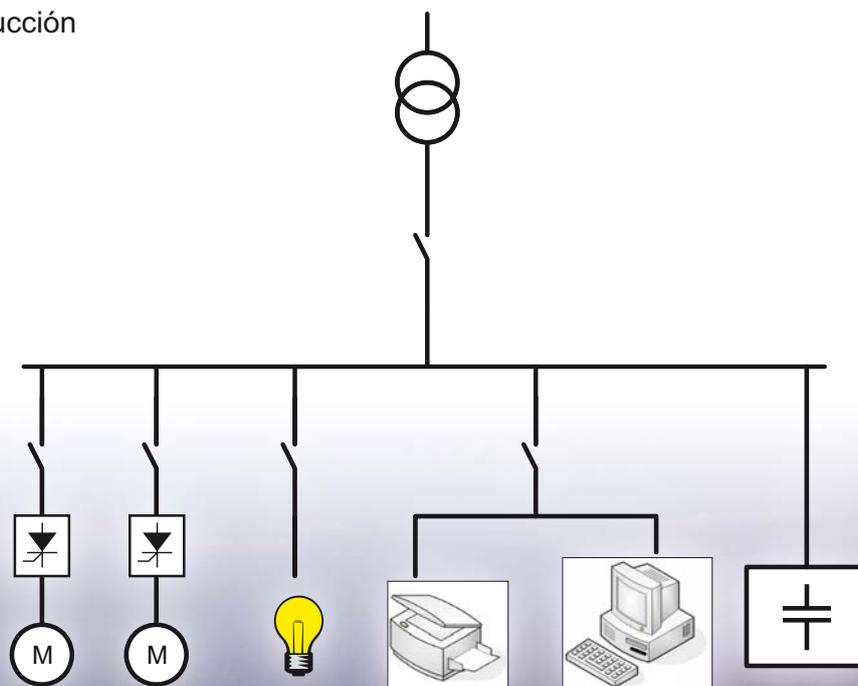
- **Residuo armónico:** Diferencia entre la tensión o corriente total y el correspondiente valor fundamental.
- **Tasa de distorsión armónica (THD):** Relación entre el valor eficaz del residuo armónico de la tensión y/o corriente y el valor de la componente fundamental.

$$\text{THD}(U)\% = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots}}{U_1} \quad \text{THD}(I)\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1}$$

2.2. ¿Quién genera los armónicos?

