

Medición de energía y calidad de la energía



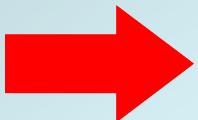
Con la colaboración de los Drs. Patricio G. Donato – Ignacio Carugati

ICYTE (Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica) Universidad Nacional de Mar del Plata

Calidad de la energía

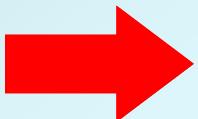
Conceptos generales

IEEE



Conjunto de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y corriente en un tiempo y ubicación determinados en un sistema de potencia (IEEE Std 1159-2009).

IEC

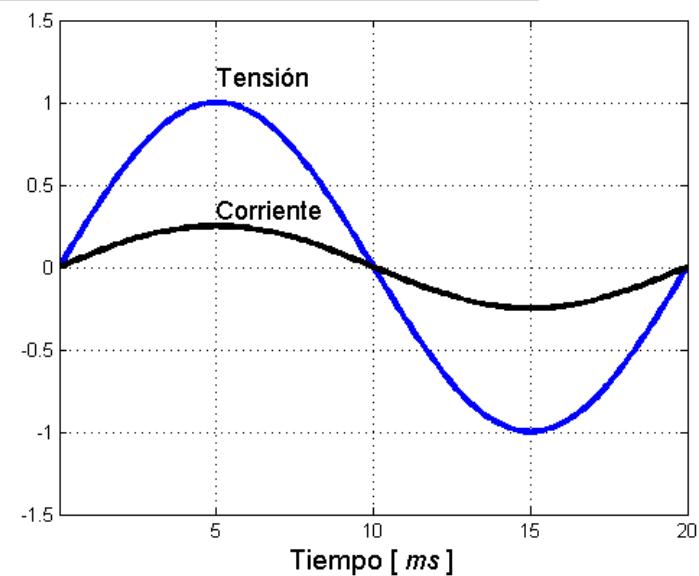


Característica de la electricidad en un punto dado del sistema eléctrico, evaluado respecto de un conjunto de parámetros técnicos de referencia (IEC 61000-4-30, 2009).

Tensión ideal = onda sinusoidal de amplitud y frecuencia constantes e iguales a sus valores nominales

Corriente ideal = onda sinusoidal de amplitud y frecuencia constantes, cuya frecuencia y fase son iguales a las correspondientes frecuencia y fase de la tensión

Cualquier desviación de la tensión o corriente respecto del ideal se considera una perturbación en la calidad de la energía (Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen)



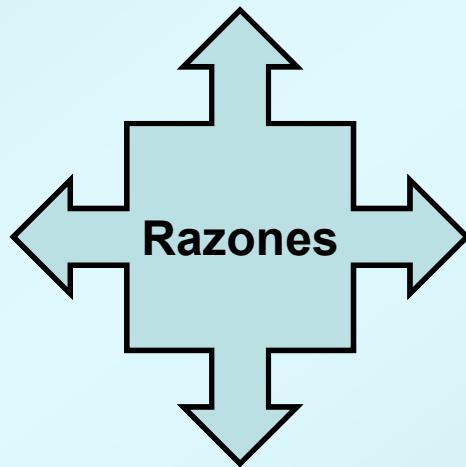
Calidad de la energía

Conceptos generales

Importancia de la calidad de la energía

La desregulación del mercado eléctrico ha incrementado la necesidad de indicadores de calidad. Los consumidores demandan más información sobre la calidad de la energía.

Los convertidores electrónicos, presentes en la mayoría de los equipos, tanto de baja como de alta potencia, producen un amplio espectro de distorsión.



Las fuentes de energía renovables crean nuevos problemas de calidad de la energía, tales como variaciones de tensión, flicker, y distorsión de la forma de onda.

Los equipos se han vuelto menos tolerantes a las perturbaciones de tensión, los procesos productivos se han vuelto menos tolerantes a los fallos en la operación de los equipos, y las compañías se han vuelto menos tolerantes a las interrupciones en la producción.

Calidad de la energía

Conceptos generales

red distribuidoras eléctricas

calidad de suministro

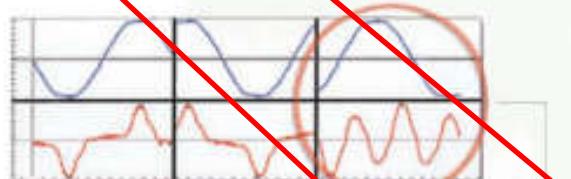
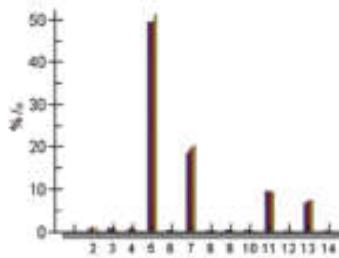
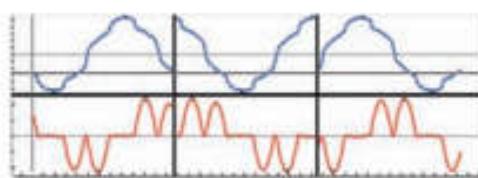


calidad de onda

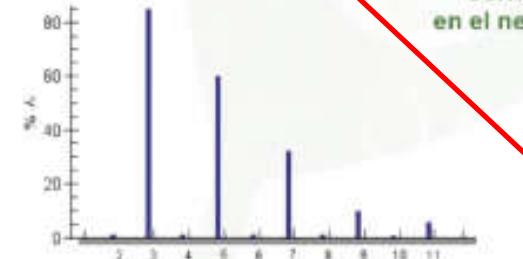


alimentación de máquinas

usuario:



corriente en el neutro



Un evento único genera diferentes perturbaciones para diferentes clientes y/o diferentes ubicaciones

A menudo es difícil distinguir entre perturbaciones de tensión y de corriente, ya que generalmente una implica la otra, y viceversa.

Las perturbaciones de corriente son provocadas por el consumidor y pueden afectar a la red.

Las perturbaciones de tensión se originan en la red eléctrica y pueden afectar a los consumidores.

Ref: Circutor - [Guía Técnica de Eficiencia Energética Eléctrica](#)

Calidad de la energía

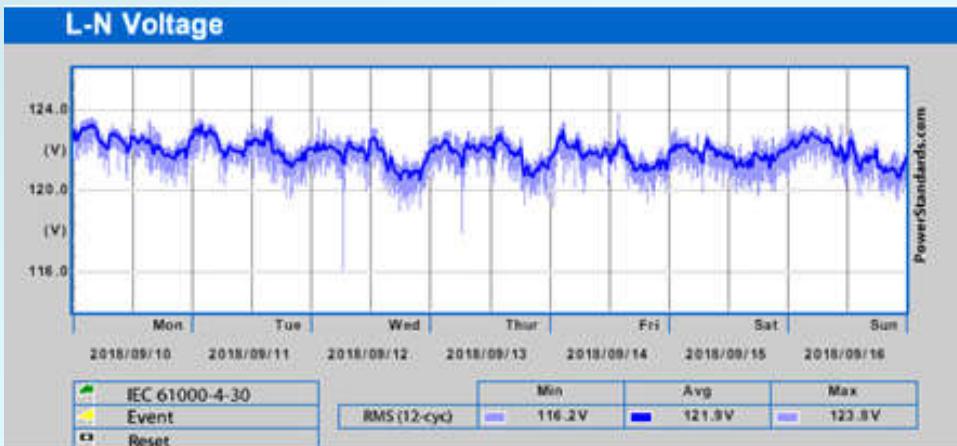
Conceptos generales

Clasificación de perturbaciones en función de la duración: Variaciones y Eventos

Variaciones: perturbaciones estacionarias o quasi-estacionarias que requieren una medición continua.



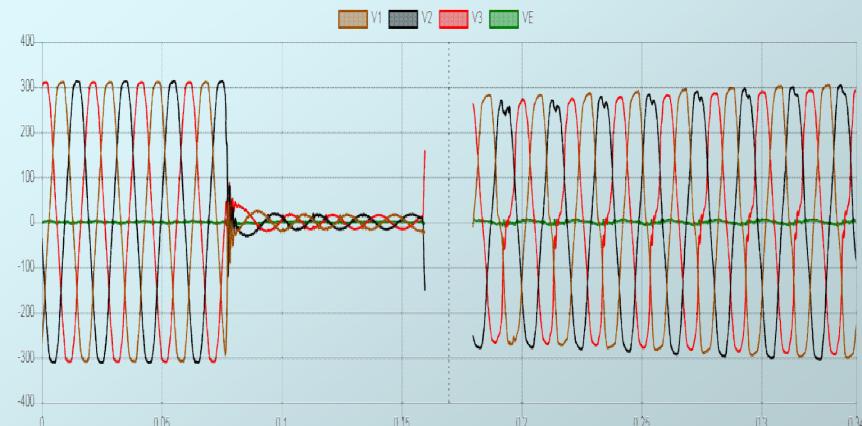
Ejemplo: Variación de tensión durante varios períodos, variación de la frecuencia de red en un período largo de tiempo.



Eventos: perturbaciones repentinas con un principio y un final.

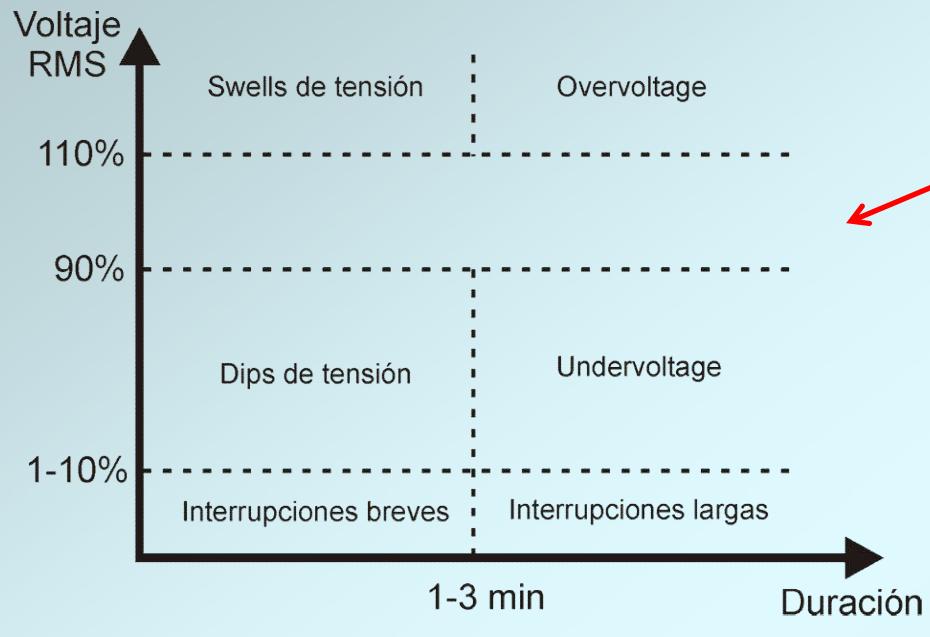


Ejemplo: Interrupción en el suministro.



Calidad de la energía

Eventos

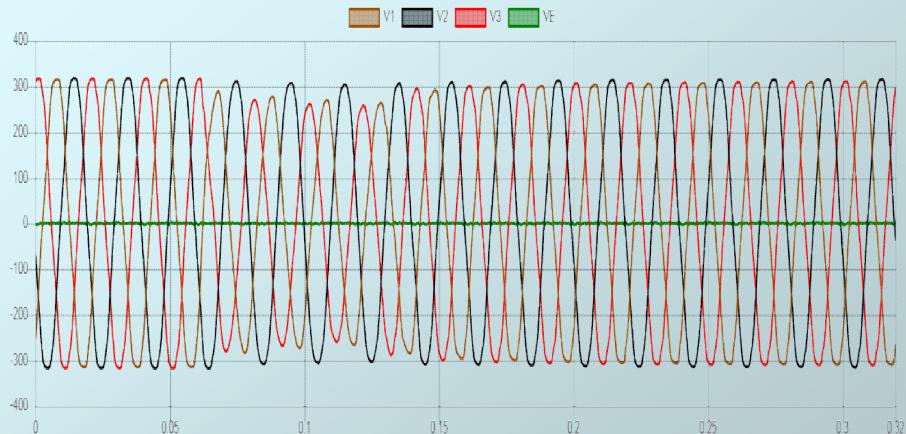
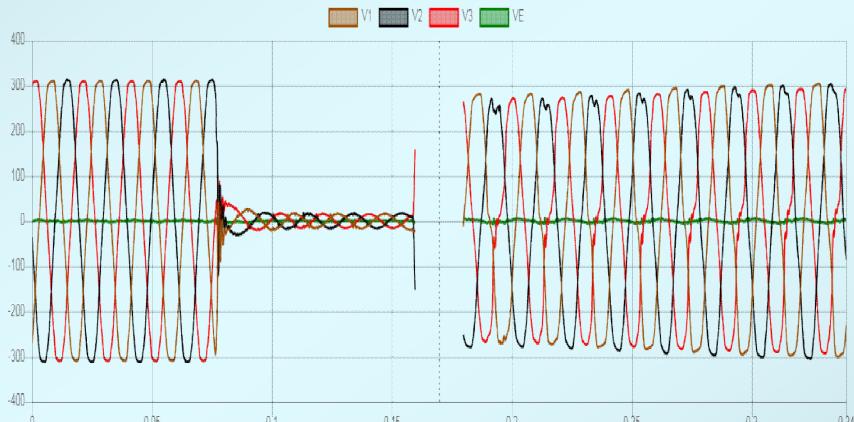


Eventos: perturbaciones repentinas con un principio y un final.

DIP / SAG: Interrupción/caída breve de tensión

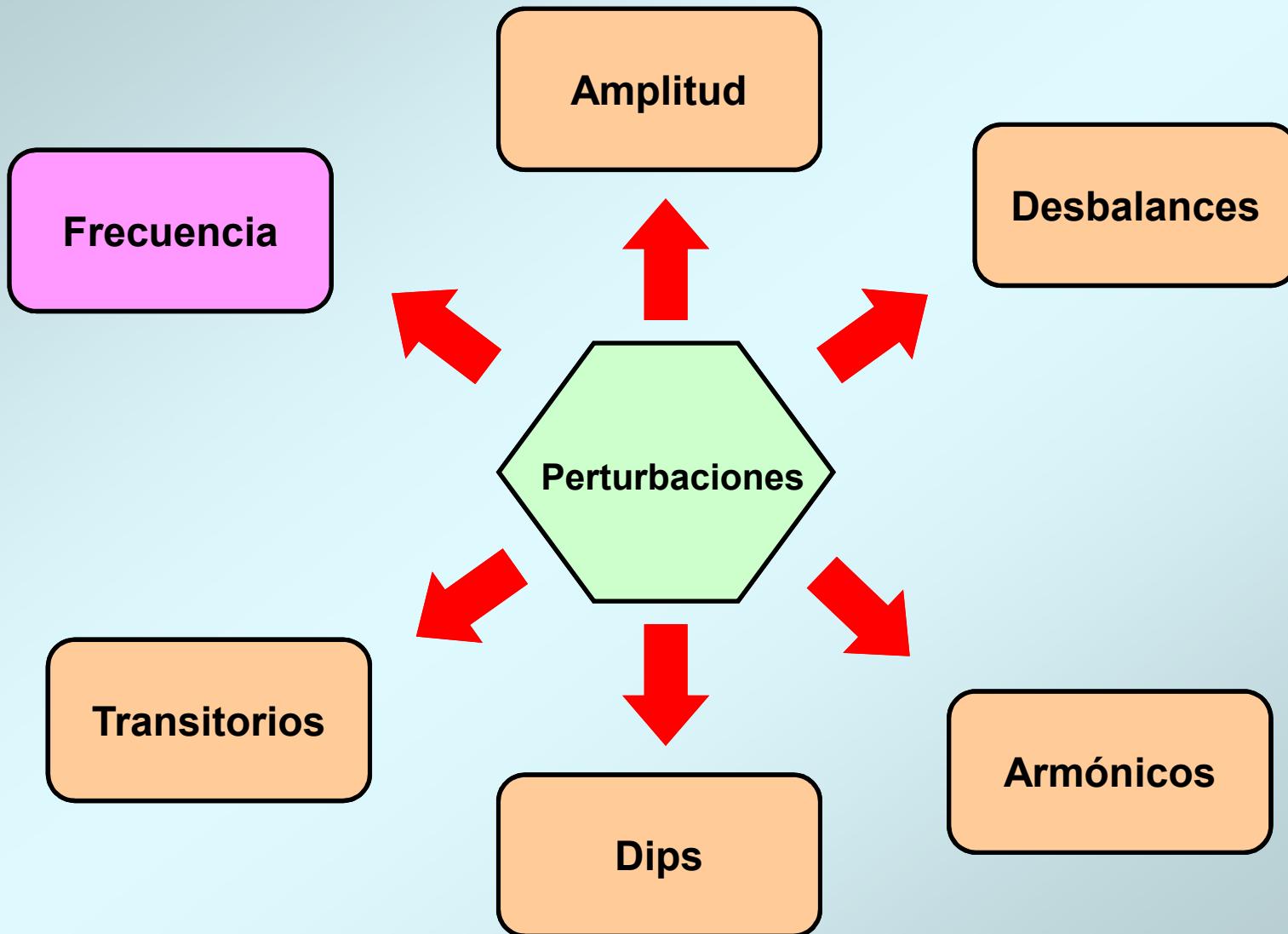
SURGE / SWELL: Incremento de tensión >10% del valor nominal

¿Transitorio=Impulso=Spike?



