

Julio 2006

TÍTULO

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 3: Límites

Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión

Publicación básica CEM

(IEC/TR 61000-3-6:1996)

Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3: Limits. Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems. Basic EMC publication (IEC/TR 61000-3-6:1996).

Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 3: Limites. Section 6: Evaluation des limites d'émission pour les charges déformantes raccordées aux réseaux MT et HT. Publication fondamentale en CEM (CEI/TR 61000-3-6:1996).

CORRESPONDENCIA

Este informe es idéntico al Informe Técnico IEC/TR 61000-3-6:1996.

OBSERVACIONES

Este informe fue sometido a información pública como PNE 21000-3-6 IN.

ANTECEDENTES

Este informe ha sido elaborado por el comité técnico AEN/CTN 208 *Compatibilidad Electromagnética* cuya Secretaría desempeña UNESA.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 30378:2006

© AENOR 2006
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

66 Páginas

Grupo 38

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	5
INTRODUCCIÓN	7
Capítulos	
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	8
2 NORMAS PARA CONSULTA	9
3 CONCEPTOS BÁSICOS	9
4 PRINCIPIOS GENERALES	13
5 MÉTODO GENERAL DE EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE EMISIÓN	15
5.1 Evaluación de la inyección armónica debida a las cargas perturbadoras	15
5.2 Impedancia armónica	17
5.2.1 Método simplificado de evaluación	17
5.2.2 Cálculo manual detallado.....	19
6 LEYES DE ADICIÓN	19
6.1 Primera ley de adición	20
6.2 Segunda ley de adición	21
7 LÍMITES DE EMISIÓN DE LAS CARGAS PERTURBADORAS EN LAS REDES DE MT	22
7.1 Etapa 1: evaluación simplificada de la emisión de perturbación.....	22
7.1.1 Criterio de la potencia perturbadora ponderada.....	23
7.1.2 Criterios de las corrientes armónicas relativas	24
7.2 Etapa 2: límites de emisión en función de las características efectivas de la red	24
7.2.1 Procedimiento simplificado de la primera ley de adición.....	24
7.2.2 Procedimiento general de la segunda ley de adición.....	26
7.3 Etapa 3: aceptación de los niveles de emisión más altos a título excepcional y en precario.....	31
8 LÍMITES DE EMISIÓN DE LAS CARGAS PERTURBADORAS EN LAS REDES DE AT	31
8.1 Etapa 1: evaluación simplificada de la emisión de perturbación.....	31
8.2 Etapa 2: límites de emisión en función de las características efectivas de la red	32
8.2.1 Evaluación de la potencia total disponible.....	32
8.2.2 Límites de emisión individual	33
8.3 Etapa 3: aceptación de niveles de emisión más altos a título excepcional y en precario..	35
9 LÍMITES DE EMISIÓN DE INTERARMÓNICOS	35
10 LÍMITES DE EMISIÓN RELATIVOS A LAS INTERFERENCIAS TELEFÓNICAS ..	36

ANEXO A (Informativo)	EJEMPLO DE PROCEDIMIENTO POR LA "CARACTERÍSTICA DE IMPEDANCIA MÁS DESFAVORABLE" (como se practica en el Reino Unido).....	37
ANEXO B (Informativo)	EJEMPLO DE CÁLCULO MANUAL DE LA IMPEDANCIA ARMÓNICA DE UNA RED MT EN EL PCC (como se practica en alemania)	38
ANEXO C (Informativo)	EJEMPLO DE MÉTODOS PARTICULARES PARA LA APLICACIÓN DE LOS LÍMITES DE LA ETAPA 1 EN LAS REDES DE MEDIA TENSIÓN (como se practica en el Reino Unido)	44
ANEXO D (Informativo)	CASO GENERAL DE LAS CARGAS EN MT REPARTIDAS A LO LARGO DE UNA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN: REPARTO DE LA EMISIÓN	45
ANEXO E (Informativo)	EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS PROPUESTOS PARA EVALUAR LOS LÍMITES DE EMISIÓN ...	50
ANEXO F (Informativo)	EJEMPLOS DE CASOS TÍPICOS EN AT [12]	58
ANEXO G (Informativo)	LISTA DE LOS PRINCIPALES SÍMBOLOS ALFABÉTICOS.....	62
ANEXO H (Informativo)	BIBLIOGRAFÍA.....	65

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 3: Límites

Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión

Publicación básica CEM

PRÓLOGO

- 1) IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) es una organización mundial para la normalización, que comprende todos los comités electrotécnicos nacionales (Comités Nacionales de IEC). El objetivo de IEC es promover la cooperación internacional sobre todas las cuestiones relativas a la normalización en los campos eléctrico y electrónico. Para este fin y también para otras actividades, IEC publica Normas Internacionales. Su elaboración se confía a los comités técnicos; cualquier Comité Nacional de IEC que esté interesado en el tema objeto de la norma puede participar en su elaboración. Organizaciones internacionales gubernamentales y no gubernamentales relacionadas con IEC también participan en la elaboración. IEC colabora estrechamente con la Organización Internacional de Normalización (ISO), de acuerdo con las condiciones determinadas por acuerdo entre ambas.
- 2) Las decisiones formales o acuerdos de IEC sobre materias técnicas, expresan en la medida de lo posible, un consenso internacional de opinión sobre los temas relativos a cada comité técnico en los que existe representación de todos los Comités Nacionales interesados.
- 3) Los documentos producidos tienen la forma de recomendaciones para uso internacional y se publican en forma de normas, informes técnicos o guías y se aceptan en este sentido por los Comités Nacionales.
- 4) Con el fin de promover la unificación internacional, los Comités Nacionales de IEC se comprometen a aplicar de forma transparente las Normas Internacionales de IEC, en la medida de lo posible en sus normas nacionales y regionales. Cualquier divergencia entre la Norma IEC y la correspondiente norma nacional o regional debe indicarse de forma clara en ésta última.
- 5) IEC no establece ningún procedimiento de marcado para indicar su aprobación y no se le puede hacer responsable de cualquier equipo declarado conforme con una de sus normas.
- 6) Se debe prestar atención a la posibilidad de que algunos de los elementos de esta Norma Internacional puedan ser objeto de derechos de patente. No se podrá hacer responsable a IEC de identificar alguno o todos esos derechos de patente.

La tarea principal de los comités técnicos de IEC es la de preparar las Normas Internacionales. En circunstancias excepcionales un comité técnico puede proponer la publicación de un informe técnico de uno de los tipos siguientes:

- tipo 1, cuando no puede obtenerse el apoyo requerido para la publicación de una Norma Internacional a pesar de repetidos esfuerzos;
- tipo 2, cuando el contenido está todavía bajo desarrollo técnico o si por cualquier otra razón existe una futura pero no inmediata posibilidad de acuerdo sobre una Norma Internacional;
- tipo 3, cuando un comité técnico ha reunido datos de naturaleza diferente de aquellos que son normalmente publicados como Normas Internacionales, como por ejemplo las informaciones sobre el "estado de la técnica".

Los informes técnicos de los tipos 1 y 2 están sujetos a revisión dentro de los tres años siguientes a su publicación para decidir si pueden ser transformados en Normas Internacionales. Los informes técnicos de tipo 3 no tienen necesariamente que ser revisados hasta que los datos que contienen dejen de tener validez o utilidad.

La IEC 61000-3-6, que es un informe técnico de tipo 3, ha sido elaborada por el subcomité 77A: *Fenómenos de baja frecuencia*, del comité técnico 77 de IEC: *Compatibilidad electromagnética*.

El texto de este informe técnico se basa en los documentos siguientes:

Proyecto de comité	Informe de voto
77A/135/CDV	77A/153/RVC

El informe de voto indicado en la tabla anterior ofrece toda la información sobre la votación para la aprobación de este informe técnico.

Los anexos A, B, C, D, E, F, G y H se dan sólo para información.

INTRODUCCIÓN

Este informe técnico es una parte de la serie IEC 61000, de acuerdo con la siguiente estructura:

Parte 1: Generalidades

Consideraciones generales (introducción, principios fundamentales)

Definiciones, terminología

Parte 2: Entorno

Descripción del entorno

Clasificación del entorno

Niveles de compatibilidad

Parte 3: Límites

Límites de emisión

Límites de inmunidad (en la medida en que no están bajo la responsabilidad de los comités de producto)

Parte 4: Técnicas de ensayo y medida

Técnicas de medida

Técnicas de ensayo

Parte 5: Guías de instalación y atenuación

Guías de instalación

Métodos y dispositivos de atenuación

Parte 6: Varios

Cada parte está a su vez subdividida en secciones que serán publicadas como normas internacionales, o como informes técnicos.

Esta sección es un informe técnico.

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 3: Límites
Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas
perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión
Publicación básica CEM

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Este informe técnico presenta los principios que sirven de base para la determinación de los requisitos a cumplir en las conexiones de las cargas perturbadoras de gran potencia (produciendo armónicos y/o interarmónicos) en la red general. El objetivo principal es proporcionar indicaciones sobre las prácticas de ingeniería que aseguren una calidad de servicio adecuada a todos los usuarios de una misma red.

El procedimiento aconsejado en este documento que responde necesariamente a ciertas hipótesis simplificadoras, no garantiza que este procedimiento facilite siempre la solución óptima a todos los problemas de armónicos. La aplicación total o parcial de los procedimientos de evaluación recomendados se debería practicar con flexibilidad y revisar por un ingeniero.

La decisión final relativa a la conexión de las instalaciones, incluyendo cargas perturbadoras, será siempre competencia del distribuidor.

Los problemas ligados a los armónicos corresponden a dos categorías principales:

- Las corrientes armónicas se inyectan en la red de alimentación por convertidores y otras fuentes de armónicos. Tanto las corrientes armónicas como las tensiones resultantes se consideran como un fenómeno conducido. El objetivo de este informe es limitar las tensiones armónicas efectivas en la red de alimentación a niveles (de compatibilidad) que no se traducirán en efectos nocivos para los equipos sensibles. Las tensiones armónicas resultan de las corrientes armónicas y de las impedancias; esto implica limitar las corrientes armónicas insertadas en la red.
- Las corrientes armónicas entre 50 Hz y 5 kHz pueden inducir interferencias en los sistemas de comunicación. Este fenómeno está más marcado por los armónicos de orden elevado debido a un acoplamiento más importante entre los circuitos y también por la más fuerte sensibilidad de los circuitos de comunicación en la banda de las frecuencias audibles.

Este informe trata en primer lugar del control o de la limitación de las tensiones armónicas y de sus efectos, pero se consagra un capítulo a las interferencias telefónicas.

NOTA 1 El término carga se entiende como el que representa a la instalación completa del usuario.

NOTA 2 Este informe define el sistema de tensiones en los términos siguientes:

- | | |
|-------------------------------|--|
| - baja tensión (BT) para | $U_n \leq 1 \text{ kV};$ |
| - media tensión (MT) para | $1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV};$ |
| - alta tensión (AT) para | $35 \text{ kV} < U_n \leq 230 \text{ kV};$ |
| - muy alta tensión (MAT) para | $230 \text{ kV} < U_n$ |

En el contexto de este informe, la función de la red es más importante que su tensión nominal. Por ejemplo se puede atribuir a una red de AT utilizada para la distribución, un "nivel de planificación" (véase el capítulo 3) que se sitúa entre esas redes de MT y de AT.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Las normas que a continuación se relacionan contienen disposiciones válidas para esta norma internacional. En el momento de la publicación estaban en vigor las ediciones indicadas. Toda norma está sujeta a revisión por lo que las partes que basen sus acuerdos en esta norma internacional deben estudiar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de las normas indicadas a continuación. Los miembros de IEC y de ISO poseen el registro de las normas internacionales en vigor en cada momento.

IEC 60050(161):1990 *Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad Electromagnética.*

IEC 61000-2-2:1990 *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 2: Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público de baja tensión.*

IEC 61000-3-2:1995 *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 2: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada $\leq 16 A$ por fase).*

IEC 61000-4-7:1991 *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida. Sección 7: Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.*

3 CONCEPTOS BÁSICOS

Se deberían definir los límites de emisión para los equipos individuales o para el conjunto de la carga de un usuario a partir de criterios de calidad de tensión. Se utilizan algunos conceptos básicos para definir esos criterios de calidad de tensión. Para que estos puedan llevar a valoraciones significativas, se definen en función del lugar donde se aplican, y de la forma en que son medidos y calculados (tiempo de medición, tiempo de muestreo, periodo de medida de la media, estadísticas). Estos conceptos se describen aquí y se representan en las figuras 1 y 2. Se puede encontrar las definiciones en la Norma IEC 60050 (161).

Niveles de compatibilidad

Son valores de referencia (véase la tabla 1) que permiten coordinar la emisión y la inmunidad de los equipos que forman parte de, o son alimentados por una misma red, para asegurar la CEM en el conjunto del sistema, comprendiendo la red misma y las instalaciones a ella conectadas. Los niveles de compatibilidad generalmente se basan en una probabilidad que no excede del 95% para el conjunto de la red, sobre la base de distribuciones que representan las variaciones de las perturbaciones a la vez en el tiempo y en el espacio. El margen representa el hecho de que un distribuidor no puede garantizar los niveles en todos los puntos de la red y en todo momento. Por ello, es deseable que los niveles de compatibilidad se evalúen sobre el conjunto de una red; no hay método de evaluación en un punto específico.

Los niveles de compatibilidad relativos a las tensiones armónicas para las redes de BT y MT, se representan en la tabla 1.

**Tabla 1 – Niveles de compatibilidad de las tensiones armónicas
(en porcentaje de la tensión nominal fundamental) en las redes de BT y MT**

Órdenes impares no múltiplos de 3		Órdenes impares múltiplos de 3		Órdenes pares	
Orden h	Tensión armónica %	Orden h	Tensión armónica %	Orden h	Tensión armónica %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2 + $1,3 \cdot (25/h)$				

NOTA Tasa total de distorsión armónica (THD): 8%.

Niveles de planificación

Se trata de niveles que se pueden utilizar para fines de planificación en la evaluación del impacto sobre la red del conjunto de las cargas de todos los usuarios. Los niveles de planificación se especifican por el distribuidor de electricidad para todos los niveles de tensión de la red, y se pueden considerar objetivos internos de calidad. Los niveles de planificación son inferiores o iguales a los niveles de compatibilidad. Sólo se pueden dar unos valores indicativos porque los casos diferirán, según la estructura de la red y las circunstancias. A título de ejemplo, se presentan niveles de planificación de tensiones armónicas en la tabla 2.

**Tabla 2 – Valores indicativos de niveles de planificación de tensiones armónicas
(en porcentaje de la tensión nominal) en MT, AT y MAT¹⁾**

Órdenes impares no múltiplos de 3			Órdenes impares múltiplos de 3			Órdenes pares		
Orden h	Tensión armónica %		Orden h	Tensión armónica %		Orden h	Tensión armónica %	
	MT	AT-MAT		MT	AT-MAT		MT	AT-MAT
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	>21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						
> 25	0,2 + $0,5 \frac{25}{h}$	0,2 + $0,5 \frac{25}{h}$						

NOTA Tasa total de distorsión armónica (THD): 6,5% en redes de MT y 3% en redes de AT.

1) Una tensión U_2 del 1,5% puede parecer demasiado fuerte para una red de AT, pero se pueden encontrar esos valores y es conveniente recordar que la presencia de un armónico de orden 2 no está necesariamente ligado a una componente continua.

No está previsto utilizar los niveles de planificación de la tabla 2 para control de armónicos debidos a casos incontrolables tales como las tormentas geomagnéticas, etc.

En el resto de este informe se presentan los procedimientos para utilizar estos niveles de planificación en la evaluación de las reglas de conexión de usuarios individuales.

Procedimiento de evaluación

La Norma IEC 61000-4-7 es la norma básica que se debe utilizar para la medición de los armónicos e interarmónicos. Para comparar los niveles de armónicos reales con los niveles de planificación, el tiempo mínimo de medición debería ser de una semana.

- El mayor valor diario, con un 95% de probabilidad, de los $U_{h,vs}$ (valor eficaz de cada componente armónica, tomado como la media cuadrática en un periodo “muy corto” de 3 s.) no debería exceder el del nivel de planificación.
- El valor máximo semanal de $U_{h,sh}$ (valor eficaz de cada componente armónica, tomada como la media cuadrática en un periodo “corto” de 10 min.) no debería exceder el del nivel de planificación.
- El valor máximo semanal de $U_{h,vs}$ no debería exceder de 1,5 a 2 veces el del nivel de planificación.

NOTA Los armónicos generalmente se miden hasta $h = 40$. Esto es adecuado en la mayor parte de los casos para evaluar los efectos de distorsión de las perturbaciones de potencia. No obstante, en ciertos casos puede ser importante estudiar los armónicos alcanzando un orden de 100. Entre los ejemplos citamos:

- los convertidores de gran potencia con conmutación de tensión por impulsos;
- las grandes instalaciones con convertidores con un número de pulsos elevado (por ejemplo fábricas de producción de aluminio);
- los equipos de potencia electrónica de diseño reciente equipados con un convertidor de modulación de anchura de impulsos (PWM) del lado de la red de alimentación.

De estos casos pueden resultar ruidos inducidos en los equipos sensibles cercanos (por ejemplo, los captadores, los sistemas de comunicación, etc.). Se constata generalmente que los armónicos de orden más alto varían más según el lugar y la hora que los armónicos de orden más bajo. En muchos casos, los armónicos de orden alto son producidos por un solo usuario, a menudo en combinación con una resonancia en la red. (Se pueden necesitar análisis más desarrollados cuando se trata de armónicos de orden alto).

Las figuras 1 y 2 ilustran los conceptos básicos descritos anteriormente. Éstos se establecen para poner en evidencia las relaciones más importantes entre las variables básicas.

Las interferencias sobrevienen inevitablemente en ciertas ocasiones en todo el sistema de distribución (figura 1), y es el motivo del solapamiento entre las distribuciones de los niveles de perturbación y de inmunidad. Generalmente los niveles de planificación son inferiores o iguales a los niveles de compatibilidad; son específicos para la explotación de la red. Los niveles a aplicar en los ensayos de inmunidad se especifican según normas adecuadas o convenios entre el fabricante y el usuario.

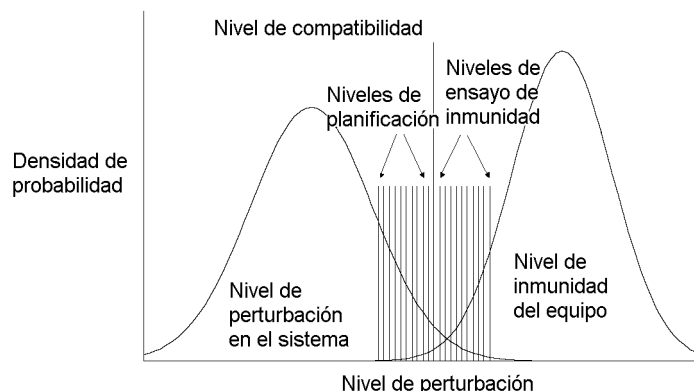


Figura 1 – Ilustración de los conceptos fundamentales de la calidad de tensión por medio del resultado estadístico relativo al tiempo y en todos los lugares del sistema

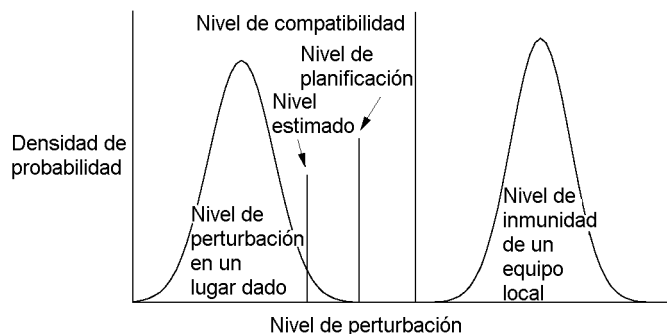


Figura 2 – Ilustración de los conceptos fundamentales de la calidad de tensión por medio del resultado estadístico relativo al tiempo en un lugar dado del sistema

Tal como se muestra en la figura 2, las distribuciones de probabilidad del nivel de perturbación y del nivel de inmunidad sin importar el lugar dado son más estrechos que las del sistema entero, de tal manera que no hay solapamiento o hay muy poco entre las distribuciones de los niveles perturbación y de inmunidad. El riesgo de interferencia es entonces menor y los equipos funcionan correctamente; eso significa que la CEM es más probable que la que permite suponer la figura 1.

