

Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario

Study of the quality power in the electrical system and its scope of applicability to the rail system

Antonio Berrios Villalba¹

RESUMEN

La energía eléctrica es un bien de consumo y, como tal, debe ser evaluada su calidad.

El suministro de la energía eléctrica es esencial en nuestra sociedad actual. Los tres pilares en los que se basa toda la regulación del sector eléctrico son el de garantizar el suministro eléctrico, garantizar la calidad del suministro y garantizar que se realice al menor coste posible.

La falta de calidad de la energía eléctrica puede afectar negativamente a los dispositivos que están conectados a la misma.

Se ha desarrollado un importante paquete de normas técnicas, internacionalmente aceptadas, relativas a la identificación y definición de los parámetros que evalúan la calidad de la energía eléctrica y la forma de medirla para poder estandarizar las mismas y, a su vez, se ha desarrollado por la industria distintos dispositivos electrónicos inteligentes que miden esos parámetros de la onda de energía y calculan la calidad de la misma, con una precisión más que aceptable.

La administración, por su parte, en concreto en nuestro país el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, que regula el desarrollo del sector eléctrico, también ha definido los límites que han de cumplirse por los suministradores de energía eléctrica para garantizar esta calidad del suministro recibido por el consumidor.

El ferrocarril no está excluido de esta regulación y se analizan en este artículo las distintas normas vigentes en esta materia identificando los problemas intrínsecos del sector y realizando un ejercicio de tentativa en la extrapolación o aplicación de las normas actuales sobre el sistema ferroviario, con el objetivo de profundizar en el conocimiento de esta materia y disponer de sistemas que permitan evaluar el grado de cumplimiento de esta calidad, en los puntos de conexión del suministro eléctrico al sistema ferroviario y, dentro de éste, cuando se suministra energía eléctrica a trenes e instalaciones para obtener, si cabe, una cada vez más eficiente explotación ferroviaria.

PALABRAS CLAVE

Calidad de la energía eléctrica, calidad de onda, ferrocarril, flicker, armónicos, desequilibrio de tensión, hueco de tensión, sobretensiones, interrupción, freno regenerativo.

¹ Ingeniero Industrial en Electrónica e Ingeniero Técnico en Electricidad, Máster en Dirección Estratégica Internacional por la UPM, Gerente de Área de Ingeniería de Activos de Energía de ADIF, Chairman Energy Management Sector en la Organización Internacional de Ferrocarriles UIC desde 2014 y Editor de la Revista Vía Libre-Técnica de la FFE (www.tecnica-vialibre.es)

ABSTRACT

Electricity is a commodity and as such its quality should be evaluated.

The supply of electricity is essential in today's society. The three pillars on which the entire electricity sector regulation is based are to guarantee the power supply, ensure the quality of supply and ensure that they perform at the lowest cost possible.

The lack of quality of electric power can adversely affect the devices connected to it.

A major package of technical standards has been developed, internationally accepted, regarding the identification and definition of parameters to assess the quality of electricity and how to measure to standardize them and, in turn, various intelligent electronic devices have been developed by industry which measure the wave energy parameters and calculates the its quality, with a more than acceptable accuracy.

The administration, mainly, particularly in our country, the Ministry of Energy, which governs the electricity sector, has also defined the limits to be met by suppliers of the electricity to ensure the quality of the supply received by the consumer.

The railway is not excluded from this regulation and the various existing rules in this area are discussed in this article identifying the intrinsic problems of the rail and conducting an exercise attempt at extrapolation of current rules on the railway system, with the aim of deepening knowledge of this matter and have systems to assess the degree of compliance of this quality in the connection points of power to the rail system and, within that, when power is supplied to trains and facilities to obtain, if possible, an increasingly efficient rail operation.

KEY WORDS

Power Quality, railway, harmonics, flicker, voltage unbalanced, peak, fault analysis, waveform, frequency, disturbances, regenerative brake.

1. INTRODUCCION

La evaluación de la calidad de la energía eléctrica es en nuestros días una tarea que tiene como objetivo final reducir las perturbaciones que se producen en la onda de tensión, que provocan a su vez interrupciones del servicio eléctrico y daños en los equipos que están conectados a la red de distribución de la energía eléctrica.

Las perturbaciones pueden ser creadas desde las fuentes de generación de energía, pueden introducirse en el transporte de la misma o incluso generarse por los propios consumidores de la energía.

Normativas de ámbito internacional están en constante desarrollo y han permitido consolidar un paquete de estándares que incorpora la información aceptada para saber el qué hay que medir, dónde hay que medirlo, cómo hay que medirlo y cuáles son los umbrales aceptables estadísticos para evaluar la calidad de esta energía.

La explotación ferroviaria por su parte está comenzando a incorporar estos conceptos en su gestión de la energía, una vez que se identifican oportunidades de reducción de coste en el importe total de la energía consumida al verter sobre la red la energía regenerada por el frenado de los trenes.

Es necesario por tanto desarrollar estudios, como el que se realiza en este artículo, que aborden, desde una perspectiva comparativa, aspectos como el de identificación de los puntos frontera para medir la calidad de la energía en el sistema ferroviario, los distintos umbrales estadísticos de cada parámetro, las principales perturbaciones que pueden estar presentes proponiendo, a la vez, soluciones técnicas de mitigación de las mismas.

2. ENTORNO LEGISLATIVO EN LA CALIDAD DE SUMINISTRO

En España la regulación de la calidad del suministro eléctrico se ha ido desarrollando paulatinamente en el marco legislativo del desarrollo del sector eléctrico.

En el año 1997, la ley 54/1997 del sector eléctrico, incorporaba en su artículo 48 la responsabilidad de la Administración General del Estado en establecer índices objetivos de calidad del servicio y que las empresas eléctricas estarán obligadas a facilitar a la Administración la información de sus índices de calidad.

En el BOE nº197, del 18/08/1998 se publicó la resolución que aprueba una serie de procedimientos técnicos necesarios para realizar la adecuación gestión técnica del sistema eléctrico y entre ellos el Procedimiento de Operación del sistema P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema, en el que se indican los límites de la calidad del servicio en el punto frontera entre el agente conectado al punto y el operador del sistema.

En el año 2000, el Real Decreto RD 1995/2000 en su Capítulo II, del Título VI, establecía el contenido y extensión de la calidad del suministro eléctrico. Este capítulo identifica los indicadores relativos a la interrupción del suministro, a la calidad de la onda de tensión suministrada y, por último, a la calidad de atención al cliente. Establece los límites estadísticos de cada parámetro y comunica las responsabilidades de cada parte y las penalizaciones económicas de no cumplirse los límites establecidos.

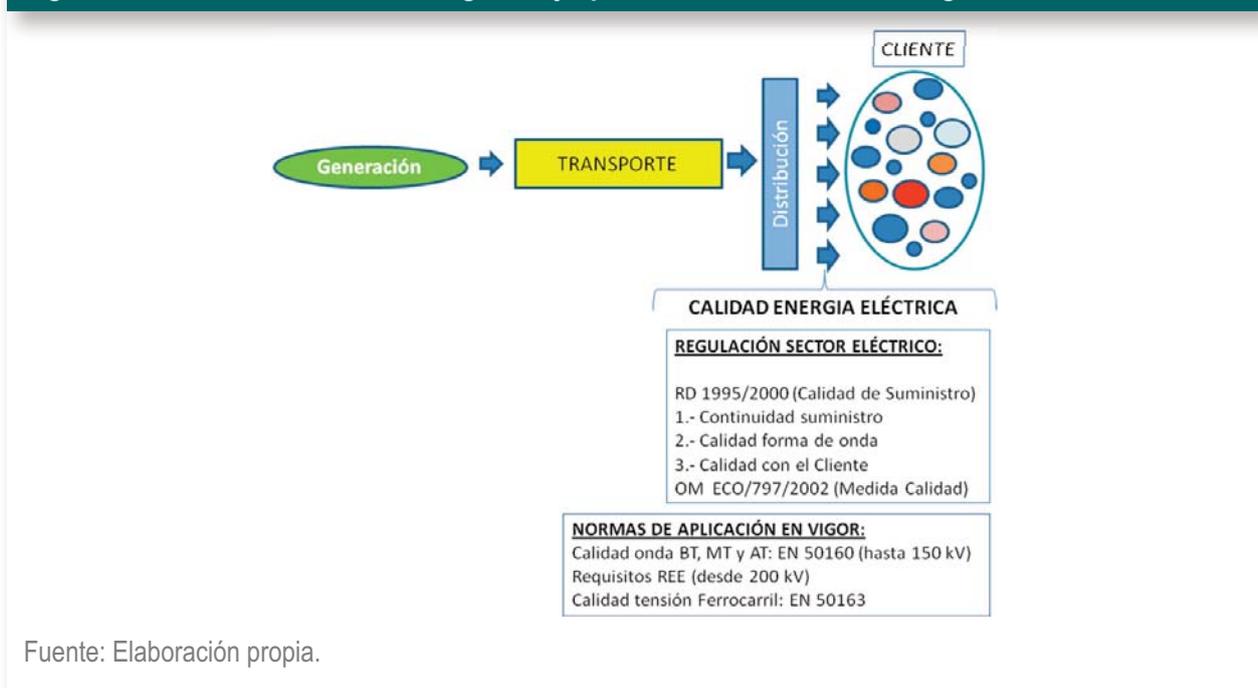
En el año 2002, la Orden Ministerial OM ECO/797/2002, establece con todo detalle el procedimiento para medir la calidad del suministro de energía de una forma homogénea para todas las empresas y que esta medida pueda ser auditable.