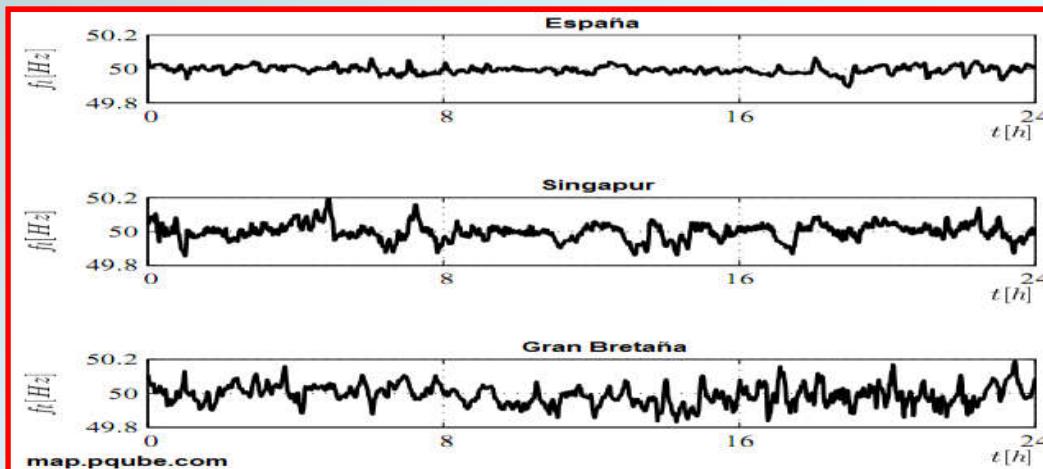
Calidad de la energía

Análisis de perturbaciones

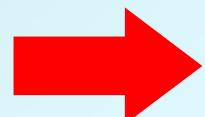


Calidad de la energía

Variaciones de frecuencia

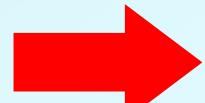


Desincronización
de relojes



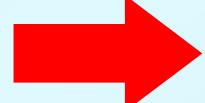
Los sistemas que generan la temporización de procesos a partir de múltiplos de la frecuencia de línea se ven afectados por las variaciones de la misma.

Velocidad de
motores



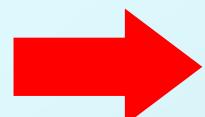
Fluctuaciones rápidas pueden causar problemas mecánicos.

Tasa de cambio
de frecuencia



Los sistemas que poseen protección por ROCOF (Rate-Of-Change-Of-Frequency) se desconectan de la red ocasionando cambios de generación o carga.

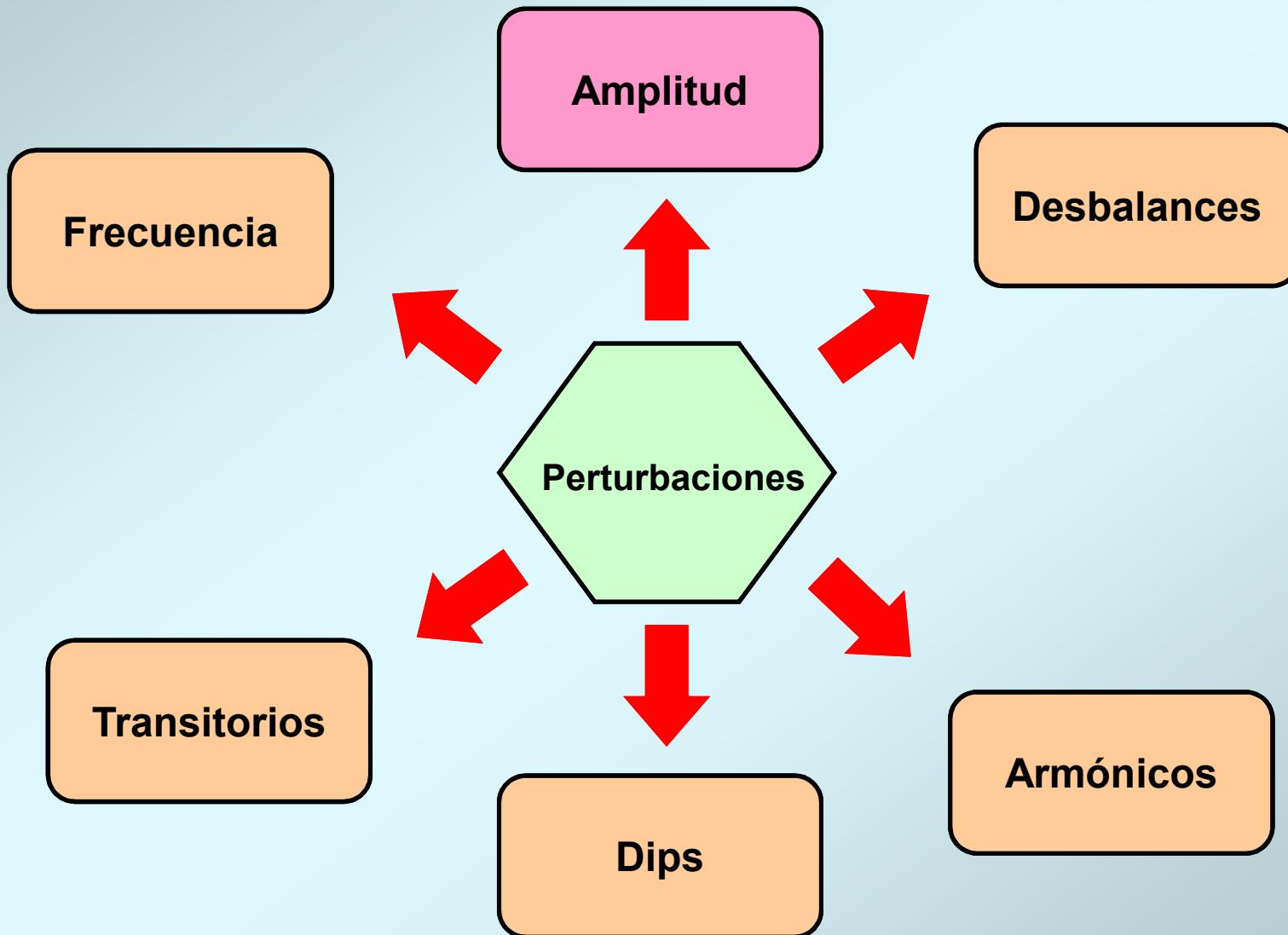
Desconexión por
baja o alta
frecuencia



Un desbalance instantáneo entre potencia generada y potencia demandada provoca una variación en la frecuencia de la red. Para revertir esta situación y balancear generación-demanda se dispara un sistema de desconexión de carga.

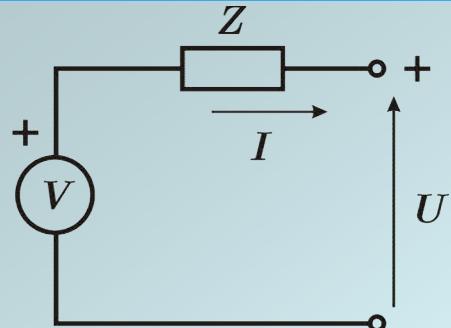
Calidad de la energía

Análisis de perturbaciones



Calidad de la energía

Variaciones lentas de amplitud

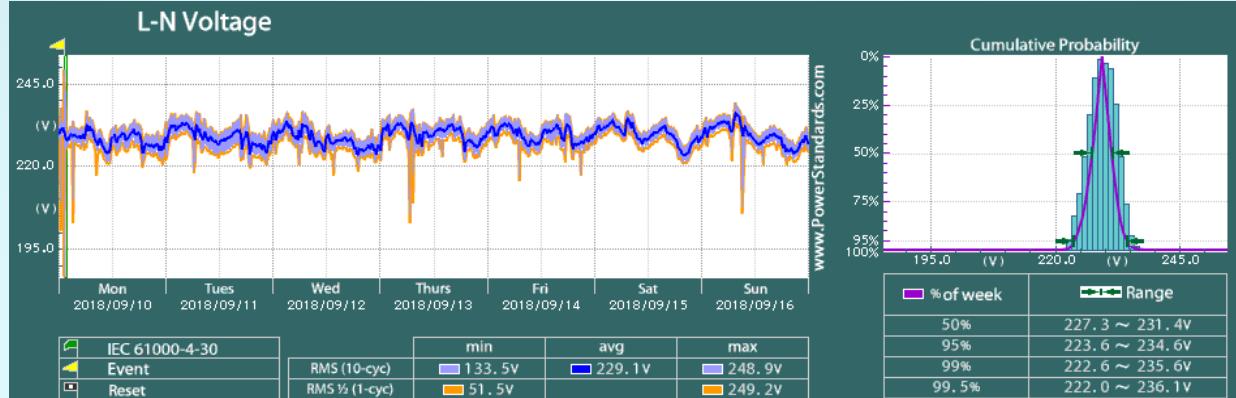


$$U = V - Z \cdot I$$

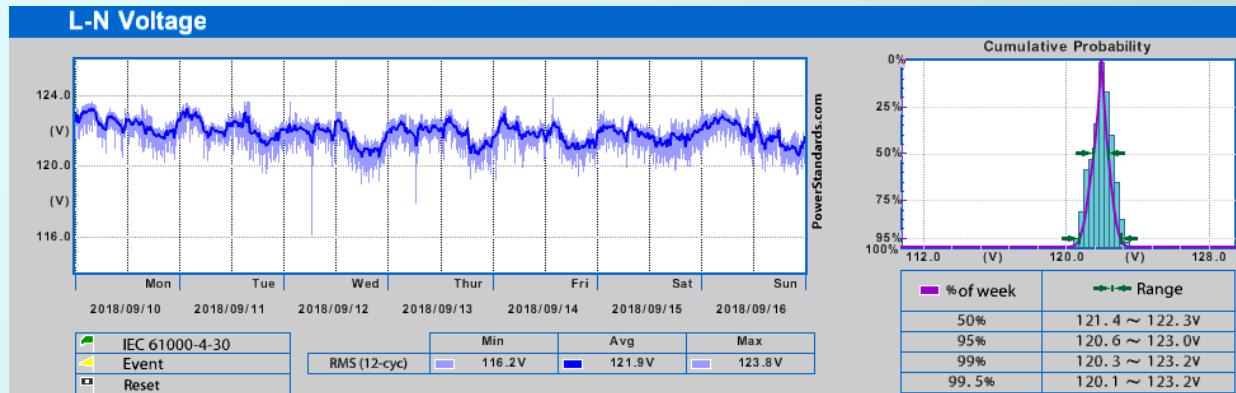
$$S = U \cdot I^* = P + jQ$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \sqrt{\left(1 + \frac{RP + XQ}{U^2}\right) + \left(\frac{XP - RQ}{U^2}\right)} - 1$$

Mar del Plata,
Argentina, 10-16 de
septiembre de 2018



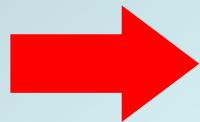
Austin, Texas,
EE.UU., 10-16 de
septiembre de 2018



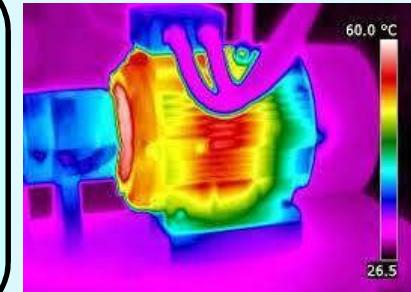
Calidad de la energía

Variaciones lentas de amplitud

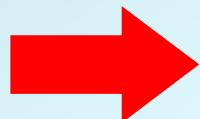
Motores de inducción



- Reducción de tensión provoca una reducción de torque, frenado del motor, y consecuente aumento de la corriente.
- Sobretensión incrementa el torque y la corriente, caída de tensión en las cargas cercanas al motor, y si bien acelera más rápido, el efecto sobre la carga mecánica podría ser perjudicial.



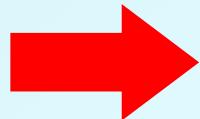
Calefacción



Hay una relación cuadrática entre la tensión y la potencia, por lo que una variación del 10% en la primera provocará casi un 20% de variación en la segunda.

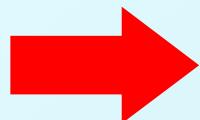


Sistemas ciclados

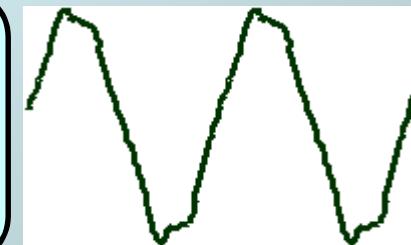


Reducción de tensión conlleva el incremento del ciclo de trabajo para cualquier equipo que use un termostato (calefacción, refrigeración, aire acondicionado). Como resultado la corriente total para un grupo de tales dispositivos se incrementará.

Transformadores



Una tensión mayor que la nominal en los terminales de un transformador incrementará la corriente magnetizante. Como esta está muy distorsionada, un incremento de tensión conllevará un aumento de la distorsión de forma de onda

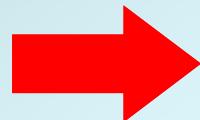


Calidad de la energía

Variaciones rápidas de amplitud (fluctuaciones)

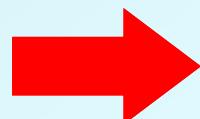
Causas

Equipos que generan cambios repetitivos en la forma de onda



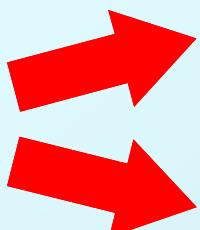
Fotocopiadoras, equipos de aire acondicionado y heladeras. Estos sistemas tienen un ciclo de trabajo reducido y generan pequeños eventos repetitivos de gran velocidad que resultan en rápidos cambios de la amplitud de las tensiones de línea.

Equipos que varían continuamente el consumo de corriente



Hornos de arco eléctrico, cargas de tracción y generadores eólicos.

Consecuencias



Cambios rápidos en la intensidad luminosa de dispositivos de iluminación (flickers).

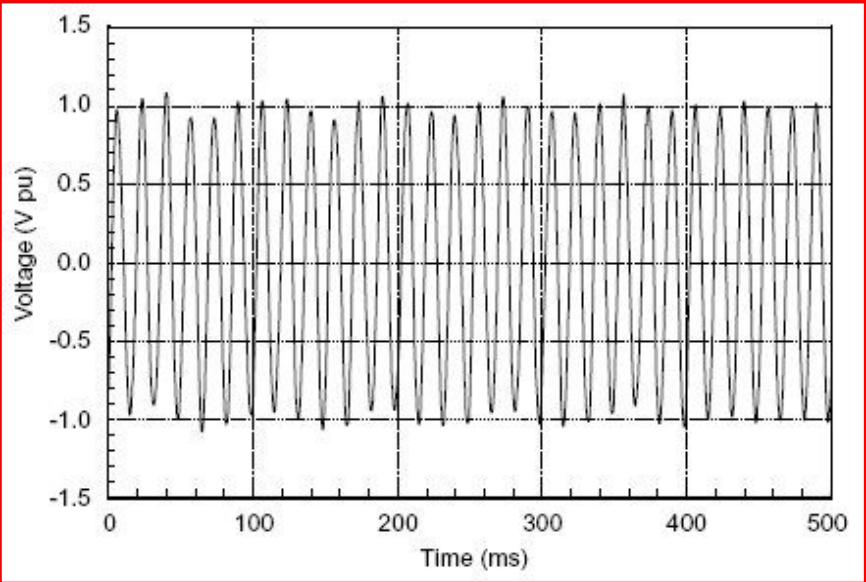
Control de rectificadores controlados por línea y en el frenado y aceleración de motores.

