

NOTAS DE POWER QUALITY- Introducción

Por José Ramos López

Escuela de Ingeniería Eléctrica
Universidad de El Salvador

Introducción

- Este Curso Tutorial presenta una introducción a los conceptos de power quality y su aplicación en sistemas comerciales e industriales.

El alcance está limitado a los fenómenos electromagnéticos más importante, sus efectos, solución de problemas, y la aplicación de normas.

Interés Creciente en Power Quality

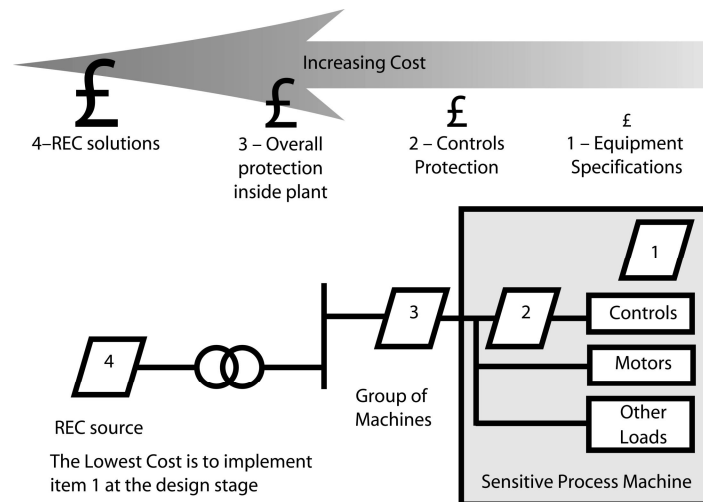
- Costo de la Energía
- Uso creciente de equipo electrónico [sensible]
- Uso creciente de power electronics
- Desregulación del sector eléctrico

Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

3

Power Quality Issues

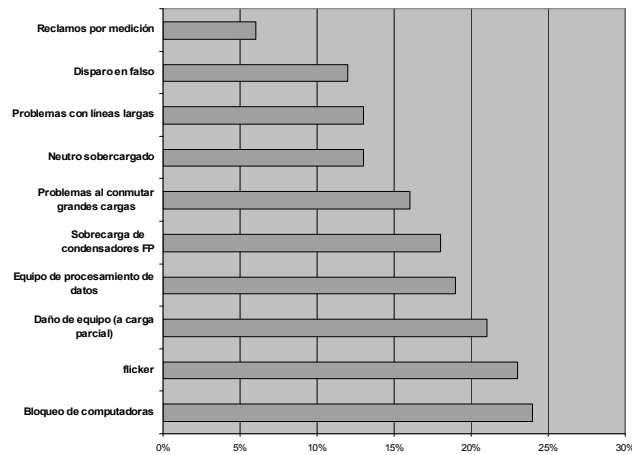
El Costo de soluciones de Power Quality



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

4

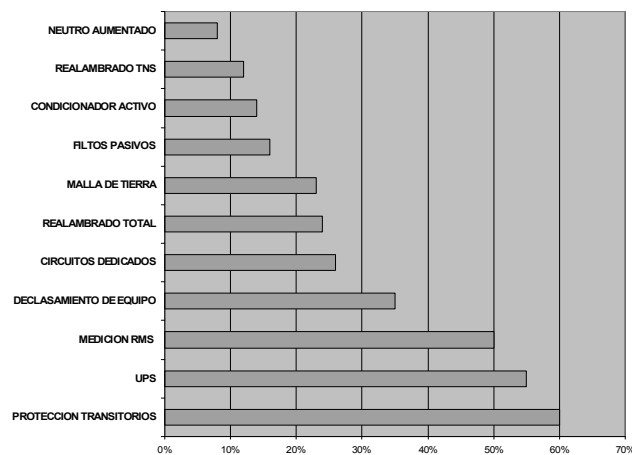
Problemas más comunes de PQ medidos en 1400 sitios en 8 países



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

5

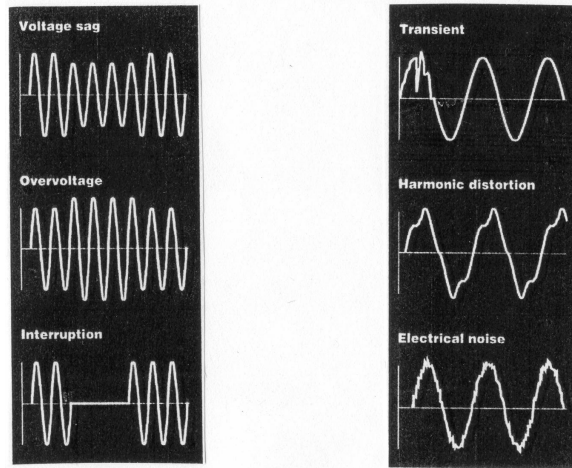
Soluciones de PQ más prevalecientes en % de adopción en 1400 sitios en 8 países



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

6

DEFINICIONES



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

7



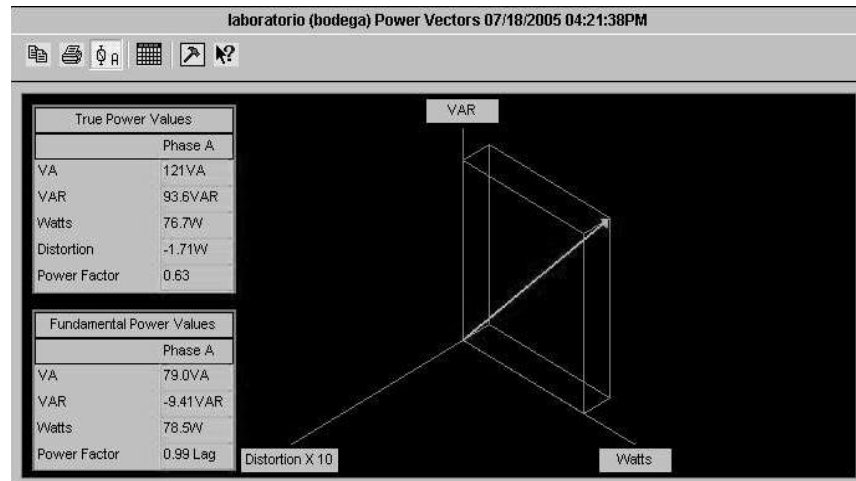
*Como tú sabes, un Peón puede avanzar dos casillas en la primera jugada,
así que debes pasar muy deprisa por la Tercera Casilla (¡mejor que tomes el tren!)
para llegar sin problemas hasta la Cuarta Casilla.
Allí te encontrarás a los señores Tweedlee Dee y Tweedlee Dum.
En la Quinta Casilla no hay más que agua y la Sexta pertenece a Humpty Dumpty...*

LA REINA BLANCA

Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

8

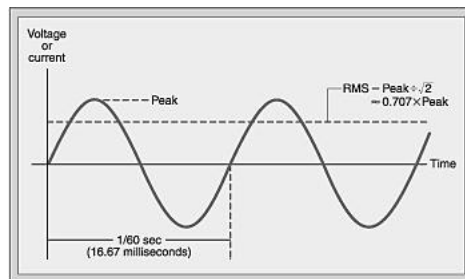
Repaso (Valor eficaz y potencia)



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

9

El voltaje y la corriente pueden ser representados por una onda senoidal. Consideremos un ciclo de una corriente continua:



El ángulo de la onda puede ser expresado como una función de la frecuencia "f" y el tiempo "t". Para una frecuencia dada, el ángulo de la onda es relacionado a la expresión $2\pi ft$.

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

10

Puesto que el valor instantáneo de la onda está cambiando continuamente, se define una cantidad numérica para representar una cantidad promedio de esta onda. Esta cantidad, el valor medio cuadrático, o valor rms, es igual al valor pico de la onda de CA dividido entre la raíz cuadrada de 2. En el caso de la corriente:

$$I_{rms} = \frac{i_{pico}}{\sqrt{2}} \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

El factor de cresta (CF) en este caso es $\sqrt{2}$. Además en general la potencia en AC es menor o igual al producto Voltaje x Corriente:

$$P_{ca} \leq V_{rms} I_{rms} \quad \text{Ecuación 3}$$

Sin embargo, el producto de los valores rms del voltaje y la corriente definen una magnitud llamada Potencia aparente (U):

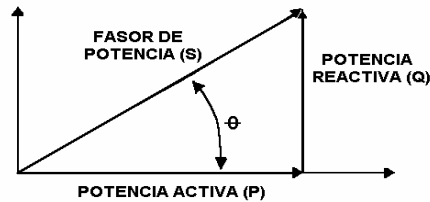
$$U = V_{rms} I_{rms} \quad \text{Ecuación 4}$$

De las magnitudes anteriores, surge la siguiente relación, conocida como Factor de Potencia:

$$FP = \frac{P}{U} \quad \text{Ecuación 5}$$

El FP es un valor único que relaciona la potencia activa, P, con la potencia aparente, U. La capacidad de un sistema eléctrico está limitada por la potencia aparente, no por la potencia activa. El FP expresa, con un valor único, el alcance al cual un sistema eléctrico es eficiente y efectivamente utilizado.

