



**ASPECTOS REGULATORIOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA EN COLOMBIA**

**JHON JAIRO PUELLO MERCADO
DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.H Y C
JULIO DE 2012**



**ASPECTOS REGULATORIOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA EN COLOMBIA**

**JHON JAIRO PUELLO MERCADO
DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO**

Monografía de Grado presentada como requisito para optar el Título de
Ingeniero Electricista

Minor Sistemas de Potencia

Director
Luis Eduardo Rueda
Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.H Y C**

JULIO DE 2012

Cartagena D.T. y C, Julio de 2012

SEÑORES

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLÍVAR

ATN: COMITÉ EVALUACION DE PROYECTOS

La ciudad

Cordial saludo,

Me permito presentar ante ustedes para su estudio, consideración y aprobación, el trabajo titulado “**ASPECTOS REGULATORIOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA**” desarrollado por los estudiantes JHON JAIRO PUELLO MERCADO Y DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO, como requisito para la aprobación del “MINOR DE SISTEMAS DE POTENCIA”, y optar por el título de Ingeniero Eléctrico, y en la cual participe como DIRECTOR.

Atentamente,

LUIS EDUARDO RUEDA RINCÓN

Ingeniero Electricista

Director

ASPECTOS REGULATORIO SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGIA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

Cartagena D.T. y C, Julio de 2012

SEÑORES
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
ATN: COMITÉ EVALUACION DE PROYECTOS
La ciudad

Cordial saludo,

Me permito de la manera más respetuosa presentar ante ustedes para su estudio, consideración y aprobación, el trabajo titulado **“ASPECTOS REGULATORIOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA”** dirigido por el Ingeniero Luis Eduardo Rueda Rincón y desarrollado por nosotros, como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Eléctrico.

Atentamente,


JHON JAIRO PUELLO MERCADO

C.C.: 1.047.395.381 de Cartagena


DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO

C.C.: 73.211.382 de Cartagena

ASPECTOS REGULATORIO SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGIA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO** y **JHON JAIRO PUELLO MERCADO**, identificados con cédulas de ciudadanía **73.211.382** de Cartagena y **1.047.395.381** de Cartagena, respectivamente; autorizamos a la Universidad Tecnológica de Bolívar a hacer buen uso del trabajo de grado titulado **“ASPECTOS REGULATORIOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA”**, y a publicarlo en el catalogo ONLINE de la Biblioteca.



DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO
C.C.: 73.211.382 de Cartagena



JHON JAIRO PUELLO MERCADO
C.C.: 1.047.395.381 de Cartagena

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D. T. y C., 09 de julio de 2012.

AGRADECIMIENTOS

JHON JAIRO PUELLO MERCADO

Gracias doy a Dios por guiar cada uno de mis pasos en este camino y permitirme llegar satisfactoriamente a la culminación de este proyecto y con él, al final de esta meta, que es alcanzar el título de Ingeniero Electricista.

Así mismo, agradezco a mis padres Nancy Mercado Villamil y Jairo Puello Herrera por brindarme su apoyo incondicional y por estar presentes cada vez que necesité de su amor y fortaleza, por levantarme en los tropiezos y por inculcar en mí los valores morales y espirituales que me han permitido llegar hasta este punto de mi vida; a mi hermana por darme su cariño y por ser una de las razones que tengo para intentar ser mejor cada día. A mis amigos y amigas, por dar a cada reunión de estudios el toque de alegría y diversión necesario.

También agradezco a la Universidad Tecnológica de Bolívar y a su cuerpo docente por la labor que cumplieron, forjándome como profesional y por todos los conocimientos que de ellos recibí

AGRADECIMIENTOS

DANIEL EDUARDO MORENO PATIÑO

Muchas personas estuvieron con nosotros en todo este camino no tengo palabras para expresarles mis infinitos agradecimientos, a Dios quien me lleno de fortaleza y perseverancia para culminar en este ciclo, a nuestros familiares, a nuestros padres que sirvieron de apoyo incondicional para que se cumpliera este sueño que sin ellos no habría sido posible, gracias a ti Johnny Moreno Duque y Patricia Patiño Borja por haber depositado sus ilusiones y confianzas en nosotros.

Queremos agradecer también a profesores y amigos incondicionales que siempre estuvieron apoyándonos para cumplir nuestra meta.

Especial agradecimiento a nuestro director de tesis Luis Eduardo Rueda por su gran apoyo incondicional y ardua labor de trabajo dentro y fuera de las instalaciones de la universidad, quien además con su consejos y sólidos conocimientos nos enriqueció personal e intelectualmente.

CONTENIDO

		PAG
	DEFINICIONES	13
	RESUMEN	14
	INTRODUCCION	15
	OBJETIVOS	16
1.	REVISIÓN DE NORMATIVIDAD VIGENTE SOBRE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	17
1.1	Normatividad nacional	17
1.2	Normatividad internacional	24
2.	FORMULACIÓN TEÓRICA Y ESTRUCTURA GENERAL DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA (CPE)	27
2.1	Definición de la CPE, naturaleza del producto	27
2.2	Formulación teórica y condiciones ideales	27
2.3	Estructura de la CPE	31
2.4	Clasificación de los fenómenos calificadoros a partir de sus causas	32
2.4.1	Fenómenos de la CPE de causas controlables	32
2.4.2	Fenómenos de la CPE de causas incontrolables	33
2.5	Fenómenos calificadoros de la CPE	33
2.5.1	Desviación estacionaria de la tensión	34
2.5.2	Desviación de la frecuencia estacionaria de la tensión	34
2.5.3	Distorsión armónico de las ondas de voltaje y corriente	34
2.5.4	Transitorios electromagnéticos, fluctuaciones de tensión y flicker	37
2.5.5	Factor de potencia	40
2.5.6	Desbalance de tensión	41
2.5.7	Ruido de tensión de alta frecuencia	41
2.6	Indicadores de la CPE	42
2.7	Niveles de un indicador de la CPE	42

2.8	Limite de un indicador de la CPE	42
3.	METODOLOGÍA PARA ANALIZAR LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO	43
3.1	Adquision de datos	43
3.2	Clasificación y construcción de índices e indicadores	43
3.3	Análisis estadístico de datos	44
3.4	Soluciones para mejorar la CPE	44
4.	CONCLUSIONES	49
5.	REFERENCIAS	50

LISTA DE FIGURA

		PAG
FIGURA 1.	Estructura de la CPE.	31
FIGURA 2.	Onda senoidal de la tensión	34
FIGURA 3.	Variación de la frecuencia.	35
FIGURA 4.	Distorsión armónica de tensión o corriente.	36
FIGURA 5.	Fluctuaciones de tensión o flickers.	40
FIGURA 6.	Distorsión de ruido de tensión de alta frecuencia.	41

LISTA DE TABLAS

		PAG
TABLA 1.	Síntesis principales resoluciones que rigen la Calidad de la Potencia Eléctrica en Colombia.	22
TABLA 2.	Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia	37
TABLA 3.	Soluciones para mejorar la CPE.	48

DEFINICIONES

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, por sus siglas en inglés: American National Standards Institute). Es una organización sin ánimo de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos. ANSI es miembro de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC).

CALIDAD: Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor

CEL: Calidad De La Energía Eléctrica.

CPE: Calidad De La Potencia Eléctrica.

CREG: comisión de regulación de energía y gas.

IEC: La Comisión Electrotécnica Internacional.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)

FLICKER: impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por estímulos lumínicos, en los cuales fluctúa la intensidad o la distribución espectral

FRECUENCIA: Frecuencias de refuerzo que transmiten la misma información que la principal, aunque lo hacen en una escala superior o inferior.

SP: Sistema de potencia.

RESUMEN

En esta monografía se hace una reseña crítica de cómo ha evolucionado la regulación de la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) en Colombia, desde que el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica del año 1998 (Resolución CREG 070 de 1998) la incluyó como parte constitutiva de la Calidad del Servicio, hasta la regulación que aplica actualmente, establecida a través de la resolución CREG 024 de 2005, en la cual se señalan los indicadores que se deben utilizar para la evaluación de los fenómenos que afectan la CPE, y se establece el plan de instalación del sistema de medición y registro. Estos indicadores de CPE son presentados como indicadores de gestión para las empresas del sector eléctrico. Finalmente se describe la metodología para el análisis de la CPE para un sistema de potencia.

INTRODUCCIÓN

Durante el estudio y análisis de los sistemas eléctricos de potencia industriales es importante conocer el comportamiento de los parámetros que identifican y resaltan una excelente calidad de la energía. Según lo anterior, el presente documento busca resaltar los aspectos regulatorios sobre la Calidad de la Potencia Eléctrica en Colombia y documentar la metodología a seguir en el proceso de realización del análisis de calidad de la energía. Para ello se ha organizado el presente en tres secciones que agrupan lo relacionado anteriormente.

