

Calidad de la Energía Eléctrica: Camino a la Normalización

Gerardo Manuel Robledo Leal

Comisión Federal de Electricidad

Av. Eugenio Garza Sada Esq. Av. Lázaro Cárdenas S/N, Col. Mederos, 64780, Nuevo León, México.

gerardo.robledo@cfe.gob.mx

RESUMEN

El creciente interés del estudio de la calidad de la energía o de la también llamada compatibilidad electromagnética en el suministro de la energía eléctrica se ve reflejado en las exigencias de los clientes y en la problemática operativa de la redes eléctricas, sin embargo, ante esta realidad es conveniente situar los siguientes cuestionamientos, ¿Cómo evaluar el producto entregable?, ¿Cómo medirlo?, ¿Cómo determinar la incertidumbre apropiada al proceso de medición? ¿Se esta en condiciones de dar trazabilidad a la medición? Las respuestas planteadas no son absolutas y determinantes, antes más bien es el inicio de un proyecto de investigación continua.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la competitividad de un mundo globalizado exige cada vez mejores productos, ante esta realidad el sector eléctrico no es ajeno.

La industria ve a la energía eléctrica como uno de sus insumos vitales e importantes para su proceso productivo. Como tal, este insumo debe de estar sujeto a requerimientos de control de calidad, confiabilidad en el suministro, etc. A estos requerimientos los estaremos llamando "CALIDAD DE LA ENERGÍA"

En los Comités Regionales de Confiabilidad y Suministro Noreste y Central en los últimos años se ha observado la problemática de grandes afectaciones de tiro de carga ante la variación de la tensión por alguna falla en la red eléctrica aun y cuando la liberación sea oportuna en tiempo y forma. Lo cual, evidentemente disminuye la confiabilidad del suministro.

Uno de los principales factores para entender las afectaciones de tiro de carga, es consecuencia de que en la actualidad una gran cantidad de equipos son altamente sensibles a las variaciones de la tensión eléctrica. Los equipos de control de procesos basados en microprocesadores y los sistemas electrónicos de potencia son más sensibles que sus antecesores de hace 10 o 20 años.

Sin embargo, el problema no es solo la afectación en la variación de la tensión. Resulta interesante mencionar que los sistemas basados en electrónica de potencia no solo son sensibles a las variaciones de la tensión, sino que también causan perturbaciones que afectan a la red eléctrica

asociada al suministro. El problema se agrava en el creciente énfasis en el uso de sistemas de mayor eficiencia basados en equipos alimentados o accionados mediante convertidores estáticos de potencia.

Las perturbaciones y problemas a la que se enfrenta la Comisión Federal de electricidad, CFE, derivado de estas características de los centros de consumo, son:

- Sobrecalentamiento de cables, conductores, transformadores.
- Incremento de las pérdidas reactivas de los transformadores.
- Errores en la medición.
- Operación incorrecta de sistemas de protección
- Daño en elementos primarios de la red.

2. SITUACION ACTUAL

La CFE, empresa que se dedica a generar, transmitir, distribuir y comercializa la energía eléctrica, tiene 25,8 millones de clientes.

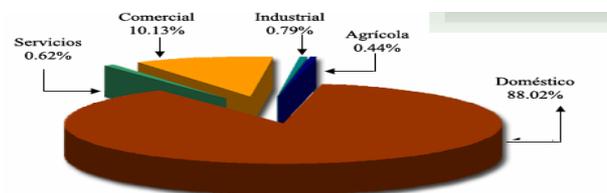


Fig. 1. Distribución de clientes por sector.

El volumen predominante de clientes con un 88,02% se ubica en el sector domestico, tal como se ilustra en la Fig. 1.

Los estándares actuales de calidad de la CFE están centrados básicamente en un par de aspectos, la calidad en el servicio y la calidad del suministro, evaluando a través de indicadores el desempeño de la empresa. En la Tabla 1 se muestra los indicadores y los valores históricos, desde el año 1999 al primer trimestre del año 2008.

Tabla 1. Indicadores y los valores históricos de calidad de CFE.