También se ha tenido en cuenta en la citada Orden Ministerial el hecho de que la calidad del suministro se puede ver afectada por los distintos consumidores, que pueden provocar perturbaciones que afectan a la calidad de la onda de intensidad, y para mitigarlo reduciendo estos efectos, se definen mecanismos de coordinación entre el suministrador de la energía y el consumidor. Se establece, igualmente, la posibilidad de que cliente y distribuidor puedan establecer otros límites de calidad de suministro más exigentes que los ya establecidos en el Real Decreto anteriormente citado.

Por último, Red Eléctrica de España (REE), como operador de la red de transporte, ha editado en su documento de Referencia TI.E/02/040, las condiciones de intercambio de energía para puntos de conexión, en el que define el conjunto de características que debe cumplir la calidad de onda de tensión.

Para ayudar a tener una visión gráfica de los distintos actores que intervienen y el marco legal establecido, se incluye a continuación en este artículo un gráfico que se ha realizado para representar, de forma muy simplificada, cómo la energía una vez generada y transportada es distribuida y comercializada al consumidor final, siendo este último eslabón donde se aplica la regulación de la calidad del suministro definida en el RD 1995/2000, con los procedimientos de medida identificados en la OM ECO/797/2002, todo ello con el soporte técnico de la norma europea EN 50160:2010 de calidad de la energía suministrada por las redes de distribución en Baja, Media y Alta tensión y con el de la norma EN 50163 para la tensión en catenaria:

Figura 1. Actores en el Sector Energético y aplicación Calidad de la Energía



3. ENTORNO NORMATIVO EN ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO

La norma técnica que establece los parámetros de calidad de suministro en redes de distribución eléctrica en Europa, hasta los 150 kV, es la EN 50160 y en Norteamérica la IEEE 1159.

Esta norma europea identifica los límites o los valores de las características de tensión que todo cliente tiene derecho a esperar en relación a los valores de frecuencia, amplitud, forma de onda y simetrías de las tensiones trifásicas.

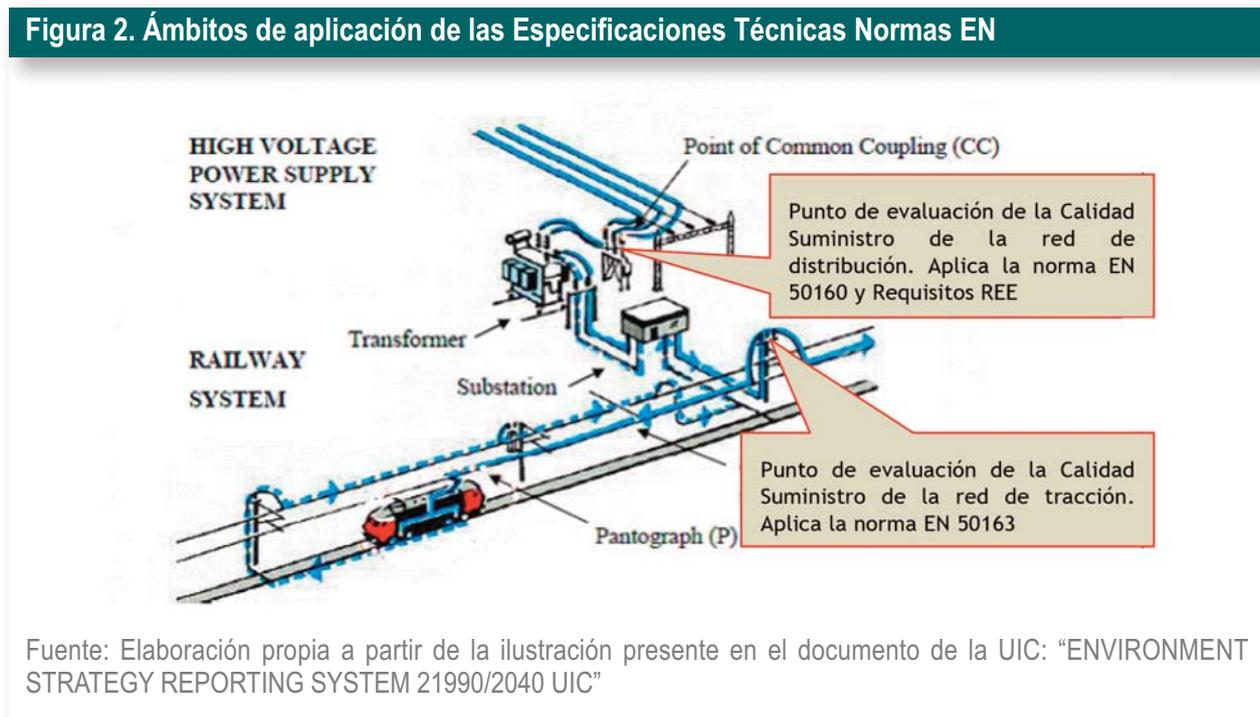
Los métodos de medida para realizar de forma homogénea y auditable los distintos parámetros de la calidad de suministro y su interpretación, están definidos en las normas IEC 61000, que analizan:

- La frecuencia
- La amplitud de la tensión de alimentación
- Las tensiones transitorias
- El desequilibrio de tensión
- Los armónicos e interarmónicos de tensión
- Las señales de transmisión por la red
- Las variaciones rápidas de tensión

Por otra parte, para el suministro en el ámbito ferroviario, se ha desarrollado la Norma Europea EN 50163, que establece las principales características que han de cumplir las tensiones de alimentación de las redes de tracción estableciendo los límites permisibles, respecto a los valores nominales, de la tensión y su frecuencia, en valor y duración.

Por último, tal y como se ha indicado anteriormente, REE mantiene publicada las condiciones que tienen que cumplir las instalaciones que conectadas a la red peninsular (Documento de Referencia TI.E/02/040, Mayo 2010) estableciendo los límites más significativos de la onda de tensión para los puntos frontera entre la red de transporte y los agentes conectados a la misma para tensiones iguales o superiores a 200 kV.

En la siguiente figura, representativa del flujo de la energía desde la generación hasta el uso por el tren, se identifican los puntos frontera de los suministros, tanto el de la red de distribución pública con la subestación, donde aplica la norma EN 50160, como el punto de salida desde la Subestación de tracción a la catenaria para la alimentación de los trenes con tracción eléctrica e instalaciones ferroviarias que están conectadas a esta red de suministro de tracción, que aplica la norma 50163:



De todo el marco de estandarización desarrollado hasta el momento quedan aún por normalizar rangos de tensión que no se encuentran en ninguna norma. En concreto entre los 150 kV, que es el límite superior de la EN 50160, y los 200 kV, que es la tensión desde la que parte REE para definir los límites de la calidad de la onda de las instalaciones conectadas a la red.

Y en cuanto a las redes de tracción eléctrica ferroviaria, la EN 50163, también requiere un desarrollo de su alcance en la definición de la calidad del suministro teniendo en cuenta a sus valores estadísticos para los parámetros de interrupción, armónicos, hueco de tensión, etc... ya que sólo define umbrales pero no valores estadísticos que son los que se requieren para valorar la calidad del suministro.

4. SIGNIFICADO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Según el RD 1995/2000, se entiende como Calidad de Servicio “el conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes de la Administración”

Respecto a esta Calidad de Servicio se definen los aspectos que se deben cumplir:

La continuidad del suministro, relativa al número y a la duración de las interrupciones. Estableciendo los límites para el tiempo máximo de interrupción del servicio (TIEPI) y número máximo de interrupciones (NIEPI) para incidencias de interrupción superiores a los 3 minutos. El Real Decreto establece los límites anuales de estas interrupciones por zonas urbanas y rurales, estableciendo las compensaciones económicas a las que tiene derecho el consumidor en el caso de no cumplir con estos umbrales de calidad del suministro.

La calidad de la forma de onda de tensión, principalmente, las variaciones del valor eficaz de la tensión y de la frecuencia y por las interrupciones de servicio y huecos de tensión de duración inferior a tres minutos. Para la determinación de los umbrales de calidad se establece por el RD que son los incluidos en la norma EN 50160.

La calidad de atención y relación con el cliente, en lo que se refiere al asesoramiento en materia de contratación, facturación, cobro, medida de consumos y demás aspectos derivados del contrato suscrito.

La OM ECO/797/2002 establece los tiempos máximos de interrupción y la norma con la cual se va a medir esta calidad que es la EN 50160. También cita que la causa de las perturbaciones puede ser del proveedor de energía, del consumidor o de terceros.

Las consecuencias de la falta de calidad del suministro pueden ser entre otras:

- Pérdidas de económicas como consecuencia del sobrecalentamiento de los equipos conectados a la red (motores, transformadores etc.) que provocan una drástica reducción de su vida útil, así como su rendimiento.
- Interrupciones del servicio prestado por fallos de suministro de energía inesperados.
- Errores y funcionamiento anómalo de los equipos conectados a la red.
- Daños en equipos electrónicos.
- Interferencias en redes de comunicación.
- Aumento de las pérdidas globales en el sistema.

- Necesidad de sobredimensionar las instalaciones para compensar los aumentos de tensión, dando lugar a un aumento de los gastos de funcionamiento además del impacto ecológico que conlleva este exceso.
- Inestabilidad en la sensación visual inducida por la fluctuación en el tiempo debida al fenómeno conocido como flicker.
- Fallos en la medición de los contadores de energía.

5. PUNTOS FRONTERA DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO EN EL SISTEMA FERROVIARIO

El sistema ferroviario no está excluido en la aplicación del RD 1995/2000 y de la OM ECO/797/2002, por tanto, es conveniente analizar cuál es el papel actual del administrador de la infraestructura ferroviaria y del operador de transporte ferroviario.