La primera sección conformada por la revisión de la normatividad vigente que rige los fenómenos asociados a la CPE a nivel nacional e internacional. En él se discute desde un punto de vista crítico la evolución en la normatividad nacional con base a la creación de nuevos estándares internacionales.

En la segunda sección se define la formulación teórica y estructura de la CPE, esta formulación es fundamentada en los parámetros que determinan la CPE y la estructura acorde a los fenómenos calificadores, índices o indicadores, niveles y límites establecidos por estándares nacionales e internacionales (ANSI e IEC).

Finalmente, la tercera sección comprende lo relacionado a la metodología de aplicación del análisis de la CPE a un sistema eléctrico, con el fin de verificar el cumplimiento de los índices e indicadores de la CPE o identificar situaciones donde el sistema presente problemas. De igual manera se presentan soluciones que incorporan las tecnologías actuales para corregir y/o mejorar los problemas asociados a la CPE.

OBJETIVOS

1. Seleccionar y discriminar la normatividad vigente sobre los aspectos regulatorios de la CPE en Colombia, que deben aplicar las empresas reguladoras, con el fin de establecer un estado del arte en la temática.
2. Interpretar la normatividad vigente sobre los aspectos regulatorios de la CPE, teniendo en cuenta su aplicación según los diferentes niveles de tensión, con el fin de inferir los aspectos más relevantes.
3. Indicar un procedimiento lógico para realizar un análisis técnico- legal sobre la CPE con el fin de aplicarse correctamente en un sistema eléctrico.
4. Explicar la influencia de la regulación en los temas ambientales y las nuevas leyes impuestas en Colombia, para afianzar el conocimiento sobre la importancia de la calidad de la energía y porque se debe hacer un control de la misma.
5. Mostrar una guía que documente el procedimiento sobre el análisis técnico-legal de la CPE, involucrando las tecnologías FACTS utilizadas para el control de la CPE en niveles transmisión y subtransmisión en Colombia, con el fin de dar una mirada sobre lo que se está implementando o se implementará a futuro en la solución a esta problemática.

1. REVISIÓN DE NORMATIVIDAD VIGENTE SOBRE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En la actualidad, la calidad de la energía eléctrica o Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) en Colombia es regulada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual desde su fundación en el año 1993, ha incentivado a los operadores de los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica, mejorar en la calidad del servicio que se presta a los usuarios finales. Para su puesta en práctica se han elaborado resoluciones que contemplan los estándares de CPE que se deben tener en los sistemas antes mencionados; para dicha estandarización fue necesario fundamentar el aspecto técnico en normatividad internacional como lo fueron normas IEEE e IEC. Acorde a lo anterior, en el presente capítulo se dará una mirada más profunda de la normatividad nacional e internacional referente a la CPE.

1.1 NORMATIVIDAD NACIONAL

La regulación de la CPE está basada en el principio de la Calidad. La ley colombiana lo ha establecido como su primer fin, al momento de intervenir los servicios públicos, el cual reza de la siguiente manera: *“Garantizar la calidad del bien objeto del servicio público y su disposición final para asegurar el mejoramiento de la calidad de vida de los usuarios.”*¹. Ahora bien, la calidad se define como la *“Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor”*². Sin embargo, la ley exige algo más avanzado: Garantizar la “Buena calidad” calificando con excelentes atributos operativos el producto en sus agentes generadores o promotores de bienes y servicios. Aunque se debe tener siempre en cuenta que la Calidad está íntimamente relacionada a La seguridad de los seres vivos en general, la cual está sólo garantizada por una buena calidad de los insumos que estos reciben, lo que hace más loables los esfuerzos para su mejoramiento. La ley siempre va más allá: *“En virtud del principio de calidad, el servicio prestado debe cumplir los requisitos técnicos que se establezcan para él.”*³

¹Ley 142 de 1994

²Primera acepción diccionario de la Real Academia Española.

³Ley 143 de 1994

La entrada en vigencia de esta normatividad, hace parte de la coyuntura tecnológica actual de los equipos de los usuarios de la electricidad, los cuales se hacen cada vez más sensibles a perturbaciones del sistema y paradójicamente comienzan a tener un mayor impacto en el propio sistema; así mismo, los costos asociados a las fallas o funcionamientos inadecuados de las máquinas eléctricas en las empresas, son evaluados con los exigentes modelos competitivos y de producción que se aplican hoy en día en la industria; el mercado mismo ha dado la señal, aquel insumo energético que se asumía dado e imperturbable debe ser objeto de revisión, la Calidad de la Energía Eléctrica debe ser establecida.

La reforma que en la década de los 90´ llevó al sector eléctrico colombiano a la aplicación de modelos económicos de mercado, basados en la competencia como mecanismo para garantizar el cumplimiento de los principios que la ley estableció, debe regir la utilización de la electricidad; ha llevado a que se asuma que la electricidad tiene el carácter de un producto ordinario y general del mercado, quedando sujeta al comercio y sus avatares; sin embargo gracias a los grandes esfuerzos de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), el estado ha logrado mantener un relativo control del mercado, sin que los vicios de la desregulación muestren ya sus frutos.

Independientemente de la discusión política o probablemente ideológica sobre las bondades o no de la aplicación de modelos económicos, la CREG tiene la obligación, con la potestad que le ha dado el estado, para intervenir y garantizar la CPE; ya que el mercado por sí mismo no lo hará. Con base en esta reflexión, era urgente el requerimiento de una regulación aplicable de CPE en Colombia.

Haciendo énfasis en el servicio de energía eléctrica, su calidad tiene dos componentes fundamentales además de las de carácter administrativo: La Continuidad y la CPE. La Continuidad se encarga de minimizar las interrupciones del servicio y por tanto evitar la ausencia del producto energía eléctrica; mientras que la CPE se encarga de que los parámetros que definen la operatividad y forma del producto, estén dentro de un entorno nacional o internacionalmente definido como de “buena calidad”. La regulación misma establece la frontera entre la Continuidad del servicio y la CPE, basándose en las definiciones del estándar [1]. De esta manera una interrupción cuya duración sea menor a un minuto es calificada como temporal según la CREG o como de corta duración según [1] y entonces debe ser tratada como un problema de Calidad de Potencia; mientras que una interrupción cuya duración sea mayor a un minuto, es clasificada por la CREG como temporal o de larga duración como [1], y su tratamiento es dado acorde a la Continuidad del Servicio. En voltaje, se considera una interrupción, cuando su magnitud es menor al 10% de su valor nominal. En este sentido la regulación de la Continuidad opera efectivamente desde hace varios años, con un modelo de compensación a usuarios, basada en el costo de racionamiento y el cálculo de los indicadores FES y DES (más conocidos en el operador de red Electricaribe como SAIFI y SAIDI), los cuales miden respectivamente la frecuencia y la duración de las interrupciones.

Por otro lado la evolución del marco regulatorio de la CPE ha seguido un proceso que ha tenido grandes y significativos avances, tanto en los operadores de red como en algunos usuarios finales, principalmente a nivel industrial y comercial. Este proceso evolutivo ha sido una iniciativa de la CREG por medio del Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica (**resolución 070 de 1998, con modificación en 096/2000**), con la cual se establecen los criterios técnicos de CPE. En dicho código se señalan los principales fenómenos que afectan la CPE, en concordancia con los mundialmente identificados.

El código recomendó la utilización del clásico estándar [2] para la evaluación y tratamiento del fenómeno de la distorsión armónica, y el estándar [1] para los fenómenos los transitorios de voltaje. Con respecto a la distorsión armónica, el estándar [2] efectivamente propone metodologías de evaluación basadas en el cálculo de indicadores y límites de compatibilidad para los mismos, lo que hace posible disponer de herramientas efectivas que no solo solucionan problemas relacionados con el fenómeno para empresas y usuarios, sino que también hacen posible la intervención de la comisión de regulación en caso de que la misma sea necesaria. Sin embargo respecto a los fenómenos transitorios de voltaje, el estándar recomendado por la comisión, más que una guía o metodología para la evaluación de los mismos, es un tratado técnico y científico en el cual estos fenómenos son definidos y clasificados.

El código de redes omitió completamente en ese entonces, la familia de estándares de la Comisión Internacional de Electrotécnica [3], [4], [5], [6], sobre Compatibilidad Electromagnética (familia 61000), la cual incluye los trabajos más importantes efectuados en el área de la CPE. Con estas omisiones dicha regulación no era aplicable en la práctica, y las herramientas ofrecidas a usuarios y operadores de red para la evaluación de la CPE, eran insuficientes.