Niveles de emisión

En cada frecuencia armónica o interarmónica, el nivel de emisión de una carga perturbadora es la tensión (o la corriente) armónica o interarmónica, que sería producida en la red de alimentación en ausencia de cualquier carga perturbadora.

Se debería adoptar un periodo mínimo de medición de una semana para comparar la emisión de corriente armónica de la carga total de un usuario con los límites de emisión.

- El mayor valor diario en un 95%, en media cuadrática de las muestras en un periodo muy corto de 3 s, para cada armónico ($I_{h,vs}$ diario en un 95%), no debería exceder del límite de emisión.
- El mayor valor semanal, en media cuadrática de las muestras en un periodo corto de 10 min., para cada armónico ($I_{h,sh}$ semanal), no debería exceder del límite de emisión.
- El mayor valor semanal $I_{h,vs}$ no debería exceder 1,5 a 2 veces el límite de emisión.
- Se debería limitar igualmente las emisiones armónicas transitorias (duración < 3 s), por ejemplo respecto a las teleseñalizaciones de la red. Este problema está en estudio.

En la práctica, estos niveles son evaluados generalmente a partir de los datos correspondientes a la carga y la red; su medición directa (véase la Norma IEC 61000-4-7) es difícil de hacer por la presencia de numerosas cargas perturbadoras (está en estudio otro informe técnico sobre el asunto).

4 PRINCIPIOS GENERALES

El procedimiento propuesto para evaluar la aceptabilidad de cargas perturbadoras depende de la potencia suscrita por el usuario, de la potencia del equipo que produce armónicos y de las características de la red. El objetivo es la limitación de inyección, proveniente de la carga total de los usuarios individuales, a niveles que no impliquen la deformación de la tensión excediendo los niveles de planificación. Se definen tres etapas de evaluación que se pueden usar de forma secuencial o independiente (véase la figura 3)

Etapas 1: evaluación simplificada de la emisión de perturbación

Generalmente se admite que los usuarios instalen aparatos pequeños sin evaluación específica de la emisión armónica por el distribuidor de energía. Los fabricantes de esos aparatos son responsables generalmente de la limitación de las emisiones. Por ejemplo, la Norma IEC 61000-3-2 es una norma de familia de productos que define los límites de emisión armónica para los equipos conectados a las redes de BT. No existe actualmente una norma de emisión correspondiente a los equipos de MT por las razones siguientes:

- la media tensión varía entre 1 kV a 35 kV;
- ninguna impedancia de referencia ha sido definida de manera internacional para las redes de media tensión.

En algunos países, los distribuidores de electricidad pueden establecer impedancias de referencia nacionales para las redes MT y BT que les permitan definir los límites de emisión en corriente armónica, y conectar las cargas de los usuarios según el procedimiento de la etapa 1 sin una evaluación detallada.

Incluso en ausencia de impedancia de referencia, es posible determinar unos criterios de aceptación cuasi automáticos en la red de MT (e incluso de AT). Por ejemplo, puede ser ventajoso utilizar una “potencia perturbadora ponderada” (véase el apartado 7.1.1), como una estimación de la cantidad total de carga perturbadora en el interior de la instalación de un usuario. Si la carga perturbadora total (o la potencia suscrita por el usuario) es baja en relación con la potencia de cortocircuito en el PCC, no debería ser necesario proceder a una evaluación detallada.

En el capítulo 7 se desarrollan criterios particulares para la aplicación de la etapa 1.

Etapas 2: límites de emisión en función de las características efectivas de la red

Si una carga no cumple los criterios de la etapa 1, se debería evaluar las características específicas de los equipos generadores de armónicos al mismo tiempo que la capacidad de absorción de la red. Ello se deduce de los niveles de planificación y se reparte entre los usuarios individuales en función de su potencia suscrita conectada a la potencia total disponible de la red. En la atribución de los niveles de planificación a los usuarios individuales de media tensión, se debería tener en cuenta también el nivel de las perturbaciones provenientes de las redes de alta tensión.

El principio de este procedimiento es que si la red esta a plena carga y si todos los usuarios inyectan hasta sus límites individuales, el nivel total de las perturbaciones es igual al nivel de planificación. El capítulo 7 describe un procedimiento de reparto del nivel de planificación entre los usuarios individuales.

Etapas 3: aceptación de los niveles de emisión más altos a título excepcional y en precario

En casos especiales, un usuario puede desear poder emitir perturbaciones excediendo los límites básicos autorizados en la etapa 2. Entonces el usuario y el distribuidor pueden ponerse de acuerdo sobre las condiciones especiales que permitan la conexión. Se tiene que realizar un estudio en profundidad de las características efectivas actuales y futuras de la red para determinar esas condiciones especiales.

NOTA Los límites de emisión resultantes de la aplicación de los métodos recomendados en los capítulos 7, 8 y 9 son considerados para mantener los niveles armónicos por debajo de los niveles de planificación. Se recomienda limitar las interferencias con las redes de comunicación con la aplicación de otros métodos citados en el capítulo 10.

Responsabilidades

El usuario es responsable del mantenimiento de las emisiones que produce en el PCC por debajo de los límites especificados por el distribuidor.

NOTA Este informe trata principalmente de las emisiones. Sin embargo, la absorción armónica también puede ser un problema si se conectan filtros o baterías de condensadores sin haber tomado precauciones de uso en lo que corresponde a las interacciones con los armónicos preexistentes normalmente en la red de potencia. Así, la absorción armónica forma también parte de la responsabilidad del usuario.

El distribuidor es responsable del control global de los niveles de perturbación en condiciones normales de explotación, de acuerdo con las reglas nacionales.

El distribuidor tiene que suministrar las características de la red que permitan las valoraciones necesarias. El procedimiento de evaluación (véase la figura 3) está diseñado de manera que las emisiones de armónicos provenientes de los usuarios no excedan los niveles de planificación y de compatibilidad de las tensiones armónicas del conjunto de la red. No obstante, no se garantiza que el procedimiento recomendado evite en todos los casos el que se sobrepasen estos niveles.

Finalmente, el distribuidor y el usuario deberían cooperar lo necesario para identificar el método óptimo que permita reducir las emisiones. El estudio y la elección ligados al método son de la responsabilidad del usuario.

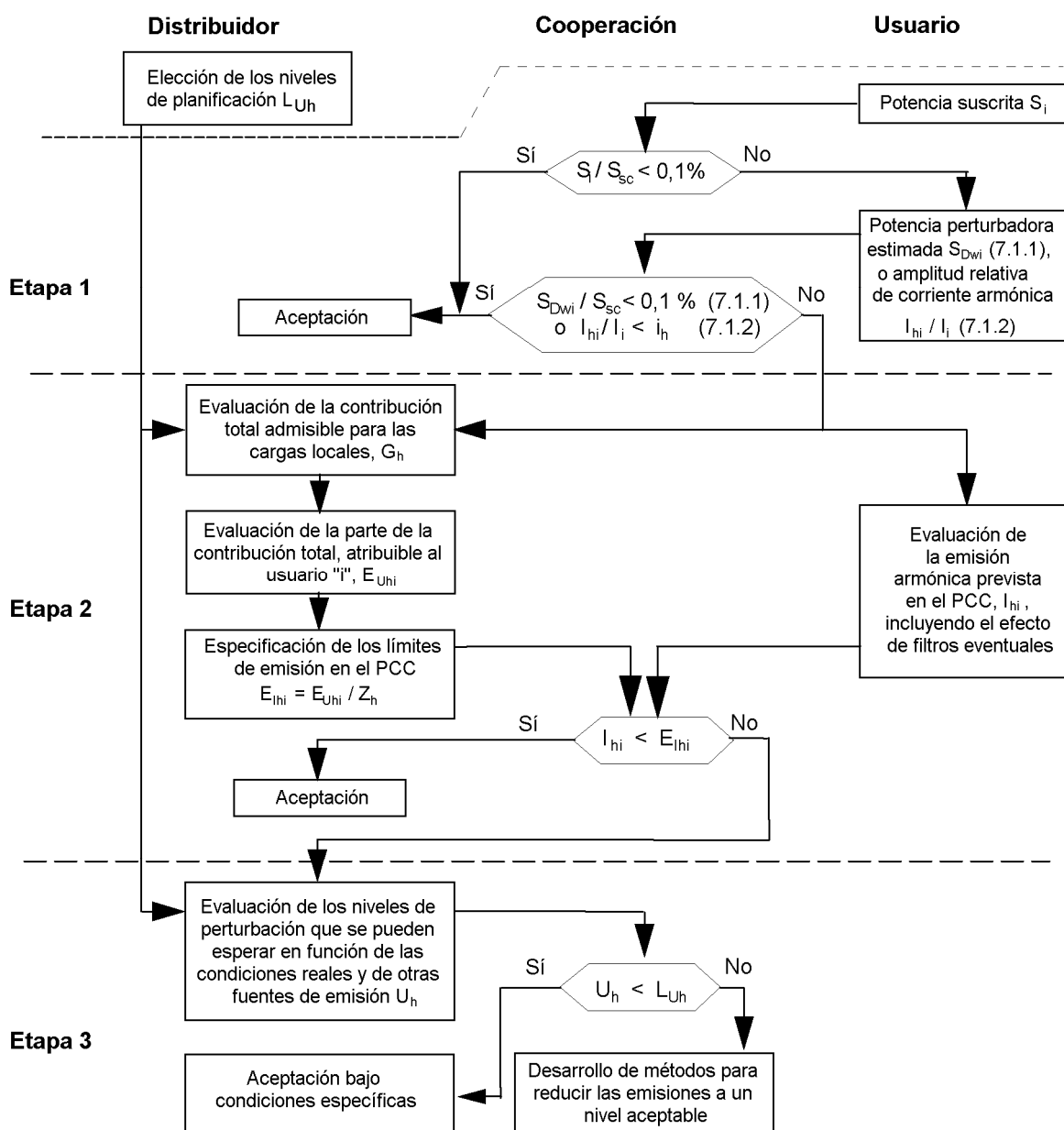


Figura 3 – Diagrama del procedimiento de evaluación

5 MÉTODO GENERAL DE EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE EMISIÓN

5.1 Evaluación de la inyección armónica debida a las cargas perturbadoras

Este capítulo está destinado a servir de guía para la evaluación de las inyecciones de armónicos provenientes de cargas perturbadoras teniendo en cuenta diversas condiciones de explotación no ideales que se pueden encontrar en las redes eléctricas y en las instalaciones de los usuarios. Se encontrarán indicaciones más detalladas sobre la estimación de los +niveles de emisión en la alimentación eléctrica de las instalaciones industriales en otra publicación de IEC [1]²⁾.

2) Las cifras entre corchetes remiten a la bibliografía dado en el anexo H.

Condiciones de explotación de las cargas perturbadoras

La evaluación de la inyección armónica derivada de las cargas perturbadoras debería cumplir las condiciones normales de explotación más desfavorables que comprenden los funcionamientos con interrupciones del servicio pudiendo prolongarse durante unos periodos significativos (por ejemplo, el fallo de uno de los rectificadores de 6 pulsos de una gran instalación de rectificadores multifásicos).

Para casos sencillos, se puede evaluar la inyección armónica proveniente de la carga de un usuario dado tomando la corriente máxima, para cada frecuencia armónica e interarmónica, que se pueda producir por cada equipo sobre la totalidad de su gama de operatividad. En el caso de cargas de gran potencia, este procedimiento puede conducir a resultados demasiado conservadores. Inversamente, se puede considerar un conjunto de corrientes armónicas e interarmónicas representativas de las condiciones de explotación simultáneas más desfavorables del conjunto del equipo para evaluar la inyección armónica máxima proveniente de estas cargas perturbadoras.

Condiciones de explotación no ideales

En la práctica, se encuentra inevitablemente un cierto grado de asimetría en la red de alimentación y en el equipamiento de los usuarios que genera armónicos no característicos. Estos armónicos no característicos pueden ser bajos comparados con los armónicos característicos, pero para ciertos tipos de cargas, como las que varían permanentemente y las grandes instalaciones de rectificadores con número alto de pulsos, es necesario incluirlos en el cálculo de las perturbaciones.

Es preciso tener en cuenta las condiciones no ideales siguientes.

- Desequilibrio de la tensión de alimentación:

La presencia de una componente inversa en la tensión de alimentación trifásica producirá generalmente armónicos impares de componente directa y/o inversa múltiplos de tres; se debería, a título de condiciones no ideales de explotación de una red en régimen permanente, tener en cuenta un desequilibrio de tensión (de hasta un 2%).

- Transformadores con convertidores y desequilibrio de la impedancia de conmutación:

Las tolerancias de fabricación en la relación de transformación (nunca exactamente igual a $\sqrt{3}$) y sobre las reactancias entre dos transformadores de un convertidor dodecafásico generan armónicos no característicos que normalmente no existen más que en un convertidor hexafásico. La asimetría de la impedancia de conmutación entre fases genera armónicos no característicos dependiendo igualmente de los acoplamientos de los transformadores.

- Asimetría de los ángulos de disparo:

Las desviaciones en los momentos de disparo de los semiconductores generan armónicos de cualquier orden. Estas desviaciones dependen del diseño de los circuitos de disparo.

- Desajuste de los filtros:

Cuando los filtros de armónicos se necesitan para respetar los límites de emisión, se deberían tener igualmente en cuenta en la evaluación de las perturbaciones armónicas las variaciones de las frecuencias de ajustes, especialmente las debidas a los parámetros siguientes:

- variación de la frecuencia de la red pudiendo sobrevenir en régimen permanente;
- variaciones de la frecuencia de ajuste debidas a las desviaciones en el valor de las componentes del filtro, ya sea debido a tolerancias de fabricación o a variaciones ligadas a la temperatura;
- envejecimiento de las componentes del filtro;
- conmutación programada de los filtros y de las baterías de condensadores en función de la carga.

5.2 Impedancia armónica

La mayor parte de las cargas perturbadoras se comportan como fuentes de corrientes armónicas. Es necesario conocer la impedancia armónica de la red vista del PCC para prever las tensiones armónicas que pueden aparecer después de la conexión de la carga. Son también necesarios cálculos para evaluar las tensiones de otros puntos de la red de alimentación debidos a las corrientes armónicas en la carga.

La evaluación de la impedancia armónica puede, sin embargo, revelarse muy compleja. Existen varios métodos de cálculo y de medición, pero ninguno enteramente satisfactorio. Incluso el mejor programa informático o el mejor analizador de red no puede dar una solución por falta de datos fiables. Por otra parte, la impedancia armónica de la red puede variar de forma significativa en el tiempo.

Está disponible una publicación internacional titulada “Guía para la evaluación de la impedancia armónica de la red” [2]. El texto a continuación da unas indicaciones para llevar a cabo cálculos manuales que son suficientemente precisos en la mayor parte de los casos, especialmente para los problemas ligados a las redes de MT.

5.2.1 Método simplificado de evaluación

En la figura 4 se representan varios casos básicos referidos a una red simplificada.

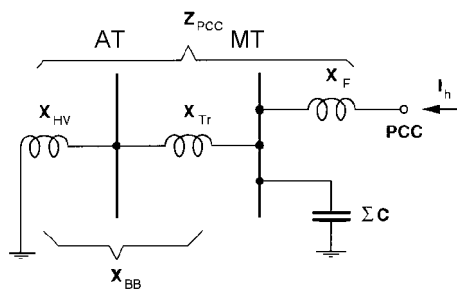


Figura 4 – Esquema equivalente de la red para la estimación de la “curva envolvente de la impedancia”

Z_h directamente proporcional a la frecuencia

En instalaciones simples, desprovistas de condensadores importantes para corrección del factor de potencia y de las redes por cables de largo alcance (ΣC despreciable en la figura 4), es poco probable encontrar condiciones de resonancia a unas frecuencias inferiores a la del armónico de orden 13. En este caso, se puede considerar que Z_h es principalmente inductivo y puede evaluarse aproximadamente como sigue:

$$Z_h = h \cdot X_{IPCC} = h \cdot (X_{IHV} + X_{ITr} + X_{IF}) \quad (1)$$

Se puede utilizar este procedimiento con una precisión razonable (normalmente mejor que $\pm 20\%$) si:

- el juego de barras de MT se alimenta a través de un transformador cuya reactancia X_{Tr} es alta con relación a la reactancia de la alimentación de alta tensión X_{AT} ;
- $X_{Tr}/X_{AT} > 10$ si hay posibilidad de una resonancia sobre los circuitos de alta tensión en la gama de frecuencias estudiada;
- $X_{Tr}/X_{AT} > 4$ si una resonancia de los circuitos de alta tensión es poco verosímil en la gama de frecuencias estudiada;
- el valor total de los condensadores conectados al secundario es tan bajo que la frecuencia de resonancia es, al menos, 2,5 veces la frecuencia armónica más alta del estudio.

Z_h con resonancia paralela simple

Normalmente se estima la primera frecuencia de resonancia paralela con la ayuda de:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

donde

L es la inductancia de fase correspondiente a X_{1BB} y C es la capacidad total para la fase (fase-neutro) teniendo en cuenta a la vez los condensadores de factor de potencia y las capacidades de los cables.

Por otra parte, se puede estimar f_r también con la ayuda de:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (3)$$

donde

f_1 es la frecuencia fundamental, S_{cc} es la potencia de cortocircuito en el juego de barras del sistema y Q_c es la potencia reactiva total producida por los condensadores y los cables del sistema.

Las estimaciones de la frecuencia de resonancia paralela f_r son un procedimiento que supone que todas las componentes capacitivas están unidas al juego de barras. El valor resultante de Z_h visto del PCC es entonces la suma de dos componentes [X_{1BB} en paralelo con C] + X_F] tal como se representa en la figura 4.

Alrededor del punto de resonancia, este método da, sin embargo, una impedancia resultante demasiado alta. Para calcular el valor correcto, se debería tener en cuenta las componentes resistentes de las impedancias de la red. Las componentes resistentes a las frecuencias armónicas son, sin embargo, muy difíciles de determinar en casos prácticos. Es por lo que se recomienda calcular el valor de Z_h únicamente con L y C despreciando la componente resistiva y limitar el resultado de forma que el factor de amplificación en la resonancia ($k = Z_h / h \cdot X_{IPCC}$) no sea superior en 3 ó 10 veces menor. El valor más bajo es válido para las redes donde la carga es alta y el valor más alto para redes que tengan una carga muy baja. Normalmente, el factor de amplificación de la resonancia no excede de 5 en las redes generales, pero puede alcanzar 8 a 10 en algunas redes industriales en condiciones de carga poco altas o de carga esencialmente debida a los motores.

Caso general: método de la “curva envolvente de las impedancias”

La complejidad de las redes de distribución y de las instalaciones a la que están conectadas generalmente es la causa de resonancias múltiples. Estas resonancias tienen su origen en unos condensadores destinados al equipo de compensación de potencia reactiva o en los de sistemas de filtros así como en la capacidad de los cables y de las líneas. Además la estructura de la red no es fija, de manera que la impedancia varía en función de las diversas configuraciones de la red o de las diferentes cargas. Hay más resonancias cuanto más complejo sea el sistema. Un condensador adicional, por ejemplo en el PCC de la figura 4, es causa de una segunda resonancia (C_{PCC} en paralelo con X_F) en una frecuencia normalmente superior a la de la primera resonancia.

En las redes de MT normales, la primera resonancia está moderadamente amortiguada con un coeficiente “ k ” de 2 a 5, como se ha mostrado antes. La segunda resonancia, así como las resonancias de orden superior, tienen a menudo una amortiguación inferior a la de la primera. (En esos casos, variaciones rápidas de tensión como los que provienen de los impulsos de conmutación conducen a oscilaciones amortiguadas.) Sin embargo, la experiencia demuestra que la relación $Z_h/(h \cdot X_{IPCC})$ aplicada a la segunda resonancia y a las de orden superior es inferior a 1.