Calidad de la energía

Variaciones rápidas de amplitud (fluctuaciones)

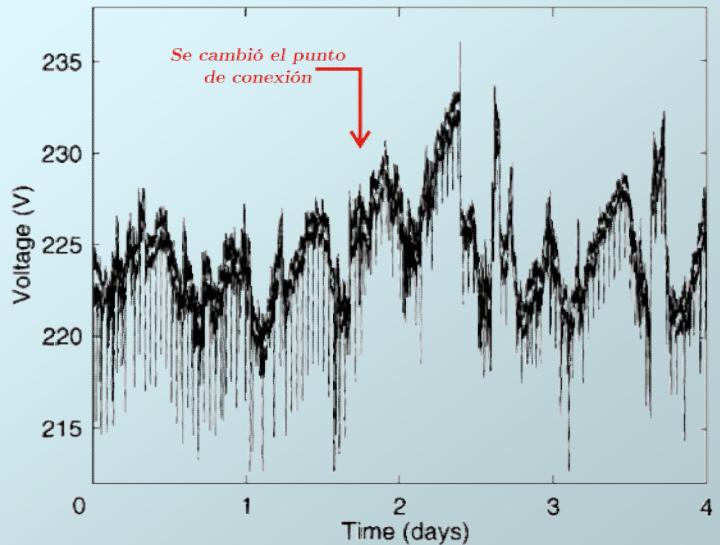
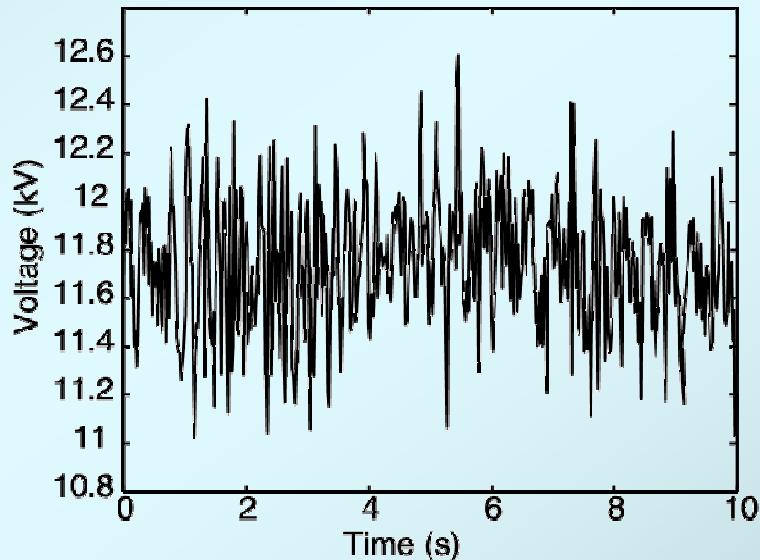
Variaciones rápidas de corriente

Horno eléctrico



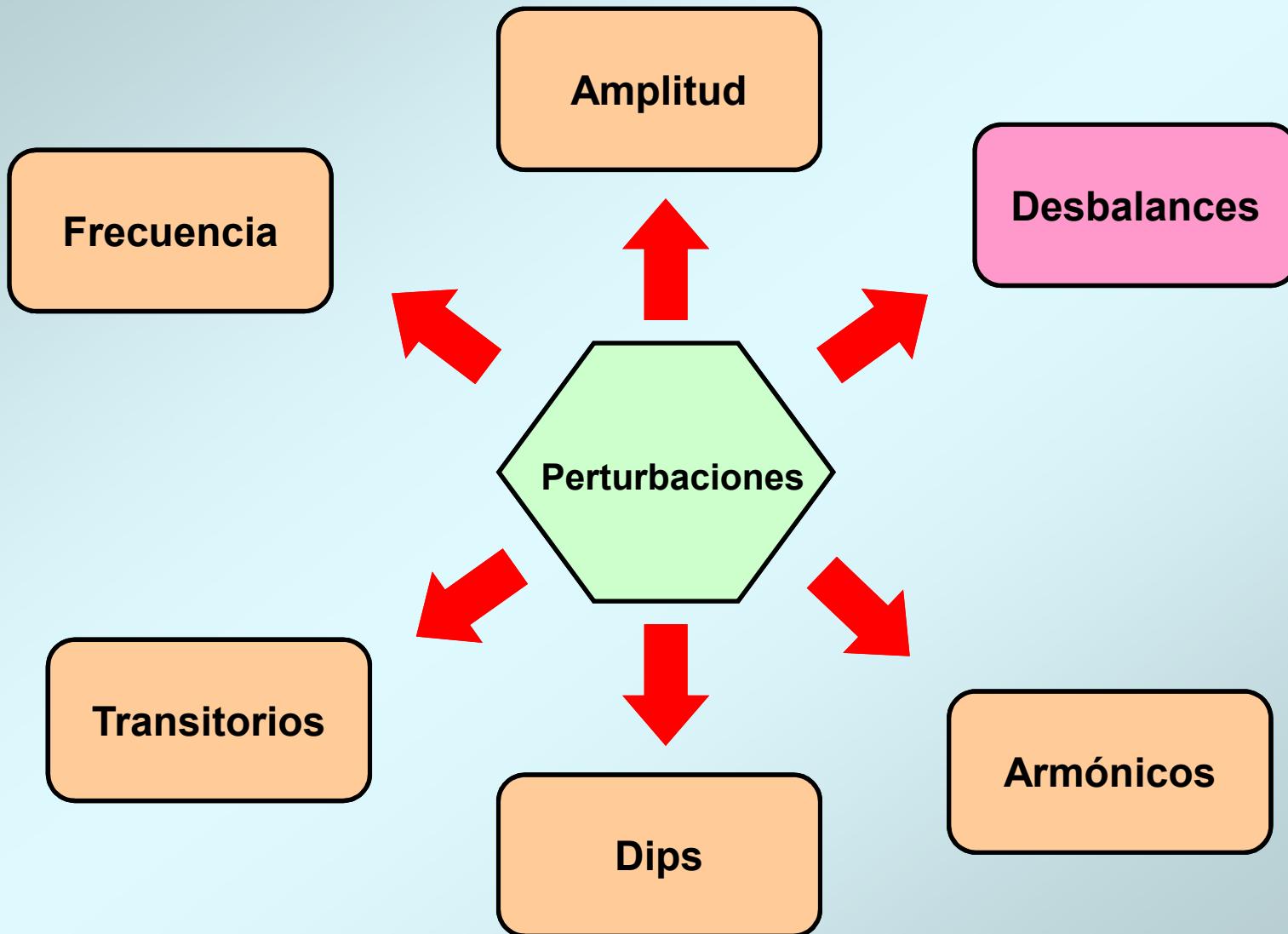
Evento repetitivo: Arranque del motor

Heladera



Calidad de la energía

Análisis de perturbaciones



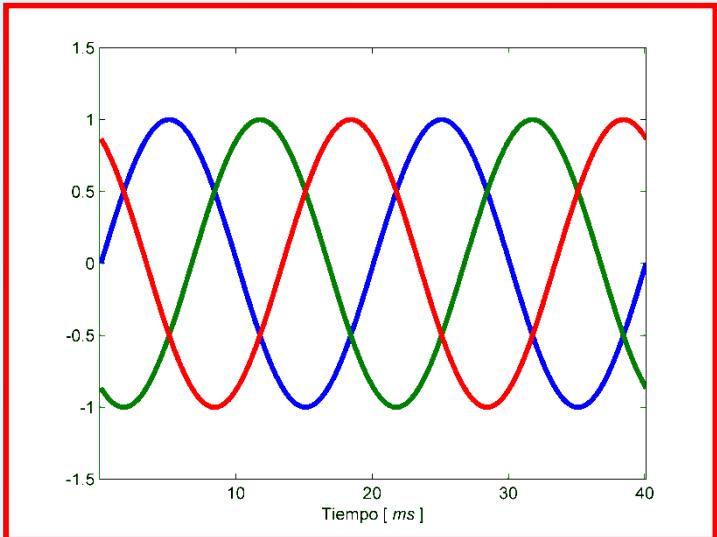
Calidad de la energía

Desbalances

Representación de sistemas trifásicos balanceados

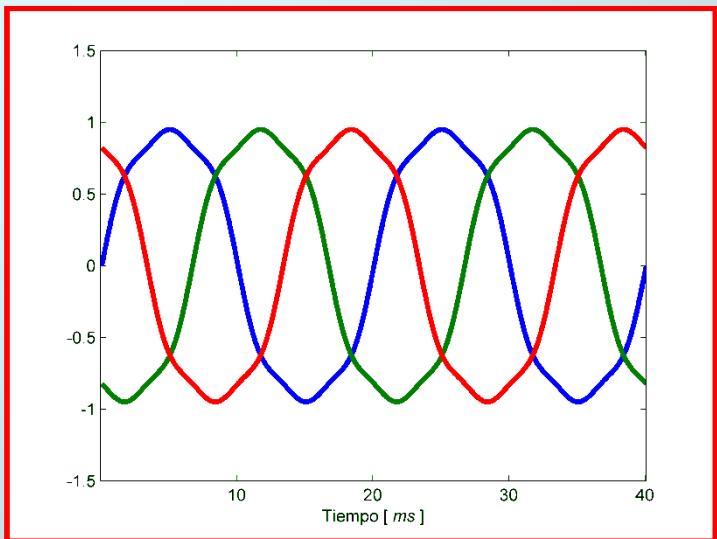
Sistema trifásico balanceado

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = V_{+1} \begin{bmatrix} \cos(\varphi_u(t)) \\ \cos(\varphi_u(t) - 2\pi/3) \\ \cos(\varphi_u(t) - 4\pi/3) \end{bmatrix}$$



Sistema trifásico balanceado con cargas no lineales

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \begin{bmatrix} \cos(n\varphi_u(t) + \varphi_n) \\ \cos(n\varphi_u(t) - n2\pi/3 + \varphi_n) \\ \cos(n\varphi_u(t) - n4\pi/3 + \varphi_n) \end{bmatrix}$$



Las señales en cada fase dejan de ser senoides puras pero conservan la misma forma de onda, manteniendo una diferencia de fase entre ellas igual a un tercio del ciclo de la componente fundamental

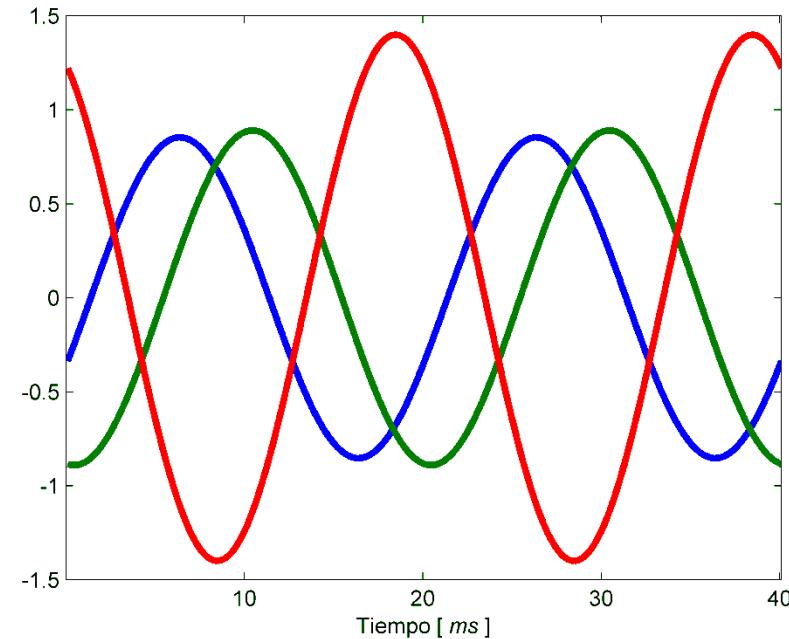
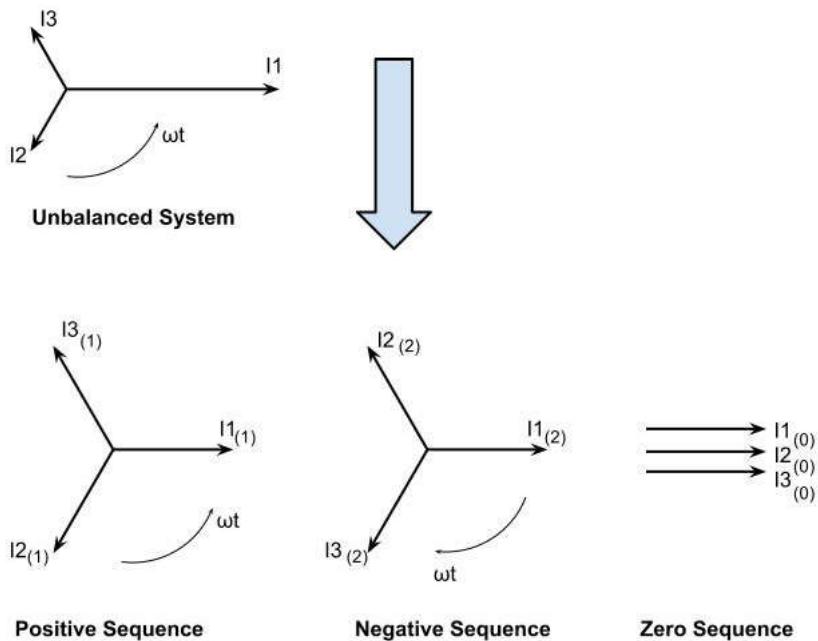
Calidad de la energía

Desbalances

Representación de sistemas trifásicos desbalanceados

Componentes simétricas
(Marco de referencia natural)

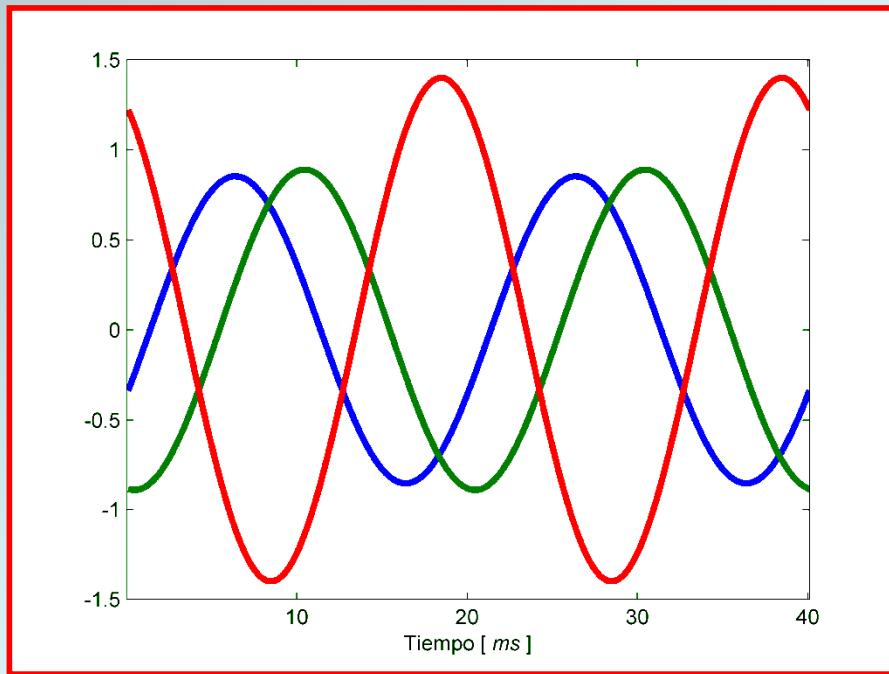
Un sistema polifásico desbalanceado, con n fases, se puede representar como la suma de n sistemas equilibrados (Teorema de Fortescue)