Buscando hacer aplicable la regulación, la CREG mediante la resolución No.058 (15 julio de 2004), sometía a consideración de las empresas, los usuarios y demás interesados una propuesta regulatoria sobre las características y los indicadores de la CPE, proponiendo en el documento de estudio (042), indicadores para la evaluación de una amplia gama de fenómenos transitorios de voltaje, buscando llenar el vacío de regulaciones anteriores, para los cuales no se tiene una metodología válida de análisis.

Finalmente, aprobada la resolución CREG 024 del 2005 “Por la cual se modifican las normas de CPE aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica.”, han quedado definidos los indicadores que deben ser utilizados para la evaluación de los fenómenos que afectan la CPE, además que estableció el plan de instalación del sistema de medición y registro.

Por otro lado la CREG también establece las normas para llevar una buena calidad del servicio al usuario final y así mejorar el impacto ambiental. Basándose en la ley 143 de 1994, que hace reseña llevando a las entidades económicas que generen un impacto ambiental importante a cumplir con la obligación de mitigar, evitar, reparar y compensar los efectos negativos sobre el ambiente natural y social. Una de las obligaciones de las empresas públicas y privadas es obtener la licencia ambiental que certifique que la empresa se encuentra en óptimas condiciones para generar, transmitir, interconectar y distribuir la energía eléctrica del país.

Tabla 1. Síntesis principales resoluciones que rigen la Calidad de la Potencia Eléctrica en Colombia.

RESOLUCIONES	SINTESIS	AUTOR	FECHA
Resolución 070-1998	En dicho contenido de la presente resolución, adopta el reglamento de distribución eléctrica, que trata un poco sobre las definiciones, plan de expansión, condiciones de conexión, operación – calidad – propiedad de los sistemas de transmisión regional, medida, alumbrado público.	ORLANDO CABRALES MARTINEZ (MINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) - JORGE PINTO MOLLA (DIRECTOR EJECUTIVO)	28 DE MAYO - 1998
Resolución 025-1999	Modifican el numeral 6.3.2.1 de la resolución Creg070-1988, el cual trata sobre los indicadores para el periodo de transición, que se medirá al nivel de circuito con base a los siguientes indicadores: de duración equivalente de interrupciones del servicio, frecuencia de interrupciones de servicio, seguimiento de la calidad del servicio prestado, DESc y FESc por defecto.	LUIS CARLOS VALENZUELA (MINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) – JOSE CAMILO MAZUR (DIRECTOR EJECUTIVO)	9 DE JUNIO - 1999
Resolución 058-2000	La presente aplica a los comercializadores de energía eléctrica y a los distribuidores-comercializadores de gas combustible que atienden usuarios finales de este servicio. Estos publicaran de forma simple y comprensible cada vez que se modifiquen, las tarifas que aplicaran a los usuarios, en un periodo de amplia circulación en los municipios donde prestan los servicios, o en una circulación nacional.	JUAN MANUEL ROJAS PAYAN (VICEMINISTRO DE ENERGIA) - CARMENZA CHAHIN (DIRECTORA EJECUTIVA)	17 DE AGOSTO - 2000
Resolución 096-2000	Se dictan normas relacionada con el periodo de transmisión de que te trata del reglamento de distribución de energía eléctrica, y se complementan algunas disposiciones de dichas resoluciones.	CARLOS CABALLERO ARGAEZ (MINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) - CARMENZA CHAHIN (DIRECTORA EJECUTIVA)	30 DE NOVIEMBRE - 2000

Resolución 159-2001	Propone la primera etapa de una opción de varios costos, a la que podrán acogerse las empresas prestadoras del servicio público domiciliario de electricidad a usuarios reguladores y se establecen otras disposiciones en cuanto a las compensaciones por incumplimiento en los estándares de calidad por el servicio prestado en los STR y/o SDL del SIN.	LUISA FERNANDA LAFAURIE (MINISTRA DE MINAS Y ENERGIA) - DAVID REINSTEIN (DIRECTOR EJECUTIVO)	27 DE DICIEMBRE - 2001
Resolución 082-2002	Aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los sistemas de transmisión regional y distribución local.	LUIS ERNESTO MEJIA CASTRO (MINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) - JAIME ALBERTO BLANDO (DIRECTOR EJECUTIVO)	17 DE DICIEMBRE - 2002
Resolución 084-2002	Se dictan normas en materia de calidad del servicio de energía eléctrica prestado en el sistema de interconectado nacional, relacionado con la resolución Creg159-2001 y con el primer año de periodo de transición, que trata el reglamento de distribución de energía eléctrica.	JUAN MANUEL GERS (VICEMINISTRO DE ENERGIA) - JAIME ALBERTO BLANDO (DIRECTOR EJECUTIVO)	30 DE DICIEMBRE - 2002
Resolución 065-2003	Presenta solicitudes revocatorias contra la resolución Creg084-2002, La cual da razones que justifiquen la revocatoria directa.	MANUEL MAIGUASHCA OLANO (VICEMINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) - JAIME BLANDON (DIRECTOR EJECUTIVO)	9 DE JULIO - 2003
Resolución 074-2004	Modificación de la definición de "consumo", en el artículo de Creg108-1997, y por defecto en la presente resolución adoptan la definición de consumo de energía reactiva.	LUIS ERNESTO MEJIA CASTRO (MINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) - SANDRA STELLA FOSENCA (DIRECTORA EJECUTIVA)	4 DE JUNIO - 2004
Resolución 024-2005	Para interpretar y aplicar las normas del reglamento de operación del sistema de interconectado nacional, se necesita tener en cuenta: calidad de la potencia eléctrica, fluctuación de tensión, forma y frecuencia estándar, hundimiento (sag), indicador, parpadeo (flicker), pico (swell), PST (percibility short time), THDV (total harmonic distortion of voltage), variación de corta duración. Anexo a dicha resolución, se exigen unos equipos de medición, un plan de instalación para el sistema de mediciones y registros, un plan de recolección de datos y un reporte para valores de indicadores.	MANUEL MAIGUASHCA OLANO (VICEMINISTRO DE MINAS Y ENERGIA) - ANA MARIA BRICEÑO MORALES (DIRECTORA EJECUTIVA)	26 DE ABRIL - 2005

<http://www.electrificaribe.com/LinkClick.aspx?fileticket=kNttHhYCn7w%3D&...>

1.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL

Es de notar que debido la falta de normatividad nacional para regular los problemas asociados a la calidad de la energía, se hizo necesario indagar y adoptar normatividad internacional como son los estándares IEEE e IEC para apoyar y construir lo que hoy día se conoce como los estándares nacionales para el estudio de la CPE.

Entre los estándares IEC se destacan el 61000-4-15 [6] que trata de las especificaciones del medidor de *flicker*, el 61000-3-3 [4] que trata el *flicker* y las fluctuaciones de voltaje en baja tensión, relativas a dispositivos de corriente nominal inferior o igual a 16 A, el 61000-3-5 que trata el *flicker* y las fluctuaciones de voltaje en baja tensión, relativas a dispositivos de corriente nominal superior a 16 A y el 6100-3-7 que trata el *flicker* y las fluctuaciones de tensión relativas a cargas fluctuantes en alta y media tensión.

Por otro lado, se encuentra el estándar IEEE 519 de 1992, el cual trata de las prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia debido a cargas no lineales como convertidores estáticos de potencia, descargadores por arco, máquinas rotativas, entre otros. Estos son usados en la industria para una variedad de propósitos, tales como suministro de energía electromecánica, variadores de velocidad y las UPS (*Uninterruptible Power Supplies*). Son importantes para la industria porque en ellos se convierte AC a DC, DC a DC, DC a AC y AC a AC. Además, se debe tener en cuenta que las cargas no lineales son las que cambian la naturaleza senoidal de la corriente AC y consecuentemente la del voltaje AC; esta variación en la onda senoidal produce un flujo de corrientes armónicas en el sistema de potencia que causan interferencia con los circuitos de comunicación y otro tipo de equipos.

Es el estándar 519, en el que se define el fenómeno conocido como *flicker*, el cual se concibe como principal calificador de la potencia eléctrica, y resulta de las entradas y salidas sucesivas de carga, cada cierto tiempo al convertidor. Si este proceso es llevado a cabo a una frecuencia a la cual el ojo humano es susceptible, y si la caída de voltaje es lo suficiente; una modulación del nivel de luminosidad de las lámparas fluorescentes o incandescentes será detectada. Este último efecto es el que le da el nombre al fenómeno de *flicker*.