Calidad en el servicio										
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008*
Plazo de conexión a nuevos usuarios (días)	1.3	1.3	1.2	1.18	1.12	1.1	1.05	1.33	1.02	0.91
Cumplimiento de los compromisos de servicio (%)	96.9	96.2	96.8	95.39	95.93	96.11	95.59	92.01	94.35	91.70 ¹
Inconformidades por mil usuarios-mes	5.2	4.92	4.53	4.23	4.09	3.75	3.93	4.98	5.44	3.45 ¹

Calidad del suministro de energía eléctrica										
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008*
Tiempo de interrupción por usuario (min.) sin afectación	134	129	128	124	121	89	77	79	84	29
Población con acceso al servicio de energía eléctrica (%)	94.5	94.7	94.7	95	95	96.0	96.5	97.00	97.33	97.33 ²

El alcance del suministro y servicio de la CFE es a gran parte del país, exceptuando al Distrito Federal y algunas poblaciones cercanas.

Con respecto al volumen total de ventas, se tiene que el 76,2 % es venta directa al público, 23,1 % se suministra a Luz y Fuerza del Centro y 0,7 % es venta de exportación.

Aun y cuando el sector domestico es el 88,02 % de los clientes, este representa el 23,6 % de ventas directas. En cuanto al sector industrial que representa un 0,79 % de los clientes el volumen de ventas es del 60,59 %. Esto se ilustra en la Fig. 2.

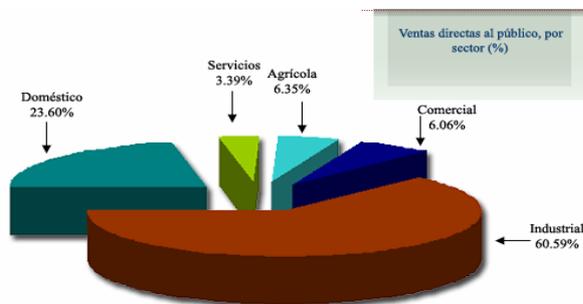


Fig. 2. Volumen de ventas directas por sector.

Los clientes y volumen de ventas por entidad federativa se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Clientes y volumen de ventas por entidad federativa.

Estados	Usuarios	Ventas MWh
Aguascalientes	362,400	541,723
Baja California	1,016,919	1,979,044
Baja California Sur	209,610	350,457
Campeche	227,082	227,009
Coahuila	830,007	2,122,665
Colima	231,677	362,052
Chiapas	1,146,785	580,379
Chihuahua	1,103,041	1,963,018
Durango	443,614	649,575
Guanajuato	1,538,324	2,229,242
Guerrero	869,238	671,753
Hidalgo	228,371	129,643
Jalisco	2,236,989	2,680,005
México	376,549	620,480
Michoacán	1,409,304	2,020,378
Morelos	422,305	430,192
Nayarit	353,610	256,728
Nuevo León	1,397,864	3,466,341
Oaxaca	1,043,285	558,315
Puebla	1,495,185	1,768,047
Querétaro	500,172	916,503
Quintana Roo	399,936	801,254
San Luis Potosí	747,103	1,676,519
Sinaloa	862,147	879,394
Sonora	872,879	1,436,646
Tabasco	586,457	623,471
Tamaulipas	1,112,961	1,706,804
Tlaxcala	331,977	455,983
Veracruz	2,181,108	2,333,037
Yucatán	596,267	657,457
Zacatecas	485,399	409,582
Sector	25,618,565	35,503,696

3. PERSPECTIVAS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

La calidad de la energía puede ser vista bajo diferentes perspectivas.

- La del consumidor viendo la afectación de las variaciones de la tensión eléctrica en sus equipos.
- La del fabricante de equipos determinando una tolerancia en sus equipos para evitar daños permanentes.

- La del suministrador viendo las características de las corrientes consumidas por sus clientes y las posibles afectaciones a la red derivado de la "calidad del consumo".

Con la perspectiva de competencia y mejora continua es necesario entender los requerimientos de los clientes y en conjunto tener las mismas perspectivas en torno a la calidad de suministro eléctrico.

Por mencionar algún ejemplo claro de estos cambios de enfoque y en busca de unificar las perspectivas, en la Unión Europea por medio del documento *Directive 85/374/ECC* cataloga a la electricidad como un producto y sus productores suministradores quedan sujetos a las responsabilidades asociadas a los daños ocasionados por un producto defectuoso. Esto trae consigo determinar las características del producto, las cuales obviamente deben de ser medidas, predichas, garantizadas y mejoradas. Este es un motivo sólido para hacer necesaria una reglamentación que regule las características de dicho producto, la forma en que el mismo debe de ser adquirido por el consumidor y las responsabilidades de cada una de las partes.

