

ESPECIALIZACIÓN EN

SDE

SISTEMAS * DISTRIBUCIÓN * ENERGÍA ELÉCTRICA

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES



FUNCIONES DE LA OPERACIÓN_ Calidad de la Potencia Eléctrica: Métodos de recolección, procesamientos y presentación de datos de operación de los sistemas de distribución.

Profesor: JAIRO BLANCO SOLANO
Candidato a Doctor - Área Ing. Eléctrica
Grupo GISEL



Universidad
Industrial de
Santander



CONSTRUIMOS FUTURO

Contenido

- I. Propósito del curso
 - II. Introducción
 - III. Calidad de la energía eléctrica: definiciones
 - IV. Clasificación general de fenómenos
 - V. Transitorios
 - VI. Variaciones de corta duración
 - VII. Variaciones de larga duración
 - VIII. Desbalances
 - IX. Distorsiones en la forma de onda
 - X. Fluctuaciones de tensión
 - XI. Variaciones de frecuencia
 - XII. Algunas estrategias de compensación
-

Introducción

Interés en la calidad de la potencia eléctrica

Sector eléctrico y usuarios finales del sistema:

- Definiciones asociadas a la calidad de la potencia eléctrica
- Causas y efectos
- Estándares o normatividad
 - Definición de fenómenos electromagnéticos
 - Técnicas de medición y monitorización
 - Interpretación de resultados de monitorización
 - Límites de emisión
- Estrategias para mitigación de perturbaciones

Introducción

Aspectos relacionados con la CPE:

- ✓ Los equipos se han vuelto más sensibles a las perturbaciones de tensión
- ✓ Productividad para los clientes
- ✓ Utilización de cargas altamente no lineales y equipos que causan perturbaciones
- ✓ Necesidad de estándares, normatividad y criterios de rendimiento
- ✓ Monitorización
- ✓ Mayor eficiencia y mejor calidad de la energía

Normatividad

Organizaciones relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica:

- ✓ *International Electrotechnical Commission (IEC):*
 - Fue fundada en 1906.
 - Organización cuyo propósito principal es promover entre sus miembros la cooperación internacional en todas las áreas de la normalización electrotécnica.
 - Ha desarrollado una amplia variedad de estándares en compatibilidad electromagnética.
 - A la fecha la IEC cuenta con 82 miembros, cada uno de ellos representando a un país, y que en conjunto constituyen el 95% de la energía eléctrica del mundo. Este organismo normaliza la amplia esfera de la electrotécnica, desde el área de potencia eléctrica hasta las áreas de electrónica, comunicaciones, conversión de la energía nuclear y la transformación de la energía solar o eólica en energía eléctrica.

Normatividad

Organizaciones relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica:

- ✓ *International Council on Large Electric Systems (CIGRE):*
 - Organización mundial en cuyos propósitos está proveer requisitos por medio de la clarificación de problemas técnicos relacionados con redes de muy altas tensiones.
 - Respaldada por la IEC en 1921.
 - Sus investigaciones son consideradas y facilitan el trabajo de normalización de la IEC.

- ✓ *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC):*
 - Responsable de la estandarización europea en las áreas de ingeniería eléctrica.
 - Es una institución de la Comunidad Económica Europea (CEE).

Normatividad

Organizaciones relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica:

✓ *Comisión panamericana de normas técnicas (COPANT):*

- Asociación civil sin fines de lucro, que funciona con plena autonomía y sin término de duración.
- Agrupa a los Organismos Nacionales de Normalización (ONN) de las Américas, que actualmente suman 31 miembros activos y 9 miembros adherentes.
- Referente de normalización técnica y evaluación de la conformidad de los países de las Américas y sus pares internacionales, y promueve el desarrollo de sus miembros

Normatividad

Organizaciones relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica:

- ✓ *American National Standards Institute (ANSI):*
 - Fundado en 1918 por cinco asociaciones de ingenieros y tres agencias gubernamentales.
 - Organización sin ánimo de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.
 - Miembro de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

Normatividad

Organizaciones relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica:

- ✓ *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC):*
 - Entidad privada sin ánimo de lucro fundada en 1963. Organismo de Normalización de Colombia.
 - Representante de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), en Colombia
 - Creación de normas técnicas y la certificación de normas de calidad para empresas y actividades profesionales.
 - Representa a Colombia ante organismos de normalización internacionales y regionales como la Organización Internacional de Normalización (OIN), la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), y la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT).

Organizaciones relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica:

- ✓ *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE):*
 - Creado en Estados Unidos en 1884. Se encargo durante 30 años del desarrollo de las normas de este país.
 - En la actualidad, el IEEE continúa como un instituto técnico profesional, sin ánimo de lucro, con más de 425000 miembros individuales en alrededor de 160 países.

Normatividad

Normas técnicas o estándares relacionados con la calidad de la potencia:

- ✓ IEC 61000
 - Estándares en compatibilidad electromagnética
 - Incluyen algunos estándares en calidad de la energía.
 - Compatibilidad electromagnética: la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético, sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables sobre cualquier cosa en su entorno.

 - 61000-1: Generalidades
 - Consideraciones generales
 - Definiciones, terminología
 - 61000-2: Entorno electromagnético
 - Descripción y clasificación del entorno (clases de entorno)
 - Niveles de compatibilidad
 - Características de la tensión

Normatividad

Normas técnicas o estándares relacionados con la calidad de la potencia:

- 61000-3: Límites
 - Límites de emisión
 - Límites de inmunidad

61000-3-2 y 61000-3-6: Límites de emisiones para corrientes armónicas
61000-3-3, 61000-3-5 y 61000-3-7: Límites de emisiones para fluctuaciones de tensión
- 61000-4: Técnicas de ensayo y de medida
61000-4-7: Guía general en instrumentación y medición de armónicos e interarmónicos.
- 61000-5: Guías de instalación y de atenuación
 - Guías de instalación
 - Métodos y dispositivos de atenuación
- 61000-6: Estándares genéricos
- 61000-9: Misceláneos

Normatividad

Normas técnicas o estándares relacionados con la calidad de la potencia:

- ✓ Estándar europeo 501 60 (CENELEC):
 - Norma actualmente utilizada sobre calidad de potencia y compatibilidad electromagnética.
 - Presenta las principales características de la tensión en los terminales de alimentación del usuario en redes públicas de baja y media tensión bajo condiciones de operación normal.
 - Se mencionan algunas perturbaciones, sus principales características y los límites para redes de baja tensión (ejemplo: límites de magnitud de tensión, distorsión armónica, fluctuación de tensión, desbalance en tensión, frecuencia).
- ✓ ANSI C84 y C62
 - Estándares nacionales americanos para sistemas de potencia eléctricos y equipos
 - ANSI C84.1 – Tensiones nominales (60 Hz)
 - ANSI C62.41 - Transitorios

Normatividad

✓ IEEE 1159-2009:

- Presenta la terminología y las definiciones de los diferentes fenómenos electromagnéticos relacionados con la calidad de la energía eléctrica.
- Clasifica los diferentes fenómenos electromagnéticos.
- Guía general sobre monitorización de la calidad de la energía, equipos de medición, calibración.
- Interpretación de resultados de monitorización.

✓ IEEE 519-2014

- *Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*
- Definiciones, generación de armónicos, efectos de los armónicos.
- Control y compensación
- Métodos de análisis, medición

Normatividad

En Colombia:

- ✓ NTC 5000:
 - Norma técnica colombiana, 2002.
 - Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales.
 - Características típicas de los fenómenos electromagnéticos.
- ✓ NTC 5001:
 - Norma técnica colombiana, 2008.
 - Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común.
 - Métodos de medida.
 - Perturbaciones de calidad de potencia.
- ✓ NTC 1340 :
 - Tensiones y frecuencia nominales en sistemas de energía eléctrica en redes de servicio

Normatividad

En Colombia:

- ✓ NTC-IEC 61000-4-30, 2012
 - Compatibilidad electromagnética. Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de la potencia.
- ✓ Regulación - CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas)
 - Entidad colombiana encargada de regular los servicios de electricidad y gas según se establece en la ley 142 y 143 de 1994.

Resoluciones sobre calidad de la energía:

- 070/1998: Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica
- 096/2000: Normas relacionadas con el período de transición de que trata el reglamento de distribución de energía eléctrica. Estándares de calidad del servicio.

Normatividad relacionada y marco actual

Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica

CREG 024 (2005)

- Definiciones de calidad de la potencia eléctrica
- Equipos de medición reconocidos en la CREG 082 (2002)
- Plan para instalar el sistema de medición y registro
- Plan de Recolección de Datos
- Reporte Valores de Indicadores
- Límites del PST.

Normatividad relacionada y marco actual

CREG 065
(2012)



Pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional

- Definiciones de calidad de Potencia
- Indicadores de calidad de la potencia y métodos de medida.
- Responsabilidad por la calidad de la potencia en el SIN
- Sistema de medición y registro de la calidad de la potencia, SMRCP.
- Reporte de indicadores de calidad de la potencia
 - Informe de calidad de la potencia.
- Revisión y corrección de perturbaciones de la calidad de la potencia.
 - Contratos de calidad de la potencia.
 - Reclamaciones ante los Operadores de Red y Transmisores Nacionales.

Calidad de la potencia eléctrica

Definiciones:

- ✓ El término calidad de la potencia se refiere a la amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente, en un tiempo determinado y en un lugar determinado del sistema eléctrico de potencia (IEEE-1159).
- ✓ El término calidad de la potencia eléctrica se refiere al conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, para un tiempo y lugar determinados, que tienen el propósito de satisfacer las necesidades del cliente (NTC-5000).
- ✓ Ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de tensión rms suministrada al usuario; esto concierne a la estabilidad de tensión, frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico (Harper, 1999).

Calidad de la potencia eléctrica

Definiciones:

- ✓ La calidad de la potencia eléctrica se relaciona con las desviaciones de las señales de tensión y/o corriente de su ideal. La tensión ideal es una onda sinusoidal de frecuencia constante y magnitud constante (Bollen, 2000) .
- ✓ Calidad de la potencia eléctrica se refiere al conjunto de límites que permiten a un equipo funcionar en su manera prevista sin pérdidas significativas de rendimiento o tiempo de vida (Sankaran, 2000).
- ✓ Conjunto de propiedades inherentes a la energía eléctrica (amplitud, frecuencia, forma de onda y continuidad) que le confieren capacidad para satisfacer necesidades implícitas o explícitas (Torres, 2005).
- ✓ Compatibilidad electromagnética: la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético, sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables sobre cualquier cosa en su entorno (IEC).

Calidad de la potencia eléctrica

Calidad de potencia eléctrica: características de la electricidad en un punto dado de un sistema eléctrico, evaluado contra un conjunto de parámetros técnicos de referencia.

PERTURBACIÓN:

Cualquier desviación de las señales de tensión y/o corriente con respecto a una forma de onda sinusoidal ideal, se puede considerar como una perturbación.

Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas

Categorías según estándar IEEE 1159-2009 :

1. Transitorios
2. Variaciones rms de corta duración
3. Variaciones rms de larga duración
4. Desbalances
5. Distorsiones en la forma de onda
6. Fluctuaciones de tensión
7. Variaciones de frecuencia

Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
I. TRANSITORIOS			
I.1 IMPULSIVOS			
Nanosegundos	5 ns elevación	< 50 ns	
Microsegundos	1 μ s elevación	50 ns – 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms elevación	> 1 ms	
I.2 OSCILATORIOS			
Baja Frecuencia	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
Media Frecuencia	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
Alta Frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu

Estándar IEEE I 159-2009

Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
2. VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN			
2.1 INSTANTÁNEAS			
Hundimientos de tensión		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
Elevaciones		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 MOMENTÁNEAS			
Interrupciones		0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
Hundimientos de tensión		30 ciclos – 3 s	0.1 a 0.9 pu
Elevaciones		30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu
2.3 TEMPORALES			
Interrupciones		3 s – 1 min	< 0.1 pu
Hundimientos de tensión		3 s – 1 min	0.1 - 0.9 pu
Elevaciones		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu

Estándar IEEE 1159-2009

Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
3. VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
3.1 Interrupciones sostenidas		>1 min	0.0 pu
3.2 Baja tensión		>1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Sobretensión		>1 min	1.1 – 1.2 pu
4. DESBALANCES		Estado Estable	
4.1 Tensión		Estado Estable	0.5- 2%
4.2 Corriente		Estado Estable	1.0-30%

Estándar IEEE 1159-2009

Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
5. DISTORSIÓN DE FORMA DE ONDA			
5.1 Componente de DC		Estado Estable	0 – 0.1%
5.2 Armónicos	0 – 9 kHz	Estado Estable	0 – 20%
5.3 Interarmónicos	0 – 9 kHz	Estado Estable	0 – 2%
5.4 Muestras		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda – ancha	Estado Estable	0 – 1 %
6. FLUCTUACIONES DE TENSIÓN	<25 Hz	Intermitente	0.1 – 7% 0.2-2 Pst
7. VARIACIONES DE FRECUENCIA		<10 s	±0.10 Hz

Estándar IEEE 1159-2009

Transitorios

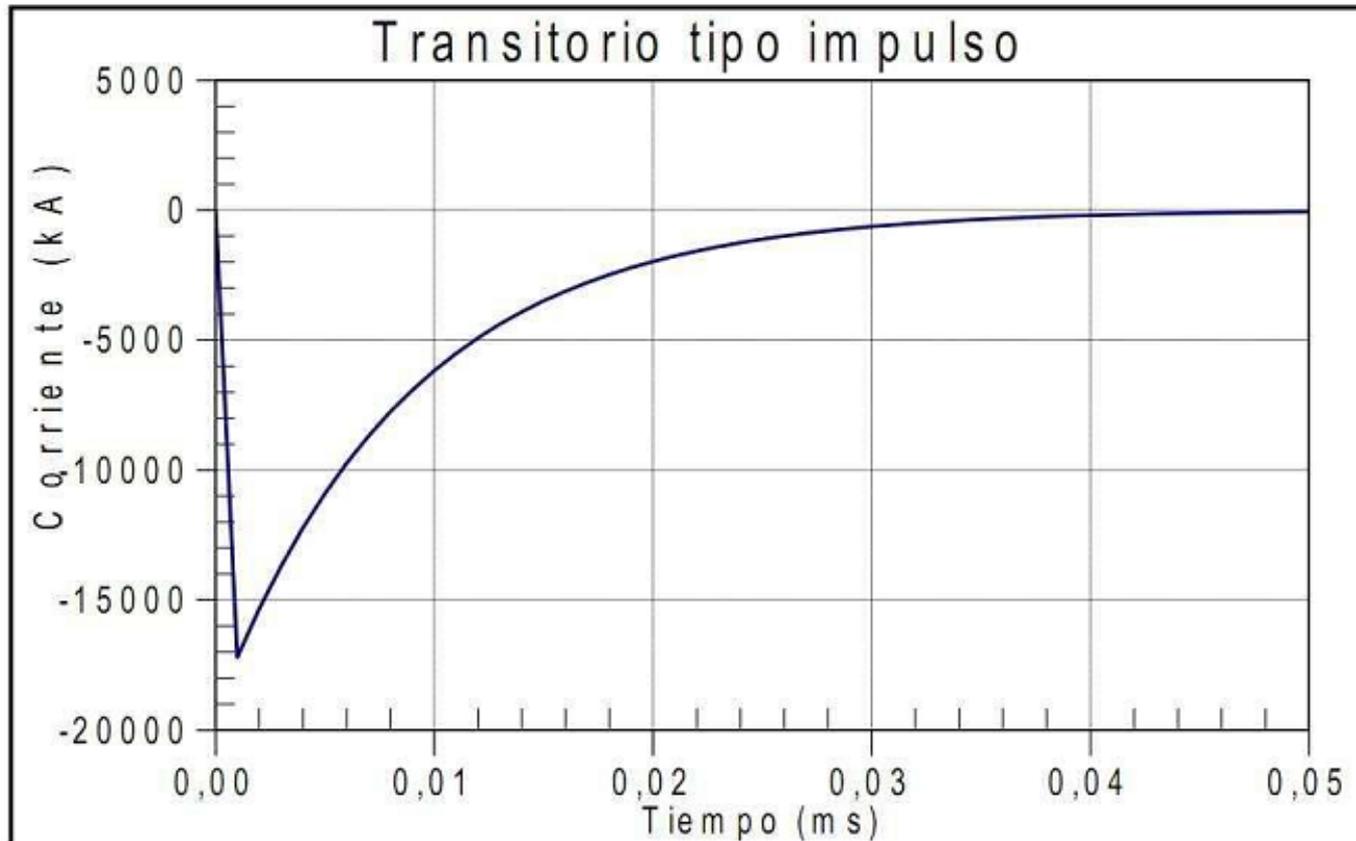
- Cambios repentinos en las condiciones de la red.
- Eventos de corta duración que se caracterizan por su contenido elevado de componentes de alta frecuencia.

✓ TRANSITORIOS IMPULSIVOS

- Es un cambio repentino a una frecuencia distinta a la fundamental a partir de las condiciones nominales de tensión, corriente, o ambas.
- Es unidireccional en su polaridad (positivo o negativo).
- Se caracterizan por su tiempo de subida (tiempo de cresta) y su tiempo de decaimiento (tiempo de cola).

Transitorios

Ejemplo:



Estándar IEEE 1159-2009

Forma de onda 1.2/50: - Tiempo de subida de $1.2 \mu\text{s}$
- Tiempo de decaimiento de $50 \mu\text{s}$

Transitorios

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
I. TRANSITORIOS			
I.1 IMPULSIVOS			
Nanosegundos	5 ns elevación	< 50 ns	
Microsegundos	1 μ s elevación	50 ns – 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms elevación	> 1 ms	

- Debido a su contenido elevado de componentes de alta frecuencia, los transitorios son amortiguados rápidamente por los elementos resistivos del circuito y no son conducidos a largas distancias desde su fuente.
- Causa más común: descargas atmosféricas.
- Los transitorios impulsivos pueden excitar circuitos resonantes del sistema eléctrico y producir transitorios oscilatorios.

Transitorios

✓ TRANSITORIOS OSCILATORIOS

- Es un cambio repentino a una frecuencia distinta a la fundamental en condición de estado estacionario de la tensión, corriente, o ambas.
- Presenta polaridades tanto positiva, como negativa.
- Consiste de una tensión o corriente cuyo valor instantáneo cambia la polaridad rápidamente.
- Los transitorios oscilatorios pueden ser medidos con o sin la componente de frecuencia fundamental. Cuando se caracteriza el transitorio, es importante indicar la magnitud con y sin componente fundamental.