Diagrama fasorial, frecuentemente llamado triángulo de Potencia:



$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\theta) \quad \text{Ecuación 10}$$

$FP_{\text{desplazamiento}}$

Para los circuitos polifásicos:

$$P = \sum_{k=1}^m V_k I_k \cos(\alpha - \beta) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$Q = \sum_{k=1}^m V_k I_k \sin(\alpha - \beta) \quad \text{Ecuación 12}$$

k = número de fase

m = número total de fases

α = ángulo del voltaje

β = ángulo de la corriente

El fasor de potencia:

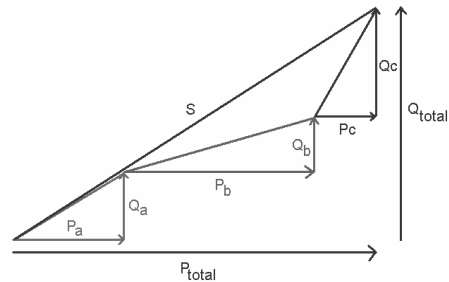
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Si la carga está balanceada en las tres fases:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\alpha - \beta)$$

En sistemas desbalanceados como el que se muestra en la figura:

$$FP = \frac{\text{Potencia Activa Total}}{\text{Fasor de Potencia}} = \frac{P_{EqTotal}}{S} \neq \cos(\theta) \quad \text{Ec. 13}$$

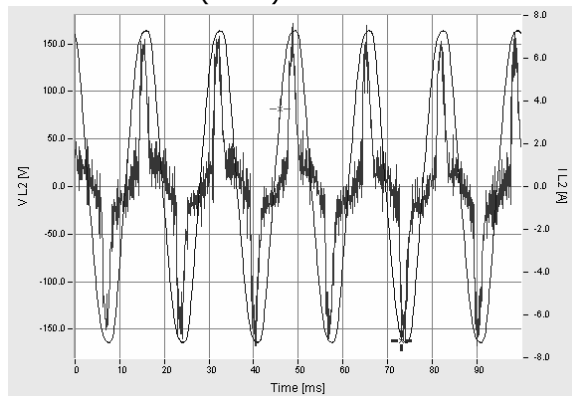


Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

15

Voltajes y corrientes no senoidales

La siguiente figura muestra las formas de onda de voltaje, y corriente para un alimentador de potencia de modo conmutado (SMPS):



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

16

Los valores rms para el voltaje y la corriente, considerando el efecto de todas las armónicas serán:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_h^2}{2}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{hrms}^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \frac{I_h^2}{2}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{hrms}^2}$$

Una medida de los niveles de armónicas, usada frecuentemente, es la tasa de distorsión armónica THD:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{hrms}^2}}{V_{1rms}} \cdot 100\% \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2}}{I_{1rms}} \cdot 100\%$$

Otra medida de los niveles de armónicas, también usada frecuentemente, es el contenido RSS de distorsión armónica, el cual para la corriente se define como :

$$\text{Contenido}_{\text{Armónico}}_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2}$$

Para un sistema monofásico, donde h es el número de armónica, y H es la armónica más alta:

$$P = \sum_{h=1}^H V_h I_h \cos(\alpha_h - \beta_h) \quad \text{Ecuación 14}$$

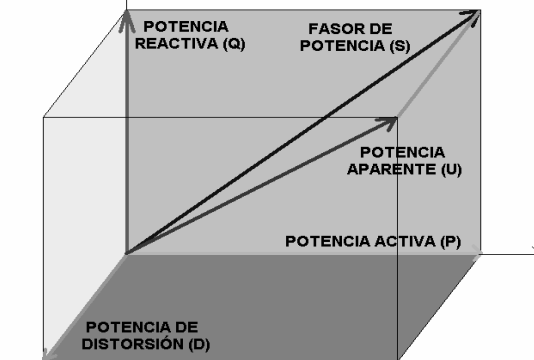
$$Q = \sum_{h=1}^H V_h I_h \sin(\alpha_h - \beta_h) \quad \text{Ecuación 15}$$

La contribución actual de las frecuencias armónicas a la potencia activa y reactiva es pequeña (< 3% de P y Q).

La mayor contribución de las frecuencias armónicas a la potencia se presenta como una potencia de distorsión.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Relaciones geométricas entre P, Q, S, D y U:



$$FP = \frac{\text{Potencia Activa Total}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{P}{U} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$U = \sqrt{S^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

También es posible expresar U a partir de los valores rms del voltaje y la corriente considerando las armónicas.

$$U = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{hrms}^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{hrms}^2}$$

Por lo que el verdadero FP, para un circuito monofásico:

$$FP = \frac{P}{U} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Ejemplo de mediciones de factor de potencia y THD_I para algunas cargas monofásicas, que son comunes en áreas residenciales:

Tipo de carga	FP_{desp}	THD_I	FP_{dist}	FP
Ventilador	0.999	1.8	1	0.999
Refrigerador	0.875	13.4	0.991	0.867
Horno microonda	0.998	18.2	0.984	0.982
Lavadora	0.951	26	0.968	0.921
Lámpara fluorescente	0.956	39.5	0.93	0.889
Televisor	0.988	121	0.637	0.629
Computadora e impresor	0.999	140	0.581	0.58

Para un sistema polifásico donde "r" es la identificación de fase y N es el número de conductores en el sistema, incluyendo el neutro:

$$P = \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{h=1}^H V_{rh} I_{rh} \cos(\alpha_{rh} - \beta_{rh}) \quad \text{Ecuación 19}$$

La potencia reactiva promedio está dada por:

$$Q = \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{h=1}^H V_{rh} I_{rh} \sin(\alpha_{rh} - \beta_{rh}) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

La potencia aparente está dada por el símbolo U y fue definida por la ecuación 18. En esta ecuación se debe utilizar los valores totales para P y Q definidas en las ecuaciones 19 y 20, y un valor total para D determinado por la ecuación 16 para cada fase.

$$U = \sqrt{S^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$P = \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{h=1}^H V_{rh} I_{rh} \cos(\alpha_{rh} - \beta_{rh}) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$Q = \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{h=1}^H V_{rh} I_{rh} \sin(\alpha_{rh} - \beta_{rh}) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$D = \sqrt{U^2 - S^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

Este diagrama tridimensional ilustra la descomposición de la potencia en un sistema de potencia. Los ejes principales son:

- Potencia Activa:** Representa la potencia real que se consume.
- Potencia Reactiva:** Representa la potencia que oscila entre la fuente y la carga.
- Potencia de Distorsión:** Representa la potencia asociada a las armónicas.

Se muestran los vectores de potencia y sus componentes:

- El vector **a** es el vector de potencia activa.
- El vector **b** es el vector de potencia reactiva.
- El vector **c** es el vector de potencia de distorsión.
- El vector **d** es el vector de potencia aparente, que es la suma de los otros tres.
- El vector **Ua** es el vector de tensión efectiva.
- El vector **d'** es el vector de potencia aparente sin distorsión.
- El vector **c'** es el vector de potencia de distorsión sin reactiva.
- El vector **b'** es el vector de potencia reactiva sin distorsión.

El diagrama muestra cómo la potencia aparente (**d**) se compone de la potencia activa (**a**), la potencia reactiva (**b**) y la potencia de distorsión (**c**). La potencia aparente sin distorsión (**d'**) se compone de la potencia activa (**a**) y la potencia reactiva sin distorsión (**b'**). La potencia de distorsión (**c**) se compone de la potencia de distorsión sin reactiva (**c'**) y la potencia reactiva sin distorsión (**b'**).

