

Junio 2006

TÍTULO

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 2-8: Entorno

Huecos de tensión e interrupciones breves en las redes eléctricas de suministro público, con inclusión de resultados de medidas estadísticas

(IEC/TR 61000-2-8:2002)

Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-8: Environment. Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results (IEC/TR 61000-2-8:2002).

Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2-8: Environnement. Creux de tension et coupures brèves sur les réseaux d'électricité publics incluant des résultats de mesures statistiques (CEI/TR 61000-2-8:2002).

CORRESPONDENCIA

Este informe es equivalente al Informe Técnico IEC/TR 61000-2-8:2002.

OBSERVACIONES

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 29088:2006

© 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

44 Páginas

Grupo 27

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	5
INTRODUCCIÓN	7
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	8
2 DEFINICIONES	8
3 DESCRIPCIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN Y DE LAS INTERRUPCIONES BREVES	9
3.1 Fuente de los huecos de tensión	9
3.2 Duración del hueco de tensión	10
3.3 Amplitud del hueco de tensión.....	10
3.4 Interrupciones breves	12
3.5 Causas de los huecos de tensión y las interrupciones breves.....	13
3.6 Ejemplo de falta en una red de MT.....	13
4 EFECTOS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN Y DE LAS INTERRUPCIONES BREVES	15
4.1 Efectos generales.....	15
4.2 Efectos sobre dispositivos particulares	15
5 MEDIDAS CORRECTORAS	18
5.1 Consideraciones generales.....	18
5.2 Algunos ejemplos de medidas correctoras.....	19
6 MEDIDA DE LOS HUECOS DE TENSIÓN Y DE LAS INTERRUPCIONES BREVES	20
6.1 Convenciones adoptadas en la medida de los huecos de tensión y de las interrupciones breves	20
6.2 Medida de los huecos de tensión	22
6.3 Medida de interrupciones breves	23
6.4 Clasificación de los resultados de medida	23
6.5 Agregación de resultados de medida.....	24
7 RESULTADOS DE MEDIDA DISPONIBLES	25
7.1 Estadísticas de UNIPEDA	25
7.2 Estadísticas de las encuestas del EPRI [9] [10].....	28
7.3 Algunas estadísticas en diferentes países	30
8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES	39
8.1 Comparación de los resultados	39
8.2 Conclusiones de los resultados.....	40
8.3 Conclusiones generales	41
8.4 Recomendaciones	42
BIBLIOGRAFÍA	44

Figura 1	Circuito equivalente para un hueco de tensión.....	11
Figura 2	Huecos de tensión e interrupciones breves que resultan de una falta en la red de MT	14
Figura 3	Curva ITIC (CBEMA) para un equipo conectado a una red 120 V y 60 Hz	16
Figura 4	Histograma de frecuencias de huecos y de interrupciones	28
Figura 5	Número anual de huecos e interrupciones por debajo de 4 umbrales de tensión	29
Tabla 1	Tensiones secundarias de un transformador con una sola falta fase-tierra en el primario	12
Tabla 2	Clasificación de los resultados de medida	24
Tabla 3	Redes subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - máximo	26
Tabla 4	Redes subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - media	26
Tabla 5	Redes subterráneas: frecuencia de huecos de tensión – percentil 95%	26
Tabla 6	Redes mixtas: frecuencia de huecos de tensión - máximo	27
Tabla 7	Redes mixtas: frecuencia de huecos de tensión - media	27
Tabla 8	Redes mixtas: frecuencia de huecos de tensión – percentil 95%	27
Tabla 9	Huecos de tensión e interrupciones breves en la red de alta tensión.....	30
Tabla 10	Huecos de tensión e interrupciones breves en la red de media tensión.....	31
Tabla 11	Redes de media tensión aéreas: frecuencia de huecos de tensión - máximo.....	32
Tabla 12	Redes de media tensión aéreas: frecuencia de huecos de tensión – percentil 95% ..	32
Tabla 13	Redes de media tensión aéreas: frecuencia de huecos de tensión - media	32
Tabla 14	Redes de media tensión subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - máximo..	33
Tabla 15	Redes de media tensión subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - media	33
Tabla 16	Redes de alta tensión (400 kV): frecuencia de huecos de tensión - máximo	33
Tabla 17	Redes de alta tensión (400 kV): frecuencia de huecos de tensión - media	34
Tabla 18	Coficiente de ponderación de severidad de los huecos de tensión	35
Tabla 19	Redes subterráneas: 2 lugares de medidas, 1996-1998 – número máximo de huecos/año	35
Tabla 20	Redes subterráneas: 2 lugares de medidas, 1996-1998 – número medio de huecos/año	36
Tabla 21	Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1996-1998 – número máximo de huecos/año	36
Tabla 22	Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1996-1998 – número medio de huecos/año	36
Tabla 23	Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1999- número máximo de huecos	37
Tabla 24	Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1999- número medio de huecos	37
Tabla 25	Redes aéreas: 3 lugares de medidas, 1999- número máximo de huecos	38
Tabla 26	Redes aéreas: 3 lugares de medidas, 1999- número medio de huecos.....	38
Tabla 27	Probabilidad media p de huecos de tensión e interrupciones breves por cliente	39
Tabla 28	Presentación de los resultados recomendada	43

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 2-8: Entorno

Huecos de tensión e interrupciones breves en las redes eléctricas de suministro público, con inclusión de resultados de medidas estadísticas

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 esta 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 técnico de IEC es la de preparar normas internacionales. Sin embargo, un comité técnico puede proponer la publicación de un informe técnico cuando haya recopilado información de diferente tipo a la que normalmente se publica en una norma internacional, por ejemplo "el estado del arte".

El Informe Técnico IEC 61000-2-8 ha sido elaborado por el subcomité técnico 77A: *Fenómenos de baja frecuencia*, comité técnico 77 de IEC: *Compatibilidad electromagnética*.

Es una publicación básica de CEM de acuerdo con la guía 107 de IEC.

El texto de esta norma se basa en los documentos siguientes:

FDIS	Informe de voto
77A/375/DTR	77A/396/RVC

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

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las Directivas ISO/IEC, Parte 2.

El comité ha decidido que esta norma permanezca vigente hasta 2010. En esa fecha, de acuerdo con la decisión del comité, la norma será

- confirmada;
- anulada;
- reemplazada por una edición revisada; o
- modificada.

INTRODUCCIÓN

La Norma IEC 61000 se publica en partes separadas de acuerdo con la estructura siguiente:

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 de medida

Técnicas de medida

Técnicas de ensayo

Parte 5: Guías de instalación y atenuación

Guías de instalación

Métodos y dispositivos de atenuación

Parte 6: Normas genéricas

Parte 9: Varios

Cada parte está a su vez subdividida en varias partes, publicadas bien como normas internacionales, bien como especificaciones técnicas o informes técnicos, algunos de los cuales han sido publicados ya como secciones. Otras serán publicadas con el número de la parte seguido de un guión y completado de un segundo número identificando la subdivisión (por ejemplo: 61000-6-1).

En la Norma IEC 61000-2-1 figuran informaciones detalladas sobre los diferentes tipos de perturbaciones que se pueden esperar en las redes eléctricas de suministro público.

Compatibilidad electromagnética (CEM)
Parte 2-8: Entorno
Huecos de tensión e interrupciones breves en las redes eléctricas de suministro público, con inclusión de resultados de medidas estadísticas

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

En este informe técnico se describen los fenómenos de perturbación electromagnética de los huecos de tensión y de las interrupciones breves en términos de su origen, efectos, medidas correctoras, métodos de medida, y resultados de medidas (en tanto que estén disponibles). Éstos se tratan principalmente como los fenómenos observados en las redes de sistemas de suministro público y que tienen un efecto sobre los equipos eléctricos que reciben la energía de estos sistemas.

El término “hueco de tensión” se corresponde con los términos en inglés “voltage sag” y “voltage dip”.

2 DEFINICIONES

2.1 hueco de tensión:

Reducción brusca de la tensión en un punto particular de una red de alimentación eléctrica por debajo de un umbral de hueco de tensión especificado, seguido de su restablecimiento después de un breve intervalo de tiempo.

NOTA 1 Un hueco de tensión se asocia generalmente con la aparición y el final de un cortocircuito u otro aumento brusco de la corriente en la red o en las instalaciones conectadas a ella.

NOTA 2 Un hueco de tensión es una perturbación electromagnética bidimensional, cuyo nivel viene determinado por la tensión y el tiempo (duración).

2.2 interrupción breve:

Reducción brusca de la tensión en todas las fases en un punto particular de una red de alimentación eléctrica por debajo de un umbral de interrupción especificado, seguido de su restauración después de un breve intervalo de tiempo.

NOTA Las interrupciones breves están asociadas generalmente con el accionamiento de los interruptores ligados a la aparición y desaparición de los cortocircuitos en la red o en las instalaciones conectadas a ella.

2.3 tensión de referencia (hueco de tensión); <medida de los huecos de tensión y de las interrupciones breves>:

Valor especificado como la base sobre la que se expresan la profundidad, los umbrales y otros valores en valor por unidad o en términos de porcentaje.

NOTA La tensión nominal o declarada de la red de alimentación se elige frecuentemente como la tensión de referencia.

2.4 umbral inicial del hueco de tensión; <medida del hueco de tensión>:

Valor eficaz de la tensión en una red de alimentación eléctrica, especificado con el objeto de definir el inicio de un hueco de tensión.

NOTA Para este umbral se utilizan generalmente valores entre 0,85 y 0,95 de la tensión de referencia.

2.5 umbral final del hueco de tensión; <medida del hueco de tensión>:

Valor eficaz de la tensión en una red de alimentación eléctrica especificado, con el objeto de definir el final de un hueco de tensión.

NOTA El valor utilizado para el umbral final se identifica generalmente con el umbral inicial o el exceso de éste en 0,01 de la tensión de referencia.

2.6 umbral de interrupción; <medida de los huecos de tensión y de las interrupciones breves>:

Valor eficaz de la tensión en una red de alimentación eléctrica, especificado como una frontera tal que un hueco de tensión en el que la tensión en todas las fases cae por debajo de él se clasifica como interrupción breve.

2.7 tensión residual (de un hueco de tensión):

Valor mínimo de la tensión eficaz registrada durante un hueco de tensión o una interrupción breve.

NOTA La tensión residual se puede expresar como un valor en voltios, como un porcentaje o por un valor por unidad relativo a la tensión de referencia.

2.8 profundidad (de un hueco de tensión):

Diferencia entre la tensión de referencia y la tensión residual.

NOTA 1 La profundidad se puede expresar como un valor en voltios, como un porcentaje o por un valor unitario relativo a la tensión de referencia.

NOTA 2 La palabra "profundidad" se utiliza frecuentemente en sentido descriptivo y no cuantitativo, refiriéndose a la amplitud de la tensión de un hueco de tensión, sin la intención de indicar si esta amplitud se expresa como *tensión residual* o *profundidad*, como se ha definido anteriormente. Se necesita poner cuidado para asegurarse de que este significado esté claro en el contexto en el que se emplea.

2.9 duración (de un hueco de tensión):

Tiempo entre el instante en que la tensión en un punto particular de una red de alimentación eléctrica desciende por debajo del umbral inicial y el instante en que alcanza el umbral final.

NOTA En los eventos polifásicos, la práctica varía en lo que respecta a la relación entre el inicio y el final del hueco de tensión en las fases correspondientes. En el futuro la práctica consistirá probablemente en que, para los eventos polifásicos, un hueco comience cuando la tensión de al menos una de las fases cae por debajo del umbral inicial del hueco, y termina cuando la tensión de todas las fases es superior o igual al umbral final del hueco.

2.10 (hueco de tensión) tensión de referencia deslizante; <medida de los huecos de tensión y de las interrupciones breves>:

Valor eficaz de la tensión en un punto particular de una red de alimentación eléctrica calculado de forma continua en un intervalo especificado para representar el valor de la tensión que precede inmediatamente a un hueco de tensión, para su utilización como tensión de referencia.

NOTA El intervalo especificado es mucho más largo que la duración del hueco de tensión.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN Y DE LAS INTERRUPCIONES BREVES

3.1 Fuente de los huecos de tensión

La fuente principal de los huecos de tensión observados en la red pública es el cortocircuito eléctrico que se produce en un punto cualquiera de la red de alimentación eléctrica.

El cortocircuito provoca un aumento muy grande de corriente, y esto, a su vez, provoca grandes caídas de tensión en las impedancias de la red de alimentación eléctrica. La aparición de faltas por cortocircuitos es inevitable en las redes eléctricas. Existen muchas causas, pero fundamentalmente implican una ruptura del dieléctrico entre dos estructuras que están previstas para estar aisladas una de la otra y que normalmente se mantienen a diferentes potenciales.

Muchos de los cortocircuitos son provocados por sobretensiones, que someten al aislamiento a una sollicitación por encima de su capacidad. El rayo atmosférico es una causa notable de estas sobretensiones. Alternativamente, el aislamiento puede ser debilitado, dañado o destruido debido a otros efectos climáticos (viento, nieve, hielo, niebla salina, etc.), por impacto o por el contacto de animales, vehículos, excavadoras, etc., y como resultado del deterioro debido al envejecimiento.

La red eléctrica de suministro típica transporta la energía desde múltiples fuentes (centrales eléctricas) hacia una multiplicidad de cargas (motores; elementos resistivos para iluminación, calentamiento, etc.; módulos de alimentación de energía de dispositivos electrónicos; etc.). El conjunto de la red, incluyendo los generadores, las cargas y cualquier elemento que los une, es un sistema único, integrado y dinámico. Cualquier cambio de tensión, de corriente, de impedancia, etc. en un punto provoca instantáneamente un cambio en cualquier otro punto en el sistema.

La mayor parte de las redes son sistemas trifásicos. El cortocircuito puede producirse entre fases, entre fase y neutro o entre fase y tierra. Se pueden implicar una, dos o las tres fases.

En el punto del cortocircuito, la tensión se colapsa de forma efectiva hasta cero. Simultáneamente, en casi cualquier otro punto de la red la tensión se reduce por igual o, más generalmente, en un menor grado.

Los circuitos de alimentación están equipados de dispositivos de protección para desconectar el cortocircuito de la fuente de energía. Desde que tiene lugar esta desconexión, hay un restablecimiento inmediato de la tensión, aproximadamente a su valor anterior, en cada punto salvo en aquellos desconectados. Algunas faltas son auto-extinguibles: el cortocircuito desaparece y la tensión se restablece antes de que pueda tener lugar la desconexión.

La reducción instantánea de tensión, seguida de su restablecimiento, como se describe anteriormente, es el fenómeno conocido con el nombre de hueco de tensión.