A continuación se presenta un resumen de los objetivos específicos que trata la IEEE 519-1992:

- Proveer procedimientos generales para la evaluación de las diferentes clases de usuarios (industriales, comerciales, residenciales) y para las aplicaciones de los equipos en un sistema de servicios públicos.
- Ilustrar métodos para la evaluación del nivel de armónicos en el Punto de Común Acople, (PCC o Point of Common Coupling). Se ilustran ejemplos de los conceptos del PCC, la dirección del flujo de la corriente armónica, el máximo promedio de la corriente de carga demandada, el radio de corto circuito (SCR o Short Circuit Ratio) y la demanda total de distorsión (TDD o Total Demand Distortion).
- Proveer ejemplos de procedimientos para evaluar las corrientes y los voltajes armónicos en el PCC. Los procedimientos de medida deben tener en cuenta un tratamiento con intervalos de tiempo especificados y las características estadísticas de los niveles de armónicos.
- Ilustrar la evaluación de los niveles de armónicos tanto para los usuarios ya existentes como para los nuevos clientes que entran al sistema de servicios públicos.
- Ilustrar los métodos para el control de armónicos a nivel del usuario, en el sistema de servicios públicos. Describir la posible importancia de la aplicación de filtros y posible interacción con otros usuarios.

Finalmente el propósito de la IEEE 519 con estos objetivos es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

- Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
- Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

Otro de los estándares internacionales utilizados para el estudio de la CPE es el estándar 1159, cuyo propósito es entregar recomendaciones practicas para usuarios en el monitoreo e interpretación de datos de fenómenos electromagnéticos que ocasionan problemas de CPE.

2. FORMULACIÓN TEÓRICA Y ESTRUCTURA GENERAL DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA (CPE)

La calidad del servicio de la energía eléctrica (CEL) ha sido dividida en dos grandes partes; la primera, relacionada directamente con la continuidad del servicio, se ha denominado Calidad del Suministro de Energía Eléctrica (CSE); y la segunda, relacionada exclusivamente con la forma de onda de las señales responsables de la potencia (tensión y corriente), se ha denominado Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE). Los conceptos asociados a la calidad del suministro de energía eléctrica son la continuidad y la confiabilidad del servicio. La CSE ha tenido una importancia preponderante sobre la CPE, debido a que en realidad determina la presencia o no del producto, en este caso energía eléctrica, mientras que la CPE se encarga de la calidad del producto asumiendo su presencia. Debido a esta última consideración, y a la relativa facilidad de calificar la CSE, esta ya ha sido estandarizada y reglamentada de manera adecuada en todos los países del mundo. Por el contrario la CPE no ha sido definitivamente estandarizada y las reglamentaciones que existen al respecto no son claras. Todavía existen algunos vacíos, incluso teóricos, sobre la forma como debe llevarse a cabo una evaluación integral de la CPE y cuáles deben ser las responsabilidades de las partes involucradas, sin embargo hay un consenso general sobre las características fenomenológicas de la potencia que determinan su calidad.

2.1 DEFINICIÓN DE LA CPE, NATURALEZA DEL PRODUCTO

Formalmente, la CPE puede definirse de la manera que lo hace el instituto EPRI (*Electric Power Research Institute*) de los Estados Unidos: "Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario" [2].

Esta definición puede complementarse con lo que dice la recomendación IEEE 519 de 1995: “El término se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia”; en este comentario se señala el carácter fenomenológico de las características de la potencia, que es la base de la estructura que se planteará.

Asumiendo que una empresa prestadora del servicio de electricidad entrega un producto a un usuario, dicho producto que es precisamente energía eléctrica, por unidad de tiempo constituye la potencia eléctrica. Ahora bien, para que exista transferencia de potencia eléctrica, debe existir una diferencia de potencial entre los extremos del circuito, y una circulación de cargas eléctricas debida a esta diferencia de potencial; sin alguna de estas condiciones no puede existir transferencia de potencia.

2.2 FORMULACIÓN TEÓRICA Y CONDICIONES IDEALES

En el punto de conexión de un usuario, el sistema de potencia completo puede verse como una sola fuente de tensión ideal senoidal de 60 Hz (tensión de Thévenin), conectada en serie a una impedancia equivalente (impedancia de Thévenin) y las impedancias de todo el Sistema de Potencia (SP). Si el circuito se cierra mediante una carga lineal, la corriente tendrá una forma senoidal a la misma frecuencia de la fuente, y considerando la impedancia de Thevenin lineal, la caída de tensión en esta también será una tensión senoidal, y el sistema mantendrá el régimen senoidal. Si se conecta una carga no lineal, la corriente tendrá una forma no senoidal, y provocará una caída de tensión en la impedancia de Thévenin similar a la de la corriente, es decir no senoidal. Se tendrá entonces un circuito en un régimen no senoidal perturbador transmitido a otros usuarios y elementos del SP, para los cuales es indeseable. Esta consideración puede extenderse para explicar el fenómeno de las fluctuaciones de tensión, provocadas por cargas de demanda variable que no necesariamente son no lineales.

Además de la inserción de cargas no lineales o de demanda variable, existen fuerzas cuyo efecto sobre el SP altera la forma de onda de la tensión y la corriente, degradando el régimen senoidal del circuito, y por tanto, perjudican la CPE. Dichas fuerzas pueden ser exógenas (externas al SP), como las descargas atmosféricas, los cortocircuitos y la salida repentina de grandes cargas; o endógenas (internas del SP), que son las que resultan del mal funcionamiento de los elementos del sistema, ejemplo de estas fuerzas están las fallas de los aislamiento, fallas en los estatores de los generadores, disparos equivocados de relés y saturación de transformadores; inclusive, maniobras normales de la operación del SP producen alteraciones a la forma de onda. Es obvio el requerimiento de que todas las fuentes del sistema de potencia deben cumplir el régimen senoidal de 60Hz (igual forma y frecuencia), cualquier fuente de tensión o corriente que produzca señales de otra forma (tipo rampa como las descargas atmosféricas) u otra frecuencia (armónicos), degradan el régimen senoidal por efecto de superposición. No puede exigirse que los equipos siempre demanden corrientes senoidales y de manera constante, pues no podrían operar, y de este modo la forma de onda de la corriente no debería, hasta cierto punto, considerarse dentro de la CPE. Acorde a lo anterior, surge el siguiente interrogante ¿Calidad de potencia = Calidad de tensión?; lo que despertó una nueva tendencia a nivel internacional, en la cual la potencia no aparece como un producto de la corriente por la tensión ($S=V I^*$), sino como una relación entre la tensión y la carga que conecta el usuario: $S=|V|^2/Z^*$. Este resultado de la “manipulación” de la primera ecuación, ha independizado “aparentemente” la potencia de la corriente, y la ha puesto en dependencia de la carga del usuario. Esto ha dado lugar a ver el servicio de electricidad desde un nuevo punto de vista, según el cual la parte del producto esencial, y casi exclusiva, es la tensión, y por tanto la CPE simplemente se limita a la calidad de la tensión. Así, bastaría que la empresa de servicio garantice una tensión con calidad a cada uno de los usuarios, los cuales tendrían la libertad de conectar libremente cualquier tipo de carga, y demandar la corriente en la forma que le plazca, pues es él quien la fija. Este punto de vista facilita la regulación de la CPE, puesto que sólo es necesario vigilar la calidad de la tensión en los puntos neurálgicos del sistema, como el Punto de

Acople Común de la empresa prestadora del servicio y el usuario, pero no libera al usuario de su responsabilidad, pues no es posible exigir un SP con fuentes ideales, que mantengan la tensión, independientemente de la corriente que entregan. Los indicadores de calidad de corriente son útiles para estudios de planeación, análisis y diagnóstico en una empresa dada. La solución de los problemas debe surgir de un compromiso mutuo entre las compañías prestadoras del servicio y los usuarios.

Las condiciones ideales se definen como un circuito eléctrico con un régimen senoidal puro de 60 Hz, con ondas de tensión y corriente con amplitudes de acuerdo a los niveles señalados y en fase. La última consideración equivale a decir que el factor de potencia es la unidad, y que las reactancias aunque lineales, deterioran la calidad al desfasar las ondas de tensión y corriente, la corrección del factor de potencia es en sí un procedimiento de mejora de la calidad. En la práctica no es posible lograr el ambiente ideal, pero es la referencia para las desviaciones de la calidad.

2.3 ESTRUCTURA DE LA CPE

En la actualidad la evaluación de la CPE de un sistema de potencia presenta la estructura mostrada en la Figura 1. Más adelante, se describirán cada uno de los componentes de la estructura de la CPE.

