

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA  
TRABAJO DE GRADUACION**



**“Elaboración de una metodología para la normalización de los estudios de  
calidad de la potencia eléctrica”**

**Asesor :  
Ing. José Roberto Ramos**

**Alumnos :  
Br. Jerry Lewis Galeas Cruz  
Br. Pablo José Domingo Urrutia Pérez**

**Ciudad Universitaria, Diciembre de 2003**

CONTENIDO	PAGINA
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>7</b>
<b>1 REGULACION DE VOLTAJE.....</b>	<b>9</b>
1.1 ALCANCE Y PROPÓSITO .....	9
1.1.1 Alcance. ....	9
1.1.2 Propósito. ....	9
1.2 VALORES NOMINALES DE VOLTAJES (60 HERTZ) EN SISTEMAS DE POTENCIA ELÉCTRICA. ....	9
1.2.1 Definiciones. ....	9
1.2.1.1 Sistemas o sistemas de potencia. ....	9
1.2.1.2 Términos de voltaje de sistemas. ....	10
1.2.1.2.1 Voltaje del sistema. ....	10
1.2.1.2.2 Voltaje nominal del sistema. ....	10
1.2.1.2.3 Sistemas de voltaje máximo. ....	10
1.2.1.2.4 Voltaje de servicio. ....	10
1.2.1.2.5 Voltaje de utilización. ....	10
1.2.1.2.6 Voltaje nominal de utilización. ....	10
1.2.1.3 Clases de voltaje de sistemas. ....	10
1.2.1.3.1 Bajo voltaje. ....	10
1.2.1.3.2 Medio voltaje. ....	11
1.2.1.3.3 Alto voltaje. ....	11
1.2.2 Selección de voltaje nominal de sistemas. ....	11
1.2.3 Explicación de los rangos de voltaje. ....	11
1.2.4 Aplicación de rangos de voltaje. ....	12
1.2.4.1 Rango A – Voltaje de servicio. ....	12
1.2.4.2 Rango A – Voltaje de utilización. ....	12
1.2.4.3 Rango B – Voltajes de servicio y utilización. ....	12
1.3 VALORES NOMINALES DE VOLTAJE PARA EQUIPO ELÉCTRICO A 60 HERTZ. ....	13
1.3.1 Generalidades. ....	13
1.3.2 Recomendaciones. ....	13
1.4 ANEXOS. ....	17
<b>2 DESBALANCE DE VOLTAJE.....</b>	<b>28</b>
2.1 DEFINICIÓN DE DESBALANCE DE VOLTAJE. ....	28
2.1.1 Definición de NEMA. ....	28
2.1.2 Definición IEEE. ....	28
2.1.3 Definición verdadera. ....	28
2.2 EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE. ....	33
2.2.1 Efectos del desbalance de voltaje en las máquinas. ....	33
2.2.2 Efectos del desbalance de voltaje en convertidores y accionamientos de electrónica de potencia. ....	36
2.3 ESTÁNDARES ACTUALES EN DESBALANCE DE VOLTAJE. ....	41
2.4 TÉCNICAS DE MITIGACIÓN. ....	43
2.4.1 Técnicas de mitigación en el sistema de potencia. ....	44
2.4.2 Técnicas de mitigación ventajas para el usuario. ....	45
2.5 REFERENCIAS. ....	46

<b>3</b>	<b>ARMONICAS .....</b>	<b>50</b>
3.1	GENERACIÓN DE ARMÓNICOS.....	50
3.1.1	Convertidores.....	50
3.1.1.1	Onda de voltaje ideal.....	50
3.1.1.2	Forma de onda ideal de la corriente.....	51
3.1.1.3	<i>Notching</i> de Voltaje.....	52
3.1.1.4	Multiplicación de fase.....	53
3.1.2	Hornos de arco.....	54
3.1.3	Compensador de var estático.....	55
3.1.4	Inversores para la generación dispersa.....	56
3.1.4.1	Inversores monofásicos.....	57
3.1.4.2	Inversores trifásicos.....	57
3.1.5	Control de fase electrónico.....	57
3.1.6	Ciclo convertidores armónicos.....	57
3.1.7	Alimentadores de potencia de modo conmutado (SMPS).....	58
3.1.8	Accionamiento por ancho de pulso (PWM).....	59
3.2	RESPUESTA CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.....	60
3.2.1	Generalidades.....	60
3.2.1.1	Capacidad de corto circuito del sistema.....	60
3.2.1.2	Bancos de condensadores y cables aislados.....	60
3.2.1.3	Características de las cargas.....	60
3.2.1.4	Condiciones de sistemas balanceados vrs desbalanceados.....	61
3.2.2	Condiciones de resonancia.....	61
3.2.2.1	Flujo normal de corrientes armónicas.....	61
3.2.2.2	Resonancia paralelo.....	62
3.2.2.3	Resonancia en serie.....	63
3.2.3	Efecto de las cargas en el sistema.....	63
3.2.3.1	El transformador reductor.....	64
3.2.3.2	Componente resistivo.....	64
3.2.3.3	Motores.....	64
3.2.4	Características típicas del sistema.....	65
3.2.4.1	Sistemas de distribución.....	65
3.2.4.2	Sistemas industriales.....	66
3.3	EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS.....	67
3.3.1	Generalidades.....	67
3.3.2	Motores y generadores.....	67
3.3.3	Transformadores.....	69
3.3.4	Cables de potencia.....	70
3.3.5	Condensadores.....	71
3.3.6	Equipo electrónico.....	71
3.3.7	Mediciones.....	72
3.3.8	Interruptores y protecciones.....	72
3.3.9	Convertidores de potencia estáticos.....	73
3.4	COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA Y CONTROL ARMÓNICO.....	73
3.4.1	Compensación de potencia reactiva.....	73

3.4.1.1	Compensación de potencia reactiva usando condensadores de potencia estáticos. ....	74
3.4.1.1.1	Conmutación de condensadores de potencia por medio de <i>circuit breakers</i> , interruptores de circuito, o interruptores de vacío. ....	74
3.4.1.1.2	Control de fase back to back de un reactor controlado por un tiristor (inductor) (TCR). ....	75
3.4.1.1.3	Conmutación de condensadores a corriente cero por tiristor back to back (TSC). ....	75
3.4.1.1.4	Reactor saturable en paralelo con un banco de condensadores. ....	76
3.4.2	Control de corrientes armónicas. ....	77
3.4.2.1	Filtros <i>shunt</i> (paralelo). ....	78
3.4.2.1.1	Diseño de filtros <i>shunt</i> . ....	78
3.4.2.2	Multiplicación de fase. ....	78
3.4.2.3	Inyección armónica. ....	79
3.5	MÉTODOS DE ANÁLISIS. ....	79
3.5.1	Cálculos de corrientes armónicas. ....	79
3.5.2	Cálculos de respuesta en frecuencia del sistema. ....	80
3.5.2.1	Cálculos simples. ....	81
3.5.2.2	Simulación de computadora. ....	82
3.5.3	Lineamientos de modelado para análisis armónico. ....	83
3.5.3.1	Modelado de sistema trifásicos vrs. monofásicos. ....	83
3.5.3.2	Modelos de motores y maquinas. ....	83
3.5.3.3	Modelos para líneas y cables. ....	84
3.5.3.4	Modelos de transformadores. ....	84
3.5.3.5	Modelos de cargas. ....	85
3.5.4	Cálculos de <i>notching</i> de línea (para sistemas de bajo voltaje). ....	85
3.5.4.1	Cálculos del área del <i>notch</i> . ....	87
3.5.4.2	Cálculo de la inductancia de fuente, inductancia del transformador (hasta 600 V) ....	88
3.5.4.3	Cálculo de la inductancia de línea. ....	88
3.5.5	Distorsión total armónica. ....	88
3.5.5.1	Relación entre <i>notching</i> de línea y distorsión para armónicos. ....	89
3.5.6	Cálculos del sistema ( Bajo voltaje, menos de 1000 V). ....	90
3.5.6.1	Factor de amortiguamiento del sistema. ....	91
3.5.7	Cálculo para corrección del factor de potencia. ....	91
3.6	MEDICIONES. ....	94
3.6.1	Generalidades. ....	94
3.6.2	Equipo básico usado para el análisis de voltajes y corrientes no sinusoidales. ....	94
3.6.2.1	Osciloscopio. ....	94
3.6.2.2	Analizadores de Espectro. ....	95
3.6.2.3	Analizadores de Armónicas o Analizadores de onda. ....	95
3.6.2.4	Analizadores de Distorsión. ....	95
3.6.2.5	Equipo de medición Armónico Digital. ....	95
3.7	PRACTICAS RECOMENDADAS PARA LOS CONSUMIDORES INDIVIDUALES. ....	95
3.7.1	Generalidades. ....	95