25

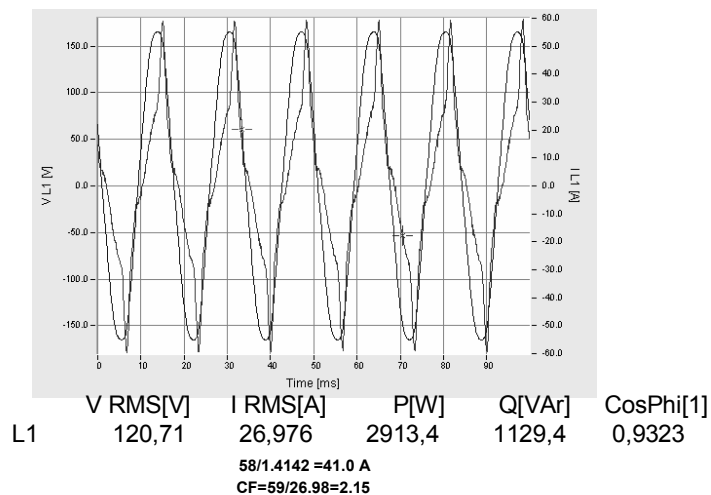
Distorsión armónica

- “Distorsión armónica es la distorsión de la onda senoidal de corriente o tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiples de dicha frecuencia nominal”

Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

27

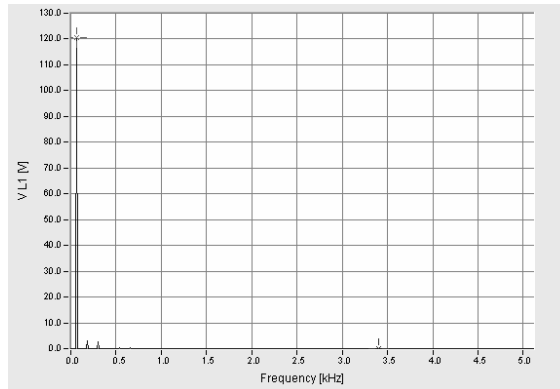
Distorsión armónica



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

28

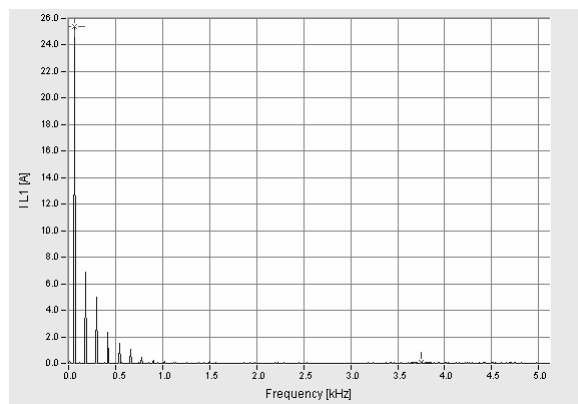
ESPECTRO DE VOLTAJE



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

29

ESPECTRO CORRIENTE LINEA

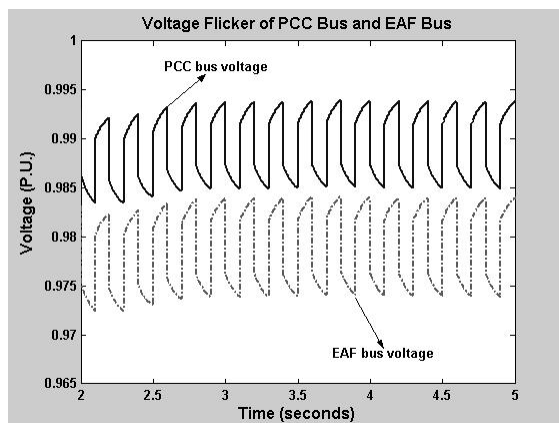


Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

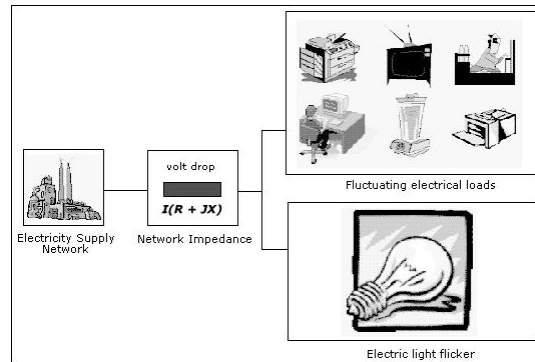
30

Flicker (Parpadeo)

- “Es una variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano”



Flicker

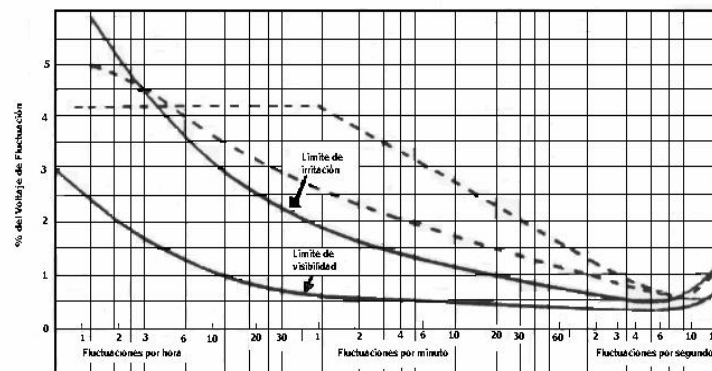


Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

33

Fluctuaciones de Voltaje permisibles máximas

<u>Bombas caseras</u> <u>Bombas de succión</u> <u>Equipos de aire acondicionado</u> <u>Luces teatrales</u> <u>Refrigeradora domestica</u> <u>Quemadores de aceite</u>	<u>Elevadores pequeño</u> <u>Grúas</u> <u>Conjunto de generadores</u> <u>conectados en Y - Δ</u> <u>En un motor elevador</u> <u>Equipo de rayos X</u>	<u>Hornos de arco</u> <u>Señales de Encendido</u>	<u>Compresores</u> <u>Soldadores</u> <u>automáticos</u>
--	--	--	---



2008. pquality@yahoo.com

34

Frecuencia nominal

- Es la frecuencia nominal del Sistema Eléctrico Nacional con un valor de 60 hertzios (60 Hz)

IEEE Std-1159

EVENTOS DE CORTA DURACIÓN		
CATEGORÍA	DURACIÓN	MAGNITUD DE VOLTAJE
INSTANTANEOS		
SAG	0.5 – 30 CICLOS	0.1 - 0.9 PU
SWELL	0.5 – 30 CICLOS	1.1 - 1.8 PU
MOMENTÁNEO		
INTERRUPCIÓN	0.5 CICLOS-3 segundos	< 0.1 PU
SAG	30 CICLOS-3 segundos	0.1 - 0.9 PU
SWELL	30 CICLOS-3 segundos	1.1 - 1.4 PU
TEMPORALES		
INTERRUPCIÓN	3 segundos – 1 minuto	< 0.1 PU
SAG	3 segundos – 1 minuto	0.1 - 0.9 PU
SWELL	3 segundos – 1 minuto	1.1 - 1.2 PU
EVENTOS DE LARGA DURACIÓN		
INTERRUPCIÓN SOSTENIDA	> 1 minutos	0.0 PU
BAJO VOLTAJE	> 1 minutos	0.8 - 0.9 PU
SOBRE VOLTAJE	> 1 minutos	1.1 - 1.2 PU

Tabla 1.1 caracterización del estándar IEEE 1159-1995.

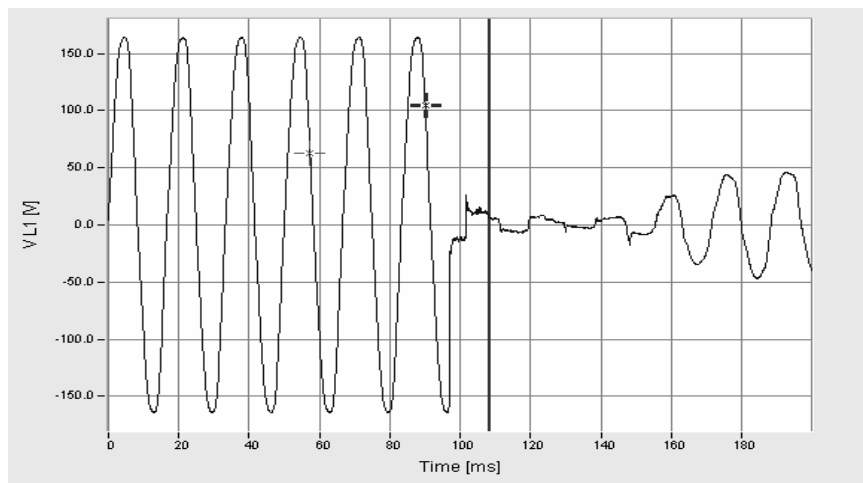
Interrupción

- Se considerará como interrupción toda falta de energía eléctrica en el punto de entrega al usuario.