En nuestro país, ADIF y ADIF Alta Velocidad, como administradores de la infraestructura ferroviaria, tienen entre sus funciones principales la de planificar, invertir, construir y mantener una red eléctrica que le permita suministrar la energía de tracción eléctrica necesaria a los operadores de trenes, como RENFE y otros operadores privados, que circulan por la red ferroviaria, así como a los sistemas e instalaciones ferroviarias dentro de la infraestructura.

Tal y como indica en su trabajo (Francisco Manrique, 2014), ADIF Alta Velocidad, tiene encomendada la gestión de la energía, y adquiere de forma regular, por concurso público abierto, la energía de tracción a las comercializadoras de energía y abona los costes de “acceso de terceros a la red” a las empresas distribuidoras del punto de suministro, siendo éste un coste regulado. Se disponen de los convenios necesarios para que este coste de energía se repercuta entre los operadores ferroviarios con criterios de equilibrio económico, según el uso de cada operador.

Por tanto, a los efectos, ADIF Alta Velocidad, acude al mercado para adquirir la energía en su rol de “Consumidor” y por tanto le corresponden sus derechos de calidad de suministro, explícitos en el Real Decreto y Orden Ministerial vigentes al afecto.

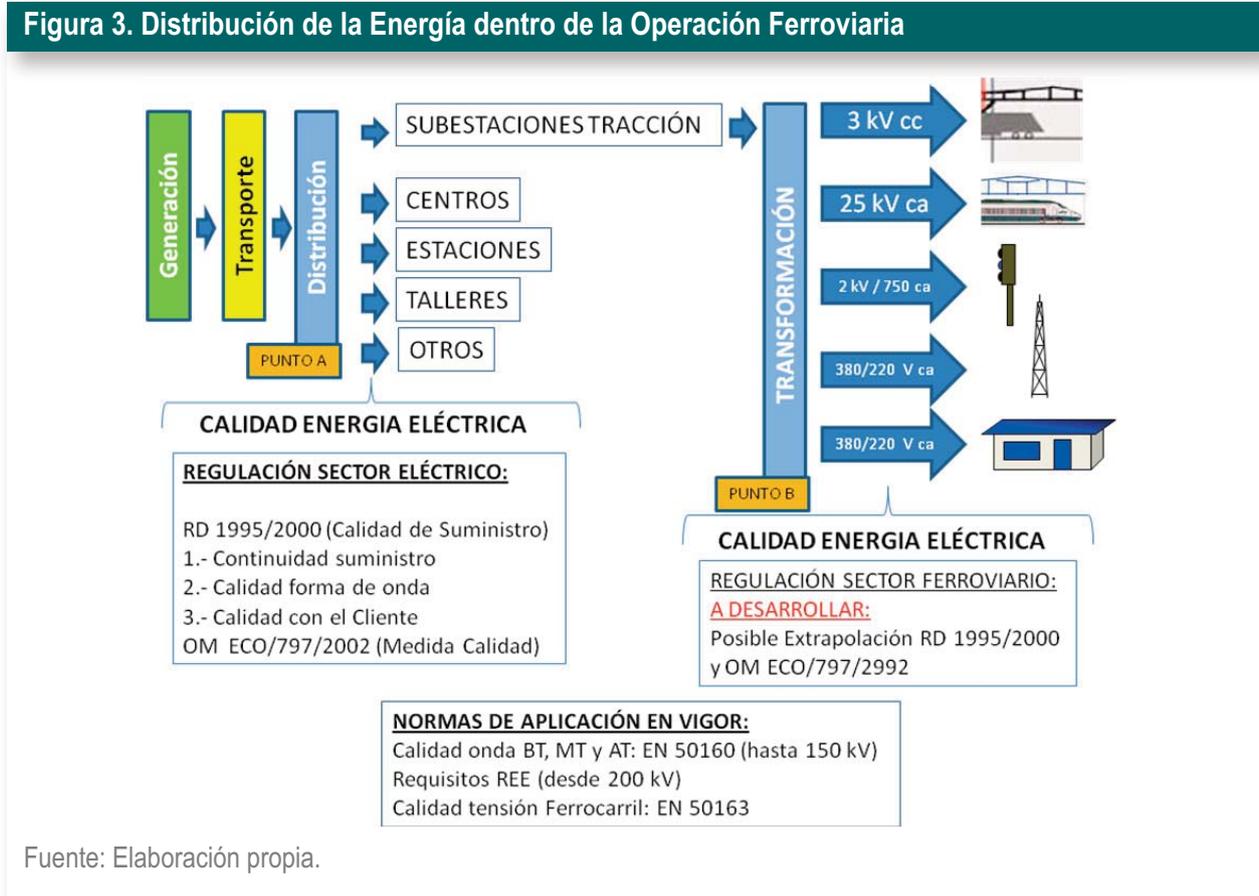
De todo ello se interpreta que el “punto frontera de suministro” sería el punto de conexión de las subestaciones de tracción con la red de transporte, los puntos de acometida eléctrica desde la red de distribución con las Estaciones Ferroviarias, etc... Por tanto, sería en este punto frontera donde sería de aplicación los derechos y obligaciones explícitas en el RD 1995/2000 y OM ECO/797/202 y la norma técnica EN 50160 para aplicar la metodología de la medida.

Para una mejor comprensión se ha realizado en este artículo un esquema que se acompaña a continuación identificado como “PUNTO A” el punto frontera indicado anteriormente.

Por otra parte, dentro de la propia infraestructura ferroviaria contamos con consumidores que pertenecen a distintas empresas y deberíamos analizar también estas fronteras. También ayudándonos del trabajo citado anteriormente (Francisco Manrique, 2014) que analiza con detalle cómo el Administrador Ferroviario puede ser considerado como un distribuidor entre los puntos de conexión eléctrica y los consumidores finales, que serían en este caso los Operadores de Trenes, podríamos asimilar a ADIF con el papel que ya reconocen las Directivas Europeas como propietario de “redes de distribución cerradas”.

En este caso, si aceptamos esta extrapolación, el punto frontera donde aplicar la regulación de la calidad de suministro de energía sería la conexión de la Subestación de Tracción con la catenaria, la

acometida de energía con las instalaciones de señalización y telecomunicaciones, los centros de transformación en los talleres y estaciones, etc.... Para este caso, dentro de la infraestructura ferroviaria, la norma técnica para la medida de la calidad de suministro sería la EN 50163 para el suministro de tracción en catenaria y la EN 50160 para el resto. En este caso se ha identificado como “PUNTO B” en la figura siguiente (al que se añade el “Punto A” citado anteriormente):

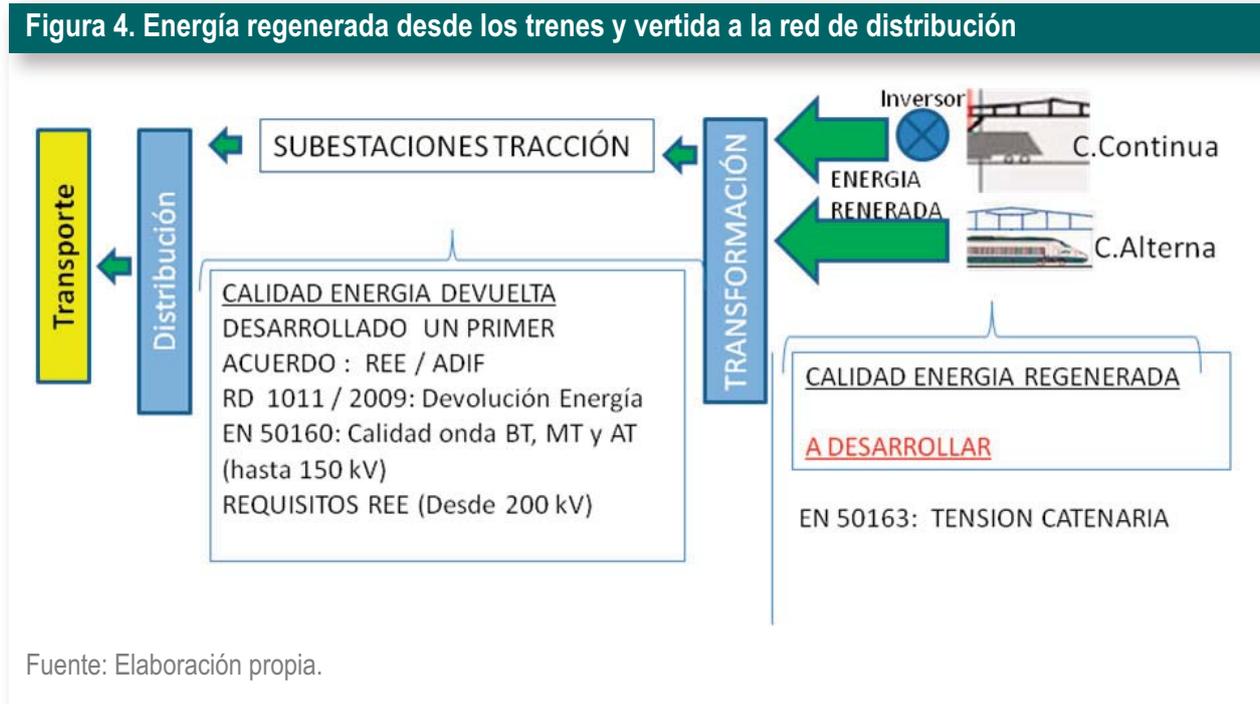


Por último, nos encontramos con el escenario de contemplar los vertidos de energía que se producen desde la red ferroviaria hacia la red de transporte, como consecuencia de la energía generada cuando los trenes dotados de freno regenerativo hacen uso del mismo.