La conexión de grandes cargas, la magnetización de los transformadores, el arranque de grandes motores y las fluctuaciones de gran amplitud que son características de algunas cargas pueden producir grandes variaciones de corriente de efecto similar a una corriente de cortocircuito. Aunque el efecto sea generalmente menos severo en el lugar de aparición, las variaciones que resultan de la tensión observada en algunos lugares pueden no ser discernibles de las ocasionadas por un cortocircuito. En este caso, se consideran también como huecos de tensión. (Sin embargo, en la gestión de las redes públicas, y debido a estas causas, en las condiciones de suministro se aplican límites permitidos para estas fluctuaciones de tensión).

3.2 Duración del hueco de tensión

Salvo que se trate de una falta auto-extinguible, la duración de los huecos de tensión se rige por la velocidad de funcionamiento de los dispositivos de protección.

En la red, los dispositivos de protección son fusibles o disyuntores controlados por relés de varias clases. Los relés de protección se diseñan a menudo para tener una característica de tiempo inverso, de manera que, cuanto más baja sea la corriente de cortocircuito, más largo es el tiempo de extinción de la falta. Los fusibles tienen unas características semejantes. Las características de los tiempos y ajustes de los fusibles y de los relés se gradúan y coordinan cuidadosamente, de manera que un cortocircuito detectado por varios dispositivos sea eliminado en el punto más apropiado.

Muchos de los cortocircuitos se eliminan en la gama de tiempos de 100 ms a 500 ms. Los tiempos más rápidos se alcanzan a menudo para cortocircuitos en líneas principales de transporte, mientras que la supresión de los cortocircuitos en las redes de distribución puede ser considerablemente más lenta.

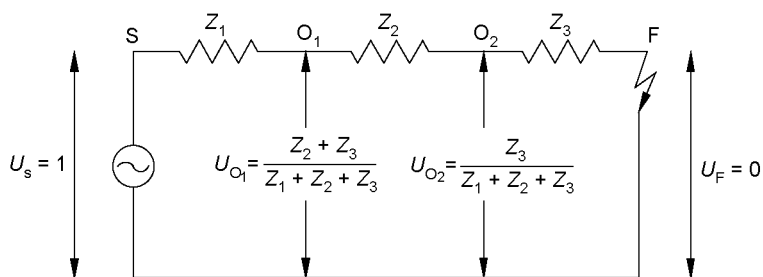
Cuando una fluctuación de corriente distinta de un cortocircuito es la fuente del hueco de tensión, la duración se rige por el evento que lo causa.

Algunas cargas generan una gran entrada de corriente cuando la tensión se restablece al final del hueco de tensión. Esto tiene el efecto de retardar el restablecimiento de la tensión y de prolongar la duración del hueco de tensión. El mismo efecto se produce cuando los transformadores entran en fase de saturación durante el restablecimiento de la tensión.

3.3 Amplitud del hueco de tensión

La amplitud del hueco de tensión se rige por la posición del punto de observación con relación al emplazamiento del cortocircuito y a la o las fuentes de alimentación.

La red se puede representar por un circuito equivalente simple que une el punto de observación a una fuente única equivalente y al lugar de la falta (véase la figura 1). Toda la tensión (100%) se reparte a través de la impedancia entre la fuente y el cortocircuito. La caída de tensión en el punto de observación depende de la magnitud relativa de las dos impedancias que unen este punto a la fuente y al cortocircuito. Dependiendo de estas impedancias, la profundidad del hueco de tensión puede tener cualquier valor en la gama del 0% a 100%.



Hueco de tensión en los puntos de observación O_1 y O_2 para un cortocircuito en F y una fuente equivalente única en S (expresados en términos de tensión residual por unidad).

Figura 1 – Circuito equivalente para un hueco de tensión

De manera general, cuanto más cerca esté el punto de observación del lugar del cortocircuito, la tensión en este punto de observación se acerca más a la tensión en el sitio de la falta. En otros términos, el hueco de tensión se aproxima a la máxima profundidad posible (tensión residual nula) cerca del cortocircuito. Por otra parte, si un punto de observación está cerca de una fuente generadora o de fuentes de energía almacenada, tales como las máquinas rotativas, el efecto es el de aproximar el punto de observación más cerca de la fuente equivalente única como se representa en la figura 1. Esto atenúa la severidad del hueco de tensión observado. (Sin embargo, si se prolonga la duración del hueco, resulta un aumento de corriente por la desaceleración de los motores y esto puede incrementar la severidad del hueco).

El que un hueco de tensión debido a un cortocircuito sea observable en un punto particular de observación depende de su posición en la red de suministro. Un cortocircuito en una red de transporte es susceptible de tener como consecuencia un hueco de tensión importante que puede afectar a una red muy amplia, incluso a una distancia de algunos centenares de kilómetros. Por otra parte, un cortocircuito en una red de distribución tiene una influencia observable en un campo mucho más pequeño. Los puntos de observación en la misma red son susceptibles de experimentar algunos huecos importantes, la severidad del hueco se modera considerablemente en los circuitos cercanos y a mayores distancias el hueco es apenas perceptible.

Dado un punto de observación dentro o cerca de una instalación privada, es posible naturalmente que un cortocircuito o cualquier otro evento que cause el mismo efecto, se produzca en esta misma instalación. El hueco de tensión observado puede ser igual o sobrepasar un hueco causado por un cortocircuito en la red pública de transporte o de distribución.

La amplitud del hueco de tensión observado depende también de las fases concernientes, tanto en el cortocircuito como en el punto de observación, y en las conexiones del arrollamiento (estrella-triángulo, estrella-estrella, etc.) de cualquiera de los transformadores entre estos dos puntos.

3.3.1 Importancia de la conexión de los transformadores y de las cargas

La amplitud del hueco de tensión observado que proviene de un evento particular es diferente si el punto de observación y el evento están en el mismo lado o en diferentes lados de una red o del transformador del cliente. La sucesión de las fases del cortocircuito o de cualquier otro evento, la sucesión de las fases del sistema de medida, y de los métodos de conexión de los arrollamientos primario y secundario del transformador son todos ellos importantes a este respecto. Por ejemplo, considerando la red o las instalaciones de una parte y de la otra un transformador reductor conectado en Dyn o Dy, una falta a tierra en un solo conductor puede traducirse del lado primario en un hueco de tensión de 0 V (tensión residual) en una fase, pero, del lado secundario, en una tensión fase-neutro, en dos fases, que puede alcanzar el 58% de la tensión preexistente.

En la práctica, las cargas que son sensibles a los huecos de tensión (convertidores y accionadores de velocidad, motores, equipo de control, etc.) se conectan a menudo entre fases en las instalaciones industriales. Serían sometidas por tanto a huecos de tensión entre fases antes que a huecos de tensión fase-neutro. Esto se necesita tener en cuenta anotando si las medidas se hacen fase-neutro, entre fases o los dos conjuntamente.

Por ejemplo, en la tabla 1 se da un resumen de los huecos de tensión que serían observados del lado secundario de diferentes transformadores reductores, con una falta fase-tierra sobre una sola fase del lado primario, que entraña una caída de tensión del 100% sobre la fase 1 de ese lado. (La red de alimentación se supone que es un sistema con neutro puesto directamente a tierra).

Tabla 1 – Tensiones secundarias de un transformador con una sola falta fase-tierra en el primario

Conexión del transformador ^a	Tensión fase-neutro			Tensión fase-fase		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁₂	V ₂₃	V ₁₃
YNyn o YNy	0,0	1,0	1,0	0,58	1,0	0,58
Yy, Yyn, o Dd	0,33	0,88	0,88	0,58	1,0	0,58
YNd o Yd	–	–	–	0,33	0,88	0,88
Dyn o Dy	0,58	1,0	0,58	0,88	0,88	0,33

^a Las letras en mayúsculas corresponden a las conexiones de los arrollamientos primarios (lado alimentación de la red) y las letras minúsculas corresponden a las conexiones de los arrollamientos secundarios (lado de carga). N y n designan el neutro del transformador conectado a tierra en el primario o en el secundario, respectivamente.

Véase [6]¹⁾

3.4 Interrupciones breves

El funcionamiento de un interruptor o de un fusible desconecta una parte de la red de la fuente de energía. En el caso de un circuito radial, esto interrumpe el suministro de todas las partes aguas abajo de la red. En el caso de una red mallada, es necesario efectuar desconexiones en más de un punto para suprimir la falta. Los usuarios comprendidos en la parte de la red desconectada sufrirán una interrupción de la alimentación.

En el caso de las redes aéreas, las secuencias de reenganches automáticos se aplican a menudo en los interruptores que interrumpen las corrientes de falta. Su fin es restaurar la red a su situación normal en un tiempo mínimo en el caso en que la falta se compruebe que es una falta transitoria (auto-extinguible) (como en el caso de un arco, debido a una sobretensión, que no provoca ningún daño serio o permanente en los componentes implicados). Si el primer intento de reenganche resulta infructuoso, puede haber otros intentos en intervalos preajustados. Si la falta permanece después de que la secuencia preajustada de las operaciones de apertura – cierre haya sido completada, el disyuntor queda en la posición de apertura y no se cierra de nuevo hasta que se hayan efectuado las reparaciones necesarias en el emplazamiento de la falta. (Naturalmente, cada reenganche, mientras todavía exista la falta, provoca un hueco de tensión adicional, cuya profundidad observada depende de la posición del punto de observación.)

Además del aislamiento real de la falta, se efectúan a menudo otras maniobras, bien automáticamente o manualmente, para reducir la extensión de la red y el número de usuarios interrumpidos, como resultado de la primera maniobra de supresión de la falta.

Así pues, una sola falta puede tener como consecuencia una serie compleja de maniobras, observables por los usuarios como una serie de interrupciones de diversas duraciones. Dependiendo de la estructura de la red en el caso particular y de las posiciones individuales de los usuarios con relación a los emplazamientos de la falta y de los interruptores implicados, algunos usuarios experimentarán interrupciones muy breves, mientras que otros pueden incluso tener que esperar a las reparaciones a realizar antes de que el suministro pueda ser restaurado.

Las interrupciones que tienen una duración de hasta 1 min (o, en el caso de algunos sistemas de reconexión, hasta 3 minutos) se clasifican convencionalmente como interrupciones breves.

1) Las cifras entre corchetes remiten a la bibliografía.

3.5 Causas de los huecos de tensión y las interrupciones breves

Como ya se ha expuesto, la causa de los huecos de tensión (que a veces degeneran en interrupciones breves o se asocian con ellas) es el importante pico de corriente implicado en un cortocircuito en una red eléctrica, y ocasionalmente las fluctuaciones a gran escala de la carga. La circulación de la corriente a través de las impedancias de los componentes de la red tiene como consecuencia caídas de tensión, que disminuyen por un instante la tensión suministrada a los usuarios de electricidad.

La ruptura dieléctrica implicada en los cortocircuitos se origina por la sollicitación debida a la sobretensión o de alguna forma por el debilitamiento, el daño o la ruptura del aislamiento. Las causas de las faltas que provocan estos resultados son múltiples, incluyendo:

- eventos atmosféricos: el rayo y tempestades de viento, nieve, hielo, depósito de sal o polución atmosférica sobre los aisladores, residuos transportados por el viento;
- interferencias y daños mecánicos, colisión por vehículos, equipos de construcción, excavadoras, animales y aves, ramas de árboles, vandalismo y actos delictivos;
- corte de la red en una fábrica: deterioros debido al envejecimiento, corrosión, putrefacción, vicios latentes de fabricación o de construcción;
- accidentes o errores de funcionamiento y de mantenimiento;
- eventos naturales importantes: inundaciones, derrumbamientos, temblores de tierra, avalanchas.

Un cierto número de faltas debidas a estas causas es inevitable en todas las redes. Algunos tipos de redes están más expuestas a la mayor parte de estas causas o a muchas de ellas. En particular, las redes aéreas están expuestas a la mayor parte de estas causas.

Los huecos de tensión que resultan de las fluctuaciones de la carga están asociados al arranque de grandes motores, particularmente en lugares apartados alimentados por largas líneas, y de forma semejante los motores con grandes fluctuaciones de la carga, los hornos de arco, los equipos de soldadura, etc. (Sin embargo, en la gestión de las redes públicas, las condiciones de suministro imponen generalmente los límites a tales fluctuaciones).

3.6 Ejemplo de falta en una red de MT

En la figura 2 se muestran los huecos de tensión y las interrupciones breves que resultan de una falta sobre una línea de media tensión. Se representan tres casos:

- una falta transitoria que se comprueba que es suprimida después de la primera maniobra de reenganche;
- una falta semipermanente que persiste después de la primera maniobra de reenganche pero se comprueba que es suprimida en la segunda maniobra de reenganche (después de un cierto retraso);
- una falta permanente que persiste siempre después de que se haya efectuado toda la secuencia completa de reenganches.

En cada caso, los huecos y las interrupciones de tensión se muestran como son observados por dos clientes, uno sobre la misma línea de la falta pero aguas arriba, y el otro sobre otra línea de alimentación que proviene del mismo juego de barras. (Los tiempos mostrados son a título ilustrativo. Los tiempos reales dependen de los ajustes adoptados para una red en particular).