Calidad de la energía

Desbalances

Representación de sistemas trifásicos desbalanceados



$$T_+ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & g & g^2 \\ g^2 & 1 & g \\ g & g^2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & g^2 & g \\ g & 1 & g^2 \\ g^2 & g & 1 \end{bmatrix}$$

$$g = e^{j2\pi/3}$$

Operador de Fortescue
(120°)

$$T_h = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

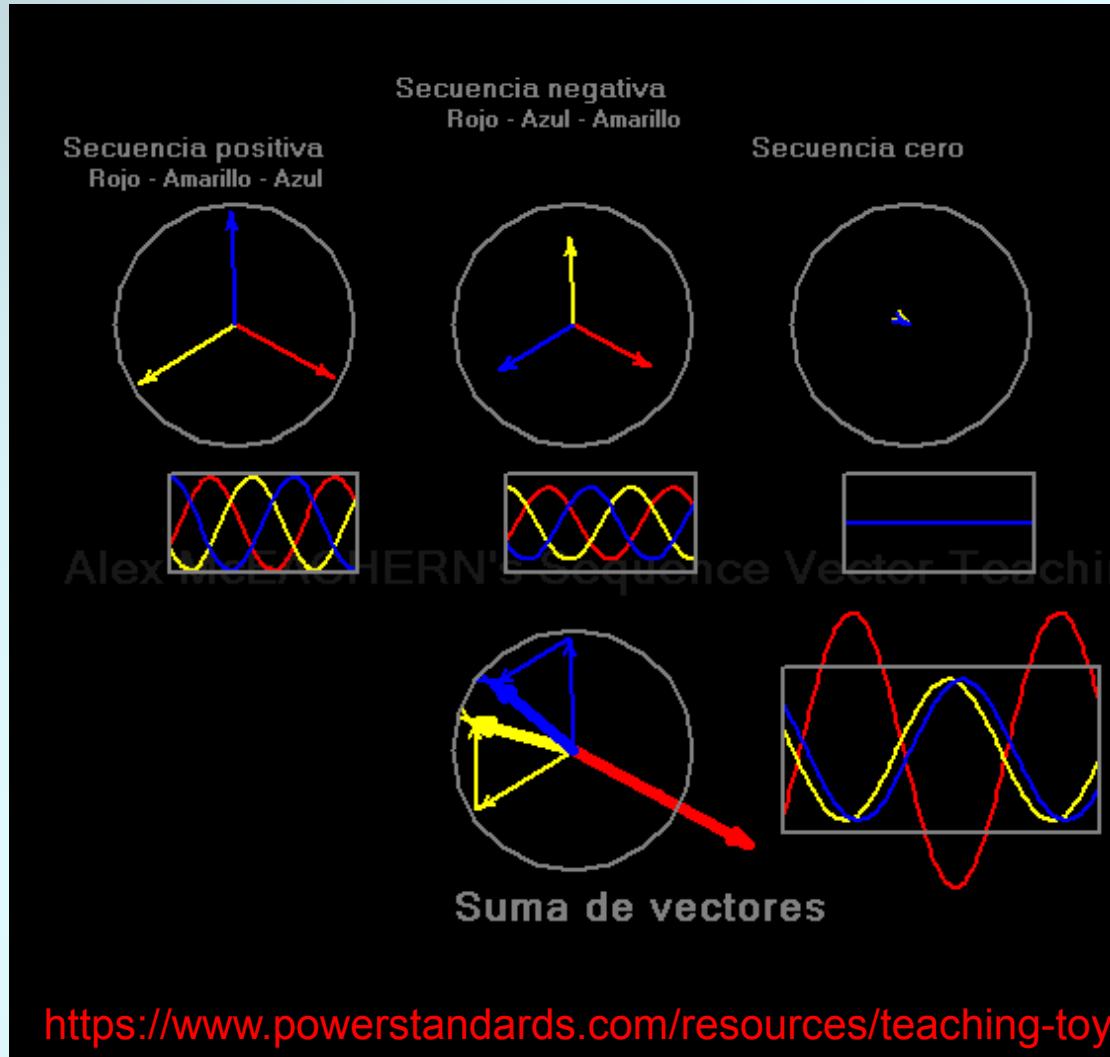
Sistema trifásico desbalanceado

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = V_+ \begin{bmatrix} \cos(\varphi_u(t)) \\ \cos(\varphi_u(t) - 2\pi/3) \\ \cos(\varphi_u(t) - 4\pi/3) \end{bmatrix} + V_- \begin{bmatrix} \cos(-\varphi_u(t) + \varphi_-) \\ \cos(-\varphi_u(t) - 2\pi/3 + \varphi_-) \\ \cos(-\varphi_u(t) - 4\pi/3 + \varphi_-) \end{bmatrix} + V_h \begin{bmatrix} \cos(\varphi_u(t) + \varphi_h) \\ \cos(\varphi_u(t) + \varphi_h) \\ \cos(\varphi_u(t) + \varphi_h) \end{bmatrix}$$

Calidad de la energía

Desbalances

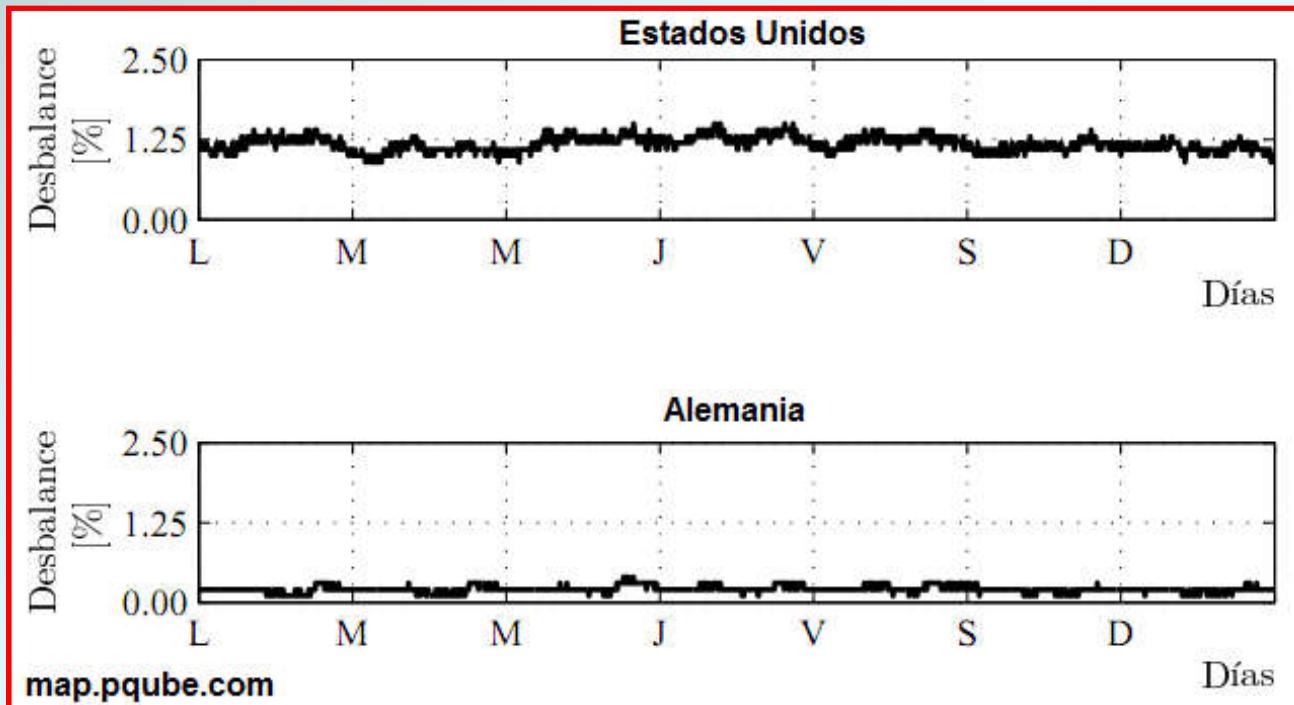
Representación de sistemas trifásicos desbalanceados



Software PSL

Calidad de la energía

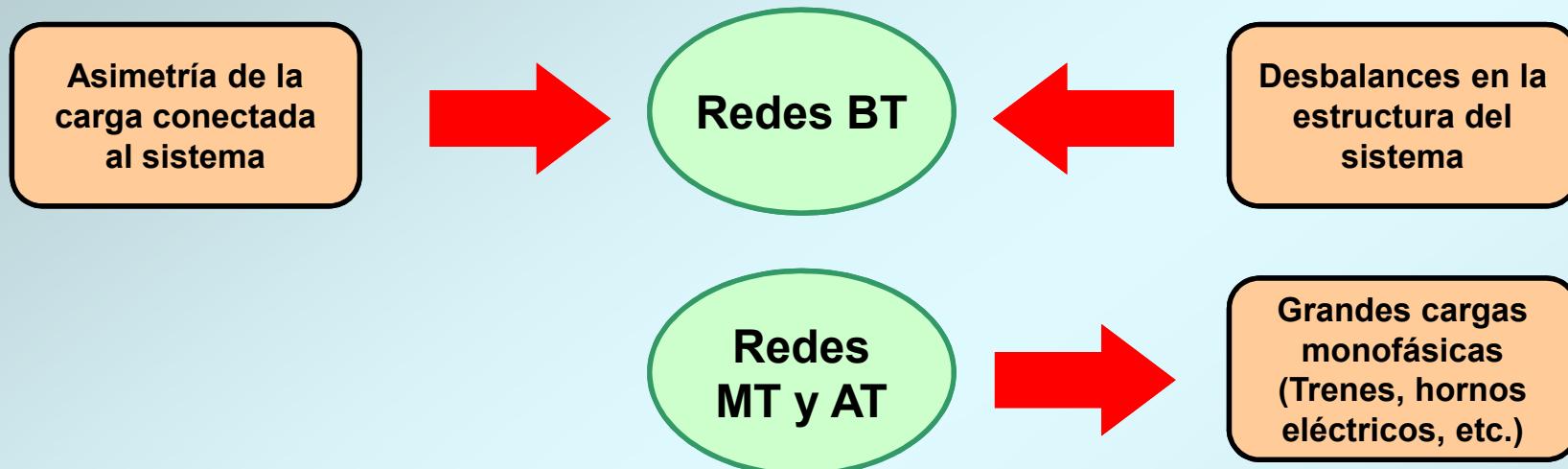
Desbalances



$$\text{DESB} = \frac{V_-}{V_+} 100 \%$$

Calidad de la energía

Desbalances - Causas



Otra causa puede ser la circulación de corriente balanceada a través de impedancias no balanceadas. Los transformadores y las líneas de transmisión no son completamente iguales para cada fase. Por ejemplo, la rama central de un transformador trifásico toma una corriente de magnetización diferente a las otras dos.

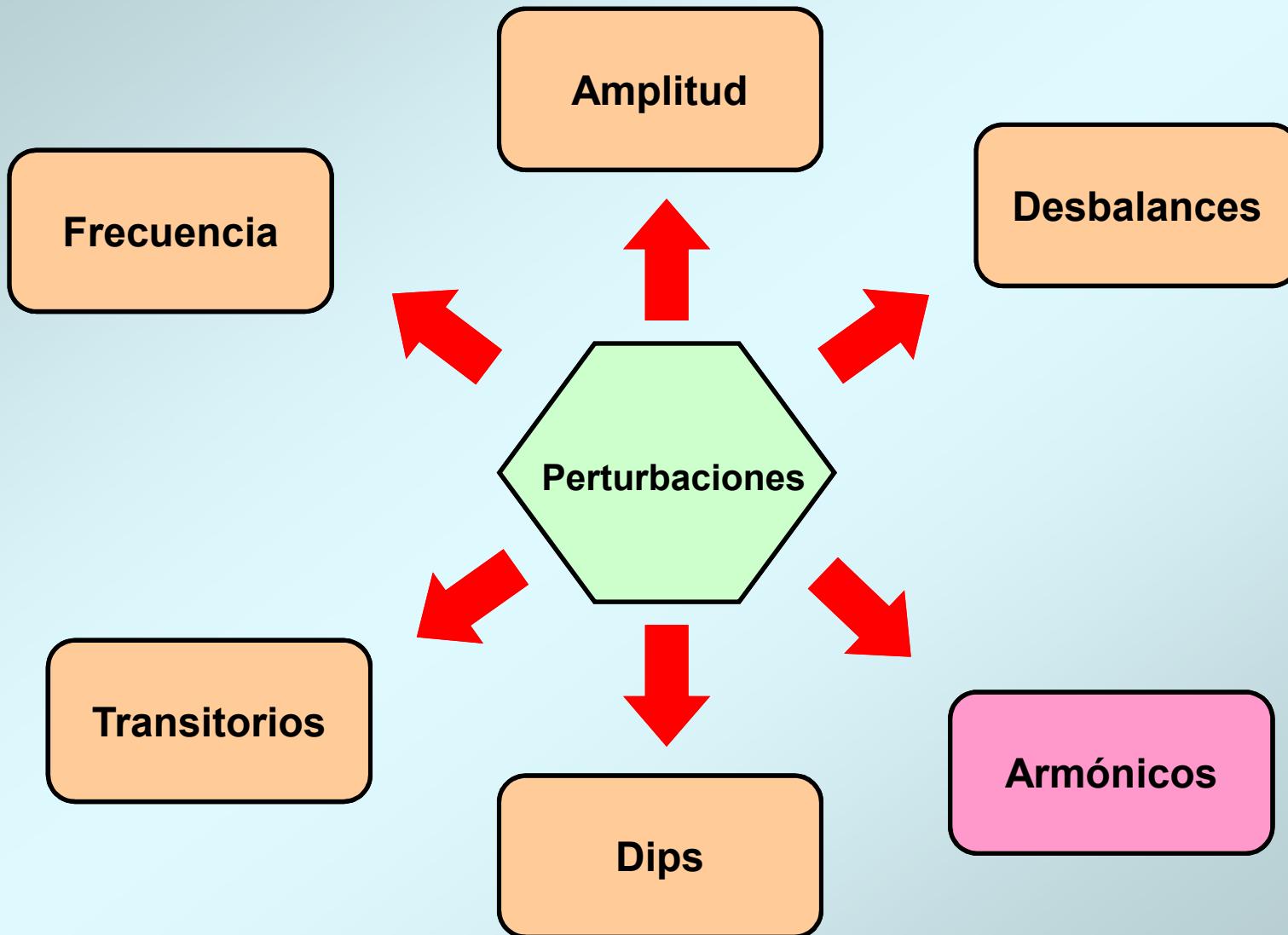
Incluso cargas que deberían ser balanceadas pueden no serlo



Motor trifásico: calentamiento desigual del estator, diferencias en los arrollamientos, alineamiento rotor, reparaciones, etc

Calidad de la energía

Análisis de perturbaciones



Calidad de la energía

Distorsión de forma de onda

Distorsión armónica

Tipos de distorsión de forma de onda

Distorsión no periódica

- Ruido
- Caos

$$v(t) = V_o + \sum_{h=1}^H \sqrt{2}V_h \cos(h\omega t - \alpha_h)$$

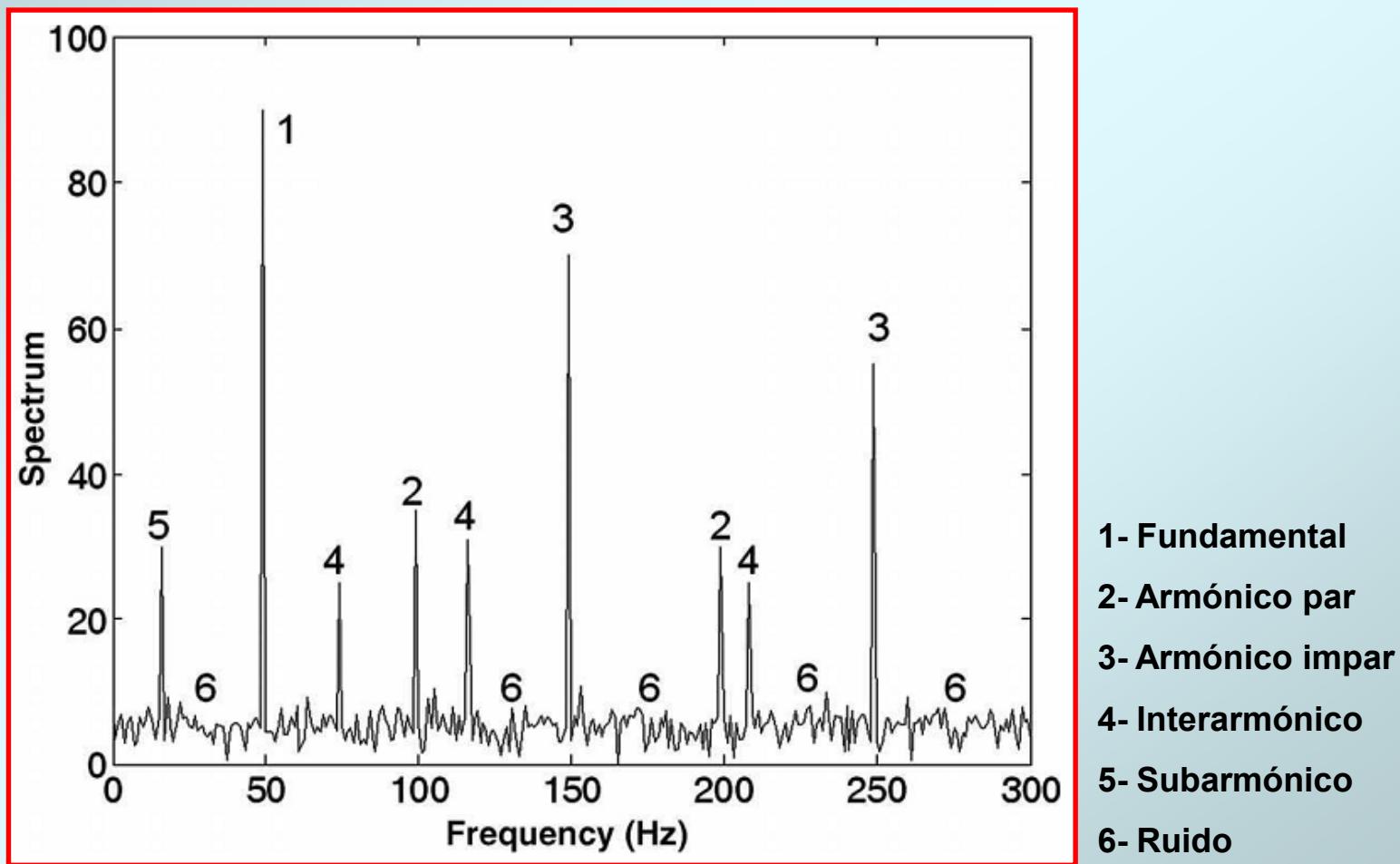
Distorsión interarmónica

$$v(t) = V_o(t) + \sqrt{2} \sum_{h=1}^H V_h \cos(h\omega t - \alpha_h) + V_\xi \cos(\xi\omega t - \alpha_\xi)$$

La distorsión no armónica es más difícil de cuantificar. Sin embargo, la distorsión armónica suele ser la dominante, resultando en una forma de onda periódica en una ventana de un ciclo.