Este derecho de vertido se encuentra regulado en el RD 1011/2009, en el que se permite a los consumidores, que implanten sistemas de ahorro y eficiencia energética, puedan verter a la red aquella energía que no pueda ser consumida en su propia instalación, detrayéndola de su consumo, añadiendo una disposición adicional al RD 1995/2000 relativa a los “Vertidos a la red de energía eléctrica para consumidores que implanten sistemas de ahorro y eficiencia”.

Tal y como se regula, para la energía vertida en la red, se tendrá que disponer un medidor de calidad de onda en el punto frontera y establecer el acuerdo correspondiente con el gestor de distribución de ese punto para realizar el “neteo” correspondiente de la energía devuelta (diferencia entre la energía consumida y la energía devuelta).

Es por ello que queda a desarrollar por tanto un interesante marco regulatorio de la calidad de la energía en el sistema ferroviario en el que habría que incluir, sin duda, la calidad de la energía que se vierte al sistema proveniente del frenado regenerativo. Todo ello se describe en la figura siguiente:



6. PERTURBACIONES DESDE EL SISTEMA FERROVIARIO QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

El sistema ferroviario puede afectar la calidad del sistema de energía externo porque produce perturbaciones que pueden afectar a la red, las cargas no lineales presentes en la explotación ferroviaria (los trenes traccionando) y las fallas dentro del propio sistema de energía ferroviario son las principales causantes de estas perturbaciones.

La devolución de la energía de frenado, desde el sistema ferroviario hacia la red de suministro, supone un importante ahorro económico para el sistema ferroviario ya que le corresponde, de forma efectiva, el “neteo” (la reducción de energía a pagar al suministrador de energía). Pero el suministrador que recibe la energía de frenado, nos puede solicitar que le garanticemos una calidad de la energía vertida a la red.

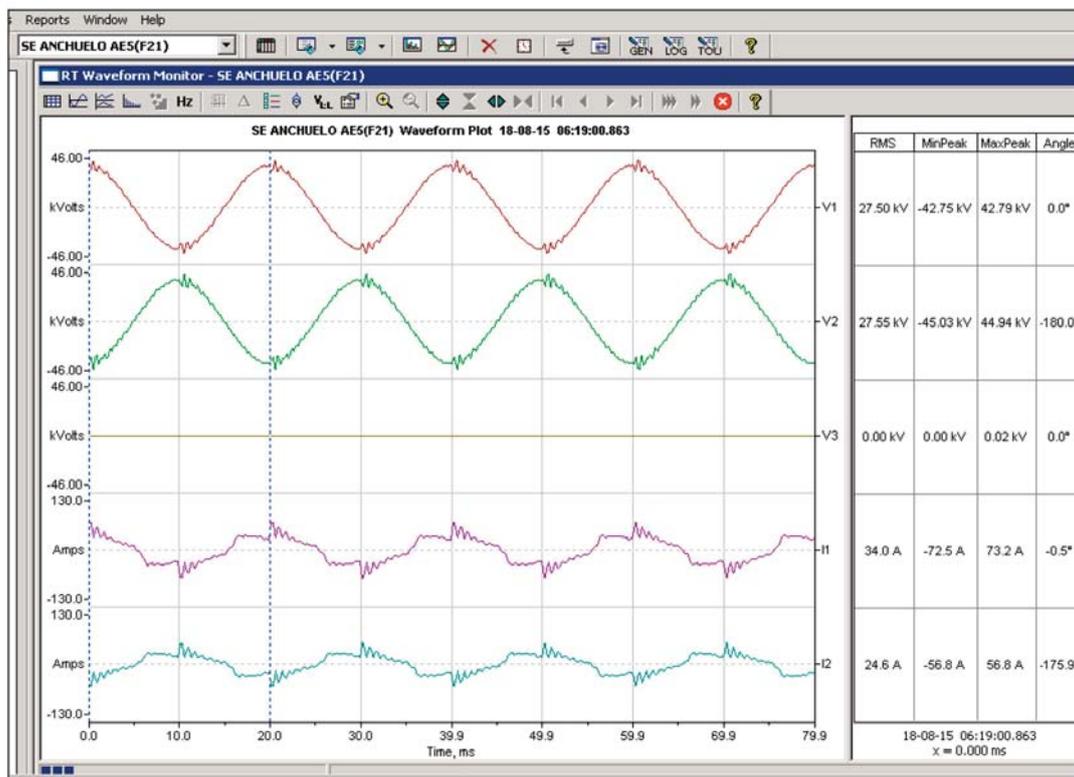
Como ejemplo de estas perturbaciones, se incluyen a continuación la forma de onda de la tensión e intensidad en catenaria medida en una campaña realizada por el Área de Ingeniería de Activos de Energía de ADIF el pasado verano del año 2015 en la subestación de Anchuelo (Guadalajara), con equipos de medida de calidad de onda, con los correspondientes transductores de medida en los transformadores de medida de intensidad y tensión de la catenaria y feeder, situados dentro de la subestación y antes de la salida al pórtico de seccionadores de alimentación a catenaria y feeder.

El primer tren que se muestra a continuación es de la serie 100, que dispone de una potencia de 8.800 kW y que tiene 8 motores trifásicos síncronos auto-pilotados, se puede ver cuando está traccionando una onda de tensión e intensidad distorsionada:

Figura 5. Medida de la calidad de onda de tensión en intensidad en catenaria circulando un tren serie 100



TREN SERIE 100 RENFE



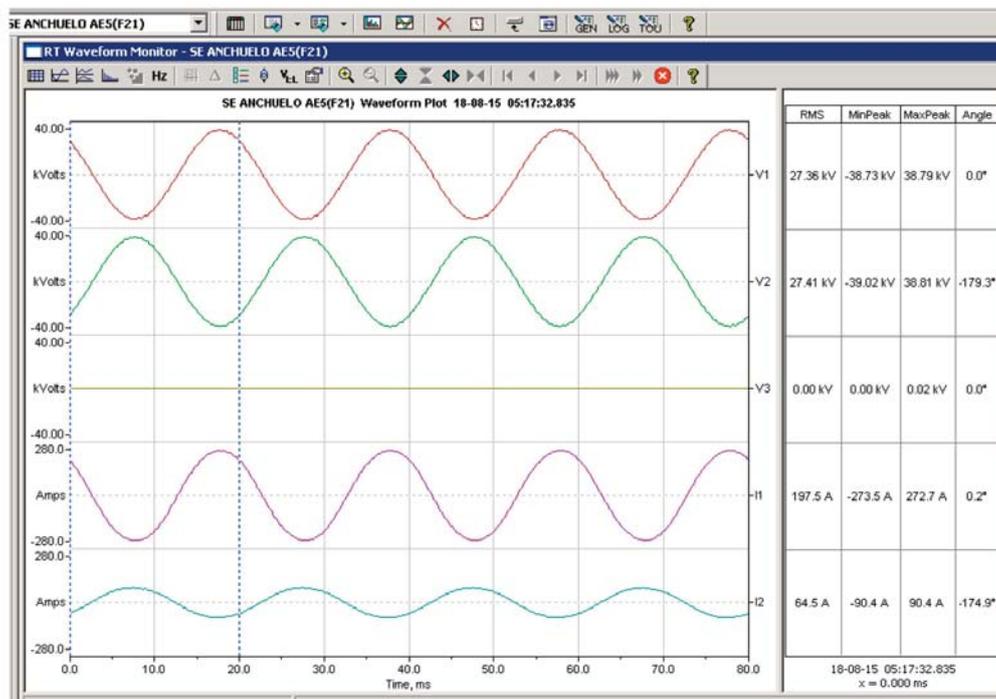
Fuente: Elaboración Propia con los datos mostrados por el software PAS Versión 1.4-SATEC del equipo de calidad de energía instalado en la SE Anchuelo, línea LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Por orden descendente las ondas corresponden a : tensión en catenaria, tensión en feeder, intensidad en catenaria, intensidad en feeder.

Y, como segundo ejemplo de calidad de onda, se muestra a continuación las formas de onda medidas en la circulación de un tren de la serie 103, también con 8.800 kW de potencia y en este caso dotado de 16 motores de tracción asíncronos. Se puede comprobar una calidad de onda de tensión e intensidad sin perturbaciones apreciables:

Figura 5. Medida de la calidad de onda de tensión en intensidad en catenaria circulando un tren serie 100



TREN SERIE 103 RENFE



Fuente: Elaboración Propia con los datos mostrados por el software PAS Versión 1.4-SATEC del equipo de calidad de energía instalado en la SE Anchuelo, línea LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Por orden descendente las ondas corresponden a : tensión en catenaria, tensión en feeder, intensidad en catenaria, intensidad en feeder.

Por tanto, será necesario supervisar la calidad de la energía vertida a la red, con analizadores de la calidad de energía instalados en los puntos frontera con la red de suministro, supervisando al menos los parámetros que se ven afectados por cargas no lineales como: la presencia de armónicos, el desequilibrio de la red y el efecto de Flickers (parpadeo). Todos estos parámetros se analizarán con más detalle en el apartado de la calidad de onda.

7. CALIDAD EN LA CONTINUIDAD DEL SUMINISTRO

Como se indicaba en el anterior apartado de “Significado de la calidad de energía” uno de los tres aspectos que se debe determinar en su exigencia es la “Continuidad del suministro eléctrico”.

Los umbrales vigentes en el Real Decreto 1995/2000, relativos a la calidad de la continuidad del suministro, se sintetizan en la siguiente tabla, en la cual se indican los límites anuales de la suma de las horas de interrupción de suministro y el número de sucesos de interrupción para Baja y Media Tensión, para interrupciones mayores a 3 minutos de duración.