Transitorios

✓ TRANSITORIOS OSCILATORIOS

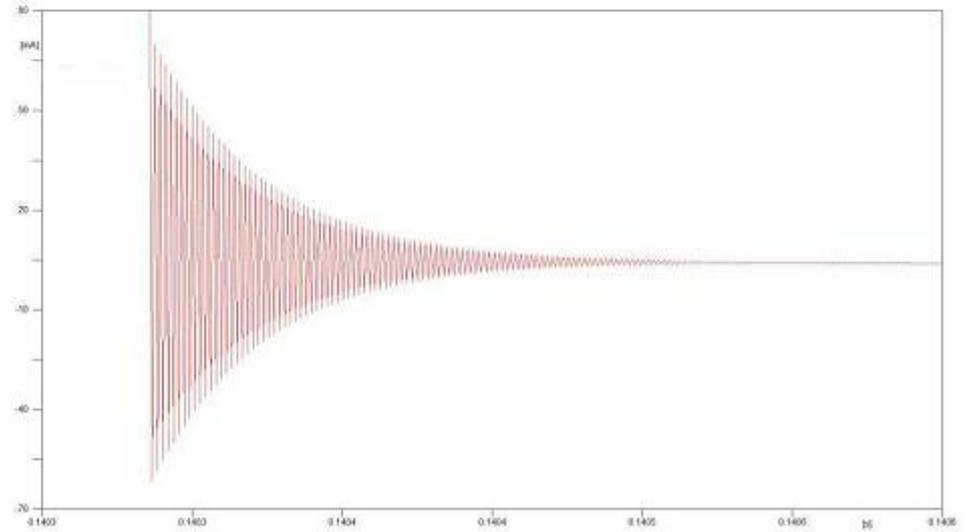
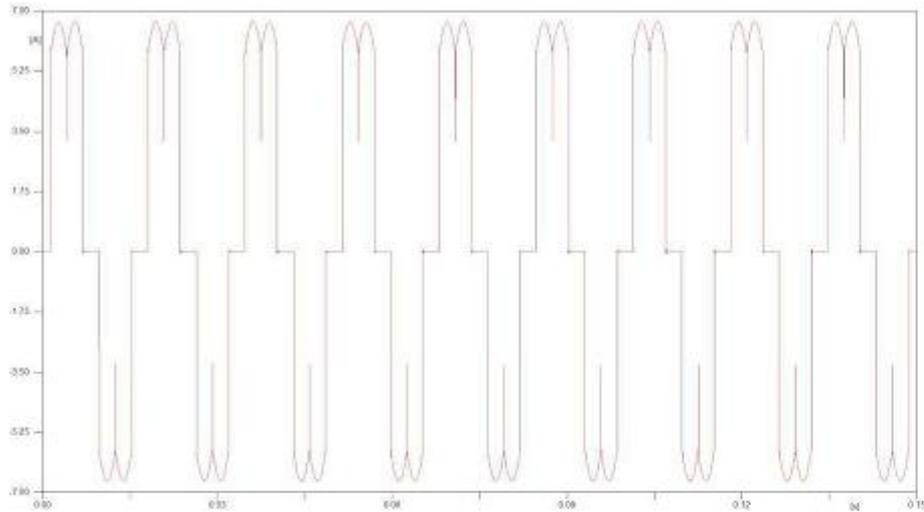
- Se describen por su magnitud, duración y contenido espectral.
- La clasificación se realiza según los tipos más comunes de fenómenos transitorios en el sistema eléctrico.

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
1.2 OSCILATORIOS			
Baja Frecuencia	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
Media Frecuencia	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
Alta Frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu

Transitorios

- Alta frecuencia:
 - Componentes de frecuencia mayores a 500 kHz.
 - Duración típica en μs .
 - Causas típicas: Eventos de conmutación.
Respuesta del sistema local a un transitorio tipo impulso.
Dispositivos basados en electrónica de potencia

Transitorios



Transitorios

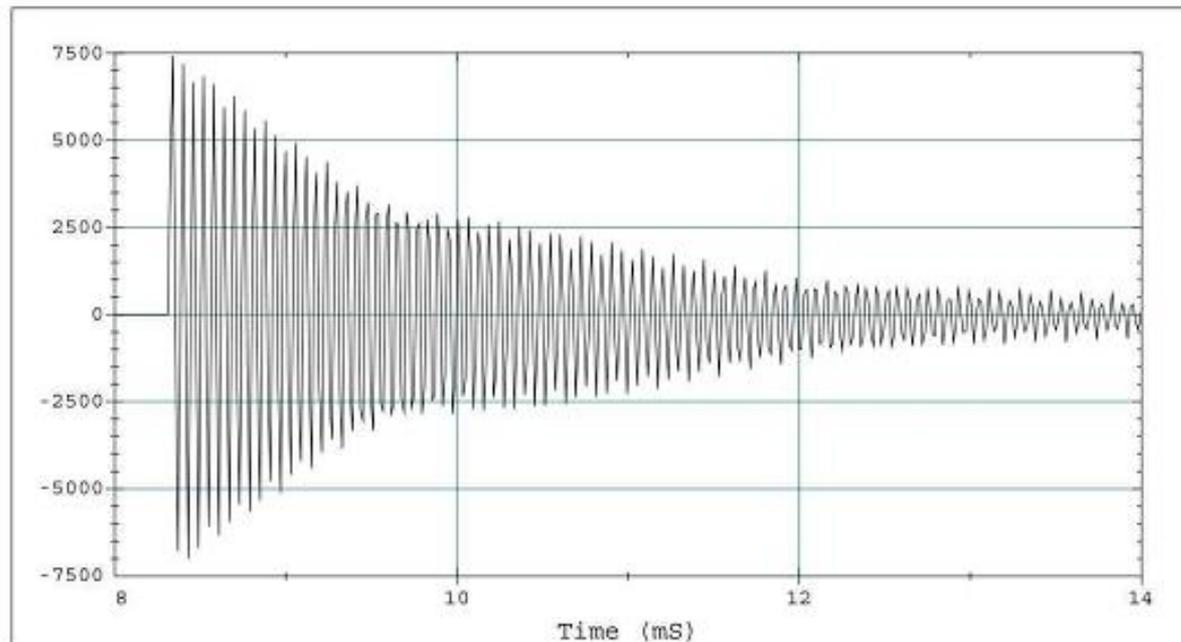
- Media frecuencia:

- Componentes de frecuencia entre 5 kHz y 500 kHz.

- Duración típica en μs .

- Causas típicas: Energización de capacitores.

Respuesta del sistema a un transitorio impulsivo

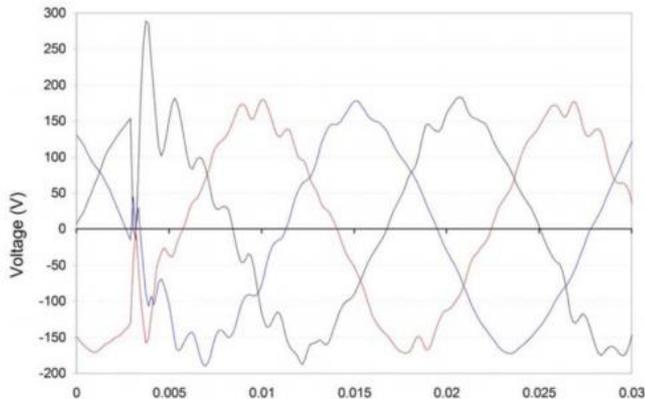


Estándar IEEE 1159-2009

Transitorios

- Baja frecuencia:

- Componentes de frecuencia menores a 5 kHz.
- Duración típica entre 0.3 ms y 50ms.
- Se presentan típicamente en sistemas de distribución.
- Causas típicas: Energización de bancos de capacitores (frecuencia primaria entre 300 Hz y 900 Hz, amplitud pico típica entre 1,3 pu y 1.5 pu, duración entre 0.5 ciclos y 3 ciclos de la fundamental).



Estándar IEEE 1159-2009

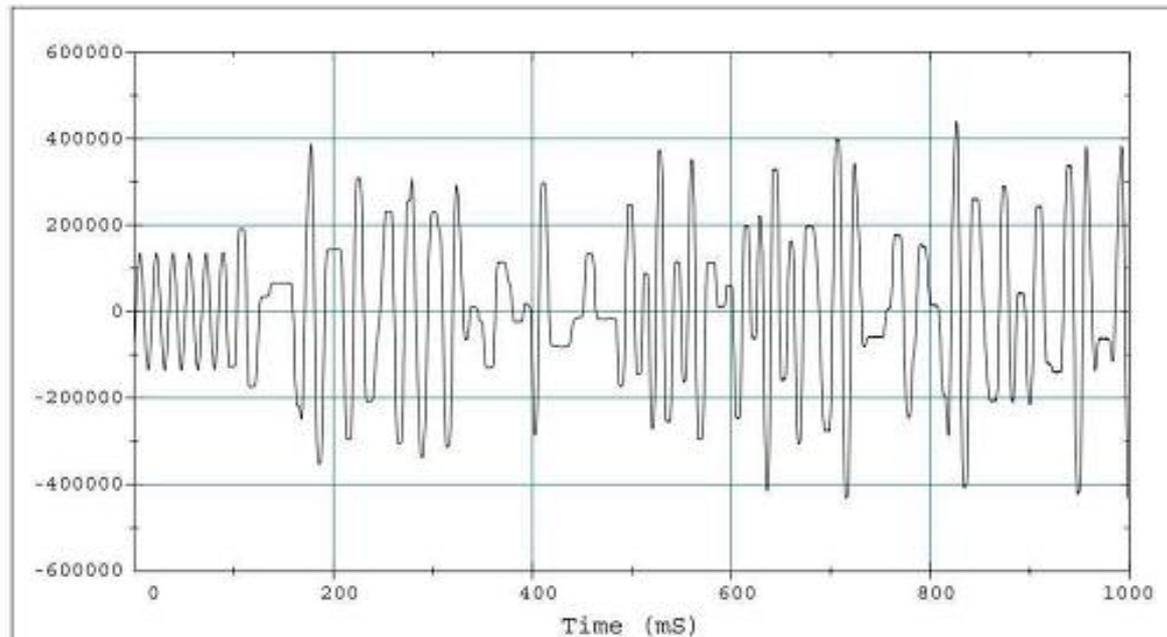
Analizar:

- ✓ IEEE_34_Nodes_Bancos_Condensadores
- ✓ IEEE_34_nodes_conmutacion

Transitorios

- Baja frecuencia:

- Causas típicas: Energización de transformadores, ferorrresonancia, condensadores en serie (frecuencia primaria menor a 300 Hz).
- C62.4I: Transitorios



Estándar IEEE 1159-2009

Variaciones de corta duración

Desviación del valor eficaz de la onda de tensión para un tiempo mayor a 0,5 ciclos y menor o igual a 1 minuto.

	CATEGORÍAS	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
2.	VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN		
	2.1 INSTANTÁNEAS		
	Hundimientos de tensión	0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
	Elevaciones	0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
	2.2 MOMENTÁNEAS		
	Interrupciones	0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
	Hundimientos de tensión	30 ciclos – 3 s	0.1 a 0.9 pu
	Elevaciones	30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu
	2.3 TEMPORALES		
	Interrupciones	3 s – 1 min	< 0.1 pu
	Hundimientos de tensión	3 s – 1 min	0.1 - 0.9 pu
	Elevaciones	3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu

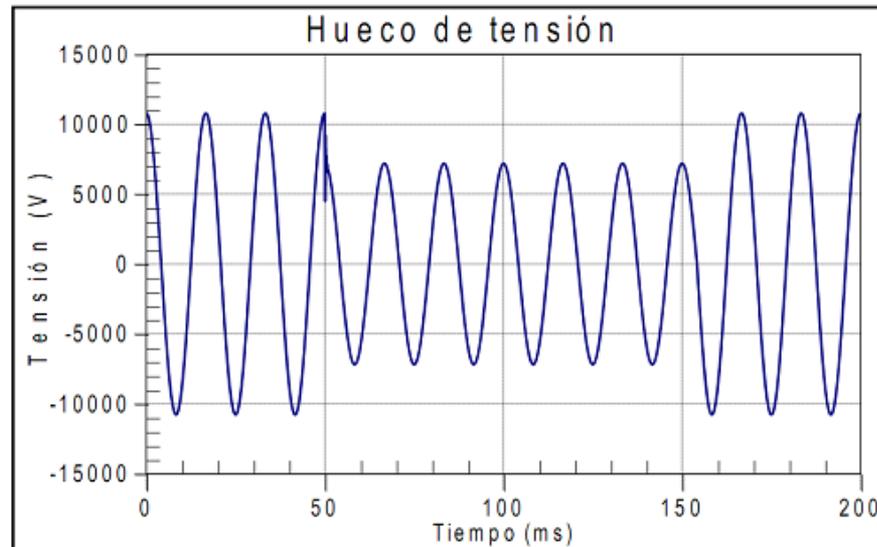
Principales causas:

- ✓ Condiciones de falla
- ✓ Energización de grandes cargas que requieran altas corrientes de arranque
- ✓ Conexiones sueltas en cables de potencia

Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)

- Es una reducción en el valor rms de la tensión entre 0.1 pu y 0.9 pu de la tensión de referencia, para duraciones entre 0.5 ciclos y 1 minuto.
- Reducción repentina en la tensión en un punto particular del sistema eléctrico de potencia, por debajo de un valor umbral, seguida de una recuperación después de un intervalo corto.



Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)

El nivel del hundimiento es determinado por los siguientes parámetros:

- ✓ Tensión de referencia
- ✓ Tensión umbral
- ✓ Umbral
- ✓ Profundidad de hundimiento de tensión
- ✓ Duración del hundimiento de tensión

Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)

✓ Duración del hundimiento

- Depende principalmente por el tiempo de operación del dispositivo que actúe para desconectar el corto circuito o la falla del sistema, principalmente, fusibles, *circuit-breakers* o relés de protección.
- Reducción de la duración del hueco.
- Tiempos de actuación:
 - Tiempos rápidos pueden conseguirse para corto circuitos en líneas de transmisión (60 a 150 ms).
 - Tiempos más lentos se consiguen en sistemas de distribución (0.5 a 2s).
- Algunas cargas, como motores eléctricos, demandan altas corriente repentinas al momento de la recuperación de la perturbación. Esto puede resultar en un aumento en la duración del hueco de tensión.

Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)

✓ Magnitud del hundimiento

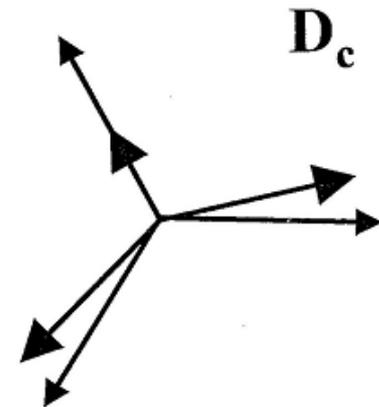
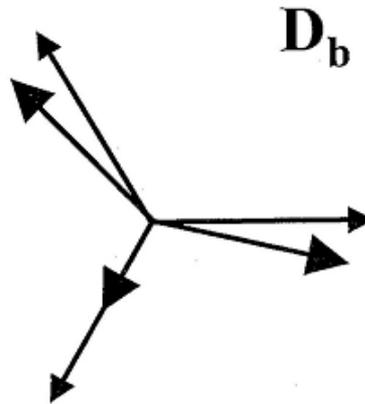
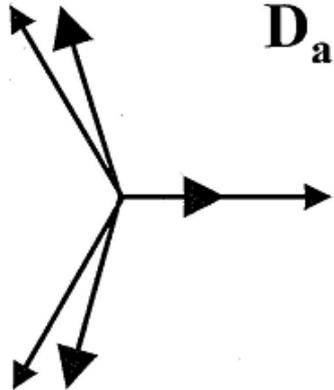
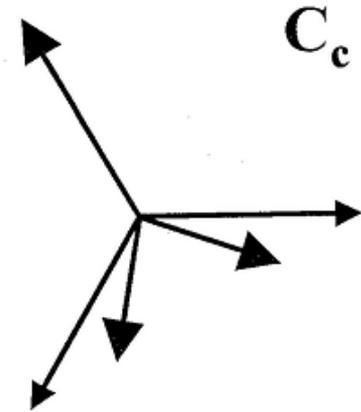
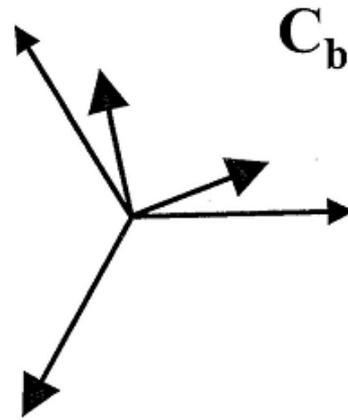
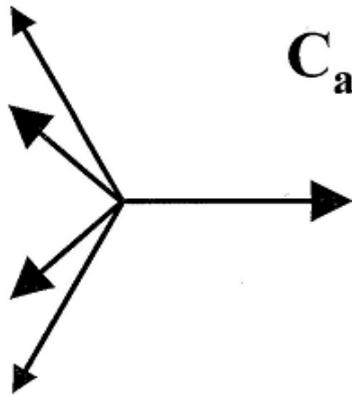
- Depende de la distancia eléctrica entre el punto de observación, el sitio en el cual ocurrió la falla y la fuente de alimentación.
- Un corto circuito en un sistema de transmisión resultará en un hueco que es observado en una amplia área, incluso a una distancia de algunos cientos de kilómetros.
- Un corto circuito en un sistema de distribución tendrá un campo de influencia mucho más pequeño.

Tipos de huecos de tensión (A-B-C-D-E-F-G):

- Describe las diferentes características de los huecos de tensión, las cuales pueden ser experimentadas en los terminales del usuario final, para diferentes condiciones de falla y configuraciones del sistema.

Variaciones de corta duración

Representación de los tipos de hundimientos de tensión

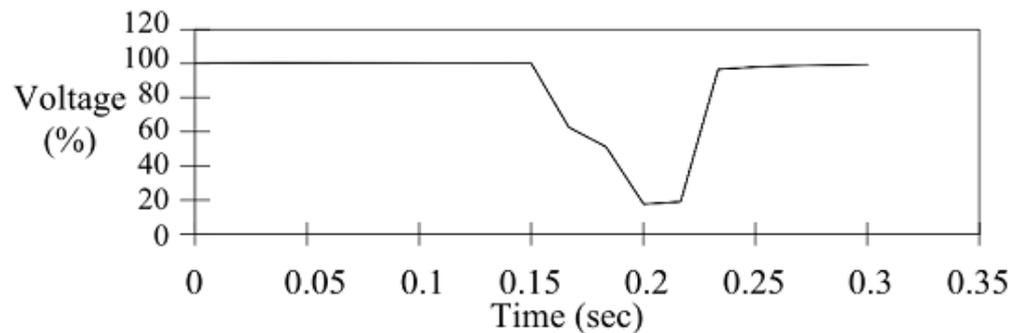


Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)

✓ Causas:

- Fallas en el sistema: causan altas corrientes, las cuales, a su vez llevan a caídas de tensión a través de las impedancias del sistema. Estas fallas muchas veces son inevitables. Los tiempos para limpiar la falla dependen de la magnitud de la corriente de falla y del tipo de protección de sobre corriente.



Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)

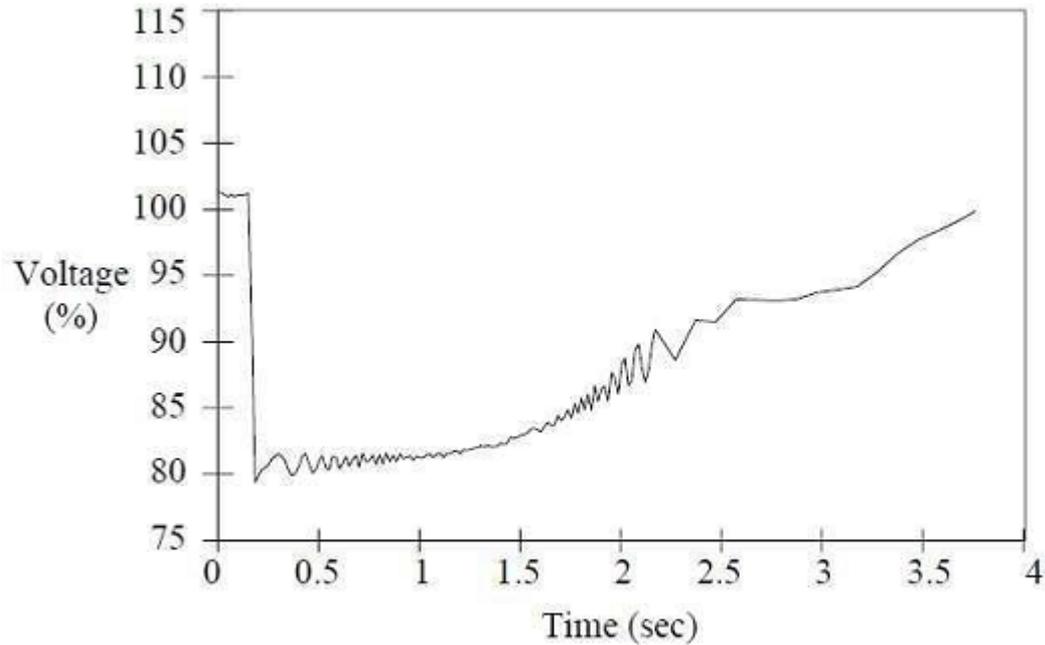
✓ Causas:

Los dispositivos de protección se utilizan para desconectar el corto circuito. Cuando el dispositivo se acciona, se recupera la tensión a aproximadamente su valor previo de la falla.

- Conmutación de grandes cargas, hornos de arco, equipos de soldadura o arranque de motores. Éstos pueden producir grandes cambios en corriente.

Variaciones de corta duración

Hundimiento de tensión (dip o sag)



Estándar IEEE 1159-2009

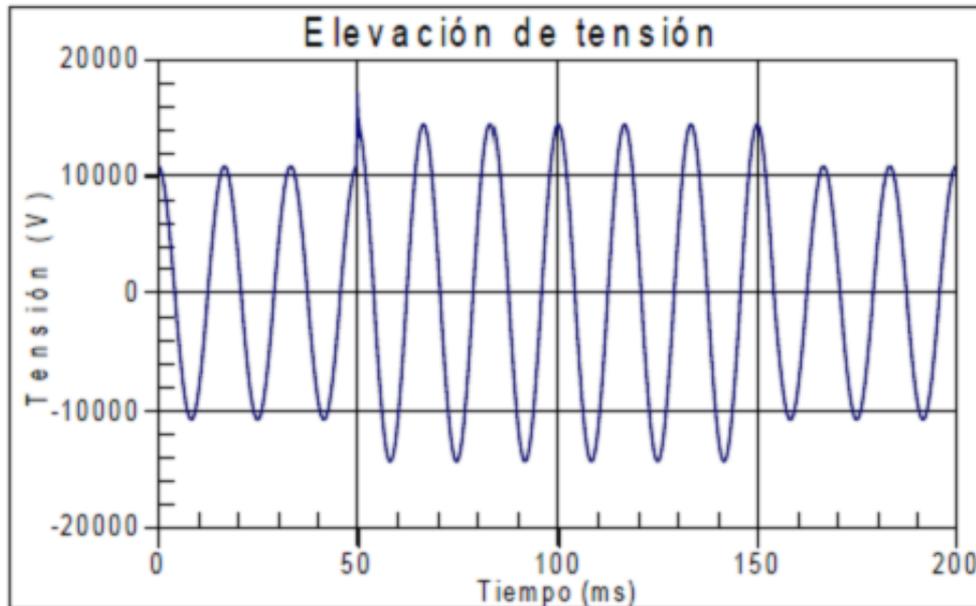
Analizar:

IEEE_34_Nodes_Fallas

Variaciones de corta duración

✓ ELEVACIONES DE TENSIÓN (SWELLS)

- Es un incremento en el valor rms de la tensión por encima de 1.1 pu de la tensión de referencia, para duraciones entre 0.5 ciclos y 1 minuto.
- Las magnitudes típicas están entre 1.1 y 1.2 pu.



Variaciones de corta duración

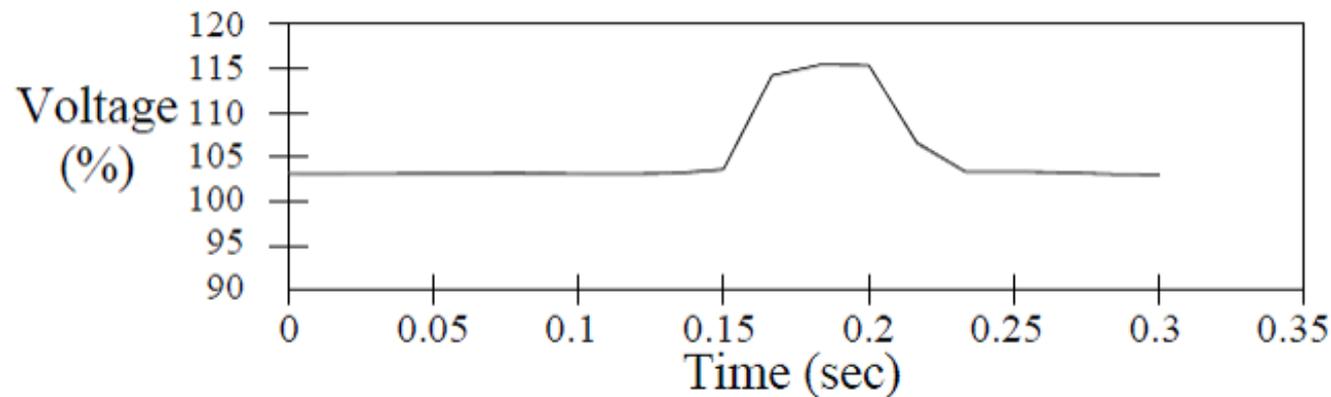
✓ ELEVACIONES DE TENSION (SWELLS)

- El nivel de la elevación también es determinado por los siguientes parámetros:
 - Tensión de referencia
 - Tensión residual (siempre mayor a 1.0 pu)
 - Umbral
 - Duración
- Son menos comunes que los hundimientos de tensión
- Causas:
 - Condiciones de falla pueden resultar en una elevación de tensión en las fases en donde no ocurre la falla.
 - Desconexión de grandes cargas.
 - Conmutación de grandes bancos de condensadores.

Variaciones de corta duración

✓ ELEVACIONES DE TENSIÓN (SWELLS)

- Magnitud de la elevación:
 - Depende de la distancia eléctrica entre el punto de observación, el sitio en el cual ocurrió la falla y la fuente de alimentación.



Estándar IEEE 1159-2009

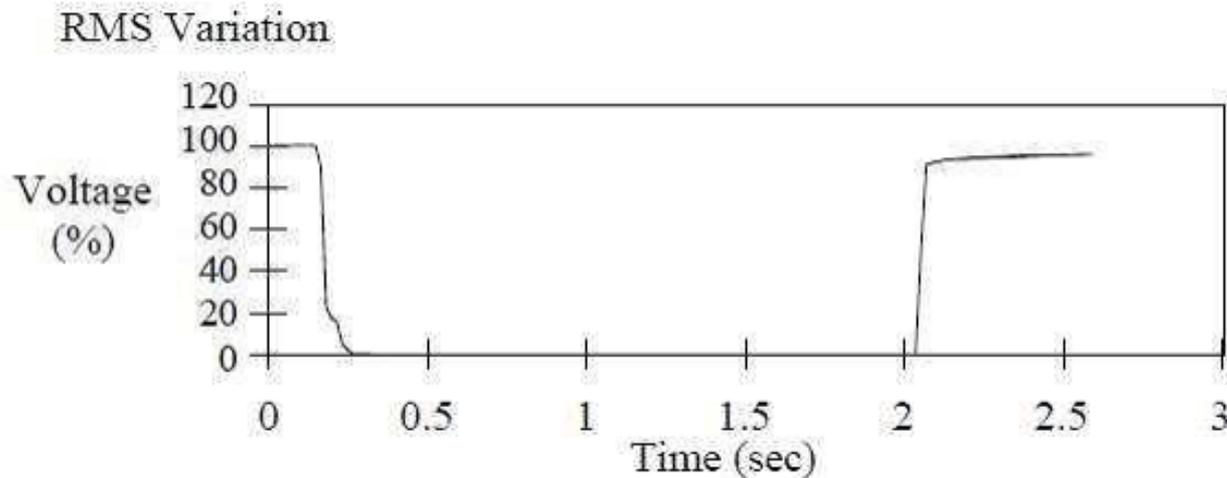
Analizar:

- ✓ Sistema_No_aterrizado

Variaciones de corta duración

✓ INTERRUPCIONES MOMENTÁNEAS Y TEMPORALES

- Ocurre cuando la tensión se reduce a menos del 0.1 pu de la tensión de referencia por un periodo de tiempo menor a 1 minuto.
- Es una reducción de la tensión en un punto del sistema eléctrico seguida de una restauración después de un corto intervalo.



Variaciones de corta duración

✓ INTERRUPCIONES MOMENTÁNEAS Y TEMPORALES

- Las interrupciones son medidas según:
 - Tensión de referencia
 - Umbral (0.1 pu)
 - Duración
- Causas: fallas en el sistema y fallos en equipos.
- Duración de la interrupción debida a una falla:
 - Depende principalmente por el tiempo de operación del dispositivo que actúe para desconectar el corto circuito o la falla del sistema, principalmente, fusibles, *circuit-breakers* o relés de protección.
- Algunas interrupciones pueden ser antecedidas por hundimientos de tensión, cuando éstas son debidas a fallas en el sistema.

Analizar:

IEEE_34_Nodes_Fallas

Variaciones de larga duración

Desviación del valor eficaz de la onda de tensión para un tiempo mayor un minuto.

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
3. VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
3.1 Interrupciones sostenidas		>1 min	0.0 pu
3.2 Sub-tensión		>1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Sobretensión		>1 min	1.1 – 1.2 pu

Principales causas:

- ✓ Condiciones de falla
- ✓ Variaciones de carga en el sistema
- ✓ Operaciones de conmutación

Variaciones de larga duración

✓ INTERRUPCIONES SOSTENIDAS

- Reducción de la tensión de alimentación por debajo del 10% del valor nominal por un periodo mayor a 1 minuto.
- Este tipo de interrupciones son generalmente permanentes y requieren intervención manual para la restauración del sistema.
- Causas: fallas en el sistema

✓ SOBRETENSIÓN

- Incremento del valor rms de la tensión por encima del 1.1 pu con una duración de más de un minuto.
- Generalmente son el resultado de conmutación de cargas (desconexión de cargas grandes).
- Otras causas: Variación en la compensación de reactivos en el sistema, ya sea por bancos de capacitores o por sistemas activos de compensación.

Variaciones de larga duración

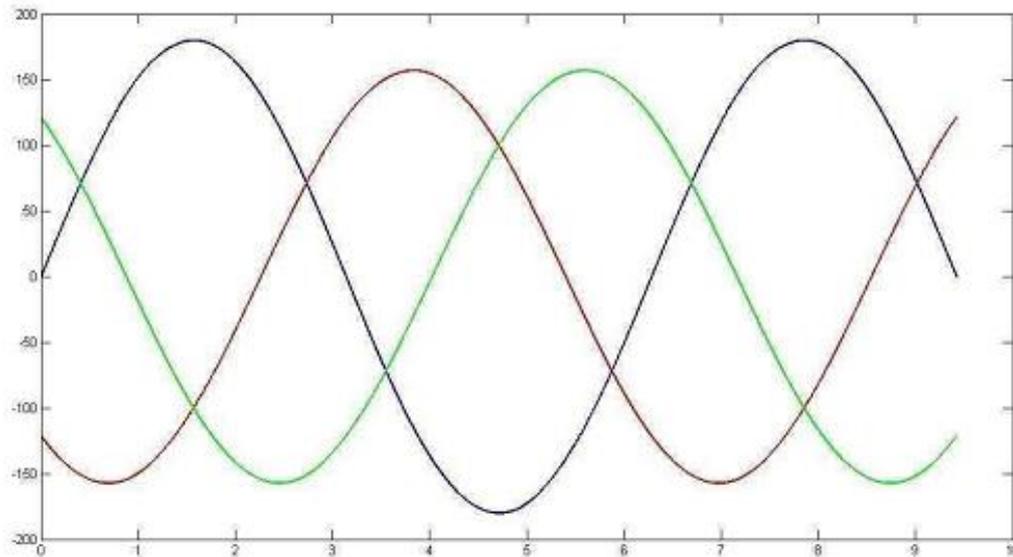
✓ BAJA TENSIÓN

- Reducción del valor rms de la tensión por debajo entre el 0.1 pu y el 0.9 pu del valor de referencia por un periodo mayor a 1 minuto.
- Valores típicos entre 0.8 pu y 0.9 pu.
- Sus causas son las opuestas de las de sobretensión
- Causas:
 - Conmutación de carga (conexión de grandes cargas)
 - Desconexión de bancos de condensadores.
 - Circuitos sobrecargados.

- ✓ Estas perturbaciones generalmente son caracterizadas mediante gráficas de tensión rms versus tiempo.

Desbalances

- ✓ En un sistema trifásico, el desbalance en tensión es definido como una condición en la cual las tres tensiones de fase son desiguales en magnitud o los ángulos de desfase entre ellas son diferentes a 120° .
- ✓ Una definición análoga puede ser aplicada a corrientes.



Desbalances

- ✓ Para analizar desbalances se utiliza generalmente el método de componentes simétricas.
- ✓ Cualquier sistema asimétrico trifásico puede ser descompuesto en tres sistemas simétricos trifásicos, uno de secuencia positiva, otro de secuencia negativa y otro de secuencia cero, por medio de la siguiente transformación:

$$\begin{pmatrix} V_a^0 \\ V_a^+ \\ V_a^- \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Desbalances

✓ Parámetros:

- Como medida del desbalance, se utiliza el factor **K**, calculado como la relación entre las componentes de secuencia negativa o secuencia cero y la componente de secuencia positiva.

$$K_{-} = \frac{|V_a^{-}|}{|V_a^{+}|} \cdot 100\%$$

$$K_0 = \frac{|V_a^0|}{|V_a^{+}|} \cdot 100\%$$

- Estos factores se pueden utilizar tanto para las tensiones, como para las corrientes.

Desbalances

- Generalmente el desbalance en tensión debido a componentes de secuencia negativa es más significativo.
- Las componentes de secuencia cero es normalmente presente solo en redes de baja tensión y la conexión delta del transformador previene su transferencia a redes de mayor tensión.
- El desbalance de tensión típico es menor al 3%. El desbalance en corriente puede ser considerablemente alto, especialmente ante la presencia de cargas monofásicas.

- Otras formulas para calcular el factor de desbalance para la secuencia negativa:

$$K_- = \left| \frac{V_a + a^2 V_b + a V_c}{V_a + a V_b + a^2 V_c} \right| \cdot 100\%$$

$$K_- = \left| \frac{V_{ab} - a V_{bc}}{V_{ab} - a^2 V_{bc}} \right| \cdot 100\%$$

Desbalances

- Determinación del factor del desbalance de secuencia positiva considerando solo los valores rms. Válido cuando las componentes de secuencia cero son nulas.

$$K_{-} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100\%$$

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{\left(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2\right)^2}$$

Desbalances

✓ Causas:

- Cargas monofásicas: la mayoría de cargas en las redes de baja tensión y algunas cargas en las redes de media tensión (motores de tracción eléctricos). La operación de estas cargas causan corrientes desbalanceadas, que a su vez llevan a caídas de tensión en fases individuales del sistema eléctrico, produciendo tensiones desbalanceadas en los nodos del sistema.
- Operación de cargas desbalanceadas, como hornos de arco (cientos de MVA): impedancias diferentes en los caminos de alta corriente del horno.
- Componentes trifásicos en los sistemas de transmisión. Debido a la geometría de las torres, los conductores de fases individuales no están simultáneamente en la misma localidad entre sí y con respecto a la tierra. Por lo tanto, las líneas tienen diferentes valores de parámetros de fase.

Analizar:

- ✓ IEEE_34_Nodes_Operación_Estable

Distorsiones en la forma de onda

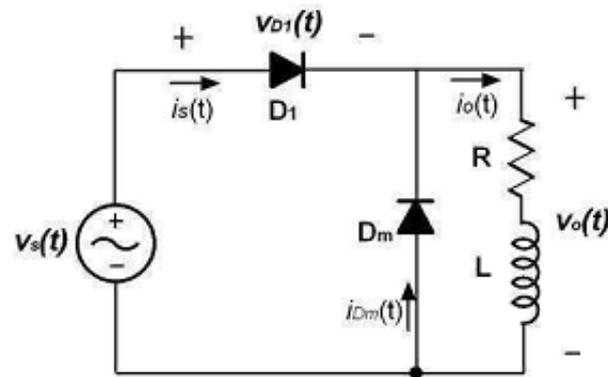
- ✓ Desviaciones en estado estable con respecto a la onda sinusoidal ideal (frecuencia fundamental), caracterizadas principalmente por el contenido de armónicos de la desviación.

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL TÍPICO	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD DE TENSIÓN TÍPICA
5. DISTORSIÓN DE FORMA DE ONDA			
5.1 Componente de DC		Estado Estable	0 – 0.1%
5.2 Armónicos	0 – 9 kHz	Estado Estable	0 – 20%
5.3 Interarmónicos	0 – 9 kHz	Estado Estable	0 – 2%
5.4 Muecas		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda – ancha	Estado Estable	0 – 1 %

Distorsiones en la forma de onda

✓ COMPONENTE DE DC:

- Presencia de una componente de continua en la tensión o en la corriente.
- *DC offset*.
- Causas: rectificadores de media onda.



- Componentes de DC pueden incrementar la saturación de los transformadores, lo cual va asociado con calentamiento y otros efectos adversos.