Interrupción momentánea

- Son aquellas interrupciones que tienen una duración limitada de hasta 3 minutos (norma salvadoreña), el cual es el tiempo requerido para establecer los dispositivos de control y protección.

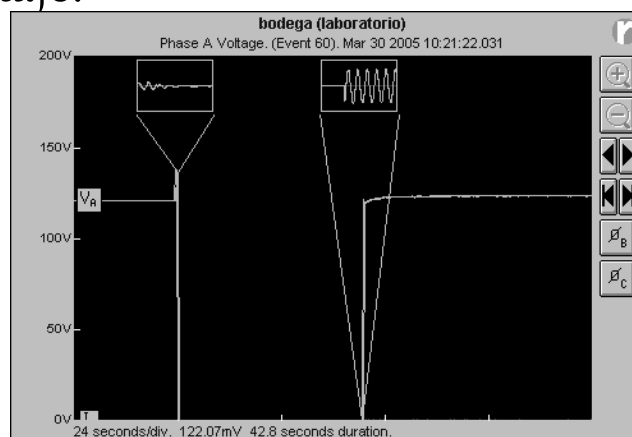
Interrupción



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

39

Ejemplo de Interrupción de Voltaje.



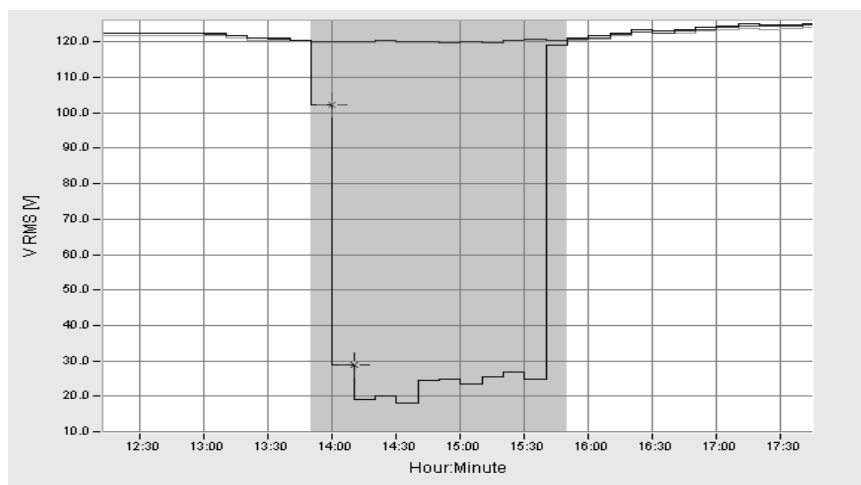
Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

40

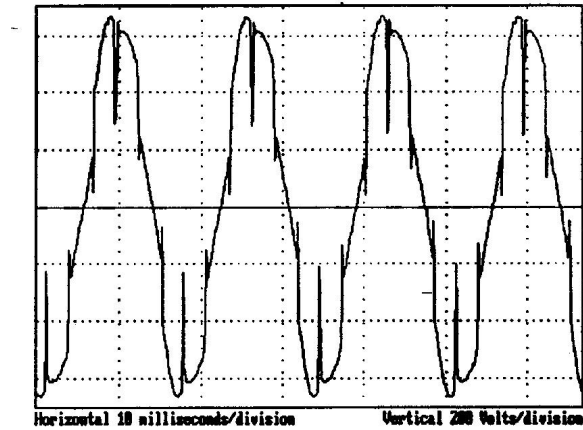
Interrupción sostenida

- Cualquier interrupción no clasificada como momentánea.

Causa de interrupción [Falla SLG]



Notch



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

43

Power quality

2.2.63 power quality: The concept of powering and grounding electronic equipment in a manner that is suitable to the operation of that equipment and compatible with the premise wiring system and other connected equipment.

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

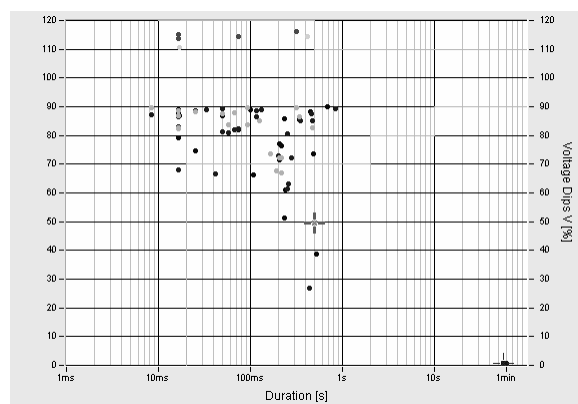
44

Definiciones:

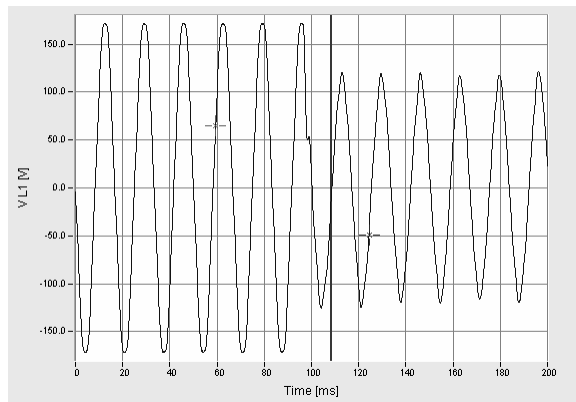
➤ **Sag/Dip (Bajo voltaje):**

Es un decremento momentáneo de la magnitud RMS de voltaje. Su duración va desde $\frac{1}{2}$ ciclo hasta varios segundos.

Sags/Dips de Voltaje



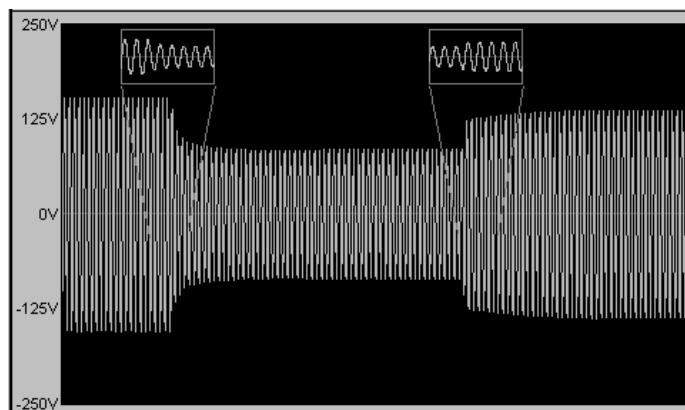
Sags/Dips de Voltaje



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

47

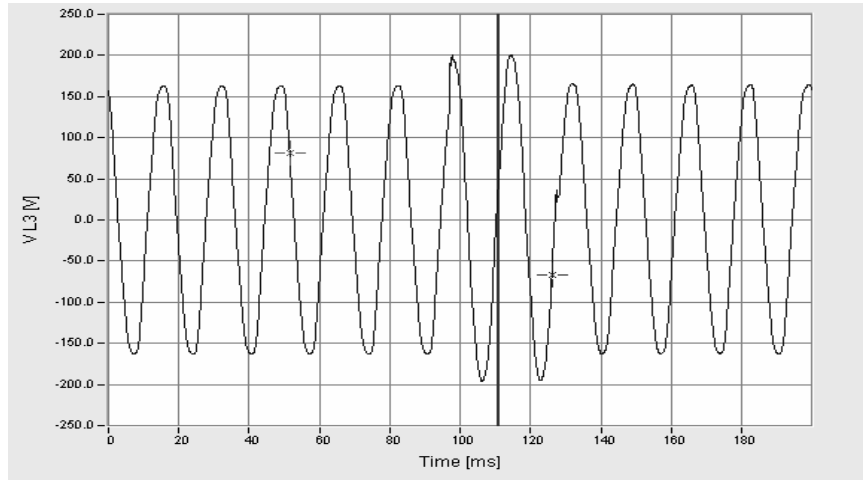
Ejemplo de Sag de voltaje.