Una procedimiento simplificado consiste en utilizar una curva envolvente de impedancias (véase la figura 5) que describe la amplitud sin información sobre el ángulo de fase. Esta envolvente comprende el punto de impedancia máximo en la primera resonancia (con un factor de amplificación “k”) y los puntos de impedancia máximos de las resonancias de frecuencia más alta (con un factor de amplificación “1” con relación a la reactancia de cortocircuito de la red que no tiene en cuenta otros circuitos resonantes).

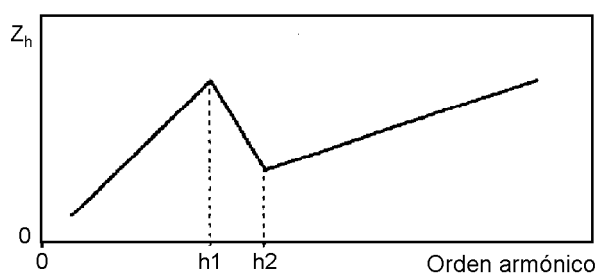


Figura 5 – "Curva envolvente de la impedancia" de una red de MT

donde

h_1 viene dado por f_r/f_1 [f_r de la ecuación (2) ó (3)] y $h_2 = 1,5 \cdot h_1$; hasta h_1 : $Z_h = k \cdot h \cdot X_{1BB} + h \cdot X_{1F}$, más allá de h_2 : $Z_h = h \cdot X_{1PCC}$.

Este procedimiento puede evitar un análisis específico (medición y simulación), pero conduce a menudo a una sobrevaloración de las tensiones armónicas resultantes (véase la nota 1)

NOTA 1 La curva envolvente de las impedancias armónicas dada anteriormente no suministra suficientemente informaciones para los casos donde una resonancia puede aparecer entre el equipo de un usuario y la impedancia de la red (por ejemplo, con filtros de armónicos). Entonces es necesario determinar el ángulo de fase de la impedancia armónica. Por otra parte, si para un usuario el límite de emisión está expresado en corriente, se debería tener en cuenta igualmente la impedancia mínima de la red vista desde el juego de barras sobre la que un filtro eventual se pueda conectar para verificar el valor de la corriente inyectada en la red después del filtrado. Un filtro paralelo puede no ser suficiente si existe una resonancia serie entre el equipo del usuario y la red de distribución.

NOTA 2 Es imposible extender estas consideraciones a las redes de tensión superiores a 35 kV. Sin embargo, se recomienda generalmente evaluar la impedancia armónica de la red teniendo en cuenta los diversos modos de explotación del sistema así como sus modificaciones futuras previsibles. Se debería definir la impedancia armónica resultante en forma de tabla o por un conjunto de curvas que muestren el lugar de las impedancias mínimas y máximas tanto en amplitud como en fase, para cada frecuencia armónica que presente interés. Cuando se prevean evoluciones importantes entre las configuraciones del sistema actual y futuro, es bueno suministrar dos conjuntos de resultados distintos para permitir al usuario un estudio óptimo de su equipo.

Estudios profundos deberían permitir determinar una envolvente de las curvas de impedancia armónica máxima para un tipo particular de red de MT. A veces se utiliza esta envolvente como “curva de impedancia más desfavorable” permitiendo una evaluación rápida de la impedancia armónica de la red. El anexo A da un ejemplo práctico de este procedimiento.

5.2.2 Cálculo manual detallado

Pueden efectuarse cálculos manuales más detallados, y se recomienda utilizar herramientas informáticas como las hojas de cálculo electrónicas. En el anexo B se muestra un ejemplo del procedimiento recomendado por VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke).

6 LEYES DE ADICIÓN

La coordinación de las perturbaciones conducidas necesita la adopción de hipótesis relacionadas con la suma de las perturbaciones producidas por las diversas cargas. En el caso de perturbaciones armónicas, la tensión o la corriente armónica real en un punto cualquiera de un sistema de distribución es el resultado de la combinación vectorial de las componentes individuales de cada una de las fuentes.

Se utilizan habitualmente dos leyes de adición, la primera es más simple de aplicar y la segunda más general.

6.1 Primera ley de adición

La primera ley de adición es una simple ley lineal utilizando factores de diversidad k_{hj} :

$$U_h = U_{h0} + \sum_j k_{hj} \cdot U_{hj} \quad (4)$$

donde

U_{h0} es la tensión armónica preexistente de la red de alimentación (tensión armónica presente en la red de alimentación, estando desconectadas las cargas j). La amplitud de los factores de diversidad k_{hj} depende:

- del tipo de equipo considerado;
- del armónico de orden h ;
- de la relación entre la potencia nominal S_{Tj} del equipo considerado y de la potencia de cortocircuito S_{cc} en el PCC.

La tabla 3 da unos valores indicativos para el caso general y la tabla 4 de los valores indicativos para rectificadores no controlados con filtros capacitivos.

Tabla 3 – Valores indicativos del coeficiente de diversidad k_{hj} en el caso general

S_{Tj}/S_{cc}	h						
	3	5	7	11	13	17	19
$\leq 0,001$	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	–	–
0,002	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	–
0,005	0,6	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
0,010	0,7	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3	0,1
0,020	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
$\geq 0,050$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabla 4 – Valores indicativos del coeficiente de diversidad k_{hj} en el caso de rectificadores con diodos y condensadores de filtrado

S_{Tj}/S_{cc}	h						
	3	5	7	11	13	17	19
$< 0,001$	1,0	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1
0,002	1,0	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
0,005	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3
0,010	1,0	1,0	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4
0,020	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6
$> 0,050$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

NOTA Las variaciones tienen como origen los valores del nivel de potencia, el valor de los condensadores y la carga.

El procedimiento que utiliza los coeficientes de diversidad se revela especialmente útil cuando se conocen las fases de armónicos preexistentes y las de los armónicos que se deben añadir (en casos favorables, k_{hj} puede ser negativo).

6.2 Segunda ley de adición

La experiencia permite adoptar a la vez una ley de adición más general para la tensión armónica y para la corriente armónica. La ley para la tensión armónica resultante de orden h se expresa por:

$$U_h = \sqrt[\alpha]{\sum_i U_{hi}^\alpha} \quad (5)$$

donde

U_h es la amplitud de la tensión armónica resultante (de orden h), para las fuentes consideradas (valor de probabilidad);

U_{hi} es la amplitud de los diversos niveles de emisión individuales (de orden h) a sumar;

α es un exponente dependiente principalmente de dos factores:

- el valor de la probabilidad elegida para que el valor efectivo total no exceda el valor calculado;
- el grado de variación aleatoria en amplitud y en fase entre las tensiones armónicas individuales.

Hay que tener en cuenta los hechos siguientes:

- La coordinación de las emisiones armónicas hace referencia principalmente a valores probables que no excedan el 95%.
- Las fuentes que se deben combinar cuando la coordinación de las emisiones corresponden a las cargas principales de las redes de distribución de MT/BT, al transferir perturbaciones de un nivel de tensión de la red al otro y a la emisión global debida a la multiplicación de los equipos de BT de gran difusión.
- Los armónicos impares de orden bajo tienen:
 - Amplitudes significativas no importa en que punto de las redes y que permanecen generalmente estables durante largos periodos;
 - Una gama de variación de las fases relativamente estrecha (variaciones limitadas en la fuente y variaciones limitadas debido a la propagación en la red si no existe resonancia a baja frecuencia).
- Los armónicos de orden alto varían grandemente en amplitud y en fase.

Se puede adoptar el siguiente conjunto de factores sobre la base de las informaciones disponibles actualmente:

Tabla 5 – Exponentes para adición de armónicos

α	Orden del armónico
1	$h < 5$
1,4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h > 10$
NOTA Cuando se sabe que los armónicos están verosímelmente en fase (es decir, con un desfase inferior a 90°), se debería utilizar un exponente $\alpha = 1$ para los de orden 5 y superiores.	

7 LÍMITES DE EMISIÓN DE LAS CARGAS PERTURBADORAS EN LAS REDES DE MT

7.1 Etapa 1: evaluación simplificada de la emisión de perturbación

En la etapa 1, la conexión de pequeños consumidores o usuarios que posean solamente una cantidad limitada de cargas perturbadoras se puede acordar sin una evaluación detallada de las características de emisión o de la respuesta de la red de alimentación.

NOTA 1 En BT, véase la Norma IEC 61000-3-2 (corriente de entrada ≤ 16 A/fase) o la Norma IEC 61000-3-4 (corriente de entrada > 16 A /fase).

Si la condición:

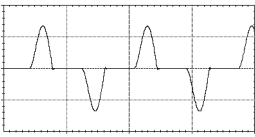
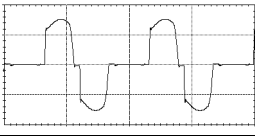
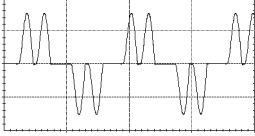
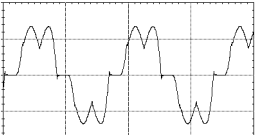
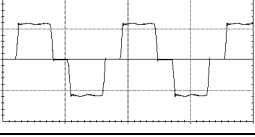
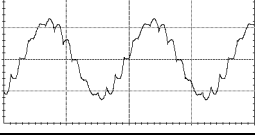
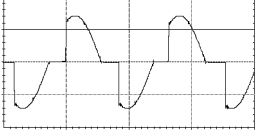
$$S_i / S_{cc} \leq 0,1\% \quad (6)$$

se cumple (S_i = potencia suscrita por el usuario i y S_{cc} = potencia de cortocircuito en el PCC), se puede conectar entonces cualquier carga perturbadora en el interior de la instalación del usuario sin otro examen.

NOTA 2 A menudo se utiliza la relación inversa $S_{cc} / S_i = R_{cc}$. La ecuación (4) es equivalente a la regla muy conocida $R_{cc} \geq 1\,000$ para la que una carga se puede conectar sin estudio especial.

Si no, a continuación se recomiendan dos procedimientos alternativos.

Tabla 6 – Factores de ponderación W_j para diferentes tipos de equipos produciendo armónicos

Equipo tipo conectado en MT o AT	Forma de onda típica de las corrientes	THD típica en corriente	Factor de ponderación (W_j)
Alimentación monofásica (rectificador y condensador de filtrado)		80% (elevado orden 3)	2,5
Convertidor semicontrolado		Valores elevados de orden 2, 3 y 4 para valores bajos de carga	2,5
Convertidor de 6 pulsos, filtro capacitivo sin inductancia serie		80%	2,0
Convertidor de 6 pulsos, filtro capacitivo con inductancia serie > 3% o motor de corriente continua		40%	1,0
Convertidor de 6 pulsos y fuerte inductancia de alisamiento de la corriente		28%	0,8
Convertidor de 12 pulsos		15%	0,5
Regulador de tensión alterna		En función del ángulo de iluminación	0,7

7.1.1 Criterio de la potencia perturbadora ponderada

Este procedimiento caracteriza la cantidad de cargas perturbadoras en el interior de la instalación del usuario por medio de la “potencia perturbadora ponderada” S_{Dwi} . Se puede efectuar el cálculo utilizando los factores de ponderación W_j de la tabla 6 para tipos corrientes de cargas generadoras de armónicos.

Se calcula la potencia perturbadora ponderada como sigue:

$$S_{Dwi} = \sum_j S_{Dj} \times W_j \quad (7)$$

donde

S_{Dj} es la potencia del equipo perturbador (j) de la instalación (i).

Se puede adoptar una ponderación de 2,5 si las características de una carga generadora de armónicos no son conocidas.

Se puede determinar la aceptabilidad de las cargas de un usuario en la etapa 1 comparando la potencia perturbadora ponderada y la capacidad de cortocircuito en el PCC. En la etapa 1 se puede utilizar el criterio de aceptación conservador indicado abajo:

$$S_{Dwi} / S_{cc} < 0,1\% \quad (8)$$

NOTA Para algunos tipos de carga que presentan características de emisión homogéneas, algunos distribuidores prefieren una regla de aceptación todavía más simple refiriéndose únicamente a la potencia (kVA) o a la corriente nominal de la carga. En el anexo C se presenta un ejemplo.

7.1.2 Criterios de las corrientes armónicas relativas

Generalmente no se excede en el reparto admisible de la distorsión total de la tensión si se fijan límites apropiados a las “corrientes armónicas relativas”. La tabla 7 presenta un ejemplo de estos límites:

Tabla 7 – Gama de valores indicativos de los límites en las corrientes armónicas de la carga total de un usuario, relativos a la etapa 1 (las gamas se dan en función del tipo de red)

Orden de armónico h	5	7	11	13	$\sqrt{\sum i_h^2}$
Corriente armónica admisible $i_h = I_{hi} / I_i$ (%)	5 - 6	3 - 4	1,5 - 3	1 - 2,5	6 - 8

donde

i_h es la corriente armónica total de orden h generado por las cargas del usuario e I_i el valor eficaz de la corriente correspondiente a la potencia suscrita por el usuario (a la frecuencia fundamental).

NOTA 1 En el caso de consumidores cuya potencia suscrita S_i es superior a 2 MVA, o cuya relación $S_i/S_{cc} > 2\%$, la tabla anterior puede conducir a unos límites de emisión superiores a las de la etapa 2; si la etapa 1 y la etapa 2 se destinan a utilizarse de forma sucesiva, se deberían evaluar los límites de emisión para esos consumidores según el procedimiento de la etapa 2.

NOTA 2 Si el consumidor utiliza condensadores y/o filtros para corrección del factor de potencia, se debería tener en cuenta la impedancia armónica de la red de alimentación de MT en la evaluación de i_h y se debería evaluar estos casos según el procedimiento de la etapa 2.

7.2 Etapa 2: límites de emisión en función de las características efectivas de la red

En esta etapa, el nivel de planificación apropiado se reparte entre los usuarios, proporcionalmente a la parte de la potencia disponible total de la red de alimentación tomada por cada instalación que está conectada. Esta regla asegura que el nivel de perturbación, debido a las emisiones de todas las instalaciones de los usuarios que están conectadas a la red, no excederá del nivel de planificación.

Si se tiene en cuenta la capacidad real de absorción de la red en razón del factor de simultaneidad y de las diferencias de fase de la corriente armónica así como de la impedancia de la red y de la carga futura, se pueden admitir límites de emisión más altos que los dados en la etapa 1.

Más adelante se presentan dos planteamientos como variante. Se basan en las dos leyes de adición y ofrecen un método de evaluación más simple y otro más general.

7.2.1 Procedimiento simplificado de la primera ley de adición

Puede evaluarse la parte U_{hi} de la tensión armónica total de la red, que se produce por todos los dispositivos j de la instalación de un usuario individual i, a partir de las corrientes armónicas i_{hj} inyectadas por cada uno de esos dispositivos, de la impedancia armónica Z_h en el punto de conexión común y de los factores de diversidad k_{hj} descritos en el apartado 6.1:

$$U_{hi} = Z_h \cdot \sum_j k_{hj} \cdot I_{hj} \tag{9}$$

Como variante, la evaluación se puede llevar a cabo a partir de la corriente armónica total I_{hi} inyectada por la instalación del usuario en la red por medio de un factor de diversidad total k_{hi} :

$$U_{hi} = Z_h \cdot k_{hi} \cdot I_{hi} \tag{10}$$

Es evidente que la condición particular U_{hi} proveniente de un solo usuario no puede representar más que una parte de la contribución admisible global G_{hMT} proveniente del conjunto de las cargas alimentadas a partir de la red de MT considerada.

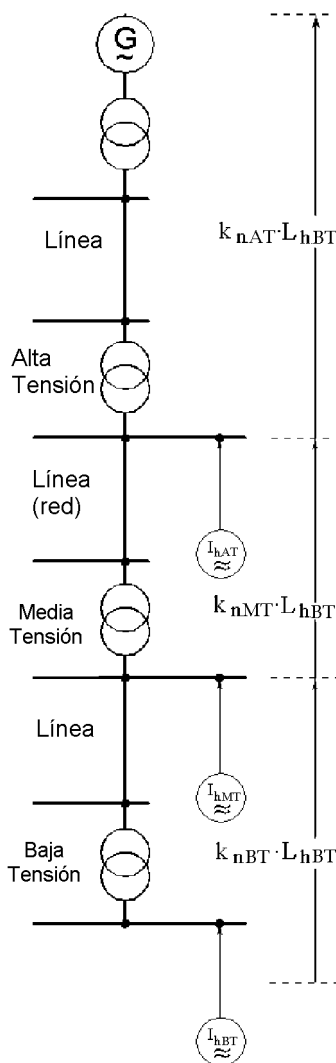


Figura 6 – Método simplificado de repartición de las emisiones de tensión armónica admisibles entre los diferentes niveles de tensión con $k_{nAT} + k_{nMT} + k_{nBT} = 1$ (por ejemplo, $k_{nAT} = 0,3$, $k_{nMT} = 0,5$, $k_{nBT} = 0,2$)

Se puede evaluar G_{hMT} como el producto del nivel de planificación de BT L_{hBT} y de un “factor de contribución de la red” k_{nMT} que especifica la parte del nivel de planificación que aparece bajo la forma de caída de tensión armónica a través de una parte de una parte de la impedancia armónica de la red (véase la figura 6):

$$G_{hMT} = k_{hMT} \cdot L_{hBT} \quad (11)$$

En general, k_{hMT} varía entre 0,4 y 0,7. Se utiliza a menudo 0,5 a título de compromiso.

Si S_i es la potencia suscrita por el usuario y S_t la potencia total disponible en la red de MT, el valor admisible de la contribución a la tensión armónica producida por la instalación del consumidor en la red es:

$$U_{hi} \leq G_{hMT} \cdot \frac{S_i}{S_t} \quad (12)$$

En consecuencia, la conexión de la instalación de un consumidor según la etapa 2 es admisible cuando esta condición se cumple para cada uno de los armónicos de orden h .

7.2.2 Procedimiento general de la segunda ley de adición

7.2.2.1 Emisión global a repartir entre los usuarios

Una primera aplicación de la ecuación (5) es necesaria para determinar la contribución global de todas las fuentes armónicas presentes en un sistema de MT particular. Para cada orden de armónico, la tensión armónica efectiva en una red de MT resulta de una combinación vectorial de la tensión armónica proveniente de la red de AT situada aguas arriba, y la tensión armónica resultante del conjunto de las cargas no lineales conectadas a la red de MT (incluidas las cargas no lineales del sistema de BT aguas abajo que se pueden considerar formando parte de la carga del sistema de MT). Esta tensión armónica total no debería exceder del nivel de planificación del sistema de MT.

Primer procedimiento

Si se define:

- G_{hMT+BT} la contribución global admisible, en tensión armónica de orden h , de las cargas de MT y de BT locales en la red de MT (expresada en % de la tensión fundamental) (se puede evaluar G_{hMT+BT} a partir de la corriente armónica y de la impedancia de la fuente);
- L_{hMT} el nivel de planificación del armónico de orden h en la red de MT;
- L_{hAT} el nivel de planificación del armónico de orden h en la red de AT aguas arriba;
- T_{hAT} el coeficiente de transferencia entre la red de AT aguas arriba y la red de MT para el armónico de orden h ;
- α el exponente de la ley de adición (tabla 5), la aplicación de la ecuación (5) da:

$$G_{hMT+BT} = \sqrt[\alpha]{L_{hMT}^\alpha - (T_{hAT} L_{hAT})^\alpha} \quad (13)$$

En una primera evaluación, los coeficientes de transferencia T_{hAT} entre la red de AT aguas arriba y la red de MT se consideran iguales a 1. En la práctica, sin embargo, pueden ser inferiores a 1 (por ejemplo, 2/3) debido a la presencia de elementos de la red aguas abajo, o superiores a 1 (normalmente entre 1 y 3), debido a la resonancia. Corresponderá entonces al distribuidor determinar los valores apropiados.