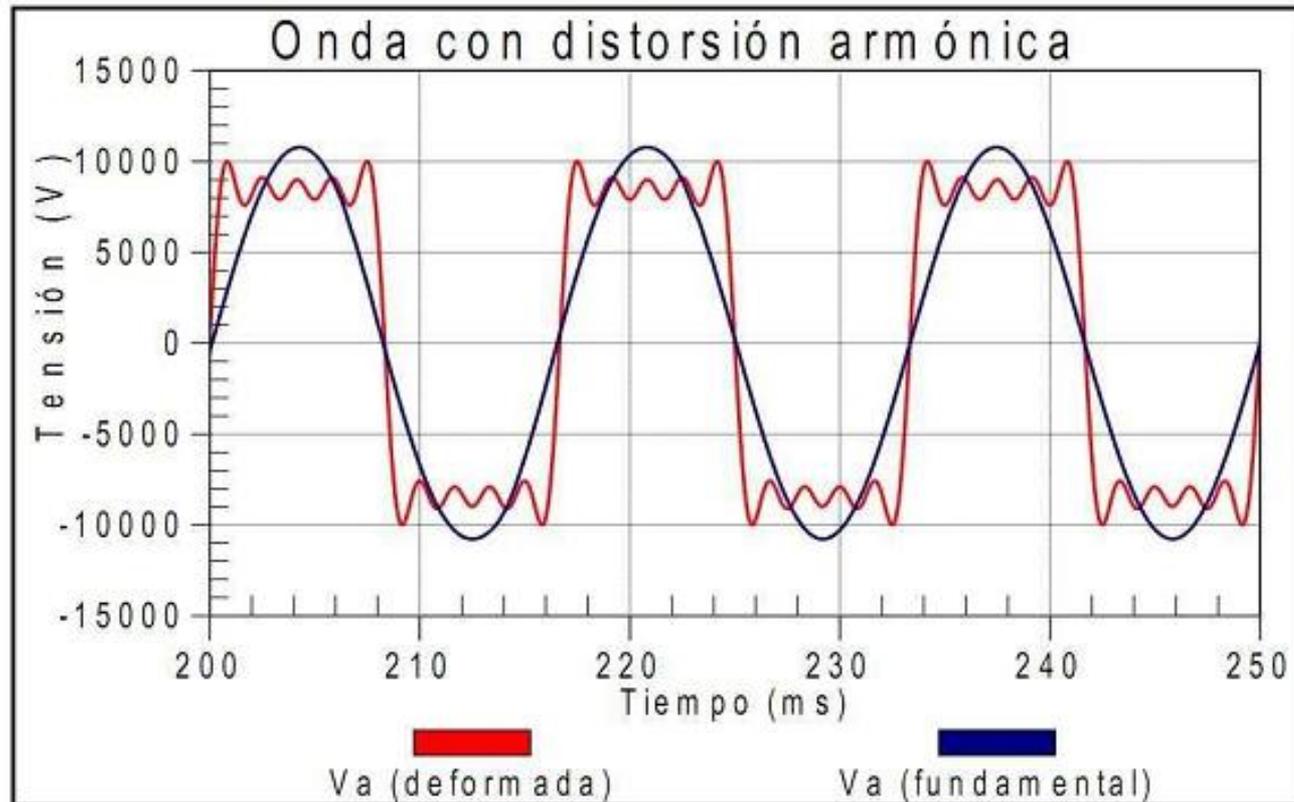
Distorsiones en la forma de onda

✓ ARMÓNICOS:

- Los armónicos son tensiones o corrientes a frecuencias múltiplos entero de la frecuencia a la cual el sistema está diseñado para operar (frecuencia fundamental, 60 Hz).
- Un armónico se define como una componente a una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El número del armónico indica la frecuencia del armónico (Ej.: armónico de segundo orden opera a 120Hz).
- Los armónicos en combinación con la componente fundamental presentan distorsión armónica.
- Causas generales: características no lineales de los dispositivos y cargas en el sistema de potencia, por ejemplo, equipos basados en electrónica de potencia.

Distorsiones en la forma de onda

✓ ARMÓNICOS:



Distorsiones en la forma de onda

✓ ARMÓNICOS:

- Descomposición de la forma de onda distorsionada:

Una forma de onda distorsionada periódica puede ser obtenida por medio de superposición a partir de formas de onda sinusoidales a diferentes frecuencias y con diferentes amplitudes.

Jean Baptise Joseph Fourier:

Cualquier onda periódica puede ser descompuesta en una sinusoidal a la frecuencia fundamental con un número de sinusoidales a frecuencias armónicas de la fundamental.

- La descripción de la distorsión en el dominio de la frecuencia es comúnmente aceptada.

Distorsiones en la forma de onda

✓ ARMÓNICOS:

– Armónicos y componentes simétricas:

La noción de componentes simétricas puede ser aplicada en sistemas trifásicos distorsionados a cada componente armónica por separado.

- Sistemas trifásicos balanceados.
- Sistemas trifásicos desbalanceados.

Distorsiones en la forma de onda

✓ ARMÓNICOS:

– Parámetros:

- Factor armónico de la n-ésima armónica (HF_n)
- Proporción de la componente fundamental (HF_1)
- Factor pico
- Distorsión armónica total (THD, *Total Harmonic Distortion*)

Distorsiones en la forma de onda

✓ ARMÓNICOS:

– Causas:

- Equipos basados en electrónica de potencia y equipos electrónicos (Fuentes de alimentación conmutadas, rectificadores trifásicos).
- Equipos de núcleo magnético (transformadores, motores eléctricos, generadores).
- Hornos de arco, equipos de soldadura, lámparas fluorescentes.
- Armónicos por encima de 2 kHz (equipos basados en electrónica de potencia).

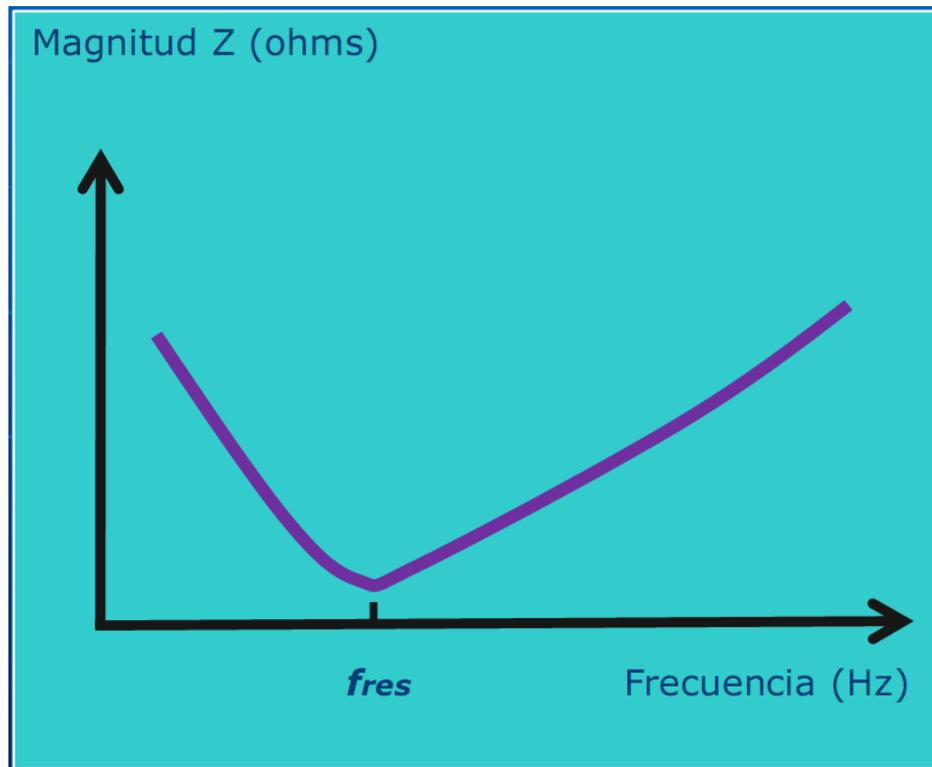
Analizar:

- ✓ IEEE_34_Nodes_Armonicos
- ✓ IEEE_34_Nodes_Armonicos_IC

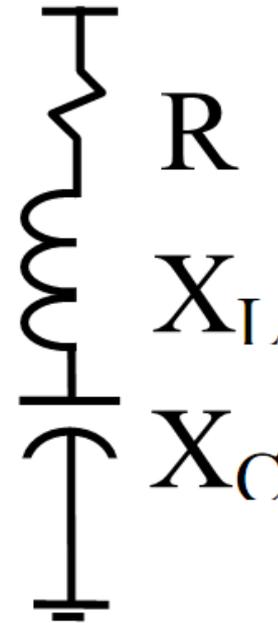
Distorsiones en la forma de onda

Resonancia debido a las componentes armónicas

Resonancia serie:



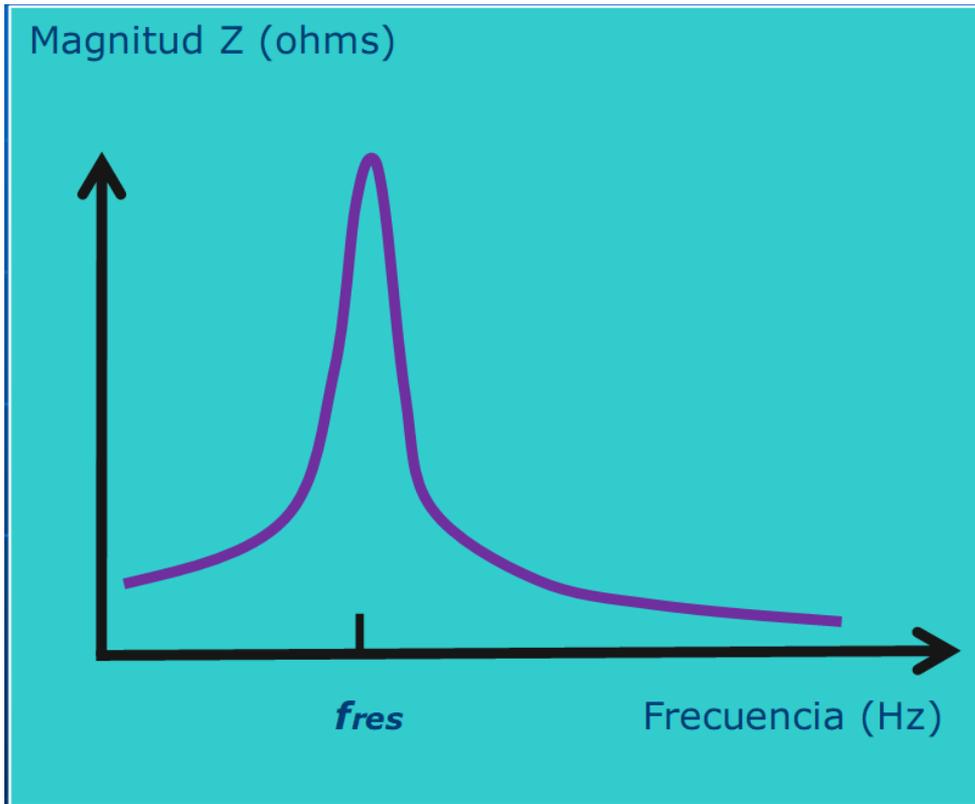
$$Z = R + jX_L - jX_C$$



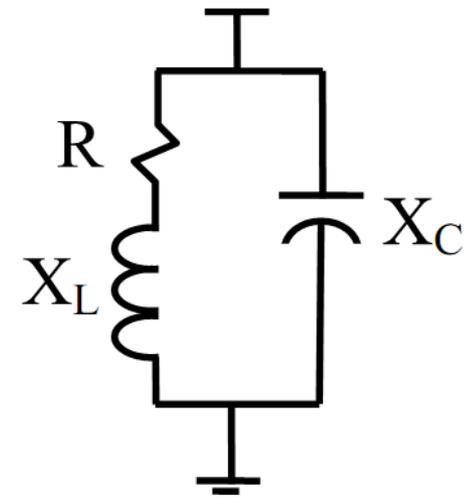
Distorsiones en la forma de onda

Resonancia debido a las componentes armónicas

Resonancia paralelo:



$$Z = \frac{-jX_C(R + jX_L)}{R + jX_L - jX_C}$$



Distorsiones en la forma de onda

Las corrientes armónicas en los sistemas de distribución

- ✓ Las componentes armónicas se generan en las corrientes provenientes de las cargas.
- ✓ La magnitud de las corrientes armónicas dependen de la operación de los equipos que las generan.
- ✓ Las corrientes armónicas de corriente al circular por la red eléctrica, circulan por las ramas que les ofrecen menor resistencia a su paso y obedecen a las LCK.
- ✓ La magnitud de impedancia esta en función de la frecuencia, por tanto la impedancia varia con las armónicas.
- ✓ Las corrientes armónicas al circular por la red, ocasionan caídas de tensión armónica.
- ✓ Por los general, los voltajes armónicos se presentan como consecuencia de la circulación de las corrientes armónicas.

Distorsiones en la forma de onda

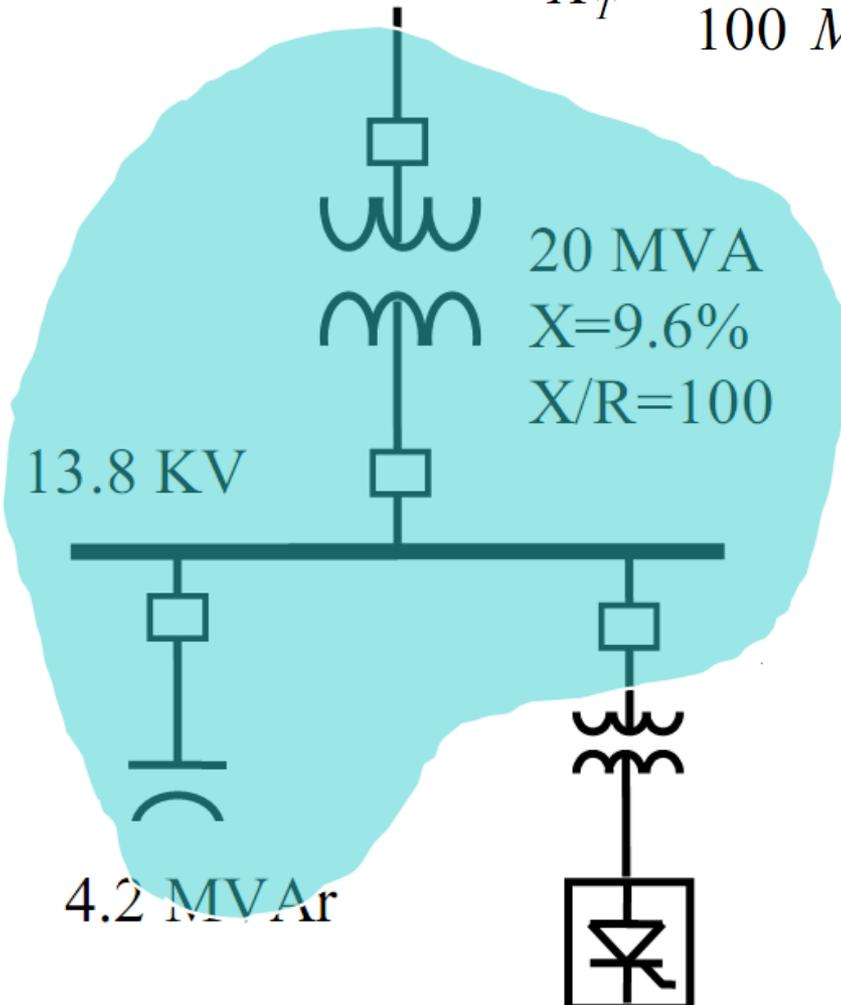
Ejemplo:

$$X_T = \frac{X\% \text{ KV}^2}{100 \text{ MVA}}$$

$$X_C = \frac{\text{KV}^2}{\text{MVA}_r}$$

$$R_T = X_T / 100$$

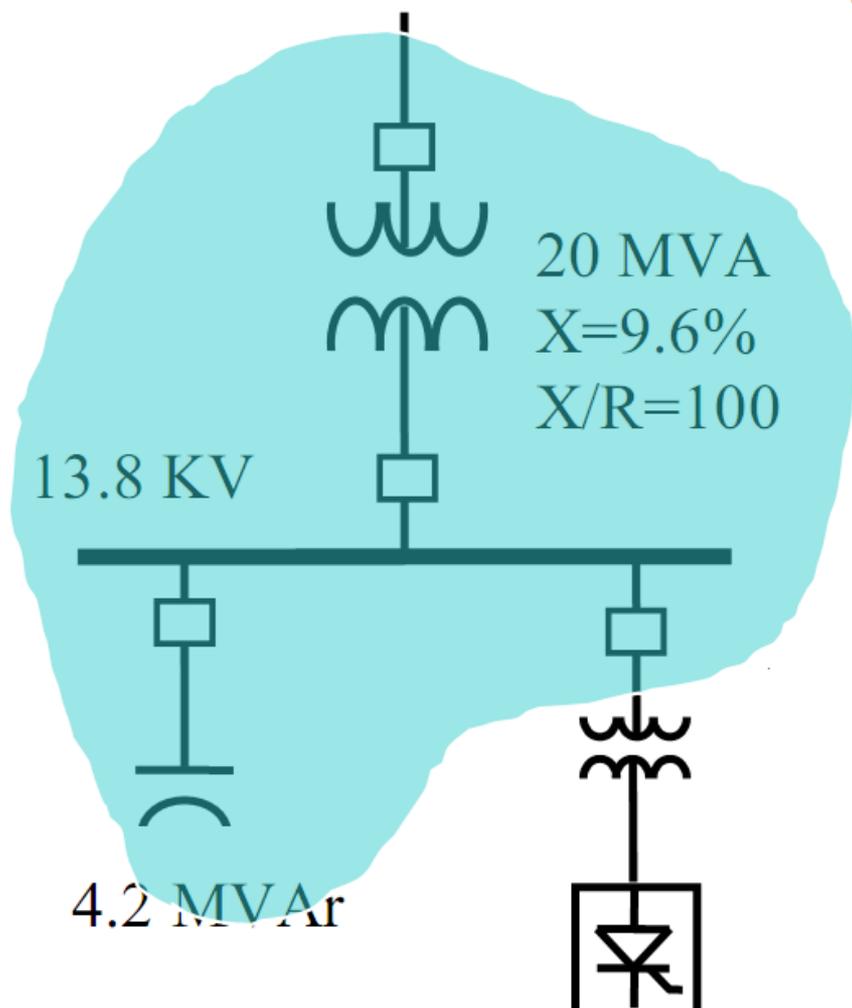
$$Z_{eq} = \frac{-j \frac{X_C}{h} (R_T + jhX_T)}{R_T + jhX_T - j \frac{X_C}{h}}$$



h	Z_{eq}
7	61 + j519.14
8	0.11 - j25.20
9	0.02 - j13.00
10	0.01 - j9.00
11	0.004 - j6.98
1	0.01 + j0.93
2	0.01 + j1.99
3	0.01 + j3.35
4	0.02 + j5.40
5	0.04 + j9.21
6	0.12 + j0.20

Distorsiones en la forma de onda

Ejemplo:

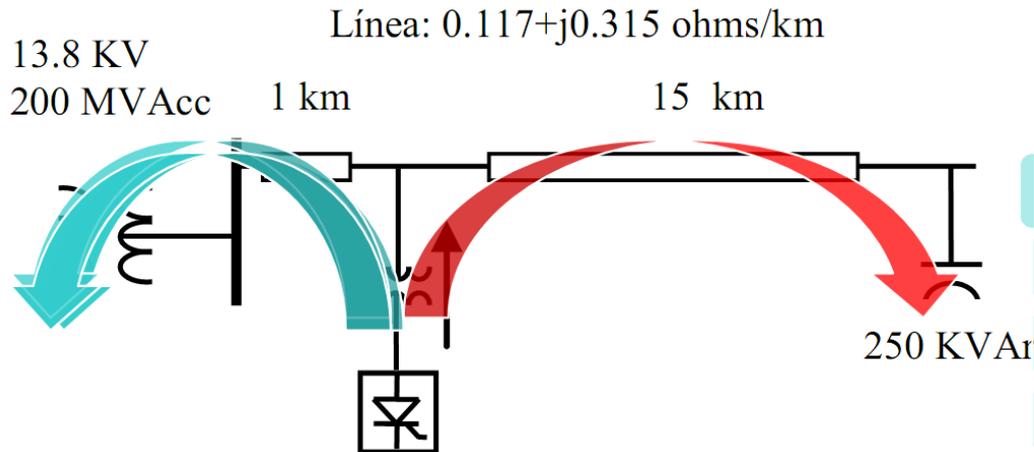


$$V_h = \sqrt{3} \times I_h \times Z_{eq,h}$$

h	Z_{eq}	I_h	V_h KV
1	$0.01 + j0.93$	380.33	≈ 13.8
2	$0.01 + j1.99$	0	0
3	$0.01 + j3.35$	0	0
4	$0.02 + j5.40$	0	0
5	$0.04 + j9.21$	76.06	1.2
6	$0.12 + j0.20$	0	0
7	$61 + j519.14$	54.33	49.1
8	$0.11 - j25.20$	0	0
9	$0.02 - j13.00$	0	0
10	$0.01 - j9.00$	0	0
11	$0.004 - j6.98$	34.57	0.41

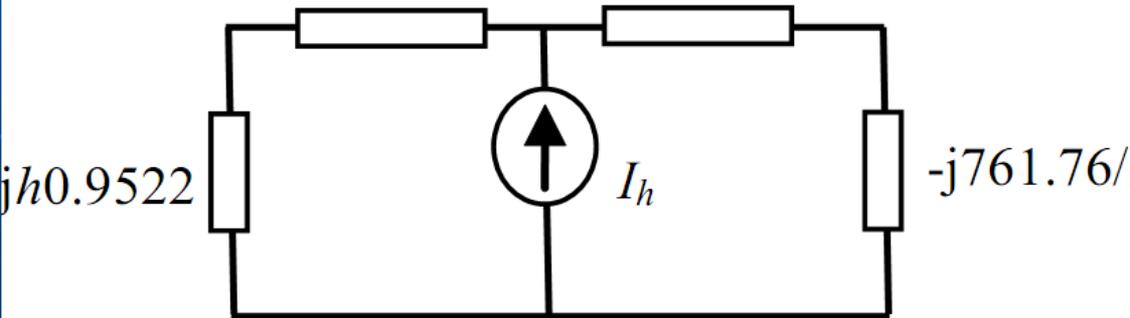
Distorsiones en la forma de onda

Propagación de las componentes armónicas:



$$0.1170 + jh0.3150$$

$$1.755 + jh4.725$$



h	$ Z_{izq} $	$ Z_{der} $
3	3.8034	239.7514
5	6.3371	128.7390
7	8.8712	75.7682
11	13.9397	17.3648
13	16.4740	3.3284
15	19.0084	20.1675
17	21.5427	35.5589
19	24.0771	49.7134

Distorsiones en la forma de onda

Efectos de las corrientes armónicas:

- ✓ Incrementos de las corrientes eficaces o rms
- ✓ Deterioro del factor de potencia
- ✓ Calentamiento de neutros de transformadores
- ✓ Calentamiento de motores eléctricos debido a las corrientes armónicas de secuencia negativa
- ✓ Mala operación de dispositivos de protecciones
- ✓ Daño de banco de capacitores
- ✓ Sobre tensiones armónicas por efecto de resonancias armónicas.

Analizar:

- ✓ IEEE_34_Nodes_Armonicos_Efecto_Compensación

Distorsiones en la forma de onda

✓ INTERARMÓNICOS:

- Tensiones o corrientes con componentes a frecuencias que no son múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema.
- Pueden aparecer como frecuencias discretas o en una banda del espectro.
- Principales causas:
 - Convertidores de frecuencia estáticos, ciclo-convertidores
 - Hornos de inducción

Se producen especialmente cuando el control no está sincronizado con la frecuencia fundamental del sistema.

Distorsiones en la forma de onda

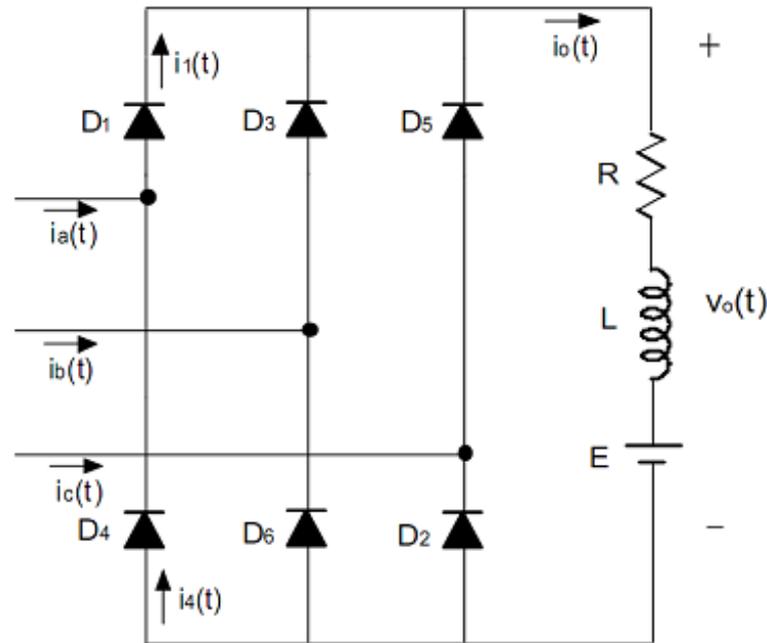
✓ MUESCAS:

- Es una perturbación periódica causada por la operación normal de equipos basados en electrónica de potencia, en el momento en el cual la corriente es conmutada de una fase a otra.
- Las muescas de tensión son periódicas, pero presenta componentes a alta frecuencia.
- Puede ser considerada tanto transitorio como distorsión armónica.
- Como las muescas son periódicas, pueden ser caracterizadas mediante su espectro.



Distorsiones en la forma de onda

✓ MUESCAS:



- La severidad de las muescas dependen de la impedancia de la fuente, la magnitud de la corriente y el punto de monitorización.

Distorsiones en la forma de onda

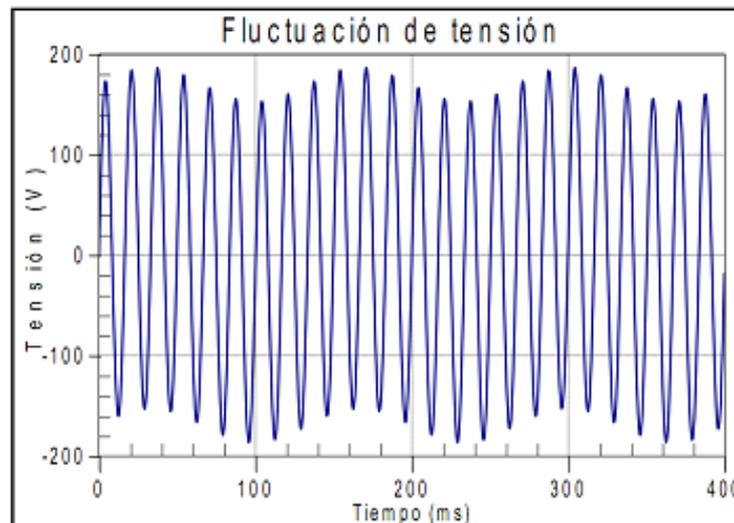
✓ RUIDO:

- Señales eléctricas indeseadas con un contenido espectral de banda ancha típicamente menor a 200 kHz, superpuesto en la tensión o en la corriente de los conductores de fase.
- También son señales eléctricas indeseadas que se encuentran en los conductores del neutro.
- Cualquier distorsión indeseada de las señales de potencia que no puede ser clasificada como distorsión armónica o transitorio, es denominada ruido.
- Principales causas: equipos basados en electrónica de potencia, circuitos de control, cargas con rectificadores, fuentes de alimentación conmutadas.
- El nivel o la magnitud del ruido depende de la fuente que produce el ruido y las características del sistema. Las magnitudes típicas son menores al 1% de la magnitud de tensión.
- Puede ser mitigado mediante filtros y transformadores de aislamiento.

Fluctuaciones de tensión

Flicker

- ✓ Variaciones sistemáticas de la envolvente de tensión o cambios de tensión aleatorios, cuya magnitud normalmente no excede el rango entre 0.95 pu y 1.05 pu.
- ✓ *Flicker*: impresión subjetiva que es experimentada por el ser humano cuando es sujeto a cambios que ocurren en la intensidad luminosa de fuentes de luz.
- ✓ La fluctuación de tensión es un fenómeno electromagnético, *flicker* es un resultado indeseado de este fenómeno.
- ✓ Las fluctuaciones de tensión generalmente aparecen como una modulación. Las variaciones generalmente ocurren a frecuencias menores a 25 kHz.



Fluctuaciones de tensión

- ✓ Las variaciones pueden ser percibidas por el ser humano por medio de cambios en la intensidad de la iluminación de las lámparas, principalmente si la frecuencia de repetición de las desviaciones está entre 8 Hz y 10 Hz, lo que puede producir malestares.
- ✓ La amplitud de las fluctuaciones de tensión generalmente es muy reducida, mucho menor que el umbral de inmunidad de los equipos eléctricos.
- ✓ Principales causas:
 - Cargas fluctuantes como hornos de arco y soldadores. La potencia demandada por este tipo de cargas presenta variaciones rápidas.
 - Cualquier carga que presente variaciones cíclicas significativas, especialmente en la componente reactiva.
- ✓ Parámetros:
 - *Short-term Flicker severity (Pst)*: Indicador de perceptibilidad de un equipo o sistema, ante fluctuaciones de tensión durante un periodo de tiempo corto (1 minuto).
 - *Long-term flicker severity (Plt)*.

Variaciones de frecuencia

- ✓ Desviaciones de la frecuencia fundamental del sistema a partir de su valor nominal de referencia (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz).
- ✓ La frecuencia del sistema está directamente relacionada con la velocidad rotacional de los generadores. En cualquier instante, la frecuencia depende del balance entre la carga y la capacidad de generación disponible. Con estos cambios de balance dinámicos, pequeños cambios pueden ocurrir en la frecuencia.
- ✓ La variación en la frecuencia y su duración, depende de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación al cambio de carga. Generalmente ocurren variaciones pequeñas e instantáneas debidas a la conmutación de cargas. Generalmente los cambios en la frecuencia son más pronunciados en la carga.
- ✓ Las variaciones de frecuencia por fuera de los límites aceptables (± 0.1 Hz), son causadas principalmente por fallas en el sistema de transmisión, grandes bloques de cargas desconectadas o la desconexión de alguna fuente de generación.

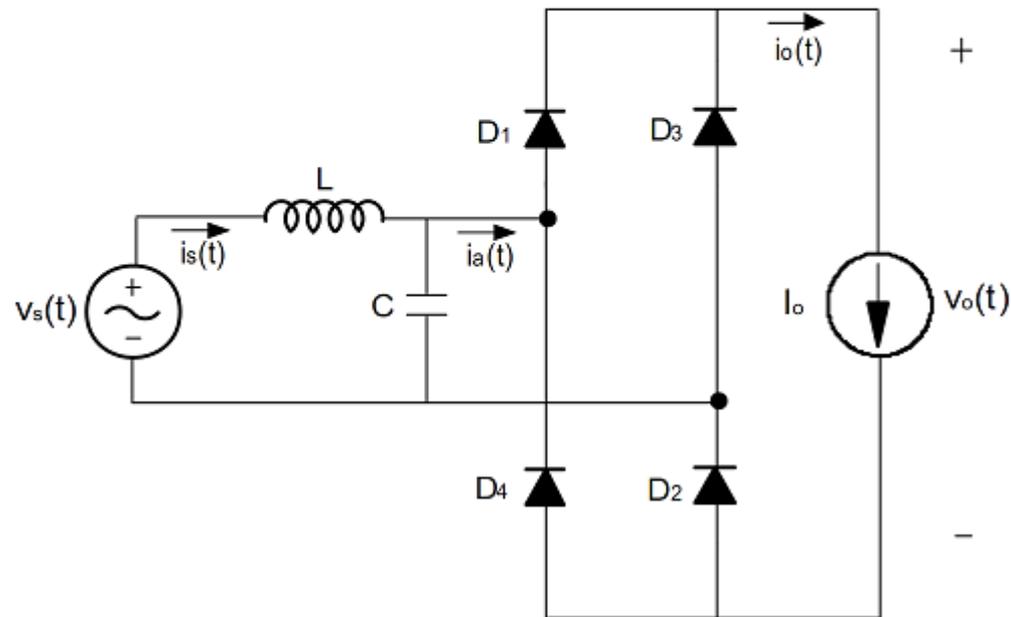
Algunas estrategias de compensación

Soluciones para compensar las perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica:

- Filtros Pasivos
- *Custom Power Devices*
- Filtros Híbridos
- Dispositivos tipo reconfiguración

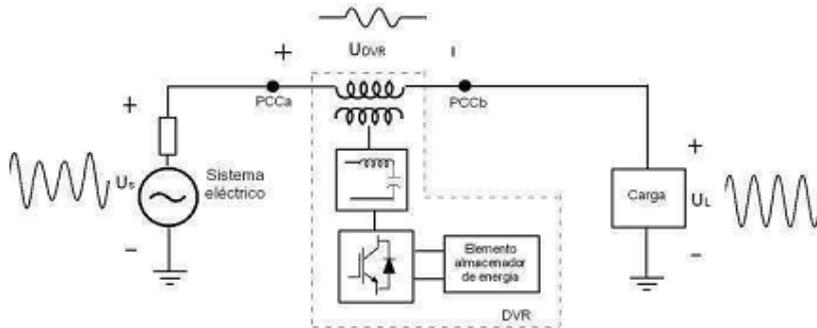
Algunas estrategias de compensación

✓ Ejemplos de filtros pasivos:

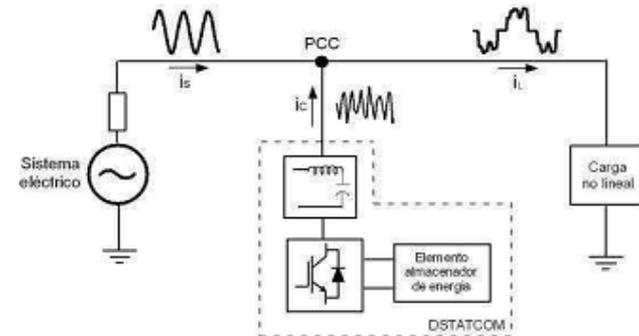


Algunas estrategias de compensación

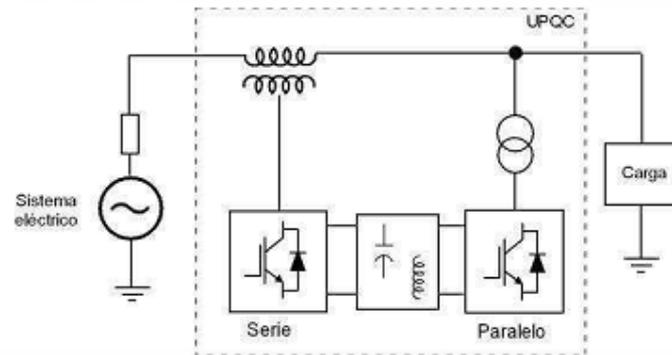
✓ Custom Power Devices



Restaurador dinámico de tensión (DVR)



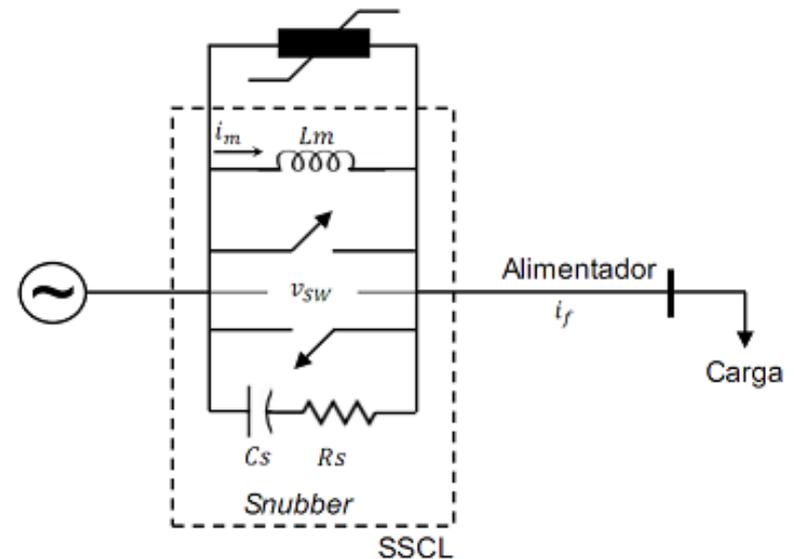
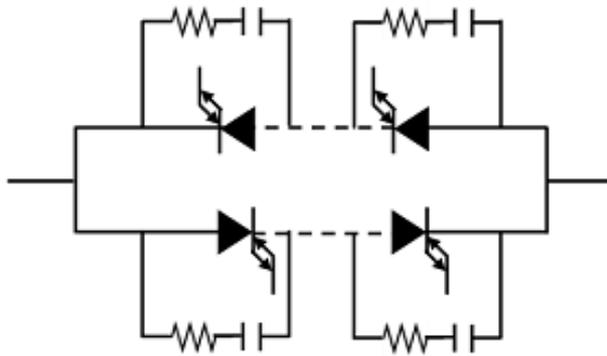
Compensador estático de potencia (DSTATCOM)



Acondicionador de calidad de la energía unificado (UPQC)

Algunas estrategias de compensación

- ✓ Ejemplos dispositivos tipo reconfiguración:



Limitador de corriente de estado estable

Otras Definiciones (Creg 065, NTC 5000)

Fluctuación de tensión. Fenómeno que origina distorsión transitoria de la forma de onda de tensión, respecto de su forma estándar. Se dice que existe una discontinuidad del servicio cuando la tensión no sigue la forma de onda estándar.

Forma y Frecuencia estándar. Forma en el tiempo de una onda sinusoidal pura de amplitud constante, igual a la tensión nominal, y a una frecuencia de 60 Hz.

Hundimiento. Reducción temporal de la magnitud de la tensión en un punto del SIN por debajo de un umbral determinado.

Interrupción. Reducción de la magnitud de la tensión en un punto del SIN por debajo de un umbral determinado.

Definiciones (Creg 024, Creg 065, NTC 5000)

Niveles de Tensión. Los sistemas de Transmisión Regional y/o Distribución Local se clasifican por niveles, en función de la tensión nominal de operación, según la siguiente definición:

Nivel 4: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 57,5 kV y menor a 220 kV.

Nivel 3: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 kV y menor de 57,5 kV.

Nivel 2: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 kV y menor de 30 kV.

Nivel 1: Sistemas con tensión nominal menor a 1 kV.