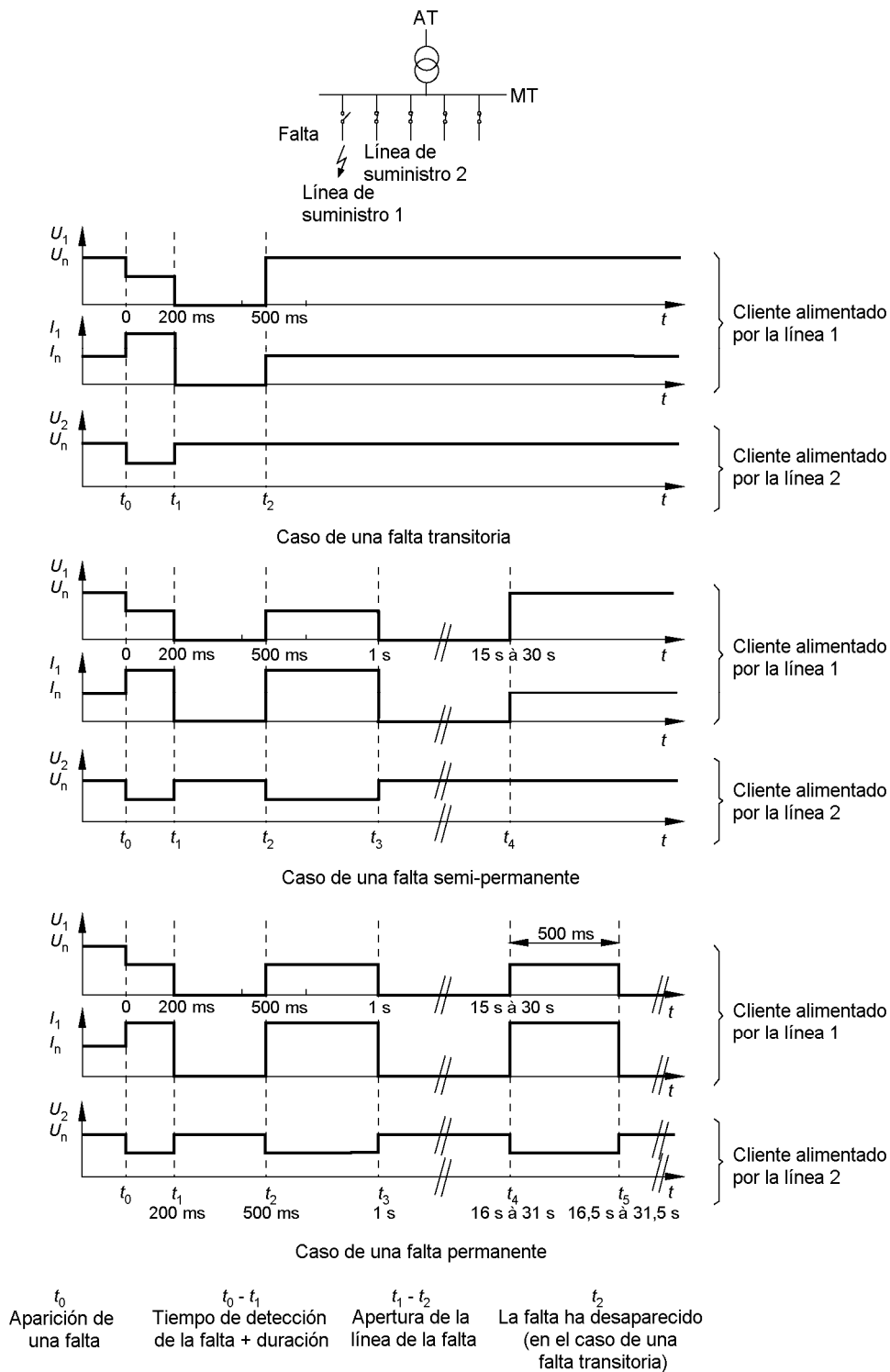


Figura 2 – Huecos de tensión e interrupciones breves que resultan de una falta en la red de MT

4 EFECTOS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN Y DE LAS INTERRUPCIONES BREVES

4.1 Efectos generales

En este documento, que forma parte de la serie de la Norma IEC 61000, los efectos correspondientes son los relacionados con la CEM, es decir la posible degradación del funcionamiento de los equipos. Como fenómenos CEM, los huecos de tensión y las interrupciones breves pueden ser la causa de que los equipos conectados a la red de alimentación no funcionen de la manera para la que han sido previstos.

La relación fundamental entre la red de suministro y el equipo que se conecta a ella es que la red se comporta como una fuente de energía de la que el equipo obtiene cualquier energía que necesite para efectuar su función prevista. La cantidad de energía obtenida y el uso que se hace es casi enteramente una cuestión de diseño y de la utilización del equipo usado (incluyendo los dispositivos de conmutación y de control incorporados) y se limita solamente por la capacidad de la red para suministrar la energía en el punto de conexión del equipo.

La capacidad de suministro de energía de la red disminuye cuando decrece la tensión. Los huecos de tensión y las interrupciones breves ocasionan por tanto una disminución o una interrupción temporal del suministro de energía al equipo. Esto lleva a un deterioro del funcionamiento de una manera tal que varía con el tipo de equipo implicado, con la posible parada completa de las operaciones.

Una opción que se aplica a veces, bien en el diseño del equipo o en su instalación, consiste en incorporar un dispositivo protector con el objeto de interrumpir el suministro en el caso de una caída de tensión por debajo de un umbral fijado, impidiendo así los daños y otros efectos indeseables debido a una tensión reducida. Tal protección puede tener el efecto de convertir un hueco de tensión en una interrupción larga para el equipo implicado. La interrupción larga no se provoca por el hueco de tensión, pero es el resultado buscado por el dispositivo protector que se diseña para responder de esta manera a la reducción de tensión.

Como con todos los fenómenos de perturbación, la gravedad de los efectos de los huecos de tensión y de las interrupciones breves depende no solamente de los efectos directos sobre el equipo implicado, sino también del nivel de importancia y de la función crítica asegurada por este equipo. Por ejemplo, los métodos de fabricación modernos implican a menudo procesos continuos complejos que utilizan muchos dispositivos que actúan conjuntamente. Un fallo o una puesta fuera de servicio de cualquier equipo, en respuesta a un hueco de tensión o a una interrupción breve, puede parar necesariamente el proceso entero, con la consecuencia de una pérdida de producción y de daños o de un atasco serio del equipo. Esto puede ser una de las consecuencias más graves y más caras de los huecos de tensión y de las interrupciones breves. Esta avería o pérdida consiguiente, sin embargo, es una función del proceso y es un efecto indirecto o secundario del hueco de tensión o de la interrupción breve.

Las consideraciones sobre la CEM se corresponden con los efectos directos sobre el funcionamiento de los equipos que toman el suministro de energía de la red eléctrica. Algunos efectos más corrientes se describen más en particular para algunos tipos de equipos en los apartados siguientes. La lista no es exhaustiva.

NOTA Un desfase súbito puede acompañar al hueco de tensión y puede tener un efecto significativo sobre ciertos equipos. Este fenómeno no se trata más en profundidad en este informe.

4.2 Efectos sobre dispositivos particulares

4.2.1 Equipos de tecnología de la información (TI) y de control de procesos

De manera general, las principales unidades funcionales de estos equipos, requieren fuentes de alimentación en corriente continua, que se suministran por medio de módulos de alimentación de energía que convierten la corriente alterna de la red de suministro público. Habitualmente, la tensión mínima alcanzada durante un hueco de tensión es la significativa para los módulos de alimentación de energía. En la figura 3 se muestra la muy conocida curva ITIC para los objetivos mínimos de inmunidad a los huecos. (Incluye también tensiones por encima del rango normal). El usuario del equipo tiene que considerar si las consecuencias de los huecos que son más severos que los mostrados por la curva son tales que hacen necesario tomar medidas adicionales para mantener los resultados satisfactorios. Según la aplicación del equipo, los fallos pueden tener implicaciones de seguridad u otros. El fallo de las señales de tráfico por carretera es uno entre muchos ejemplos posibles.

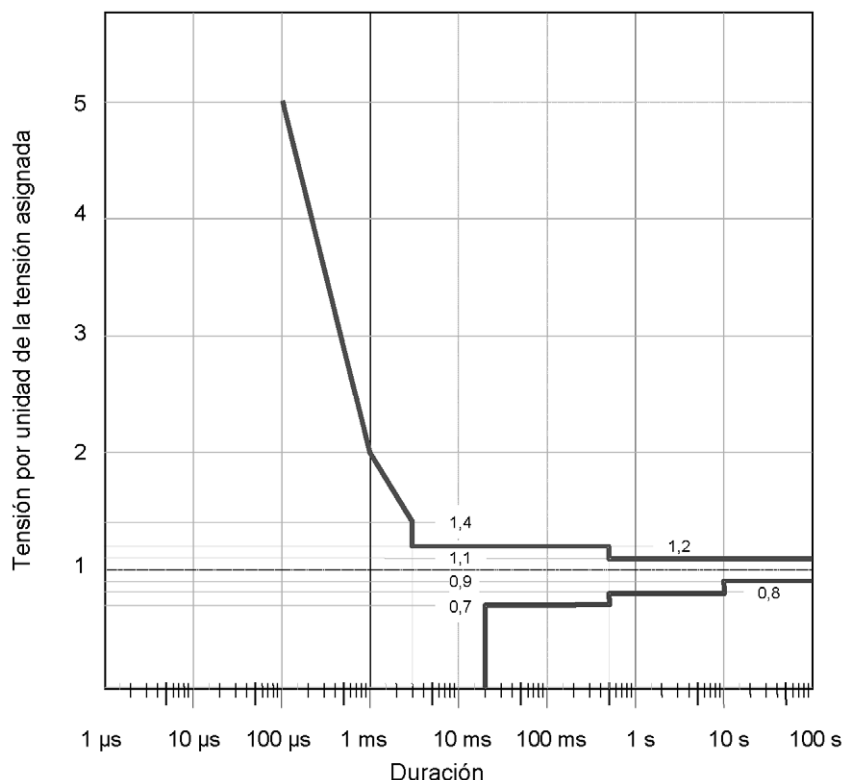


Figura 3 – Curva ITIC (CBEMA) para un equipo conectado a una red 120 V y 60 Hz

4.2.2 Relés y contactores

Los relés y los contactores pueden desconectarse cuando la tensión se reduce por debajo de alrededor del 80% del valor nominal para una duración de más de un ciclo. Las consecuencias varían con la aplicación, pero pueden ser muy graves en términos financieros o de seguridad.

4.2.3 Motores asíncronos

El punto de funcionamiento de un motor asíncrono se rige por el equilibrio entre el par-velocidad característico del motor, que depende del cuadrado de la tensión, y el de la carga mecánica. Durante un hueco de tensión, el par motor decrece inicialmente, reduciéndose la velocidad, mientras que puede haber un aumento de corriente hasta que se alcance un nuevo punto de funcionamiento.

Los motores de inducción con un par máximo superior a 2,2 veces su valor asignado son poco sensibles a las huecos que presentan una tensión residual por encima del 70% de la tensión asignada. Hay un aumento de corriente del orden del 25% al 35%, mientras que la potencia obtenida de la red es más bien constante o disminuye un poco. (Si el par definido por la carga es bastante constante, la velocidad disminuye solamente en un pequeño porcentaje correspondiente al aumento del deslizamiento debido al menor flujo en el motor). Los efectos son principalmente térmicos, con una constante de tiempo mucho mayor que incluso en los huecos más largos. La sobreintensidad debida al restablecimiento de la tensión es generalmente limitada y, para los motores conectados directamente, no sobrepasa la corriente de arranque habitual.

Los huecos de mayor profundidad son equivalentes a las interrupciones breves en cuanto a su efecto sobre el funcionamiento del motor. Se encuentran dos comportamientos diferentes, según el valor de la constante de tiempo mecánico (cociente entre la inercia total y el par asignado del motor).

- Cuando la constante de tiempo mecánica es grande comparada con la duración del hueco, la velocidad disminuye sólo ligeramente. La constante de tiempo del flujo es generalmente del orden de unos pocos centenares de milisegundos, de manera que existe la posibilidad de que durante el restablecimiento, la fuerza contra-electromotriz (f.e.m) esté en oposición de fase con relación a la tensión de alimentación. La corriente de entrada transitoria que resulta puede ser mayor que la corriente normal de arranque.
- Cuando la constante de tiempo mecánica es pequeña comparada con la duración del hueco, la disminución de la velocidad es tal que prácticamente el motor se para. La corriente de entrada debida al restablecimiento de la tensión se corresponde con la corriente normal de arranque.

NOTA Se tiene que considerar la posibilidad de conectar relés o conectores de protección del motor – véase el apartado 4.2.2.

El restablecimiento de la tensión que sigue a un hueco puede también ser una fase crítica si hay un gran número de motores conectados en la misma barra. En este caso, la corriente de entrada elevada que acompaña al restablecimiento de la tensión, puede producir una caída de tensión secundaria, retardando el restablecimiento de la tensión y retardando la re-aceleración de los motores hasta la velocidad normal. En algunos casos, puede ser imposible la re-aceleración, requiriéndose así la desconexión de los motores.

4.2.4 Motores síncronos

El funcionamiento de un motor síncrono se define del lado de salida por el par y la velocidad, y del lado de entrada por la tensión y la potencia activa. El flujo, la potencia reactiva y el desfase angular del rotor son variables que están ligadas a la tensión y al par. Se puede tolerar un hueco de tensión siempre que se establezcan nuevas condiciones de funcionamiento estables. Éste es generalmente el caso para los huecos que presentan una tensión residual del 75% o del 80% (secuencia directa). Por otra parte, el circuito de excitación puede ser afectado, y debería ser considerado.

Unas condiciones más severas impiden que se establezcan nuevas condiciones de funcionamiento estables, creando una pérdida de sincronismo aumentando el decalaje angular del rotor hasta el límite de la estabilidad. El que este ángulo crítico sea alcanzado depende de la duración del hueco de tensión, del nivel al que se reduce la tensión y de la constante de tiempo mecánica. El análisis completo es complejo y se tienen que tener en cuenta los arrollamientos amortiguadores, que pueden desarrollar un par asíncrono.

4.2.5 Sistemas de accionamiento de potencia

En el caso de los sistemas de accionamiento de potencia (power drive systems, PDS) que pueden ser sensibles incluso a los huecos de tensión mínimos, los efectos de los huecos de tensión y de las interrupciones breves pueden ser muy complejos, ya que los elementos constitutivos se tienen que considerar así como el conjunto completo. Estos sistemas contienen generalmente un convertidor/inversor de potencia, el motor, el elemento de control y un cierto número de componentes auxiliares.

El efecto sobre el elemento de control puede ser crítico, ya que tiene la función de controlar la respuesta de los otros elementos a los huecos de tensión o a la interrupción breve. La reducción de la tensión tiene como consecuencia una reducción de la potencia que se puede transferir al motor, y de allí al equipo accionado, y puede llevar a la pérdida de control. Los convertidores regeneradores pueden ser particularmente sensibles o requerir una atención específica, en particular si el hueco de tensión o la interrupción breve coincide con un flujo de potencias invertido (funcionamiento como regenerador).

El convertidor tiene poca o ninguna capacidad de almacenamiento de energía. De manera general, el equipo accionado tiene una cierta capacidad de almacenamiento de energía, que puede ser empleada en ciertas condiciones.

4.2.6 Iluminación

Las lámparas de descargas de alta presión se apagan por huecos de tensión que reducen la tensión a menos del 90% aproximadamente del valor nominal. Pueden requerirse varios minutos para su restablecimiento, como consecuencia del enfriamiento y de la pérdida de presión. Los sistemas de iluminación que contienen componentes electrónicos pueden ser afectados como en el apartado 4.2.1.

5 MEDIDAS CORRECTORAS

5.1 Consideraciones generales

En las normas se aborda la compatibilidad electromagnética aplicando límites coordinados de emisión y de inmunidad. Se intenta por una parte impedir que la perturbación electromagnética se emita con un nivel excesivo y por otra parte proporcionar al equipo expuesto a la perturbación un nivel adecuado de inmunidad – un nivel que le permita funcionar como estaba previsto.