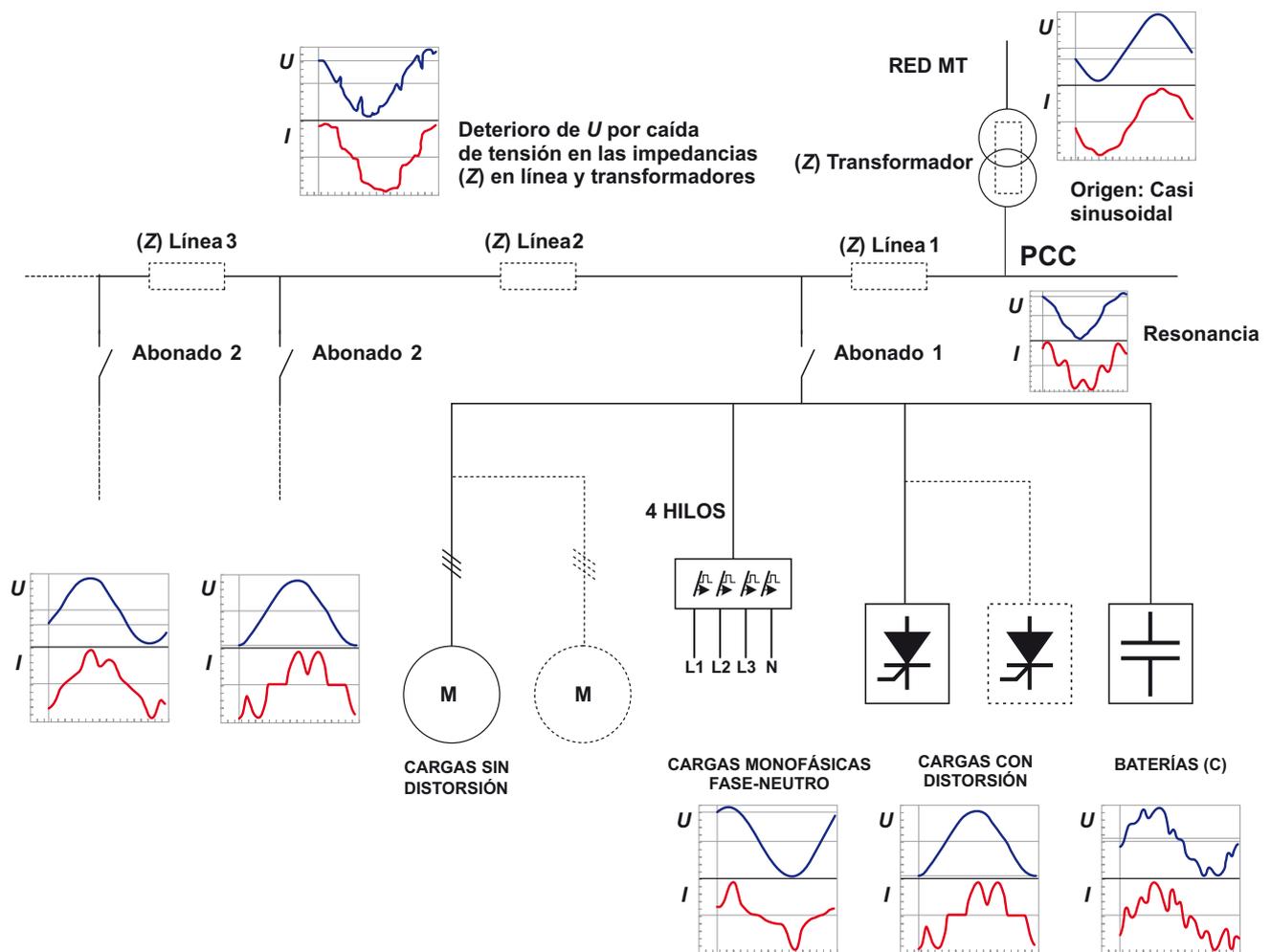
Los armónicos son producidos por cargas no-lineales que absorben corriente no-sinusoidal. Las cargas más comunes, tanto en entornos industriales como domésticos, son las siguientes:

- Variadores de velocidad/frecuencia
- Lámparas de descarga (Vapor de mercurio, de sodio, bajo consumo, fluorescentes, etc.)
- Rectificadores
- Convertidores C.A./C.C.
- Soldadura por arco
- Hornos de inducción
- SAI
- Ordenadores
- Etc.



2.3. Relación corriente y tensión armónicas

La circulación de corrientes armónicas generadas por cargas lineales a través de las impedancias internas de la red genera una distorsión en la onda de tensión.



Aplicando la ley de Ohm tendremos que $U_h = Z_h \cdot I_h$, donde Z_h y I_h son la impedancia armónica y la corriente armónica correspondiente a cada rango de armónico h . Por tanto, a una mayor circulación de corriente armónica generada por las cargas tendremos una mayor caída de tensión. Cuanto más alejados del PCC y más próximos a las cargas distorsionantes, mayor será esta caída de tensión. Si conectamos cargas sensibles alejadas del PCC y cercanas a dichas cargas distorsionantes, el nivel de distorsión que tendrán puede ser no tolerable y provocar un mal funcionamiento de dichas cargas sensibles.

Un hecho importante es verificar en el PCC en vacío y en carga. Si al comparar los niveles de distorsión en tensión en vacío y en carga, la distorsión no varía, es un indicio de que la distorsión en tensión es de origen externo. En cambio, si aumenta la distorsión en tensión proporcional a la corriente consumida, es un indicio de que la distorsión es de origen interno en nuestra instalación.

De aquí podemos deducir la importancia de evitar la circulación de corrientes armónicas en nuestra red.

2.4. ¿Qué efectos producen los armónicos?