3.7.2	Desarrollo de Limites de Distorsión de corriente.....	97
3.7.3	Limites del <i>Notch</i> de Conmutación.....	98
3.7.4	Límite de distorsión de corriente.....	99
3.7.4.1	Consideraciones para calentamiento de transformadores.....	102
3.8	PRACTICA RECOMENDADAS PARA LAS DISTRIBUIDORAS.....	102
3.8.1	Generalidades.....	102
3.8.2	Suma de armónicas.....	102
3.8.3	Armónicos de corta duración.....	103
3.8.4	Condiciones anormales para problemas armónicos.....	103
3.8.5	Limites de distorsión de voltaje.....	105
3.9	METODOLOGÍA RECOMENDADOS PARA EVALUAR NUEVAS FUENTES DE ARMÓNICAS.....	105
3.9.1	Generalidades.....	105
3.10	EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	105
3.10.1	Ejemplo de gran planta industrial alimentada a niveles de voltaje de transmisión.....	105
3.11	REFERENCIAS.....	110
<b>4</b>	<b>SAG/SWELL .....</b>	<b>114</b>
4.1	EFFECTOS DE LOS SAGS DE VOLTAJE SOBRE LAS PROTECCIONES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	114
4.1.1	Probabilidad de ocurrencia de los <i>sags de voltaje</i> .....	114
4.1.2	Valoración de confiabilidad (pronosticado).....	115
4.1.3	Confiabilidad histórica (pronosticado).....	115
4.1.4	Tendencia general.....	116
4.1.5	Índices de confiabilidad.....	117
4.2	SAGS DE VOLTAJE EN SISTEMAS INDUSTRIALES.....	118
4.2.1	Generalidades.....	118
4.3	CAUSAS DE SAG DE VOLTAJE.....	119
4.4	VOLTAJE EN LA FABRICA DURANTE UNA FALLA MONOFÁSICA LÍNEA A TIERRA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	121
4.5	SENSIBILIDAD DEL EQUIPO A SAGS DE VOLTAJE.....	123
4.6	ESTIMANDO LA PROBABILIDAD DE UN PROBLEMA DE SAG DE VOLTAJE.....	125
4.7	EVALUACIÓN Y SOLUCIONES PARA PROBLEMAS DE SAG DE VOLTAJE.....	127
4.8	REFERENCIAS.....	130
<b>5</b>	<b>TRANSITORIOS.....</b>	<b>132</b>
5.1	ALCANCE.....	132
5.2	COMO UTILIZAR ESTE DOCUMENTO.....	133
5.2.1	Generalidades.....	133
5.2.2	Logrando inmunidad practica contra transitorios.....	133
5.2.2.1	Protección deseada.....	134
5.2.2.2	Sensibilidad de equipos.....	134
5.2.2.3	Ambientes de potencia de transitorios.....	135
5.2.2.4	Ambiente de potencia del sistema eléctrico.....	135
5.2.2.5	Desempeño de los dispositivos de protección contra transitorios.....	135
5.2.2.6	Ambiente de prueba.....	135
5.2.2.7	Costos.....	135

5.3	DEFINICIONES.....	136
5.4	EL ORIGEN DE LOS VOLTAJES TRANSITORIOS.....	136
5.4.1	Generalidades.....	136
5.4.2	Los rayos.....	136
5.4.3	Transitorios de conmutación.....	137
5.5	RESUMEN DE LA BASE DE DATOS.....	138
5.5.1	Generalidades.....	138
5.5.2	Notaciones y definiciones.....	138
5.6	SELECCIÓN RECOMENDADA DE TRANSITORIOS REPRESENTATIVOS.....	139
5.6.1	Generalidades.....	139
5.6.2	Razón de ocurrencia de niveles de voltaje de circuitos sin protección.....	139
5.6.2.1	Generalidades.....	139
5.6.2.2	Razón de ocurrencia contra nivel de voltaje.....	140
5.6.2.3	Niveles de exposición.....	141
5.6.3	Formas de onda recomendada.....	144
5.6.3.1	Generalidades.....	144
5.6.3.2	Ondas oscilatorias.....	144
5.6.3.3	Transitorios con capacidad de deposición de energía elevada.....	145
5.6.3.4	Transitorios rápidos.....	147
5.6.4	Amplitud, energía e impedancia de la fuente.....	149
5.6.5	Razón de cambio de voltaje.....	150
5.6.6	Categorías de ubicación.....	150
5.7	PLANIFICACIÓN RECOMENDADA PARA INMUNIDAD DE TRANSITORIOS.....	153
5.7.1	Generalidades.....	153
5.7.2	Reconocimiento de la susceptibilidad del equipo y el ambiente de prueba.....	153
5.7.3	Diseño del peor caso y compromiso económico.....	154
5.7.4	Efectos de los transitorios.....	156
5.7.5	Selección de las formas de onda.....	157
5.8	DEFINICIONES FORMAS DE ONDA ESTÁNDAR PARA PRUEBAS DE TRANSITORIOS.....	158
5.8.1	Generalidades.....	158
5.8.1.1	Onda oscilatoria de 100 Khz.....	160
5.8.1.2	Onda combinada.....	160
5.8.2	Selección del valor pico de la forma de onda estándar.....	160
5.8.3	Condiciones de prueba.....	164
5.8.3.1	Mediciones de la potencia eléctrica.....	164
5.8.3.2	Verificación del generador de prueba.....	164
5.8.3.3	Tolerancia sobre los parámetros más importantes.....	165
5.8.3.4	Pruebas sin potencia eléctrica.....	165
5.8.4	Detalles y especificaciones de las formas de onda.....	166
5.8.4.1	Onda oscilatoria 0.5 ms – 100 khz.....	166
5.8.4.2	Onda combinada de 1.2/50 – 8/20 $\mu$ s.....	167
5.8.5	Ecuaciones para formas de onda estándar.....	169
5.9	DEFINICIÓN DE FORMAS DE ONDA ADICIONALES PARA PRUEBAS DE TRANSITORIOS.....	170
5.9.1	Transitorios rápidos de electricidad (EFT).....	170
5.9.1.1	Definición de forma de onda.....	170
5.9.1.2	Amplitud.....	171

5.9.1.3	Procedimientos de prueba.....	172
5.9.2	La onda 10/1000 ms.....	172
5.9.2.1	Definición de forma de onda.....	172
5.9.2.2	Amplitud.....	173
5.9.2.3	Procedimiento de prueba.....	174
5.9.3	Onda transitoria a 5 khz.....	175
5.9.3.1	Definición de forma de onda.....	175
5.9.3.2	Amplitud.....	175
5.9.3.3	Procedimiento de prueba.....	176
5.9.4	Ecuaciones para formas de onda adicionales.....	177
5.10	REFERENCIAS.....	179
<b>6</b>	<b>FLUCTUACIONES DE VOLTAJES.....</b>	<b>181</b>
6.1	FUENTES DE FLICKER Y MITIGACIÓN.....	181
6.1.1	Fluctuación de voltaje.....	181
6.1.2	Efecto humano.....	182
6.1.3	Efecto del equipo.....	182
6.1.4	Niveles aceptables de <i>flicker</i> .....	182
6.1.5	Horno de arco.....	183
6.1.6	Estudios de la variación de voltaje.....	184
6.1.7	Mitigación de fluctuaciones de voltaje.....	185
6.1.8	Condensador síncrono.....	185
6.1.9	Condensador shunt.....	185
6.1.10	Condensador serie.....	185
6.1.11	Reactor saturado.....	186
6.1.12	Reactancia de compensación estática y dinámica.....	186
6.1.13	Soldadores eléctricos.....	186
6.2	FLICKER Y PRINCIPIOS DE COMPENSACIÓN.....	187
6.2.1	Caracterización del problema de <i>flicker</i> .....	187
6.3	NATURALEZA DE LA VARIACIÓN DE CORRIENTE DE LOS HORNOS DE ARCO.....	189
6.4	ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN DEL FLICKER.....	191
6.5	GENERADORES.....	192
6.5.1	Primera acción.....	192
6.5.2	Alternadores.....	193
6.5.3	Turbinas de viento.....	193
6.6	REFERENCIAS.....	194
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>195</b>