Para ilustrar esto, se ha aplicado la ecuación (13) en el caso particular de una red de MT suponiendo que el coeficiente de transferencia proveniente de la red de AT aguas arriba es igual a 1 en todas las frecuencias armónicas, y suponiendo que los niveles de planificación de las redes de AT y de MT son los de la tabla 2. Se presentan los resultados en la tabla 8.

Tabla 8 – Contribución total admisible G_{hMT+BT} de las cargas de MT y de BT en la tensión armónica de MT en el caso donde los coeficientes de transferencia de las perturbaciones viniendo de la red de AT son unitarios

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden	Tensión armónica	Orden	Tensión armónica	Orden	Tensión armónica
h	%	h	%	h	%
5	4	3	2	2	0,1
7	2,8	9	0,4	4	0
11	2,6	15	0	6	0
13	2	21	0	8	0
17	1,2			10	0
19	0,7			12	0
23	1				
25	1				

Se encuentra a continuación la aplicación de la ecuación (13) con tres valores diferentes del coeficiente de transferencia en el 5º armónico destinado a ilustrar un caso de resonancia alrededor de este 5º armónico.

$$T_{5HM} = 1 \rightarrow G_{5MT+BT} = [5^{1,4} - (1 \times 2)^{1,4}]^{1/1,4} = 4\%$$

$$T_{5HM} = 2 \rightarrow G_{5MT+BT} = [5^{1,4} - (2 \times 2)^{1,4}]^{1/1,4} = 2\%$$

$$T_{5HM} = 3 \rightarrow G_{5MT+BT} = [5^{1,4} - (3 \times 2)^{1,4}]^{1/1,4} = 0\%$$

Los resultados arriba expresados muestran claramente que este procedimiento se debe utilizar con precaución cuando el coeficiente de transferencia entre un sistema aguas arriba y el sistema de MT es superior a 1. No hay que olvidar que los coeficientes de transferencia no son solamente función del orden de los armónicos y del emplazamiento en la red, sino igualmente del tiempo (por ejemplo, debido a la conmutación de las baterías de condensadores).

En el caso en que los niveles de planificación de las redes de MT son los mismos que los de las redes de AT y de MAT como para los de orden $h = 4, 6, 12, 15$ y 21 , la simple aplicación de la ecuación (13) tendría como resultado una contribución nula de los usuarios de MT. En este caso, se debería repartir equitativamente las emisiones entre las diferentes redes.

Segundo procedimiento

Considerar las cargas de BT formando parte de la carga de MT global es un buen procedimiento si la parte para uso doméstico de la carga es relativamente baja. No obstante, en presencia de una importante carga en uso doméstico, tal procedimiento es pesimista porque supone una utilización simultánea de las cargas perturbadoras domésticas y comerciales o industriales. Se puede preferir entonces el procedimiento más fino como sigue.

Llamando:

G_{hMT} la contribución admisible global de las cargas locales suministradas directamente en MT, a la tensión armónica de orden h en el sistema de MT (expresada en % de la tensión fundamental);

S_{MT} potencia total de las cargas alimentadas directamente en MT (en condición de plena utilización de la red) por intermedio de transformadores de alimentación de AT/MT.

S_{BT} potencia total de las cargas alimentadas en BT (en condición de plena utilización de la red) por intermedio de los mismos transformadores de alimentación de AT/MT.

F_{ML} factor de coincidencia entre las dos acumulaciones de cargas perturbadoras de las redes de distribución de MT y BT.

Se puede obtener el valor F_{ML} a partir de las curvas de carga, y eso corresponde a la potencia total tomada por las cargas de BT, en la hora punta de las cargas de MT, expresada en p.u. de la punta de carga de BT. Este factor tiene en cuenta de hecho que no existe solapamiento entre la producción armónica máxima de las cargas perturbadoras MT y BT. Eso se debe a las diferencias que existen en las curvas de carga y en las características de las cargas, entre las cargas de MT y de BT. Por ejemplo, si se refiere a la figura 7, se evalúa F_{ML} como sigue:

- potencia total tomada por las cargas de BT en la hora punta de las cargas de MT: 0,3 p.u. a las 8 h a.m.;
- punta de cargas BT: 0,6 p.u. a las 8 h p.m.;
- $F_{ML} = 0,3/0,6 = 0,5$ (aunque un análisis más fino muestra una situación más crítica a las 10 h a.m. que a las 8 h a.m. y una mejor evaluación de F_{ML} con $0,39/0,6 = 0,65$).

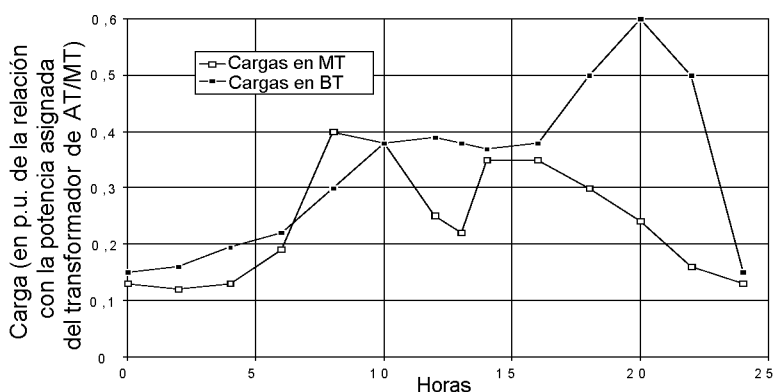


Figura 7 – Curva de carga diaria en una red de distribución de MT

Se debería entonces sustituir la ecuación (13) por la ecuación (14):

$$G_{hMT} = \sqrt[\alpha]{\frac{S_{MT}}{S_{MT} + S_{BT} \cdot F_{ML}} \left[L_{hMT}^\alpha - (T_{hHM} L_{hAT})^\alpha \right]} \quad (14)$$

NOTA En la etapa 2, la evaluación de F_{ML} debe permanecer conservadora para tener en cuenta los cambios desfavorables en las características de coincidencia de las cargas perturbadoras en lo sucesivo.

Límites de emisiones individuales

Se admite solamente una fracción de los límites globales de emisión G_{hMT+BT} o G_{hMT} para cada usuario. Una proposición razonable consiste en tomar la relación entre la potencia suscrita S_i y la capacidad total de alimentación S_t de la red (S_t siendo generalmente superior o igual a la suma de todas las potencias suscritas por el conjunto de los consumidores alimentados por la red de MT considerada). Este criterio responde al hecho de que la potencia suscrita por un consumidor representa a menudo el coeficiente de reparto de los costes de inversión en la red eléctrica.

Primer procedimiento

Siendo que E_{Uhi} representa el nivel de emisión de la tensión armónica admisible para el consumidor, la aplicación de la ecuación (5) da:

$$\sqrt[\alpha]{\sum_i E_{Uhi}^\alpha} = G_{hMT+BT} \quad (15)$$

o bien

$$\sum_i E_{Uhi}^\alpha = G_{hMT+BT}^\alpha \quad (16)$$

Si el límite de emisión individual es proporcional a la potencia suscrita S_i por el consumidor, la ecuación (16) se cumple con:

$$E_{Uhi}^\alpha = G_{hMT+BT}^\alpha \cdot \frac{S_i}{S_t} \quad (17)$$

o, como el resultado final:

$$E_{Uhi} = G_{hMT+BT} \cdot \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_t}} \quad (18)$$

donde

E_{Uhi} es el nivel de emisión de tensión armónica admisible para un consumidor (i) alimentado directamente en MT (%);

G_{hMT+BT} es la contribución global admisible de las cargas locales en MT y BT, en la tensión armónica de orden h de la red en MT, según la ecuación (13);

$S_i = P_i / \cos\varphi_i$ es la potencia suscrita por el usuario i;

S_t es la potencia total disponible en la red de MT;

α es el exponente de la ley de adición (tabla 5).

NOTA Llamando S_{tr} a la potencia del transformador de AT/MT, se obtiene evidentemente:

$$S_t = \sum S_{tr} \quad (19)$$

Existen, sin embargo, sistemas en MT donde una cantidad importante de la potencia disponible se suministra por fuentes que, desde el punto de vista armónico, se comportan como cargas no lineales. Llamando S_{nlg} a la potencia de esos generadores no lineales, la "potencia total potencialmente perturbadora" de la red resulta:

$$S_t = \sum S_{tr} + 2 \sum S_{nlg} \quad (20)$$

(Para comprender fácilmente la presencia del factor 2 en la ecuación (20), basta pensar en el caso límite donde toda la potencia sería suministrada por fuentes no lineales y donde no alimentarían más que cargas no lineales. En este caso la potencia perturbadora total valdría dos veces la potencia total disponible.)

Esto representa la "potencia total disponible corregida" que se debe utilizar en este caso.

Segundo procedimiento

Tal como se expuso en el apartado 7.2.2.1, un procedimiento más fino tiene en cuenta el hecho de que las cargas en BT y MT no puedan estar en servicio simultáneamente. En este caso, se obtiene G_{hMT} con la ayuda de la ecuación (14) y no con la (13), y se debería sustituir S_i por S_{MT} . Por otra parte, puede ocurrir que todas las cargas perturbadoras en MT no se utilicen simultáneamente de manera que la ecuación (18) deriva en:

$$E_{Uhi} = G_{hMT} \alpha \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_{MT}} \frac{1}{F_{MT}}} \quad (18')$$

donde

E_{Uhi} es el límite de emisión de la tensión armónica de orden h admitida para una carga (i) suministrada directamente en MT (%);

G_{hMT} es la contribución global admisible, de las cargas locales alimentadas directamente en MT, a la tensión armónica de orden h de la red de MT según la ecuación (14);

$S_i = P_i / \cos\varphi_i$ es la potencia suscrita por el consumidor i ;

S_{MT} es la potencia total de las cargas alimentadas directamente en MT (en condición de plena utilización de la red) por medio de transformadores de AT/MT;

F_{MT} es el factor de coincidencia para cargas en MT produciendo perturbaciones simultáneamente. Los valores típicos de F_{MT} se sitúan entre 0,4 y 1;

α es el exponente de la ley de adición (véase la tabla 5).

Tercer procedimiento

Las reglas propuestas anteriormente para el establecimiento de límites de emisión individuales, no tienen en cuenta variaciones de la potencia de cortocircuito a lo largo de las redes. Cuando se conectan las cargas a un juego de barras común (en presencia de una bobina de inductancia serie entre el juego de barras y el principio de la línea, con objeto de reducir la potencia de cortocircuito, la denominación “juego de barras” se debe entender como el punto inicial en la línea de la bobina), la potencia de cortocircuito no varía de manera significativa y los métodos de atribución de los límites de emisión presentados hasta el presente se adaptan bien. Este es el caso de las redes de distribución por cables cortos (< 10 km), y de líneas aéreas cortas (< 5 km). Estas condiciones son características de las redes que alimentan las cargas más bien altas (cargas industriales particulares, etc.).

En el caso de las redes de distribución largas por cables o líneas aéreas, donde la carga se reparte a lo largo de la línea de alimentación, el procedimiento anterior puede conducir a especificar límites de corriente armónica demasiado estrictos, penalizando así a los usuarios más remotos a lo largo de la línea, donde la potencia de cortocircuito puede ser mucho más baja que en el juego de barras de la subestación. El anexo D da un procedimiento de reparto de la emisión total admisible G_{hMT} entre las cargas de MT individuales para compensar este efecto.

El método propuesto en el anexo D, y cuyo ejemplo se da en el anexo E, es adecuado para la resolución de casos particulares tanto como al desarrollo de las reglas de emisión por motivo general. En consecuencia, este método se puede utilizar por el distribuidor de energía eléctrica para establecer sus propios límites de emisión de corriente armónica en función de las peculiaridades de una ley de reparto de referencia.

NOTA 1 El límite de la tasa de distorsión armónica total puede fijarse en 1,3 veces el límite de la emisión calculada para el orden 5.

NOTA 2 Se puede preferir especificar en corrientes armónicas los límites de una instalación perturbadora, incluso si el objeto es limitar las tensiones armónicas en la red. Corresponde al distribuidor de la electricidad suministrar los datos concernientes a la impedancia de la red en función de la frecuencia para permitir expresar esos límites en términos de corrientes armónicas:

$$E_{\text{Ihi}} = \frac{E_{\text{Uhi}}}{Z_{\text{h}}} \quad (21)$$

donde

E_{Ihi} es el nivel admisible de la emisión de corriente armónica de orden h para el consumidor i;

Z_{h} es la impedancia de la red en función de la frecuencia en el punto de conexión común.

NOTA 3 Puede suceder hasta que en un armónico de orden h, el nivel preexistente (B_{hMT}) sea superior que la parte normal (la “parte normal” que sea proporcional a $[(S_{\text{r}}-S_{\text{i}})/S_{\text{i}}]^{1/\alpha}$) y debería tenerlo en cuenta para evitar un exceso del nivel de planificación. En la ecuación (13) o (14), L_{hMT} se debe sustituir por $(L_{\text{hMT}}^{\alpha} - B_{\text{hMT}}^{\alpha})^{1/\alpha}$.

NOTA 4 Para usuarios cuya potencia suscrita es baja, la ecuación (18) puede dar limitaciones severas no realistas. Si el nivel de emisión admisible en tensión para ciertos órdenes de armónicos es inferior a 0,1%, se toma igual a 0,1% (salvo si existe un riesgo de interferencias psfométricas o si corresponde a una frecuencia de control a distancia pudiendo justificar una restricción más severa).

7.3 Etapa 3: aceptación de los niveles de emisión más altos a título excepcional y en precario

Se debería advertir, que numerosos usuarios que no emplean cargas perturbadoras de importancia notable, no producen armónicos de manera significativa. Además, una parte de la potencia disponible de la red no se puede utilizar durante un periodo muy largo.

En consecuencia, la aplicación pura y simple de las etapas 1 y 2 puede conducir a limitaciones inútiles de las tensiones armónicas con valores inferiores a los niveles de planificación, creando así un margen.

Para preservar los principios generales, y permitir una interpretación flexible de este informe, el distribuidor puede utilizar el margen disponible en los casos apropiados. Sin embargo, la aceptación de límites de emisión superiores al normal no se puede consentir a los usuarios en circunstancias excepcionales y en precario.

La etapa 3 es importante para diferir inversiones que quizás no serán necesarias nunca. Eso significa que se debe estudiar cuidadosamente las condiciones de conexión teniendo en cuenta la deformación preexistente y la contribución esperada de la parte del equipo considerado, recordando que probablemente serán necesarias disposiciones para dejar la posibilidad de una extensión eventual de la instalación del filtrado.

8 LÍMITES DE EMISIÓN DE LAS CARGAS PERTURBADORAS EN LAS REDES DE AT

8.1 Etapa 1: evaluación simplificada de la emisión de perturbación

El objetivo de la etapa 1 es dar unos criterios muy simples para la conexión de instalaciones perturbadoras, evitando así una evaluación detallada. Para redes de AT y de MAT, parece justificado relacionar la potencia nominal admisible (S_{Di}) de la parte perturbadora de la carga con la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión común (S_{sc}). Se puede proponer por ejemplo,

$$S_{\text{Di}}/S_{\text{sc}} \leq 0,1 \text{ a } 0,4\% \text{ (AT) o } 0,1 \text{ a } 0,2\% \text{ (MAT)} \quad (22)$$

como límites de la etapa 1.

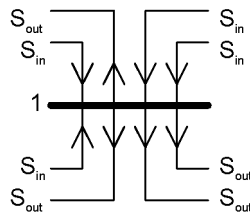
8.2 Etapa 2: límites de emisión en función de las características efectivas de la red

8.2.1 Evaluación de la potencia total disponible

Llamando S_i (MVA) a la potencia nominal de la instalación i y S_t la potencia total disponible en la red en el punto de conexión común (capacidad total de alimentación), la relación S_i/S_t representa la cantidad básica para la determinación de los límites de emisión según el procedimiento de la etapa 2.

Primer procedimiento

Es mucho más difícil evaluar S_t en las redes de AT y de MAT que en el caso de las redes de MT. Se sugiere el procedimiento siguiente: si se considera el caso de instalación de un usuario industrial conectado a una subestación de AT dada, la información básica es el registro en un día de máxima demanda de las potencias que entran y salen en la subestación (o una previsión equivalente que tiene en cuenta la evolución futura de la red).



La evaluación entonces es simplemente:

$$S_t = \Sigma S_{in} = \Sigma S_{out} \quad (23)$$

Un enlace de alta tensión en corriente continua (ATCC) representa un caso más particular porque puede alimentar la subestación y comportarse al mismo tiempo como carga perturbadora. El mismo problema se encuentra con un compensador estático de energía reactiva (CER) que suministra la potencia reactiva en la subestación. Se sugiere una solución que considera separadamente la potencia de todos los enlaces eventuales de alta tensión en corriente continua y los compensadores estáticos unidos a la subestación, y que evalúa:

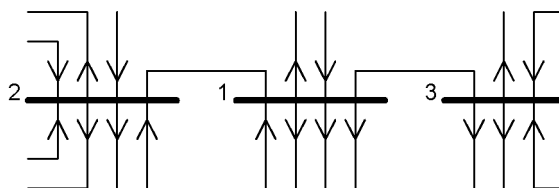
$$S_t = \Sigma S_{out} + \Sigma S_{ATCC} + \Sigma S_{CER} \quad (24)$$

ecuación según la cual S_t resulta la “potencia total potencialmente perturbadora”, que se denomina “potencia total disponible corregida” preferida a la “capacidad total de alimentación”, y donde S_{out} no incluye ninguna potencia de tipo S_{ATCC} o S_{CER} .

La hipótesis básica de este procedimiento es que cada S_{in} constituye una inyección de potencia sinusoidal pura mientras que cada S_{out} representa un consumo de potencia cuya parte está potencialmente deformada. Prácticamente, se puede esperar que S_{in} sea menos pura y que, simultáneamente S_{out} esté menos deformada de lo previsto de manera que la evaluación global permanezca razonable.

Segundo procedimiento

El procedimiento simple anterior puede que no sea correcto si existen instalaciones perturbadoras importantes o son susceptibles de existir alrededor de la subestación considerada. En caso de duda, se aconseja proceder como sigue:



- Si se llama 1 al nudo considerado y 2, 3... los demás nudos situados cerca del primero, se calcula los valores de S_{t1} , S_{t2} , S_{t3} ,... según la ecuación (24), pero ignorando la totalidad de la potencia S_{out} que pasa entre dos de estos nudos.
- Para cada orden de armónico h , se calcularán los coeficientes de influencia K_{h2-1} , K_{h3-1} ... (el coeficiente de influencia K_{hj-i} es la tensión armónica de orden h producida en el nudo i cuando se aplica una tensión armónica de orden h unitario (igual a 1 p.u.) en el nudo j ; el cálculo de K_{hj-i} necesita generalmente la utilización de una herramienta informática).
- Se sustituye la ecuación (24) por:

$$S_t = S_{t1} + K_{h2-1} S_{t2} + K_{h3-1} S_{t3} + \dots \quad (24')$$

añadiendo los términos $K_{hj-i} S_{tj}$ tanto tiempo como permanezcan significativos con relación a S_{t1} . Evidentemente S_t depende de la frecuencia cuando se utiliza (24')

8.2.2 Límites de emisión individual

Para cada orden de armónico h , cada instalación no lineal i tiene derecho a una contribución (E_{hi}) en el nivel de planificación (L_{hAT}) en función de la relación entre su potencia nominal (S_{i-MVA}) y la potencia total disponible corregida (S_t) de la red. Suponiendo una ley de adición aritmética de los armónicos provenientes de diferentes fuentes la ecuación es simplemente:

$$E_{Uhi} = L_{hAT} \cdot \frac{S_i}{S_t} \quad (25)$$

En la práctica, la suma efectiva de un cierto número de fuentes armónicas conduce generalmente a un valor inferior a la suma aritmética de los valores máximos de cada componente armónica, al menos en lo que concierne a los armónicos de orden superior a 4 (véase el capítulo 3). La ecuación (25) resulta en:

$$E_{Uhi} = L_{hAT} \sqrt{\frac{S_i}{S_t}} \quad (26)$$

donde

E_{Uhi} es el límite de emisión de una instalación no lineal i (AT o MAT) para el armónico de orden h ;

L_{hAT} es el nivel de planificación del armónico de orden h en las redes de AT o MAT (véase la tabla 2);

S_i es

- la potencia nominal de la subestación ATCC (MVA), o
- la potencia del compensador estático de energía reactiva (MVAR), o
- la potencia nominal (MVA) de la instalación de un consumidor ligada a la potencia suscrita P_i y al factor de potencia admitido $\cos \varphi_i$ ($S_i = P_i / \cos \varphi_i$);

S_t es la potencia total disponible corregida de la red en el PCC, véase la ecuación (24) ó (24');

α es el exponente de la ley de adición (véase la tabla 5);

o con un procedimiento más fino (semejante al introducido por la ecuación (18') en MT):

$$E_{Uhi} = L_{hMT} \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_t} \frac{1}{F_{AT}}} \quad (26')$$

donde

F_{AT} es el factor de coincidencia de las cargas de AT produciendo perturbaciones simultáneamente (el valor F_{AT} dependiendo de las cargas y de las características del sistema, los valores tipos se sitúan entre 0,4 y 1).