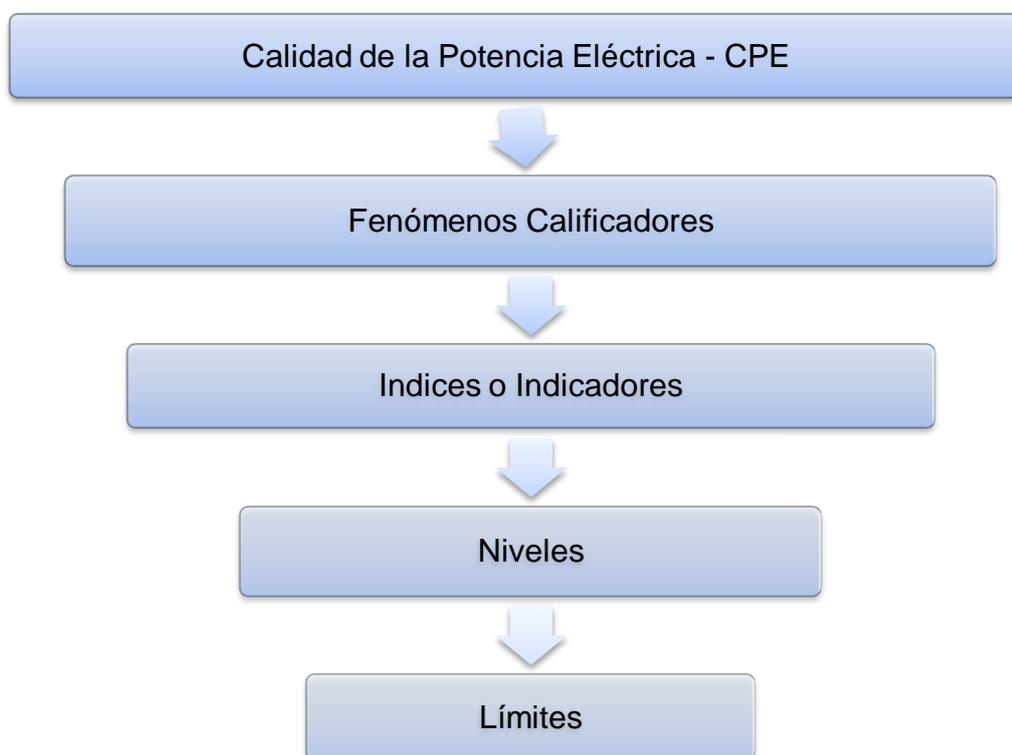


Figura 1. Estructura de la CPE.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS FENÓMENOS CALIFICADORES A PARTIR DE SUS CAUSAS

Los fenómenos que afectan la CPE han sido clasificados de muchas maneras, según este encaminado el estudio, sin embargo para el tratamiento de estos fenómenos, y sobre todo para fines regulatorios, es particularmente útil clasificarlos según el grado de controlabilidad de las causas que los producen. Dos grandes tipos de causas son distinguibles: las controlables y las incontrolables. Se espera entonces que los problemas causados por fenómenos controlados sean inmediatamente regulados, mientras que se pueden dar plazos a las regulaciones tendientes a mitigar los fenómenos de la CPE de causas incontrolables.

2.4.1 Fenómenos de la CPE de causas controlables.

Los fenómenos que afectan la CPE de causas controlables son aquellos que son el resultado de eventos cuyas características pueden ser manipuladas directa o indirectamente por personas, o bien, por los sistemas de control de los sistemas de potencia. De esta manera las variables involucradas en el fenómeno pueden ser modificadas con el fin de mantener los niveles del mismo dentro de límites que aseguren la compatibilidad del sistema. En la mayoría de los casos, los fenómenos de la CPE heredan la controlabilidad de sus causas. Fenómenos así controlables son por ejemplo la emisión de armónicos de un equipo al sistema, perturbaciones causadas por la conexión (arranque de motores), ciclos de trabajo, o maniobras de una carga determinada (suitcheo de condensadores), la disminución de la tensión por el aumento de la demanda, etc. Estos fenómenos son de fácil evaluación y tratamiento, y por tanto regulación. Sus estudios se basan primordialmente en la teoría de circuitos eléctricos, y no requieren una compleja formulación matemática.

2.4.2 Fenómenos de la CPE de causas incontrolables.

Cuando un fenómeno de la CPE es el resultado de un evento de ocurrencia y severidad aleatoria y no es posible la manipulación de todas las variables involucradas, el fenómeno puede ser considerado de causal incontrolable. En este caso la evaluación y el tratamiento se complican considerablemente, debido a que es necesario recurrir a matemáticas estadísticas. Es claro que la regulación de este tipo de fenómenos es la labor más ardua de los estudiosos de la CPE, la asignación de límites queda supeditada a las características propias de la región física de la red, como por ejemplo el nivel cerámico de la región, y puede ser necesario llevar a cabo monitoreos largos y continuos de la red con el fin de señalar valores razonables. Un ejemplo claro son las fluctuaciones de tensión debidas a las fallas que ocurren durante una tormenta eléctrica como consecuencia de las descargas atmosféricas ó de las ramas que caen de los árboles. Algún control sobre el fenómeno es posible manipulando elementos del SP, como por ejemplo el tiempo de actuación de los relés de protección que determinan la duración de la caída de tensión al presentarse un corto circuito, de esta manera el fenómeno adquiere cierta controlabilidad gracias a elementos del SP.

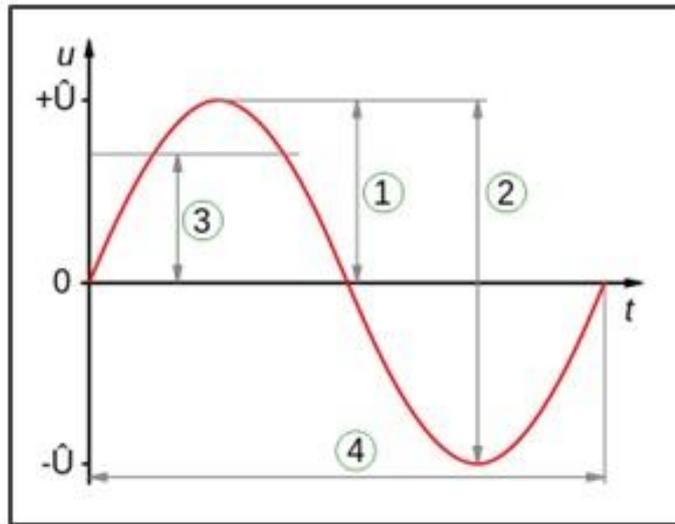
2.5 FENÓMENOS CALIFICADORES DE LA CPE

Los calificadores son las características físicas de la energía eléctrica que permiten evaluar su calidad y son de carácter fenomenológico. Resultan del análisis físico de su impacto en el sistema de potencia, los usuarios y los seres vivos en general (método científico). Se considera (aún es un problema abierto) que los calificadores de la potencia son: desviación de la frecuencia y tensión estacionaria (Resolución CREG 070 de 1988, modificada 024/2005), contenido de armónicos en las ondas de corriente y tensión, factor de potencia (este contenido de armónicos es más conocido como la distorsión armónica de corriente y de voltaje), transitorios electromagnéticos y fluctuaciones de tensión, desbalances de tensión, señales de ruido electromagnético.

Los fenómenos calificadores definen la variable a monitorear del sistema para estudiar la CPE, es por ello que a continuación se expone cada uno de ellos.

2.5.1 Desviación estacionaria de la tensión.

Está definida por la amplitud de la onda senoidal de la tensión en estado estacionario. Puede darse en valor pico o valor eficaz; para una onda senoidal la relación entre el valor pico y el valor eficaz es $\sqrt{2}$. La magnitud de la tensión es un calificador de la CPE porque sus variaciones pueden provocar serios problemas como mal funcionamiento y daños en los equipos de los usuarios y del sistema así como también poner en riesgo la seguridad de los seres vivos.



1 = Amplitud; 2 = Amplitud de pico a pico; 3 = Media cuadrática; 4 = Período

Figura 2. Onda senoidal de la tensión.

2.5.2 Desviación de la Frecuencia estacionaria de la tensión.

Está definida por la frecuencia de la onda de la tensión en estado estacionario. La frecuencia normal en Colombia es 60 Hz. La frecuencia es un calificador de la CPE por que existen equipos sensibles a sus variaciones, como aquellos que utilizan el cruce por cero de la onda de tensión como referencia. A continuación se mostrara en la figura 3, los cambios permanentes o semi-permanentes de la frecuencia.