4. NORMALIZACIÓN

La calidad de la energía participa de manera sustantiva en la modernización del sector eléctrico y de la industria, por lo que el definir los estándares y características del producto es indispensable. Así mismo, es relevante e indispensable que el cliente del servicio eléctrico, entienda las características del producto y su compromiso al adquirirlo; de tal forma que sean concientes y tengan el aliciente de usar la información para proteger adecuadamente sus equipos y minimizar el impacto de los distintos fenómenos que se presentan en la red eléctrica.

Citando un ejemplo de una problemática, derivado de un fenómeno que tiene afectación tanto en el suministrador como en el cliente, es el fenómeno aleatorio de la variación momentánea de la tensión eléctrica, comúnmente conocido como *sag*. Estos suelen ocurrir por fallas en la red, en los circuitos aéreos de distribución, subtransmisión y transmisión. Se ha observado afectaciones de carga del orden 749 MW, derivado de una variación en la tensión en una sola fase, en valores no mayores al 50 % del valor nominal y de una duración no mayor de 75 ms. Esto significa que la liberación de la falla se logra dentro de una operación normal de los

esquemas de protección eléctrica, no obstante hay una afectación no directa y puede ser por la sensibilidad o mala protección de los equipos de procesos.

Para lograr los objetivos mencionados anteriormente, la CFE por conducto de la Gerencia de Normalización ha conformado un grupo de trabajo con la intervención y representación de los procesos operativos; Generación, Transmisión, Distribución, el Centro Nacional de Control de Energía, CENACE; así como de la participación del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Materiales, LAPEM, y la Unidad de Ingeniería Avanzada, UIE.

La Tarea de este grupo de trabajo (Grupo PQ) es el de desarrollar un documento normativo en el cual describa los estándares y las características del producto entregado al cliente; así como las recomendaciones y obligaciones de los centros de consumo para que no se contaminen a sí mismo o la red eléctrica derivado de las características de sus equipos de consumo.

Para definir el producto y sus características el grupo de trabajo se ha dedicado a elaborar la descripción de las características de la tensión eléctrica entregada al consumidor.

Clasificando las características, podemos dirigir nuestra atención en tres áreas específicas para un mejor entendimiento del desarrollo de documento normativo de la calidad de la energía:

ESTABILIDAD DE LA TENSIÓN.

En esta área se puede referir a todos los eventos que ocasionan sobretensiones, bajatensiones, *sag*, *swells*, fluctuaciones de tensión, desviación de la frecuencia fundamental.

CONTINUIDAD EN EL SERVICIO

Son todos aquellos eventos que provocan interrupciones momentáneas, interrupciones temporales e interrupciones sostenidas.

DISTORSION DE LA FORMA DE ONDA

En esta área queda ubicados los eventos que provocan distorsión en la forma de onda tales como: transitorios, distorsión armónica, *notches*, ruido.

La clasificación de las características resulta un buen método de busca para ubicar los estándares y guías internacionales que pretenden precisar las técnicas recomendables para su medición, cuantificación y algunas otras para solucionar los

efectos de los fenómenos electromagnéticos. Auxiliando de esta forma la tarea encomendada al grupo.

5. PLAN DE TRABAJO

Para el desarrollo del documento normativo se ha estructurado el siguiente plan de trabajo, con su respectivo objetivo:

1. Describir los términos, definiciones y vocabulario de los fenómenos asociados a la calidad de energía.

Objetivo:

Desarrollar la descripción de los términos, vocabulario, así como las definiciones de los fenómenos inherentes a la calidad de la energía.

2. Describir problemas actuales en la red eléctrica que han impactado en la calidad de la energía.

Objetivo:

Desarrollar los antecedentes del tema y el impacto de los problemas en la red de potencia que inciden en los procesos de consumo productivo.

3. Estructurar los estándares de calidad de la energía en indicadores.

Objetivo:

Elaborar y homologar los indicadores de calidad de energía de los procesos operativos de CFE.

4. Indicar los requisitos de los equipos de medición.

Objetivo:

Investigar y conformar los requisitos que deben de cumplir los medidores a ser utilizados en medición de calidad de la energía.

5. Analizar causa-efecto de los parámetros de calidad de la energía.

Objetivo:

Desarrollar la clasificación de las causas-efectos de los parámetros de la calidad de la energía.