NOTA 1 El límite de emisión en distorsión armónica total puede estar fijado en 1,3 veces el límite de emisión calculado para el orden 5.

NOTA 2 Por razón de los efectos debidos a las resonancias, pueden aparecer tensiones armónicas más altas en la red para ciertas frecuencias, en otra parte remota del punto de conexión. Se puede tener en cuenta este fenómeno evaluando los coeficientes de influencia K_{hi-j} donde i se refiere al punto de conexión y j a cualquier otro punto de la red. Si, para un orden de armónico h dado, existen valores K_{hi-j} superiores a 1, es preciso utilizar el mayor de esos valores para sustituir L_{hAT} por L_{hAT} / K_{hi-j} en la ecuación (26).

NOTA 3 Puede ocurrir que en un armónico de orden h , el nivel preexistente (B_h) sea más alto que la parte normal (la "parte normal" que sea proporcional a $[(S_i - S_i) / S_i]^{1/\alpha}$). Se debería tener en cuenta para evitar un exceso del nivel de planificación. En la ecuación (26), L_{hAT} se sustituye por $(L_{hAT}^\alpha - B_h^\alpha)^{1/\alpha}$.

NOTA 4 En algunos casos, los límites de emisión obtenidos por la ecuación (26) pueden ser bajos y no realistas, haciéndose a menudo necesario la utilización del procedimiento de la etapa 3. Para evitarlo se tienen en cuenta los elementos siguientes:

- si el nivel de emisión admisible cae por debajo de 0,1% en un cierto orden de un armónico, E_{Uhi} se debe tomar igual a 0,1% (salvo si existe riesgo de interferencia psfométrica o si E_{Uhi} corresponde a una frecuencia de control a distancia pudiendo justificar una restricción más severa);
- si el distribuidor de electricidad sabe que una parte de la carga conectada a la red no producirá nunca perturbaciones, se puede sustraer de la ecuación (24) o (24') un término correspondiente a la potencia que no es potencialmente perturbadora.

NOTA 5 Se puede preferir especificar en corrientes armónicas los límites de una instalación perturbadora, incluso si el objetivo es limitar las tensiones armónicas en la red. Corresponde al distribuidor de la electricidad suministrar los datos relativos a la impedancia de la red en función de la frecuencia para permitir expresar estos límites en términos de corrientes armónicas:

$$E_{Ihi} = \frac{E_{Uhi}}{Z_h} \quad (27)$$

donde

E_{Ihi} es el nivel admisible de emisión de corriente armónica de orden h para el consumidor i ;

Z_h es la impedancia de la red en función de la frecuencia.

Sin embargo, no sería preciso tener en cuenta valores de impedancia excepcionalmente bajos en la especificación de los valores límites en corriente. Los valores de impedancia más bajos están ligados generalmente a resonancias y los armónicos de tensión a esas frecuencias particulares pueden exceder los niveles de planificación en otras partes de la red. En consecuencia, los valores de impedancia utilizados en la ecuación (27) deberían ser más altos que el Z_{min} de la ecuación (28) donde el coeficiente $K = 0,5$ a 1 y donde Z_{surge} es la impedancia característica de una línea de arranque unida en el PCC y N el número total de esas líneas:

$$Z_{min} = k \frac{Z_{surge}}{N} \quad (28)$$

(valor que es posible utilizar en ausencia de datos más específicos).

8.3 Etapa 3: aceptación de niveles de emisión más altos a título excepcional y en precario

Es preciso resaltar que numerosos usuarios que no emplean cargas perturbadoras de importancia notable, no producen armónicos de manera significativa. Además, una parte de la potencia disponible de la red no se puede utilizar durante un periodo muy largo.

En consecuencia, la aplicación pura y simple de las etapas 1 y 2 puede conducir a limitaciones inútiles de las tensiones armónicas con valores inferiores a los niveles de planificación, creando así un margen.

Para preservar los principios generales y permitir una interpretación flexible de este informe, el distribuidor puede utilizar el margen disponible en los casos apropiados. No obstante, la aceptación de límites de emisión superiores a lo normal no se puede permitir a los usuarios más que en circunstancias excepcionales y en precario.

La etapa 3 es importante para diferir las inversiones que quizás nunca llegan a ser necesarios. Eso significa que se debería efectuar un estudio cuidadoso de la conexión teniendo en cuenta la deformación preexistente y la contribución esperada de la parte del equipo considerado, recordando que esas disposiciones probablemente serán necesarias para dejar la posibilidad de una eventual extensión de la instalación de filtrado.

9 LÍMITES DE EMISIÓN DE INTERARMÓNICOS

Las tensiones interarmónicas U_μ (donde μ es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental) tienen que ser limitadas:

- por debajo del doble de la frecuencia fundamental, conviene limitar los interarmónicos a 0,2% para evitar problemas de flicker con lámparas de filamentos y fluorescentes (tubos delgados) [3, 4];
- receptores con regulación por control de onda (teledisparo centralizado de la red) se pueden perturbar en caso de sobrepasarse la tensión mínima de funcionamiento (0,3%) [5];
- en la gama de frecuencia de hasta 2,5 kHz, no se debería exceder del 0,5% para evitar dificultades en los receptores de televisión, las máquinas giratorias de inducción (ruido audible y vibraciones) y los relés de mínima frecuencia [6];
- en la gama de frecuencia de 2,5 kHz a 5 kHz, es preferible no exceder del 0,3% para evitar los ruidos audibles, por ejemplo, en los receptores de radio y otros equipos de audio;
- en presencia de cargas no lineales, un interarmónico de frecuencia f_μ se acompaña de componentes sobre la banda lateral a frecuencias $[f_\mu \pm 2 \cdot n \cdot (\text{frecuencia fundamental})]$ con n igual a 1, 2, 3, ...; la amplitud de las componentes $[f_\mu \pm 2 \cdot n \cdot (\text{frecuencia fundamental})]$ puede ser muy próxima a la del interarmónico considerado [7]. La banda de frecuencias del “flicker” se deberá extender entonces hasta cuatro veces la frecuencia fundamental. Las frecuencias interesantes que corresponden a los dispositivos con regulación por control de onda (telemando centralizado de la red) son igualmente aquellas cuya diferencia con la frecuencia portadora es el doble de la frecuencia fundamental.

Teniendo en cuenta esos límites, el nivel de planificación para los interarmónicos es igual al 0,2%.

Sólo se pueden añadir aritméticamente las tensiones interarmónicas cuando las frecuencias y fases son iguales. Eso sólo es posible de manera accidental durante un instante corto. Por esta razón, en la práctica, no se puede encontrar un valor superior al doble de la tensión interarmónica más alta.

Una tensión interarmónica que proviene de un equipo único inferior al 0,1% se considera como no perturbadora.

Si se autorizan valores más altos, las frecuencias interarmónicas no pueden exceder los criterios de “flicker” y no pueden coexistir, en las zonas donde se utiliza dispositivos con regulación por control de onda (telemando centralizado de la red), con las frecuencias de esos dispositivos (y sus bandas laterales desviadas en dos veces la frecuencia fundamental). En ciertas circunstancias, puede incluso revelarse necesario tener en cuenta las frecuencias de los telemandos centralizados utilizados por distribuidores de electricidad vecinos.

10 LÍMITES DE EMISIÓN RELATIVOS A LAS INTERFERENCIAS TELEFÓNICAS

El presente capítulo trata de las interferencias telefónicas debidas a los armónicos presentes en las redes de potencia.

La teoría prevé que las interferencias dependen de tres factores:

- el nivel de emisión del sistema de potencia;
- la susceptibilidad del sistema telefónico;
- el acoplamiento entre los dos sistemas.

Dado que esos tres factores tienen que darse simultáneamente para que haya problemas de interferencias se pueden encontrar una gran variedad de situaciones. En la mayor parte de los países europeos las interferencias telefónicas son raras o corresponden a casos muy específicos (por ejemplo, con los enlaces de alta tensión en corriente continua). Algunos países escandinavos pueden ser la excepción, como Finlandia, donde en el pasado se han recogido varios casos de interferencias entre líneas de alta tensión y líneas telefónicas aéreas por hilo desnudo sirviendo zonas rurales. Sin embargo, en América del Norte, se han constatado numerosos casos de interferencias en los sistemas de media tensión y por razones diferentes (por ejemplo: utilización de los mismos pilares que soportan líneas telefónicas y líneas de potencia, líneas de distribución de media tensión con neutro a las tomas de tierra múltiples o con retorno por tierra). Estas condiciones requieren un examen específico. Las normas norteamericanas apropiadas [8, 9] definen las reglas correspondientes que permiten hacer compatibles líneas de potencia y líneas telefónicas.

Este informe no da ni niveles de planificación ni límites de emisión por razón de la excesiva especificidad de las interferencias telefónicas eventuales. En consecuencia, corresponde al distribuidor de electricidad especificar los límites cada vez que se presente ese riesgo.

ANEXO A (Informativo)

EJEMPLO DE PROCEDIMIENTO POR LA “CARACTERÍSTICA DE IMPEDANCIA MÁS DESFAVORABLE”

En el Reino Unido se han definido, basándose en mediciones relativas a diversos sitios, las características “de impedancia más desfavorable”[10]. Si los cálculos que utilizan esas características indican que la carga se puede conectar, la conexión queda asegurada con un riesgo mínimo. En cambio, si el resultado de los cálculos está fuera de los límites, es preferible utilizar un procedimiento más fino.

En baja tensión, la característica de la impedancia más desfavorable se deduce de la impedancia de cortocircuito y varía proporcionalmente al orden del armónico.

A 11 kV, en el caso de una subestación urbana no incluyendo ni condensador ni filtro, la característica de la impedancia más desfavorable se da en la figura A.1. Se deduce de la impedancia de cortocircuito, parte del valor a 50 Hz y crece proporcionalmente hasta el doble del valor fundamental multiplicado por el orden del armónico correspondiente a 400 Hz. Más allá de esta frecuencia, crece proporcionalmente al orden del armónico y al valor de la impedancia fundamental.

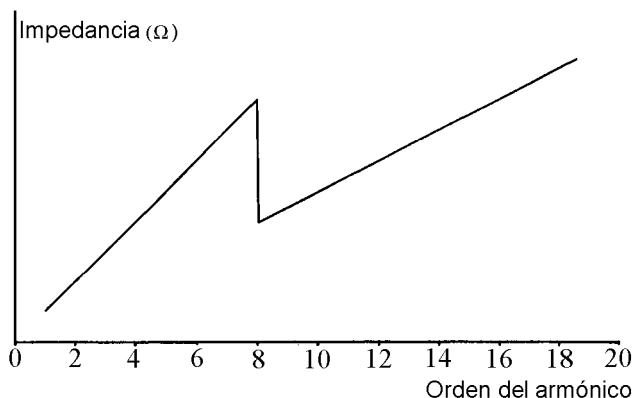


Figura A.1 – Característica de impedancia más desfavorable a 11 kV

Hasta h = 8:	$Z_h = 2 h X_1$
Por encima de h = 8:	$Z_h = h X_1$

A 33 kV, las características “de impedancia más desfavorable” están afectadas, hasta 800 Hz, por un coeficiente multiplicador de 1,25 con relación a las que se deducirían de la impedancia de cortocircuito. Se pueden necesitar mediciones específicas en función de las circunstancias para el examen de las frecuencias superiores.

A 66 kV y superior, no es posible generalización alguna.

ANEXO B (Informativo)**EJEMPLO DE CÁLCULO MANUAL DE LA IMPEDANCIA ARMÓNICA DE UNA RED DE MT EN EL PCC (como se practica en Alemania)**

NOTA En muchas ecuaciones y figuras, según la costumbre alemana, “k” es el símbolo para “cortocircuito”, y “V” el símbolo para el punto de conexión común o “PCC”.

Más abajo se exponen dos posibilidades de cálculo a diferentes frecuencias no siendo necesario recurrir a soluciones matriciales intensivas.

- En el capítulo B.3 se añade sucesivamente los elementos del esquema en forma de impedancia o admitancia según la estructura y resultando la impedancia Z_h para cada valor h. En principio, se aplica este método manualmente (ayudado de una calculadora científica para la inversión de impedancia a admitancia y viceversa). Pero el número de etapas sucesivas es tan importante que se recomienda utilizar un ordenador, especialmente cuando el esquema equivalente de la red es más complejo.
- En el capítulo B.4 se pone en la instalación un circuito reducido equivalente deducido de las características de la red. Se determinan dos magnitudes auxiliares en función de la frecuencia. La magnitud D representa el factor de amortiguamiento del circuito mientras que N indica la desviación de frecuencia relativa a la primera resonancia paralela. Una sola ecuación es suficiente para calcular la impedancia Z_h en cada frecuencia, a partir de h, x_{kh} , D y N.

B.1 Potencia reactiva de origen capacitivo

La potencia reactiva de origen capacitivo (cuyo conocimiento es necesario para la evaluación de las resonancias) es una combinación de la potencia reactiva de la línea ΣQ_L y de la potencia reactiva de los condensadores conectados directamente (sin inductancias en serie) ΣQ_{Ca} .

$$Q_c = \Sigma Q_{Ca} + \Sigma Q_L \quad (B.1)$$

Tabla B.1 – Carga capacitiva de los cables (Q'_{Cab}) y de las líneas aéreas (Q'_{OL}) en kvar/km

Sección mm ²	120	150	185	240
Cables				
5,8 kV / 10 kV				
papel de aislamiento	14	16	16	20
aislamiento XLPE	10	11	12	12
11,6 kV / 20 kV				
papel de aislamiento	50	50	55	70
aislamiento XLPE	30	30	35	40
Líneas aéreas				
10 kV	0,3			
20 kV	0,1			

La potencia reactiva de las líneas se puede evaluar con la ayuda de los valores estándar de la tabla B.1 y por medio de la relación siguiente:

$$\Sigma Q_L = \Sigma (Q'_{Cab} \cdot I) + \Sigma (Q'_{OL} \cdot I)$$

donde

I es la longitud en km del cable o línea aérea.

La estimación de la potencia reactiva de origen capacitivo ΣQ_{Ca} es siempre difícil, porque este valor está en función de los condensadores repartidos que dependen del número de máquinas sincrónicas, de los dispositivos de alumbrado, etc.

B.2 Carga de la red P_N

El valor de las impedancias a las frecuencias alrededor de la primera resonancia depende de la amortiguación aportada por los elementos de la red. Estos elementos resistentes pueden provenir de las cargas como de la parte resistiva de las impedancias. Para los motores, solo la parte resistente del esquema equivalente en las condiciones de arranque interviene en términos de amortiguación. En una primera aproximación, no se debería tener en cuenta su potencia activa para no sobrestimar la amortiguación de la red.

El cálculo de la amortiguación introducida por la carga de la red P_N se tiene que tener en cuenta las desviaciones que pueden sufrir. Una red poco cargada, con potencia activa mínima P_{Nmin} , tiene como consecuencia una impedancia alta y una amortiguación baja.

P_{Nmin} se puede estimar en las redes generales en unos dos tercios de la carga específica en periodo de carga baja (alrededor de un tercio de la carga está representada por motores); no se puede dar una estimación general relativa a las redes industriales, para las que la amortiguación debida a la carga puede ser mucho más baja.

B.3 Ejemplo de cálculo de la impedancia de una red, por adición sucesiva del valor de cada elemento del esquema completo

El esquema equivalente de la red tomado como ejemplo se muestra en las figuras B.1 y B.2. Se debería hacer notar como el convertidor (carga perturbadora) se conecta al juego de barras por un cable de gran longitud cuya impedancia no se puede ignorar.

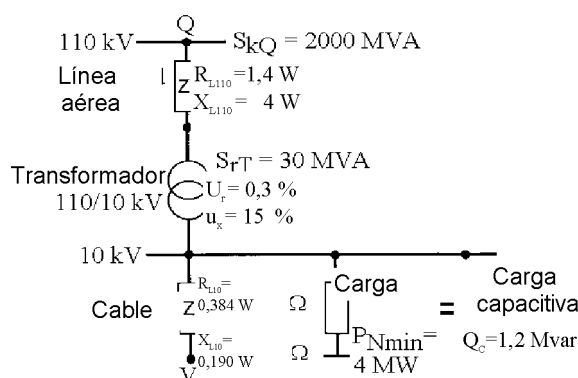


Figura B.1 – Modelo de la red

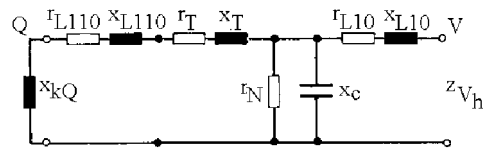


Figura B.2 – Esquema equivalente de la red

La impedancia Z de cada componente se relaciona relativamente con el cuadrado de la tensión de su circuito al que pertenece U_N para evitar la conversión en cada nivel de tensión:

$$r = \frac{R}{U_N^2}; \quad x = \frac{X}{U_N^2}; \quad z = \frac{Z}{U_N^2} \quad (\text{B.2})$$

Normalmente estas impedancias se expresan en % /MVA.

Los elementos del esquema equivalente se pueden calcular como sigue:

$$h \cdot x_{kQ} = h \cdot 0,05 \quad \%/MVA$$

$$r_{L110} = 0,012 \quad \%/MVA$$

$$h \cdot x_{L110} = h \cdot 0,033 \quad \%/MVA$$

$$r_T = 0,01 \quad \%/MVA$$

$$h \cdot x_T = h \cdot 0,5 \quad \%/MVA$$

$$r_N = \frac{1}{P_N} = \frac{100\%}{4 \text{ MW}} = 25 \%/MVA$$

$$\frac{x_c}{h} = \frac{-1}{h \times Q_c} = \frac{-100\%}{h \times 1,2 \text{ MVA}} = \frac{-1}{h} 83,3\%/MVA$$

$$r_{L10} = 0,384 \quad \%/MVA$$

$$h \cdot x_{L10} = h \cdot 0,19 \quad \%/MVA$$

Las impedancias del esquema equivalente conducen a la impedancia armónica z_h para cada frecuencia determinante. La tabla B.2 da el detalle del método para $h = 5$. La suma de los elementos se deduce directamente del esquema.

Tabla B.2 – Cálculo de las impedancias de la red Z_h en el PCC (V), para $h = 5$

Elementos del esquema	Impedancias %/MVA			Admitancias MVA/%	
	real	imaginario		real	imaginario
x_{kQ}	–	0,250			
r_{L110}, x_{L110} en serie	0,012	0,165			
r_T, x_T en serie	0,010	2,500			
Total $x_{kQ}, r_{L110},$ x_{L110}, r_T, x_T en serie	0,022	2,915	\Rightarrow	0,0026	-0,343
r_N	25,0	–	\Rightarrow	0,04	–
x_c	–	-16,6	\Rightarrow	–	0,060
Total en el juego de barras r_{L10}, x_{L10} en serie	0,52 0,38	3,45 0,95	\Leftarrow	0,0426	-0,283
Total en el PCC V	0,90	4,40			
Módulo de z_{V5} en el PCC V	4,5				

Se puede repetir el procedimiento para cada frecuencia determinante, tal como se muestra en la tabla B.3.