En el caso de los huecos de tensión y de las interrupciones breves, sin embargo, que son una repuesta natural de una red eléctrica a los cortocircuitos o a cualquier aumento súbito de corriente, el nivel de la perturbación tiene dos dimensiones, la tensión residual y la duración. Un límite de emisión tendría que cubrir las dos dimensiones.

La tensión residual en general no puede ser modificada. Se extiende sobre el rango de cero voltios hasta alrededor del nivel normal de la tensión de alimentación, según las posiciones relativas de los lugares del cortocircuito, del punto de observación y de las fuentes de generación.

La duración se puede cambiar en cierta medida, ya que está en gran parte determinada por la velocidad con la que han sido eliminados los cortocircuitos. Sin embargo, una característica necesaria de la protección del cortocircuito es la graduación de los tiempos de funcionamiento de los interruptores, relés, etc. en diferentes puntos de la red para asegurar que cada cortocircuito se elimina en el punto más adecuado. Esto significa que el tiempo de eliminación y, en consecuencia, la duración de los huecos de tensión y de las interrupciones breves dependen de la posición del cortocircuito. (Si el evento causal es otro distinto del cortocircuito, la duración depende del evento correspondiente).

Así, hay un margen restringido para la limitación de la emisión en términos de *nivel* de la perturbación. (Puede haber algunos medios en casos particulares para influir en la *frecuencia* con la que los huecos y las interrupciones breves se producen, tomando acciones para reducir la exposición de una red a la falta). En consecuencia es necesario considerar si es posible proporcionar la inmunidad al equipo que está expuesto a los huecos de tensión y a las interrupciones breves.

En lo que respecta a los huecos de tensión moderados en profundidad y en duración, algunos equipos pueden tener un cierto nivel de inmunidad inherente, por ejemplo en virtud de su capacidad de almacenamiento de inercia o de energía. Alternativamente, es posible hacer ajustes de diseño de manera que se dé esta propiedad.

Sin embargo, para las interrupciones breves y los huecos de tensión más severos, la inmunidad no es, en sentido estricto, un concepto viable. El carácter esencial del evento es que implica un cese completo o una disminución importante de suministro de energía durante un breve intervalo. Ningún dispositivo eléctrico puede continuar funcionando como estaba previsto en ausencia de suministro de energía.

En consecuencia, tal inmunidad a proveer contra estas perturbaciones tiende a ser extrínseca. Se trata de proporcionar la restauración rápida de la energía desde una fuente alternativa o arreglárselas para que el equipo y su proceso asociado se adapten de una manera prevista a la interrupción breve o a la disminución de potencia.

- Algunas medidas correctoras emplean una capacidad de almacenamiento de energía para suministrar durante un tiempo limitado la energía perdida de la red de alimentación. Esto puede compensar los huecos de tensión de cualquier tensión residual e incluso las interrupciones breves. La aptitud del equipo para soportar los huecos de tensión y las interrupciones breves en un cierto lapso de tiempo depende de la relación entre la energía almacenada y la demanda de potencia del proceso correspondiente. En muchos casos, se tiene que tener en consideración un cierto tiempo de reacción (varios milisegundos). Ya que el almacenamiento de la energía es muy costoso, la protección de un proceso tiende a orientarse hacia las partes que son particularmente sensibles.
- Otras medidas correctoras, que no tienen ninguna capacidad de almacenamiento de energía, no pueden suplir las interrupciones del suministro pero tienen la capacidad de compensar los huecos de tensión con una tensión residual de alrededor del 50%. Difieren en cuanto a los niveles de la reducción de tensión que pueden soportar. De manera general, la duración del hueco no es un parámetro importante en estos métodos. La supresión de la fuente de energía tiene como consecuencia unos costes que son en general menores.

Los ejemplos siguientes se dan para una información más completa sobre los fenómenos de perturbación de los huecos de tensión y de las interrupciones breves. La atenuación como tal, está fuera del campo de aplicación de este informe técnico. Necesita plantearse sobre la base del análisis tanto económico como técnico, como se indica en la Norma IEEE 1346-1998 [5].

5.2 Algunos ejemplos de medidas correctoras

5.2.1 Máquina rotativa con inercia adicional

Un método simple para soportar los huecos de tensión y las interrupciones breves para los equipos rotativos es aumentar su inercia. Sin embargo, la utilización de este método se limita a las aplicaciones especiales, por ejemplo en metalurgia, donde se emplea a menudo como complemento para atenuar las variaciones bruscas de las cargas. Las posibilidades de esta configuración dependen de la relación entre la inercia y la carga real, pero están normalmente en el rango de varios segundos.

5.2.2 Máquina rotativa con volante y motor o sistema de alimentación de emergencia

Una gran masa ligada a un motor/generador gira a una velocidad muy alta en vacío y acumula una energía de hasta varios megavatios-segundo. La energía se suministra al sistema por medio de un convertidor. La potencia disponible normalmente alcanza hasta varios cientos de kilovatios.

5.2.3 Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI)

Los sistemas de alimentación ininterrumpida están muy extendidos en su utilización para proteger los equipos sensibles contra las variaciones de tensión y las interrupciones de la alimentación. Normalmente, la carga se suministra por medio de un convertidor. Del lado de corriente continua, se une a una fuente de energía como la de las baterías. Su capacidad de almacenamiento varía sobre un rango amplio, según los requisitos específicos y viene limitada principalmente por los costes de almacenamiento de energía. Las aplicaciones reales se extienden desde las cargas pequeñas en baja tensión hasta las cargas de varios cientos de kilovatios.

5.2.4 Almacenamiento superconductor de energía magnética (SMES)

El almacenamiento superconductor de energía magnética pueden almacenar una capacidad de varios megavatios-segundo almacenados en una bobina superconductora. Normalmente, puede compensar las interrupciones o los huecos de tensión profundos de varios cientos de milisegundos para cargas con una demanda de gran potencia, según el diseño.

5.2.5 Compensador estático de potencia reactiva (SVC)

Un compensador estático de potencia reactiva consiste generalmente en condensadores y/o circuitos de filtros pasivos con una bobina de inductancia en paralelo controlada por tiristores. Suministra permanentemente una potencia reactiva regulable (equilibrada o desequilibrada) al sistema, que permite así el ajuste de la tensión. Generalmente, los SVCs se conectan a la red de media o de alta tensión con una potencia nominal que va desde varios megavares (Mvar) hasta varios cientos de megavares. Principalmente, permiten el control de la tensión en los grandes nudos de la red de distribución. Se pueden diseñar para compensar los huecos de tensión, con posibilidades más bien limitadas en esta aplicación. En general, la capacidad de regulación de la tensión de un SVC es de 10% - 20% de la tensión de la red.

5.2.6 Restaurador dinámico de tensión (DVR)

Durante los huecos de tensión, los restauradores dinámicos de tensión añaden la amplitud de la tensión que falta, equilibrada y desequilibrada, por medio de la electrónica de potencia por medio de un transformador en serie con la carga. Para tensiones residuales inferiores al 50%, la tensión se puede restituir en varios milisegundos. Las aplicaciones existen para las cargas en el rango de varias decenas de kilovatios (baja tensión) hasta varias decenas de megavatios (media tensión).

5.2.7 Transformadores ferorresonantes

Los transformadores ferorresonantes (tensión constante) se emplean a veces para atenuar los huecos de tensión. Se diseñan para funcionar en un estado de saturación magnética para mantener, en determinadas condiciones, una tensión de salida constante a pesar de las variaciones de la tensión de entrada.

6 MEDIDA DE LOS HUECOS DE TENSIÓN Y DE LAS INTERRUPCIONES BREVES

6.1 Convenciones adoptadas en la medida de los huecos de tensión y de las interrupciones breves

Cualquier valor de la tensión relativa a los huecos de tensión es un valor eficaz contado sobre al menos un semiperiodo de la frecuencia de la tensión de alimentación, 10 ms y $8\frac{1}{3}$ ms para 50 Hz y 60 Hz respectivamente.

NOTA En la Norma IEC 61000-4-30²⁾, la medida básica de la tensión se considera como la tensión eficaz medida en un ciclo y regenerada en cada semiciclo.

Una dimensión importante del hueco de tensión es su amplitud en términos de tensión. Ésta se expresa como el valor que disminuye la tensión durante el evento y también como la cuantía en que el valor de la tensión es menor con respecto a la tensión preexistente u otro valor de referencia. En este informe técnico, se ha adoptado la primera convención de cuantificación de esta dimensión de los huecos de tensión, y el término utilizado es el de “tensión residual”.

La medida de los huecos de tensión implica registrar el valor de la tensión durante el hueco, la duración del evento, y el número de eventos durante el periodo de medida. Las dos últimas cantidades se registran para las interrupciones breves. Para registrar estos valores y poder comparar los resultados, es necesario adoptar ciertas convenciones arbitrarias.

Los apartados que siguen describen las convenciones que han sido empleadas o consideradas en diversas encuestas de huecos de tensión, sin recomendar ninguna práctica en particular.

6.1.1 Tensión de referencia para la medida

6.1.1.1 Tensión de referencia fija

La tensión residual en un hueco de tensión se expresa habitualmente en términos relativos, en porcentaje o por unidad. El fundamento de esta relación es por convención la tensión nominal o la tensión declarada de la red en el punto de observación. Esto es particularmente adecuado cuando lo que importa es el posible efecto en el funcionamiento de los equipos. Así, la tensión de referencia para las medidas en las redes de baja y media tensión es habitualmente la tensión nominal o la tensión declarada de la red correspondiente.

6.1.1.2 Tensión de referencia deslizante

Puede ser adecuado un planteamiento diferente cuando el objeto de la investigación incluye una comparación entre los huecos de tensión en diferentes puntos de la red que posiblemente operan con diferentes tensiones, y que resultan de un único cortocircuito. Se da a menudo el caso en que las medidas se realizan en las redes de más alta tensión. Por otra parte, es útil saber cómo las medidas en las redes de alta tensión se corresponden con los huecos sufridos por los equipos en funcionamiento cuya mayor parte están conectados a las redes de baja y media tensión.

El rango normal de tensiones en las redes de alta tensión puede variar más libremente que en el caso de las redes de baja y media tensión, no teniendo más que un componente en el régimen de operación en relación, por ejemplo, con la escala de las tomas de regulación de los transformadores. Un evento que provoca una profundidad dada en un hueco de tensión medido en una red de alta tensión es susceptible de tener como consecuencia una gran variedad de tensiones residuales en diferentes puntos de observación en las redes de tensión inferior, incluso si están directamente aguas abajo. Esto se explica porque las tensiones precedentes a los huecos en los diferentes puntos variarán según la disposición de los reguladores y de las conexiones en los transformadores en juego.

En estas condiciones el hueco de tensión se puede medir con relación a la tensión precedente, para permitir que la variación de la tensión sea registrada. En este caso, para representar la tensión que precede al inicio del hueco de tensión, la tensión de referencia es un valor que se calcula continuamente durante un cierto intervalo, mucho más largo que la duración de un hueco de tensión. Se refiere entonces como una tensión de referencia deslizante.

2) A publicar.

Cuando se emplea una tensión de referencia deslizante, es necesario tener en cuenta el hecho de que el valor que es crítico para los equipos en funcionamiento es a menudo un valor absoluto de la tensión. Por ejemplo, suponiendo que el nivel de la tensión precedente al hueco esté en la escala de $0,9 \cdot U_n - 1,1 \cdot U_n$ en un punto particular, una reducción de tensión de r por unidad, relativo a un valor de referencia deslizante, puede significar una tensión residual real que va de $0,9 \cdot r \cdot U_n$ a $1,1 \cdot r \cdot U_n$ ($U_n =$ tensión nominal). Esto no es necesariamente lo suficientemente preciso como para evaluar el efecto sobre el equipo.

6.1.2 Duración del hueco: umbrales de tensión que marcan el inicio y el final

La selección de los umbrales de tensión para marcar el inicio y el final de un hueco de tensión depende de si la tensión de referencia se trata de un valor deslizante que representa la tensión que inmediatamente le precede o un valor fijo tal como la tensión nominal o la tensión declarada. En primer lugar se toma el caso de una tensión fija de referencia.

En cualquier punto de observación dado en la red de suministro, la tensión cambia constantemente como respuesta a las variaciones y a las conmutaciones incesantes de las cargas en diversos puntos de la red. Habitualmente, la red se diseña para mantener estas variaciones de tensión dentro de una cierta banda, al menos cuando se está en condiciones normales de suministro. Dentro de las oscilaciones constantes de la tensión en la banda prevista de variación, los cambios de tensión del tipo definido como huecos de tensión surgen en el caso de un cortocircuito o de una subida súbita equivalente de la corriente. En un evento tal, las tensiones que resultan pueden tener un valor cualquiera entre el 0% y el 100% de la tensión preexistente, según los lugares de observación relativos al lugar del evento causante.

En consecuencia, en algunos puntos de observación que estén más bien alejados del emplazamiento del evento causante, particularmente en los puntos en que la tensión preexistente se aproxima a la parte superior de la banda prevista de la variación de tensión, la tensión residual puede permanecer suficientemente alta para que esté siempre dentro de esta banda. En las medidas en este lugar, la tensión residual, estando dentro del margen previsto, no se necesita distinguir de las variaciones de tensión que resultan de las fluctuaciones normales de la carga local. Por convención, se excluye cuando se miden los huecos.

Por esta razón, muchas medidas de huecos de tensión se basan en un umbral de tensión que se corresponde con el límite inferior de la banda prevista de la variación de tensión. Solamente los eventos en los que la tensión cae a un valor por debajo de este umbral se registran como huecos. Cada hueco de tensión se cuenta como que comienza en el instante en que la tensión cae por debajo del umbral y termina en el instante en que la tensión recupera al menos este valor.

Sin embargo, en el caso de un punto de observación en el que la tensión, en un momento dado, sucede que está cerca de la parte inferior de la banda prevista de variación de tensión, es probable que las variaciones y las conmutaciones normales de la carga tengan como consecuencia pequeñas oscilaciones de tensión alrededor del límite inferior de esta banda. (Se considera que la banda normal de variación se aplica a la tensión media durante un intervalo breve, tal como 10 min – en consecuencia la tensión en este intervalo tiene unos valores por debajo y por encima de la media). El número de huecos de tensión registrados en este punto de observación podría estar considerablemente inflado por estas oscilaciones de tensión inducidas por la carga, si el umbral se fija como se dijo más arriba.