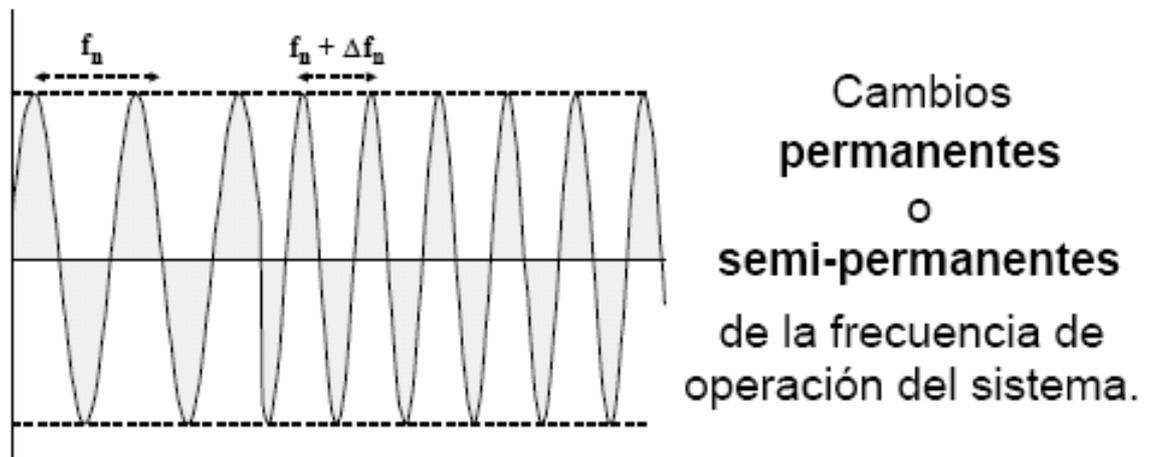


Figura 3. Variación de la frecuencia

2.5.3 Distorsión armónica de las ondas de voltaje y corriente.

Es la distorsión que presentan las ondas de tensión y corriente por la presencia de ondas armónicas acompañando a la componente fundamental (de 60 Hz). Si la frecuencia de la onda es múltiplo entero de la fundamental, la onda se denomina armónico, si no es un múltiplo entero se le denomina interarmónico.

En general cualquier onda periódica se puede representar como una serie de senoidales relacionadas armónicamente, y por tanto las ondas distorsionadas periódicas, son analizadas por sus componentes armónicos. En principio, los armónicos son el resultado de las cargas no lineales tanto en el sistema de transmisión (transformadores saturados), como en el sistema de distribución (cargas de los usuarios). Una tensión distorsionada trae consigo el mal funcionamiento y daño de equipos sensibles a las componentes armónicas así como también funcionamientos ineficientes que se reflejan a veces en calentamientos y ruidos. Los estándares internacionales más importantes sobre armónicos son el IEEE 519-1992: Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia (es el que toma como referencia la regulación colombiana), y los IEC de la familia 61000 (CEM). Para regulación se recomienda adoptar el indicador clásico de Distorsión Armónica Total de voltaje (THDv), considerando que su vigilancia es suficiente para garantizar la CEM.

A continuación se presentara en la figura 4, la distorsión armónica de tensión o corriente no sinusoidales.

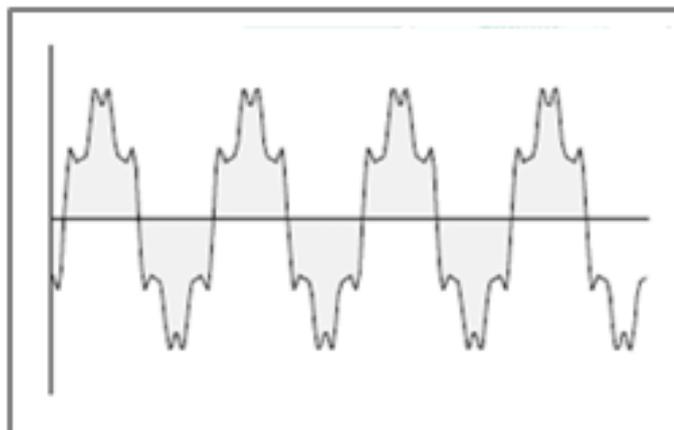


Figura 4. Distorsión armónica de tensión o corriente.

Las tensiones o corrientes no sinusoidales, pueden descomponerse en la suma de la onda de frecuencia, como se muestra en la siguiente expresión:

En general

2.5.4 Transitorios electromagnéticos, fluctuaciones de tensión y flicker.

Es todo fenómeno que origine distorsiones transitorias de las ondas de tensión y corriente respecto a su forma y frecuencias permisibles [2]. La IEEE los divide de acuerdo con su duración, en siete grandes categorías: Transitorios Electromagnéticos (TEM), Variaciones de Corta duración (VCD), Variaciones de Larga Duración (VLD), Desbalance (D), Distorsión de la Forma de onda (DF), Fluctuaciones (F), Variaciones de la Frecuencia Industrial (VFI). Dichos fenómenos han sido clasificados de acuerdo con su contenido espectral típico, duración y magnitud en la guía IEEE 1159-1995, como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia

CATEGORIAS	contenido espectral típico	duracion típica	magnitud del voltaje típico
1.0 Transitorio			
<u>1.1 impulso</u>			
1.1.1 nanosegundo	5 ns de subida	< 50 ns	
1.1.2 microsegundo	1 µs de subida	50 ns-1 ms	
1.1.3 milisegundo	0.1 ms de subida	> 1 ms	
<u>1.2 Oscilatorio</u>			
1.2.1 baja frecuencia	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Media frecuencia	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
1.2.3 alta frecuencia	0.5-5MHz	5 µs	0-4 pu

CATEGORIAS	contenido espectral tipico	duracion tipica	magnitud del voltaje tipico
2.0 Variacion de corta duracion			
<u>2.1 Instantaneo</u>			
2.1.1 sag (Dip)		0.5-30 ciclos	0.1-0.9 pu
2.1.2 swell		0.5-30 ciclos	1.1-1.8 pu
<u>2.2 Momentania</u>			
2.2.1 Interrupcion		0.5- ciclos-3 s	< 0.1 pu
2.2.2 sag		30 ciclos-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos-3 s	1.1-1.4 pu
<u>2.3 Temporal</u>			
2.3.1 Interrupcion		3 s-1 min	<0.1 pu
2.3.2 sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
3.0 Variacion de larga duracion			
<u>3.1 Interruption, sustained</u>		> 1 min	0.0 pu
<u>3.2 Undervoltages</u>		> 1 min	0.8-0.9 pu
<u>3.3 Overvoltages</u>		> 1 min	1.1-1.2 pu
4.0 Desbalance de voltaje		estado estable	0.5-2%
5.0 Distorsion de la forma de onda			
<u>5.1 DC offset</u>		estado estable	0-0.1%
<u>5.2 Armonicos</u>	0-100th H	estado estable	0-20%
<u>5.3 Interarmonicos</u>	0-6 kHz	estado estable	0-2%
<u>5.4 Muecas</u>		estado estable	
<u>5.5 ruido</u>	banda ancha	estado estable	0-1%
6.0 Fluctuaciones de voltaje	< 25 Hz	intermitente	0.1-7%
7.0 Variaciones de la frecuencia		< 10 s	

Clasificación según la IEEE – 1159 [1995] de los eventos sobre una Onda de tensión.

Una fluctuación de tensión puede definirse como una serie de cambios, o una variación cíclica de la envolvente de la onda de tensión. Las variables de interés son la frecuencia de ocurrencia, el tiempo de duración, la magnitud de la fluctuación y el contenido espectral. Existen Indicadores como las “cartas de coordinación de sags de voltaje” que indican el comportamiento de la fuente respecto a algunos de estos fenómenos, pero utilizarlas para una regulación es complicado por su difícil obtención e interpretación, además de no existir un equipo de susceptibilidad típica para estas. Estos fenómenos transitorios y fluctuaciones de tensión son considerados como calificadores de la CPE debido a la creciente cantidad de equipos sensibles a estos que se conectan a la red.

Por otro lado, el *Flicker* es definido por la IEC como una “impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por estímulos lumínicos, en los cuales fluctúa la intensidad o la distribución espectral”; el nivel de iluminación de la lámpara incandescente depende directamente del voltaje de alimentación; por tanto, fijar límites a la inestabilidad de la luminosidad implica directamente fijar límites a la inestabilidad de la tensión. En CPE, por *Flicker*, entiéndase condición de inestabilidad de voltaje.

Para la IEC fue prioritario el estudio de la susceptibilidad del sistema lámpara-ojo-cerebro, y con base a su respuesta a los cambios en la luminosidad, estableció requerimientos de compatibilidad para la señal de voltaje y así poder establecer límites para la emisión de perturbaciones desde equipos. El modelo IEC el *flicker*, está contenido en el tema de la CEM, en familia de estándares 61000 en los cuales se establecen los indicadores de severidad de *flicker*, cómo medirlos y qué límites aplican en cada circunstancia). El estudio del modelo de IEC lleva a la conclusión que algunos de estos fenómenos pueden ser regulados de una manera fácil y teóricamente justificada.