Tabla B.3 – Resultados para diferentes órdenes de armónicos

h	5	7	11	13	17	19
z_{Vh} (% / MVA)	4,5	7,4	22,7	20,5	6,4	3,9

B.4 Cálculo de la impedancia del circuito a partir del esquema equivalente reducido

En numerosos casos, la utilización del esquema equivalente reducido es suficiente para deducir la impedancia de la red. Este método es apropiado si el equipo generador de armónicos y los circuitos capacitivos efectivamente activos se conectan directamente en el punto de conexión común o en su alrededor inmediato. La descomposición indicada más abajo permite evaluar las impedancias relativas del circuito de la figura B.4.

$$z_{Vh} = \frac{h \cdot x_{kV}}{\sqrt{D^2 + N^2}} \quad (B.3)$$

Las magnitudes auxiliares D y N tienen en cuenta las impedancias a 50 Hz, r_{kV} y x_{kV} así como la potencia reactiva de origen capacitivo Q_c y la potencia activa P_N de la red (véase los capítulos B.1 y B.2).

Para cada orden de armónico, la magnitud auxiliar N se calcula a partir de la potencia reactiva capacitiva de la red y de la parte inductiva de su impedancia:

$$N = 1 - h^2 \cdot x_{kV} \cdot Q_c \quad (B.4)$$

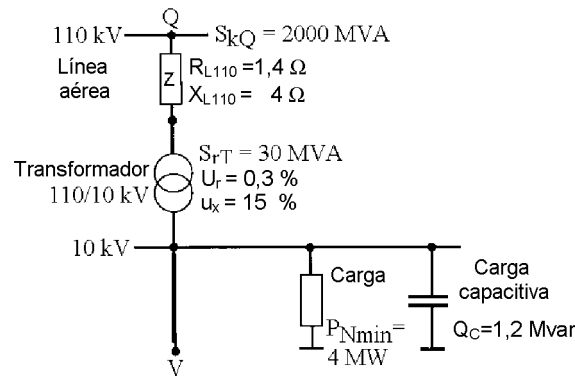


Figura B.3 – Esquema de la red

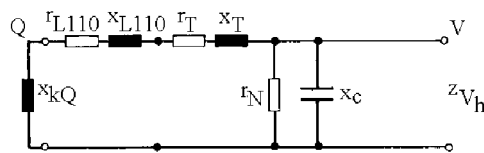


Figura B.4 – Esquema del circuito equivalente de la red

La magnitud auxiliar D representa la amortiguación debida a las resistencias, y se evalúa teniendo en cuenta la potencia activa de la red y la parte resistente de la impedancia de cortocircuito:

$$D = h \cdot x_{kV} \cdot P_N + \frac{I_{kV}}{h \cdot x_{kV}} \tag{B.5}$$

Entonces, se puede calcular el valor de la impedancia cuyo resultado depende de la parte amortiguada debida a la carga P_N ; la representación de este resultado se sitúa en el interior de la superficie rayada de la figura B.5.

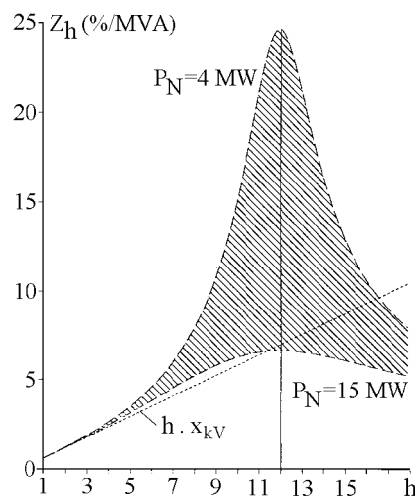


Figura B.5 – Impedancias relativas para frecuencias ≥ 50 Hz

Impedancia de la red (véase la figura B.3): $r_{kV} = 0,02\% / \text{MVA}$; $x_{kV} = 0,58\% / \text{MVA}$

Potencia reactiva capaz: $Q_C = 1,2 \text{ MVAr}$

La impedancia es máxima alrededor de la primera resonancia paralela de la red:

$$h_{\text{res}} = \frac{1}{\sqrt{Q_C \cdot x_{kV}}} \approx \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}} \quad (\text{B.6})$$

Se remite a la ecuación (B.4) en la que el valor auxiliar N se puede calcular según:

$$N = 1 - (h/h_{\text{res}})^2 \quad (\text{B.7})$$

La atenuación media de numerosas redes generales de MT se puede plantear según:

$$D \approx h_{\text{res}} \cdot 0,04 \quad (\text{B.8})$$

La utilización del esquema reducido, y la aplicación de estas dos últimas relaciones en la ecuación (B.3) permiten estimar la impedancia armónica en el campo $1 \leq h \leq (1,5 \cdot h_{\text{res}})$.

En previsión de la posibilidad de aparición de una resonancia secundaria, la relación (B.3) no da un resultado correcto a frecuencias superiores a $(1,5 \cdot h_{\text{res}})$.

En numerosas redes generales de BT, y en el rango de $1 \leq h \leq 20$ la impedancia en el punto de conexión común V responde a:

$$z_{Vh} = h \cdot x_{kV} \quad (\text{B.9})$$

La probable presencia de resonancias secundarias más allá del orden $h = 20$ hará que el uso de la relación (B.3) en este rango proporcione un resultado incorrecto.

El valor de la impedancia resultante de la ecuación (B.9) se anota en forma de recta en la figura B.5.

ANEXO C (Informativo)**EJEMPLO DE MÉTODOS PARTICULARES PARA LA APLICACIÓN DE
LOS LÍMITES DE LA ETAPA 1 EN LAS REDES DE MEDIA TENSIÓN**

El siguiente planteamiento ha sido adoptado en el Reino Unido (Engineering Recommendation G5/3).

Tabla C.1 – Tamaño máximo de un convertidor o de un regulador individual pudiéndose conectar a una red de 6,6kV o 11 kV en el Reino Unido, siguiendo el procedimiento de la etapa 1

(Engineering Recommendation G5/3)

Convertidor trifásico			Reguladores alternos trifásicos	
3-p kVA	6-p kVA	12-p kVA	6 tiristores kVA	3 tiristores/ 3 diodos kVA
85	130	250 *	150	100
* Este límite se aplica a los convertidores de 12 pulsos, o combinaciones de equipos de 6 pulsos, que se utilizan siempre en funcionamiento con 12 pulsos.				

Las emisiones armónicas que proceden de convertidores o de reguladores presentan un espectro regular, y se ha calculado la carga armónica total que corresponde a las tensiones límites en el punto de conexión común.

Una encuesta relativa al número medio de convertidores y reguladores conectados en general a una red, y un estudio de la suma de los armónicos en fase aleatoria, han mostrado que los límites aplicables a un equipo individual representa un sexto de la carga total admisible apropiada a la red de 6,6 kV o 11 kV (véase la tabla C.1).

ANEXO D (Informativo)

CASO GENERAL DE LAS CARGAS EN MT REPARTIDAS A LO LARGO DE UNA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN: REPARTO DE LA EMISIÓN

D.1 Generalidades

Se puede resaltar que el método de reparto expuesto en el apartado 7.2 del presente informe no obtiene todo el provecho posible de la capacidad de absorción armónica del sistema, y este es especialmente el caso de las redes de distribución de media tensión con cables largos (≥ 10 km) y/o líneas aéreas (≥ 5 km) tal como se las encuentra frecuentemente; puede resultar una limitación demasiado estricta de la emisión en corriente armónica de las instalaciones de los consumidores conectados a lo largo de la línea. Generalmente, este tipo de reparto conduce a límites de emisión demasiado estrictos para la mayor parte de los armónicos (no para todos). Por ejemplo, se encuentran límites inferiores o iguales del 50% al 70% de los que se pueden admitir en una red de distribución que conlleva unas secciones por cables y otras por líneas aéreas.

El método siguiente propone un reparto de la contribución total aceptable entre los usuarios, con la posibilidad de una mejor toma en cuenta de las capacidades de absorción armónica de la red, para no penalizar a los consumidores situados en el extremo de la línea.

Este método es adecuado no solamente para tratar los casos específicos (estudio caso por caso), sino también para coordinar la emisión armónica en el momento del proyecto de la red de distribución, y para promover reglas de emisión de uso general o de reglas específicas adaptadas a una red de distribución particular. Son necesarios un modelo detallado de la red y un cálculo por ordenador para la puesta en funcionamiento del método.

NOTA Este método se aplica a toda la red (líneas aéreas, cables, condensadores en derivación, cargas, etc.) conteniendo resonancias armónicas en el nivel de tensión analizado. La respuesta armónica del sistema toma en cuenta todas las resonancias armónicas, paralela o en serie. Evidentemente, es indispensable realizar simulaciones numéricas como se indicó anteriormente.

El método responde principalmente a las tres etapas siguientes:

- en primer lugar, para una red de configuración dada, se trata de evaluar la repartición de la inyección de corriente armónica que proviene de las cargas de media tensión a lo largo de la línea; en consecuencia, se toma como hipótesis un reparto de carga común (reparto equitativo), y se propone un criterio teniendo por objeto no penalizar demasiado (desde el punto de vista de la emisión armónica) a los consumidores situados al comienzo de la línea;
- en segundo lugar, se trata de evaluar la respuesta armónica de la tensión de la red con la inyección de un conjunto de corrientes armónicas de referencia a todo lo largo de la línea; de esta evaluación se toma la más fuerte de las tensiones armónicas que aparecen en un punto cualquiera de la red para establecer los límites de emisión;
- en tercer lugar, se trata de evaluar los límites de corriente emitidos en cada punto de conexión de las cargas consideradas; estos límites deben tener en cuenta la respuesta armónica en la tensión del sistema efectivo de forma que respete la contribución total de las cargas de media tensión.

D.2 Definición del reparto de la inyección armónica a lo largo de la línea

La elección del tipo de reparto de la inyección armónica a lo largo de la línea tiene unas consecuencias tanto en la explotación de las capacidades de absorción de la red como en la penalización de los consumidores situados lejos del transformador de alimentación. Estas consecuencias son especialmente sensibles para las líneas de longitud superior a ≥ 10 km. En la elección que queda al distribuidor de electricidad, se recuerda tres tipos principales de reglas de reparto:

- inyección de corriente armónica constante;
- inyección de potencia armónica constante;
- inyección de corriente armónica inversamente proporcional a la impedancia vista del PCC (o tensión armónica constante).

Siendo

$$K_{Zi} = \frac{Z_{1PCCi}}{Z_{1BB}} = \frac{I_{ccBB}}{I_{ccPCCi}} \quad (D.1)$$

donde

Z_{1BB} es la impedancia vista del juego de barras a la frecuencia fundamental, en ohmios;

Z_{1PCCi} es la impedancia a la frecuencia fundamental, vista del PCC donde se conecta el consumidor (i) a lo largo de la línea, en ohmios;

I_{ccBB} es la corriente de cortocircuito trifásico simétrico en el juego de barras;

I_{ccPCCi} es la corriente de cortocircuito trifásico simétrico en el PCC del consumidor (i) a lo largo de la línea.

Las relaciones que rigen la inyección de corriente armónica a lo largo de la línea se escriben:

- inyección de corriente armónica constante $I_h = K(\text{constante})$;
- inyección de potencia armónica constante $I_h = 1/\sqrt{K_{Zi}}$;
- inyección de corriente armónica inversamente proporcional a la impedancia vista del PCC: $I_h = 1/K_{Zi}$ o $U_h = K$.

En el caso de las redes de distribución de MT con líneas de longitud ≥ 10 km, se incrementa la capacidad de la red para absorber las perturbaciones pasando del criterio a) al b) y después al c), y en consecuencia esta progresión hace decrecer las posibilidades de emisión de las instalaciones situadas en el extremo de la línea.

La ley de referencia de inyección armónica en base a las relaciones arriba indicadas, puede expresarse como sigue. Se recomienda aplicar en este orden el criterio b) después el criterio a) en función de las particularidades de la red y de las estrategias en uso por el distribuidor de energía eléctrica. Aplicando el criterio b) se debe examinar que:

- se obtiene un compromiso entre la mejor explotación de las posibilidades de absorción de las perturbaciones, y la imposición de límites estrictos a los usuarios alimentados lejos de la subestación fuente (en comparación de las impuestas a los que están próximos);
- se atenúan los efectos de las diferencias debidas a la impedancia de la red; por ejemplo, para usuarios que teniendo la misma potencia suscrita, la emisión de tensión armónica decrece cuando la impedancia del sistema decrece igualmente pero el número de usuarios sumados a las perturbaciones aumenta.

D.3 Evaluación de la respuesta armónica en la tensión de la red en la inyección de corrientes armónicas según el reparto de referencia a lo largo de la línea

Para determinar el efecto de la inyección de corriente armónica en el sistema estudiado, es preciso evaluar la tensión armónica a lo largo de la línea. Se puede llegar por medio de una inyección simultánea de corrientes armónicas, según la ley de reparto a lo largo de la línea para cada orden de armónico que interese (la ley de reparto corresponde a cada punto de conexión de las cargas de la red).

NOTA La evaluación para cada orden de armónico del efecto de cada fuente en el sistema, y la suma de todos los efectos individuales por medio de la ley de adición tomada como hipótesis, es una técnica posible.

Para una red dada, se debería retener la tensión armónica más grande de cada orden h susceptible de aparecer en un punto cualquiera. Estos valores se denominan por D_{Uh} y se expresan en %.

Con el criterio b) (inyección de potencia armónica constante) por ejemplo, se inyecta una unidad de corriente armónica (1 A en valor eficaz, por ejemplo) para cada carga conectada al juego de barras, y una corriente de $1/\sqrt{K_{Zi}}$ (A en valor eficaz) para cada carga conectada en el PCC_i a lo largo de la línea.

Se puede observar que estas fuentes de corrientes representan la inyección neta de la carga i en su PCC. Para que la evaluación de la respuesta armónica del sistema sea correcta, no es necesario tener en cuenta las impedancias paralelas interiores en la instalación de un usuario dado (cargas o filtros) sí y solamente sí se considera la inyección global de la instalación de este usuario en tanto que inyección neta.

D.4 Evaluación de los límites de emisión de la corriente armónica

La última etapa del método consiste en evaluar las inyecciones máximas admisibles (límites) de corrientes armónicas en cada punto donde las cargas examinadas se deben conectar. Para esto, se tiene en cuenta la respuesta armónica anterior del sistema y la ley anterior de reparto de la inyección armónica a lo largo de la línea.

La relación siguiente permite evaluar el límite de emisión en corriente armónica para cada orden, aplicable a una red dada en el caso del criterio de inyección a potencia armónica constante (criterio b):

$$E_{I_{hiMT}} = \left(\frac{1 A_{r.m.s.}}{\sqrt{K_{Zi}}} \right) \cdot \left(\frac{G_{hMT}}{D_{Uh}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha F_{MT}}} \right) \quad (D.2)$$

en amperios (valor eficaz).

- NOTA – en el caso del criterio de inyección de corriente constante, criterio a): $K_{Zi} = 1$;
- en el caso del criterio de inyección de corriente inversamente proporcional a la impedancia en el PCC, el criterio c): $\sqrt{K_{Zi}}$ debe ser sustituido por K_{Zi} .

Los correspondientes límites de emisión en corriente, de la corriente fundamental relativa a la potencia suscrita, resultan:

$$E_{I_{hiMT}\%} = 100 \cdot \frac{E_{I_{hiMT}}}{S_i / (\sqrt{3} \cdot U_N)} \quad (D.3)$$

donde

- $E_{I_{hiMT}}$ es el límite de emisión permisible en corriente armónica de orden h , para la carga i alimentada directamente en media tensión (valor eficaz en A);
- $E_{I_{hiMT}\%}$ es el límite de emisión permisible en corriente armónica de orden h , para la carga i alimentada directamente en media tensión (valor relativo en % de la corriente correspondiente a la potencia suscrita);
- G_{hMT} es la emisión armónica total de orden h en tensión, correspondiente al conjunto de las cargas alimentadas directamente en media tensión (expresada en %);
- D_{Uh} es la tensión armónica más alta de orden h que aparece en un punto cualquiera de la red estudiada, debida a la inyección de corrientes armónicas de orden h según la ley de reparto a lo largo de la línea que ha sido considerada (expresado en %) (véase la evaluación en el capítulo D.3);

- K_{Zi} = Z_{IPCCi}/Z_{IBB} o I_{ccBB}/I_{ccPCCi} como se define en el capítulo D.2;
- F_{MT} es el factor de coincidencia de las cargas de media tensión susceptibles de perturbar el sistema simultáneamente (el valor es función de la naturaleza de las cargas y de las características de la red, valor medio = 0,4);
- S_i = $P_i / \cos\phi$, es la potencia suscrita por el usuario i (kVA);
- P_i = $S_{MT} \cdot \cos\phi / N$ es la potencia activa suscrita por el usuario i (kW);
- S_{MT} es la potencia total de las cargas conectadas directamente en media tensión (con saturación de la capacidad de alimentación de la red) por medio del transformador de AT/MT que alimenta la línea;
- N es el número de cargas de MT supuestas en la red de distribución de media tensión (número de cargas alimentadas a partir del mismo juego de barras);
- U_N es la tensión nominal de la red de distribución (kV).

Los límites anteriores, valorados para una configuración de referencia de la red a un nivel dado, pueden servir de base para establecer límites apropiados con diversas configuraciones que no implican grandes variaciones de la impedancia armónica, de la carga total y del reparto de las cargas entre media y baja tensión. (Las variaciones de algunos parámetros tales como F_{MT} , F_{MI} , el número de usuarios de potencia suscrita (S_i) no suponen como consecuencia grandes variaciones de la impedancia armónica en la nueva configuración de la red, si la carga total de la red en el nivel considerado permanece aproximadamente constante.)

Cuando esas condiciones se cumplen, se puede fijar límites de emisión paramétricos, observando los parámetros y límites del caso de referencia con la ayuda del índice “ref”. Por ejemplo, el nivel de MT se puede tratar como sigue:

Caso donde prácticamente S_i :

$$E_{IhiMT\%} = \left(\frac{S_i}{S_{iref}} \right)^{1/\alpha} \cdot E_{IhiMTref\%} \cdot \left(\frac{S_{iref}}{S_i} \right) \quad (\%) \quad (D.4)$$

Caso donde prácticamente solo cambian S_i y F_{MT}

$$E_{IhiMT\%} = \left(\frac{S_i}{S_{iref}} \cdot \frac{F_{MTref}}{F_{MT}} \right)^{1/\alpha} \cdot E_{IhiMTref\%} \cdot \left(\frac{S_{iref}}{S_i} \right) \quad (\%) \quad (D.5)$$

D.5 Sistemas de alta tensión

La aplicación del método presentado en el anexo E a una red de alta tensión mallada, o a una red de muy alta tensión, constituye un procedimiento alternativo al dado en el apartado 7.2. Entonces, se debe seguir las etapas que se detallan a continuación:

- Evaluación de un valor objetivo de emisión total en AT.

Sobre la base de una hipótesis razonable, confirmada por la experiencia en una red nacional europea, según la cual en las horas punta en la red de AT los niveles de compatibilidad o los niveles de planificación de AT se reparten en razón del 80% viniendo de cargas perturbadoras en AT y del 20% viniendo de cargas en MT y BT, se puede evaluar el valor objetivo de emisión total en la red de AT por:

$$G_{hAT} = 0,8 \cdot L_{hAT} \quad (\%) \quad (D.6)$$

donde

G_{hAT} es la emisión armónica total de orden h debida a las cargas alimentadas directamente en AT (%);

L_{hAT} es el nivel de planificación armónica de orden h para la red de AT (%).

(En caso de duda, se puede evaluar el efecto de las cargas perturbadoras de MT y de BT en la red de AT por medio de una simulación clásica sin preocuparse de la inyección debida a las cargas conectas en AT o en MAT).