## INTRODUCCION

Energía eléctrica de calidad es simplemente la interacción de la energía eléctrica con los distintos equipos eléctricos. Si los equipos eléctricos operan correcta y confiablemente, sin ser dañados o sometidos a situaciones que puedan generar mal funcionamiento, diremos entonces que la *Energía Eléctrica es de Calidad*. Por el contrario, si el equipo eléctrico no opera adecuadamente, si su funcionamiento no es confiable o el mismo se daña bajo uso normal, entonces la Calidad de Energía Eléctrica es pobre. Como regla general, cualquier alteración en el voltaje de una fuente de energía (bien sea cd o ca) puede ser considerada como materia concerniente a la Calidad de Energía Eléctrica. Problemas de Calidad de Energía Eléctrica consideran eventos de gran velocidad tales como impulsos de voltaje/transitorios, sonido de alta frecuencia, fallas en la onda eléctrica, incrementos y caídas de voltaje y pérdida total de la energía. Cada tipo de equipo eléctrico será afectado particularmente debido a los distintos problemas de Calidad de la Energía. Analizando la "potencia eléctrica" y evaluando los equipos o sus cargas, podemos nosotros determinar si realmente existe un problema en la Calidad de la Energía. Los problemas en la Calidad de la Energía Eléctrica pueden ser detectados instalando equipos de medición de alta velocidad para monitorear la "potencia eléctrica". Este tipo de equipo de prueba proveerá información que será usada en una evaluación para determinar si el suministro de energía eléctrica es de suficiente "calidad" para operar los equipos confiadamente. Este proceso es similar al usado por un médico cuando utiliza un monitor de ritmo cardíaco para registrar los impulsos eléctricos del corazón del paciente. El monitoreo provee información valiosa, pero de cualquier forma esta información requiere ser analizada e interpretada para poder ser aplicada al tipo de equipo que está conectado.

# Capitulo 1

## Regulacion de voltaje

# 1 REGULACION DE VOLTAJE

## Valores nominales de voltaje (60 Hertz) para sistemas de potencia eléctrica y equipo eléctrico.

### 1.1 Alcance y propósito

#### 1.1.1 Alcance.

Este documento establece valores de voltaje nominal y tolerancias de operación para 60 hertz en los sistemas de potencia eléctricos arriba de 100 voltios y hasta 230 kV. También hace recomendaciones a otros grupos de normas con respecto a valores de voltajes para equipo usado en sistemas de potencia y para el uso de dispositivos conectados a tales sistemas.

#### 1.1.2 Propósito.

Los propósitos de este documento son:

- (1) Promover un mejor entendimiento de los voltajes asociados con los sistemas de potencia y uso de equipo para lograr en conjunto un diseño práctico, económico, y operacional.
- (2) Establecer nomenclatura uniforme en el campo de voltajes
- (3) Promover la normalización de sistemas de voltaje nominal y rangos de variación de voltajes para sistemas en operación.
- (4) Promover la normalización de valores nominales de voltaje del equipo y tolerancias.
- (5) Promover la coordinación de relación entre el sistema y los valores de voltaje del equipo y sus tolerancias.
- (6) Proporcionar una guía para el desarrollo futuro y diseño de equipo para alcanzar la mejor conformidad posible con las necesidades de los usuarios.
- (7) Promover una guía con respecto a los cambios de voltajes para empresas de sistemas de potencia nuevas y para cambios de algunas viejas.

### 1.2 Valores nominales de voltajes (60 hertz) en sistemas de potencia eléctrica.

#### 1.2.1 Definiciones.

##### 1.2.1.1 Sistemas o sistemas de potencia.

Sistema interconectado del sistema de potencia para llevar potencia eléctrica desde la fuente al dispositivo en utilización. Las porciones del sistema pueden estar bajo diferentes propiedades como el de un proveedor o un usuario.

### **1.2.1.2 Términos de voltaje de sistemas.**

#### **1.2.1.2.1 Voltaje del sistema.**

La raíz media cuadrática (rms) del voltaje fase a fase de una porción de un sistema eléctrico de corriente alterna. Cada sistema de voltaje pertenece a una porción del sistema que es limitado por los transformadores o el equipo en utilización. (Todos los voltajes a continuación son voltajes rms fase a fase o fase a neutro.)

#### **1.2.1.2.2 Voltaje nominal del sistema.**

El voltaje por el que una porción del sistema se designa y a ciertas características del funcionamiento del sistema que están relacionadas. Cada sistema de voltaje nominal pertenece a una porción del sistema que es limitado por transformadores o el equipo en utilización.

#### **1.2.1.2.3 Sistemas de voltaje máximo.**

Los altos voltajes que ocurren en sistemas bajo condiciones de operación normal, y el alto voltaje del sistema para el equipo y otros componentes se diseñan para el funcionamiento continuo satisfactorio sin reducción de cualquier tipo. Definiendo el voltaje máximo del sistema, transitorios de voltajes y los sobre voltajes temporales causados por condiciones anormales del sistema como fallas, eliminación de cargas y otras anomalías similares son incluidas. Sin embargo los transitorios de voltaje y los sobre voltajes temporales pueden afectar las operaciones de funcionamiento del equipo y son consideradas en las aplicaciones de los equipos.

#### **1.2.1.2.4 Voltaje de servicio.**

El voltaje en el punto donde el sistema eléctrico de la fuente y el sistema eléctrico del usuario están conectados.

#### **1.2.1.2.5 Voltaje de utilización.**

El voltaje de utilización en los terminales de línea del equipo.

#### **1.2.1.2.6 Voltaje nominal de utilización.**

Valor nominal de voltaje de cierto equipo de utilización usado en el sistema.

### **1.2.1.3 Clases de voltaje de sistemas.**

#### **1.2.1.3.1 Bajo voltaje.**

Una clase de sistema de voltaje nominal menor o igual a 1000 voltios.

### **1.2.1.3.2 Medio voltaje.**

Una clase de sistema de voltaje nominal mayor que 1000 voltios y menor que 100kV voltios.

### **1.2.1.3.3 Alto voltaje.**

Una clase de sistema de voltaje nominal mayor o igual a 100kV voltios e igual o menor que 230kV voltios.

## **1.2.2 Selección de voltaje nominal de sistemas.**

Cuando se va a construir un nuevo sistema o se va a introducir un nuevo nivel de voltaje en un sistema existente, pueden ser seleccionados uno (o más) de los sistemas preferidos de voltaje nominal mostrados en negrilla en la tabla 1. El cambio lógico y económico para un sistema particular entre los voltajes de una manera diferenciada dependerá de un número de factores, tal como la característica y tamaño del sistema.

Otros sistemas de voltaje que son usados sustancialmente en sistemas existentes son mostrados en letras regulares.

Las consideraciones económicas requerirán que estos voltajes permanezcan en uso y en algunos casos pueden requerir que su uso sea ampliado; como sea, estos voltajes generalmente no deberían ser utilizados en sistemas nuevos o en nuevos niveles de voltaje en sistemas existentes.

Los sistemas de tres fases 4160 voltios, 6900 voltios y 13800 voltios son particularmente apropiados para sistemas industriales que suministran predominantemente cargas polifásicas, incluyendo grandes motores, debido a que estos voltajes corresponden a una clasificación estándar de motores de 4000 voltios, 6600 voltios, y 13200 voltios, como es explicado en el apartado 1.2.1.2.6.

Dos de estos sistemas de voltaje son mostrados en negrita para indicar que estos pueden ser utilizados para este propósito. Esto no es un intento para recomendar el uso de estos sistemas de voltaje para provecho de la distribución primaria, por lo que los voltajes de cuatro hilos de 12 470Y/7200 voltios o mayores pueden ser usados.