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

48

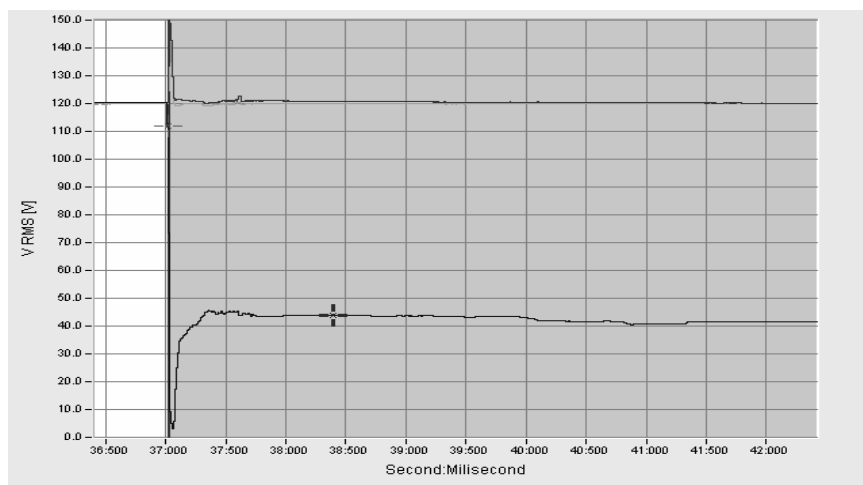
Swell



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

49

Swell en dos líneas, debido a falla en la otra línea



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

50

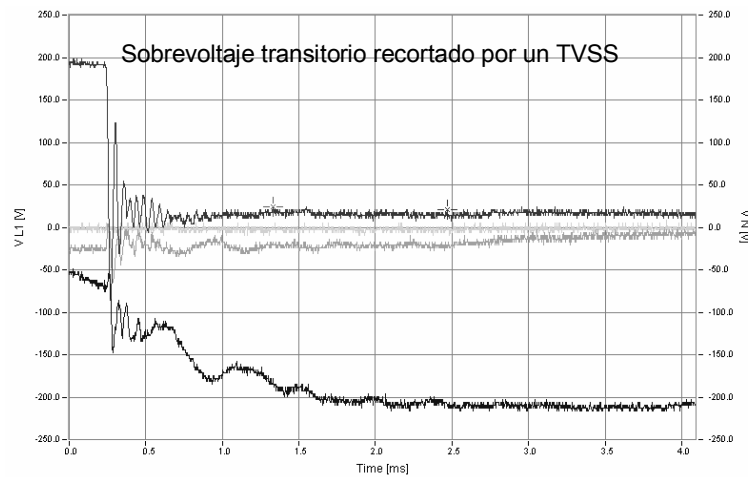
Tensión nominal

- Es el valor eficaz de la tensión eléctrica, en sus niveles diferentes de tensión establecidos por la norma ANSI C84.1, que sirve como base para controlar las desviaciones de los parámetros eléctricos que se controlarán para medir la calidad del servicio eléctrico de distribución, que prestan los distribuidores.

Transitorio

- **2.2.83 transient:** A subcycle disturbance in the ac waveform that is evidenced by a sharp, brief discontinuity of the waveform. May be of either polarity and may be additive to, or subtractive from, the nominal waveform. See *also*: **notch; overvoltage; swell.**

Transitorio



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

53

TVSS

2.2.84 transient voltage surge suppressor (TVSS): A device that functions as a surge protective device (SPD) or surge suppressor.

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

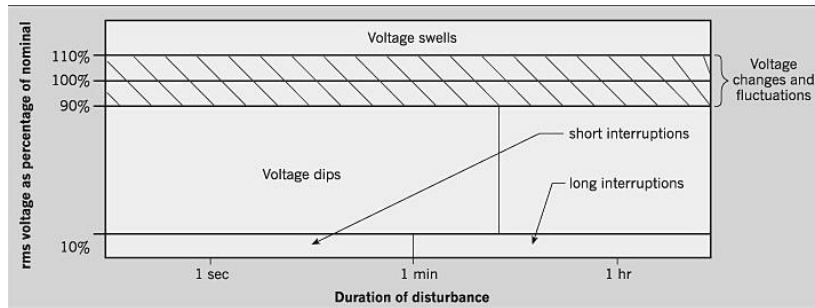
54

LINEAMIENTOS DE NECESIDADES GENERALES

Clasificación de perturbaciones

- Frecuencia.
- Amplitud.
Sobrevoltaje, bajovoltaje, sags, swells,
transitorios, flicker, etc.
- Forma de onda.
Distorsión armónica
- Simetría.
Desbalance

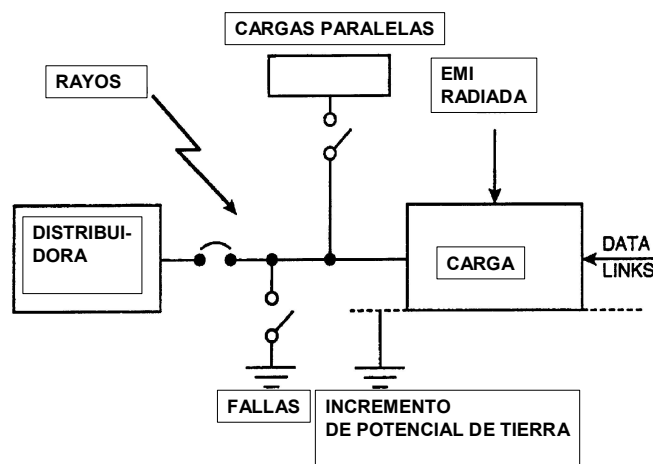
Clasificación de perturbaciones



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

57

Origen de perturbaciones



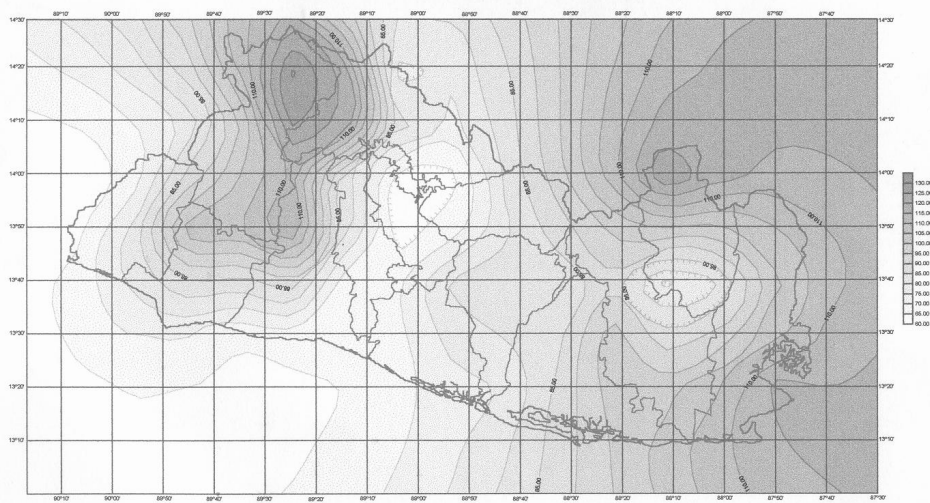
Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

58

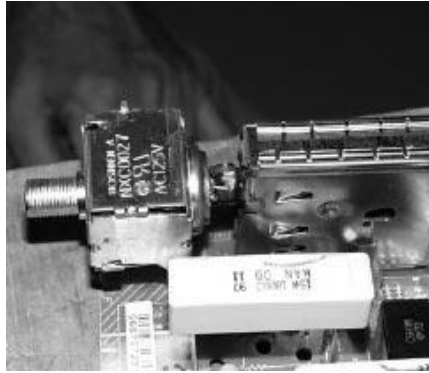
Expectativa de daños por transitorios

- Una de las causas más importantes de sobrevoltajes transitorios son las descargas atmosféricas

Mapa de niveles isoceráunicos de El Salvador



Naturaleza de daños por descargas atmosféricas



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

61

Puesta a Tierra

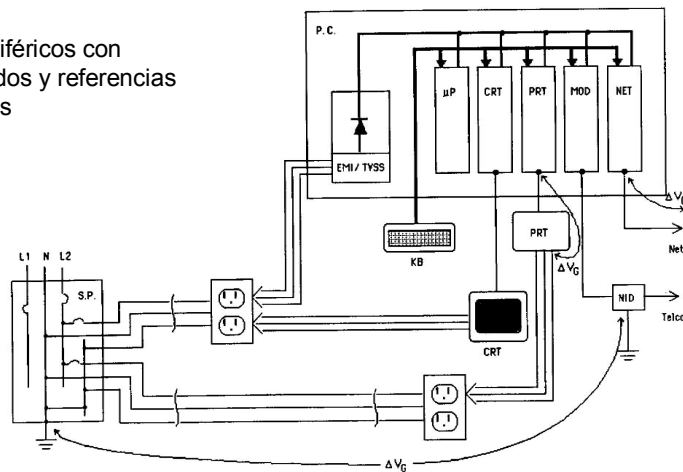
- Puesta a tierra para seguridad
- Puesta a tierra para desempeño (compatibilidad electromagnética)