Un método para excluir estas variaciones es aplicar otro margen por debajo de la banda normal de variación de tensión. En este procedimiento, un evento observado se registra como un hueco de tensión solamente cuando la tensión residual cae por debajo de un umbral que se sitúa en un margen indicado por debajo de la banda prevista de variación de tensión. Registrando la duración del hueco de tensión, los dos instantes en los que la tensión corta este umbral marcan el inicio y el final del evento.

Un método alternativo, utilizando dos umbrales, ha sido también empleado para excluir las oscilaciones de tensión inducidas por la carga, cerca de la parte inferior de la banda prevista de variación de tensión. Así, se clasifican como huecos de tensión solamente los eventos en los que la tensión cae por debajo de un umbral correspondiente a la parte inferior de la banda, recuperándose al alcanzar un segundo umbral que se sitúa con un ligero margen (normalmente un 1% de la tensión de referencia) por encima del primer umbral (Por analogía, el término “histéresis” se aplica al margen entre los dos umbrales).

En el planteamiento inicial, el segundo umbral se empleaba solamente para clasificar un evento como hueco de tensión – una vez clasificado así el evento, el primer umbral fue empleado para marcar el inicio y el final. Como variante de este procedimiento, se desarrolló una práctica con vistas a adoptar el segundo umbral, descrito anteriormente como la marca del final del hueco de tensión observado.

Como recapitulación, para el caso de una tensión de referencia fijada, las posibles disposiciones para los umbrales inicial y final son como sigue:

- el umbral inicial se ajusta en el límite inferior del ancho de banda de la variación normal de tensión o en un margen especificado por debajo de este límite;
- el umbral final se ajusta con el mismo valor que el umbral inicial o con un pequeño margen por encima de éste (histéresis)

Cuando la tensión de referencia es un valor deslizante, calculado continuamente para representar el nivel de tensión justo antes del hueco, este proceso tiene un efecto de alisado que elimina automáticamente la mayor parte de las variaciones debidas a las fluctuaciones locales de la carga. En este caso, por tanto, los umbrales inicial y final pueden ser seleccionados con un valor próximo de la tensión de referencia deslizante.

En el caso de que la tensión tuviera una tendencia a decrecer, independientemente del hueco de tensión, el valor de recuperación de la tensión al final del hueco, es un poco menor que el valor precedente inmediato al evento. En consecuencia, para asegurar que el final del hueco está identificado, puede ser necesario situar el umbral final en un valor ligeramente inferior al valor de referencia, por ejemplo el 99% de la tensión de referencia deslizante. Por uniformidad, el umbral inicial se puede situar en el mismo valor.

En el caso de medida en varias fases, los huecos de tensión cuyas duraciones se solapan en el tiempo han sido convencionalmente contados como un único evento. En algunos casos, la práctica ha consistido en contar la duración desde el instante en que la primera tensión simple o compuesta cae por debajo del umbral inicial hasta el instante en que la última tensión de fase o línea sobrepasa o iguala el umbral final.

6.1.3 Distinción entre los huecos de tensión y las interrupciones breves

La noción misma de interrupción implica la desconexión completa de todas las fuentes de alimentación y en consecuencia una tensión nula. En la práctica, sin embargo, la parte desconectada de la red puede incluir fuentes significativas de energía almacenada, impidiendo alcanzar la tensión nula durante una interrupción breve. Por otra parte, teóricamente la mayor parte de los huecos de tensión severos implican una tensión nula. Este hueco de tensión es, de hecho, una interrupción, aunque permanezca la conexión con la fuente de tensión. Así, puede haber una dificultad para que el instrumento de medida distinga entre interrupciones breves y huecos de tensión.

Por esta razón, en las medidas de huecos de tensión y de interrupciones breves, es necesario adoptar una tensión frontera, mayor que cero, para distinguir entre estos fenómenos. Un evento en el que la tensión residual cae por debajo del valor frontera adoptado se clasifica como interrupción breve, por el contrario sería un hueco de tensión.

Como resultado, un cortocircuito dado puede tener como consecuencia huecos de tensión e interrupciones breves en diferentes puntos de observación, según que la tensión residual observada en cada uno de los puntos esté por encima o por debajo del nivel elegido convencionalmente como frontera.

6.2 Medida de los huecos de tensión

Aunque los huecos de tensión son a menudo complejos en su forma, se ha adoptado un procedimiento simplificado en las campañas en las que las medidas de huecos de tensión se efectúan en varios emplazamientos para obtener datos estadísticos. El procedimiento ha consistido en tratar los huecos como si éstos fueran sólo eventos de una profundidad única. Para cada hueco se registra un solo par de datos. La tensión residual es la tensión más baja que se produce durante el evento. La duración se mide a partir del instante en que la tensión cae por debajo del umbral inicial hasta aquél en el que llega a ser igual o mayor que el umbral final. Estos umbrales se sitúan como se describe a continuación.

Algunos eventos medidos, sin embargo, se comprueba que son más complejos, con la tensión tomando varios niveles durante el desarrollo del evento, posiblemente durante la caída de tensión, en su subida o en los dos, extendiéndose durante un intervalo apreciable dentro de la duración del hueco. En este caso, caracterizar el hueco como si tuviera una tensión residual equivalente a la tensión más baja alcanzada y una duración correspondiente a los umbrales inicial y final, puede ser una exageración seria de la magnitud de la perturbación.

Para tratar la complejidad de los huecos no rectangulares, sería posible indicar varias graduaciones sobre la escala de tensión y registrar la duración para la que la tensión es igual o inferior a cada una de las graduaciones. Esto tendría como consecuencia el registro de varios pares de datos de la tensión residual-duración para describir cada hueco de tensión.

Sin embargo, este procedimiento no se ha empleado en ninguna de las campañas de medida cuyos resultados se presentan en este informe.

En algunos casos el objetivo de la medida de los huecos de tensión en un emplazamiento específico es vigilar si las condiciones de un contrato suministrador-usuario se cumplen o si las condiciones críticas en una máquina o un proceso particular se sobrepasan. En estos casos, es probable que haya un umbral de tensión particular que sea el centro de atención, bien porque se especifique en el contrato o porque sea el valor crítico para la máquina o el proceso implicado. El inicio y el final del hueco real y su profundidad última pueden ser del todo irrelevantes. No hay ningún registro tomado a menos que la tensión caiga por debajo del umbral especificado. Cuando es así, la única información requerida es el tiempo durante el cual permanece igual o por debajo de este valor.

6.3 Medida de interrupciones breves

Las interrupciones breves se miden de la misma manera que los huecos de tensión. Se elige una tensión frontera por debajo de la cual el evento se considera un interrupción breve. Esta frontera estaba en el pasado situada de forma variable en el 1%, 5% y 10% de la tensión de referencia.

Cuando estas medidas forman parte de la campaña referida anteriormente, la tensión frontera se emplea para identificar solamente un evento bien como un hueco de tensión o como una interrupción breve. Sin embargo, la duración de la interrupción breve se basa sobre los mismos umbrales inicial y final, utilizados para el hueco de tensión. En el caso de un evento no rectangular, esto exagera la duración de la interrupción breve.

6.4 Clasificación de los resultados de medida

Al recopilar o presentar los resultados de una campaña de medidas de huecos de tensión y de interrupciones breves, es necesario respetar la naturaleza bidimensional del fenómeno. Esto sugiere una matriz bidimensional o un procedimiento tabular, con filas que contienen la clasificación de las profundidades o de las tensiones residuales, y con columnas que contienen la clasificación de las duraciones.

6.4.1 Resultados basados sobre la hipótesis de una forma rectangular

En la tabla 2 se muestra la tabulación desarrollada por UNIPEDE. Para un emplazamiento de medida dado, cada celda está prevista para contener el número de huecos de tensión de profundidad y de duración correspondientes que ocurren en el curso de un periodo especificado, habitualmente un año.

La última fila representa las interrupciones breves. (En medidas previas, se ha empleado una tensión del 1% de la tensión de referencia como frontera entre el hueco de tensión y la interrupción breve).

Tabla 2 – Clasificación de los resultados de medida

Tensión residual u % de U_{ref}	Duración s							
	$0,01 < \Delta t \leq 0,02$	$0,02 < \Delta t \leq 0,1$	$0,1 < \Delta t \leq 0,5$	$0,5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 85$								
$85 > u \geq 70$								
$70 > u \geq 40$								
$40 > u \geq 10$								
$10 > u \geq 0$								
NOTA 1 Los resultados de medida en la primera columna y en la primera fila son susceptibles de ser inflados por transitorios y fluctuaciones de carga, respectivamente. NOTA 2 0,01 y 0,02 segundos en los dos primeros encabezamientos de la duración corresponden a un semiperiodo y a un periodo de la tensión a 50 Hz. Para las redes de 60 Hz, se emplearían los valores correspondientes.								

Una tabla similar se emplea para compilar los resultados de todos los lugares en la campaña de medida. En este caso cada celda puede contener:

- un percentil (normalmente 95%) del número de huecos registrados en esta celda para todos los lugares;
- el número máximo registrado en la celda;
- el número medio en la celda para todos los lugares;
- u otra estadística.

Cuando están implicados varios tipos de redes, es apropiado producir una tabla separada para cada tipo. Por ejemplo, deberían distinguirse las redes aéreas de las redes subterráneas.

6.4.2 Resultados teniendo en cuenta la forma compleja del hueco

Se podría emplear una tabla similar para recopilar los resultados de las medidas cuando se registran varios pares de valores profundidad-duración para cada hueco de tensión. Cada hueco tendría entonces varias entradas en la tabla, una para cada una de las graduaciones designadas en la escala de tensión. Sería necesario poner una columna adicional en la tabla para prever la duración cero. Las filas corresponderían a las graduaciones seleccionadas de la tensión. En una campaña de medida en varios lugares, los resultados de todos los sitios podrían consolidarse en una tabla única como la descrita antes para el caso de una forma simple de hueco, en la que cada celda contiene una estadística específica calculada a partir de los resultados de la medida completa.

En lo que se conoce, este procedimiento más bien complejo no se emplea en la práctica.

6.5 Agregación de resultados de medida

Las operaciones de reenganche pueden tener como resultado múltiples huecos de tensión o interrupciones que provienen de un mismo suceso primario como causa. Estas perturbaciones repetitivas son poco susceptibles de afectar repetidas veces a los equipos y a los procesos. Puede por tanto ser engañoso contar estas perturbaciones como eventos separados.

Para tener en cuenta este efecto, el concepto de agregación se puede aplicar para los análisis estadísticos e informes dirigidos a un regulador o a un cliente. Consiste en aplicar un conjunto de reglas que definen cómo agrupar los eventos que se producen en un intervalo de tiempo limitado y caracterizar el evento equivalente que resulta en términos de amplitud y tiempo.

Por ejemplo, todos los eventos en un intervalo de un minuto se pueden contar como un evento simple cuya amplitud y tiempo son los del hueco más severo observado durante ese intervalo.

Se tiene que anotar que la selección del método de agregación puede tener un impacto significativo sobre el número y las características de los eventos registrados. Por otra parte, los eventos equivalentes resultantes no reflejan necesariamente con exactitud el impacto sobre el equipo y los procesos.

7 RESULTADOS DE MEDIDA DISPONIBLES

A continuación se presentan algunos resultados, en el formato en que se suministraron a IEC.

7.1 Estadísticas de UNIPEDA

Nueve países de Europa cooperaron en la campaña de medida de UNIPEDA DISPID [8] para determinar el número de huecos de tensión y de interrupciones breves experimentados en un año por los usuarios de electricidad conectados a las redes de baja y media tensión.

Las medidas se efectuaron en las redes de baja tensión lo más cerca posible de los juegos de barras de baja tensión de las subestaciones de media/baja tensión o en las líneas de media tensión conectadas directamente a las subestaciones de media/baja tensión. Allí donde la medida se efectuó a través de un transformador de tensión, fue aplicada la corrección necesaria para representar la tensión fase-neutro vista por los usuarios de baja tensión.

El objeto era reflejar el gran abanico de condiciones ambientales y geográficas encontradas en varios países con diferentes climas y configuraciones de red. Los resultados se han producido en 85 emplazamientos de medida, con un periodo de medida de al menos un año en casi todos los casos.

Los umbrales adoptados han sido el 90% de la tensión nominal para el inicio y final del hueco de tensión, con duraciones que van de 10 milisegundos a 1 minuto. Para las interrupciones breves, el umbral de tensión era el 0%, correspondiente a la última fila en las tablas 3 a 8.

De los 85 lugares de medida, 33 se encontraban en las redes subterráneas y los 52 restantes estaban en redes mixtas con proporciones variables de líneas aéreas y cables subterráneos.

En las tablas 3, 4 y 5 se presentan los resultados para las redes subterráneas.

En la tabla 3 se muestra el número máximo de eventos registrados que corresponden a las celdas individuales de la tabla. Puesto que dos de estos máximos no se producen necesariamente en el mismo sitio, la suma de todas las celdas de la tabla no tiene ninguna significación. Para información, sin embargo, se añade debajo de la tabla el total para el lugar en que se ha registrado el mayor número de huecos y de interrupciones.

En la tabla 4 se dan dentro de cada celda las medias de los numerosos eventos producidos. (En este caso el número medio de eventos aparecidos en todos los lugares de medida, añadido debajo en la tabla, es el mismo que la media de los valores de las celdas).

La tabla 5 contiene el número máximo de eventos en cada una de las celdas después de haber descartado el 5% de número de valores registrados que comprenden los mayores valores para esta celda. Esto significa que el valor en cada celda es el percentil 95% de la distribución del número de eventos en esta celda. El percentil 95% de todos los eventos, huecos e interrupciones, de todos los lugares se añade debajo en la tabla.

Las tablas 6, 7 y 8 presentan los valores correspondientes para redes mixtas.