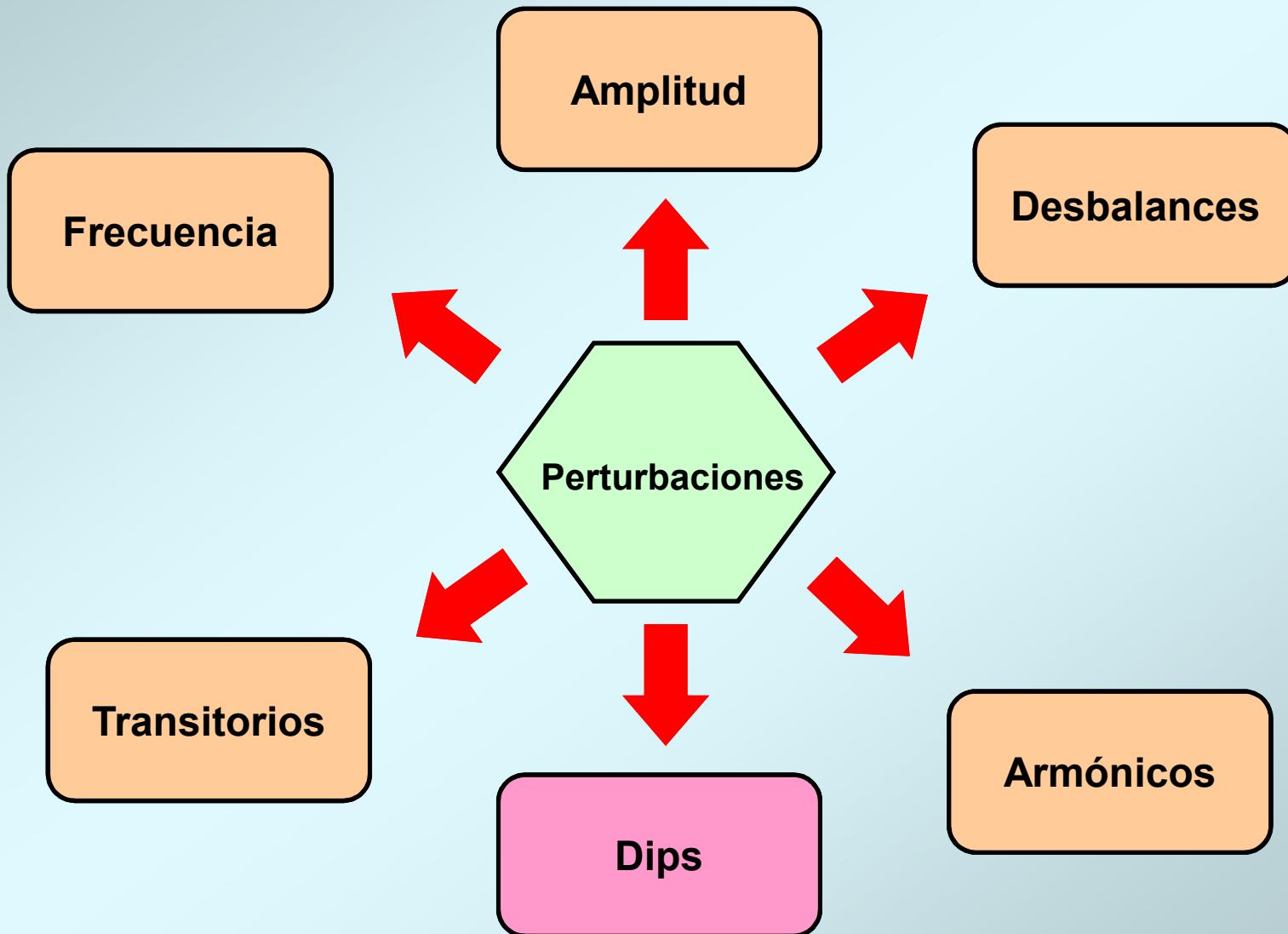
Calidad de la energía

Distorsión de forma de onda



Calidad de la energía

Análisis de perturbaciones

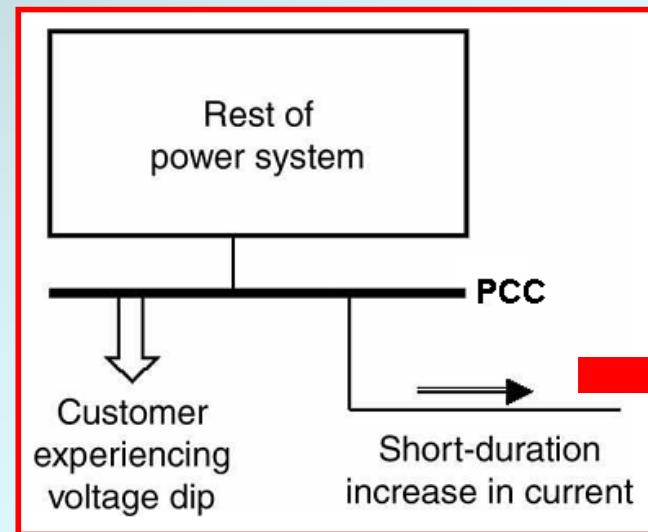


Calidad de la energía

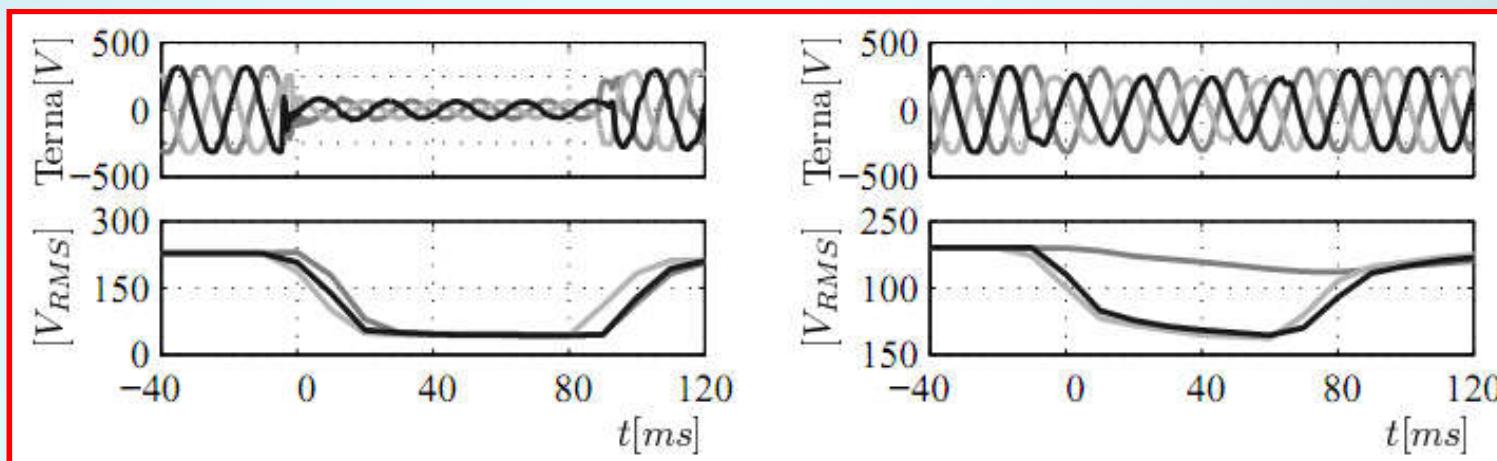
Reducción breve de la tensión (dip)

Evento

Duración: entre $\frac{1}{2}$ ciclo y 3 minutos
Tensión < 90%

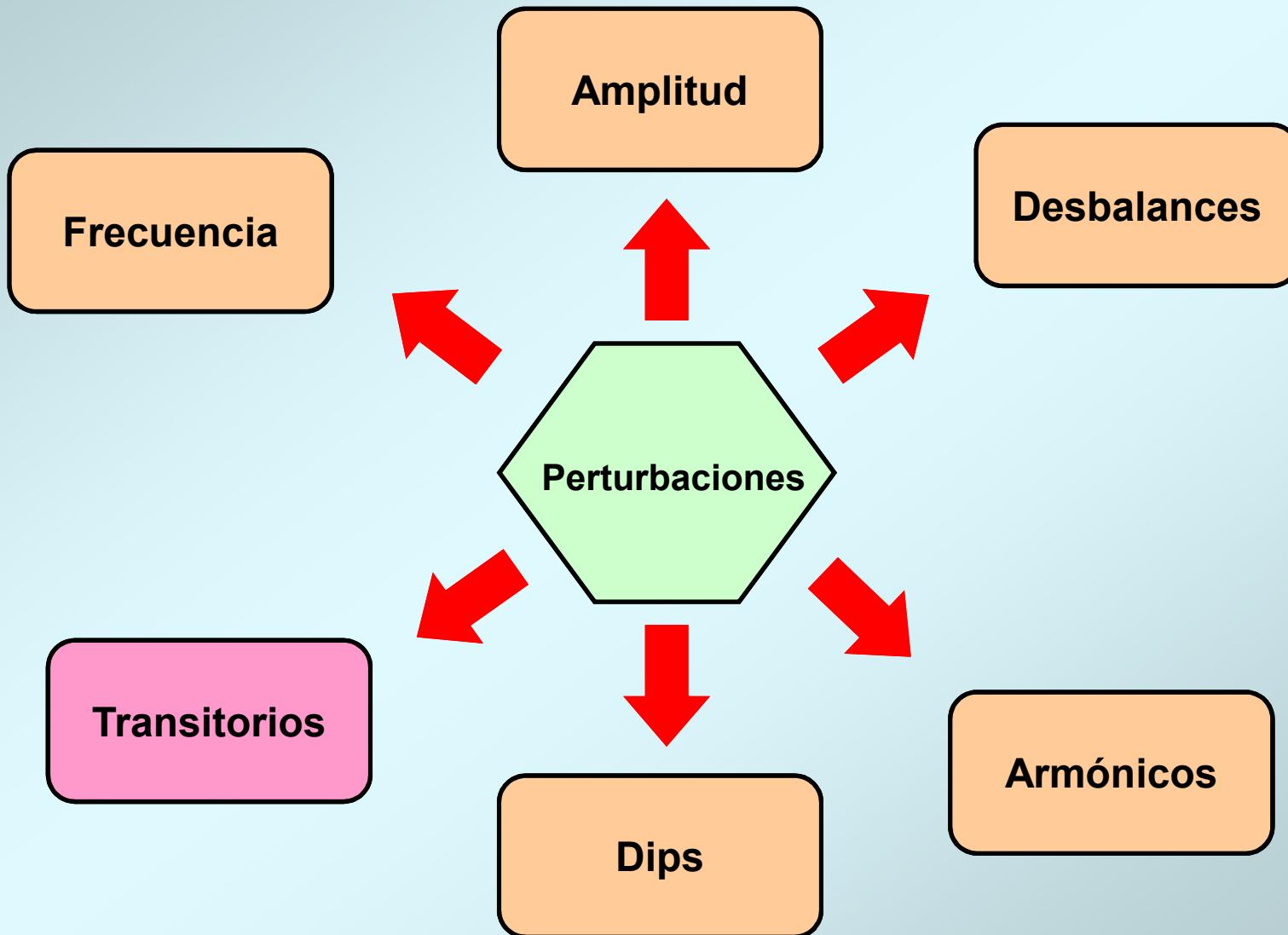


- Cortocircuitos y fallas a tierra
- Arranque de motores de inducción
- Energizar transformadores



Calidad de la energía

Análisis de perturbaciones



Calidad de la energía

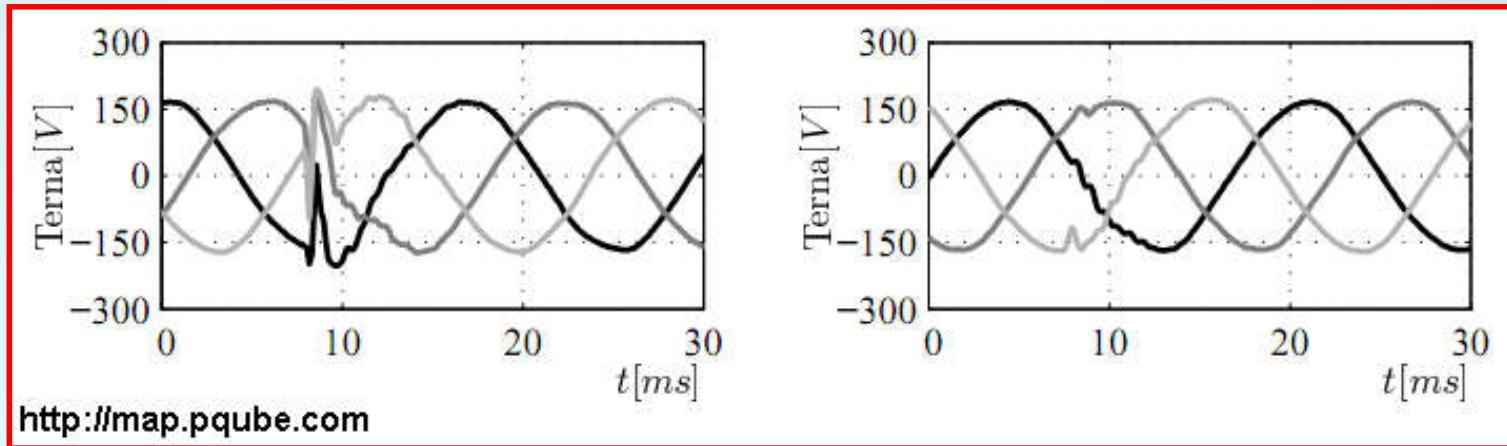
Transitorios

En sistemas de potencia, los transitorios son los eventos de tensión o corriente que tienen una duración menor a un ciclo de la fundamental.