## **1.2.3 Explicación de los rangos de voltaje.**

Para cualquier sistema de voltaje nominal específico, los voltajes actualmente existentes en varios puntos en varios tiempos en cualquier sistema de potencia, o en cualquier grupo de sistemas, o en la industria como un conjunto, usualmente debería estar distribuido dentro del máximo y mínimo voltaje mostrado en la tabla 1. el diseño y operación de sistemas de potencia y el diseño de equipos para ser suministrados de tales sistemas puede ser coordinado con respecto a estos voltajes para que el equipo funcione satisfactoriamente conforme con los productos estándar y en el rango completo de voltajes de uso actual que serán encontrados dentro del sistema. Para fomentar este objetivo, este documento establece, para cada sistema de voltaje nominal, dos rangos de voltaje de servicio y de variaciones de voltajes de utilización, designados como rango A y rango B, de los cuales sus límites son dados en la tabla 1. Estos límites aplican para niveles de voltaje sostenido y no para voltajes de salida momentáneos que

pueden provenir de causas tales como operaciones de conmutación, corrientes de arranque de motores, y otras similares.

#### **1.2.4 Aplicación de rangos de voltaje.**

##### **1.2.4.1 Rango A – Voltaje de servicio.**

Los sistemas de suministro eléctrico serán diseñados y operados para que la mayoría de servicios de voltaje estén dentro de los límites especificados para el rango A. La incidencia de servicios de voltaje fuera de estos límites debe ser poco frecuente.

##### **1.2.4.2 Rango A – Voltaje de utilización.**

Los sistemas para consumidores serán así diseñados y operados para que los voltajes de servicio estén dentro de los límites del rango A, la mayoría de voltajes de aplicación estarán dentro de los límites especificados para este rango.

Los equipos de aplicación serán diseñados y evaluados para ofrecer un desempeño completamente satisfactorio a lo largo de este rango.

##### **1.2.4.3 Rango B – Voltajes de servicio y utilización.**

El rango B incluye voltajes arriba y abajo de los límites del rango A, que necesariamente resultan del diseño práctico y condiciones de operación sobre el suministro o los sistemas del usuario, o ambos. Aunque tales condiciones son una parte de operaciones prácticas, ellas deben estar limitadas en grado, frecuencia, y duración. Cuando ellas ocurren, se deben tomar medidas correctivas dentro de un tiempo razonable para mejorar los voltajes para cumplir con los requerimientos del rango A.

En la medida en que sea posible, se diseñarán equipos de aplicación para dar un funcionamiento aceptable en el extremo del rango de voltaje aplicado, aunque no necesariamente como un buen funcionamiento en el rango A.

Debe reconocerse que debido a las condiciones más allá del control del proveedor o usuario, o ambos, existiran periodos poco frecuentes y limitados en donde ocurrirán voltajes sostenidos fuera de los límites del rango B. El equipo utilizado puede no funcionar satisfactoriamente bajo estas condiciones, y los dispositivos de protección pueden operar para proteger el equipo.

Cuando los voltajes ocurren fuera del límite del rango B, disponible, se tomara la acción correctiva. La urgencia para tal acción dependerá de muchos factores, como el lugar y la naturaleza de la carga o circuitos involucrados y la magnitud y duración de la desviación más allá de los límites del rango B.

### **1.3 Valores nominales de voltaje para equipo eléctrico a 60 hertz.**

#### **1.3.1 Generalidades.**

Los valores de voltaje y otras características de diversas clases para equipo eléctrico a 60 hertz son establecidas en otras normas. Una lista parcial de estas normas se da en el anexo E.

Los principales tipos de aplicación para equipo eléctrico, los valores de voltaje de placa y los correspondientes sistemas de voltaje nominal para el cual ellos son aplicables son listados en las tablas C1, C2 y C3 en el anexo C.

Las tablas son detalladas sobre valores de voltaje de estos otros tipos de equipo consultando las normas apropiadas o a los fabricantes para asegurar la aplicación apropiada.

En la revisión de los valores de voltaje en la placa en el anexo C y en las normas de corriente para equipo mostradas en el anexo E, indican mucha inconsistencia en la relación entre los valores de placa del equipo y entre estos valores y los sistemas de voltaje nominal para el cual el equipo es aplicable. Para sistemas base de 120 voltios, los valores de voltaje del equipo son basados diferentemente en 115 voltios, 120 voltios, y 125 voltios. La misma base no siempre se usa de forma consistente para todos los equipos de la misma categoría.

Este documento incluye información, como la proporcionada en el anexo D, para ayudar en el entendimiento sobre los efectos de voltajes desbalanceados en equipos de uso en sistemas polifásicos.

#### **1.3.2 Recomendaciones.**

En la medida en que resulte practico, siempre que las normas de equipo eléctrico son revisadas:

- (1) Los valores nominales de voltaje de placa deberían ser cambiables como sea necesario con el propósito de brindar una relación consistente entre los valores nominales de todos los equipos de la misma clase general y el mismo voltaje del sistema nominal en la porción del sistema sobre la cual ellos están diseñados para trabajar.
- (2) Los rangos de voltaje para el cual el equipo está diseñado deberían ser cambiados como sea necesario con el propósito de cumplir con los rangos mostrados en la tabla 1.

Los valores de voltaje de uso en cada categoría de equipo tampoco debe ser igual al voltaje del sistema nominal o menos que el sistema de voltaje nominal por la razón aproximada de 115 a 120.

**Tabla 1. Voltajes nominales de sistemas y rangos de voltaje normalizados**

Clases de voltaje	Voltaje nominal del sistema (Nota a)			Voltaje nominal de utilización (Nota i)	Rango de voltaje A (Nota b)			Rango de voltaje B (Nota b)																												
					Máximo	Mínimo		Máximo	Mínimo																											
	Dos hilos	Tres hilos	Cuatro hilos	Dos hilos Tres hilos Cuatro hilos	voltaje de Utilización y Servicio Nota (c)	Voltaje de servicio	Voltaje de utilización	voltaje de Utilización y Servicio	Voltaje de servicio	Voltaje de utilización																										
Bajo voltaje (Nota 1)	Sistemas Mono-fásicos																																			
	120	120/240		115 115/230	126 126/252	114 114/228	110 110/220	127 127/254	110 110/220	106 106/212																										
	Sistemas Tri-fásicos																																			
			208Y/120 (Nota d) 240/120	200 230/115	218Y/126 252/126 230 252	197Y/114 226/114 226	191Y/110 220/110 220	220Y/127 254/127 220	191Y/110 (Nota 2) 220/110 220	184Y/106 (Nota 2) 212/106 212																										
		240 480 600 (Nota e)	480Y/277	460 460 575	504Y/291 504 630 (Nota e)	456Y/263 456 570	440Y/254 440 550	508Y/293 508 635 (Nota e)	440Y/110 440 550	424Y/245 424 530																										
Medio Voltaje	2400	4160Y/2400		2520 4370/2520	2340 4050Y/2340	2160 3740Y/2160	2540 4400Y/2540	2280 3950Y/2280	2080 3600/2080																											
	4160 4800 6900			4370 5040 7240	4050 4680 6730	3740 4320 6210	4400 5060 7260	3950 4560 6560	3600 4160 5940																											
	13800	8320Y/4800 12000Y/6930 12470Y/7200 13200Y/7620 13800Y/7970		8730Y/5040 12600Y/7270 13090Y/7560 138860Y/8000 14490Y/8370 14490	8110Y/4680 11700Y/6760 12160Y/720 12870Y/7430 13460Y/7760 13460	(Nota f) 12420	8800Y/5060 12700Y/7330 13200Y/7620 13970Y/8070 14520Y/8380 14520	7900Y/4560 11400Y/6580 11850Y/6840 12504Y/7240 13110Y/7570 13110	(Nota f) 11880																											
	23000	20780Y/12000 22860Y/13200		21820Y/12600 2400Y/13860 24150	20260Y/11700 22290Y/12870 22430	(Nota f)	22000Y/12700 24200Y/13970 24340	19740Y/11400 21720Y/12540 21850	(Nota f)																											
	34500	24940Y/14400 34500Y/19920		26190Y/15120 36230Y/20920 36230	24320Y/14040 33640Y/19420 33640		26400Y/15240 36510Y/21080 36510	23690Y/13680 32780Y/16930 32780																												
	46000 69000			Voltaje Máximo (Nota g) { 4830 72500	Notas:(1) mínimo de voltaje de utilización para circuitos de 120-600 voltios que no alimentan carga de alumbrado son las siguientes:  <table style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>voltaje nominal del sistema</td> <td>Rango A</td> <td>Rango B</td> </tr> <tr> <td>120</td> <td>108</td> <td>104</td> </tr> <tr> <td>120/240</td> <td>108/216</td> <td>104/208</td> </tr> <tr> <td>208Y/120</td> <td>187Y/108</td> <td>180Y/104</td> </tr> <tr> <td>240/120</td> <td>216/108</td> <td>208/104</td> </tr> <tr> <td>240</td> <td>216</td> <td>208</td> </tr> <tr> <td>480Y/277</td> <td>432Y/249</td> <td>416Y/240</td> </tr> <tr> <td>480</td> <td>432</td> <td>416</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>540</td> <td>520</td> </tr> </table>			voltaje nominal del sistema	Rango A	Rango B	120	108	104	120/240	108/216	104/208	208Y/120	187Y/108	180Y/104	240/120	216/108	208/104	240	216	208	480Y/277	432Y/249	416Y/240	480	432	416	600	540	520	(2) muchos motores de 220 voltios se les aplica 208 voltios de sistemas existentes sobre la asuncion de que el voltaje de utilización no es menor que 1878 voltios. La precaucion debiera ser ejercida poniendo en practica los minimos voltajes del rango B .	
voltaje nominal del sistema	Rango A	Rango B																																		
120	108	104																																		
120/240	108/216	104/208																																		
208Y/120	187Y/108	180Y/104																																		
240/120	216/108	208/104																																		
240	216	208																																		
480Y/277	432Y/249	416Y/240																																		
480	432	416																																		
600	540	520																																		
Alto Voltaje	115000 138000 161000 230000			121000 145000 169000 242000	(Nota 2)																															
(Nota h)																																				
Extra-alto Voltaje		345000 500000 765000		362000 550000 800000																																
Ultra-Alto Voltaje		1100000		1200000																																