En la Figura 5, se analiza la variaciones sistemáticas de la envolvente de la amplitud de la tensión, dentro de un intervalo de 0.9 – 1.1 pu

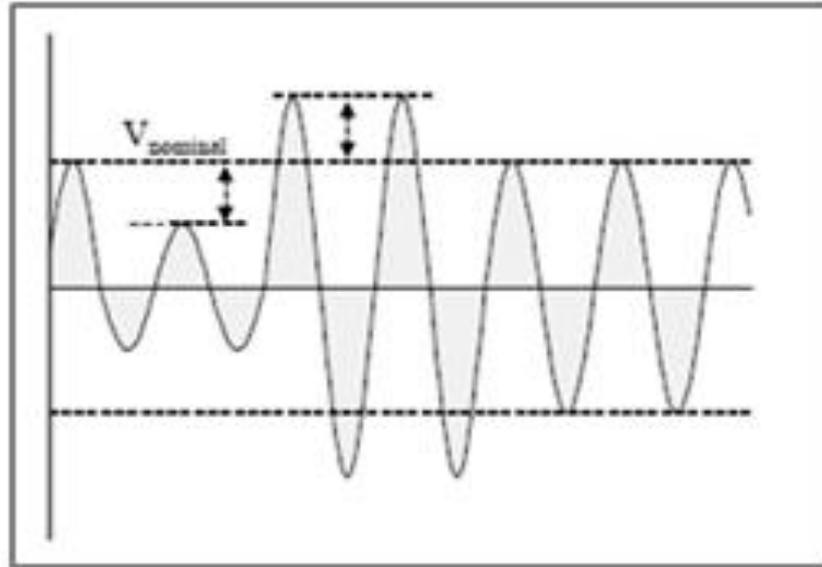


Figura 5. Fluctuaciones de tensión o flickers

2.5.5 Factor de potencia.

Se define el factor de potencia como el coseno del ángulo de desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente. Se considera que en un SP ideal la tensión y la corriente están en fase, es decir que el factor de potencia es igual a la unidad. Esta condición hace que en teoría la potencia aparente sea igual a la potencia activa, lográndose la mayor eficiencia posible del sistema.

2.5.6 Desbalance de tensión.

En un sistema polifásico, las tensiones de fase deben tener la misma magnitud, y deben estar desfasadas entre sí, el ángulo correspondiente a la relación entre 360 grados y el número de fases del sistema. Cuando alguna de las tensiones no es igual a las demás en magnitud, o cuando algún ángulo de desfase entre dos tensiones consecutivas no es igual a los demás se presenta un desbalance de tensión. Este fenómeno puede ser considerado como un problema de magnitud de la tensión estacionaria, si el desbalance es en estado estable, o como una fluctuación de tensión, si es transitoria.

2.5.7 Ruido de tensión de alta frecuencia.

Se conocen como ruido las componentes de tensión que no son del todo periódicos, contenidos dentro la tensión de la fuente; sin embargo desde el punto de vista del usuario todos los fenómenos de tensión anteriormente mencionados pueden considerarse ruido [1]. Diferenciarlo de los demás fenómenos es muy complicado, y actualmente no es necesario. Normalmente no se toma este fenómeno como un calificador CPE, porque su tratamiento es sólo requerido en los casos en que conduce a un problema en un equipo en particular.

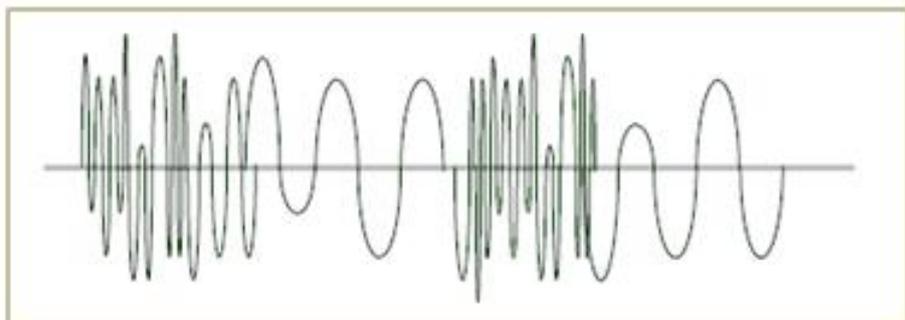


Figura 6. Distorsión de ruido de tensión de alta frecuencia.

2.6 Indicadores de la CPE.

Los indicadores o índices son cifras que indican el estado y/o la evolución (variables dinámicas) de una cantidad, en este caso, un calificador de la CPE. Los indicadores permiten un análisis cualitativo y cuantitativo de los fenómenos calificadores de la CPE. Cada fenómeno calificador tiene asociado un conjunto de índices o indicadores definidos según su naturaleza. En general un indicador se encuentra expresado mediante una "fórmula" matemática que al ser evaluada entrega un valor con significado (nivel).

2.7 NIVEL DE UN INDICADOR DE LA CPE.

Evaluado un indicador de una manera específica, se obtiene un nivel. Este nivel es la información que se ha pretendido obtener por el indicador. Puede ser obtenido directamente de una medida, o bien evaluando la fórmula del indicador para un caso dado.

2.8 LÍMITE DE UN INDICADOR DE LA CPE.

Los límites son valores que señalan la permisividad de los niveles, estableciendo ya sea el nivel máximo ó el nivel mínimo tolerable de cada índice o indicador. En este punto es posible la comparación del nivel obtenido con los niveles límites (niveles de compatibilidad) previamente establecidos del indicador, y se puede hacer la evaluación. Los límites son fijados a partir del análisis de la interacción entre el fenómeno sujeto a evaluación, el sistema de potencia y los usuarios (extensible a los seres vivos en general). Si el nivel no se encuentra dentro de los límites establecidos del indicador, se puede decir que la calidad de la potencia es objetable respecto al fenómeno calificador para el cual se definió el indicador.

3. METODOLOGÍA PARA ANALIZAR LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO

Para efectuar un análisis de CPE a un sistema eléctrico se hace necesario el desarrollo de una metodología en el cual se estipule un procedimiento lógico acorde a las estipulaciones legales vigentes en la normatividad eléctrica y los fenómenos asociados a la CPE. En este sentido, se propondrá en la presente sección dicha metodología.

3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

En primer lugar, todo análisis de calidad de potencia eléctrica necesita de una previa adquisición de datos los cuales deben ser obtenidos con cierta tasa de muestreo y resolución; y con el equipamiento necesario de acuerdo a los niveles de tensión, corriente y parámetros acordes a la tabla 2, que se manejen y se estudian en el sistema eléctrico. Para la adquisición se sugiere colocar el Analizador De Redes (es un instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión). inmediatamente aguas abajo del transformador que alimenta el sistema a analizar, en el caso de tener subestaciones aisladas se sugiere un análisis individual de cada una de ellas y de ser posible un análisis global de la acometida principal, por lo general este último se realiza en media tensión. Independientemente del sistema, las mediciones deben ser tomadas en el periodo de una semana, lo anterior con el fin de tener la suficiente información para el posterior análisis.

En esta etapa se debe verificar luego de la instalación del analizador si la lectura es la adecuada, esto es posible con un medidor alterno que permita contrastar la medida y se sugiere verificar el estado del aparato diariamente. Cabe anotar que el analizador tendrá la capacidad de obtener los índices o indicadores de la CPE o los respectivos insumos para su posterior obtención, los cuales deben ser establecidos de manera previa a la medición.

3.2 CLASIFICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES E INDICADORES

De acuerdo a la adquisición de datos realizada se debe proceder a clasificar los datos asociados a cada uno de los índices e indicadores, previamente establecidos, cabe anotar si el analizador no tiene establecido como parámetros de salida los índices e indicadores de la CPE, pero si cuenta con los insumos para su construcción se procederá a consultar el estándar que facilite su obtención acorde a los parámetros de salida.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

Luego de tomar correctamente los datos y tener establecidos los valores asociados para los índices e indicadores, se procede a realizar el análisis estadístico de los mismos. Para ello se sugiere apoyarse en tablas dinámicas que faciliten la construcción de gráficas e histogramas que faciliten su lectura y comprensión, para ello se recomienda realizar dos tipos de análisis:

- Análisis diario: este análisis pretende dar una idea inicial del comportamiento del sistema durante las 24 horas del día. En él, es importante realizar un análisis de cargabilidad del sistema, análisis de variación de factor de potencia, análisis de las variaciones de tensión y corriente y análisis de las variaciones de frecuencia; con el fin de identificar y determinar condiciones anómalas del SP.
- Análisis semanal: este análisis brinda un comportamiento más completo del SP. Se utiliza la misma metodología que se practico en el análisis diario; pero a diferencia, aquí se realiza un proceso, mediante el cual se hacen observaciones para el estudio de la planeación del sistema y las soluciones a las problemáticas a mediano y largo plazo.