Dentro de la amplia gama de perturbaciones existente en la red, los armónicos producen, en los componentes o elementos, los siguientes efectos:

Componente / Elemento	Problema	Efecto
Conductor	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la corriente - Aumento de la resistencia - Aumento de pérdidas térmicas (efecto Joule) - Efecto "Skin" 	<ul style="list-style-type: none"> - Calentamiento de cables - Disparo de protecciones
Conductor de neutro	<ul style="list-style-type: none"> - Circulación de armónicos múltiplos de 3 - Retorno por el conductor de neutro 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobreintensidad de la corriente circulando por el neutro - Calentamiento en el neutro - Degradación prematura del conductor de neutro - Tensión neutro-tierra - Disparo de protecciones
Condensadores	<ul style="list-style-type: none"> - Resonancia paralelo con el sistema - Amplificación de los armónicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Calentamiento - Envejecimiento prematuro de condensadores - Destrucción de condensadores
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> - Circulación de corrientes armónicas por los devanados 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrecalentamiento de los devanados. - Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. - Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) - Disminución del rendimiento. - Sobredimensionado del transformador. - Saturación del transformador (crea mayor distorsión)
Motores	<ul style="list-style-type: none"> - Circulación de corrientes armónicas por los devanados 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrecalentamiento de los devanados - Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento - Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) - Disminución del rendimiento - Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidad - Reducción del par
Grupo electrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema blando, con mayor impedancia que la red - Tensión distorsionada 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificultad de sincronización automática y posterior conmutación
Equipos de medida y control	<ul style="list-style-type: none"> - Medidas no validas - Errores en procesos de control 	<ul style="list-style-type: none"> - Error en equipos que toman como referencia el paso por cero de la onda - Saturación de transformadores de medida y/o protección - Valores de magnitudes incorrectas

3. ¿Cómo analizar un problema de armónicos?

Para un correcto análisis de armónicos es necesario disponer de un analizador de redes (analizador portátil **AR5L** o **QNA-P**), capaz de medir todas las magnitudes eléctricas de nuestra instalación para su posterior interpretación.



AR5L



QNA-P

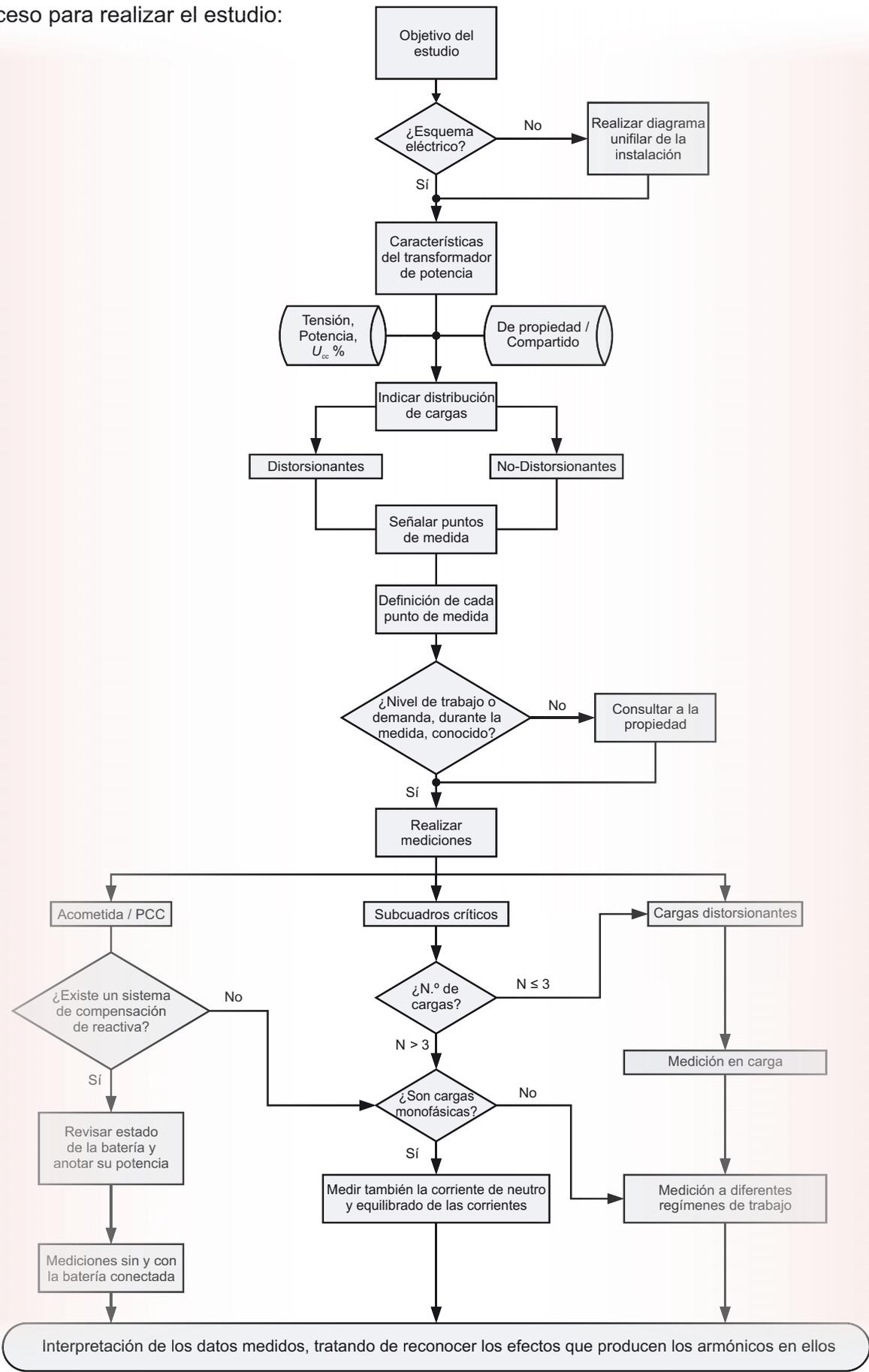
No hay una forma estandarizada para realizar un estudio, pero podemos considerar los siguientes pasos para realizarlo:

- Identificación previa de los síntomas que pueden existir en la instalación:

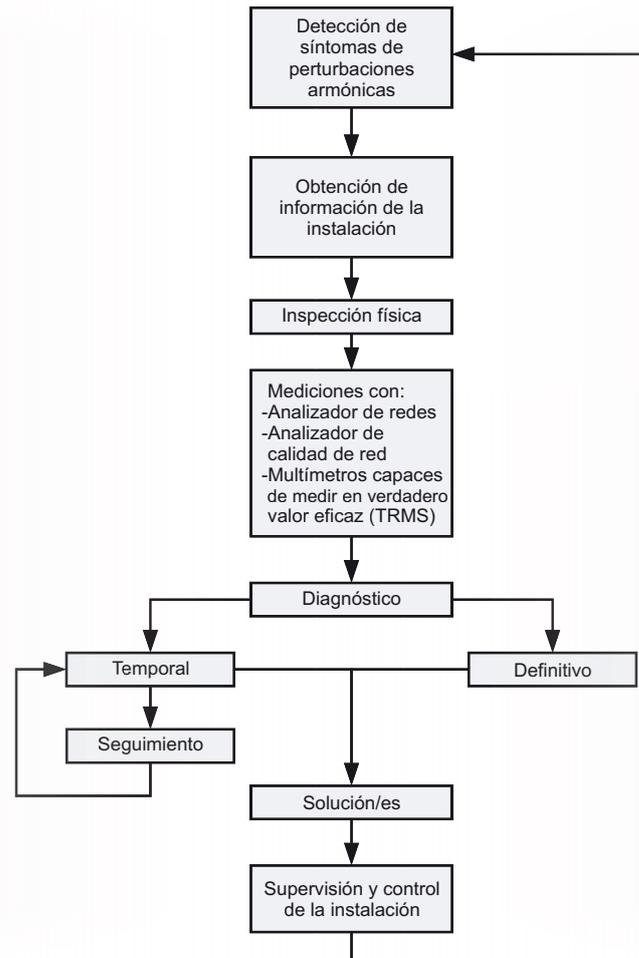
Componente / Elemento	Síntomas	SÍ	NO	?
Conductor	- Calentamiento de conductores - Disparo de protecciones	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Conductor de neutro	- Calentamiento del conductor del neutro - Degradación del conductor - Disparo de protecciones	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Condensadores	- Calentamiento de los condensadores - Envejecimiento prematuro de los condensadores (pérdida de capacidad) - Destrucción de condensadores	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Transformadores	- Sobrecalentamiento de los devanados - Degradación de los devanados - Disminución del rendimiento - Necesidad de sobredimensionar	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Motores	- Sobrecalentamiento de los devanados - Degradación de los devanados - Disminución del rendimiento - Vibraciones en el eje - Desgaste mecánico en rodamientos - Excentricidad del eje - Sobretensiones que destruyen los devanados	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Grupo electrógeno	- Dificultad de sincronización y conmutación del grupo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Equipos de medida y control	- Medida incorrecta de magnitudes - Interferencias en equipos sensibles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

El hecho de desconocer la existencia de alguno de los síntomas (?) no exime la instalación de sufrirlas, al contrario, debemos de tener más cuidado y supervisar la instalación, por ejemplo: mediante la monitorización de los parámetros eléctricos de diferentes puntos de la instalación con analizadores de redes fijos y un sistema **PowerStudio-SCADA**.