6. Elaboración de recomendaciones para lograr compatibilidad electromagnética entre el suministrador-cliente.

Objetivo:

Desarrollar las recomendaciones técnico-operativas. Describir las características de compatibilidad entre suministrador-cliente.

Describir requisitos que deben cumplir los clientes.

7. Indicar las características de sistemas informáticos para la adquisición, administración de la información.

Objetivo:

Evaluar tecnologías de información.

8. Investigar y describir la metodología para tener trazabilidad de la medición hacia patrones nacionales de referencia.

Objetivo:

Desarrollar los procedimientos de calibración de los medidores de calidad de la energía.

Conformar la cadena de trazabilidad a patrones nacionales de referencia.

El presente trabajo describirá lo concerniente al desarrollo de los temas: Requisitos de los equipos de medición y a la trazabilidad de la medición.

6. REQUISITOS DE LOS EQUIPOS DE MEDICION

Actualmente los requerimientos de los equipos de medición instalados en los puntos de la red eléctrica con el propósito de intercambio y/o entrega de energía eléctrica están especificados exclusivamente en parámetros de demanda eléctrica (kW), energía activa (kWh), energía reactiva (kvarh), así como de valores instantáneos tales como: tensión eléctrica (V), (A), factor de potencia, etc.

Para definir los requerimientos de los equipos de medición de parámetros de calidad de la energía, es necesario evaluar las propiedades del producto, es decir de la tensión eléctrica.

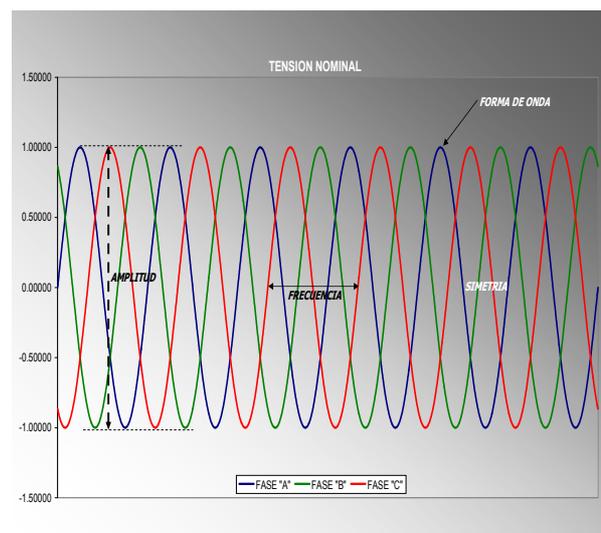


Fig. 3. Sistema trifásico de tensión eléctrica.

Se puede describir los valores que caracterizan a la tensión, a través de su:

- Frecuencia.
- Amplitud.
- Forma de onda.
- Simetría.

Lo siguiente es definir los parámetros que deben de vigilarse en los puntos de intercambio de energía, en ese sentido la experiencia internacional, específicamente en la unión europea han desarrollado el documento UN-EN-50160 "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución". En este se proporcionan las recomendaciones de los parámetros que deben de medirse como un compromiso del suministrador con el cliente.

La propuesta del documento se concentra en los siguientes parámetros:

- Frecuencia.
- Amplitud de la tensión.
- Variaciones de la tensión.
- Variaciones rápidas de la tensión.
- Sag, dips, huecos de tensión.
- Interrupciones breves de la tensión.
- Interrupciones largas de la tensión.
- Sobretensiones temporales.
- Sobretensiones transitorias.
- Desequilibrio de la tensión.
- Tensiones armónicas.
- Tensiones interarmónicas.
- Transmisión de señales de información por red.

La existencia de tal documento nos da una buena idea de que parámetros serían necesarios medir y dar pauta a los requerimientos de los equipos de medición, sin embargo, es necesario considerar que la referencia fue desarrollada para sistemas eléctricos y prestación de servicios que no necesariamente son coincidentes con nuestro sistema eléctrico nacional. Una clara evidencia de ello, es el último parámetro de la lista.

El servicio de transmisión de señales de información no es proporcionado en nuestro ámbito.

Si bien es cierto que la EN50160 nos da la idea de que parámetros medir no es suficiente con eso, nos hace falta describir la metodología de medición.

La Norma IEC-61000-4-30 *Testing and measurement techniques- Power quality measurement methods*. Así como el proyecto de

norma PROY-NMX-J-550/4-30-ANCE-2007, tienen el objetivo de describir la metodología de la medición y la interpretación de resultados para los parámetros enlistados en la referencia EN50160.