- Definición del reparto de las cargas alimentadas directamente en alta tensión, en condición plena de utilización de la red. Eso implica, para una red de AT mallada, el análisis de ciertas condiciones de carga.
- Declaración de la hipótesis de reparto de la inyección de las corrientes armónicas. El criterio de corriente armónica máxima inyectada constante se recomienda en las redes de AT malladas. (Manifiestamente, para evaluar la respuesta del sistema, no es necesario prever las inyecciones más que en los puntos donde las cargas son alimentadas directamente en AT, y tomar el valor de cada elemento de la inyección de referencia proporcionalmente al tamaño de la carga prevista).

En caso de duda debido a la gran potencia de la carga perturbadora y/o a las características de la red, se sugiere un estudio específico detallado y clásico que simula también las inyecciones equivalentes debidas a las cargas de MT y de BT.

En todos los casos, los límites de emisión expresados en tensión armónica ($E_{U_{hi}} = E_{I_{hi}} \cdot Z_h$) deben quedar en la gama:

- valor mínimo de $E_{U_{hiAT}} = 0,1\%$ (niveles de emisión básicos);
- valor máximo de $E_{U_{hiAT}} = G_{hAT}$.

ANEXO E (Informativo)

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS
PROPUESTOS PARA EVALUAR LOS LÍMITES DE EMISIÓN

Para más detalles sobre este ejemplo, se puede consultar el anexo H en la referencia bibliográfica [11].

E.1 Red de referencia e hipótesis

Para facilitar la aplicación de los diversos procedimientos que se proponen en el presente informe, para evaluar los límites de emisión armónica a utilizar en la etapa 2, este anexo da un ejemplo relativo a la evaluación de la emisión armónica de cargas de MT.

Para que la aplicación de los métodos propuestos sea posible por medio de cálculos manuales, no se examina más que una red de referencia simple y se basa en hipótesis simplificadas.

Se analiza una red de distribución de 20 kV mostrada en la figura E.1. El sistema se compone de seis líneas aéreas de 20 kV de una longitud de 25 km alimentadas por un transformador de AT/MT de 40 MVA. En el nivel de saturación del sistema, y tomando en cuenta la capacidad de sobrecarga así como el factor de utilización del transformador de AT/MT, la potencia total suministrada es de 44 MVA ($S_t = 40 \times 1,3 \times 0,85 = 44$).

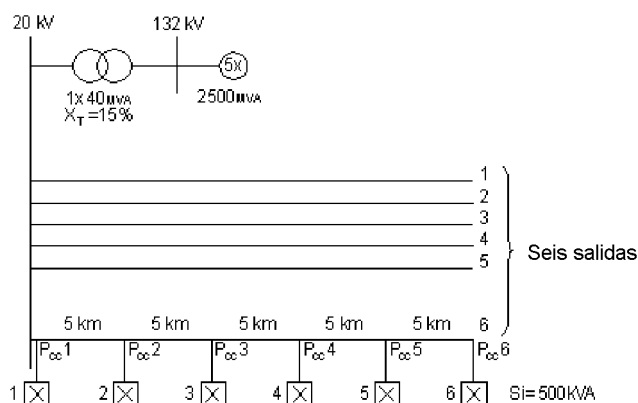


Figura E.1 – Red de distribución de seis líneas – seis cargas por línea

$S_i = 40 \times 1,3 \times 0,9 \times 0,4 / (6 \cdot 6) = 500 \text{ kVA}$ – Línea principal: 25 km de longitud.

(0,35 Ω / km a la frecuencia fundamental)

El reparto de las cargas, 40% en MT y 60% en BT, corresponde a una media. La potencia suministrada en MT es de 18 MVA ($S_{MT} = 44 \times 0,4 = 18$) y la potencia suministrada en BT es de 26 MVA ($S_{BT} = 44 \times 0,6 = 26$).

Para obtener resultados representativos, se supone un reparto igual a lo largo de cada línea de seis cargas de MT iguales, representadas en la figura E.1. La potencia S_{MT} se reparte entre 36 cargas iguales $S_i = 500 \text{ kVA}$.

Los otros parámetros se suponen de valores típicos relativos a una red de distribución (Italia); las definiciones se exponen en el apartado 7.2:

$$F_{ML} = 0,5, F_{MT} = 0,4 \text{ y } T_{hHM} = 1$$

A fin de reducir los cálculos manuales al mínimo, se admiten las hipótesis siguientes:

- se limita el cálculo del armónico hasta el de orden 5;
- se considera que no hay impedancia paralela a lo largo de las líneas;
- la toma en cuenta de las impedancias armónicas esta limitada sólo a las partes reactivas; la impedancia armónica, deducida de la impedancia de cortocircuito, se supone proporcional a la frecuencia (sin resonancia); los valores en el de orden 5, calculados a partir de los parámetros de la figura E.1, se dan en la tabla siguiente.

Tabla E.1 – Impedancia armónica de orden 5 en los PCC

Nudo PCC Nº	Distancia del juego de barras km	Impedancia armónica de orden 5 Ohmios
1	0	8,55
2	5	17,3
3	10	26,0
4	15	34,8
5	20	43,5
6	25	52,3

En consecuencia, se calcula los límites de emisión por medio de las tres aproximaciones diferentes presentadas en este informe:

- primer procedimiento según los apartados 7.2.2.1 y 7.2.2.2;
- segundo procedimiento según los apartados 7.2.2.1 y 7.2.2.2;
- tercera procedimiento según el apartado 7.2.2.2 y el anexo D.

E.2 Primer procedimiento

Los límites de emisión en tensión se deben calcular a partir de las ecuaciones (13) y (18) convertidos después en límites de emisión en corriente con la ayuda de la ecuación (21).

La contribución total aceptable G_{hMT+BT} en el armónico 5º puede leerse directamente en la tabla 8:

$$G_{hMT+BT} = 4\%$$

Los límites individuales de emisión armónica para las cargas conectadas en MT ($S_i = 500$ kVA) son calculados por la ecuación (18), con $\alpha = 1,4$ para $h = 5$ (según la tabla 5):

$$E_{Uhi} = 4\% \cdot 1,4 \sqrt{\frac{500}{44\ 000}} = 0,163\% \tag{E.1}$$

El límite aceptable de emisión armónica en tensión se puede convertir en límite de emisión armónica en corriente dividiendo la tensión por la impedancia armónica en el PCC de cada usuario de da en la ecuación ecuación (21). En la ecuación dada a continuación, los límites de emisión en corriente se expresan en % de la corriente de carga que corresponde a S_i , la potencia suscrita por el usuario, cuya instalación se conecta a un PCC de donde la impedancia armónica es Z_h y para una red de MT de tensión nominal U_N viene:

$$E_{Ihi} \% = \left(\frac{E_{Uhi} \% \cdot 1\,000 \cdot U_N^2}{Z_h \cdot S_i} \right) \quad (E.2)$$

Para las cargas conectadas al nudo 1, $Z_h = 8,55 \, \Omega$, así:

$$E_{Ihi} \% = \left(\frac{0,163 \% \cdot 1\,000 \cdot 20^2}{8,55 \cdot 500} \right) = 15,2\% \quad (E.3)$$

Igualmente, para las cargas conectadas al nudo 6, $Z_h = 52,3 \, \Omega$:

$$E_{Ihi} \% = \left(\frac{0,163 \% \cdot 1\,000 \cdot 20^2}{52,3 \cdot 500} \right) = 2,5\% \quad (E.4)$$

La tabla E.2 da los resultados calculados para las otras cargas conectadas a los otros nudos a lo largo de la línea.

Tabla E.2 – Límites de emisión de corriente armónica de orden 5 calculados conforme al primer procedimiento (suponiendo implícitamente $F_{MT} = 1$)

Nudo PCC Nº	Distancia de la fuente km	E_{Ihi} (%) ¹⁾
1	0	15,2
2	5	7,55
3	10	5,0
4	15	3,75
5	20	3,0
6	25	2,5

1) % de la corriente de carga de la instalación de cada usuario cuya potencia suscrita es $S_i = 500$ kVA.

E.3 Segundo procedimiento

En el cuadro del segundo método, la contribución global de las cargas de MT directamente alimentadas en MT se obtiene a partir de la ecuación (14):

$$G_{hMT} = \sqrt[3]{\frac{S_{MT}}{S_{MT} + S_{BT} \times F_{ML}}} \times \left[L_{hMT}^\alpha - (T_{hHM} \times L_{hAT})^\alpha \right] \quad (E.5)$$

A partir de los valores dados en el capítulo E.1 y con $L_{hAT} = 2\%$ y $L_{hMT} = 5\%$ (tomados de la tabla 2), se obtiene:

$$G_{hMT} = 1,4 \sqrt{\frac{18}{18+26 \cdot 0,5} \left[5^{1,4} - (1 \cdot 2)^{1,4} \right]} = 2,7\% \quad (E.6)$$

La evaluación de los límites de emisión individuales de las cargas de MT se practica por la aplicación de la ecuación (18):

$$E_{UhiMT} = G_{hMT} \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{MT} \cdot F_{MT}}} \quad (E.7)$$

$$E_{UhiMT} = 2,7\% \cdot 1,4 \sqrt[3]{\frac{500}{18\,000 \cdot F_{MT}}} \quad (E.8)$$

Para valores de $F_{MT} = 1,0$ y $0,4$ respectivamente, obtenemos:

– para $F_{MT} = 1,0: \Rightarrow E_{UhiMT} = 0,2\%$

– y para $F_{MT} = 0,4: \Rightarrow E_{UhiMT} = 0,4\%$

Se puede convertir los límites de emisión en tensión arriba indicados en límites de emisión en corriente, expresados en % de la corriente suscrita por el usuario i por medio de la misma ecuación que la utilizada en E.2, es decir, la ecuación (21). Por ejemplo, para las cargas conectadas en el nudo 6, $Z_h = 52,3 \Omega$, y así:

para $F_{MT} = 1,0$:

$$E_{Ihi} \% = \frac{0,2\% \cdot 1\,000 \cdot 20^2}{52,3 \cdot 500} = 3,0\% \quad (E.9)$$

para $F_{MT} = 0,4$:

$$E_{Ihi} \% = \frac{0,4\% \cdot 1\,000 \cdot 20^2}{52,3 \cdot 500} = 6,1\% \quad (E.10)$$

La tabla E.3 da los resultados con otros nudos a lo largo de la línea.

Tabla E.3 – Límites de emisión de corriente armónica de orden 5 calculados conforme al segundo procedimiento

Nudo PCC Nº	Distancia del juego de barras km	E_{IhiMT} para $F_{MT} = 1$ % ¹⁾	E_{IhiMT} para $F_{MT} = 0,4$ % ¹⁾
1	0	18,7	37,4
2	5	9,25	17,5
3	10	6,15	12,3
4	15	4,6	9,2
5	20	3,7	7,35
6	25	3,0	6,1

1) % de la corriente de carga de la instalación de cada usuario cuya potencia suscrita es $S_i = 500$ kVA.

E.4 Tercer procedimiento

Se trata del procedimiento presentado en el apartado 7.2.2.2 y descrito en el anexo D. Tiene por objeto tener en cuenta que la aplicación de las reglas anteriormente citadas, con cargas repartidas a lo largo de la línea, puede llevar a especificar límites de emisión demasiado estrictos para los usuarios cuyas instalaciones están conectadas al extremo de la línea, donde la potencia de cortocircuito es sensiblemente más baja que en la proximidad del juego de barras.

El cálculo de la contribución total aceptable de las cargas de MT conectadas directamente en MT se trata de la misma manera que en el segundo procedimiento, tal y como se detalla en el capítulo E.3.

Se valoran los límites de emisión siguiendo las etapas descritas en el anexo D.

E.4.1 Definición del reparto de inyecciones armónicas a lo largo de la línea

En este ejemplo, se considera tres tipos de reparto como los definidos en el capítulo D.2:

- inyección de corriente armónica constante: $I_h = 1$ A en valor eficaz (constante para todos los PCC a lo largo de la línea);
- inyección de potencia armónica constante: $I_h = 1/\sqrt{K_{zi}}$; por ejemplo en el PCC del nudo 6 se obtiene:
 $I_h = 1/\sqrt{6,12} = 0,404$ A en valor eficaz; todos los valores de referencia de inyección se dan en la tabla E.4, columna 4;
- inyección armónica inversamente proporcional a la impedancia vista del PCC $I_h = 1/K_{zi}$: por ejemplo, en el PCC correspondiente al nudo 6, resulta: $I_h = 1/6,12 = 0,163$ A en valor eficaz; todos los valores calculados de las corrientes inyectadas I_{hi} se dan en la tabla E.4, columna 5.

Tabla E.4 – Conjunto de las inyecciones de referencia de orden 5

Nudo PCC Nº	K_{zi} 1)	Inyección de corriente armónica de referencia- I_{si} A, en valor eficaz		
		Reparto a	Reparto b	Reparto c
1	1	1	1	1
2	2,02	1	0,703	0,494
3	3,05	1	0,575	0,328
4	4,07	1	0,496	0,246
5	5,09	1	0,443	0,196
6	6,12	1	0,404	0,163

1) $K_{zi} = Z_{IPCCi} / Z_{1BB}$
 Para la red examinada en este ejemplo, $Z_{1BB} = Z_1$ en el PCC nudo 1.

E.4.2 Evaluación de la respuesta armónica en la tensión del sistema

Las tres etapas siguientes muestran un método posible de evaluación de la respuesta armónica en la tensión del sistema:

- evaluar en cada PCC la tensión armónica que resulta de cada fuente individual definida según el reparto de referencia;
- adición en cada nudo de los efectos individuales de todas las fuentes por aplicación del apartado 6.2 de este informe;
- retener la tensión armónica más fuerte que aparece en el PCC más crítico y llamarla D_{Uh} ; este valor se tomará en cuenta para el cálculo de los límites de emisión.

Tomando el reparto de referencia que dice “a inyección de potencia constante” (reparto b), calculamos a continuación el efecto en la tensión armónica en el PCC número 6 de la inyección debida a la carga situada en el PCC número 3.

$$I_{S13} = 0,575 \text{ A valor eficaz - (véase la tabla E.4)}$$

$$Z_5 = 26 \Omega - \text{en el PCC nudo 3 - (véase la tabla E.1)}$$

$$U_5 \% = (0,575 \cdot 26) / (20\,000 / \sqrt{3}) \cdot 100\% = 0,129\%$$

Según la hipótesis de ausencia de impedancia conectada en paralelo a lo largo de la línea, el efecto de esta carga en la tensión armónica en los nudos 3, 4, 5 y 6 de esta misma línea es idéntico. La tensión armónica en los nudos 1 y 2 es proporcional a las impedancias armónicas respectivas en estos nudos.

Se calcula por la misma técnica el efecto de cada carga, y se repite el método para cada nudo. Los resultados se muestran en la tabla E.5.

Tabla E.5 – Respuesta de la red al reparto de inyección de referencia para el armónico 5; inyección a potencia constante

Nudo PCC Nº	Inyección de corriente armónica de orden 5 Valor eficaz A	Tensiones armónicas de orden 5 debidas a la inyección de corriente por las cargas % de $U_N / \sqrt{3}$							U ₅ total en el PCC % ¹⁾
		Otras líneas %	Carga 1 %	Carga 2 %	Carga 3 %	Carga 4 %	Carga 5 %	Carga 6 %	
1	1,000	0,518	0,074	0,052	0,042	0,037	0,033	0,030	0,590
2	0,703	0,518	0,074	0,105	0,086	0,074	0,066	0,061	0,667
3	0,573	0,518	0,074	0,105	0,129	0,112	0,100	0,091	0,731
4	0,496	0,518	0,074	0,105	0,129	0,149	0,134	0,122	0,780
5	0,443	0,518	0,074	0,105	0,129	0,149	0,167	0,152	0,812
6	0,404	0,518	0,074	0,105	0,129	0,149	0,167	0,183	0,828

1) Efecto total de la inyección del reparto de referencia calculada como sigue: Por ejemplo, la tensión total del armónico 5 en el PCC nudo 6 (última columna de la tabla de arriba) es el resultado de la combinación de las tensiones armónicas individuales debidas a las otras cargas; el cálculo resulta a partir de los valores en la última línea de la tabla que resulta de la ley de adición propuesta en el apartado 6.2: $D_{U5PCC6} = (0,518^{1,4} + 0,074^{1,4} + 0,105^{1,4} + \dots)^{1/1,4} = 0,828\%$

La perturbación máxima que aparece en el PCC número 6 representa la síntesis de la respuesta del sistema considerado en este ejemplo para el armónico de orden cinco, y como se preconiza más arriba, este valor se toma en cuenta para el cálculo de los límites de emisión, con la denominación $D_{Uh} = 0,828\%$.

E.4.3 Estimación de los límites de emisión de la corriente armónica para $S_i = 500 \text{ kVA}$

Se valora los límites de emisión de la corriente armónica, en el caso del reparto que dice “una potencia constante”, por medio de las ecuaciones (D.2) y (D.3) mostradas a continuación:

$$E_{IhiMT} = \frac{G_{hMT}}{D_{Uh} \cdot \sqrt{K_{Zi}} \cdot \sqrt[1,4]{F_{MT}}} \tag{E.11}$$

y

$$E_{I_{hiMT}} \% = 100 \cdot \frac{E_{I_{hiMT}}}{S_i / (\sqrt{3} \cdot U_N)} \quad (E.12)$$

Se presenta aquí el ejemplo de los límites de emisión de corriente armónica de las cargas del nudo 6, recordando que $G_{hMT} = 2,7\%$, $D_{Uh} = 0,828\%$ y que según la tabla E.4, $K_{zi} = 6,12$. Así:

para $F_{MT} = 1,0$

$$E_{I_{hiMT}} = \frac{2,7\%}{0,828\% \cdot \sqrt{6,12 \cdot 1,4^1}} = 1,32 \text{ A en valor eficaz} \quad (E.13)$$

y

$$E_{I_{hiMT}} \% = 100 \cdot \frac{1,32}{500 / (\sqrt{3} \cdot 20)} = 9,15\% \quad (E.14)$$

para $F_{MT} = 0,4$

$$E_{I_{hiMT}} = \frac{2,7\%}{0,828\% \cdot \sqrt{6,12 \cdot 1,4^0,4}} = 2,53 \text{ A en valor eficaz} \quad (E.15)$$

y

$$E_{I_{hiMT}} \% = 100 \cdot \frac{2,53}{500 / (\sqrt{3} \cdot 20)} = 17,6\% \quad (E.16)$$

La tabla E.6 da los límites calculados así para los otros nudos.

La aplicación de las técnicas expuestas anteriormente permiten estimar los límites de emisión para otros tipos de reparto de referencia de la inyección armónica: el que dice “a corriente constante” (reparto a para el que $K_{zi} = 1$), y el que dice “inversamente proporcional a la impedancia en el PCC” (reparto c para el que $\sqrt{K_{zi}}$ debe ser sustituido por K_{zi} en las ecuaciones citadas anteriormente).

Tabla E.6 – Límites de emisión en corriente del 5º armónico calculados conforme al tercer procedimiento para el reparto de referencia b – (inyección a potencia constante)

Nudo PCC Nº	Distancia del juego de barras km	$E_{I_{hiMT}}$ para $F_{MT} = 1$ % ¹⁾	$E_{I_{hiMV}}$ parar $F_{MT} = 0,4$ % ¹⁾
1	0	22,6	43,5
2	5	15,9	30,6
3	10	12,9	24,9
4	15	11,2	21,5
5	20	10,0	19,3
6	25	9,15	17,6

1) % de la corriente de carga de la instalación de cada usuario cuya potencia suscrita es $S_i = 500$ kVA.

Se puede obtener la evaluación de los límites de emisión armónica para cualquiera de las potencias suscritas a partir de los resultados calculados anteriormente para $S_i = 500$ kVA, por medio de las ecuaciones (D.4) o (D.5); eso es válido en el caso de variaciones poco severas de la impedancia armónica y de todas las cargas directamente alimentadas en MT.

E.5 Resumen de los resultados principales

Se pueden resumir los resultados de este ejemplo para comparar los tres procedimientos de evaluación diferentes de los límites de emisión de armónicos (véase la tabla E.7 siguiente).