- Proceso para realizar el estudio:



- Proceso de diagnóstico de la instalación:



Identificados ya los síntomas, y tengamos la información de la instalación (ver puntos anteriores), podemos realizar un diagnóstico apropiado y aportar una o varias soluciones que sean más acertadas y adaptadas a los síntomas.

4. Normativas

Los resultados medidos pueden evaluarse según las siguientes normas, directivas y reglamentos⁽¹⁾:

- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) RD 842/2002
- REAL DECRETO 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica
- Directiva Europea 2004/108/CE relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética y por la que se deroga la Directiva 89/336/CEE
- Directiva Europea 95/16/CEE de ascensores
- Norma UNE-EN 12015 “Compatibilidad electromagnética. Norma de familia de productos para ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Emisión”

(1) Debe considerarse las posibles modificaciones y actualizaciones. Algunas de las normas y reglamentos son de aplicación solo en España.

- Norma UNE-EN 20460-5-523 “Instalaciones eléctricas de edificios. Parte 5: Selección e instalación de materiales eléctricos. Capítulo 52: Canalizaciones. Sección 523: Corrientes admisibles.”
- Norma UNE-EN 50160 “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”
- Norma UNE-EN 61642:2000 “Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos. Empleo de filtros y condensadores a instalar en paralelo”
- Norma UNE-EN 61800-3 “Accionamientos eléctricos de potencia de velocidad variable. Parte 3: Norma de producto relativa a CEM incluyendo métodos de ensayo específicos”
- Norma UNE-EN 61000-3-2 “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada <16 A por fase)
- Norma UNE-EN 61000-3-12 “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-12: Límites. Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada >16 A y <75 A por fase
- Norma UNE-EN 61000-3-4 “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-4: Límites. Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada >16 A
- Norma IEEE 519-1992 “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System”
- Norma G5/4-1 “Managing Harmonics: ENA Engineering Recommendation”

5. Soluciones

Tras el diagnóstico y la evaluación de las perturbaciones pasamos al tratamiento o solución. Hemos de buscar siempre un equilibrio entre la solución técnica y la económica. La solución técnica ideal sería la de filtrar directamente en las cargas distorsionantes (reactancia **LR**, filtro **LCL**, **FB3**, filtro **EMI** y **FAR-H/Q**), evitando la propagación de las corrientes armónicas hacia otras cargas e instalación, y una mayor caída de tensión armónica que provocara la distorsión de la onda de tensión. En otros casos, pasa por buscar una solución centralizada lo más próxima a las cargas (filtro activo **AF/APF**, **TSA**, filtro de bloqueo **FB3T**, filtro absorción/híbrido **FAR-H/Q**, filtro de rechazo **FR**).