El RD, aunque no lo hace para otros parámetros, sí establece, en este caso, que para tensiones de suministro mayores que 36 kV habrá que considerar los límites establecidos para zona urbana, aunque el punto esté en cualquier otra zona geográfica.

Tabla 1. Límites anuales de la calidad en la continuidad de suministro según las zonas de suministro. Fuente: RD 1995/2000

	Baja tensión (Menor o igual a 1 KV)		Media Tensión (de 1 a 36 KV)		Alta Tensión hasta 400 kV	
	Nº horas	Nº de Interrupciones	Nº horas	Nº de Interrupciones	Nº horas	Nº de Interrupciones
Zona Urbanas	6	12	4	8	4	8
Zona Semiurbanas	10	15	8	12		
Zonas Rural Concentrada	15	18	12	15		
Zonas Rural Dispersa	20	24	16	20		

Los límites establecidos, como es lógico, son más exigentes conforme afecte a puntos de suministro de energía eléctrica situados en zonas más importantes, en cuanto al número de consumidores. Es decir, es mucho más exigente en zonas urbanas que en zonas rurales y también es más exigente conforme aumenta la tensión de suministro, ya que una interrupción del suministro puede afectar a más población conforme el punto de tensión es mayor, afectando a toda la zona de distribución de este punto de suministro.

Para una mayor información al respecto, se incluye a continuación la información del número de puntos de suministros y la potencia agregada de consumo que la red española ha tenido en el año 2015, desglosado por las cuatro zonas en las que se clasifica, según el compromiso de calidad de la continuidad del suministro (información disponible en la sede electrónica, SEDE, del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda digital):

Tabla 2. Puntos de suministro en España en el año 2015 según la división de zonas para la calidad de continuidad del suministro

Tipo de Zona	Potencia Instalada (MVA)	%	Nº Suministros	%
Zona urbana: conjunto de municipios de una provincia con más de 20.000 suministros, incluyendo capitales de provincia, aunque no lleguen a la cifra anterior.	71.744	46,4%	15.030.706	52,0%
Zona semi-urbana: conjunto de municipios de una provincia con un número de suministros comprendido entre 2.000 y 20.000, excluyendo capitales de provincia.	54.134	35,0%	9.468.080	32,7%
Zona rural concentrada: conjunto de municipios de una provincia con un número de suministros comprendido entre 200 y 2.000.	16.625	10,8%	3.221.602	11,1%
Zona rural dispersa: conjunto de municipios de una provincia con menos de 200 suministros, así como los suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.	11.974	7,8%	1.203.771	4,2%
Total	154.476	100 %	28.924.159	100 %

Fuente: Ministerio de energía, turismo y agenda digital. Calidad del suministro eléctrico.

8. PROPUESTA DE LOS CRITERIOS PARA ESTABLECER LA CALIDAD DEL SERVICIO DE SUMINISTRO ELÉCTRICO EN LA RED FERROVIARIA

La información incluida en el apartado anterior se puede utilizar para hacer una propuesta de extrapolación de la calidad de la continuidad del suministro de forma específica en la red ferroviaria.

En la tabla anterior los puntos de suministro son de todo tipo; hogares, hoteles, industria, etc... clasificados por zonas según la densidad de población.

Para el caso de la red ferroviaria estos puntos de suministro serían, por simplificar, las acometidas en las subestaciones de tracción eléctrica que alimenta a los trenes eléctricos y a las instalaciones asociadas a las líneas electrificadas.

En una primera opción, para este intento de extrapolación con la red ferroviaria, se podría interpretar que el punto de suministro (subestación eléctrica) dependiendo de la localidad donde se encuentre y

del nivel de tensión de la acometida, los límites de la calidad de la continuidad de suministro se puede obtener directamente de la Tabla 1 de los límites establecidos por el RD 1995/2000, como interpretación literal del Real Decreto.

Sin embargo, con esta interpretación nos podemos encontrar una subestación en un núcleo de cercanías, donde se transportan cientos de miles de viajeros diariamente, se pueda considerar con una calidad de suministro similar a una Zona Rural Dispersa que corresponde a la calidad del suministro a municipios de menos de 200 habitantes. Por ejemplo en la red RFIG, sería el caso de la subestación de tracción de El Tejar, que se encuentra en una zona considerada Rural pero alimenta el nudo de El Pinar de las Rozas en Madrid, que da servicio a las líneas de cercanías: C8-Cercedilla-Atocha-Guadalajara, C3-El Escorial-Aranjuez y C10-Villalba-Príncipe Pío-Fuente de la Mora, con un número de viajeros aproximado que utilizan estas líneas de cercanías al día de más de 200.000. Es por ello que se considera conveniente abordar una calidad de continuidad de suministro según el tipo de línea y/o servicio ferroviario prestado.

La Ley 38/2015 del sector ferroviario clasifica la RFIG en subredes en base a características técnicas, necesidades de mantenimiento y tipo de servicio soportado y su intensidad. Los tipos de línea o subred son:

A: Uso principal de tráfico de Alta Velocidad.

B1: Viajeros inter-ciudades de Velocidad entre 160 Km/h y 220km/h, fuera de cercanías y líneas tipo A.

B2: Resto Viajeros inter-ciudades.

C1: Núcleos de cercanías con densidad de circulación ≥ 80 circulaciones/día

C2: Núcleos de cercanías con densidad de circulación < 80 circulaciones/día

D: Uso principal mercancías.

E: Resto.

Por tanto 7 tipo de subredes según su uso que podríamos correlacionar con los 4 tipos de zonas identificadas en el Real Decreto 1995/2000.

A continuación se incluye, según los datos publicados por ADIF en el CIRTRA 2015, el número de kilómetros de cada tipo de líneas, que a su vez para este análisis hemos separado en electrificadas y no electrificadas:

Tabla 3. Longitud kilométrica de las distintas subredes en la RFIG. Líneas electrificadas y no electrificadas. Fuente: CIRTRA 2015.ADIF

		Viajeros			Cercanías		Mercancías	Resto	
		$V \geq 220$	$220 > V \geq 160$	$160 > V$	≥ 80 circ/día	< 80 circ/día			
		A	B1	B2	C1	C2	D	E	
KM DE LÍNEAS ELECTRIFICADAS	Única	3.937,9	45,4	291,9	1.532,2	250,9	479,9	1.050,5	287,0
	Única/Doble	190,6	80,4	-	61,4	-	48,8	-	-
	Doble	5.589,1	2.254,1	317,6	1.363,7	837,1	478,6	336,1	2,0
		9.717,7	2.379,9	609,5	2.957,4	1.088,0	1.007,3	1.386,6	289,0
KM DE LÍNEAS NO ELECTRIFICADAS	Única	5.644,0	-	236,3	1.480,3	-	613,3	431,8	2.882,4
	Única/Doble	5,9	-	-	5,9	-	-	-	-
	Doble	17,6	-	-	-	-	15,9	1,7	-
		5.667,5	-	236,3	1.486,2	-	629,1	433,5	2.882,4

Si hacemos la equiparación de las distintas tipologías de zonas de suministro con las distintas subredes, asimilando las mismas según la densidad de población a la que sirven el transporte podría ser una opción razonable esta propuesta:

Tabla 4. Propuesta tentativa de extrapolación de la clasificación de zonas con calidad de continuidad de suministro respecto a las que podría tener el sistema ferroviario según el tipo de subredes RFIG0

Correspondencia con RD	% Puntos suministro España 2015	Redes RFIG	Tipo	Km suma subredes	% km suministro RFIG
Zona Urbanas	52,0%	Líneas de Alta Velocidad y Líneas con Tráfico de Cercanías	A + C1 + C2	4.475	46 %
Zona Semiurbanas	32,7%	Líneas de Largo Recorrido	B1 + B2	3566	37 %
Zonas Rural Concentrada	11,1%	Líneas de Mercancías	D	1.387	14 %
Zonas Rural Dispersa	4,2%	Otras Líneas	E	289	3 %

Se ha incluido en esta tabla en la primera columna, la clasificación dada en el RD 1995/2000 para los distintos umbrales de continuidad de suministro según la densidad de población. En la segunda columna, el porcentaje que ha supuesto de puntos de suministro en el año 2015 en nuestro país y en las siguientes columnas, la posible agrupación de subredes según los núcleos de población que atienden y según el tipo de servicio, sumando las distintas subredes y comprobando el porcentaje de kilómetros de red ferroviaria que tendría cada clasificación. Se puede comprobar que los conceptos son equiparables y que incluso los porcentajes, una vez obtenidos, son muy aproximados entre el número de puntos de suministro dotados de una calidad de suministro y los kilómetros de red con la correspondiente similitud en el compromiso de continuidad de suministro.

Por supuesto que este primer estudio requerirá análisis posteriores a fin de obtener decisiones colegiadas que permitan adaptar el marco legal y normativo a la especificidad del transporte ferroviario que no en vano consumo más del 1,5 % de la energía eléctrica en nuestro país y como tal debe ser regulada la calidad de energía en base al servicio que hay que ofertar al transporte de viajeros y mercancías en líneas electrificadas.

9. PARÁMETROS DE LA CALIDAD DE LA ONDA DE TENSIÓN

El segundo de los aspectos que tiene en cuenta el Real Decreto de Calidad de la energía es la “calidad de la forma de onda de tensión”.