**Voltajes nominales de sistemas estandar y rangos de voltajes (Rango de interes de tabla 1)**

Clases de voltaje	Voltaje nominal del sistema (Nota a)			Voltaje nominal de utilización (Nota i)	Rango A de voltaje (Nota b)			Rango B de voltaje (Nota b)		
					Máximo	Mínimo		Máximo	Mínimo	
	Dos hilos	Tres hilos	Cuatro hilos	Dos hilo Tres hilos Cuatro hilos	voltaje de Utilización y Servicio Nota (c)	Voltaje de servicio	Voltaje de utilizacion	voltaje de Utilización y Servicio	Voltaje de servicio	Voltaje de utilizacion
<b>Bajo voltaje (Nota 1)</b>	<b>Sistemas Monofásicos</b>									
	<b>120</b>			<b>115</b>	<b>126</b>	<b>114</b>	<b>110</b>	<b>127</b>	<b>110</b>	<b>106</b>
		120/240		115/230	126/252	114/228	110/220	127/254	110/220	106/212
	<b>Sistemas Trifásicos</b>									
			208Y/120 (Nota d) 240/120	200 230/115 230	218Y/126 252/126 252	197Y/114 226/114 226	191Y/110 220/110 220	220Y/127 254/127 254	191Y/110 (Nota 2) 220/110 220	184Y/106 (Nota 2) 212/106 212
	240 480 600 (Nota e)	480Y/277	460 460 575	504Y/291 504 630 (Nota e)	456Y/263 456 570	440Y/254 440 550	508Y/293 508 635 (Nota e)	440Y/110 440 550	424Y/245 424 530	

Notas:

- a) Los sistemas trifásicos de tres hilos son sistemas en los cuales solamente los conductores trifásicos son llevados desde la fuente para la conexión de cargas. La fuente puede ser derivada de cualquier tipo de conexión de transformador trifásico, puesto a tierra o no aterrizado. Los sistemas trifásicos de cuatro hilos son sistemas en los cuales un conductor neutro aterrizado es también llevado desde la fuente para la conexión de cargas. Los sistemas de cuatro hilos en la tabla 1 son designados por el voltaje fase a fase, seguido por la letra Y (excepto para sistemas delta 240/120 voltios), una línea inclinada, y el voltaje fase a neutro. Los servicios monofásicos y cargas pueden ser suministradas por otros sistemas monofásicos o trifásicos. Las principales conexiones de transformador que son usadas para suministrar sistemas monofásicos o trifásicos son ilustradas en el anexo A.
- b) Los rangos de voltaje en esta tabla son ilustrados en el anexo B.
- c) Para sistemas nominales de 120-600 voltios, los voltajes en esta columna son voltajes de servicios máximos. Los máximos voltajes de utilización no excederán los 125 voltios para el voltaje nominal del sistema de 120 voltios, ni los múltiplos apropiados de los mismos para otros voltajes nominales del sistema dentro de los 600 voltios.
- d) Una modificación para este sistema trifásico de cuatro hilos está disponible como un servicio de 120/208Y voltios monofásica, trifásica para aplicaciones estrella abierta.
- e) Ciertos tipos de control y equipos de protección actualmente disponible tienen un límite de voltaje máximo de 600 voltios; las fabricas o los suministradores de potencia o ambos serán consultados para asegurar la apropiada aplicación.
- f) Los equipos utilizados generalmente no operan directamente a estos voltajes. Para equipos suministrados a través de transformadores, refiérase a los límites para el voltaje nominal del sistema de transformadores de salida.
- g) Para estos sistemas los límites del rango A y Rango B no se muestran debido a que donde se utilizan como voltajes de servicio el nivel del voltaje opera conectado al sistema del usuario que es ajustado normalmente por medidas de regulación de voltaje para satisfacer sus requerimientos.
- h) Los voltajes estándar son tomados de la norma ANSI C92.2-1987 solo por conveniencia.
- i) Los voltajes nominales de utilización son para motores de bajo voltaje y control. Ver anexo C para otros equipos de voltaje nominal de utilización (o equipos con rangos de voltajes de placa).

## 1.4 Anexos.

### Anexo A (Información)

Principales conexiones de transformadores para suministro de voltajes en los sistemas de la tabla 1

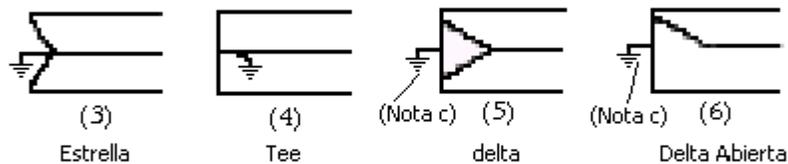
(Ver la figura A1)

Sistemas monofásicos



Sistemas trifásicos tres hilos

(Nota b)