Se sugieren en la norma IEC-61000-4-30 dos tipos de clases de desempeño de la medición:

Tipo A: Recomendado a usarse en aplicaciones de medición con fines contractuales, evaluación de la conformidad con normas. Aplicaciones en donde se requiera un mínimo de incertidumbre.

Tipo B: Recomendación elaborada para aplicaciones donde no se requiere una baja incertidumbre, tales como mediciones para fines estadísticos, análisis de problemas de operación por mencionar algunos ejemplos.

La tarea a realizar en esta etapa del programa de trabajo es conformar los requisitos de los equipos de medición, para ello serán consideradas las recomendaciones de las normas EN50160 y la aplicación de la metodología de la medición de la IEC 61000-4-30. Adicionalmente será necesario validar los parámetros a evaluar en nuestro sistema eléctrico, de acuerdo a los problemas reportados y a la incidencia de estos.

La Fig. 4 muestra una primera aproximación de los problemas encontrados en la red y su incidencia:

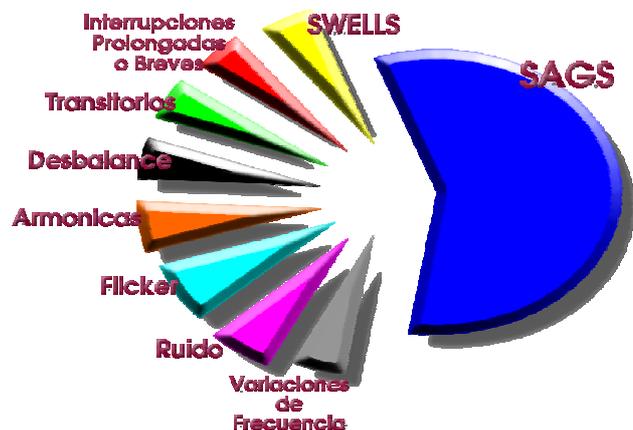


Fig. 4. Distribución de incidencias de parámetros de la calidad de la energía.

7. TRAZABILIDAD DE LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Es intuitivo el objetivo de esta etapa del plan de trabajo, es decir el obtener la referencia de la medición hacia un valor verdadero convencional.

El desarrollo de los procedimientos para la calibración de los dispositivos de medición estará de la mano de los requerimientos de la incertidumbre que puede tolerar el proceso involucrado, esto es un reto adicional en esta fase del plan de trabajo.

Como se mencionó en párrafos anteriores la norma IEC-61000-4-30 proporciona los niveles de incertidumbre para la medición con una clase de desempeño tipo A y en la que los equipos con estas características puede ser utilizados en los intercambios y/o de entrega de de energía eléctrica. La referencia de incertidumbre proporcionada por la norma sería la base para expresar la tolerancia del proceso.

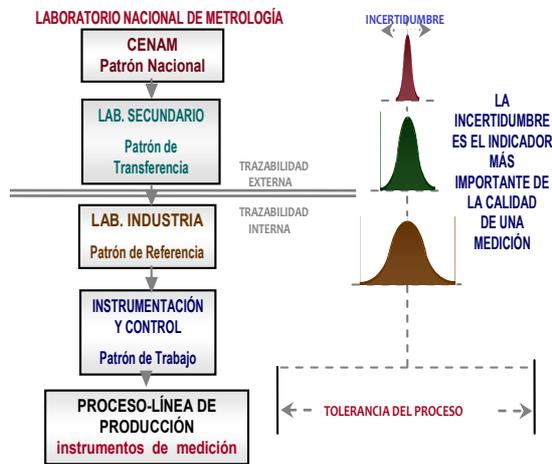


Fig. 5. Ejemplo de una cadena de trazabilidad.

En la Fig. 5 se presenta lo que es la cadena de trazabilidad de cualquier proceso y en el que se aprecia la exigencia de una mejor calidad expresado en el indicador de la incertidumbre.

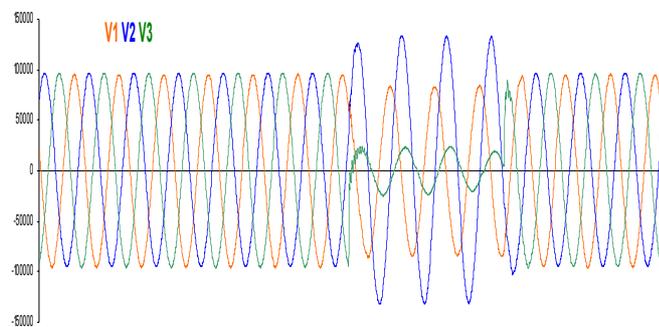


Fig. 6. Sag y swell por falla en la red.