Operador de Red de STR y SDL, OR. Persona encargada de la planeación de la expansión, las inversiones, la operación y el mantenimiento de todo o parte de un STR o SDL, incluidas sus conexiones al STN.

Sistema de Distribución Local, SDL. Sistema de transporte de energía eléctrica compuesto por el conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a los Niveles de Tensión 3, 2 y 1 dedicados a la prestación del servicio en un Mercado de Comercialización

Definiciones (Creg 024, Creg 065, NTC 5000)

PST (Percibility Short Time): Es un indicador de la perceptibilidad de un equipo o sistema, ante fluctuaciones de tensión durante un período de tiempo corto (10 minutos), obtenido de forma estadística a partir del tratamiento de la señal de tensión. La forma de calcularlo se define en el Estándar IEC-61000-4-15 (2003-02).

THDV (Total Harmonic Distortion of Voltage). Es un indicador de la distorsión armónica total de tensión, respecto de la onda estándar, expresada en porcentaje. La forma de calcularlo se define en el Estándar IEEE 519 [1992].

Variaciones de corta duración. Los fenómenos transitorios cubiertos por el indicador PST a que se refiere esta resolución, son, entre otros, los que se relacionan en la siguiente tabla, basada en el Estándar IEEE 1159 [1995].

Definiciones (Creg 024, Creg 065, NTC 5000)

Condiciones normales de operación. Condiciones de tensión, corriente y frecuencia que permiten atender la demanda del sistema, las maniobras en la red y la eliminación de fallas en ausencia de condiciones de fuerza mayor.

Perturbación conducida. Fenómeno electromagnético propagado a lo largo de los conductores de las líneas de una red de distribución y/o transmisión. En ciertos casos, un fenómeno electromagnético se propaga a través de los arrollamientos de los transformadores y, por lo tanto, entre redes de diferentes niveles de tensión. Estas perturbaciones pueden degradar el desempeño de un aparato, de un equipo o de un sistema, o provocar daños.

Método de medición Clase A. Método de medición de parámetros que es usado cuando se requiere tomar medidas precisas, por ejemplo para aplicaciones contractuales, verificación de cumplimiento de estándares, etc. Tal como se define en el numeral 4.1 de la norma IEC 61000-4-30 de 2008.

Tensión nominal, Un. Voltaje por el cual un sistema es designado o identificado.

Definiciones (Creg 024, Creg 065, NTC 5000)

Tensión declarada, Uc. La tensión de alimentación declarada corresponde a la tensión nominal de la red. Si como consecuencia de un acuerdo entre el OR y el usuario, la tensión de alimentación a entregar en el punto de conexión difiere de la tensión nominal, entonces aquella tensión corresponderá a la tensión de alimentación declarada, Uc.

Tensión deslizante. Promedio de la magnitud de tensión en un intervalo de tiempo especificado, que representa la tensión precedente a un hundimiento o elevación de tensión, calculada de acuerdo con la sección 5.4.4 del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008.

Punto de medida de calidad de la potencia. Es el punto eléctrico en el cual se miden los parámetros técnicos de referencia de la calidad de la potencia.

Equipo de medida de calidad de la potencia. Dispositivo destinado a la medición de los parámetros de calidad de la potencia que debe cumplir, como mínimo, con los requisitos definidos en la presente resolución.

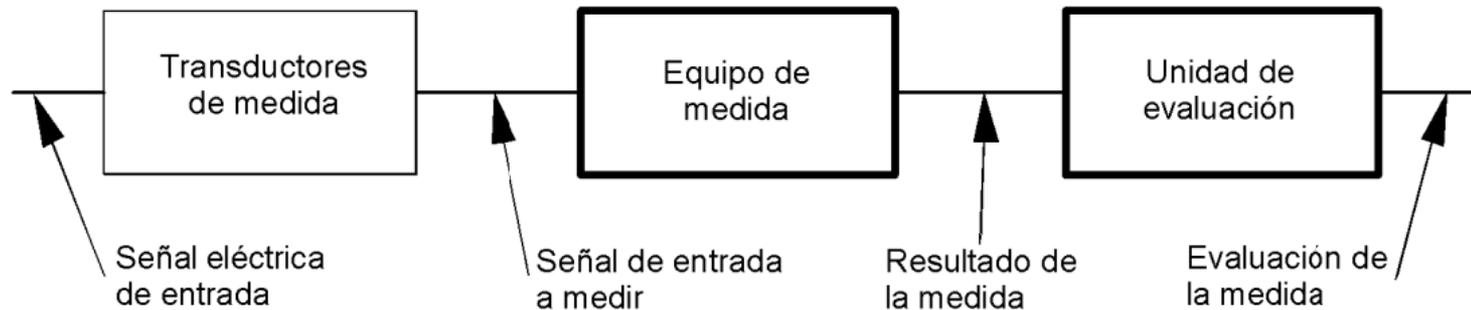
Definiciones (Creg 024, Creg 065, NTC 5000)

Método de medición Clase A. Método de medición de parámetros que es usado cuando se requiere tomar medidas precisas, por ejemplo para aplicaciones contractuales, verificación de cumplimiento de estándares, etc. Tal como se define en el numeral 4.1 de la norma IEC 61000-4-30 de 2008.

Transitorio electromagnético. Cambio en la condición de estado estable de la tensión, de la corriente o de ambos. Con una duración típica inferior a 50 ms, la cual se evidencia por un cambio en la forma de onda. Se clasifican en dos categorías: de tipo impulso y de tipo oscilatorio (IEEE std 100:2000, IEEE1100:2005, IEEE 1159:2009).

Calidad de la Potencia Eléctrica- Media clase A

Método de medida clase A: Esta clase de métodos de medida se utiliza cuando son necesarias medidas precisas. Las medidas de un parámetro efectuadas con dos instrumentos diferentes de acuerdo con los requisitos de la medida clase A, cuando se mide una misma señal, producirán resultados concordantes dentro del margen de incertidumbre especificado.

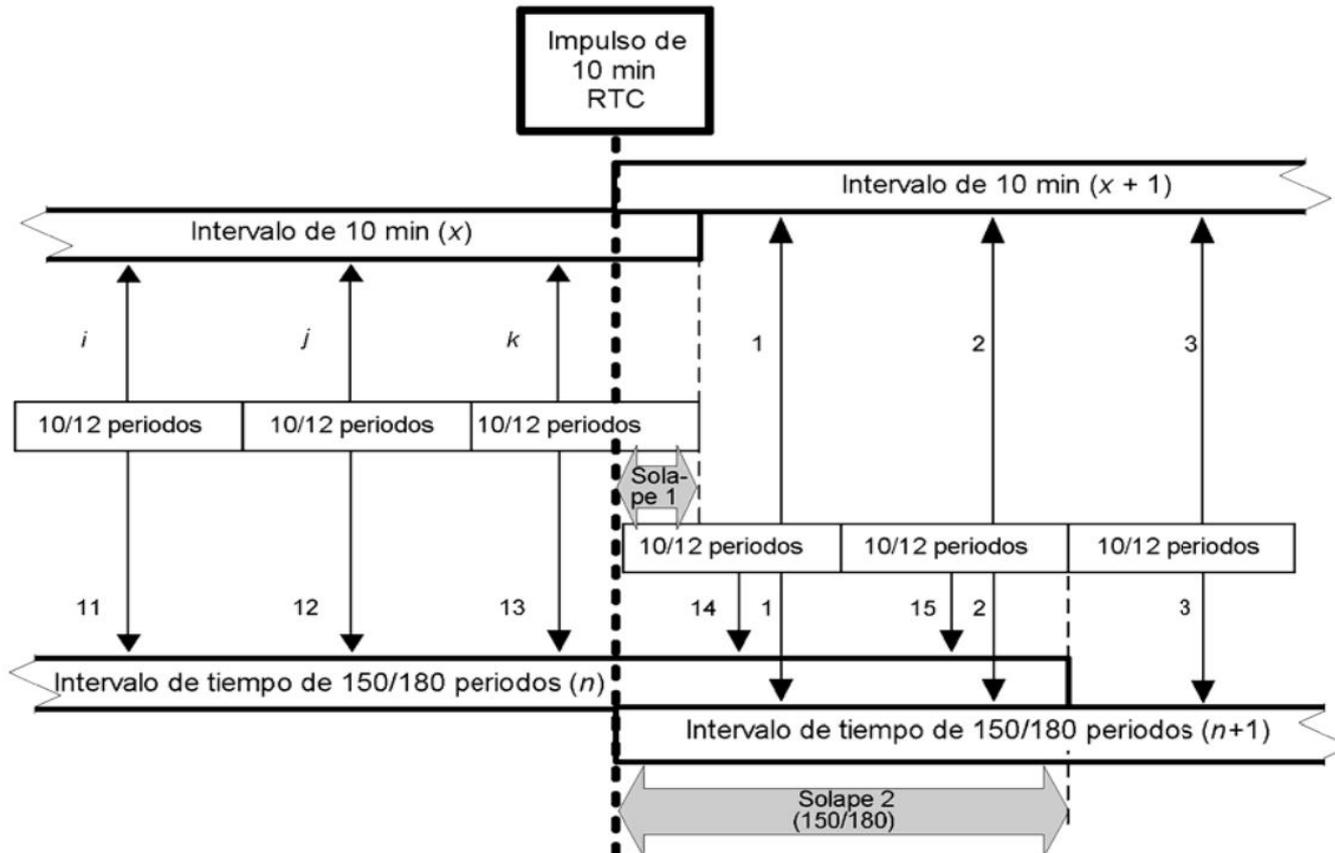


La cadena de medida

Calidad de la Potencia Eléctrica- Medición clase A

Agregación de medidas en intervalos de tiempo

El intervalo de tiempo básico de medida de amplitudes de los parámetros debe ser un intervalo de 12 períodos. La medida de los 12 períodos debe re-sincronizarse en todos los impulsos de 10 minutos del reloj de tiempo real RTC.



Calidad de la Potencia Eléctrica- Medición clase A

Los valores de 12 períodos son agregados después sobre 3 intervalos adicionales:

- Intervalo de 180 períodos
- Intervalo de 10 minutos
- Intervalo de 2 horas

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

Las agregaciones se calculan mediante la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores de la entrada.

Agregación de 180 períodos: Los datos deben agregarse sin separación a partir de los 15 intervalos de tiempo de 12 períodos.

Agregación de 10 min: el valor debe identificarse con el tiempo absoluto. El tiempo identificado corresponde al tiempo de finalización de la agregación de 10 min.

Agregación de 2h: Los datos para el intervalo de 2 horas debe agregarse a partir de 12 intervalos de 10 min.

Calidad de la Potencia Eléctrica- Medición clase A

Incertidumbre del RTC: La incertidumbre no debe sobrepasar ± 16 ms, independientemente del intervalo de tiempo.

Concepto de marcado: durante un hundimiento de tensión, una sobretensión temporal o una interrupción, los algoritmos de medida de otros parámetros pueden dar valores dudosos. El concepto de marcado permite así evitar contabilizar un suceso dado más de una vez en diferentes parámetros.

Calidad de la Potencia Eléctrica

CONCEPTUALIZACIÓN

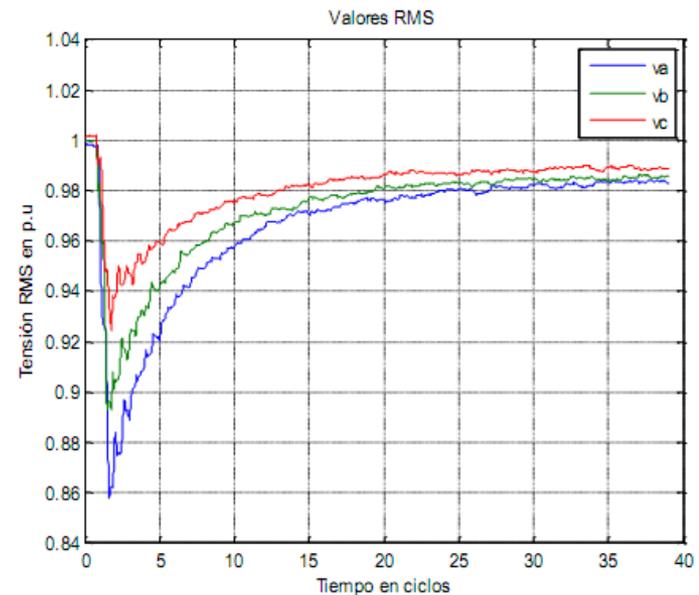
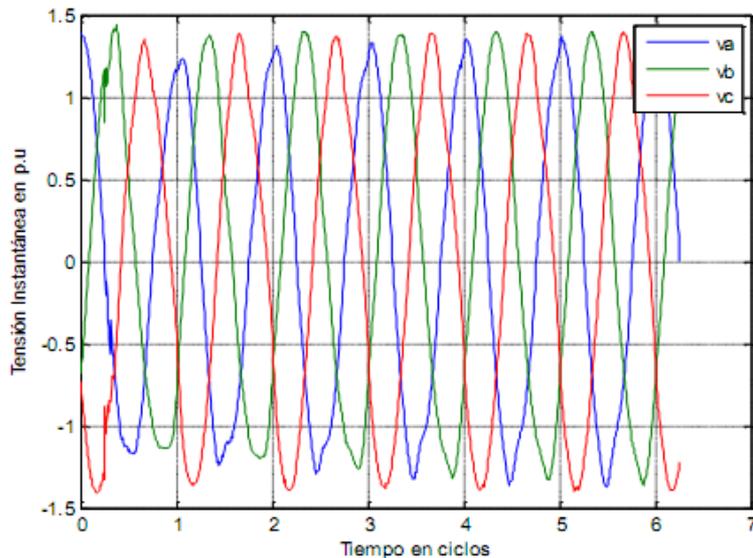
Cálculos de secuencias rms

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) \right)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt, \quad n = 1, 2, \dots$$



Calidad de la Potencia Eléctrica

CONCEPTUALIZACIÓN

Propuesta de IEEE 519-2014:

- ✓ Medición armónica de muy poco tiempo (very short time harmonic measurement): Las mediciones armónicas son realizadas sobre intervalos de 3 segundos (15 ventanas de 12 ciclos).

$$F_{n,vs} = 2 \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F_{n,i}^2}$$

- ✓ Medición armónica de poco tiempo (short time harmonic measurement): Las mediciones armónicas son realizadas sobre intervalos de 10 minutos, basado en 200 valores agregados a partir de “vsthm”.

$$F_{n,sh} = 2 \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F_{(n,vs),i}^2}$$

Análisis en ATPDraw:

- Cálculo de secuencias eficaces
- Cálculo de secuencias eficaces en señales con armónicos
- Estimación de las componentes armónicas
- Análisis de calidad de potencia usando ATP-EMTP (transitorios, hundimientos de tensión, análisis armónico, análisis de resonancia)

Analizar:

- ✓ IEEE_34_nodes_fallas_Rms
- ✓ IEEE_34_Nodes_Armonicos_IC_RMS_Fourier

Calidad de la Potencia Eléctrica

Indicadores de calidad de la potencia y métodos de medida- CREG_NTC5001

Los parámetros técnicos de referencia para evaluar la calidad de la potencia en el SIN son:

- Desviación de la frecuencia
- Desviación estacionaria de la tensión eficaz
- Severidad del parpadeo de corta duración Pst
- Relación de tensión de secuencia negativa y positiva (V_2/V_1)
- Distorsión armónica total de tensión – THDV
- Distorsión armónica total de corriente – THDI
- Distorsión total de demanda - TDD

Calidad de la Potencia Eléctrica

1. Desviación de la frecuencia:

- Los valores de frecuencia tomados cada 10 minutos se agruparán para un período de una semana de tal forma que puedan ser evaluados los valores del percentil del 95%, los valores máximos y mínimos, excluidos los valores de frecuencia durante tiempos de interrupción del servicio, de tal forma que los valores se encuentren dentro del rango permisible.

Tipo de red	Frecuencia aceptable durante el 95 % de los datos tomados de una semana	Frecuencia aceptable durante el 100 % de los datos tomados de una semana
Redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado.	Todos mayores a 59,8 Hz y todos menores a 60,2 Hz	Todos mayores a 57,5 Hz y todos menores a 63 Hz
Redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado (redes de distribución en regiones no interconectadas e islas)	Todos mayores a 59,8 Hz y todos menores a 60,2 Hz	Todos mayores a 51 Hz y todos menores a 69 Hz

Calidad de la Potencia Eléctrica

2. Desviación estacionaria de la tensión eficaz: Existe una desviación estacionaria de tensión cuando la tensión eficaz se encuentra por encima del 110% ó por debajo del 90% de la tensión nominal durante un período superior a un minuto.

Para sistemas con tensión nominal mayor o igual a 500 kV existe una desviación estacionaria de tensión cuando la tensión eficaz se encuentra por encima del 105% o por debajo del 90% de la tensión nominal durante un período superior a un minuto.

La magnitud de la tensión de suministro debe ser determinada de acuerdo con el método de medida Clase A, según lo establecido en el numeral 5.2 del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008.

- **Método de cálculo:** La medida debe ser el valor eficaz de la amplitud de la tensión en un intervalo de tiempo de 12 períodos, para redes de 60 Hz.
- No existen límites o de referencia ya que no se deberían presentar.

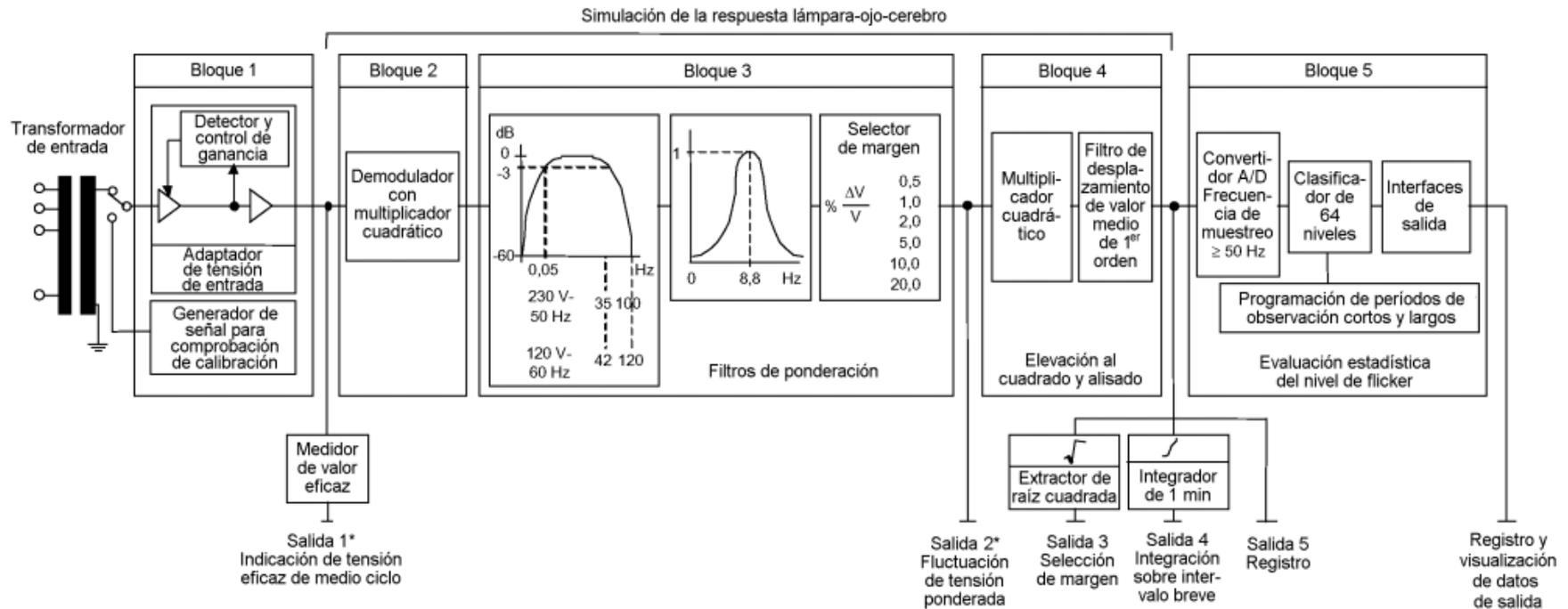
Calidad de la Potencia Eléctrica

3. Severidad del parpadeo de corta duración, Pst : Es un indicador de la intensidad de la molestia provocada por el parpadeo evaluada en un período de 10 minutos. Se debe determinar para cada fase de acuerdo con el método de medida Clase A, establecido en el numeral 5.3 del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008.