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

62

Puesta a Tierra: Escenario de instalación difícil (1)

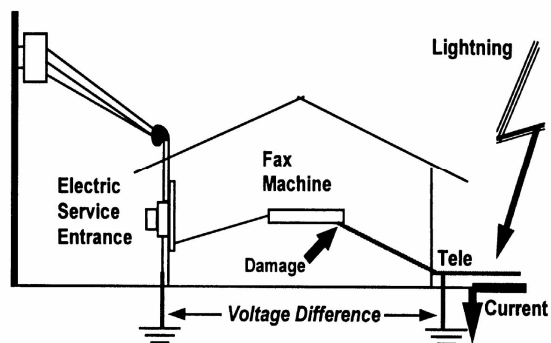
PC y periféricos con alambrados y referencias diferentes



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

63

Puesta a Tierra : Escenario de instalación difícil (2)

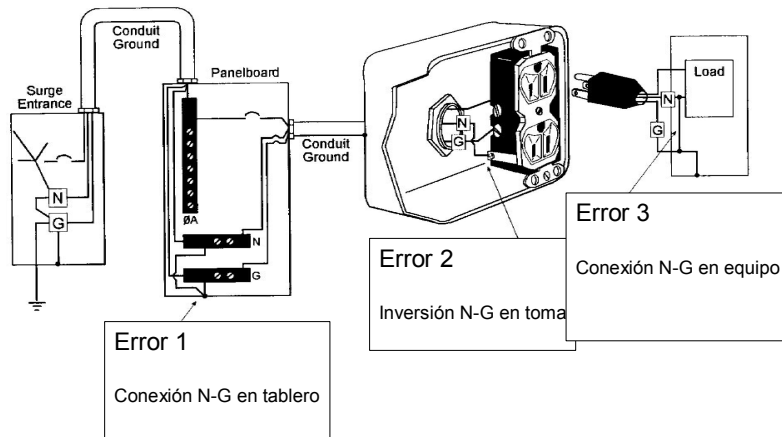


Impacto de transitorio en un sistema de comunicación

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

64

Puesta a Tierra : Escenario de instalación difícil (3)



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

65

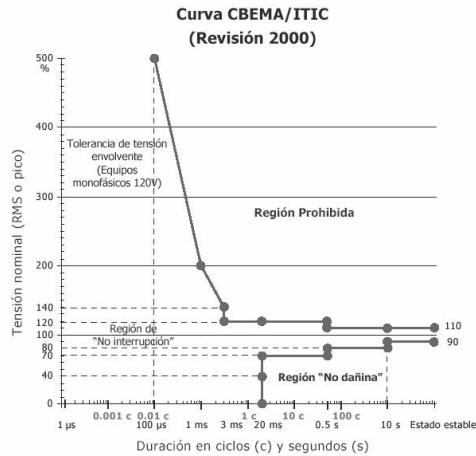
Protección contra Sags

- UPS
- Transformador ferroresonante
- Rediseño de alimentadores de potencia (aumentando la capacitancia en el lado DC)

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

66

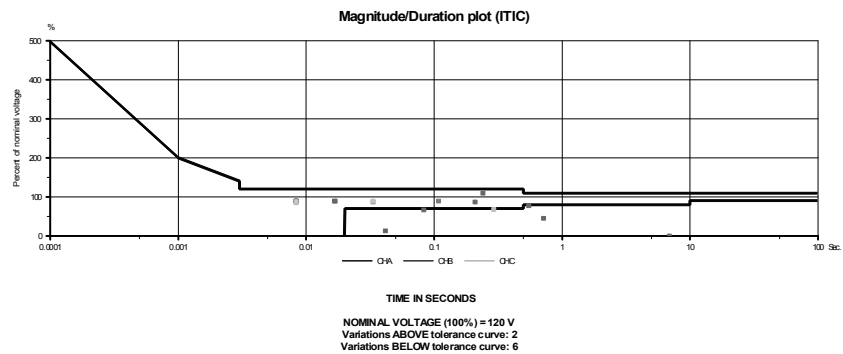
Information and Technology Equipment (ITE): La curva CBEMA



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

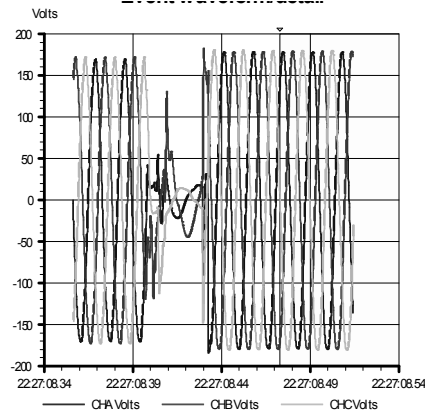
67

Desempeño de equipo en referencia a la curva ITIC



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

68

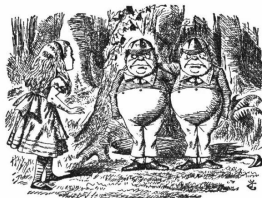


Post-trigger at 22/05/2007 22:27:08

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

69

Fundamentos



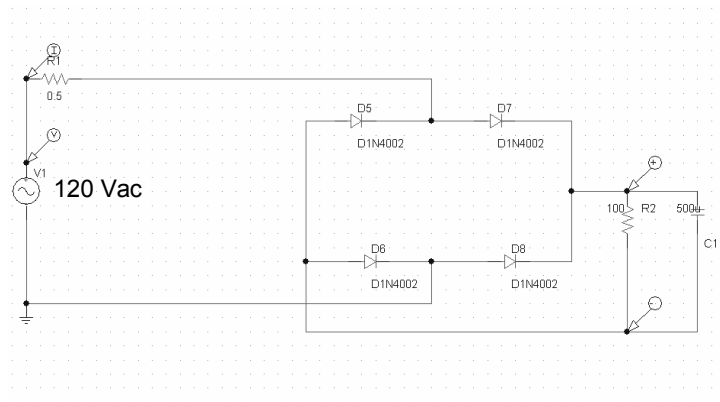
-¡Sé muy bien lo que estás pensando!- le dijo Tweedlee Dum-.

-Pero te equivocas.....¡Y sanseacabó!

-O por el contrario –continuó diciendo Tweedlee Dee-, si fuera así, podría muy bien serlo, y que duda cabe de que, si fue así, entonces lo habría sido....., pero como resulta que no es así, pues no lo es....¡Eso es pura lógica!

Equipos de oficina

Circuito simplificado de SMPS



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

73

Carga lineal

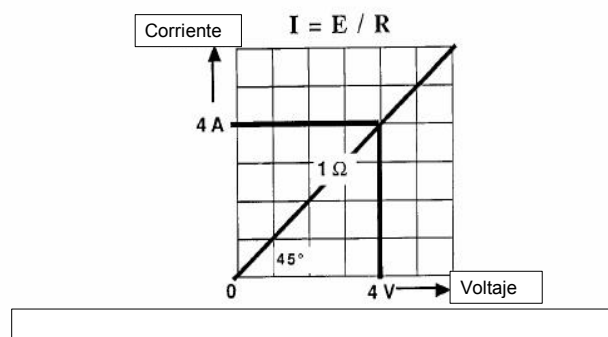
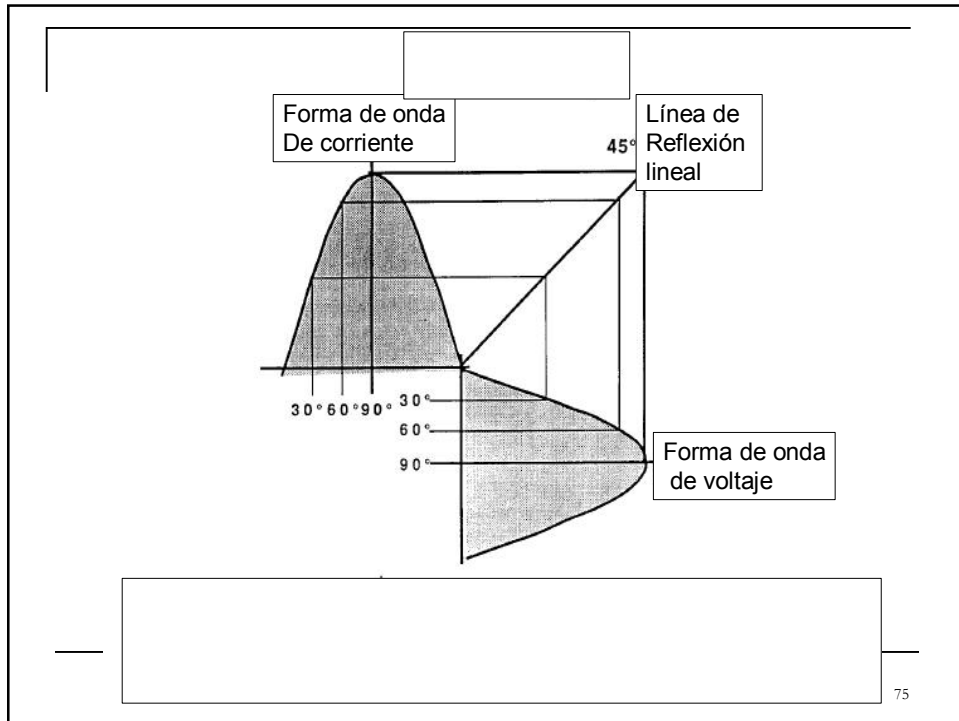