Sistemas trifásicos cuatro hilos

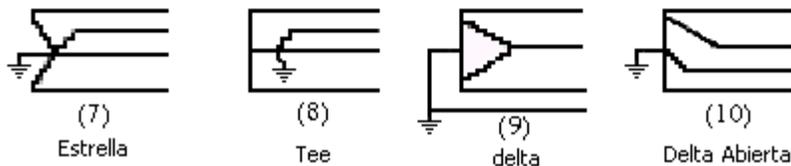


Figura A1

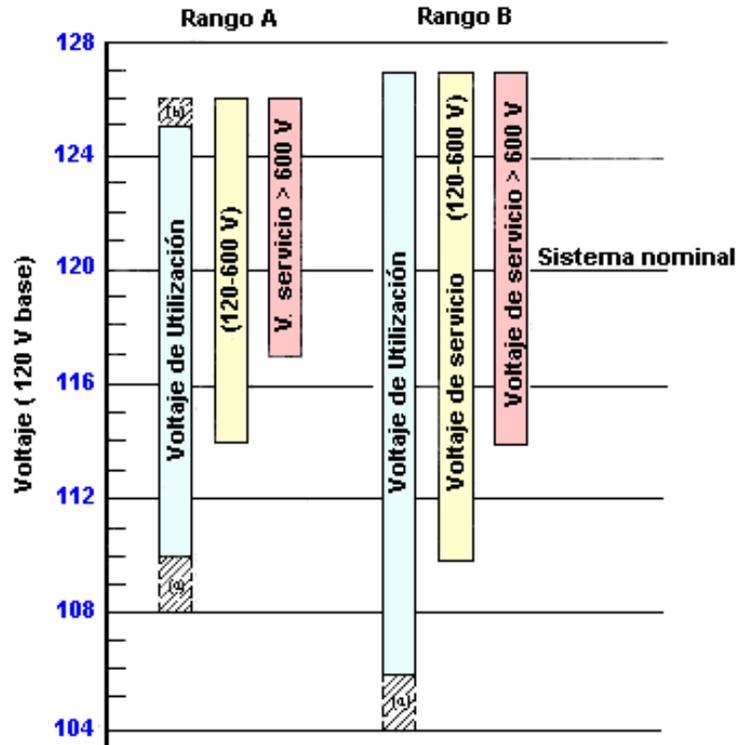
#### Notas

- Los diagramas de arriba muestran conexiones de transformadores en el embobinado secundario para suministro de voltaje nominal de la tabla 1. Los sistemas de más de 600 voltios son normalmente trifásicos y suministrado por conexiones (3), puesta a tierra (5), o (7). Los sistemas de 120-600 voltios pueden ser ambos, monofásicos o trifásicos, y todas las conexiones mostradas son utilizadas para algunas extensiones por algunos sistemas en este rango de voltaje.
- Los sistemas trifásicos tres hilos pueden ser solidamente aterrizados, impedancia aterrizada, o no aterrizadas pero no son deseadas para suministro de cargas de fase a neutro (como son los sistemas de cuatro hilos).
- En las conexiones (5) y (6) la puesta a tierra debe ser conectada en el punto medio de uno de los embobinados como se muestra (si está disponible), a un conductor de fase (puesta a tierra de esquina), o se puede omitir por completo (no aterrizado).
- Los servicios monofásicos y cargas monofásicas pueden ser suministrados desde sistemas monofásicos o desde sistemas trifásicos. Ellos son conectados fase a fase cuando suministra desde un sistema trifásico de tres hilos y cualquiera de las dos: fase a fase o fase a neutro desde un sistema trifásico de cuatro hilos.

## Anexo B (Informativo)

### Ilustración de rangos de voltaje de la tabla 1.

La figura B1 muestra las bases de los límites del rango A y el rango B de la tabla 1. Los límites en la tabla 1, fueron determinados por multiplicación de los límites mostrados en este gráfico por la razón de cada voltaje nominal del sistema para la base de 120 voltios. (Para excepciones, ver nota (d) de la figura B1).



**Figura B1.**

#### Notas

- Esas porciones sombreadas de los rangos no se aplican para circuitos que suministran cargas de alumbrado.
- Esta porción sombreada del rango no es aplicable a sistemas de 120-600 voltios.
- La diferencia entre voltaje mínimo de servicio y voltaje mínimo de utilización tiene como propósito permitir caídas de voltaje en el sistema de alambrado del cliente. Esta diferencia es mayor para servicios a más de 600 voltios para permitir caídas de voltajes adicionales en las transformaciones entre el voltaje de servicio y los equipos utilizados.
- Los límites del voltaje de utilización de rango B en la tabla 1 para sistemas de 6900 y 13800 voltios son el 90% y 110% de las razones de voltajes de los motores estándar utilizados en estos sistemas y derivados ligeramente de esta figura.

**Anexo C**  
**Valores nominales de voltaje para equipo eléctrico de utilización a 60 hertz**  
(Ver anexo E para una lista parcial de aplicaciones estándar)

En las tablas C1 y C2 solo se incluyen categorías representativas de equipos debido al número verdadero de equipo actual y protecciones que hacen impráctico para cubrirlos a todos ellos.

**Tabla C1 - Lámparas, balastos y diversos accesorios**

Equipo	Aplicaciones para todos los voltajes de sistemas conteniendo estos voltajes	Valores nominales de voltaje en la placa del equipo
<b>Dispositivos de alumbrado</b>		
lamparas incandescentes	120	120
	120	120
aditamentos y balastos para lamparas fluorescentes y de presion de alta presion [notas (a) y (b)]	208	208
	24	240
	277	277
	480	480
<b>Dispositivos que funcionan con motores</b>		
secadores de cabello		
relojes	120	120
secadores de ropa	120	120
ventiladores	120/240, 240/120, 208Y/120	120/240
batidoras de comida		120
triturador de desechos de comida		120
		115
temporizadores		
aspiradora	120	120
lavador		120
ropa		
platos		115
		115
<b>Dispositivos de comunicación</b>		
proyectors, mudos y sonoros	120	120
pequeños	120/240, 240/120	120/240
grandes	208Y/120	120/208
fonografos		
radios		
grabadoras	120	120
television		
<b>Dispositivos de cocina y calentadores</b>		
cobertores		
Dispositivos de cocina, mesa y contadores	120	120
electrodomestico - pequeño		
electrodomestico - grande	120	120
comercial - pequeño		
comercial - grande	240	240
	208	208
	480	480
calentadores de aire portatil		120
almuada calentadora		120
plancha	120	
manual		120
soldador		120
tipo electrodomesticos - policias	120/240, 240/120	120/240
	208Y/120	120/208
calentadores de agua		120/240
tanque pequeño	120	
tanque grande	240	240
	240	
	280	280

**Notas**

- a) Los sistemas de alumbrado incorporan dos líneas a tierra por servicio puede requerir balastos especiales y auxiliares.
- b) Algunos balastos son evaluados para utilizarse en más de un sistema de voltaje por derivaciones en uso o por múltiples derivaciones primarias.
- c) Se requiere la atención al hecho que bajo las condiciones de emergencia en sistemas eléctricos, pueden ser encontrados voltajes por debajo del rango B de la tabla 1. Esto debe ser tomado en cuenta en el diseño de dispositivos de operación de motores por encendido automático y en la aplicación de motores y control.

Tabla C2 – calefacción, refrigeración y equipos de aire acondicionado

equipo	fase	aplicable para todos los voltajes nominales del sistema conteniendo este(os) voltaje(s)	valores nominales de voltaje en la placa del equipo
hornos de gas y aceite y fracciones de hp	1	{ 120 240	115
unidades de bobina	1		230
refrigeradoras y neveras	1	120	115
cuartos con aire acondicionado	1	{ 120 208 240 208, 240	115
			208, (200)*
			230
unidades de aire acondicionado y bombas de calentamiento	{ 1 y 3 1 y 3 1 y 3 1 3 3	208, 240	208/230**, (200/230)* **
compresores		208	208, (200)*
unidades condensadoras		240	230
maquinas de cubos de hielo		208, 240	208/230**, (200/230)* **
integral hp fan coil units, etc.		277	265
calentadores auxiliares y ductos para unidades de aire acondicionado y bombas de calentamiento	3	480	460
	3	600	575
Hornos eléctricos	{ 1 y 3 3	240	230
		208	208, (200)*
calentadores de confort	1	{ 120 208 240 277	120
			208
			240
Enfriadores de agua de bebida refrigerados	1	120	115
Deshumidificadores	1	120	115

\* valores explicativos son sobre consideraciones para diseños futuros

\*\*Denota valores de voltaje "uno de dos"

Tabla C3. Motores y equipo de control de motores

Aplicables a todos los voltajes nominales del sistema conteniendo este voltaje	Todos los motores y los equipos de control para motores con valores nominales de placa conteniendo estos voltajes			
	hp enteros		hp fraccionarios	
	Trifasico	Monofasico	Trifasico	Monofasico
120	-	115	-	115
208	200	-	200	-
240	230	230	230	230
480	460	-	460	-
600*	575	-	575	-
2400	2300	-	-	-
4160	4000	-	-	-
4800	4600	-	-	-
6900	6600	-	-	-
13800	13200	-	-	-

Para los propósitos de este anexo, el termino “equipo para control de motores” es usado en un censo general e incluido algunos tipos de equipo clasificados como interruptores<sup>7</sup>. Para dispositivos estándar ver anexo E.