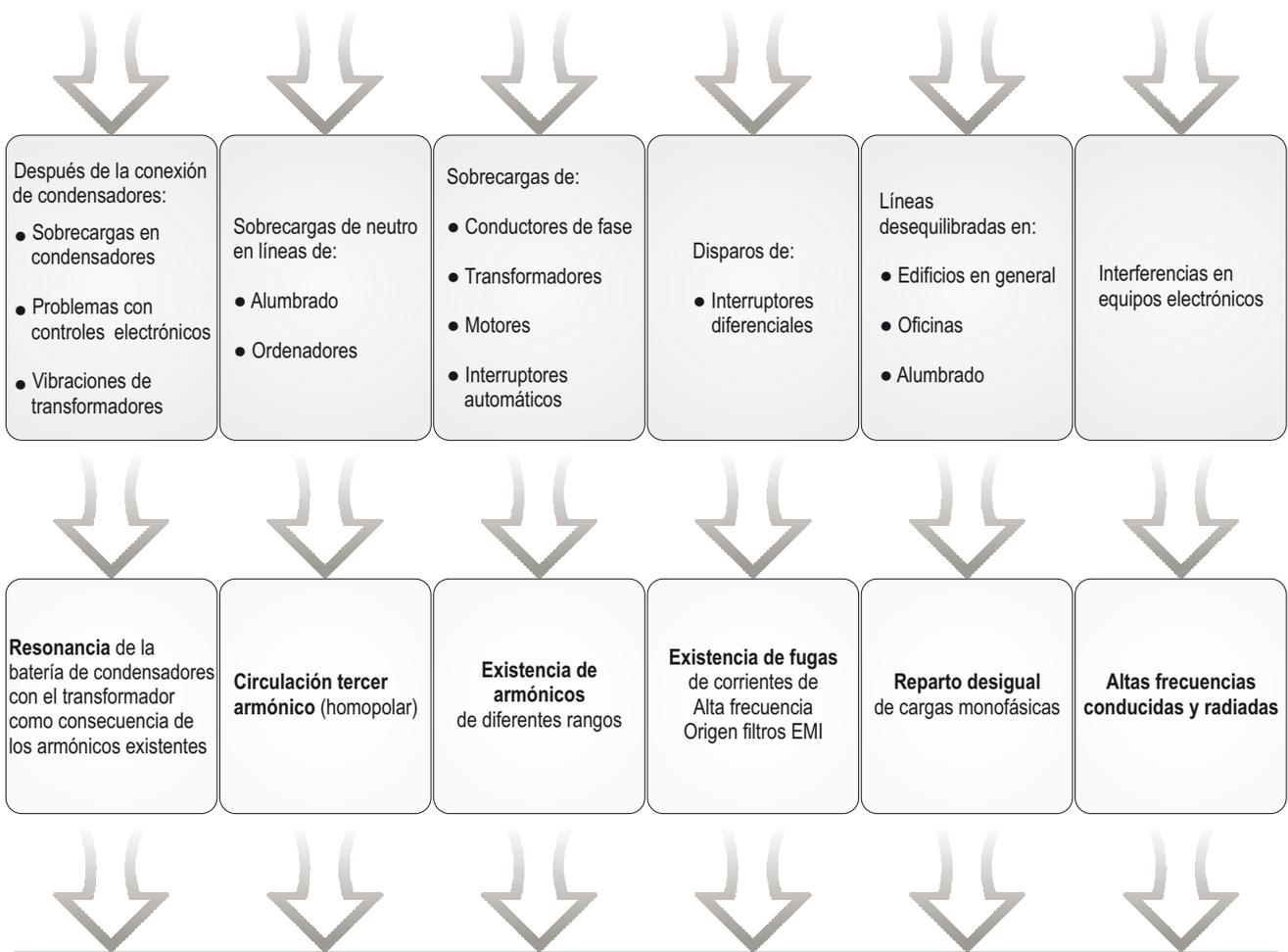
ESTRATEGIAS DE FILTRADO

Cuadro General	↔	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir el nivel de THD(<i>I</i>)% que se genera hacia la red (punto de acoplamiento común) • Disminuir la desclasificación del transformador
Cuadros Secundarios	↔	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir el valor eficaz de la corriente en las líneas de la instalación sin pérdida de potencia • Reducción de pérdidas • Circulación de corrientes distorsionantes hacia otros equipos • Ligera atenuación de THD(<i>I</i>)%
Filtrado Individual	↔	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir la corriente distorsionante y eficaz en el punto donde se genera • Reducción de las pérdidas en todo el sistema. • Circulación de corrientes distorsionantes hacia otros equipos • Mayor atenuación de THD(<i>I</i>)%