Tabla 3 – Redes subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - máximo

Tensión residual u % de la tensión de referencia	Duración t					
	$10 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s
$90 > u \geq 70$	63	38	8	1	1	0
$70 > u \geq 40$	8	29	4	0	0	0
$40 > u \geq 0$	6	17	1	3	0	0
$u = 0$ (interrupciones)	1	1	2	1	1	10
Número mayor de huecos/lugar: 124						

Tabla 4 – Redes subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - media

Tensión residual u % de la tensión de referencia	Duración t					
	$10 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s
$90 > u \geq 70$	13,4	9,5	0,4	0,2	0,1	0
$70 > u \geq 40$	1,5	5,9	0,3	0	0	0
$40 > u \geq 0$	0,1	1,8	0,2	0,2	0	0
$u = 0$ (interrupciones)	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,7
Número medio de huecos/lugar: 35						

Tabla 5 – Redes subterráneas: frecuencia de huecos de tensión – percentil 95%

Tensión residual u % de la tensión de referencia	Duración t					
	$10 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s
$90 > u \geq 70$	23	19	3	1	0	0
$70 > u \geq 40$	5	19	1	0	0	0
$40 > u \geq 0$	1	8	1	0	0	0
$u = 0$ (interrupciones)	0	0	1	0	1	1
Percentil 95% de huecos/lugar: 63						

Tabla 6 – Redes mixtas: frecuencia de huecos de tensión - máximo

Tensión residual <i>u</i> % de la tensión de referencia	Duración <i>t</i>					
	$10 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s
$90 > u \geq 70$	111	99	20	8	3	1
$70 > u \geq 40$	50	59	14	3	1	0
$40 > u \geq 0$	5	26	11	4	1	1
$u = 0$ (interrupciones)	5	25	104	10	15	24
Número mayor de huecos/lugar: 306						

Tabla 7 – Redes mixtas: frecuencia de huecos de tensión - media

Tensión residual <i>u</i> % de la tensión de referencia	Duración <i>t</i>					
	$10 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s
$90 > u \geq 70$	26,8	27,6	3,4	1,2	0,3	0,02
$70 > u \geq 40$	3,1	15,1	1,3	0,4	0,02	0
$40 > u \geq 0$	0,4	6,5	1	0,4	0,1	0,02
$u = 0$ (interrupciones)	0,3	3,5	7,4	1,2	1,1	2,1
Número medio de huecos/lugar: 103						

Tabla 8 – Redes mixtas: frecuencia de huecos de tensión – percentil 95%

Tensión residual <i>u</i> % de la tensión de referencia	Duración <i>t</i>					
	$10 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s
$90 > u \geq 70$	61	68	12	6	1	0
$70 > u \geq 40$	8	38	4	1	0	0
$40 > u \geq 0$	2	20	4	2	1	0
$u = 0$ (interrupciones)	0	18	26	5	4	9
Percentil 95% de huecos/lugar: 256						

7.2 Estadísticas de las encuestas del EPRI [9] [10]

En esta encuesta, los resultados de las medidas se han recogido durante un periodo de dos años (1993 a 1995) en las redes de distribución de media tensión de 24 compañías eléctricas en los Estados Unidos. El número real de lugares en los que se han instalado los monitores fue un total de 277, en 95 líneas de suministro diferentes. Había muy pocas redes de cables en esta encuesta.

En la mayor parte de los casos, se midieron las tensiones fase-neutro en media tensión. El valor eficaz de la tensión se ha calculado en un ciclo. Todos los eventos dentro de un periodo de un minuto se han clasificado como un solo hueco, caracterizado por la tensión mínima en una cualquiera de las fases y la duración del evento ha sido asociada a esta fase.

Los resultados estadísticos de la frecuencia y de la amplitud del hueco de tensión se muestran en las figuras siguientes. (Los datos correspondientes a la duración de los huecos de tensión no se han publicado todavía). Los datos provenientes de cada lugar se han ponderado según la probabilidad de la selección de este lugar entre todos los emplazamientos de medida posibles.

La figura 4 representa el número de huecos y de interrupciones por emplazamiento y por 30 días.

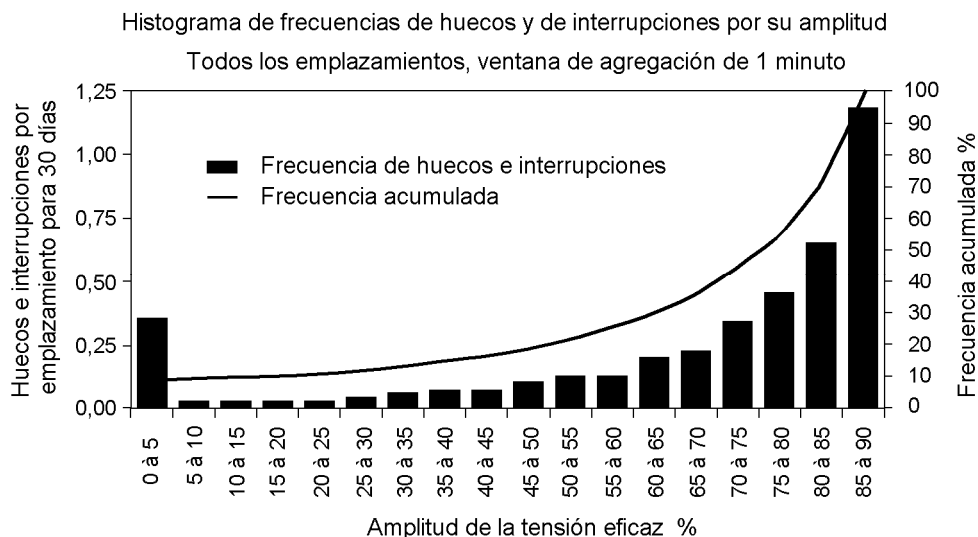


Figura 4 – Histograma de frecuencias de huecos y de interrupciones

La figura 5 muestra el número de emplazamientos en los que se ha registrado un número dado de huecos de tensión por debajo de 4 umbrales diferentes de tensión. Esto corresponde al índice de SARFI_x, donde:

$$\text{SARFI}_x \text{ (Índice de (variación) de frecuencia en valor eficaz medio del sistema, System Average RMS (Variation) Frequency Index)} = \sum N_i / N_t$$

donde

x = umbral de tensión eficaz;

N_i = número de clientes por año que han experimentado huecos de tensión por debajo de x ;

N_t = número de clientes abastecidos por la red correspondiente.

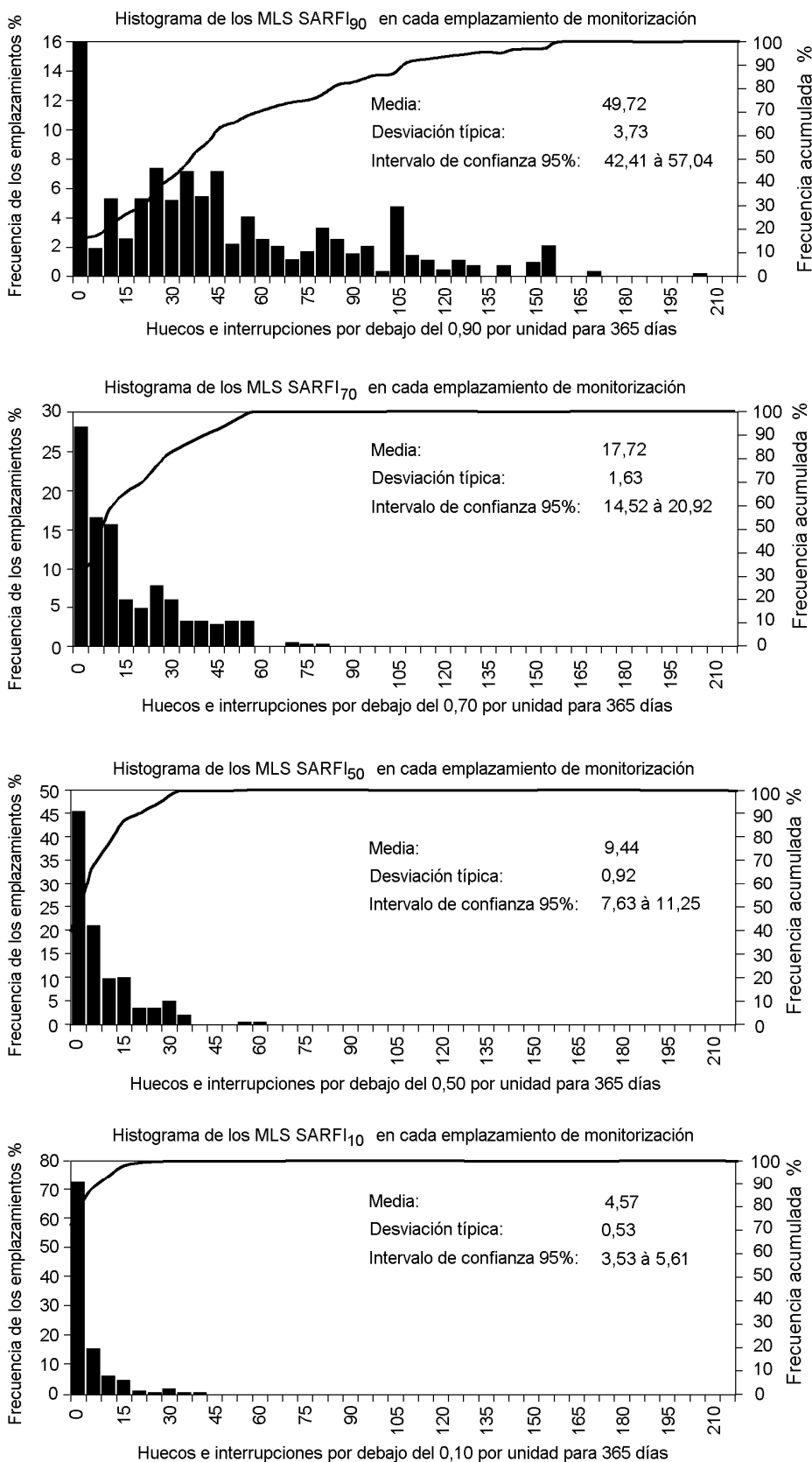


Figura 5 – Número anual de huecos e interrupciones por debajo de 4 umbrales de tensión

7.3 Algunas estadísticas en diferentes países

7.3.1 País A

Estas medidas se ha realizado en redes de alta tensión y media tensión durante un año, utilizando 27 equipos en alta tensión y 36 en media tensión.

Los umbrales adoptados fueron 90% (inicial), 92% (final) y 10% (interrupciones), basados en la tensión nominal como valor de referencia. Los valores eficaces de tensión se han calculado en ventanas de 10 ms.

Un evento se consideró como un hueco de tensión cuando al menos una de las tres tensiones cayó por debajo del umbral inicial. Un evento se consideró como una interrupción breve cuando las tres tensiones han caído por debajo del umbral del 10%.

El equipo de medida se instaló para detectar los eventos cuya duración era más larga o igual a 20 ms y para los que la tensión residual era más baja o igual al 90% de la tensión de referencia. Sin embargo las tablas siguientes muestran solamente los eventos cuya duración fue más larga o igual a 50 ms, y cuya amplitud era inferior o igual al 80%.

Las interrupciones breves se han contado separadamente de los huecos de tensión, haciéndose entonces estadísticas por separado en las tablas siguientes.

Las tablas 9 y 10 muestran la distribución de los huecos y de las interrupciones medidos en porcentaje del número de eventos detectados (más de 20 000) en las redes alta tensión y media tensión.

Tabla 9 – Huecos de tensión e interrupciones breves en la red de alta tensión

Tensión residual u % de la tensión de referencia	Duración t				
	$50 \leq t < 200$ ms	$200 \leq t < 400$ ms	$400 \leq t < 600$ ms	$0,6 \leq t < 1$ s	$1 \leq t$ s
$80 > u \geq 75$	7,4%	2,7%	0,6%	0,8%	0,6%
$75 > u \geq 70$	3,9%	1,5%	0,2%	0,3%	0%
$70 > u \geq 50$	4,7%	2,5%	0,2%	0,4%	0,4%
$50 > u \geq 30$	0,9%	0,4%	0,2%	0,2%	0%
$30 > u$	3,2%	0,6%	0,2%	0%	1,1%
Interrupciones breves	0%	0,3%	0,1%	0%	3,5%

Tabla 10 – Huecos de tensión e interrupciones breves en la red de media tensión

Tensión residual u % de la tensión de referencia	Duración t				
	$50 \leq t < 200$ ms	$200 \leq t < 400$ ms	$400 \leq t < 600$ ms	$0,6 \leq t < 1$ s	$1 \leq t$ s
$80 > u \geq 75$	6,5%	2,4%	0,8%	0,9%	0%
$75 > u \geq 70$	2,7%	1,4%	1,1%	1,3%	0%
$70 > u \geq 50$	7,1%	2,4%	1,6%	1,3%	0%
$50 > u \geq 30$	2,2%	1,8%	0,6%	0,6%	0%
$30 > u$	5,7%	2,4%	0,8%	0%	0,2%
Interrupciones breves	1,3%	2,4%	0,2%	0%	4,7%

7.3.2 País B

La campaña de medida se efectuó durante un periodo de tres años, 1996-1998, con la ayuda de 45 registradores de huecos, registrando los resultados en cada emplazamiento elegido durante un año completo. De manera general, las medidas se han tomados entre fase y tierra, pero las conexiones disponibles del transformador de tensión hicieron necesario medidas entre fases en algunos casos.

Los umbrales adoptados fueron del 90% (inicial), 91% (final) y 1% (interrupción), basados en la tensión nominal como valor de referencia.

Los huecos de tensión se clasificaron según la profundidad y la duración siguiendo la tabla desarrollada por UNIPEDA. Los huecos que implican más de una fase se designaron como un evento único si se solapaban en el tiempo. Los eventos separados en el tiempo (sin solapamiento) se contaron como huecos distintos.

Se constató que una cuarta parte de los eventos registrados había tenido una duración en el rango de 10 ms a 20 ms. Era también evidente que los diferentes instrumentos de medida habían respondido de formas diferentes a estos eventos, que son probablemente los transitorios de tensión. En consecuencia se decidió ignorar los eventos que tienen una duración menor de 20 ms.

Las tablas que siguen dan los resultados para tres tipos de redes: media tensión aérea- 109 lugares de medida, media tensión subterránea – 11 lugares, y alta tensión (400 kV) – 9 lugares.

En cada caso se presenta el valor máximo y el valor medio de las incidencias. Para los valores máximo (tablas 11, 14 y 16) cada celda de la tabla contiene el número anual de huecos de tensión del lugar en el que se han registrado mayor número de huecos a sus correspondientes profundidad (tensión residual) y duración. Para los valores medios (tablas 13, 15 y 17) cada celda contiene la media aritmética de los números anuales registrados en todos los emplazamientos a sus correspondientes profundidad (tensión residual) y duración.