Definición de transitorios

Teoría de circuitos \neq Sistemas de potencia



<http://map.pqube.com>

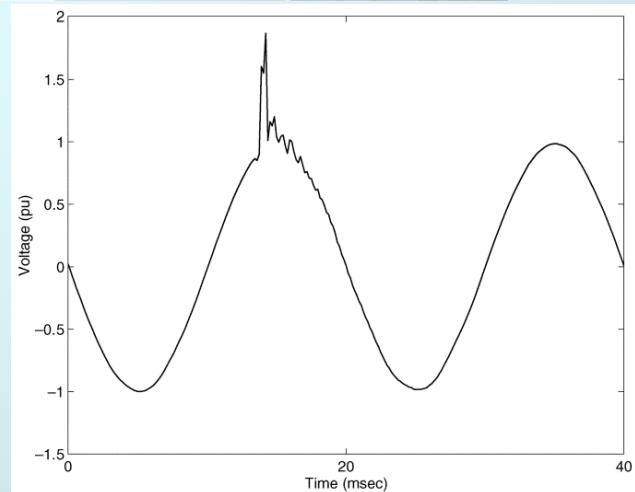
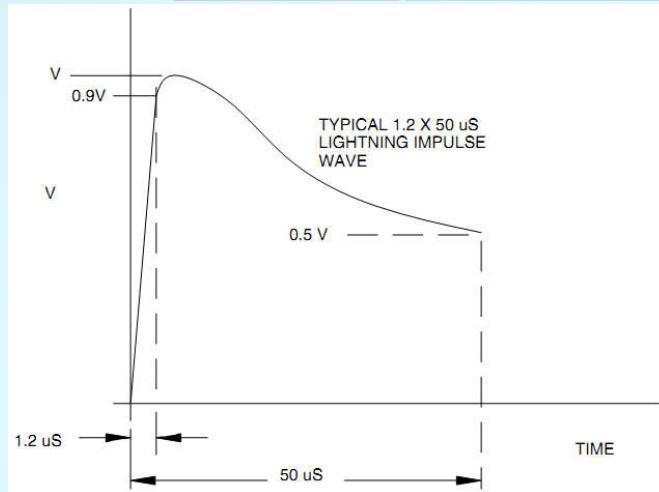
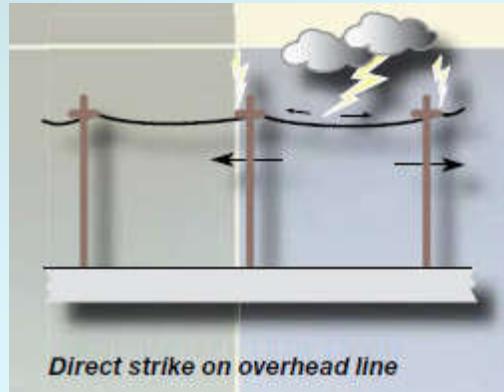
Calidad de la energía

Transitorios

Clasificación de transitorios basada en el origen del evento

Descargas eléctricas

Conexiónado (switching)



Transitorio debido a un descarga en la línea de 132 kV

Power Quality, C. Sankaran

Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen

<http://electrical-engineering-portal.com/transient-voltage-surge-suppressors>

Categorization and Analysis of Power System Transients, Math H. Bollen

Calidad de la energía

Transitorios

Clasificación de transitorios basada en el origen del evento

Descargas eléctricas

Conexiónado (switching)

- Carga / Descarga de capacitores
- Carga / Descarga de inductores

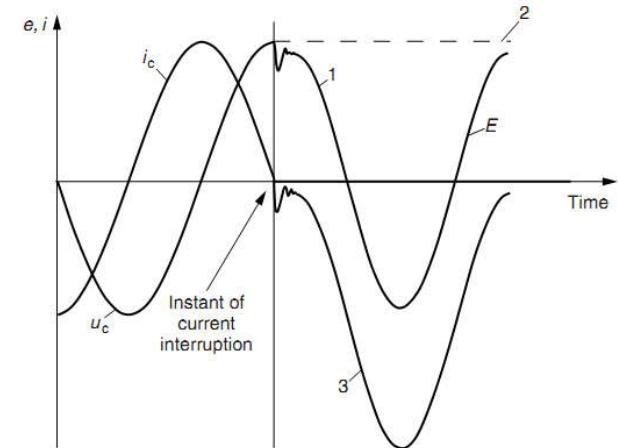
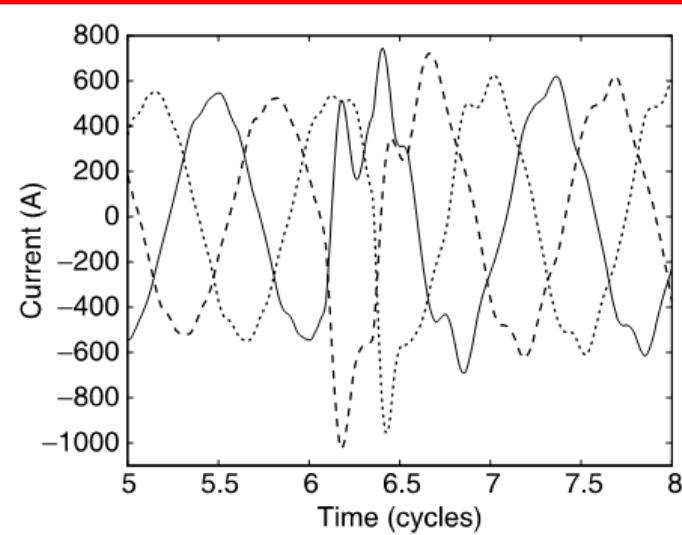
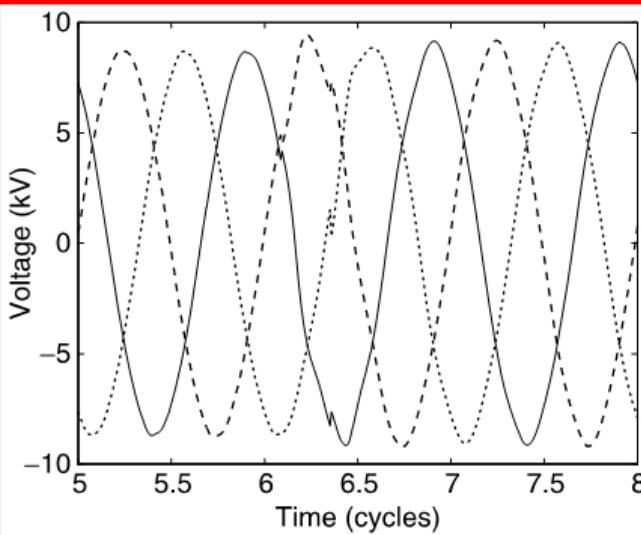


Figure 5.2 Current and voltage traces during the interruption of a capacitive current 1: supply voltage, 2: voltage on the capacitor, and 3: voltage across the circuit breaker



Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen
Transients in power systems, Lou van der Sluis

Calidad de la energía

Medición

Parámetros

Índices

**Métodos de
medición**

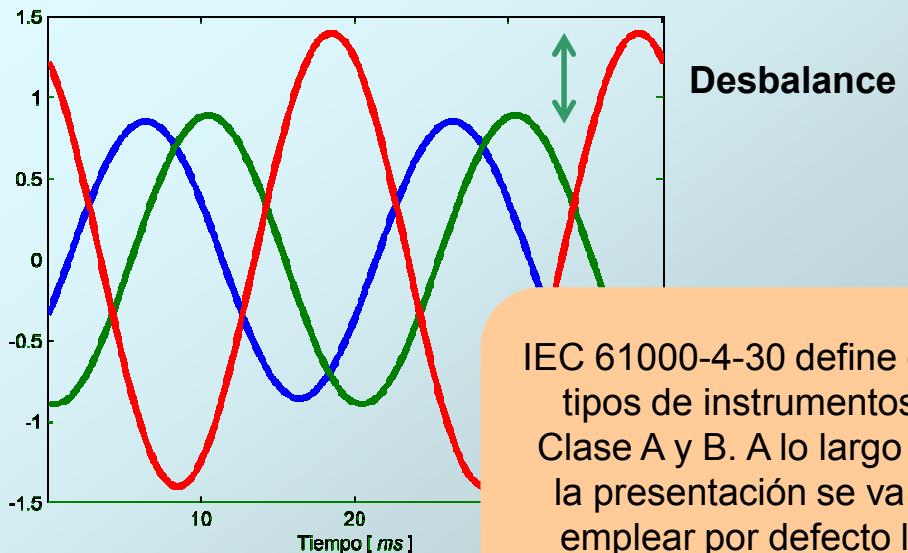
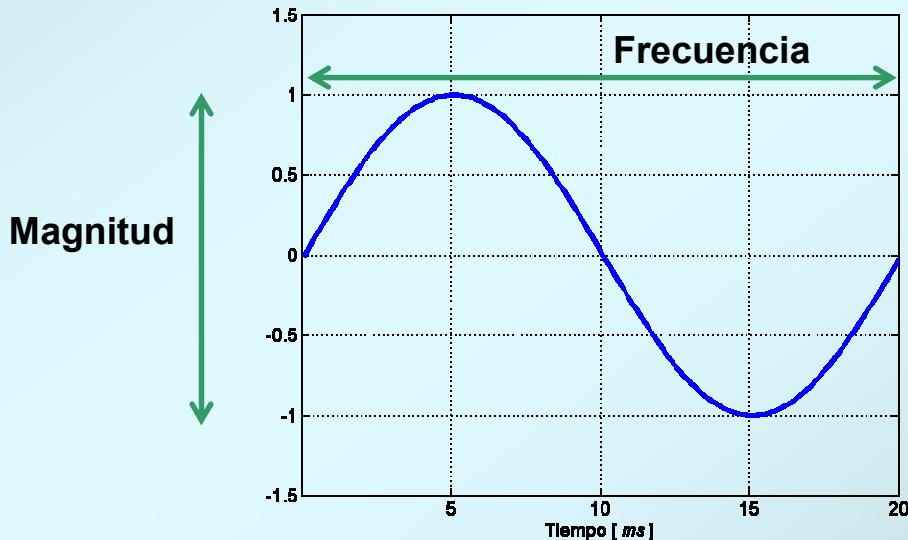
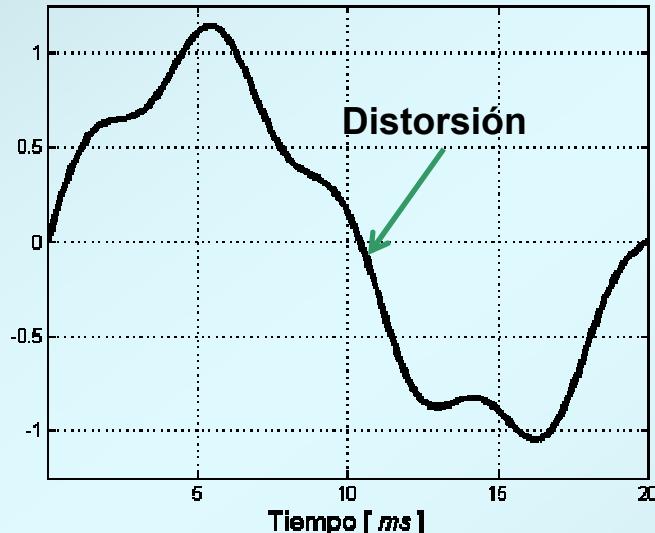
Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Necesidad de evaluar la calidad de la energía eléctrica



Cualquier desviación de la forma de onda ideal de tensión o corriente se puede caracterizar mediante ciertos parámetros



IEC 61000-4-30 define dos tipos de instrumentos:
Clase A y B. A lo largo de la presentación se va a emplear por defecto la Clase A (más exigente)

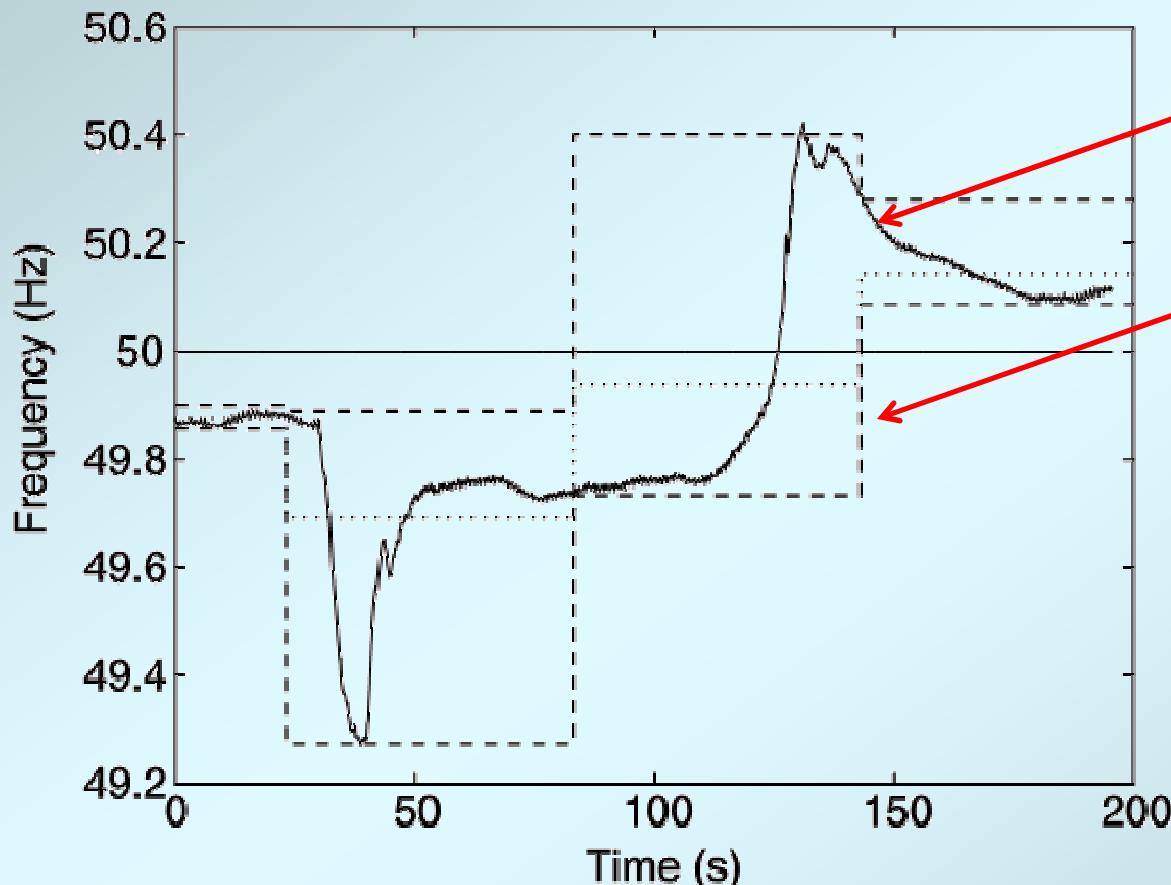
Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Frecuencia



Es una medida de la velocidad de rotación de las máquinas eléctricas



Ejemplo de perturbación sobre la línea de transmisión que afecta la frecuencia del sistema.

Línea llena: medición en una ventana de 100 ms realizada por el operador en la línea de transmisión

Líneas de trazos: mediciones realizadas en una ventana de 1 minuto en la línea de baja tensión (230V).

Medición de frecuencia

- Cruces por cero
- PLLs
- Transformadas $\alpha\beta$ y dq
- Otros

Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Frecuencia

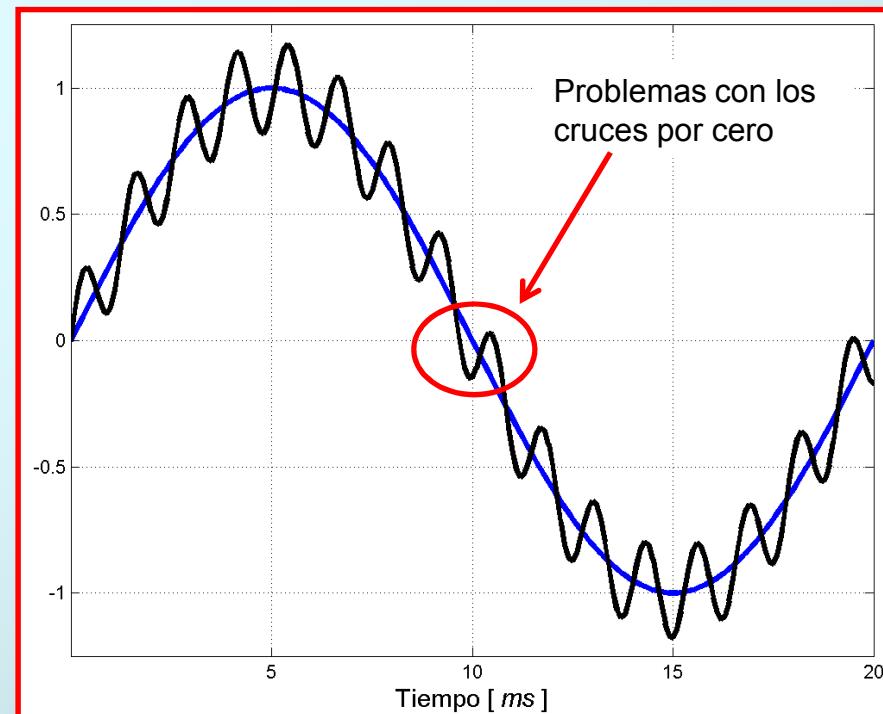


Cruces por cero

La norma IEC 61000-4-30 define la frecuencia como el cociente entre el número de ciclos enteros contados en **un intervalo de tiempo de 10 s**, dividido por la duración acumulada de los mismos ciclos

$$f = \frac{499}{9,982 \text{ s}} = 49,99 \text{ Hz}$$

- El error está limitado a ± 1 ciclo de red (20 ms o 16,7 ms)
- Resolución: 10 mHz
- Sistemas trifásicos: Se debe tomar una fase como referencia
- Se consigue una exactitud muy elevada con señales estacionarias, pero hay errores importantes en la medición de señales no estacionarias, transitorios.
- Dips → Salto de fase → ¿variación de frecuencia?



Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Frecuencia

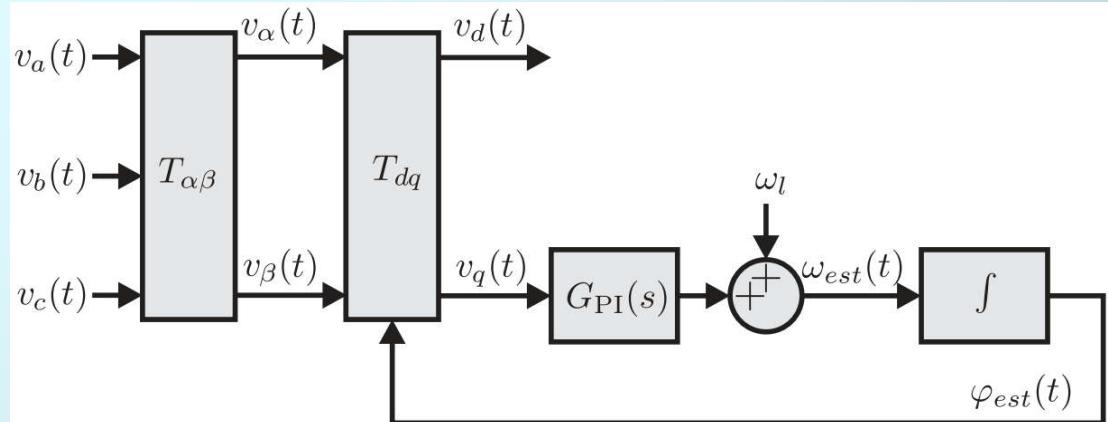
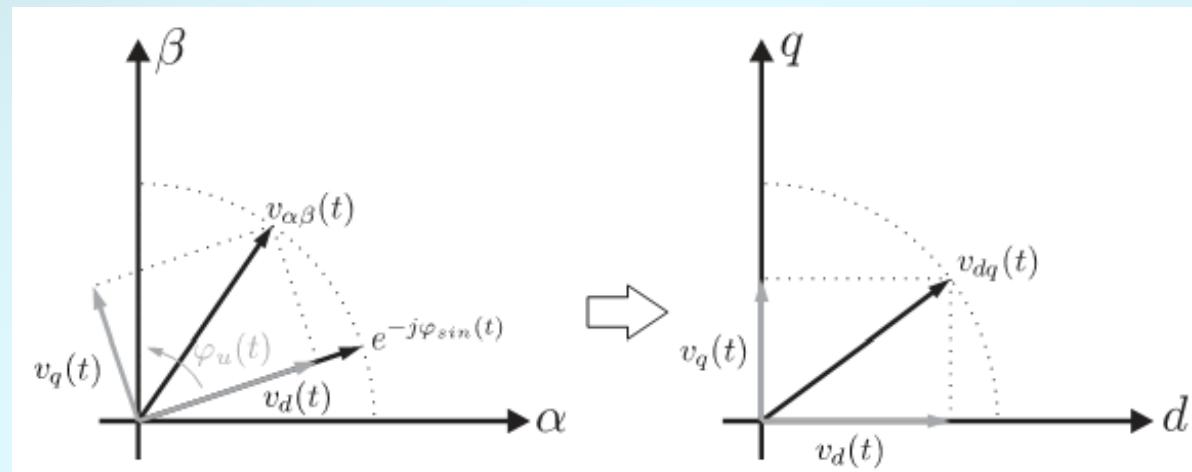


Transformadas
 $\alpha\beta$ y dq

Lazo de enganche
de fase (PLL)



En vez de tomar una única fase como referencia, se puede combinar la información de las tres fases para obtener una información de fase que represente a la terna en forma integral.



Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Amplitud

A diferencia de la frecuencia, que puede considerarse igual en todos los puntos de la red, la amplitud depende de la ubicación del punto de medición.

IEC 61000-4-30

Establece que se calcula el valor rms en un intervalo de 10 o 12 ciclos de la componente fundamental (~200ms).

$$V_I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}$$

Valor RMS

N es un múltiplo entero del número de muestras durante medio ciclo de la tensión de línea.

Medición de la amplitud
(caso monofásico)

$$V_{II} = \frac{\max(|\psi_0|, |\psi_1|, \dots, |\psi_N|)}{\sqrt{2}}$$

Valor máximo

- Necesidad de filtrado
- Criterio de selección de N (a mayor valor de N, mayor V_{II})

$$V_{III} = |V_1|$$

Componente fundamental

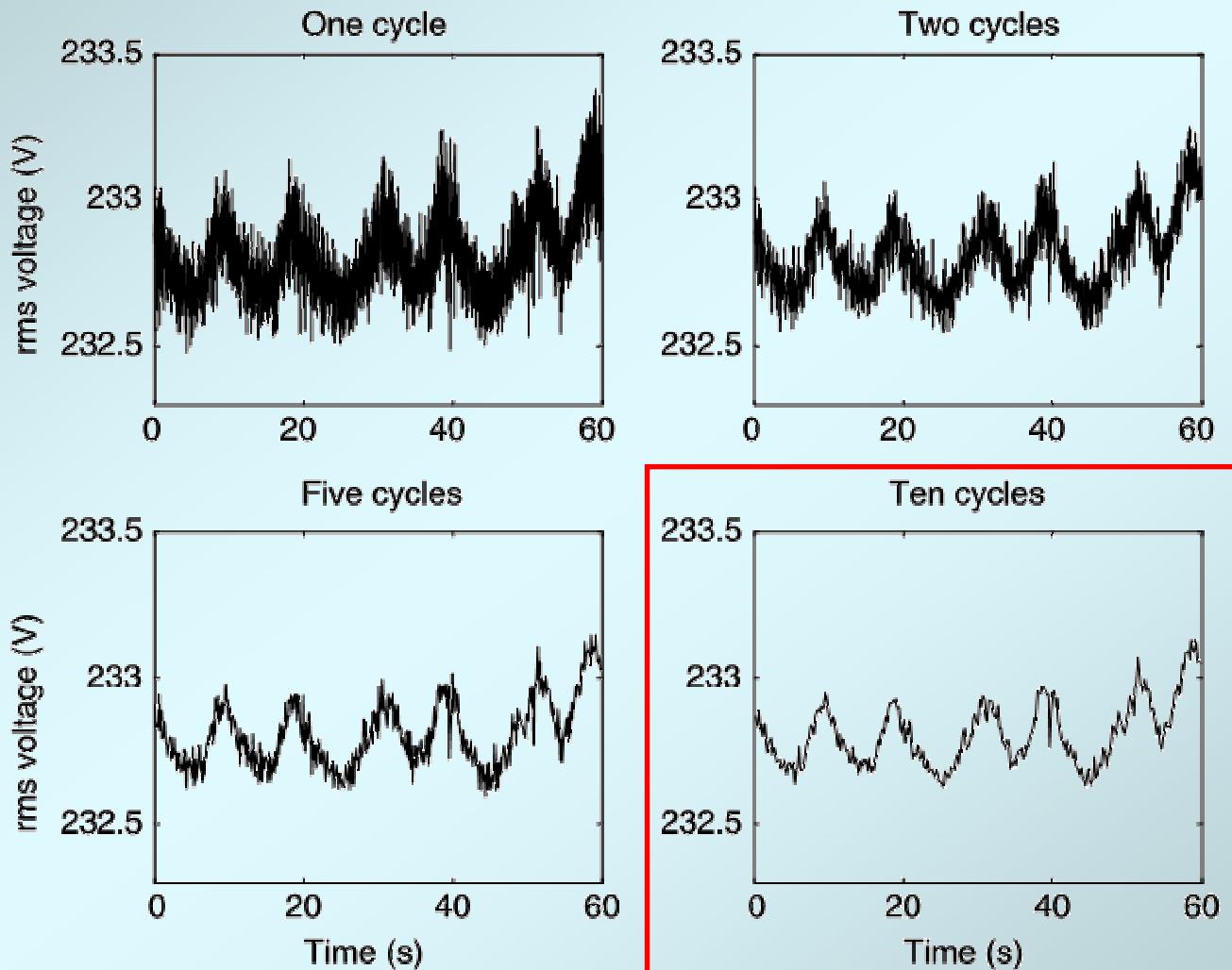
Si la distorsión es baja, $V_{III} \approx V_I$

Si bien suele emplearse más el valor RMS, los otros dos métodos son válidos en la mayoría de las aplicaciones

Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Efecto de la ventana de medición sobre el valor rms



Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Medición de la amplitud (caso trifásico)

Valor promedio



$$V_{IV} = \text{promedio } (V_a, V_b, V_c)$$

Para determinar las tensiones de fase se puede emplear cualquiera de los tres métodos vistos para sistemas monofásicos

Valor rms de las tres fases



$$V_V = \sqrt{\frac{1}{3} (V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)}$$

Valor absoluto de la secuencia positiva



$$V_{VI} = |V_+|$$

Valor rms instantáneo



$$V_{VII} = \sqrt{\frac{1}{3} (v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t))}$$

Para sistemas balanceados sin distorsión, este valor es constante. Caso contrario aparecen oscilaciones en la amplitud que deben filtrarse

Máxima desviación respecto del valor nominal



$$\Delta = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm V_{rms} \mp V_{ref} \\ \hline V_{ref} \end{array} \right.$$

La presencia de desbalances y distorsión afecta de diferente forma a todos los métodos. Por esta razón es importante indicar claramente la metodología utilizada.

Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Distorsión

IEC 61000-4-7



Define como se mide la distorsión armónica en la corriente y los límites establecidos.

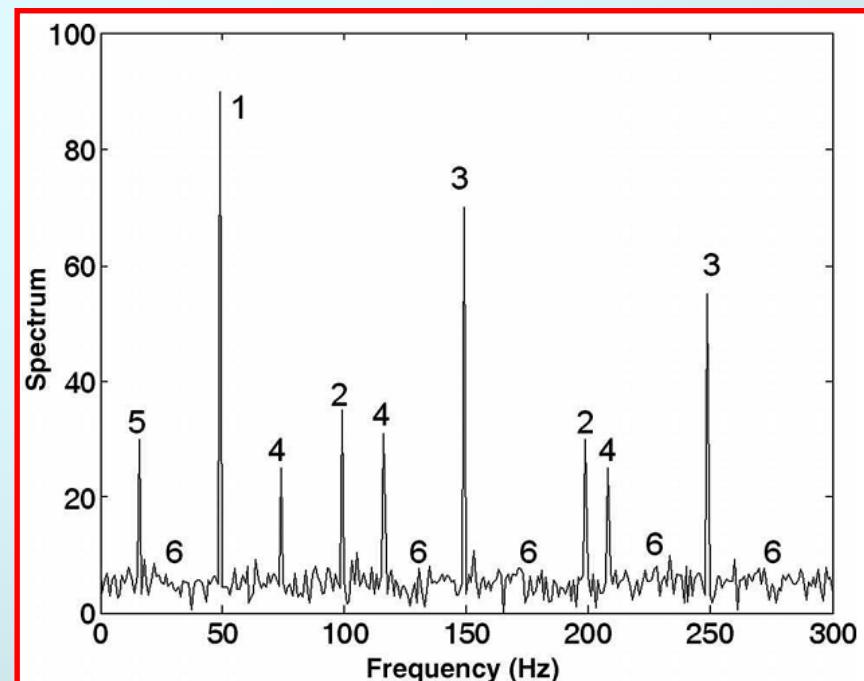
IEC 61000-4-30



Define las condiciones del proceso de medición

- Transformada de Fourier
- Ventana rectangular de **10/12 ciclos de duración** (según si es de 50 o 60 Hz)
- Sincronización con la red eléctrica (0,03% de tolerancia)
- Uso de filtros anti-aliasing

Necesidad de definir
índices para cuantificar
la distorsión



Calidad de la energía

Parámetros de calidad de la energía

Desbalance



Las tensiones de la red trifásica no se corresponden con el caso ideal balanceado: tres tensiones sinusoidales desfasadas 120°.

- u_n : El cociente entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva (IEEE 1519, IEEE 936, Bollen, y otros).

$$u_n = \frac{U^-}{U^+}$$

- u_n : Cálculo a través de las tensiones de línea (IEC 61000-4-30)

$$u_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6Q}}{1 + \sqrt{1 - 3Q}}} , Q = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)^2}$$

(ver Bollen, secc. 3.2.4.3)

- u_{112} : Máxima desviación del promedio de las tensiones de fase referida al promedio de las tensiones de fase (IEEE 112, IEEE 1159).

- u_{NEMA} : Máxima desviación del promedio de las tensiones de línea referida al promedio de las tensiones de línea (NEMA, IEEE 112, IEEE 1159).

- u_{936} : Diferencia entre la mayor y menor tensión rms, referida al promedio de las tres tensiones (IEEE 936).



Contradicciones entre normas IEEE, próximas a desaparecer

Parámetros

Índices

**Métodos de
medición**

Calidad de la energía

Índices de calidad de la energía

¿Por qué se necesitan índices de calidad de la energía?



Algunos de los parámetros conocidos, como la amplitud del voltaje, la magnitud de la secuencia negativa, las amplitudes de las armónicas, etc., pueden no ser suficientes para caracterizar la calidad de la energía de un determinado sistema.



Hay una necesidad de combinar ciertos parámetros para obtener una información más útil sobre determinados aspectos de la calidad de la energía. Los medidores necesitan suministrar información compactada de todos los parámetros que releva.



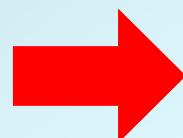
De todas formas, para determinados tipos de variaciones es suficiente emplear los parámetros tal como se miden (p.ej. frecuencia, amplitud...)

Calidad de la energía

Índices de calidad de la energía

Distorsión armónica total (THD)

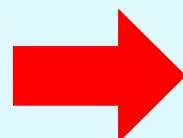
Se define como la energía relativa presente en frecuencias diferentes de la fundamental



$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1}$$

No se incluye la componente de continua debido a que normalmente es muy pequeña y no afecta el resultado

Una alternativa es usar la distorsión de forma de onda total (TWD)



$$\text{TWD} = \frac{\sqrt{V_{\text{rms}}^2 - V_1^2}}{V_1}$$

IEEE 519 → THD, con H=50

IEEE 1459 → TWD

IEC 61000-4-7 → THD, con H=40 y ventana de 10-12 ciclos

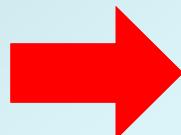
Para una ventana de un ciclo, THD=TWD

Calidad de la energía

Índices de calidad de la energía

Distorsión armónica total (THD)

En el caso de señales con componentes interarmónicas y/o ruido...