Tabla E.7 – Resumen de los resultados obtenidos por los diferentes procedimientos para este ejemplo

Evaluación de los límites de emisión armónica		Límites de emisión de corriente armónica de orden 5 E_{limMT} % ¹⁾			
		$F_{\text{MT}} = 1,0$		$F_{\text{MT}} = 0,4$	
Punto a lo largo de la línea		Nudo 1	Nudo 6	Nudo 1	Nudo 6
Primer procedimiento		15,2	2,5	no aplicable	no aplicable
Segundo procedimiento		18,7	3,0	37,4	6,1
Tercer procedimiento	a) Inyección en corriente armónica constante	12,4	12,4	23,9	23,9
	b) Inyección en potencia armónica constante	22,6	9,15	43,5	17,6
	c) Inyección en corriente armónica inversamente proporcional a Z_h	35,7	5,8	68,7	11,2
1) % de la corriente de carga de la instalación de cada usuario cuya potencia suscrita es $S_i = 500$ kVA.					

En el caso simplificado del primer procedimiento, se supone que todas las cargas de BT y de MT son simultáneamente perturbadoras (lo que supone implícitamente que F_{ML} y F_{MT} valen 1,0). Resultando que los límites de emisión autorizados son generalmente bajos y que la capacidad de absorción de la red puede no utilizarse plenamente.

El segundo procedimiento permite considerar que las cargas de BT y de MT no son simultáneamente perturbadoras (en este caso $F_{\text{ML}} = 0,5$); en consecuencia, los límites de emisión en corriente de las cargas de MT ($S_i = 500$ kVA) son sensiblemente superiores ($E_{\text{limMT}} = 18,7\%$ en lugar de 15,2% en el nudo 1). Además se puede considerar también que todas las cargas de MT no son más simultáneamente perturbadoras, y eso permite incrementar los límites de emisión en un factor 1,92 para $F_{\text{MT}} = 0,4$. Es especialmente importante determinar el factor de coincidencia de las cargas perturbadoras de MT, para el orden de armónico más crítico (normalmente el de orden 5), para evitar la necesidad de un filtrado generalizado.

El tercer procedimiento va más lejos, teniendo en cuenta la respuesta efectiva de la red cuya síntesis viene dada por el factor de perturbación en tensión D_{Uh} que se utiliza para definir los límites de emisión. Eso permite una compensación que autoriza mayor emisión a las cargas conectadas a lo largo de la línea, previendo que el nivel de perturbación admisible en la tensión no se exceda. La elección del tipo de inyección de referencia es del todo importante en la aplicación de este método que se detalla en el capítulo D.2. Los límites de emisión autorizados en el caso del reparto a inyección de potencia constante representan un compromiso entre la utilización máxima de la capacidad de absorción armónica de la red y la definición de límites que no sean demasiado exigentes.

ANEXO F (Informativo)

EJEMPLOS DE CASOS TÍPICOS EN AT [12]

F.1 Konti-Skan 2, línea de transporte de AT en corriente continua

La figura F.1 muestra el esquema unifilar de la interconexión entre la línea de transporte de AT en corriente continua Konti- Skan 2 y la red alterna. La potencia de cortocircuito en el nudo 1 es de 3 700 MVA. Este caso es especialmente interesante por razón de la proximidad de otra subestación de interconexión de ATcc, dando así un ejemplo de aplicación de la ecuación (24').

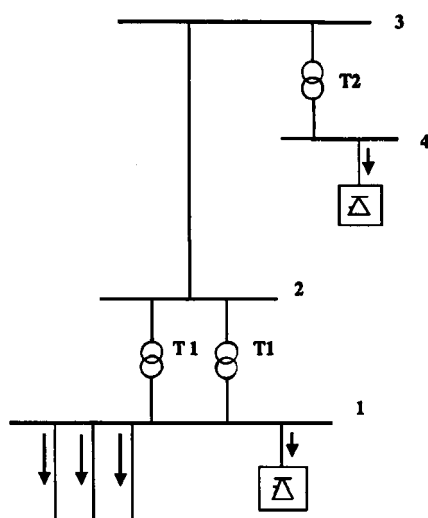


Figura F.1 – Konti-Skan: esquema de conexión entre el enlace de alta tensión en corriente continua y la red de alterna

Límites de la especificación inicial (en la puesta en servicio)

$$U_h \leq 1\%$$

$$\text{THD} \leq 1,5\%$$

(para las tensiones armónicas en el nudo 1 incluyendo la distorsión preexistente).

Límites según esta guía:

$$S_i = 300 \text{ MVA (potencia del enlace Konti-Skan 2)}$$

$$\Sigma S_{\text{out}} = 500 \text{ MVA (medida en el nudo 1)}$$

$$S_{t1} = 300 + 500 = 800 \text{ MVA}$$

$$S_{t4} = 275 \text{ MVA (potencia del antiguo enlace de alta tensión en corriente continua ATcc Konti-Skan 1)}$$

$$K_{h4-1} = 0,15 \text{ (los cálculos dan unos resultados comprendidos entre 0,1 y 0,2 en función del orden del armónico; aquí utilizamos 0,15 para todos los ordenes).}$$

Las ecuaciones (24') y (26) dan entonces:

$$S_t = 800 + (0,15 \cdot 275) = 841 \text{ MVA}$$

$$E_{Uhi} = L_{hAT} \alpha \sqrt{\frac{S_i}{S_t}} \quad (\text{véase la tabla F.1})$$

Comparación entre las nuevas especificaciones y los resultados de la medición:

Tabla F.1 – Konti-Skan 2, especificaciones y mediciones

h	L_h %	E_{Uhi} especificaciones %	U_h mediciones %
2	1,5	0,54	–
3	2,0	0,71	0,60
4	1,0	0,36	–
5	2,0	0,71	0,70
6	0,5	0,18	–
7	2,0	0,71	0,30
8	0,2	–	–
9	1,0	0,48	–
10	0,2	–	–
11	1,5	0,72	0,60
13	1,5	0,72	0,30
15	0,3	0,18	–
17	1,0	0,60	0,15
19	1,0	0,60	0,10
23	0,7	0,42	0,35
25	0,7	0,42	0,15
29	0,60	–	–
31	0,56	–	–
35	0,50	0,29	0,20
37	0,47	0,28	0,10
47	0,37	0,22	0,15
49	0,36	0,22	–
THD	3,0	1,8	1,3

h es el orden del armónico
L_h es el nivel de planificación
E_{Uhi} es el límite de emisión
U_{hmeas} es la medida de la tensión armónica en presencia de la instalación productora de armónicos considerada.
NOTA Las mediciones en Konti-Skan 2 son valores medios efectuados sobre 64 periodos de la red.

Las mediciones muestran que los nuevos requisitos (límites de la etapa 2) se cumplen fácilmente. Muestran igualmente que esos nuevos requisitos están más próximos a la realidad física de los fenómenos que los antiguos (amplitud de la tensión armónica decreciente con la frecuencia).

F.2 Fábrica metalúrgica

La figura F.2 muestra el cuadro sinóptico de conexión de la fábrica metalúrgica en la red de corriente alterna. La potencia de cortocircuito en el nudo 1 es de 5 000 MVA.

Límites según esta guía:

S_i = 150 MVA (potencia de la fábrica metalúrgica)

ΣS_{out} = 600 MVA (medida en el nudo 1)

S_t = 600 MVA

$$EU_{hi} = L_{hAT} \sqrt{\frac{S_i}{S_t}} \quad (\text{Véase la tabla F.2})$$

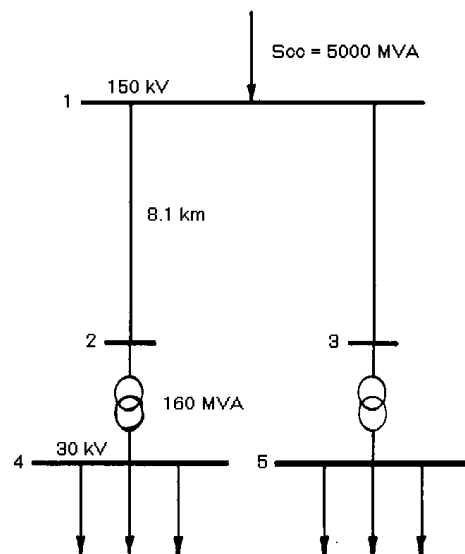


Figura F.2 – Conexión en la red de corriente alterna de una fábrica metalúrgica
(los dos nudos 4 y 5 en 30 kV pertenecen a la fábrica)

Comparación entre las nuevas especificaciones y los resultados de las mediciones:

Tabla F.2 – Fábrica metalúrgica, especificaciones y mediciones

h	L_h %	E_{U_{hi}} especificaciones %	U_h mediciones %
2	1,5	0,38	–
3	2,0	0,50	0,43
4	1,0	0,25	–
5	2,0	0,50	0,49
6	0,5	0,13	–
7	2,0	0,50	0,35
8	0,2	0,07	–
9	1,0	0,37	0,07
10	0,2	0,07	–
11	1,5	0,56	0,44
13	1,5	0,56	0,48
15	0,3	0,15	0,11
17	1,0	0,50	0,37
19	1,0	0,50	0,45
23	0,7	0,35	1,15
25	0,7	0,35	0,50
29	0,60	0,30	0,16
31	0,56	0,28	0,22
35	0,50	0,25	0,33
37	0,47	0,24	0,31
47	0,37	0,19	–
49	0,36	0,18	–
THD	3,0	1,50	1,78

NOTA Mediciones cotidianas con el 95% de probabilidad fueran efectuadas en un período de una semana. Se ha retenido el valor mayor de cada día para cada orden de armónico.

Este ejemplo es muy interesante porque los límites de la etapa 2 eran sobrepasados para ciertos órdenes de armónicos ($h = 23, 25, 29, 31, 35, 37$) en la red general de 150 kV. Los niveles de planificación eran excedidos también para $h = 23$ (!). Sin embargo, el distribuidor de electricidad ha aceptado esta situación sin modificación mientras que no ocurra ningún problema. Eso demuestra la importancia de un examen suficientemente flexible de esos problemas. El exceso de los límites de la etapa 2, e incluso de los niveles de planificación, fue admitido bajo la etapa 3 evitando así gastos de filtrado.

ANEXO G (Informativo)**LISTA DE LOS PRINCIPALES SÍMBOLOS ALFABÉTICOS****Letras**

α	exponente de la ley de adición
C	nivel de compatibilidad
E	límite de emisión
F	coeficiente de coincidencia o de simultaneidad de las cargas
h	orden del armónico
i	carga o usuario individual (i)
I	corriente
j	equipo o aparato unitario en la instalación del usuario i
K	coeficiente o relación entre dos valores (sentido general)
L	nivel de planificación
N	número de cargas en la red de distribución considerada
PCC	punto de conexión común
P	potencia activa
Q	potencia reactiva
S	potencia aparente
T	coeficiente de transferencia
U	tensión
Z	impedancia

Índices

1BB	(impedancia) a la frecuencia fundamental vista desde el juego de barras
1PCCi	(impedancia) a la frecuencia fundamental vista del PCC en el que la instalación del usuario (i) está conectada
FHM	transferencia de flicker en AT/MT
FML	transferencia de flicker en MT/BT
h	orden del armónico
hHM	transferencia de tensión armónica de orden h en AT/MT
hLM	transferencia de tensión armónica de orden h en BT/MT
hML	transferencia de tensión armónica de orden h en MT/BT
i	carga o usuario individual (i)
I _{hiMT}	corriente armónica de orden h de la instalación del consumidor (i) en MT expresado en valor eficaz
I _{hiMT} %	corriente armónica de orden h de la instalación del consumidor (i) en MT expresado en % del valor suscrito

j	equipo o aparato (j)
LM	entre cargas de BT y MT
BT	cargas de BT
ML	entre cargas de MT y de BT
MT	cargas de MT
N	Nominal
ccBB	cortocircuito trifásico en el juego de barras
ccPCCi	cortocircuito trifásico en el PCC en el que la instalación del usuario (i) está conectada

Lista de los símbolos principales

(Los símbolos evidentes no están relacionados)

C_{PstBT}	nivel de compatibilidad de los flicker de corta duración en BT (p.u.)
C_{UhBT}	nivel de compatibilidad de la tensión armónica de orden h en BT (%)
D_{uh}	respuesta armónica (la mayor tensión armónica de orden h sobreviniente en cualquier punto de la red considerada debido a la inyección de corriente según el reparto de referencia) (%)
E_{IhiMT}	límite de emisión en corriente armónica de orden h admitido por la instalación del usuario (i) directamente alimentada en MT (como valor eficaz)
$E_{IhiMT} \%$	límite de emisión en corriente armónica de orden h admitido por la instalación del usuario (i) directamente alimentada en MT (% de la corriente suscrita)
E_{PstiMT}	límite de emisión de flicker de corta duración admitido por la instalación del usuario (i) directamente alimentada en MT (p.u.)
E_{UhiBT}	límite de emisión en tensión armónica de orden h admitido por la carga (i) directamente alimentada en BT (%)
E_{UhiMT}	límite de emisión en tensión armónica de orden h admitido por la carga (i) directamente alimentada en MT (%)
F_{ML}	coeficiente de coincidencia entre cargas perturbadoras de las redes de MT y BT
F_{MT}	coeficiente de coincidencia para las cargas en MT simultáneamente perturbadoras, cuyo valor es función de las propiedades de las cargas y de las redes
G_{PstiMT}	emisión total de flicker de corta duración para todas las cargas alimentadas directamente en MT (p.u.)
G_{hAT}	emisión de tensión armónica total de orden h para todas las cargas alimentadas directamente en AT (%)
G_{hMT}	emisión de tensión armónica total de orden h para todas las cargas alimentadas directamente en MT (%)
I_{ccBB}	corriente de cortocircuito trifásico en el nivel del juego de barras
I_{ccPCCi}	corriente de cortocircuito trifásico en el nivel del PCC del usuario (i)
K_{zi}	Z_{1PCCi}/Z_{1BB} o I_{ccBB}/I_{ccPCCi} (definido en anexo D, capítulo D.2)
L_{PstAT}	nivel de planificación de flicker de corta duración en AT (p.u.)
L_{PstMT}	nivel de planificación de flicker de corta duración en MT (p.u.)
L_{UhAT}	nivel de planificación de las tensiones armónicas de orden h en AT (%)
L_{UhMT}	nivel de planificación de las tensiones armónicas de orden h en MT (%)
N	número presumible de cargas en MT de la red de distribución en MT considerado (número de cargas alimentadas a partir del mismo juego de barras)

PCC o PCC_i	punto de conexión común del consumidor (i)
P_i	Potencia activa suscrita por el consumidor individual (i) (kW)
P_{stAT}	flicker de corta duración en AT
P_{stiMT}	flicker de corta duración en MT debido a la instalación (i)
P_{stMT}	flicker de corta duración en MT
Q_c	potencia reactiva de origen capacitivo
S_{Dwi}	potencia perturbadora ponderada de la instalación del consumidor i
S_i	$(P_i/\cos \varphi)$ potencia aparente suscrita por el consumidor individual (i) (kVA) (es preciso utilizar el factor de potencia en lugar del $\cos \varphi$ si la carga es fuertemente perturbadora)
S_{BT}	potencia total de las cargas alimentadas directamente en MT (en saturación de las posibilidades de la red); (como media el valor es de 0,6 p.u. de la potencia asignada del transformador de MT/BT)
S_{MT}	potencia total de las cargas alimentadas directamente en MT a partir del/de los transformador/es de alimentación de AT/MT (en saturación de las posibilidades de la red); (en medio el valor es de 0,4 p.u. de la potencia asignada del transformador de AT/MT)
S_{cc}	potencia de cortocircuito
T_{FHM}	coeficiente de transferencia de AT/MT del flicker; valor que depende de las características de la red y de la carga (en medio el valor es de 0,8) [11]
T_{FML}	coeficiente de transferencia de MT/BT del flicker; valor que depende de las características de la red y de la carga (en medio el valor es de 0,95) [11]
T_{hHM}	coeficiente de transferencia de AT/MT de la tensión armónica de orden h; valor que depende de las características de la red y de la carga (como media el valor es de 1)
T_{hML}	coeficiente de transferencia de MT/BT de la tensión armónica de orden h; valor que depende de las características de la red y de la carga (como media el valor es de 0,95)
U_h	tensión armónica de orden h (genérico)
U_{hAT}	tensión armónica de orden h en AT
U_{hMT}	tensión armónica de orden h en MT
U_{hiMT}	contribución a la tensión armónica de orden h de la instalación del consumidor (i) en MT
U_N	tensión nominal de la red de distribución (kV)
Z_{1BB}	Impedancia a la frecuencia fundamental en el juego de barras (ohmios)
Z_{1PCCi}	Impedancia a la frecuencia fundamental en el PCC del usuario (i) a lo largo del comienzo de la línea (ohmios)
Z_h	Impedancia armónica de orden h de la red de distribución en el punto de conexión común (PCC) a partir del cual la instalación del consumidor (i) se alimenta (ohmios a la frecuencia armónica)
Z_i	Impedancia vista del PCC en el que la instalación del usuario (i) está conectada

ANEXO H (Informativo)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC 61000-2-6:1995 *Compatibilidad electrónica (CEM). Parte 2-6: Entorno. Evaluación de los niveles de emisión en la alimentación de plantas industriales respecto a las perturbaciones conducidas en baja frecuencia.*
- [2] Guide for assessing the network harmonic impedance (A. Robert, T. Deflandre, WG CC02, ELECTRA, August 1996).
- [3] Flickern von Leuchstofflampen durch Tonfrequenz-Rundsteuerimpulse (HJ Hoffmann et al, etz Bd.102 (1981) H.24, S.1268-1272).
- [4] Flicker caused by interharmonics (W Mombauer, etzArchiv Bd.12 (1990) H.12, S.391-396).
- [5] Grundsätze für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen (VDEW, 92).
- [6] Investigations on the impact of voltage and current harmonics on end-use devices and their protection (EF Fuchs, DOE/RA/50150--23, DE87 008018, Jan 87).
- [7] Untersuchungen von Störungen beim Betrieb einer Tonfrequenz-Rundsteueranlage infolge von Modulations-effekten (R Kruft, Elektrizitätswirtschaft, Jg.79 (1980), H.20, S.755-759).
- [8] IEEE Std 776.
- [9] CSA C22.3 N°.3.
- [10] Report on the harmonic impedance of supply systems (Electricity Association, Engineering Technical Report N°.112, 1988).
- [11] Report on EMC coordination in electricity supply systems (UNIPEDE, Normcomp, August 1994).
- [12] Connection of harmonic producing installations in high-voltage networks with particular reference to HVDC, Part 1: guide for limiting harmonic voltage effects (A Robert on behalf of JTF 01 from WG CIGRE/CIREDC C02 and WG CIGRE 14.03, ELECTRA, N°149, August 93).
- [13] Equipment producing harmonics and conditions governing their connection to the mains power supply (GT CIGRE 36.05, ELECTRA 123, Mar 89).
- [14] Connection of distorting loads - An international study (A Robert, J Marquet on behalf of WG CIGRE/CIREDC C02, CIREDC 91, Paper 2.04).
- [15] IEC 61000-2-1:1990 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-1: Entorno. Electromagnético para perturbaciones conducidas de baja frecuencia y transmisión de señales de redes de suministro público.*
- [16] IEC 61000-2-2:1990 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.*
- [17] Assessing voltage quality with relation to harmonics, flicker and unbalance (A Robert and J Marquet on behalf of WG CC02, CIGRE 92 - Paper 36-203, CIREDC Bulletin No 16 - Nov 92).

- [18] Statistical approach for harmonics measurements and calculations (JM Crucq and A Robert, CIRED 89, Paper 2.02).
- [19] Harmonic currents in controlled three-phase rectifier installations (E Wargowsky, CIRED 81, Paper 2.7).
- [20] AC system modeling for AC filter design, An overview of impedance modeling (J Arrillaga, CIGRE JTF 36.05.02/14.03.03, ELECTRA, March 1996).
- [21] Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems (IEC 77A(Secr)88, 1994).

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD DE VIGO