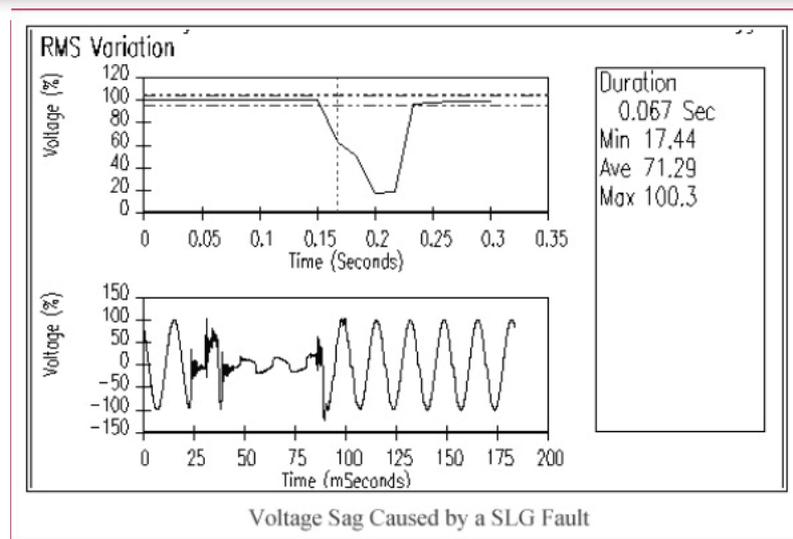
Los valores que caracterizan la tensión eficaz de alimentación suministrada son, entre otros, los siguientes: la frecuencia, la amplitud, la forma de onda y la simetría de las tensiones trifásicas. No obstante, vamos a analizar en este artículo todos los parámetros más importantes que se caracterizan en las normas actualmente vigentes de calidad de energía.

a) Huecos de Tensión

Un Huevo de Tensión es una reducción brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y hasta el 10% del valor nominal seguido de una reposición de la tensión después de un corto lapso de tiempo (por convenio entre los 10 milisegundos y 60 segundos).

La profundidad del huevo se define como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el huevo de tensión y la nominal. En el ejemplo que se ilustra a continuación (Juan Carlos Campo Avella, 2007) se puede observar un huevo de tensión de profundidad 83 y de duración de 67 ms.

Figura 7.Huevo de Tensión



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159

Los huecos son clasificados según la magnitud de la tensión residual y su duración.

Los huecos más comunes son los que duran menos de 1 segundo y tienen una reducción de la tensión residual cercana al 60 %.

Estos huecos son causados normalmente, en general, por defectos que sobrevienen de las instalaciones de los consumidores, por ejemplo, conmutaciones de carga, y también por descargas atmosféricas, cortocircuitos, contacto de animales o árboles, accidentes, arranque de grandes motores de inducción, etc.-

Los problemas que causan están relacionados con disparos en controles sensibles, aperturas de relés en subestaciones, etc... que suponen interrupciones del tráfico ferroviario que a la postre suponen pérdidas de tipo económico.

La mitigación de estos huecos se puede conseguir estabilizando la señal de tensión con acondicionadores de red, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc...

b) Interrupciones de la Tensión

Se considera este defecto cuando la tensión en los puntos de suministro se sitúa por debajo del 1 % del valor de la tensión nominal. Puede considerarse "prevista" si ha sido informada a los consumidores y

responde a un trabajo programado en la red de distribución o “accidental” cuando está provocada por una avería o un suceso exterior fugitivo. Dentro de las accidentales se pueden considerar las “interrupciones breves”, menores de 3 minutos, y las “interrupciones largas” mayores de 3 minutos.

Los límites aceptables de estas interrupciones están regulados como se ha indicado anteriormente por el RD 1995 / 2000 y por la OM ECO/797/2003 y se han analizado en el apartado 7 de este documento, “Calidad en la continuidad del suministro”, y el no cumplimiento de los límites admisibles supone el derecho del consumidor a recibir una compensación económica ya regulada.

En la infraestructura ferroviaria la solución para que este tipo de interrupciones de suministro no afecte al servicio (normalmente a la desconexión de los sistemas de señalización y telecomunicaciones) es la incorporación de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI) con bancos de batería de capacidad suficiente (según tiempo e intensidad) para alimentar el tiempo necesario medio para la reposición de la tensión, pudiéndose incluso disponer de Grupos diésel electrógenos para situaciones más largas en duración. Por supuesto que estos sistemas sólo cubren las necesidades de los sistemas críticos de señalización y telecomunicaciones sin tener en cuenta nunca la tracción ferroviaria.

Este equipamiento complementario tiene normalmente un coste alto, con un ciclo de vida bajo, que encarece notablemente la instalación, por tanto, es recomendable antes de equipar con un SAI analizar con detalle la probabilidad de la falta de calidad de energía en el punto de suministro y la severidad de las consecuencias para la explotación del servicio comercial.

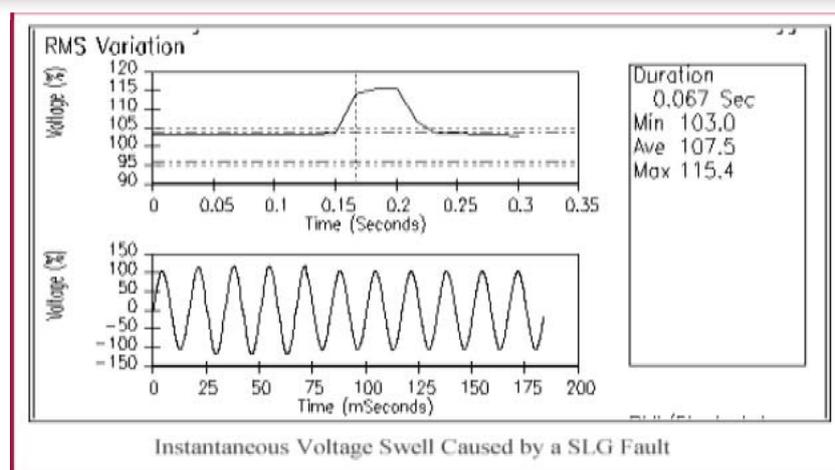
c) Sobretensiones

Las Sobretensiones son incrementos repentinos del valor eficaz de la tensión en más del 110 % de la tensión nominal.

Las sobretensiones son “temporales” cuando pueden durar entre 10 milisegundos y un minuto y son “transitorias” cuando duran como máximo menos de 10 milisegundos.

En el ejemplo que se muestra a continuación la sobretensión temporal ha sido del 115 % del valor nominal con una duración inferior al segundo:

Figura 8. Sobretensión temporal



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995

La causa principal de las sobretensiones suele ser por un defecto en la red general de distribución o en una instalación de un consumidor y desaparece en el momento de la eliminación del defecto. No suele ser tan común como los huecos.

Estas sobretensiones, sobre todo las transitorias, pueden venir también provocadas por condiciones atmosféricas como los rayos, pudiendo incorporar una fuerte carga de energía.

En las subestaciones de tracción se incorporan autoválvulas para proteger la instalación de estas sobretensiones que pueden provocar en su caso graves daños y la interrupción del servicio.

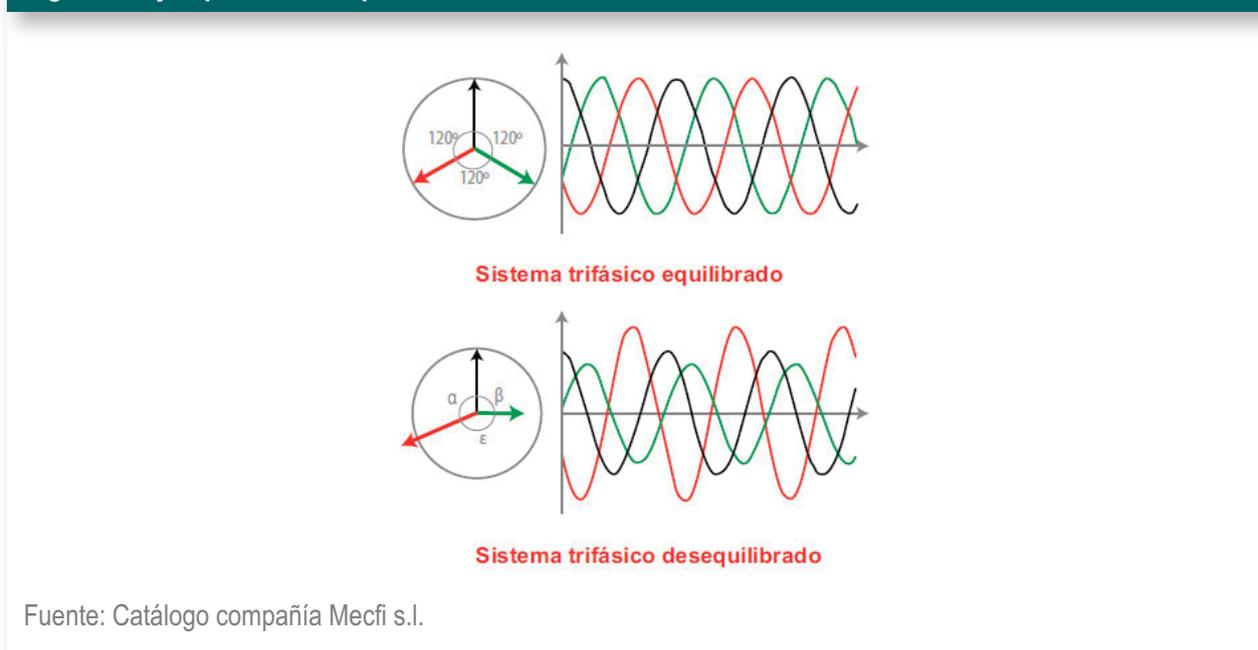
A continuación, se van a analizar con más detalle los parámetros de calidad que pueden verse más afectados por las cargas no lineales presentes en la explotación ferroviaria, sobre todo la tracción eléctrica de un tren, y que puede afectar incluso en la calidad de la onda de la energía vertida a la red de suministro: los desequilibrios, los armónicos y los flickers.

d) Desequilibrio de tensión

El sistema trifásico de tensión o corriente está perfectamente equilibrado cuando sus tres fases (0,4,8) se encuentran desfasadas 120° entre ellas y los módulos de los vectores tienen igual módulo.