Los motores monofásicos y trifásicos y el control de valores nominales de voltaje mostrado en la tabla C3 satisface los voltajes nominales del sistema indicado. Generalmente debe entenderse que motores con estos valores nominales serán considerados como convenientes para uso ordinario en el sistema correspondiente; por ejemplo, un motor de 230 voltios está preparado para el uso en un sistema nominal de 240 voltios. La operación de motores de 230 voltios en sistemas de 208 voltios no es recomendable porque el voltaje de utilización encontrado estará comúnmente por debajo de -10% de la tolerancia en el rango de voltaje o para el cual el motor es diseñado.

### Apéndice

Medidas adecuadas deberían ser tomadas por los fabricantes y las compañías distribuidoras para indicarle al comprador que el equipo está diseñado para ser usado sobre el sistema u/o voltaje nominal, pero puede ya ser numéricamente igual a, el valor nominal del voltaje de placa del equipo; por ejemplo, un motor y su control con voltaje nominal de 230 voltios está pensado para ser usado en sistema con voltaje nominal de 240 voltios.

## Anexo D

### Desbalance de voltaje polifásico

#### D.1 Introducción.

Estudios sobre el tema de desbalance de voltaje trifásico indican que:

1. Los costos relacionados al servicio requerido para reducir el desbalance de voltaje y los costos requeridos para un rango de operaciones de desbalance de voltaje para motores son en última instancia cubiertos directamente por los consumidores,
2. los costos en mejorar el suministro de las distribuidoras son máximos cuando el desbalance de voltaje se aproxima a cero y declina cuando el rango se incrementa, y
3. En las fábricas los costos relacionados a motores son mínimos a desbalance de voltaje cero y se incrementan rápidamente cuando se incrementa el rango.

Cuando estos costos, que no toman en cuenta las pérdidas de energía relacionadas a motores son combinados se pueden desarrollar curvas que indiquen el incremento del costo anual para el consumidor a diferentes límites de porcentaje de desbalance seleccionados.

El rango óptimo de desbalance de voltaje ocurre cuando los costos son mínimos.

Estudios de campo y estadísticos indican que:

1. Cada clase de motor está asociado con un único rango de desbalance de voltaje.
2. Estos rangos varían desde 0-2.5 por ciento a 0-4 por ciento de desbalance de voltaje con el promedio en aproximadamente 0-3.0 por ciento
3. Aproximadamente 98 por ciento de los sistemas de suministro eléctricos estudiados están dentro del 0-3.0 por ciento aproximadamente del rango de desbalance de voltaje, con el 66 por ciento en 0-1.0 por ciento más pequeño.

#### D.2 Recomendación.

Los sistemas de suministro eléctrico deberían ser diseñados y operados a un límite de desbalance de voltaje máximo de 3 por ciento cuando se hacen mediciones al suministro eléctrico bajo condiciones sin carga.

Esta recomendación no es para expandir los rangos de voltajes prescritos en 1.2.4. Si los voltajes desbalanceados de un sistema polifásico están cerca del límite superior o inferior especificado en la tabla 1, rango A o rango B, cada voltaje de fase individual estará dentro de los límites de la tabla 1.

### D.3 Definiciones.

El desbalance de voltaje de un sistema polifásico es expresado como un valor porcentual y es calculado como sigue.

$$\text{Porcentaje de desbalance de voltaje} = \frac{\text{desviación máxima del voltaje promedio}}{\text{Voltaje promedio}} \cdot 100$$

Ejemplo: con voltajes de fase de 230, 232, y 225, el promedio es 229; la desviación máxima del promedio es 4; y el porcentaje de desbalance es  $(100 \cdot 4) / 229 = 1.75\%$ .

### D.4 Redimensionamiento por desbalance.

La capacidad de carga de un equipo polifásico es normalmente reducido por un desbalance de voltaje un ejemplo común es el factor de redimensionamiento, de la figura D1, usado en la aplicación de motores de inducción polifásicos.

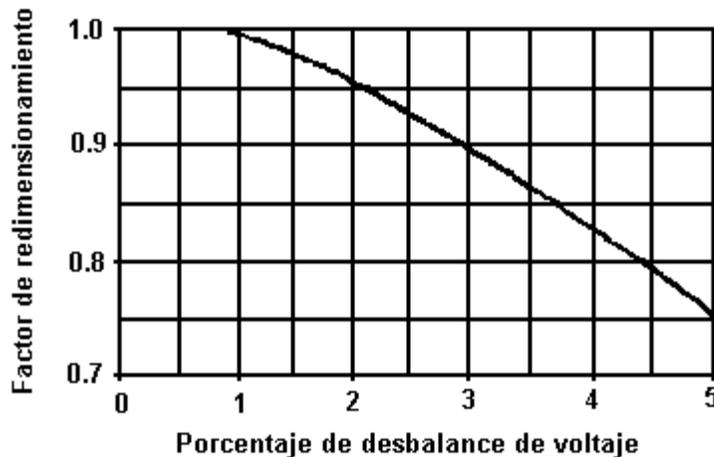


Figura D1. Factor de redimensionamiento

### D.5 Protección de desbalance de voltaje severo.

Los sistemas de los usuarios serán diseñados y operados para mantener un balance de carga razonable.

En casos severos de desbalance de voltaje, las consideraciones se darán para equipo de protección por la aplicación de controles de límites de desbalance.

## Anexo E

### Normas aplicables

#### E.1 Lista de normas

Equipos	Normas
Voltaje nominal para equipo de refrigeración y aire acondicionado	ARI 110
Equipo para filtrar aire	ARI 680
Compresores de amoníaco y unidades compresoras	ARI 510
Aplicación, instalación y servicio de sistemas unitarios	ARI 260
Hieleras comerciales automáticas	ARI 810
Cables con dispositivos de terminación (potencia)	IEEE 48
Equipo de calefacción eléctrica central de aire forzado	ARI 280
Unidades manejadoras de aire con estación central	ARI 430
Conectores para aplicación de distribución eléctrica	ANSI C119.1
Propuesta definitiva de contactores magnéticos	ARI 780
Extractores de humo	ANSI/AHAM DH-1
Instrumentos de medición eléctrica	SERIES ANSI C39
Aisladores de potencia eléctrica	SERIES ANSI C29
Mediciones eléctricas	SERIES ANSI C12
Neveras para refrigeración, con circulación de aire forzado	ARI 420
Hornos de gas	SERIE ANSI Z21
Aparatos de control industrial	SERIE ANSI / NEMA ICS
Conductores aislados	ANSI/NFPA 70
	SERIES AEIC
	SERIES ICEA
Lámparas	
Lámparas bactericidas	} SERIES ANSI C78
Lámpara de descarga eléctrica	
Lámparas incandescentes	
Lámparas de balastro	SERIES ANSI C82
Fusibles de bajo voltaje	ANSI/NEMA FU 1
Circuit breakers modelados para bajo voltaje	NEMA AB 1
Unidades mecánicas para transporte de refrigerado	ARI 1110
Hornos de aceite	CS 195
Empacado terminal de aires acondicionados	ARI 310
Compresores refrigerantes de desplazamiento positivo y unidades de condensación	ANSI/ARI 520
Equipo de switcheo de potencia	} SERIES ANSI C37
Circuitos de reconexión automática	
Seccionadores de línea automáticos	
Switcheos de condensadores	
Fusibles limitadores de corriente en distribución	
Recortadores y fusibles de enlace en distribución	