THD ≠ TWD

Esto se debe a la energía presente en las frecuencias no armónicas



$$TnHD = \sqrt{V_{rms}^2 - \sum_{h=0}^H V_h^2}$$

Distorsión no armónica total (TnHD) o Distorsión interarmónica total

$$TWD^2 = THD^2 + TnHD^2 + \frac{V_0^2}{V_1^2}$$

Componente de continua

Relación entre índices

Calidad de la energía

Índices de calidad de la energía

Distorsión armónica total (THD)

Se puede dividir el espectro en armónicos pares e impares...



$$\text{THD}_{\text{par}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{H/2} V_{2n}^2} / V_1$$



$$\text{THD}_{\text{impar}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{H/2} V_{2n-1}^2} / V_1$$

La medición del THD proporciona información útil para diagnóstico. Un elevado valor de THD_{par} o TnHD frecuentemente indica un estado anormal del sistema o de una pieza del equipamiento.



$$\text{THD}^2 = \text{THD}_{\text{par}}^2 + \text{THD}_{\text{impar}}^2$$

$$\text{TWD}^2 \approx \text{THD}_{\text{impar}}^2$$

En la mayoría de los casos la distorsión armónica impar es la dominante

Calidad de la energía

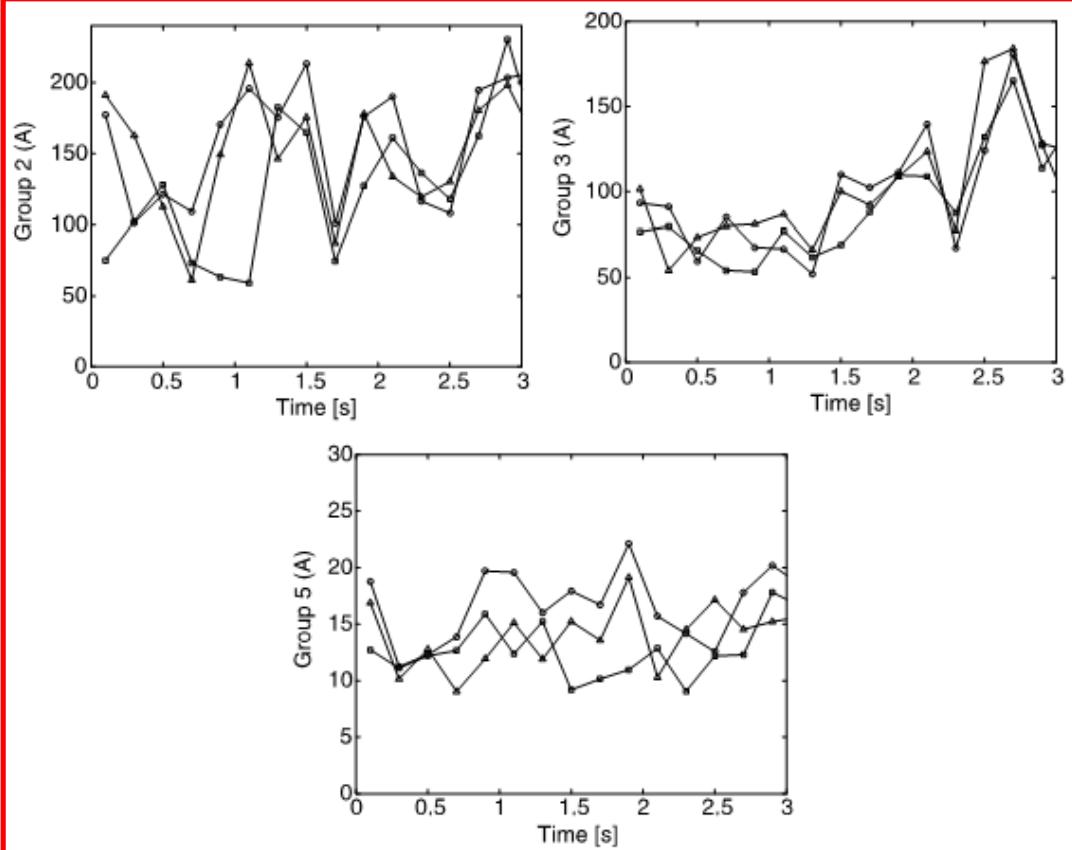
Índices de calidad de la energía

Mediciones de distorsión sobre redes trifásicas – Diferencias entre fases

Tres mediciones
de armónicos
posibles

Único índice
(aggregation method)

- Mayor valor de amplitud
- Promedio de las amplitudes de las tres fases
- Valor rms en las tres fases



$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H \max(V_{ha}, V_{hb}, V_{hc})}}{\max(V_{1a}, V_{1b}, V_{1c})}$$



$$\text{THD} = \max(\text{THD}_a, \text{THD}_b, \text{THD}_c)$$

Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen

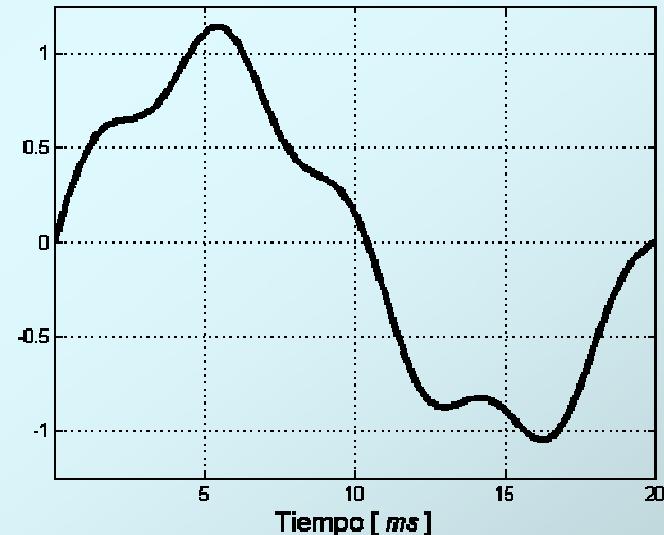
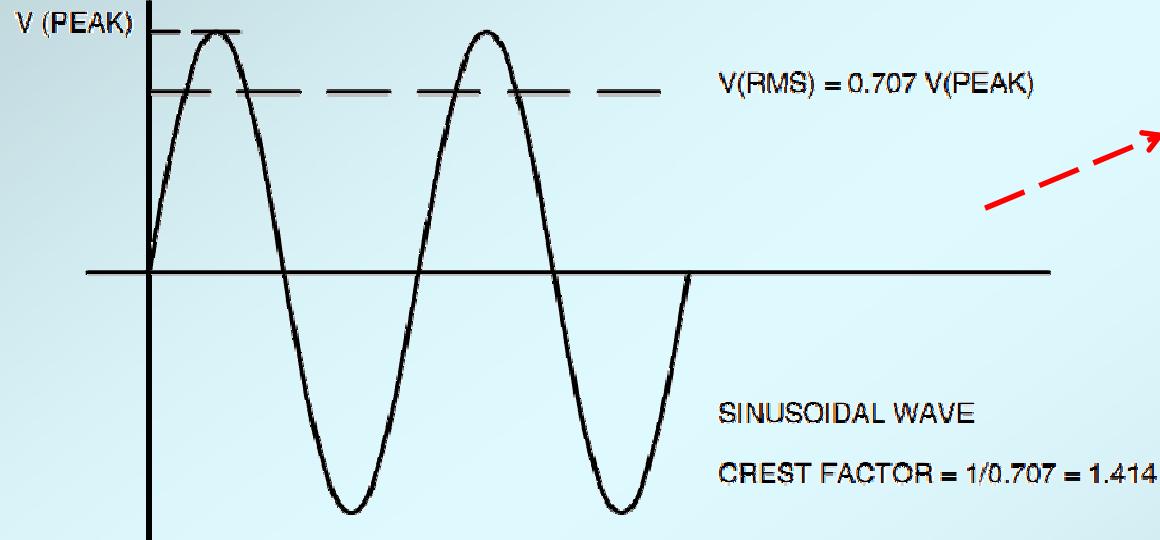
Calidad de la energía

Índices de calidad de la energía

Factor de cresta

Es una magnitud temporal que indica cuan distorsionado está el valor máximo de la onda sinusoidal.

$$C_r = \frac{V_{\text{peak}}}{V_{\text{rms}}}$$



Se lo suele emplear para evaluar los efectos de las sobretensiones en capacidores (dielectric stress), lámparas fluorescentes, y otros componentes electrónicos de potencia.

Power Quality, C. Sankaran

Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen

Herraiz Jaramillo, Power Quality Indices for Aperiodic Voltages and Currents (2000)

Wood, Fluorescent Ballast Design Using Passive P.F.C. and Crest Factor Control

Calidad de la energía

Índices de calidad de la energía

Factor K (transformadores)

Se utiliza para cuantificar el efecto de una corriente distorsionada sobre un transformador. Fue establecido en los '90 por UL (Underwriters Laboratories) y varios fabricantes de transformadores, como una forma de evaluar la capacidad de los mismos para soportar los efectos de los armónicos.

$$K = \frac{\sum_{h=1}^H h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^H I_h^2} \quad \rightarrow \quad I_K = \sqrt{\sum_{h=1}^H h^2 I_h^2}$$

Harmonic number <i>h</i>	Nonlinear load current <i>I_h</i> (%)	<i>I_h²</i>	<i>I_h</i> = $\sqrt{I_h^2 / \sum I_h^2}$	<i>I_h²</i>	<i>I_h²h²</i>
1	100	1.000	0.909	0.827	0.827
3	33	0.109	0.300	0.090	0.811
5	20	0.040	0.182	0.033	0.827
7	14	0.020	0.127	0.016	0.794
9	11	0.012	0.100	0.010	0.811
11	9	0.008	0.082	0.007	0.811
13	8	0.006	0.073	0.005	0.895
15	7	0.005	0.064	0.004	0.912
Total		1.20		0.992	6.688
				K-factor = 6.688	

Load	K-Factor	ILK
Incandescent Lighting.....	K-1	0.00
Control Transformers/Electromagnetic Control Devices.....	K-1	0.00
Motor Generators (without solid state drives).....	K-1	0.00
Distribution Transformers.....	K-1	0.00
Electro discharge lighting.....	K-4	25.82
UPS with optional input filter.....	K-4	25.82
Welders.....	K-4	25.82
Induction heating equipment.....	K-4	25.82
PLCs and solid state controls.....	K-4	25.82
Telecommunications equipment (e.g., PBX).....	K-13	57.74
UPS without input filtering.....	K-13	57.74
Multiwire receptacle circuits in general care areas of health care facilities and classrooms of schools, etc.	K-13	57.74
Multi-wire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line.....	K-13	57.74
Mainframe computer loads.....	K-20	80.94
Solid state motor drives (variable speed drives).....	K-20	80.94
Multiwire Receptacle Circuits in Critical Care, Operating and Recovery Room areas of hospitals.....	K-20	80.94
Multiwire Receptacle Circuits in Industrial, Medical and Educational Laboratories.....	K-30	123.54
Multiwire Receptacle Circuits in Commercial Office Spaces.....	K-30	123.54
Other Loads Identified as Producing Very High Amounts of Harmonics	K-40	208.17

Table 1: Sample of Typical Load K-Factors
REPRINTED WITH PERMISSION FROM EDI MAGAZINE

<http://www.indusul.com/index.php?es/especiais/factor-k.html>

IEEE 1100-2005: Powering and Grounding Electronic Equipment

Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen

<http://www.emersonindustrial.com/en-US/egselectricalgroup/aboutus/faq/Pages/Catalog027-02-2012.aspx>

Parámetros

Índices

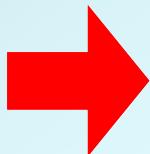
**Métodos de
medición**

Calidad de la energía

Medición de parámetros

Diferentes enfoques de medición de componentes armónicas

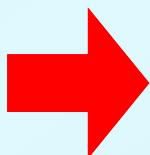
Métodos basados
en transformadas



Señales estacionarias

- Discrete Fourier Transform (DFT)
- Goertzel Transform (GT)
- Sliding Goertzel Transform (SGT)
- Modulated Sliding DFT (mSDFT)

Métodos basados
en modelos

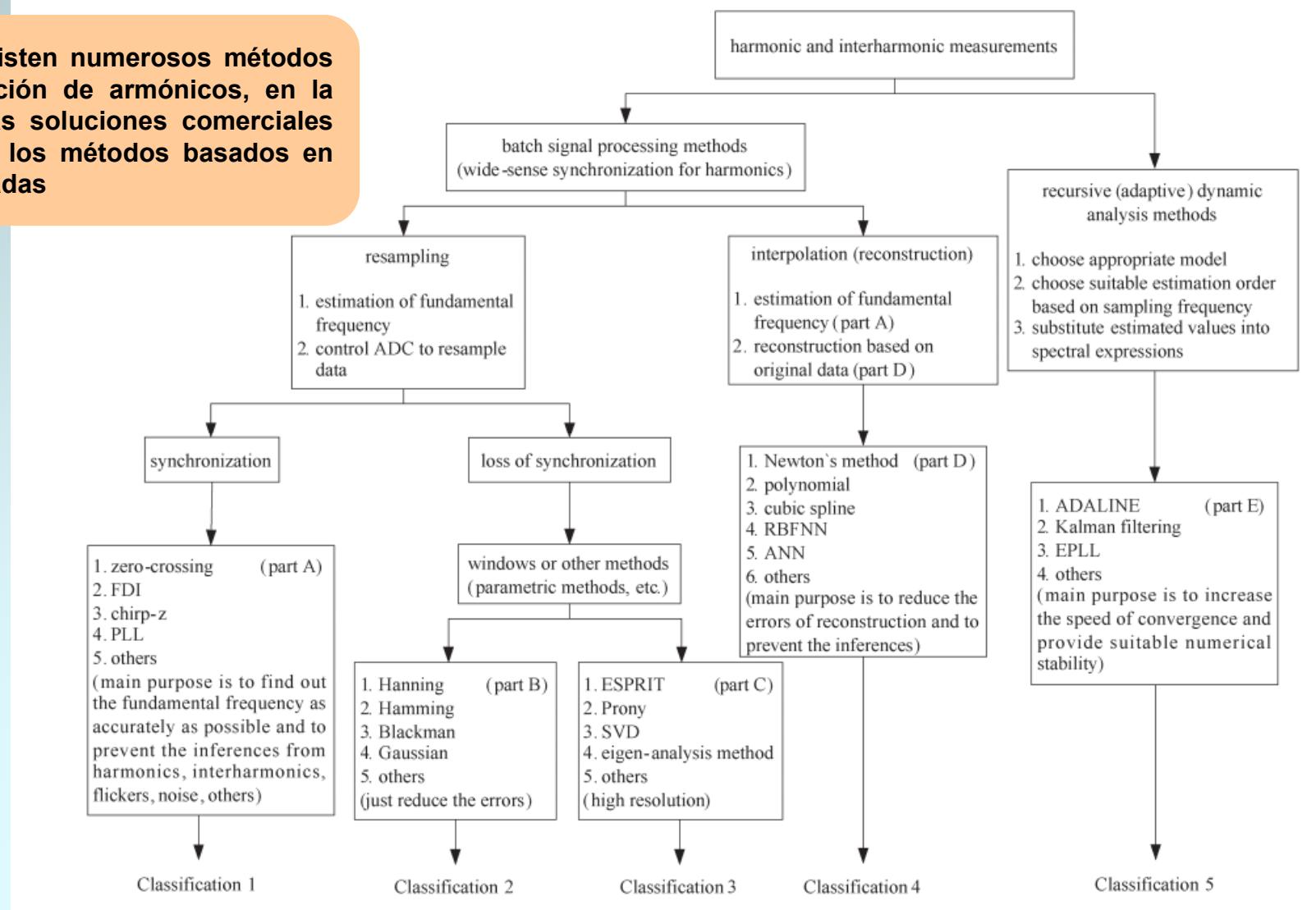


- Kalman filters
- Recursive Least Squares (RLS)
- Neural networks
- Fuzzy approach
- Estimation of signal parameters via rotational invariance technique (ESPRIT)
- Multiple Signal Classification (MUSIC)
- Otros...

Calidad de la energía

Medición de parámetros

Si bien existen numerosos métodos de estimación de armónicos, en la práctica las soluciones comerciales pasan por los métodos basados en transformadas



Calidad de la energía

Bibliografía

- Signal Processing of Power Quality Disturbances, Math H. Bollen
- Von Jouanne - Assessment of Voltage Unbalance
- Power Quality, C. Sankaran
- Categorization and Analysis of Power System Transients, Math H. Bollen
- Cheng-I Chen - Comparative Study of Harmonic and Interharmonic Estimation Methods for Stationary and Time-Varying Signals
- Herraiz Jaramillo, Power Quality Indices for Aperiodic Voltages and Currents (2000)
- Wood, Fluorescent Ballast Design Using Passive P.F.C. and Crest Factor Control

Normas:

IEEE Std 1159 *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*

IEC 61000-4-30 *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing And Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods*

IEC 61000-4-7 *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing And Measurement Techniques - General Guide On Harmonics And Interharmonics Measurements And Instrumentation, For Power Supply Systems And Equipment Connected Thereto*