El desequilibrio se produce, según la norma EN 50160, cuando el módulo de estos vectores no es el mismo, no están desfasados los 120° o ambas cosas a la vez. Los desequilibrios tienen unos umbrales que no deben sobrepasarse.

Figura 9. Ejemplo de Desequilibrio



Fuente: Catálogo compañía Mecfi s.l.

La causa principal del desequilibrio en una red trifásica es la distinta potencia de las cargas monofásicas conectadas al sistema trifásico.

En el sistema ferroviario la red de suministro es trifásica y la alimentación de tracción, en las líneas de alterna, supone una carga monofásica que se carga sobre dos fases de la red de transporte.

En la subestación de tracción ferroviaria en corriente alterna el primario del transformador de tracción se conecta a dos fases de la red de suministro, creando de esta forma en el secundario una fuente monofásica de 25 kV c.a. y 50 Hz en el sistema de 1 x 25 y de +-25 kV ca 50 kHz para el sistema de 2x25.

Esta topología puede provocar importantes desequilibrios de corrientes en el sistema, que puede suponer importantes niveles de desequilibrios de tensiones a la red de transporte.

Las consecuencias del desequilibrio es que modifica la corriente en el neutro y afecta considerablemente a motores trifásicos conectados a la red desequilibrada que puede suponer calentamiento de los mismos y por tanto reducir su ciclo de vida útil.

Los límites admisibles del desequilibrio, la medida y/o cálculo se realizará de acuerdo con la Norma IEC 61000-4-30, apartado 5.7. Se evalúa por el método de las componentes simétricas:

$$\text{Tasa de desequilibrio } V\mu(\%) = (\text{Componente Inversa de la tensión} / \text{componente directa de la tensión}) \times 100$$

También se podrá conocer el valor de los desequilibrios, mediante una estimación aproximada entre el cociente de la potencia consumida y la potencia de cortocircuito de la red de transporte.

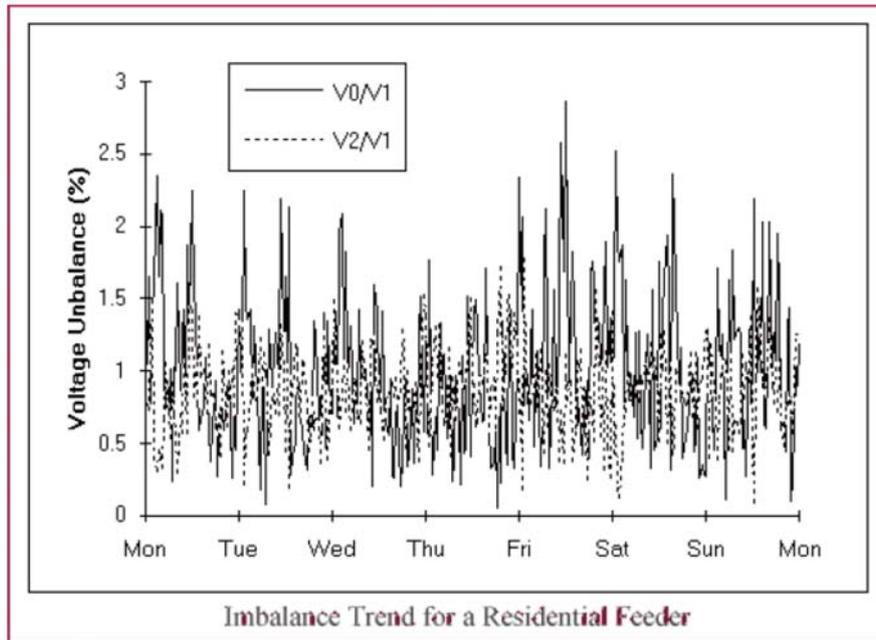
La norma EN 50160 establece para baja y media tensión los mismos límites. En el período de tiempo de 1 semana, el 95% de los valores eficaces promediados cada 10 minutos de la componente inversa de la tensión de alimentación, debe situarse entre el 0 y el 2 % de la componente directa. En ciertas regiones equipadas con líneas parcialmente monofásicas o bifásica este valor se puede aceptar que llegue al 3%.

Tabla 5. Umbrales del desequilibrio de tensión

	Niveles de tensión	Máximo valor periodo observación 95% (integración 10 minutos)	Período de Observación
NORMA EN50160:2010	1 kV / 36 kV	≤ 2 %	Semanal
	36 kV / 150 kV	≤ 2 %	Semanal
REQUISITOS CONEXIÓN REE	>= 200 kV	Corta duración (10 min) ≤ 0,7 % Muy corta duración (3 seg) ≤ 1 %	Semanal

En el ejemplo que se ilustra a continuación se puede observar cómo el “Viernes” se produce un desequilibrio que supera el 2 % entre las tensiones de dos fases (V0 y V1).

Figura 10. Medida del desequilibrio entre las distintas fases de un red trifásica



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159

e) Tensiones armónicas

La norma EN 50160 define la tensión armónica como “una tensión sinusoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación”, para el caso de España la frecuencia fundamental es de 50 Hz.

Lo que importa a nivel individual es conocer la amplitud relativa de la armónica respecto a la tensión fundamental, lo que se conoce como tasa de distorsión armónica de tensión (HD) que es el cociente entre el valor eficaz de la tensión armónica y el valor eficaz de la tensión nominal a la frecuencia fundamental.

Y a nivel global se debe medir lo que se conoce como Tasa de distorsión armónica total de Tensión (THD) que tiene el valor de la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de la distorsión de todos los armónicos hasta el orden 40, todo ello dividido por el valor eficaz de la tensión nominal a la frecuencia fundamental.

La causa principal de los armónicos: es la presencia de cargas no lineales conectadas en los distintos niveles de tensión de la red de alimentación.

Es un problema que se está agudizando en nuestros días porque ha aparecido con cierta importancia con la aparición de sistemas electrónicos en la red de consumidores y de cargas no lineales como compresores, bombas, equipos de aire acondicionado,... y en la explotación ferroviaria la tracción eléctrica donde el rectificado de la tensión alterna y su posterior modulación/conversión con convertidores de frecuencia supone la generación de una importante tasa de armónicos que a la postre supone una considerable distorsión de la onda de tensión.

Las consecuencias de la presencia de armónicos: es el aumento de la temperatura de los transformadores sumergidos en aceite. Según el estudio realizado por (Vasquez Stanescu Carmen Luisa, 2011), en el que se analizan la influencia de las tensiones armónicas en los transformadores de distribución sumergidos en aceite, se pueden observar hasta una diferencia de 8,69% entre las temperaturas del punto más caliente de un transformador con y sin tensiones armónicas.

El aumento de esta temperatura interna en un transformador tiene como consecuencias la aceleración del envejecimiento de su aislamiento, produce gases disueltos en el aceite y por tanto reduce su rigidez dieléctrica. Ello afecta a la vida útil del transformador.

Según los estudios realizados dentro del proyecto europeo SEEDT, Selecting Energy Efficient Distribution transformers, en su informe de proyecto (Frangiskop Topalis, 2008) se informa que este calor que se produce en los transformadores suponen pérdidas de energía que en el conjunto de la Unión Europea se estima en un coste de 38 TWh/año que es la energía suministrada por 5 centrales nucleares (de los cuales 5 TWh son directamente causados por las pérdidas de energía debidos a los armónicos y a las energías reactivas). En el mismo estudio en España se consideran unas pérdidas de 3 TWh/año en los transformadores de distribución por pérdidas por calor que es aproximadamente la energía que se consume en todo el sistema ferroviario en nuestro país anualmente.

Como referencia indicar que la potencia que está desplegada en los transformadores de tracción en la red ferroviaria de ADIF es superior a los 2.000 MW a los que habría que añadir los transformadores embarcados en los trenes que permitiría evaluar las pérdidas en el sistema ferroviario y que podría ser un estudio interesante para posteriores informes en esta materia.

En la norma UNE 21428-1 se establece que del 100 % de las pérdidas de un transformador el 75 % corresponden a las pérdidas fijas (que se pueden medir en vacío) y el resto el 25 % para pérdidas variables cuando está en carga.

El coste de un transformador es: Coste de capitalización total= coste inicial+ coste pérdidas fijas x pérdidas fijas (en vacío) + coste pérdidas variables x pérdidas variables (en carga).

Por tanto, se puede concluir indicando que la presencia de armónicos supone una reducción del ciclo de vida por los efectos del aumento de temperatura en su operación y consecuentemente un aumento del coste del ciclo de vida de los transformadores de tracción.

Límites admisibles de la tasa de armónicos: está estandarizada en la norma IEC 61000-4-7: 2002 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4-7 - Técnicas de medida y ensayo - Guía general sobre la medición de Armónico e Inter-Armónicos e instrumentación para Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica y equipos conectados a ellos.

El valor de los armónicos está limitado en los convenios que se han establecido y se han normalizado, para baja y media tensión, es decir hasta los 35 kV. Por una parte, se limita para el establecimiento de la calidad de la energía, por períodos de una semana, que el 95% de los valores de cada armónico no debe sobrepasar unos umbrales que están definidos en una tabla que no supera ninguno el 6% del valor de la tensión de suministro, y también se limita el valor de la tasa de armónicos TDH, que establece para un período de una semana el límite de no sobrepasar el 8% de la tensión de suministro.

La tensión interarmónica es aquella tensión sinusoidal que también está presente en la tensión de suministro, pero cuya frecuencia no es múltiplo de la frecuencia de la tensión de suministro.