Por otra parte, la tabla 12 contiene los percentiles 95% para las redes aéreas de media tensión. En esta tabla, cada celda es el número máximo de huecos después de haber excluido el 5% de los lugares en los que se registró el mayor número de huecos con sus correspondientes valores de profundidad (tensión residual) y duración. (El número de lugares de medida no era suficiente para permitir la producción de estas tablas para otros tipos de redes)

Tabla 11 – Redes de media tensión aéreas: frecuencia de huecos de tensión - máximo

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	541	61	24	25	53	51	10
$85 > u \geq 70$	1 532	203	136	20	7	1	1
$70 > u \geq 40$	1 146	225	38	26	8	1	1
$40 > u \geq 1$	97	424	31	28	5	1	3
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	2	20	7	27	27	6	10

Tabla 12 – Redes de media tensión aéreas: frecuencia de huecos de tensión – percentil 95%

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	150	37	9	6	3	2	1
$85 > u \geq 70$	238	93	14	5	1	0	0
$70 > u \geq 40$	141	128	15	5	1	0	0
$40 > u \geq 1$	55	113	12	4	1	0	0
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	0	4	1	6	7	2	3

Tabla 13 – Redes de media tensión aéreas: frecuencia de huecos de tensión - media

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	47,1	11,7	2,3	1,2	1,5	1,1	0,2
$85 > u \geq 70$	63,9	28,1	5,3	1,0	0,2	0	0
$70 > u \geq 40$	36,5	31,9	3,6	1,1	0,2	0	0
$40 > u \geq 1$	10,4	24,2	2,5	0,8	0,2	0	0
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	0	0,8	0,3	1,1	1,4	0,4	0,6

Tabla 14 – Redes de media tensión subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - máximo

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	105	34	8	20	43	11	10
$85 > u \geq 70$	64	54	28	2	0	0	0
$70 > u \geq 40$	65	126	9	2	0	0	0
$40 > u \geq 1$	26	53	3	1	0	0	0
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	0	9	5	6	3	1	2

Tabla 15 – Redes de media tensión subterráneas: frecuencia de huecos de tensión - media

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	37,4	12,1	1,8	1,9	4,2	1,2	1,1
$85 > u \geq 70$	24,0	20,4	4,4	0,5	0	0	0
$70 > u \geq 40$	14,2	19,7	2,1	0,2	0	0	0
$40 > u \geq 1$	5,6	12,5	0,8	0,1	0	0	0
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	0	0,8	0,7	0,6	0,7	0,2	0,5

Tabla 16 – Redes de alta tensión (400 kV): frecuencia de huecos de tensión - máximo

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	50	11	2	0	0	0	0
$85 > u \geq 70$	61	15	1	0	0	0	0
$70 > u \geq 40$	20	14	1	0	0	0	0
$40 > u \geq 1$	2	1	0	6	0	0	0
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	0	0	2	4	0	0	0

Tabla 17 – Redes de alta tensión (400 kV): frecuencia de huecos de tensión - media

Tensión residual u % de tensión de referencia	Duración t						
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 60$ s	$60 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	27,7	3,1	0,4	0	0	0	0
$85 > u \geq 70$	30,2	7,6	0,3	0	0	0	0
$70 > u \geq 40$	7,1	2,9	0,2	0	0	0	0
$40 > u \geq 1$	0,9	0,1	0	1,1	0	0	0
$1 > u \geq 0$ (interrupciones)	0	0	0,2	0,6	0	0	0

7.3.3 País C

Para este país, los resultados de medida se disponen como sigue:

- dos lugares de medida en redes subterráneas durante tres años, 1996 a 1998 incluidos;
- tres lugares de medida en redes mixtas (aéreas/subterráneas) durante los mismos tres años;
- tres lugares de medida en redes mixtas durante un solo año, 1999;
- tres lugares de medida en redes aéreas durante el año 1999.

Estas medidas se tomaron en las barras de media tensión de las subestaciones de alta tensión/media tensión.

Además de las tablas habituales de resultados, se determinó un valor característico simple para cada conjunto de resultados tabulados. Esto se evaluó aplicando una ponderación al valor de cada celda y tomando la suma de todos los valores ponderados de las celdas.

En la tabla 18 se dan los coeficientes de ponderación de las celdas. Para cada celda, el coeficiente viene dado por el producto de los valores mitad del intervalo de los intervalos de *duración y profundidad* (no es tensión residual). Por ejemplo, la celda correspondiente al intervalo de duración 0,5 s - 0,75 s y el intervalo de profundidad $0,3 \cdot U_{\text{ref}} - 0,6 \cdot U_{\text{ref}}$ (tensión residual $0,4 \cdot U_{\text{ref}} - 0,7 \cdot U_{\text{ref}}$) tiene el coeficiente de ponderación $0,28125 = 0,625 \times 0,45$. Sin embargo, asumiendo que no hay ningún incremento de severidad por encima de 1 segundo, para las cuatro columnas finales se calcula el coeficiente sobre la base del mismo valor mitad de intervalo de duración de 0,875.

Tabla 18 – Coeficiente de ponderación de severidad de los huecos de tensión

Tensión residual u	Profundidad u'	Duración t							
		$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	$10 < u' \leq 15$	0,008	0,022	0,047	0,078	0,109	0,109	0,109	0,109
$85 > u \geq 70$	$15 < u' \leq 30$	0,014	0,039	0,084	0,141	0,197	0,197	0,197	0,197
$70 > u \geq 40$	$30 < u' \leq 60$	0,027	0,079	0,169	0,281	0,394	0,394	0,394	0,394
$40 > u \geq 10$	$60 < u' \leq 90$	0,045	0,131	0,281	0,469	0,656	0,656	0,656	0,656
$10 > u \geq 0$	$90 < u' \leq 100$	0,057	0,166	0,356	0,594	0,831	0,831	0,831	0,831

La suma ponderada obtenida después de la multiplicación de los diferentes valores de las celdas por los coeficientes correspondientes contenidos en la tabla 18 se muestra al final de cada una de las tablas 19 a 26 siguientes. Por comparación, se acompaña de la suma directa que resulta de sumar los valores reales de las celdas sin aplicar la ponderación.

Las tablas 19 y 20 contienen los resultados de dos lugares de medida en redes subterráneas para el periodo de tres años 1996-1998. Estas dos tablas contienen los valores máximos y medios, respectivamente, del número anual de huecos de tensión registrados para cada combinación de intervalos clasificados según la tensión residual y la duración. En el caso de los valores máximos, la media de los tres números anuales se determina para cada uno de los dos lugares y el mayor de los dos resultados se representa en cada celda de la tabla. En el caso de los valores medios, el número en cada celda es simplemente la media de los seis valores – tres valores anuales para cada uno de los dos lugares.

Las tablas 21 y 22 contienen la misma información para las redes mixtas en el mismo periodo de tres años. Se calculan como se ha descrito anteriormente, salvo que había tres lugares de medida en lugar de dos.

Tabla 19 – Redes subterráneas: 2 lugares de medidas, 1996-1998 – número máximo de huecos/año

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	1,67	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
$85 > u \geq 70$	3,67	3,33	0,67	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
$70 > u \geq 40$	0,67	2,67	0,33	1,33	0,00	1,33	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$10 > u \geq 0$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma directa: 17,0								
Suma ponderada: 1,5								

Tabla 20 – Redes subterráneas: 2 lugares de medidas, 1996-1998 – número medio de huecos/año

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	1,17	0,17	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
$85 > u \geq 70$	3,67	2,50	0,50	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
$70 > u \geq 40$	0,33	1,33	0,17	1,00	0,00	0,67	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$10 > u \geq 0$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma directa: 12,2								
Suma ponderada: 1,0								

Tabla 21 – Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1996-1998 – número máximo de huecos/año

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	4,00	1,33	1,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,00
$85 > u \geq 70$	8,67	5,33	2,33	2,33	1,33	0,33	0,00	0,00
$70 > u \geq 40$	3,00	3,67	2,67	4,00	0,67	1,00	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,67	1,33	0,67	1,00	1,00	1,67	0,00	0,00
$10 > u \geq 0$	0,00	0,33	0,33	0,67	0,00	1,00	0,33	0,00
Suma directa: 52,7								
Suma ponderada: 8,3								

Tabla 22 – Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1996-1998 – número medio de huecos/año

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	2,67	0,89	0,56	0,33	0,11	0,22	0,11	0,00
$85 > u \geq 70$	5,78	4,78	1,11	1,44	0,67	0,11	0,00	0,00
$70 > u \geq 40$	1,78	2,56	1,78	1,44	0,22	0,67	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,22	0,89	0,22	0,56	0,44	1,11	0,00	0,00
$10 > u \geq 0$	0,00	0,11	0,11	0,22	0,00	0,33	0,11	0,00
Suma directa: 31,6								
Suma ponderada: 4,1								

La tabla 23 muestra los resultados para tres lugares de medidas en redes mixtas durante sólo el año 1999. El número indicado en cada celda es el mayor de los números registrados en los tres lugares con la duración y la tensión residual correspondientes. La tabla 24 contienen la media de estos valores para el mismo conjunto de medidas.

Las tablas 25 y 26 contienen los resultados correspondientes para tres lugares de medidas en las redes aéreas para el mismo año.

Tabla 23 – Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1999- número máximo de huecos

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	2	3	1	0	0	0	0	0
$85 > u \geq 70$	7	13	1	0	1	0	0	0
$70 > u \geq 40$	5	4	1	2	1	1	0	0
$40 > u \geq 10$	1	1	0	0	1	1	0	1
$10 > u \geq 0$	0	1	0	1	1	1	0	4
Suma directa: 55								
Suma ponderada: 10,8								

Tabla 24 – Redes mixtas: 3 lugares de medidas, 1999- número medio de huecos

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	1,67	1,67	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$85 > u \geq 70$	4,67	5,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00
$70 > u \geq 40$	3,00	2,33	0,67	1,00	0,67	0,33	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,67	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,33
$10 > u \geq 0$	0,00	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,00	1,33
Suma directa: 27,7								
Suma ponderada: 4,1								

Tabla 25 – Redes aéreas: 3 lugares de medidas, 1999- número máximo de huecos

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	10	4	3	1	0	1	1	0
$85 > u \geq 70$	7	17	17	9	4	1	1	0
$70 > u \geq 40$	2	12	3	1	5	0	0	0
$40 > u \geq 10$	0	8	0	1	0	4	0	2
$10 > u \geq 0$	0	0	0	3	0	1	6	0
Suma directa: 124								
Suma ponderada: 21,8								

Tabla 26 – Redes aéreas: 3 lugares de medidas, 1999- número medio de huecos

Tensión residual u % de U_N	Duración t							
	$20 \leq t < 100$ ms	$100 \leq t < 250$ ms	$250 \leq t < 500$ ms	$0,5 \leq t < 0,75$ s	$0,75 \leq t < 1$ s	$1 \leq t < 3$ s	$3 \leq t < 20$ s	$20 \leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$	7,00	2,00	1,00	1,00	0,00	0,67	0,33	0,00
$85 > u \geq 70$	6,67	12,00	7,67	3,33	1,33	0,33	0,33	0,00
$70 > u \geq 40$	1,00	7,33	1,33	0,67	2,00	0,00	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,00	3,00	0,00	0,33	0,00	1,33	0,00	0,67
$10 > u \geq 0$	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,33	2,00	0,00
Suma directa: 64,7								
Suma ponderada: 8,5								

7.3.4 País D

En 1987 la federación nacional de compañías de electricidad, que comprende 10 compañías de electricidad, dirigió una campaña de medidas de julio a septiembre, periodo generalmente durante el cual se producen la mayor parte de los cortes de energía causados por el rayo.

Esta campaña tenía dos objetivos. El primero era evaluar la incidencia real de los huecos de tensión y de las interrupciones breves. El segundo era suministrar datos de probabilidad de manera que los usuarios de electricidad y los fabricantes de equipos expuestos a las perturbaciones podrían diseñar sus configuraciones del sistema y hacer una evaluación práctica de los costes y de las ventajas de las medidas correctoras.

La gran mayoría de los usuarios de electricidad se alimenta a partir de subestaciones de distribución de 6,6 kV que a su vez se conectan a las barras de 77 kV. Por comparación, el número de clientes especiales conectados a la red por encima de 77 kV es despreciable. La mayor parte de las barras de 77 kV están equipadas de unidades automáticas de oscilogramas, que se accionan por un relé de mínima tensión en el caso de una falta, registrando de esta manera la tensión durante los huecos de tensión. En consecuencia, éstas se eligieron como la fuente de los datos requeridos.

En el caso de las barras de 77 kV no equipadas con unidades de oscilogramas, se sustituyeron por las barras de 154 kV o de tensiones más altas. Éste fue también el caso de las subestaciones de distribución alimentadas directamente a partir de 154 kV o de una red de tensión más alta.

Para la evaluación de los resultados se hicieron las siguientes suposiciones.

- Cada línea de distribución tiene el mismo número de usuarios de electricidad. En consecuencia, identificando las líneas de distribución afectadas por cada uno de los huecos registrados por las unidades de oscilogramas, se podría evaluar el número de usuarios implicados.
- El número de huecos de tensión y de interrupciones breves es directamente proporcional al número de faltas en las líneas de transporte. En consecuencia, por extrapolación del número de faltas en cada nivel de tensión producidas durante el periodo de medida de tres meses en función del número anual disponible por las estadísticas nacionales, el número anual de huecos e interrupciones podría ser evaluado.

Los rangos de las posibles duraciones de los huecos y de las profundidades (tensión residual) se dividieron en siete y cinco intervalos, respectivamente. Para cada una de las combinaciones resultantes profundidad-duración, utilizando las hipótesis anteriores y relacionando el número de usuarios afectados con el número total de usuarios conectados, se efectuó el cálculo de la probabilidad de que un usuario sea afectado en el curso de un año por un hueco de la severidad correspondiente.

Los resultados se muestran en la tabla 27.

Tabla 27 – Probabilidad media p de huecos de tensión e interrupciones breves por cliente

Tensión residual u % de U_n	Duración (ciclos)						
	< 3	3 – 6	6 – 9	9 – 12	12 – 15	15 – 18	18 – 120
$90 > u \geq 80$	4	29	11	3	1	1	6
$80 > u \geq 60$	3	12	4	1	0	0	2
$60 > u \geq 40$	0	7	3	1	0	0	1
$40 > u \geq 20$	0	4	2	0	0	0	1
$20 > u \geq 0$	0	2	1	0	0	0	1

8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES

8.1 Comparación de los resultados

Solamente es posible hacer una comparación limitada entre los resultados anteriores. Existen disparidades considerables entre las diversas encuestas, en lo que respecta a:

- el número de puntos de medida seleccionados, y sus posiciones en las redes elegidas;
- los umbrales de huecos y de interrupciones seleccionados;
- la extensión del periodo de encuesta, en su totalidad y en cuanto al periodo durante el que se mantuvo el registro en cada sitio de medida;
- los tipos de equipos de medida;
- el cuidado de asegurarse que los puntos de medida sean una muestra representativa de las redes.

Hay otras disparidades en el análisis y la presentación de los datos, como:

- las diferencias en los intervalos elegidos tanto de los rangos de profundidad como de las duraciones.
- si los resultados se presentan en valor absoluto, o relativo o en términos de probabilidad;
- si la incidencia del hueco se expresa por usuario de electricidad o por punto de medida;
- si el número representado es un valor máximo, un valor medio, un percentil u otro valor estadístico;
- el método de agregación de los resultados.