Además de los análisis mencionados es necesario realizar un análisis de cada uno de los índices e indicadores, en el cual se debe revisar que ellos se encuentren en los niveles establecidos y no excedan los límites permitidos, según la reglamentación pertinente.

Un producto importante del análisis estadístico de datos es la identificación de las problemáticas puntuales y generales que afectan la CPE del sistema eléctrico; ya que este es el primordial insumo para proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo.

3.4 SOLUCIONES PARA MEJORAR LA CPE

Una pérdida de calidad puede modificar el comportamiento o los resultados y hasta provocar la destrucción de los equipos y de los procesos que de ellos dependen, con posibles consecuencias para la seguridad de las personas y con costes económicos adicionales. Se tienen tres elementos implicados:

- Uno o varios productores de perturbaciones.
- Uno o varios receptores sensibles a estas perturbaciones.
- Y entre ambos, un camino de propagación de estas perturbaciones.

Las soluciones consisten en actuar sobre todos o parte de estos tres elementos, globalmente (sobre la instalación) o localmente (sobre uno o varios receptores).

Estas soluciones pueden aplicarse para:

- Corregir una disfunción en una instalación.
- Actuar preventivamente ante la conexión de cargas perturbadoras.
- Obtener la conformidad de la instalación respecto a las normas o recomendaciones del distribuidor de energía.
- Reducir la factura energética (reducción de la potencia contratada y del consumo).

Puesto que los receptores no son sensibles todos a las mismas perturbaciones y sus niveles de sensibilidad son diferentes, la solución adoptada, además de ser la mejor desde un punto de vista técnico-económico, debe garantizar un nivel de tensión, medible y adaptado a las necesidades reales.

Es imprescindible un diagnóstico previo, efectuado por especialistas, para determinar la naturaleza de las perturbaciones contra las que hay que prevenir (por ejemplo, las soluciones son diferentes según la duración de un corte).

La calidad de este diagnóstico determinará la eficacia de la solución aplicada. También deben de ser especialistas los que efectúen el estudio y elijan la solución y los responsables de la instalación y el mantenimiento.

La utilidad de la solución y de su aplicación depende de:

- Del nivel de prestaciones deseado

Una disfunción puede ser inadmisibles si pone en juego la seguridad de las personas (hospitales, balizamiento de los aeropuertos, alumbrados y sistemas de seguridad de locales de pública concurrencia, sistemas auxiliares de centrales, entre otros).

- De las consecuencias financieras de la disfunción

Toda parada no programada, incluso muy corta, de ciertos procesos (siderurgia, petroquímica, fabricación de semiconductores), lleva a una pérdida o a una no calidad de la producción, e incluso a volver a poner en condiciones adecuadas los medios de producción.

- Del tiempo requerido para el retorno de la inversión

Es la razón entre las pérdidas financieras (materias primas, pérdidas de producción, entre otros) provocadas por la no-calidad de la energía eléctrica y por el costo (estudio, puesta en marcha, funcionamiento, mantenimiento) de la solución.

También hay que tener en cuenta otros criterios, como las costumbres, la reglamentación y los límites de perturbaciones impuestas por el distribuidor u operador de red.

Estas soluciones están sujetas principalmente a los tipos de perturbación y orígenes de donde provenga, para ello en forma abreviada se exponen en la tabla 3 las más comunes.

Tabla 3. Soluciones para mejorar la CPE.

Tipos de perturbacion	Origenes	Consecuencias	Ejemplos de soluciones (equipos específicos y modificaciones)
variaciones y fluctuaciones de tensión	Variaciones importantes de carga (maquinas de soldar, hornos de arco, etc.)	Fluctuación de la luminosidad de las lámparas (parpadeo o flicker)	compensador electromagnético de energía reactiva, compensador automático en tiempo real, compensador electrónico en serie, regulador de carga
Huecos de tension	cortocircuito, conmutación de cargas de gran potencia (arranque de motores)	Perturbación o parada de proceso: pérdida de datos, datos erróneos, caída de contadores, bloqueo de variadores de velocidad, pérdida de inercia de motores, extinción de lámparas de descarga.	SAI, compensador automático en tiempo real, regulador electrónico dinámico de tensión, arranque progresivo, compensador electrónico serie. Aumentar la potencia de cortocircuito. Modificar la selectividad de las protecciones.
Cortes	cortocircuito, sobrecarga, mantenimiento, disparo intempestivos.		SAI, conmutación mecánica de fuentes, conmutación estática de fuentes, grupos electrógenos sin corte, interruptores automáticos shunt, telecontrol.
Armónicos	cargas no lineales(variadores de velocidad, hornos de arco, maquinas de soldar, lámparas de descarga, tubos fluorescentes).	Sobrecarga (de conductores de neutro, de fuente), disparos imprevistos, envejecimiento acelerado, degradación del rendimiento energético, pérdida de productividad.	Choques (self) anti-armónicos, filtro pasivo o activo, filtro hibrido, inductancia de línea, aumentar la Pcc. Agrupar las cargas perturbadoras. Desclasificar los equipos.
interarmónicos	Cargas fluctuantes (hornos de arcos, maquinas de soldar), convertidores de frecuencia.	perturbación de las señales de tarificación, parpadeo (flicker)	reactancia en serie
Sobretensiones transitorias.	Maniobra de aparamenta y de condensadores, rayo.	Bloqueo de variadores de velocidad, disparo intempestivos, destrucción de la aparamenta, incendios, perdidas de explotación.	Limitador de sobretensión, pararrayos, conexión sincronizada, resistencia de preinsercion, bobina (self de choque), compensador automático estático.
desequilibrios de tension	cargas desequilibradas(cargas monofásica de gran potencia)	Par motor invertido (vibraciones) y sobrecalentamiento de maquinas asíncronas.	Equilibrar las cargas. Compensador electrónico shunt, regulador electrónico dinámico de tensión. Aumentar la Pcc.

4. CONCLUSIONES

Mediante la elaboración de este trabajo se agrupo una serie de parámetros y criterios normativos nacionales e internacionales necesarios para la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica en Colombia. Se concluye que la calidad de la energía eléctrica está en función de los posible fenómenos perturbadores y de las propiedades específicas de estos, por esta razón resulta necesario implementar una metodología de análisis para poder solucionar problemas de potencia eléctricas específicos.

Por otro lado se estipulo que la calidad de la potencia eléctrica tiene implicados conceptos de preservación y beneficio al usuario final haciendo referencia en la ley 143 de 1994, garantizando con esto que se presenten lo menos posible fallas que atenten contra de la vida humana y la parte ambiental. Como bien sabemos los fenómenos eléctricos perturbadores a nivel de generación y transmisión afectan directamente la parte ambiental, la presencia de pedidas energéticas a nivel de transmisión y uso final ocasiona un mayor utilización de las generadores los cuales a su vez emitirán mas producto contaminante al medio ambiente.

Por consiguiente se establece un claro criterio de cómo se deben seguir los pasos a la hora de analizar un sistema eléctrico de transmisión y distribución de energía teniendo en cuenta el orden de los mismos. Y mostrando las ventajas que tiene hacer un buen uso de los analizadores de redes con un buen equipamiento acorde a los niveles de tensión y corriente, dando así una gran importancia del control de los parámetros que definen la CPE.

Y por último se dan las soluciones necesarias para llevar un sistema eléctrico y de potencia a mejorar su eficiencia y disminuir las perturbaciones de acuerdo a su clasificación que establece el estándar internacional IEEE 1159 DE 1995 después de ser analizado por los equipos especializados y de haber obtenido los insumos recopilados de análisis previos, dándonos así una clara acción para contrarrestar estos fenómenos.

5. REFERENCIAS

- [1] IEEE. Institute of Electric and Electronic Engineers - Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, New York: IEEE, 1.995. 101 p. (IEEE Standard 1159 – 1.995).
- [2] IEEE. Institute of Electric and Electronic Engineers - Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, New York: IEEE, 1.992. 101p. (IEEE Standard 519 – 1.992).
- [3] IEC. International Electro-technical Commission - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems: IEC, 1.990. 48 p. (IEC 61000-2-2 (1990-05))
- [4] IEC. International Electro-technical Commission - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 3: Limitation of voltage fluctuations and *flicker* in low-voltage supply systems for equipment with rated current ≤ 16 A: IEC, 1.994. 44 p. (IEC 61000-3-3 (1994-12)).
- [5] IEC. International Electro-technical Commission - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication: IEC, 1.996. 62 p. (IEC/TR3 61000-3-6 (1996-10)).
- [6] IEC. International Electro-technical Commission - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 15: *Flickermeter* - Functional and design specifications: IEC, 1.997. 48 p. (IEC 61000-4-15 (1997-11)).