- **Método de medición (IEC 61000-4-15):** Para su evaluación:
 - El punto de medida debe coincidir con PCC.
 - El período de evaluación implica un número de 84 datos de Severidad de Larga duración (Plt) por fase, cuando el período de monitoreo es de una semana.
 - Calcular el percentil 95% de estos valores por cada fase y compararlo con el valor de referencia.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Diagrama funcional del medidor de Flicker



Calidad de la Potencia Eléctrica

Severidad del Flicker. Intensidad de la molestia provocada por el parpadeo definida por el método de medida que se encuentra en el norma IEC 61000 – 4 – 15 del Flicker y evaluada según las cantidades siguientes:

Severidad de corta duración (P_{st}) medida en un período de 10 min,

Severidad de larga duración (P_{lt}) calculada a partir de una secuencia de 12 valores de P_{st} en un intervalo de dos horas, según la fórmula siguiente:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}}$$

Valores de referencia del P_{lt}

Rango de Tensión	Valor de Referencia P_{lt}
$V_n < 69 \text{ kV}$	1,0 p.u.
$V_n \geq 69 \text{ kV}$	0,8 p.u.

Calidad de la Potencia Eléctrica

4. Relación de tensión de secuencia negativa y positiva, U_2/U_1 : Es un indicador de la relación entre el voltaje de secuencia negativa y el voltaje de secuencia positiva. Se debe determinar de acuerdo con el método de medida Clase A establecido en el numeral 5.7 del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008, con un intervalo de agregación de 10 minutos.

Método de medición: se evalúa por el método de componentes simétricas. Además de la componente de secuencia positiva V_1 , en caso de desequilibrio existen también al menos una de las componentes siguientes : componente de secuencia negativa U_2 y/o la componente de secuencia cero U_0 .

La componente fundamental de la tensión de entrada se mide en un intervalo de tiempo de 12 períodos. La razón de secuencia negativa U_2 se calcula con las magnitudes de las componentes de secuencia, usando la siguiente ecuación expresada en porcentaje:

$$u_2 = \frac{\textit{Secuencia negativa}}{\textit{Secuencia positiva}} * 100\%$$

Calidad de la Potencia Eléctrica

Para circuitos urbanos, el 99% de los valores de desbalance de tensión evaluados en un período de agregación de 10 min, debe estar dentro de los valores de referencia.

Para sistemas trifásicos U_2 se puede hallar en función de las tensiones de línea:

$$u_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6B}}{1 + \sqrt{3 - 6B}}} * 100\% \quad \beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$$

De acuerdo a IEEE 1159:2009 el desbalance en tensión también puede ser estimado como la máxima desviación entre el promedio y las tensiones de cada fase dividido por el promedio de las tensiones de las fases, expresado en porcentaje.

$$\text{Desbalance en tensión} = \frac{(\text{Máxima desviación de la tensión promedio})}{(\text{tensión promedio})} * 100$$

Calidad de la Potencia Eléctrica

Valores de referencia de desbalance

Rango de Tensión	Valor de Referencia
$V_n < 69 \text{ kV}$	2,0 %
$V_n \geq 69 \text{ kV}$	1,5 %

Calidad de la Potencia Eléctrica

5. Distorsión armónica total de tensión – THDV: Los armónicos de tensión son ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. La presente definición cubre armónicos de larga duración o estables.

Método de medición: Las medidas se realizan en el punto de conexión común. En las condiciones normales de operación, se deben calcular los percentiles al 95% de los valores de distorsión armónica individual de tensión (D_v) y distorsión armónica total de tensión (THD v), para cada fase. Los percentiles calculados para cada fase, deben ser iguales o menores a los valores de referencia.

Para períodos cortos, durante condiciones inusuales o arranques, los valores de referencia pueden ser excedidos por un 50%.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Distorsión armónica individual de tensión:

$$D_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \%$$

Distorsión armónica total de tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1} \times 100 \%$$

- V_h magnitud de la componente armónica individual (Voltios rms)
- h orden del Armónico (A menos que aplique una condición específica, h será como mínimo igual a 40).
- V_1 magnitud de la componente fundamental (Voltios rms).

Calidad de la Potencia Eléctrica

Valores de referencia

Rango de Tensión	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica Total-THDv (%)
$1 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n \geq 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

Valores de referencia recomendados IEEE 519

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

Vsthm hasta 1,5 el percentil 99

Percentil 95 para sthm

^aHigh-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

Calidad de la Potencia Eléctrica

6. Distorsión armónica total de corriente: Es un indicador del contenido de componentes armónicos en la onda de corriente respecto de la onda estándar, expresada en porcentaje. Se debe determinar de acuerdo con el método de medida Clase A según numeral A.2.5 el Anexo A del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008, con un intervalo de agregación de 10 minutos.

Método de medición: en condiciones normales de operación, los percentiles que se calculan a continuación para la distorsión individual de corriente D_h y la distorsión total de la demanda TDD, para cada fase, no deben sobrepasar los valores de referencia.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Distorsión armónica individual de corriente (D_h):

$$D_h = \frac{I_h}{I_L} \times 100 \%$$

La distorsión total de demanda TDD se define como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \%$$

- I_h = magnitud de la componente armónica individual (amperios rms)
- h = orden del Armónico (A menos que aplique una condición específica, h será como mínimo igual a 40).
- I_L = corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental - amperios rms)

Calidad de la Potencia Eléctrica

La distorsión armónica total de corriente THDi se define como:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \% \qquad TDD = THDi \frac{I_1}{I_L}$$

en donde

- I_h = magnitud de la componente armónica individual (Corriente rms)
- h = orden del Armónico (A menos que aplique una condición específica, h será como mínimo igual a 40).
- I_1 = magnitud de la componente fundamental (Corriente rms).
- I_L = corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental - amperios rms)

Se recomienda que la corriente de carga I_L sea calculada como el valor máximo de corriente rms de todas las fases agregadas en intervalos de 10 min, durante un período máximo de una semana.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Valores límite de la distorsión de corriente armónica en porcentaje

Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución 120 V < Vn ≤ 69 kV						
Relación I _{sc} /I _L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	TDD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Límites de distorsión en corriente para sistemas de subtransmisión 69 kV < Vn ≤ 161 kV						
< 20*	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión (Vn > 161 kV), generación distribuida y cogeneración,						
< 25*	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25 < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Calidad de la Potencia Eléctrica

en donde

- I_{sc} es la mínima corriente de corto circuito trifásica que se tenga disponible para hacer la evaluación en el punto de conexión común (amperios rms). En el caso de un usuario monofásico se debe utilizar la corriente de corto monofásica.
- I_L corriente de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental - amperios rms)

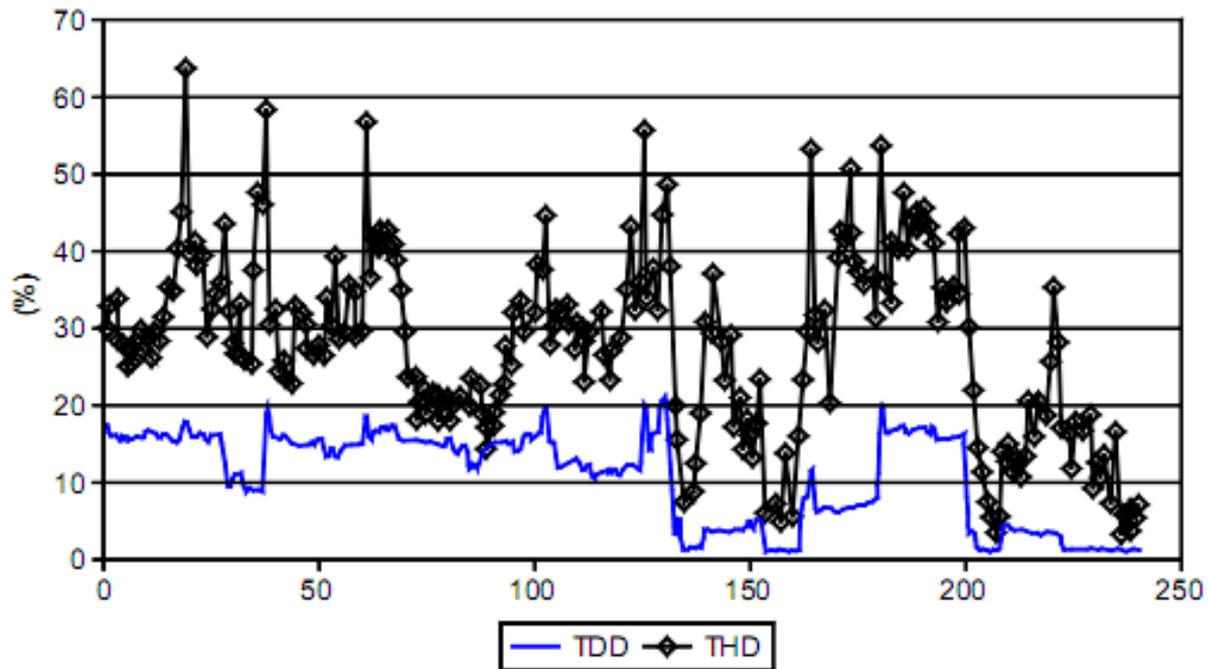
Ejemplo numérico del indicador TDD (NTC 500I)

Información entregada por el equipo									Cálculos			
Hora	I _{rms a}	I _{rms b}	I _{rms c}	I _{1a}	I _{1b}	I _{1c}	THD _a	THD _b	THD _c	TDD _a	TDD _b	TDD _c
0:00:00	358,5	332,7	337,3	304,7	246,2	303,5	4,2%	5,1%	8,5%	2,8%	2,7%	5,6%
0:10:00	443,7	320,5	369,0	377,2	237,1	332,1	6,4%	6,2%	5,0%	5,2%	3,2%	3,6%
0:20:00	419,8	328,7	431,7	356,8	243,2	388,6	4,8%	8,7%	7,0%	3,7%	4,5%	5,8%
0:30:00	360,6	366,2	438,5	306,5	271,0	394,6	5,8%	7,3%	4,1%	3,8%	4,2%	3,5%
0:40:00	378,8	334,5	366,6	322,0	247,6	329,9	5,3%	6,9%	5,0%	3,7%	3,7%	3,5%
0:50:00	434,0	324,3	395,1	368,9	240,0	355,6	7,4%	8,9%	8,1%	5,8%	4,6%	6,2%
1:00:00	457,1	404,3	340,5	388,5	299,2	306,5	7,0%	5,1%	4,8%	5,8%	3,2%	3,1%
1:10:00	398,1	328,7	377,3	338,4	243,2	339,6	5,9%	4,8%	2,3%	4,3%	2,5%	1,7%
1:20:00	438,6	397,3	351,6	372,8	294,0	316,4	4,4%	6,4%	6,9%	3,5%	4,0%	4,7%
1:30:00	428,1	366,2	368,8	363,9	271,0	331,9	7,5%	5,0%	3,3%	5,9%	2,9%	2,4%
1:40:00	385,0	359,6	382,9	327,3	266,1	344,6	4,7%	6,4%	4,3%	3,3%	3,7%	3,2%
1:50:00	381,8	376,8	382,5	324,5	278,8	344,2	5,0%	8,5%	7,0%	3,5%	5,1%	5,2%
2:00:00	340,4	340,4	464,1	289,4	251,9	417,7	5,8%	5,1%	7,5%	3,6%	2,7%	6,8%
2:10:00	345,8	379,4	327,9	293,9	280,8	295,1	4,5%	4,9%	4,4%	2,9%	3,0%	2,8%
2:20:00	375,9	307,8	406,4	319,5	227,7	365,8	4,7%	6,4%	2,4%	3,3%	3,1%	1,9%
2:30:00	416,9	336,5	336,2	354,4	249,0	302,6	5,2%	7,7%	2,7%	4,0%	4,1%	1,7%
2:40:00	354,5	357,1	374,5	301,4	264,3	337,0	7,6%	7,5%	8,6%	4,9%	4,2%	6,3%
2:50:00	459,2	371,3	336,7	390,3	274,8	303,0	5,2%	8,5%	5,6%	4,4%	5,0%	3,7%

Calidad de la Potencia Eléctrica

Máx 459,21 413,30 465,44 390,33 305,85 418,89
IL 465,44

	TDDa	TDDb	TDDc
Percentiles 95 %	5,85 %	5,02 %	7,01 %



Calidad de la Potencia Eléctrica

7. Hundimiento de tensión: Se considera que existe un hundimiento de tensión cuando la tensión se encuentra por debajo del 90% y por encima del 10% de la tensión deslizante, U_{sr} , seguido por un retorno a un valor más alto que el 90% de la tensión deslizante, en un tiempo que va desde 0,5 ciclos a 1 minuto.

Para el caso de mediciones de hundimientos de tensión en el nivel de tensión 1 se debe utilizar como referencia la tensión nominal en lugar de la tensión deslizante.

Cuando exista un acuerdo entre un usuario y el OR se utilizará la tensión declarada en el punto de conexión como referencia para determinar la existencia de hundimientos de tensión.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Método de evaluación: La evaluación se determina de acuerdo a su duración y magnitud. La duración se define como el tiempo medido desde el momento en que el valor eficaz de la tensión cae por debajo del umbral, hasta cuando retorna por encima de este. La magnitud de la caída está dada por la máxima desviación del valor eficaz de la tensión más afectada en el caso trifásico con respecto a la tensión declarada.

Cartas de Hundimientos

Se determinan los intervalos de la magnitud de tensión entre 0,5 – 0,9 en p.u (intervalos entre los cuales sucedieron los eventos) a partir de los datos que se tomaron. Posteriormente se determinan los límites de duración (en mseg) para cada uno de los análisis,

Muestra para el cálculo de los mapas Iso - Sag

		Duración [mseg]											
		80	140	200	260	320	380	440	500	1150	3700	7000	Total
Profundidad [p.u]	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,60	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	4
	0,65	0	1	1	1	2	0	0	0	2	0	0	7
	0,70	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
	0,75	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	0,80	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	0,85	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	0,90	7	1	2	1	0	0	0	0	3	2	1	17
	Total	10	7	5	3	2	1	0	2	6	2	1	39

Ejemplos de curvas de Inmunidad

CURVA ITI

La curva ITI (CBEMA) describe una envolvente de la tensión de alimentación, la cual puede ser típicamente tolerada por la mayoría de Equipos de Tecnología de Información (ETI) es decir que no causa salida de operación de este tipo de equipos.

Esta curva no debe ser utilizada para el diseño o especificación de productos o sistemas eléctricos de corriente alterna.

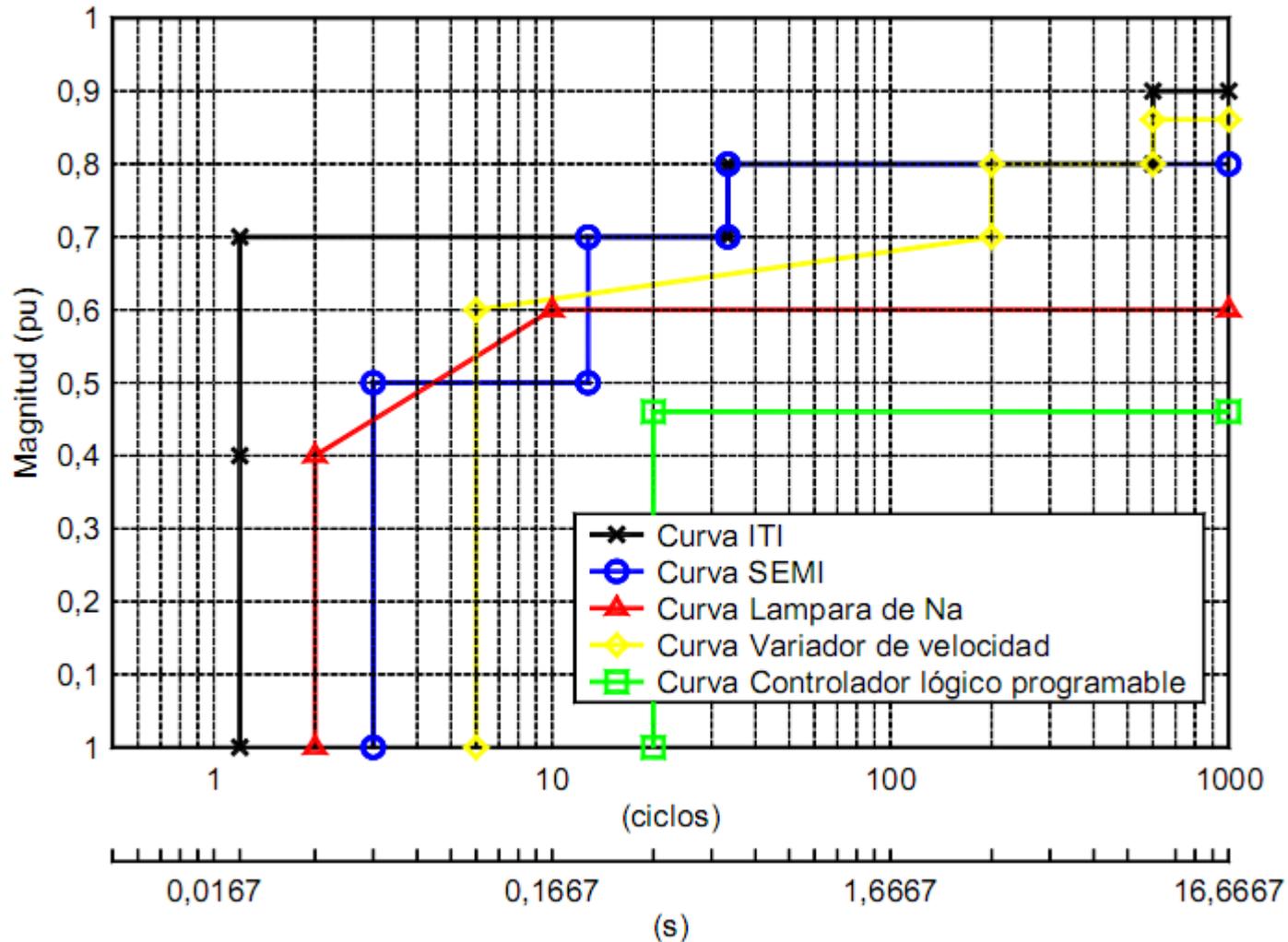
Esta curva es aplicable para sistemas eléctricos de tensión nominal de 120 V a 60 Hz. Otras tensiones nominales no son consideradas específicamente y es responsabilidad del usuario determinar la aplicabilidad de esta curva para otras condiciones

Calidad de la Potencia Eléctrica

Teniendo en cuenta que en la práctica resultaría complejo establecer con exactitud las curvas de inmunidad para diferentes tipos de equipos instalados en clientes residenciales, comerciales e industriales, se hizo una compilación de curvas de inmunidad típicas (equipos eléctricos y electrónicos) más comunes en los sistemas, donde las curvas consideradas fueron:

- a) curva ITI aplicable a equipos de cómputo,
- b) la curva SEMI aplicable a semiconductores,
- c) curvas de lámparas de sodio de alta presión,
- d) variadores de velocidad y
- e) controlador lógico programable – PLC, como se muestra en la siguiente figura.