Gráfico de voltaje contra corriente en una impedancia de carga constante

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

74



Carga no-lineal

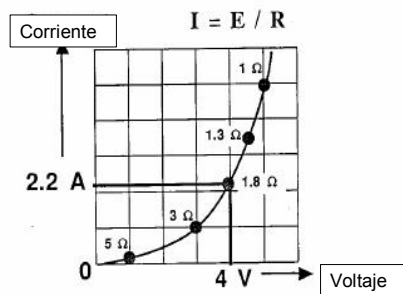
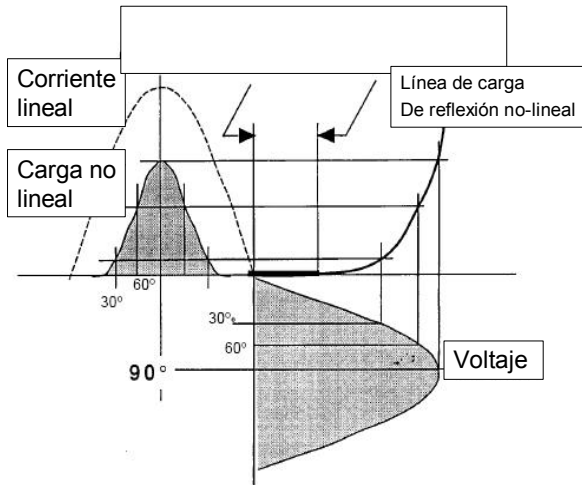


Gráfico de voltaje contra corriente en una impedancia de carga variable

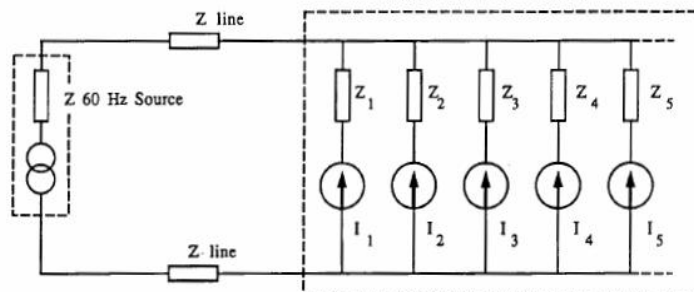
Carga no-lineal



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

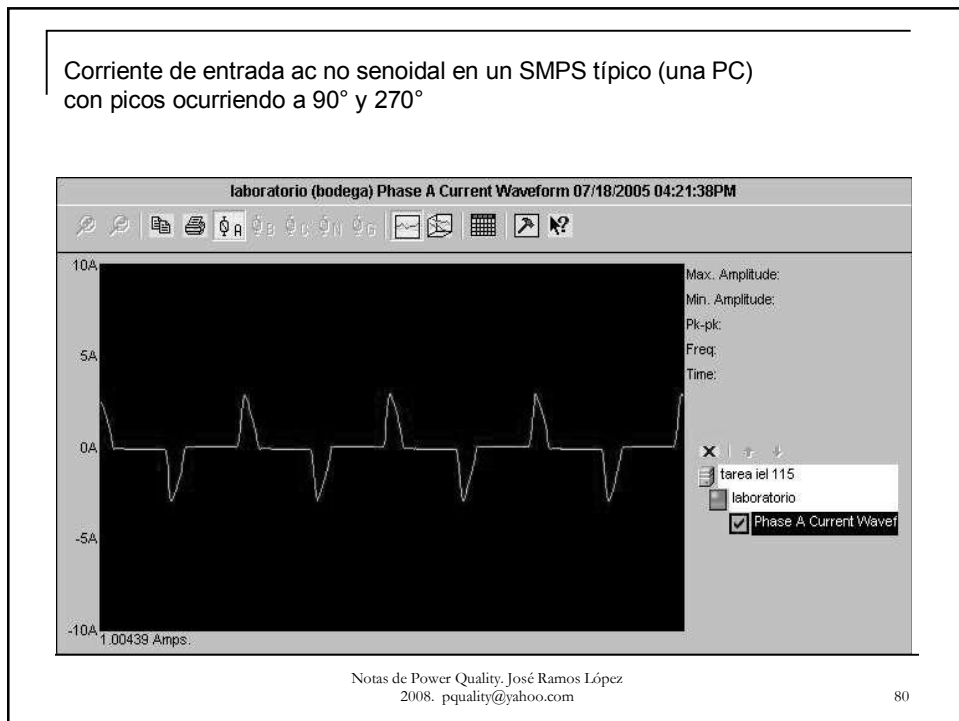
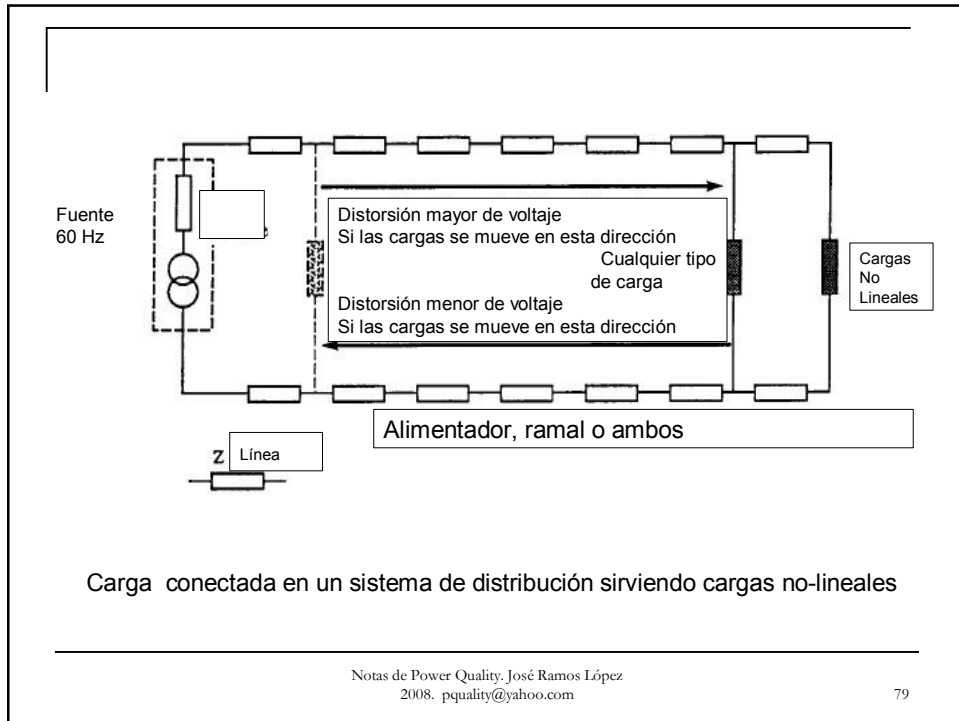
77

Carga no-lineal representada como Fuentes de corriente relacionadas armónicamente