Evaluando y proyectando una posible cadena de trazabilidad, tomaremos como ejemplo el parámetro de mayor incidencia, el sag o dip, Fig. 6. Con el propósito de simplicidad en adelante al referirnos al fenómeno lo llamaremos simplemente sag.

De acuerdo a la IEC-61000-4-30 un sag debe de ser medido con el método U_{RMS} de medio ciclo.

La detección del sag se realiza cuando se cruce el valor de un umbral programado y que puede estar dado con un porcentaje del valor de la tensión nominal (U_{din}) o bien con un porcentaje del cálculo del deslizamiento de la tensión. Para realizar el cálculo se debe de usar un filtro de primer orden con una constante de tiempo de 1 min y es expresado matemáticamente de la siguiente manera:

$$U_{SR(n)} = 0,9967 \times U_{SR(n-1)} + 0,0033 \times U_{(12)RMS} \tag{1}$$

donde $U_{SR(n)}$ es el valor presente de la Tensión de deslizamiento, $U_{SR(n-1)}$ es el valor previo de la tensión de deslizamiento, y $U_{(12)RMS}$ es el valor RMS de 12 ciclos de la tensión.

El equipo debe de declarar que tensión de referencia será utilizada.

La evaluación del sag es caracterizada por un par de datos conocidos como la tensión residual (U_{res}) que es la tensión de abatimiento o hundimiento y con la duración de tal abatimiento.

La incertidumbre de la medición de sag esta sugerida para ese par de datos mencionados y de acuerdo a la clasificación de desempeño de la medición.

7.1. Abatimiento de la Tensión

Para la Clase A, el ΔU no debe de exceder +/- 0,2 % de U_{din} .

Para la clase B, el fabricante del equipo debe de especificar el valor de la incertidumbre, el cual ΔU no deberá de exceder de +/- 1,0 % de U_{din} .

7.2. Duración

Para Clase A y Clase B, la incertidumbre es igual a la incertidumbre de inicio del evento (medio ciclo) más la incertidumbre final (medio ciclo).

Una buena plataforma para proporcionar la tolerancia de la medición, son los valores sugeridos por la norma.

A partir de esos valores de incertidumbre será necesario localizar en el mercado los patrones de trabajo o de referencia.

Actualmente se han ubicado empresas que ofertan sus equipos con características de incertidumbre de patrón de trabajo o de referencia.

8. CONCLUSIONES

La normalización de la calidad de la energía, requiere de un programa continuo de análisis de la información y esta debe ser validada con la disciplina que exige la metrología, en las grandes redes eléctricas del mundo han iniciado ese camino de estudio.

La concientización y uso de la información inherentes a la calidad de la energía puede ser de gran beneficio a los procesos productivos, pues será esta una herramienta para proteger a sus equipos y evitar verse afectados en el proceso de producción.

Para México es conveniente y necesario iniciar ese camino de investigación, al ser requerido y demandado por los mercados altamente competitivos y del que los procesos industriales de nuestro país no son ajenos.

La tarea pendiente es para los responsables del manejo de los patrones de transferencia o bien del mismo CENAM de poder ofertar la incertidumbre equivalente a patrones de referencia. De tal modo que la trazabilidad de la medición pueda ser a patrones nacionales de referencia.

9. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Sag: Reducción súbita de más del 10 % de la tensión nominal en una o más fases permaneciendo desde 16,6 ms hasta 1 min.

Swell: Incremento súbito de la tensión en una o más fases (más que 110 % de la tensión nominal) por una duración continua desde 8 ms hasta 1 min.

Fluctuaciones de la Tensión: Impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo.

Compatibilidad Electromagnética: La habilidad de un dispositivo o sistema para funcionar satisfactoriamente sin introducir disturbios intolerables a otros dispositivos conectados al sistema de suministro eléctrico.

REFERENCIAS

- [1] CEI/IEC-61000-4-30:2003 "Testing and measurement techniques- Power quality measurement methods.
- [2] UN-EN-50160:1999 "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución".
- [3] www.cfe.gob.mx