A pesar de estas diferencias, se pueden recoger algunas características comunes.

- Las encuestas tienen mucho en común en lo que respecta a la densidad relativa con la que los huecos se distribuyen en las áreas profundidad-duración
- Se confirma que los huecos se producen en toda la extensión del campo profundidad-duración.
- Se confirma que el tipo de red tiene un impacto sobre la frecuencia de aparición de los huecos, y que las redes aéreas tienen una mayor frecuencia de incidencias.
- La alta frecuencia de incidencias de duración próxima a cero y cercanas a la tensión normal se traducen respectivamente en un número inflado de transitorios de tensión y de fluctuaciones ordinarias de las cargas.
- En las encuestas que comprenden un gran número de lugares de medida, se encuentra un gran abanico de frecuencias de aparición de incidencias, reflejando verdaderamente las diferencias debidas al tipo y a la configuración de las redes, a las condiciones climáticas y a otras características de los entornos naturales y de construcción.
- Más aun, se manifiesta una evidencia de la dispersión de las frecuencias de aparición de incidencias en las diferencias entre el valor máximo, el valor medio, los percentiles y otras medidas del número de huecos de tensión registrados.

8.2 Conclusiones de los resultados

La conclusión más importante a extraer de los resultados es que los huecos de tensión y las interrupciones breves son una realidad en el entorno electromagnético. Pueden sobrevenir en cualquier lugar, en cualquier momento y hacen caer la tensión prácticamente a cero con una duración que va hasta y por encima de un segundo. La frecuencia y la probabilidad de su aparición en cualquier nivel son muy variables de un lugar a otro y de un año a otro.

Está claro que las frecuencias anuales elevadas de huecos de tensión, son posibles en las redes aéreas, lo que refleja la exposición de estas redes a las causas de las faltas, particularmente a las condiciones climáticas severas, que se añaden a la serie de causas que afectan a todas las redes.

NOTA Los usuarios de electricidad alimentados a partir de una red local subterránea pueden, naturalmente, ser afectados por huecos de tensión que provienen de las partes aguas arriba de la red, cuya parte significativa puede ser de construcción aérea.

Otra conclusión es lo muy deseable que es hacer un esfuerzo para establecer una normalización internacional sobre la manera en que se inspeccionen, se midan y se registren estos fenómenos. La meta debería ser el llegar a una coherencia y a una consistencia en lugar de las numerosas disparidades que se han enumerado en el apartado 8.1. Por tanto el estado actual del conocimiento de esta perturbación es probablemente insuficiente para permitir especificaciones prescriptivas de cómo debería ser exactamente el procedimiento sobre todos estos aspectos. Inevitablemente, tendrá que existir un compromiso entre el deseo de adquirir el máximo de conocimiento y los gastos, el costo de la instrumentación y la recolección, almacenamiento y análisis de los datos, junto con el esfuerzo de la gestión requerida para instalar y mantener el equipo y los accesorios necesarios.

Debería observarse que la mayor parte de las encuestas no implicaron una monitorización que excediera de un año sobre un sitio determinado. Por tanto se tiene que recordar que muchas de las causas de las faltas en la red, que son la fuente principal de los huecos de tensión, en particular las asociadas con las condiciones climáticas, son variables de un año a otro. Es usual que los eventos como los rayos o las tempestades alcancen picos de gravedad en intervalos de diez años o más, sin ser válidamente descritos como una desviación de las condiciones climáticas normales para una región dada. Igualmente, un circuito individual o sección de la red puede ser víctima de una tormenta local en un momento en que las condiciones climáticas generales de la región correspondiente parecen ser totalmente ordinarias.

Esto suscita la cuestión de cuántos lugares de medida se necesitan elegir y sobre el número de años que debería continuar la encuesta con el objeto de proporcionar una representación real de los tipos y frecuencia de los huecos de tensión a prever. Esta complejidad se añade a la condición normal de seleccionar los lugares de manera que no se presenten desviaciones en los resultados obtenidos.

Así, es preciso reconocer que ciertos resultados que han sido registrados podrían haber sido desviados en una u otra dirección por las condiciones que fueron particularmente favorables o desfavorables en las épocas y en los lugares seleccionados para la medida.

8.3 Conclusiones generales

Los huecos de tensión han sido una característica intrínseca de las redes de distribución pública de electricidad desde los inicios. Por tanto en las décadas recientes, vienen a ser una perturbación cada vez más inquietante, provocando inconvenientes e incluso pérdidas económicas considerables. La razón es que algunos equipos modernos que utilizan la electricidad, bien en sus propios diseños o debido a los dispositivos de control incorporados, han llegado a ser más sensibles a los huecos de tensión. Existe por tanto la necesidad de un mayor conocimiento del fenómeno entre los suministradores y los usuarios de electricidad y los fabricantes de equipos que utilizan la electricidad.

Este conocimiento tiene que abarcar todas las conclusiones ya mencionadas, comprendiendo los valores observados de la tensión y de la duración, la frecuencia con que pueden producirse los huecos y la variabilidad de esta frecuencia, con la incertidumbre que origina. El efecto del hueco sobre el equipo del usuario se tiene que considerar especialmente en lo que respecta a la característica profundidad-duración que es crítica, y el usuario tiene que tener en cuenta las posibles consecuencias de todos los deterioros de ejecución o errores de funcionamiento del equipo. A la luz de estas consecuencias, la instalación debería, ya en la primera etapa de la planificación, diseñarse para reducir al mínimo la perturbación y las pérdidas que resultan de los huecos de tensión, vistas las consideraciones económicas que ello implica.

El planteamiento normal de la compatibilidad electromagnética es el de observar la coordinación de los límites de emisión y de inmunidad frente al fenómeno de perturbación implicado. Las limitaciones especiales que se aplican a los huecos de tensión y a las interrupciones breves en lo que respecta a este planteamiento ya han sido descritos— la limitación de las emisiones es prácticamente irrealizable, mientras que la inmunidad intrínseca está sometida a las limitaciones descritas en el apartado 5.1.

Puede hacerse una distinción entre, de una parte, el equipo en el que puede ser aplicada una atención individual y especializada en el lugar previsto de su instalación y, de otra parte, el equipo que se sitúa en el mercado libre a disposición de los usuarios no expertos que pueden comprarlo y conectarlo a la red por propia iniciativa.

Puesto que el primer tipo es susceptible de formar parte de una gran instalación, existe un ambiente de consulta y de cooperación entre las tres principales partes – el usuario, el fabricante o el suministrador del equipo y el suministrador de electricidad, con un instalador experto probablemente también implicado. En algunos lugares y en ciertos países es posible que el suministrador de electricidad dé una información básica en cuanto al nivel y a la frecuencia de los huecos de tensión previstos en el lugar correspondiente, sujeto a las incertidumbres que son inevitables. Sin embargo, su aptitud para cambiar estos valores está limitada, puesto que, en un lugar dado, la mayor parte de los huecos provienen de eventos aguas arriba que están bastante distantes.

El usuario, de acuerdo con todas las partes, puede así hacer una evaluación equilibrada de los efectos posibles de los huecos previstos y tomar una decisión económicamente viable con respecto a cualquier medida de atenuación que pueda tomarse, utilizando los métodos para los que se han dado los ejemplos anteriores en el apartado 5.2.

El segundo tipo de equipos que se puede describir como un bien de consumo, debería estar provisto del nivel máximo posible de inmunidad intrínseca. Además, deberían tomarse las medidas adecuadas para informar al potencial usuario de las limitaciones de esta inmunidad y de todas las opciones que puedan estar a su disposición para atenuar los huecos que sobrepasen el nivel de inmunidad.

Sería deseable editar los niveles de compatibilidad para los huecos de tensión para guiar a los fabricantes de equipos de este tipo, de manera que puedan considerar el compromiso óptimo entre el coste del producto y el nivel de inmunidad a proporcionar. Sin embargo, el nivel y la calidad de las informaciones, que son necesarias para establecer el nivel de compatibilidad, no están aún disponibles.

Determinando este nivel de compatibilidad, habría que tener en cuenta la naturaleza bidimensional de los huecos de tensión. Según se describe en el anexo A de la Norma IEC 61000-2-2 [3], el nivel de compatibilidad (para un fenómeno unidimensional) es un punto en la escala de los niveles de perturbación tal que hay solamente una pequeña probabilidad de ser sobrepasado por el nivel real de la perturbación en el entorno electromagnético correspondiente. En el caso de los huecos de tensión, sin embargo el nivel de compatibilidad sería una curva en el área profundidad-duración de manera que habría una pequeña probabilidad de huecos de mayor profundidad (menor tensión residual) y de mayor duración.

La manera en que han sido presentados los resultados de la encuesta de los huecos de tensión, ha puesto el acento sobre el énfasis de eventos de perturbación, a diferencia del nivel de la perturbación, que no es coherente con el planteamiento CEM general de las perturbaciones electromagnéticas. Desde el punto de vista de la inmunidad, sin embargo, tiene que reconocerse que si un equipo tiene una inmunidad a los huecos de tensión hasta un cierto nivel, entonces el número de huecos hasta este nivel es por entero irrelevante – el equipo no es afectado por éstos.

Por otra parte, los huecos por encima de este nivel impedirán al equipo funcionar como estaba previsto. Si el deterioro del funcionamiento es importante, existe probablemente una frecuencia de aparición que se percibiría por el usuario como tan indeseable que incluso un incremento de esta frecuencia no lo vería como más indeseable.

Para una degradación importante del funcionamiento, esta frecuencia es verosímil que sea bastante baja, del orden de 2-4 veces por año. Tomando esta consideración en cuenta y reconociendo también que una probabilidad bastante grande se asocia a todas las partes del área de huecos-duraciones, se sugiere un posible planteamiento para el establecimiento de los niveles de compatibilidad para los huecos de tensión.

Este planteamiento consistiría en establecer varios niveles de compatibilidad (curvas sobre el área de niveles de perturbación), cada uno asociado con una frecuencia de aparición. Por ejemplo, el nivel de compatibilidad asociado a la frecuencia de 2 por año, sería una curva sobre el área profundidad-duración tal que hay solamente una baja probabilidad de que los huecos más allá de este nivel de profundidad y duración se produjeran con una frecuencia igual o superior a dos por año. Podrían establecerse curvas semejantes para las frecuencias de 3 y 4 por año (posibilidad también de 1 e incluso 0 por año).

Con este planteamiento, un fabricante de un producto previsto para usuarios inexpertos en electrotecnia, podría seleccionar el nivel de compatibilidad contra el que proporcionaría un nivel de inmunidad intrínseca, teniendo en cuenta el coste de esta inmunidad y el valor de la función ofrecida por el producto. Igualmente el usuario sería consciente de que el producto es sensible a las perturbaciones de los huecos que tienen una frecuencia de 2 por año (por ejemplo), y tendría la opción bien de aceptar la perturbación o de tomar cualquier acción que juzgue apropiada.

Las curvas de este tipo se podrían dibujar si se dispusiera de los resultados de las encuestas que indicasen con suficiente resolución las dimensiones de la profundidad y la duración, y que satisficiera en lo que concierne a la naturaleza representativa de los resultados.

8.4 Recomendaciones

Se proponen las recomendaciones siguientes como base común para la medida de los huecos de tensión y de la presentación de los datos. Mientras que los parámetros sugeridos aquí se deberían considerar como punto de partida para una campaña de medida de huecos de tensión, es una cuestión de la persona que maneja la encuesta el considerar si estos valores son adecuados para los lugares particulares a monitorizar.

- a) La medida debería efectuarse durante al menos tres años en cada lugar elegido.
- b) La monitorización debería ser realizada sobre las barras de media tensión de las subestaciones de alta tensión/media tensión. La disponibilidad de las conexiones determinarán si las medidas se hacen fase-fase o fase-tierra.
- c) Los métodos de medida deberían estar de acuerdo con la Norma IEC 61000-4-30 [4].
- d) Los umbrales deberían ser de 90% inicial, 91% final (histéresis 1%) y 10% para la interrupción, basados en la tensión nominal/declarada como tensión de referencia. En el informe de los resultados se deberían registrar los valores reales del umbral y/o de la histéresis utilizados así como la razón para elegir estos valores.
- e) Los huecos de tensión deberían clasificarse por su profundidad y duración según la tabla 28. Los huecos que implican más de una fase deberían designarse como un evento único si se solapan en el tiempo.
- f) Debería declararse el método de rellenar las celdas de la tabla – incidencia real, percentil 95%, valor máximo, valor medio, etc.
- g) Deberían explicarse las reglas de reagrupamiento, si se utilizan.

Tabla 28 – Presentación de los resultados recomendada

Tensión residual u % of U_{ref}	Duración s							
	$0,02 < \Delta t \leq 0,1$	$0,1 < \Delta t \leq 0,25$	$0,25 < \Delta t \leq 0,5$	$0,5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 80$								
$80 > u \geq 70$								
$70 > u \geq 60$								
$60 > u \geq 50$								
$50 > u \geq 40$								
$40 > u \geq 30$								
$30 > u \geq 20$								
$20 > u \geq 10$								
$10 > u \geq 0$ (interrupciones)								

NOTA Los dos primeros encabezamientos de duración 0,01 s y 0,02 s corresponden a un semi-periodo y a un periodo de la tensión de 50 Hz. Para las redes de 60 Hz, se emplearían los valores correspondientes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC 60050-161 *Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Parte 161: Compatibilidad electromagnética.*
- [2] IEC/TR3 61000-2-1 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 1: Descripción del entorno. Entorno electromagnético para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las sedes de suministro público.*
- [3] IEC 61000-2-2 *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.*
- [4] IEC 61000-4-30 *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro³⁾.*
- [5] IEEE 1346-1998 *IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment.*
- [6] SMITH, JC. et al., *The Impact of Voltage Sags on Industrial Plant Loads.* First International Conference on Power Quality: End-Use applications and Perspectives, Paris, 1991, Paper C-24, PQA'91, p. 171-178.
- [7] UIE GT2, *Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 2: Voltage dips and short interruptions.*
- [8] Disdip Group, *Voltage dips and short interruptions in medium voltage public electricity supply systems.* Report from the International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy (UNIPED), 1990.
- [9] SABIN, DD. et al., *Statistical Analysis of Voltage Dips and Interruptions. Final Results from the EPRI Distribution System Power Quality Monitoring Survey.* CIREN, June 1999.
- [10] SABIN, DD. et al., *RMS Voltage Variation Statistical Analysis for a Survey of Distribution System Power Quality Performance.* IEEE, 1998, IEEE paper no. 0-7803-4403-0/98.

3) A publicar.

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