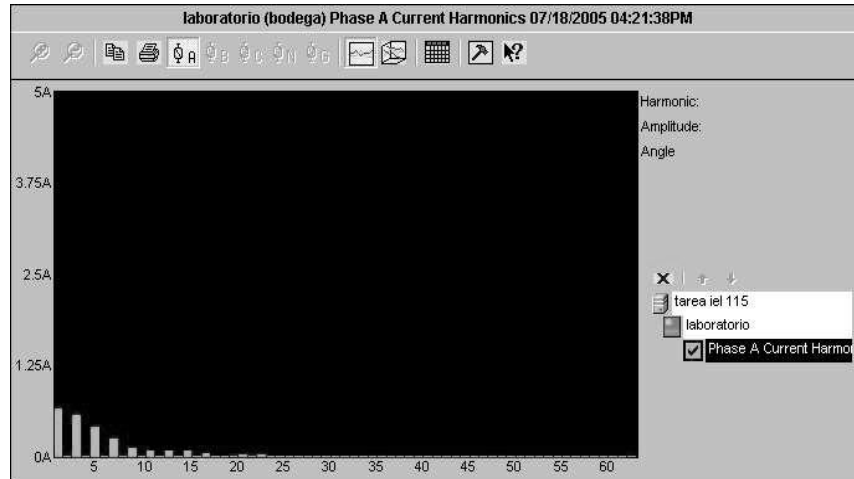


Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

78



Espectro armónico de corriente de entrada de un SPMS



Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

81

Table 4-4—Example input harmonic current distortion in balanced three-phase circuits due to rectifier-capacitor power supply

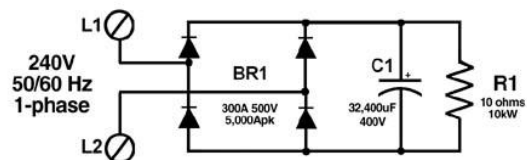
Harmonic number	Line-to-line harmonic current ^a	Line-to-neutral harmonic current ^a
1	0.82	0.65
3	—	0.52
5	0.49	0.42
7	0.29	0.29
9	—	0.13
11	0.074	0.12
13	0.033	0.098
Total phase current	1.00	1.00
Neutral current	0.0	1.61

^aNormalized to phase current

Notas de Power Quality. José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

82

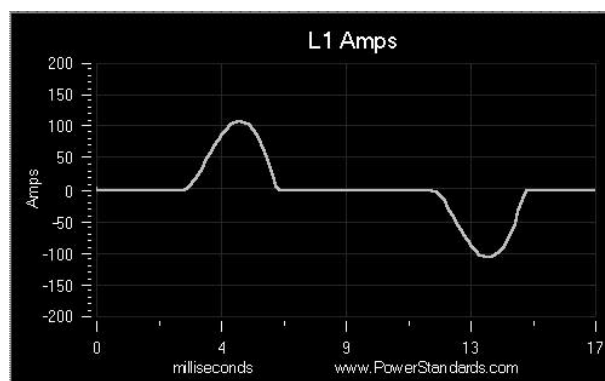
Lámpara



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

83

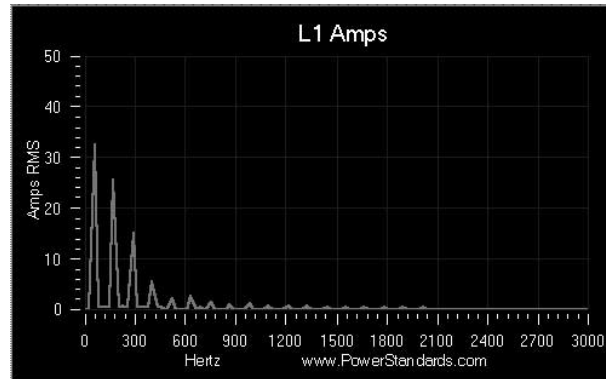
Forma de onda de corriente



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

84

Espectro de corriente



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

85

Transformadores factor-K

$$K = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (I_h^2(\text{pu}) \cdot h^2) \quad (4-10)$$

where

$I_h(\text{pu})$ is the TMS current at harmonic h , in per unit of transformer's rms rated load current,

h is the harmonic order.

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} (f_h^2 \cdot h^2)}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} (f_h^2)}$$

where f_h is the frequency, in hertz, of harmonic h .

Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

86

Table 4-5—Example calculation of a nonlinear load's K-factor

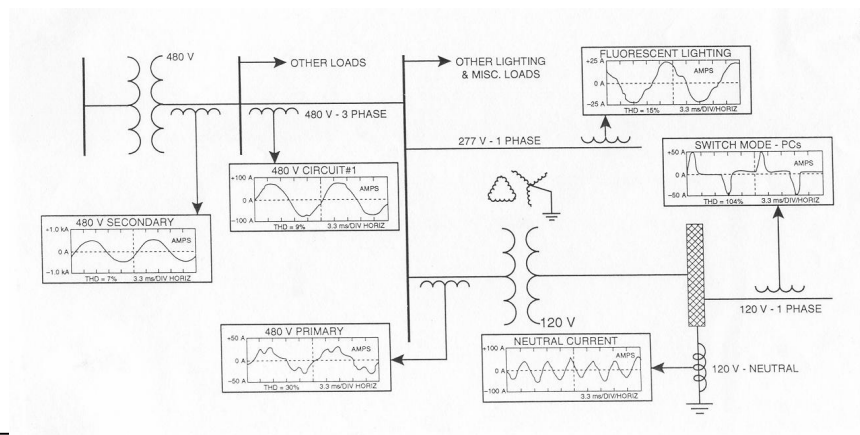
Harmonic number h	Nonlinear load current I_h (%)	I_h^2	i_h^a	i_h^2	$i_h^2 \cdot h^2$
1	100	1.000	0.909	0.826	0.826
3	33	0.111	0.303	0.092	0.826
5	20	0.040	0.182	0.033	0.826
7	14	0.020	0.130	0.017	0.826
9	11	0.012	0.101	0.010	0.826
11	9	0.008	0.083	0.007	0.826
13	8	0.006	0.070	0.005	0.826
15	7	0.004	0.061	0.004	0.826
17	6	0.003	0.053	0.003	0.826
19	5	0.003	0.048	0.002	0.826
21	5	0.002	0.043	0.002	0.826
Total		1.211		1.000	9.083
K-factor =					9.083

$$^a i_h = I_h / (\sum I_h^2)^{1/2}$$

Notas de Power Quality. José Ramos López.
2008. pquality@yahoo.com

87

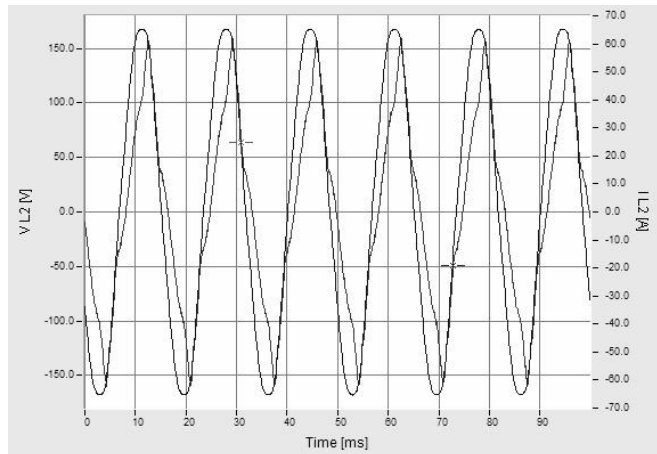
Ejemplo de instalación mixta



Notas de Power Quality. José Ramos López.
2008. pquality@yahoo.com

88

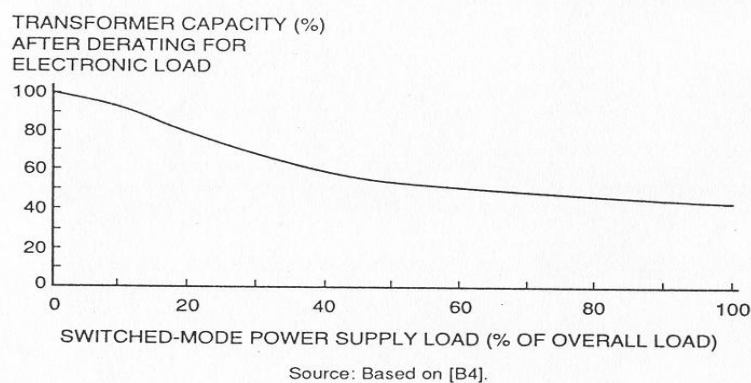
Formas de onda de voltaje y corriente en una instalación mixta



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

89

Derating para cargas no-lineales



Notas de Power Quality, José Ramos López
2008. pquality@yahoo.com

90

Fin de Parte I