La norma para la medida de Armónicos e Inter-armónicos es la IEC 61000-4-7.

Tabla 6. Umbrales de la tasa de distorsión armónica total de tensión TDH (armónico hasta r=40)

	Niveles de tensión	Límite para el 95 % tiempo de Observación (valores promedio 10 min)	Período de Observación
NORMA EN50160:2010	1 kV - 36 kV	≤ 8 %	Semanal
	36 kV – 150 kV	En estudio	
REQUISITOS CONEXIÓN REE	>= 200 kV	≤ 3 %	

Soluciones de mitigación de los armónicos: la incorporación de filtros pasivos, activos o híbridos que permitan filtrar o compensar la presencia de determinados armónicos o su módulo son otras de las soluciones que se pueden incorporar en una red eléctrica ferroviaria.

Soluciones nuevas como la fabricación de los transformadores de distribución con Tecnología de núcleo amorfo hará que la temperatura del transformador se reduzca.

f) Variaciones rápidas de tensión, parpadeo (FLICKER)

Este fenómeno se produce ante fluctuaciones en la tensión de alimentación y tiene como efecto “la impresión subjetiva de la fluctuación luminosa”, según la EN 50160, que percibe un observador cuando está presente en un sistema de iluminación. La intensidad de este parpadeo dependerá de la percepción del observador, del sistema de iluminación (principalmente tubos fluorescentes...) y de la intensidad de la fluctuación.

Es una forma de medir la incomodidad visual percibida por una persona ante los cambios reiterados del brillo de la iluminación causado por las fluctuaciones de la tensión de suministro.

El parpadeo es catalogado mediante el parámetro de Severidad de Parpadeo a Largo Plazo Plt, que es evaluado cada 2 horas.

La medida básica es el indicador Pst de Severidad del Parpadeo a Corto Plazo, evaluado cada 10 minutos por los sistemas y equipos que funcionan de acuerdo a la normativa IEC 61000-4-15. La severidad de parpadeo a largo plazo indicativa Plt es evaluada a partir de 12 valores de Pst consecutivos. Con el propósito de hacer pruebas o testear equipos o instalaciones, el período Pst puede ser temporalmente cambiado en las reglas en el rango de 1 a 10 minutos.

Los valores del Pst no son clasificados ni tenidos en cuenta durante intervalos en los que la magnitud de tensión de suministro exceda un límite de tolerancia de $\pm 15\%$ del valor nominal, o que se vean afectados por Huecos de Tensión con una profundidad de más del 15 % del valor nominal.

Las causas de los parpadeos o flickers: es otra vez la existencia de cambios bruscos en las cargas conectadas en la red que no son lineales. En nuestro caso la cadena de tracción de un tren por ejemplo o la puesta en funcionamiento de un compresor, aire acondicionado....

Límites admisibles de los parpadeos o flickers:

La técnica de medición de los flickers está estandarizada en la norma **IEC 61000-4-15: 2003 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4 - Técnicas de medida y ensayo - Sección 15: Flickermeter - Especificaciones funcionales y de diseño.**

La severidad de la molestia es lo que se mide como umbrales y se utiliza con el método de medida UIE-CEI del parpadeo. Para ello se mide el valor instantáneo de la tensión y a partir de ahí se obtiene el valor del parpadeo.

Tal y como indica el estudio de (Diego M Ferryra, 2013), los equipos de medida de la calidad de energía que incorporan el flicker entre sus medidas suelen utilizar el método que describe la norma CEI 868 que incorpora distintos bloques que permiten adaptar la señal de entrada, demodularla, filtros de simulación de ojo, simulación de cerebro y finalmente un módulo de análisis estadístico. Por su parte la norma CEI 555-3 establece los límites de estas fluctuaciones.

Para baja y media tensión la norma EN 50160 establece el límite aceptable de calidad de energía para un período de una semana, para el 95 % del tiempo (percentil 95%), el nivel de severidad de larga duración Plt debe ser igual o menor que 1. Para el nivel de corta duración Pst no establece limitaciones.

Tabla 7. Umbrales de severidad del flicker

	Niveles de tensión	Límite para el 95 % tiempo de Observación (valores promedio 10 min)	Período de Observación
NORMA EN50160:2010	1 kV – 36 kV	Pst (sin límites), Plt ≤ 1 %	Semanal
	36 kV – 150 kV	Pst (sin límites), Plt ≤ 1 %	Semanal
REQUISITOS CONEXIÓN REE	>= 220 kV	Pst ≤ 0,8 % Plt ≤ 0,6 %	Semanal

10. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGIA

El marco legal en el Real Decreto 1995/2000 establece en su artículo 104 que el consumidor tendrá derecho a instalar a su cargo un sistema de registro de medida de incidencias de calidad de servicio, debidamente precintado, al objeto de confrontar los valores aportados por las empresas distribuidoras. La instalación y precintado de este sistema deberá contar con el previo acuerdo de ambas partes, adoptado por escrito.

Hay disponibles en el mercado una amplia gama de equipos (DEI, dispositivos electrónicos inteligentes) que miden la calidad de suministro de energía eléctrica también denominados “Analizadores de Calidad de Energía”.

Tienen una alta capacidad de cálculo y almacenamiento de datos que permiten medir la tensión, intensidad, frecuencia y desfase entre ambas magnitudes a la vez que les permite calcular al menos estos parámetros de calidad de la energía:

- Variaciones de Frecuencia
- Cambios rápidos de Tensión
- Flicker (Parpadeo)
- Huecos de Tensión
- Interrupciones de Tensión
- Sobretensiones Temporales
- Sobretensiones Transitorias
- Desequilibrios de Tensión
- Tensiones Armónicas
- Tensiones Interarmónicas
- Señales de transmisión en la Red

Utilizan los estándares IEC 61000 para medir y proporcionar los parámetros de calidad e incorporan grandes capacidades de interconexión a redes de comunicaciones.

Una gran cantidad de fabricantes están ofreciendo este tipo de equipamiento y se encuentran a un precio de adquisición muy asequible para el servicio que ofrecen.

11. CONCLUSIONES

La energía eléctrica es vital para la sociedad actual, para su desarrollo económico y para garantizar el bienestar.

Sin embargo, la proliferación de nuevos equipos electrónicos está afectando a la calidad de la energía ocasionando una distorsión en su forma de onda que provoca efectos como el calentamiento de los equipos y transformadores de distribución a la vez que suponen interrupciones del suministro con afección a la producción.

La Administración, siendo consciente de la importancia de la calidad del suministro eléctrico ha intervenido incorporando una regulación a los parámetros más significativos de la calidad de la energía suponiendo para las compañías eléctricas importantes compensaciones económicas a los consumidores de no cumplir con los umbrales regulados.

Sin embargo, en el sector ferroviario, que utiliza en una proporción superior al 80 % la energía eléctrica en la tracción de los trenes, y que consume aproximadamente el 1,5 % de la energía eléctrica de nuestro país, no se dispone aún de un marco legal específico que aborde y defina los umbrales de los niveles de calidad de la energía que han de suministrarse al tren eléctrico ni tampoco en los puntos de suministro de alta tensión en las subestaciones de Alta Velocidad, sin embargo se están desarrollando acuerdos entre las partes que es una primera aproximación a la regulación que se pueda producir.

En el artículo se ha realizado una aproximación tentativa a lo que podría ser parámetros extrapolables respecto a los actualmente vigentes en baja y media tensión que han sido regulados por un Real Decreto y una Orden Ministerial en los últimos años en nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Diego M Ferryra, A. D. (2013). *Calidad de Energía: Medición de parpadeo (flicker) en una instalación urbana*.
- [2] Francisco Manrique, M. A. (2014). *ADIF Energía*.
- [3] Joaquin Melendez, S. H. (Marzo 2005, nº 360). Calidad de Onda en el servicio eléctrico. *Automática e Instrumentación*.
- [4] Juan Carlos Campo Avella, E. L. (2007). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Colombia: Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente.
- [5] Vasquez Stanescu Carmen Luisa, N. E. (2011). *Influencia de las tensiones armónicas en el comportamiento térmico de los transformadores de distribución sumergidos en aceite*.
- [6] Impacto de los sistemas ferroviarios sobre las redes eléctricas de potencia: desequilibrio. 2006. Aller JM, Alves R, Bueno A, Cova M, Pesse G, Ravelo O, Rivas R, Toledo M, Puerto de la Cruz. VIII Congreso Instalaciones Eléctricas
- [7] Calidad de Energía: Medición de parpadeo (flicker) en una instalación urbana 2013
- [8] Calidad de Onda en el servicio eléctrico. Marzo 2005, nº 360. *Automática e Instrumentación*
- [9] Influencia de las tensiones armónicas en el comportamiento térmico de los transformadores de distribución sumergidos en aceite.
- [10] Strategic for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers. Project report 2008
- [11] REE 2010 Instalaciones conectadas a la red de transporte peninsular: requisitos mínimos de diseño y equipamiento. Referencia: TI.E/02/040
- [12] Procedimiento de Operación del sistema P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema. BOE núm 197, 18/08/1998.
- [13] EN 50160:2010 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
- [14] IEEE 1159: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [15] IEC 61000-4-7: 2002 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4-7 - Técnicas de medida y ensayo - Guía general sobre la medición de Armónicos e Inter-Armónicos e instrumentación para Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica y equipos conectados a ellos.
- [16] IEC 61000-4-15: 2003 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4 - Técnicas de medida y ensayo - Sección 15: Flickermeter - Especificaciones funcionales y de diseño.
- [17] IEC 61000-4-30: 2003 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4-30 - Técnicas de medida y ensayo - Métodos para la medición de la Calidad de la Energía.