Comparación de curvas para hundimientos



Algunos Índices adicionales

Energía del hundimiento de tensión

$$E_{VS} = \int_0^T \left\{ 1 - \left[\frac{U(t)}{U_{nom}} \right]^2 \right\} dt$$

$$E_{VS} = \left[1 - \left(\frac{U}{U_{nom}} \right)^2 \right] T$$

$$E_{VS} = (E_{VS-A} + E_{VS-B} + E_{VS-C})$$

$$SEI = \sum_{i=1}^n E_{VS-i}$$

$$ASEI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{VS-i}$$

$$SEI_{system} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N SEI_s$$

Algunos Índices adicionales

System Average R.M.S. (Variation) Frequency Index_{Voltage} (SARFI_X)

$$\text{SARFI}_X = \frac{\sum N_i}{N_T}$$

X is the r.m.s. voltage threshold (minimum voltage value during a dip). For a voltage dip it can be 90, 80, 70, 50 or 10 % of the reference voltage. The value of X is determined individually depending on the customer's equipment immunity characteristic, e.g. the dominant sensitive load. In the case of a three-phase dip it is recommended to take into account the phase on which the dip of the largest amplitude has occurred.

N_i is the number of customers who experience voltage changes of residual voltage less than $X\%$ for $X < 100$, for the i th case.

N_T is the number of customers supplied from the system section being assessed.

Calidad de la Potencia Eléctrica

8. Elevación de tensión: Se considera que existe una elevación de tensión cuando la tensión se encuentra por encima del 110% de la tensión deslizante, seguido por un retorno a un valor más bajo que el 110% de la tensión deslizante, en un tiempo que va desde 0,5 ciclos a 1 minuto.

Para el caso de mediciones de elevaciones de tensión en el nivel de tensión 1 se debe utilizar como referencia la tensión nominal en lugar de la tensión deslizante. Cuando exista un acuerdo entre un usuario y el OR se utilizará la tensión declarada en el punto de conexión como referencia para determinar la existencia de elevaciones de tensión.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Método de evaluación: las elevaciones se pueden caracterizar por medio de dos parámetros que son magnitud y duración. Para evaluar las elevaciones de tensión ocurridas en un punto deben compararse estas perturbaciones ocurridas, con las curvas de inmunidad ante elevaciones.

9. Interrupción de tensión de corta duración: Se considera que existe una interrupción de tensión de corta duración cuando la tensión se encuentra por debajo del 10% de la tensión nominal, U_n , en un tiempo que va desde 0,5 ciclos a 1 minuto.

La señal debe ser llevada al equipo de medida de calidad de la potencia, el cual deberá determinar la ocurrencia y duración de la interrupción.

Calidad de la Potencia Eléctrica

10. Interrupciones de larga duración: se considera que existe una interrupción de tensión de larga duración cuando la tensión se encuentra por debajo del 10% de la tensión nominal, U_n , durante un tiempo superior a 1 minuto.

A pesar de que las interrupciones afectan la calidad de la potencia, su evaluación debe ser considerada dentro de los lineamientos para evaluar la calidad del servicio de energía eléctrica (continuidad y confiabilidad).

Para la evaluación de este parámetro se debe contar con la totalidad de interrupciones detectadas y sumar sus tiempos de duración.

Calidad de la Potencia Eléctrica

11. Muestras de tensión: son un disturbio electromagnético periódico que afecta la forma de onda reduciendo su valor instantáneo durante intervalos que generalmente no sobrepasan los 0,5 ciclos.

Método de evaluación:

La distorsión armónica total de la señal debida a las muescas se define como:

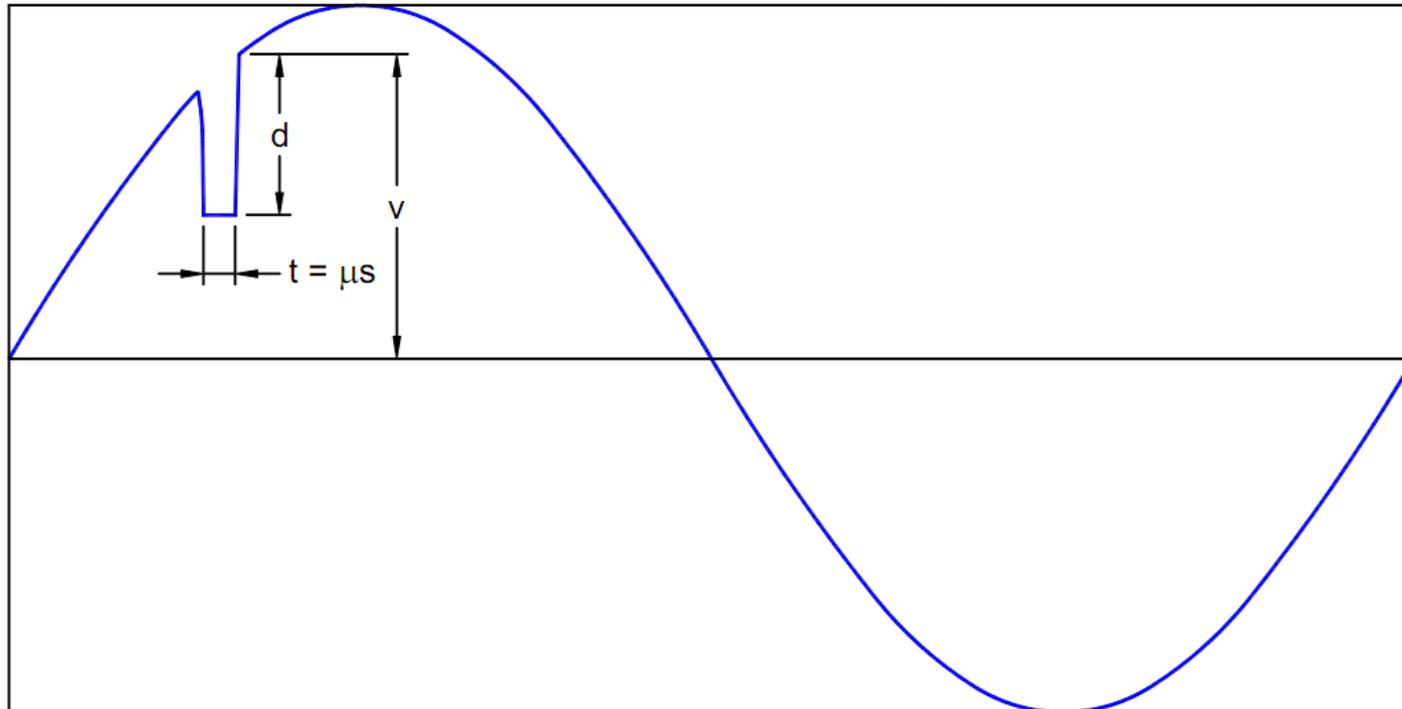
$$THD_{m\acute{a}x} = 0,074 \sqrt{\frac{A_N}{\rho}} \%$$

en donde

- ρ es la relación de la inductancia total con respecto a la del sistema y
- A_N es el área de la muesca medida en voltios–microsegundos.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Descripción de una muesca de tensión



Profundidad de la muesca: La profundidad promedio de la tensión de línea de la muesca en la onda senoidal de tensión.

$$\% Nd = d / V \times 100$$

Área de la muesca: Es el producto de la profundidad de la muesca en voltios multiplicada por el ancho de esta medida en microsegundos

$$A_N = t \times d [V-\mu s]$$

Calidad de la Potencia Eléctrica

Valores de referencia

Límites de distorsión			
	Aplicaciones Especiales*	Sistema General	Sistema Dedicado †
Profundidad de la muesca	10 %	20 %	50 %
THD (Tensión)	3 %	5 %	10 %
Área de la muesca (AN) ††	16400	22800	36500
NOTA El valor de AN para sistemas diferentes a 480 V deben ser multiplicados por V/480			
* Hospitales y aeropuertos			
† Un Sistema Dedicado es exclusivamente dedicado al rectificador de carga			
†† En Voltios-microsegundos			

Calidad de la Potencia Eléctrica

REPORTE DE INFORMACIÓN DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA

Por punto de medida:

- **De parpadeo:**

En cada punto de medida se deben calcular los siguientes indicadores para un período de evaluación de una semana.

$Pst_{95p,n,s}$: Percentil 95 de las mediciones de Pst en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Para calcular este indicador se deben utilizar los valores de Pst medidos en cada fase.

$Pst_{99p,n,s}$: Percentil 99 de las mediciones de Pst en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Para calcular este indicador se deben utilizar los valores de Pst medidos en cada fase.

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **De componente armónico:**

En cada punto de medida se deben calcular los siguientes indicadores para un período de evaluación de una semana.

THDV_95 p,n,s : Percentil 95 de las mediciones de THDV en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Para calcular este indicador se deben utilizar los valores de THDV medidos en cada fase.

THDV_99 p,n,s : Percentil 99 de las mediciones de THDV en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Para calcular este indicador se deben utilizar los valores de THDV medidos en cada fase.

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **De desbalance de tensión:**

En cada punto de medida se deben calcular los siguientes indicadores para un período de evaluación de una semana.

$V2/V1_{95p,n,s}$: Percentil 95 de las mediciones de la relación $V2/V1$ en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

$V2/V1_{99p,n,s}$: Percentil 99 de las mediciones de la relación $V2/V1$ en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **De hundimientos de tensión:**

En cada punto de medida se deben calcular los siguientes indicadores para un período de evaluación de una semana.

$NHT_{p,n,s}$: Numero de hundimientos de tensión que se presentan en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

$NHIT_{p,n,s}$: Numero de hundimientos instantáneos de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a los hundimientos con una duración entre 0,5 ciclos y 0,5 segundos inclusive.

$NHMT_{p,n,s}$: Numero de hundimientos momentáneos de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a los hundimientos con una duración superior a 0,5 segundos y hasta tres segundos inclusive.

$NHTT_{p,n,s}$: Numero de hundimientos temporales de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a los hundimientos con una duración superior a tres segundos y hasta 60 segundos inclusive.

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **De elevación de tensión:**

En cada punto de medida se deben calcular los siguientes indicadores para un período de evaluación de una semana.

$NET_{p,n,s}$: Numero de elevaciones de tensión que se presentan en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

$NEIT_{p,n,s}$: Numero de elevaciones instantáneas de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a las elevaciones con una duración entre 0,5 ciclos y 0,5 segundos inclusive.

$NEMT_{p,n,s}$: Numero de elevaciones momentáneas de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a las elevaciones con una duración superior a 0,5 segundos y hasta tres segundos inclusive.

$NETT_{p,n,s}$: Numero de elevaciones temporales de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a las elevaciones con una duración superior a tres segundos y hasta 60 segundos inclusive.

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **Interrupciones de corta duración:**

En cada punto de medida se deben calcular los siguientes indicadores para un período de evaluación de una semana.

$NIT_{p,n,s}$: Número de interrupciones de tensión de corta duración que se presentan en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

$NIMT_{p,n,s}$: Número de interrupciones momentáneas en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a las interrupciones con una duración superior a 0,5 segundos y hasta tres segundos inclusive.

$NITT_{p,n,s}$: Número de interrupciones temporales de tensión en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s . Corresponde a las elevaciones con una duración superior a tres segundos y hasta 60 segundos inclusive.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Por nivel de tensión:

- **De parpadeo:** Para cada nivel de tensión del sistema del OR se deben calcular el $PPst_{95n,s}$ y $PPst_{99n,s}$, para un período de evaluación de una semana de la siguiente forma:

$$PPst_{95n,s} = \sum_{p=1}^{Pn} (Pst_{95p,n,s} * EE_{p,n,s}) * \frac{1}{\sum_p^{Pn} EE_{p,n,s}}$$

$$PPst_{99n,s} = \sum_{p=1}^{Pn} (Pst_{99p,n,s} * EE_{p,n,s}) * \frac{1}{\sum_p^{Pn} EE_{p,n,s}}$$

Calidad de la Potencia Eléctrica

Donde:

- $PPst_{95_{n,s}}$: Promedio ponderado del indicador $Pst_{95_{p,n,s}}$ en el nivel de tensión n , durante la semana s , respecto a la energía de entrada.
- $PPst_{99_{n,s}}$: Promedio ponderado del indicador $Pst_{99_{p,n,s}}$ en el nivel de tensión n , durante la semana s , respecto a la energía de entrada.
- P_n : Número de puntos de medida en el nivel de tensión n , con valores de Pst medidos durante la semana s .
- $Pst_{95_{p,n,s}}$: Percentil 95 de las mediciones de Pst en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .
- $Pst_{99_{p,n,s}}$: Percentil 99 de las mediciones de Pst en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .
- $EE_{p,n,s}$: Energía de entrada, en kWh, a la barra de nivel de tensión n , donde se encuentra el punto de medida p , durante la semana s .

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **Indicadores de componente armónico:** Para cada nivel de tensión del sistema del OR se deben calcular el $PTHDV_{95n,s}$ y $PTHDV_{99n,s}$, para un período de evaluación de una semana de la siguiente forma:

$$PTHDV_{95n,s} = \sum_{p=1}^{Pn} (THDV_{95p,n,s} * EE_{p,n,s}) * \frac{1}{\sum_p^{Pn} EE_{p,n,s}}$$

$$PTHDV_{99n,s} = \sum_{p=1}^{Pn} (THDV_{99p,n,s} * EE_{p,n,s}) * \frac{1}{\sum_p^{Pn} EE_{p,n,s}}$$

$PTHDV_{95n,s}$: Promedio ponderado del indicador $THDV_{95p,n,s}$ en el nivel de tensión n , durante la semana s , respecto a la energía de entrada.

$PTHDV_{99n,s}$: Promedio ponderado del indicador $THDV_{99p,n,s}$ en el nivel de tensión n , durante la semana s , respecto a la energía de entrada.

Calidad de la Potencia Eléctrica

P_n :	Número de puntos de medida en el nivel de tensión n , con valores de THDV medidos durante la semana s .
$THDV_{95_{p,n,s}}$:	Percentil 95 de las mediciones de THDV en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .
$THDV_{99_{p,n,s}}$:	Percentil 99 de las mediciones de THDV en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .
$EE_{p,n,s}$:	Energía de entrada, en kWh, a la barra de nivel de tensión n , donde se encuentra el punto de medida p , durante la semana s .

Calidad de la Potencia Eléctrica

- **De desbalance de tensión:** Para cada nivel de tensión del sistema del OR se deben calcular el $PV_2/V_1_{95n,s}$ y $PV_2/V_1_{99n,s}$, para un período de evaluación de una semana de la siguiente forma:

$$PV_2/V_1_{95n,s} = \sum_{p=1}^{P_n} (V_2/V_1_{95p,n,s} * EE_{p,n,s}) * \frac{1}{\sum_p^{P_n} EE_{p,n,s}}$$

$$PV_2/V_1_{99n,s} = \sum_{p=1}^{P_n} (V_2/V_1_{99p,n,s} * EE_{p,n,s}) * \frac{1}{\sum_p^{P_n} EE_{p,n,s}}$$

$PV_2/V_1_{95n,s}$: Promedio ponderado del indicador $V_2/V_1_{95p,n,s}$ en el nivel de tensión n , durante la semana s , respecto a la energía de entrada.

$PV_2/V_1_{99n,s}$: Promedio ponderado del indicador $V_2/V_1_{99p,n,s}$ en el nivel de tensión n , durante la semana s , respecto a la energía de entrada.

P_n : Número de puntos de medida en el nivel de tensión n , con valores de la relación V_2/V_1 medidos durante la semana s .

$V_2/V_1_{95p,n,s}$: Percentil 95 de las mediciones de la relación V_2/V_1 en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

Calidad de la Potencia Eléctrica

$V_2/V_{1_99p,n,s}$: Percentil 99 de las mediciones de la relación V_2/V_1 en el punto de medida p , asociado al nivel de tensión n , durante la semana s .

$EE_{p,n,s}$: Energía de entrada, en kWh, a la barra de nivel de tensión n , donde se encuentra el punto de medida p , durante la semana s .

Calidad de la Potencia Eléctrica

Informe de la calidad de la potencia

- ✓ Totalidad de indicadores por punto de medida y por nivel de tensión.
- ✓ Análisis histórico de los indicadores
- ✓ Puntos de medida que no cumplen, señalar el número de usuarios y la ponderación respecto al total del sistema.
- ✓ Para hundimientos de tensión y elevaciones se deben presentar curvas ITIC y carta de hundimientos por nivel de tensión.
- ✓ Análisis de las perturbaciones identificadas y las acciones de corrección propuestas.
- ✓ En el segundo informe de cada año, se debe presentar un resumen de la calidad de la potencia prestada durante el año anterior: resumen de los estándares de calidad de la potencia suministrada, gestión realizada para mantener o mejorar, número de peticiones, quejas y reclamos.

Calidad de la Potencia Eléctrica

Procedimiento de revisión y corrección de deficiencias de la CPE

- ✓ Identificación de problemas de suministro (OR y Transmisor Nacional): sistema de medida en subestaciones, por información de usuarios, solicitud de medición por parte de un usuario, identificación de cargas perturbadoras.
- ✓ Plazo para corregir deficiencias (30 días hábiles)

Bibliografía

- Angelo Baghini. *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- IEEE 1159. *Recommended practice of monitoring electric power quality*. Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, 1995.
- IEC 61000-4-30/2008, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
- NTC 5000. Norma técnica colombiana 5000: Calidad de la potencia eléctrica (CPE), definiciones y términos fundamentales. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2011.
- NTC 5001. Norma técnica colombiana 5001: Calidad de la potencia eléctrica (CPE), Límites y Metodología de Evaluación en Punto de Conexión Común. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2008.
- Resoluciones CREG 024/2005, CREG 097/2008, CREG 065/2012, CREG 016/2007, CREG 070/1998.
- Madrigal, Manuel. *Análisis Armónico en Sistemas Eléctricos*. Curso SICEL 2015.