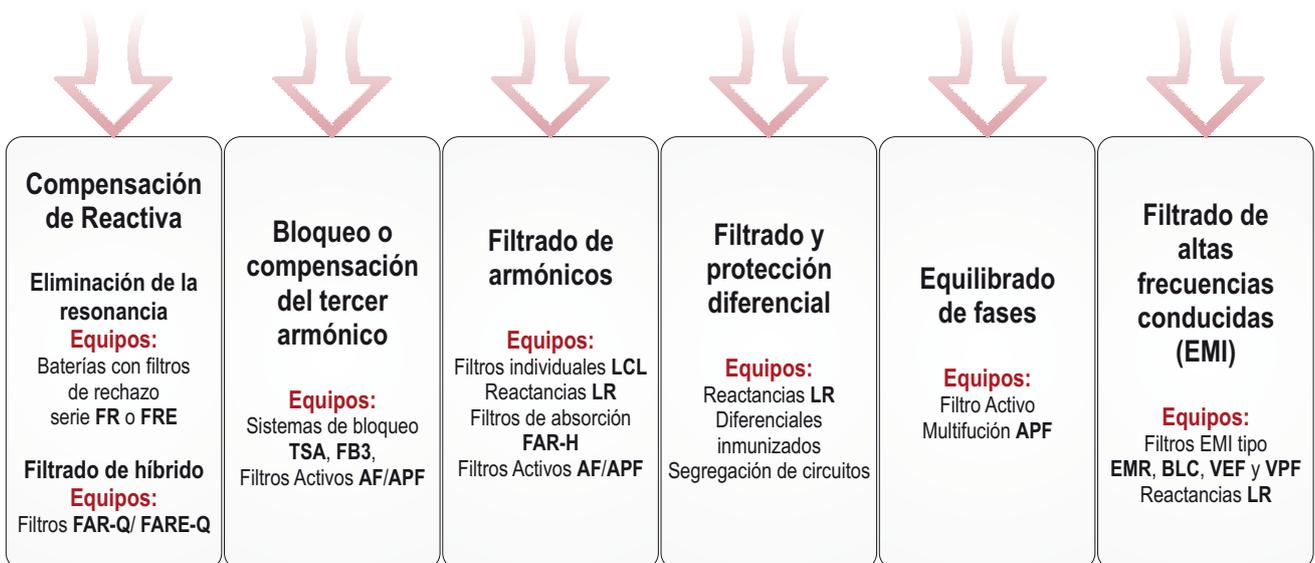
Como podemos comprobar no existe una procedimiento único, sino que en cada caso pueden aportarse diferentes soluciones dependiendo del punto donde se instalen los filtros.

No se puede generalizar, pero en la siguiente figura trataremos de representar algunas de las anomalías típicas que podemos encontrar y las diferentes soluciones que puede aportar **CIRCUTOR** al respecto.

Tipos de anomalías habituales



Soluciones y equipos CIRCUTOR



6. Resumen

Como hemos podido comprobar, la existencia de perturbaciones armónicas en nuestra instalación es cada vez mayor a medida que vamos introduciendo cargas distorsionantes en ella.

Los problemas a causa de los armónicos están bien definidos, y no podemos justificar cualquier incidencia que tengamos en la instalación solo por su presencia en ella. Los efectos se pueden manifestar de forma casi instantánea (fallo de interruptores, operaciones incorrectas en equipos estáticos, etc.) y a medio plazo (resonancia en batería de condensadores, sobrecalentamiento de transformadores, conductores y motores, error de medición de instrumentos de medida, pérdidas térmicas, etc.). Superando en solo 10 °C la temperatura máxima del aislamiento de conductores, motores o transformadores se reduce su vida útil prácticamente a la mitad.

Es muy importante seguir el proceso indicado para realizar el estudio y análisis de perturbaciones armónicas. Si omitimos alguno de los pasos, el proceso de medida y posterior estudio será complicado, y en muchos casos no podremos dar una posible solución eficaz a nuestra instalación.

Resumiendo, los pasos a seguir son los siguientes:

- Definir cuál es el objetivo del estudio
- Disponer de un esquema eléctrico de la instalación y como están distribuidas las cargas
- Definir puntos de medida e identificarlos en el esquema
- Nivel de carga durante las medidas
- Interpretar los datos medidos tratando de reconocer los efectos de los armónicos y/o en función de lo que establezcan los reglamentos, directivas o normas

A modo de ejemplo, mostramos algunas de las anomalías más comunes y algunas de sus posibles soluciones. El resultado que obtengamos irá en función de la estrategia de filtrado que utilicemos (Cuadro general, cuadro secundario y/o filtrado individual) y del proceso de estudio de la instalación. Es obvio, que con una medición en el cuadro general la capacidad para poder aportar alguna solución es escasa y limitada en muchos casos a aportar una solución en ese punto de medida.

Esta guía nos aporta los conocimientos esenciales para poder iniciarnos en el análisis de perturbaciones armónicas y poder establecer soluciones de una forma correcta y eficaz.