Equipos	Normas
Interruptores de aire de polo simple en distribución	
Recortadores de aceite y fusibles de enlace en distribución	
Switcheos de fusibles de desconexión	
Interruptores de aire de alto voltaje	
Estaciones de control manual y automático	
<i>Circuit breakers</i> de potencia	SERIES ANSI C37
Fusibles de potencia	
Sistemas de relés y rele	
Fusibles secundarios	
Supervisión y equipo asociado a tele medición (medición remota)	
Ensamblado de equipo de switcheo incluyendo material	
Paquetes de intercambio de agua fría	ANSI/ARI 590
Equipo de aire acondicionado para vehículo	ARI 250
Condensadores refrigerantes de corriente de aire frío de control mecánico remoto	ARI 460
Espacios con aire acondicionados	ANSI/AHAM RAC-1
Espacios acondicionados con ventilador	ARI 441
Maquinaria eléctrica rotativa	
Motores de inducción ca	
Generadores síncronos de rotor cilíndrico	SERIES ANSI C50
Condensadores y generadores síncronos de polo saliente	Y NEMA MG 1
Motores síncronos	
Motores universales	
Humificadores de auto contenido	ANSI/ARI 620
Enfriadores de agua potable refrigerado mecánicamente	ANSI/ARI 1010
Condensadores de potencia shunt	ANSI IEEE 18
Válvulas solenoides para líquidos y flujo gaseoso	ARI 760
Equipo de conversión de potencia estática	ANSI C34
Arrestadores de transitorios	ANSI C62.61 Y NEMA LA 1
Transformadores, reguladores y reactores	
Transformadores de horno de arco	
Transformadores de corriente constante	
Reactores limitadores de corriente	
Transformadores de distribución, convencional tipo subterráneo	SERIES ANSI C57
Tipo seco	ANSI/NEMA ST 20
Instrumentos transformadores	
Transformadores de potencia	
Transformadores de rectificación	
Transformadores de redes secundarias	
Especialidad	
Reguladores de voltaje de paso y voltaje de inducción	
Transformadores trifásicos con tap para intercambio de carga	

<b>Equipos</b>	<b>Normas</b>
Unidades de ventiladores	ARI 330
Equipo unitario de aire acondicionado	ARI 210
Equipo unitario comercial e industrial de aire acondicionado	ANSI/ARI 360
Equipo unitario de ducha	ARI 240
Dispositivos de alambrado	SERIES ANSI C73

# Capítulo 2

## Desbalance de voltaje

## 2 DESBALANCE DE VOLTAJE

### 2.1 Definición de desbalance de voltaje.

Las tres definiciones de desbalance de voltaje son especificadas y analizadas más adelante.

#### 2.1.1 Definición de NEMA.

La definición NEMA [1] de desbalance de voltaje, conocida también como índice de desbalance de voltaje de línea (LVUR), es dado por:

$$\%LVUR = \frac{\text{desviación máxima del voltaje de línea promedio}}{\text{voltaje de línea promedio}} \cdot 100 \quad (2.2.1)$$

La definición NEMA asume que el valor de voltaje promedio es siempre igual al índice, el cual es 480 V para sistemas trifásicos de EE.UU., ya que se trabaja solo con magnitudes, y los ángulos de fase no son incluidos.

#### 2.1.2 Definición IEEE.

La definición IEEE [2] de desbalance de voltaje, conocida también como índice de desbalance de voltaje de fase (PVUR), es dado por:

$$\%PVUR = \frac{\text{desviación máxima del voltaje de fase promedio}}{\text{voltaje de fase promedio}} \cdot 100 \quad (2.2.2)$$

La IEEE usa la misma definición de desbalance de voltaje que NEMA, diferenciándose en que la IEEE usa voltajes de fase en lugar de voltajes de línea a línea. Por eso es que, el ángulo de fase es despreciado y se consideran solamente magnitudes.

#### 2.1.3 Definición verdadera.

La definición verdadera de desbalance de voltaje es definida como la relación de la componente de voltaje de secuencia negativa a la componente de voltaje de secuencia positiva [3]. El factor del porcentaje de desbalance de voltaje (%VUF), o la definición verdadera, es dado por:

$$\%VUF = \frac{\text{componente del voltaje de secuencia negativa}}{\text{componente del voltaje de secuencia positiva}} \cdot 100 \quad (2.2.3)$$

Las componentes de voltaje de secuencia positiva y negativa se obtienen resolviendo los voltajes de línea trifásicos desbalanceados  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , y  $V_{ca}$  (o voltajes de fase) en dos componentes simétricas  $V_p$  y  $V_n$  (de línea o voltajes de fases). Las dos componentes balanceadas son dadas por:

$$V_p = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 \cdot V_{ca}}{3} \quad (2.2.4)$$

$$V_n = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a \cdot V_{ca}}{3} \quad (2.2.5)$$

Donde:  $a = 1\angle 120^\circ$  y  $a^2 = 1\angle 240^\circ$ .

Los voltajes de secuencia negativa y positiva se pueden usar cuando se analiza el comportamiento de un motor de inducción bajo condiciones de desbalance. Ya que la definición verdadera envuelve magnitud y ángulo (álgebra compleja) cuando se calculan componentes de voltajes de secuencia positiva y negativa, una fórmula dada por (2.2.6) evita el uso de álgebra compleja pero da una buena aproximación para la definición verdadera.

$$\% \text{ de desbalance de voltaje} = \frac{82 \cdot \sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{\text{voltaje de línea promedio}} \quad (2.2.6)$$

Donde  $V_{abe}$  = diferencia entre el voltaje de línea  $V_{ab}$  y el voltaje de línea promedio, etc.

El siguiente ejemplo muestra como usar las tres definiciones de desbalance de voltaje dadas.

Suponga que tres voltajes desbalanceados de línea a línea  $V_{ab} = 576\angle 0^\circ$ ,  $V_{bc} = 480\angle 221.4^\circ$ , y  $V_{ca} = 384\angle 124.2^\circ$  son aplicados a una máquina de inducción. El valor promedio de las magnitudes será  $(576 + 480 + 384)/3 = 480$  V y la desviación máxima del valor promedio es  $(576 - 480) = 96$  V. Por lo tanto, la definición NEMA de % de desbalance de voltaje será  $100 \cdot (96/480) = 20\%$ .

El voltaje de secuencia positiva es  $V_p = 473.1\angle -5.04^\circ$  y el voltaje de secuencia negativa es  $V_n = 112.6\angle 21.74^\circ$  para los tres voltajes desbalanceados. La definición verdadera de % de desbalance de voltaje será  $100 \cdot (112.6/473.1) = 23.8\%$ .

Aplicando la fórmula aproximada a los resultados del ejemplo en  $V_{abe} = (576 - 480) = 96$ ,  $V_{bce} = (480 - 480) = 0$ , y  $V_{cae} = (480 - 384) = 96$ , por lo tanto el % de desbalance de voltaje será  $82 \cdot (135.76/480) = 23.2\%$ . Este valor es cercano a el valor verdadero de 23.8%. La máquina de inducción responderá al valor verdadero de desbalance de voltaje, pero NEMA asumirá un desbalance de 20% para los mismos voltajes.

El análisis fue hecho, para entender las implicaciones que se tienen al hacer uso de estas definiciones de desbalance de voltaje. Puesto que las definiciones IEEE y NEMA son similares y la curva redimensionamiento está basada en NEMA, se decidió comparar la definición NEMA con la definición verdadera de desbalance de voltaje.

*Análisis:* Suponga que tres voltajes de línea desbalanceados son dados por :

$$\bar{E}_{ab} = E_{ab}\angle 0^\circ, \bar{E}_{bc} = E_{bc}\angle \theta_{bc}, \text{ y } \bar{E}_{ca} = E_{ca}\angle \theta_{ca}$$

Para un porcentaje de desbalance de voltaje dado basado en la definición NEMA, tomar 5%, asumiendo un voltaje promedio de 460 V y tomando el voltaje de línea promedio como la desviación más grande,  $E_{ab}$ . Se hacen los siguientes cálculos:

$$\%LVUR = \frac{E_{ab} - 460}{460} = 0.05$$

$$E_{ab} - 460 = 0.05 \cdot 460 = 23 \quad \therefore E_{ab} = 483$$

$$\text{El voltaje promedio} = \frac{E_{ab} + E_{bc} + E_{ca}}{3} = 460$$

$$\therefore E_{bc} + E_{ca} = 897 \text{ y } E_{ca} = 897 - E_{bc}.$$

$E_{bc}$  y  $E_{ca}$  puede ser escrito como  $|E_{bc} - 460| < 23$  y  $|E_{ca} - 460| < 23$ , respectivamente. Esto es así porque  $E_{ab}$  tiene la desviación más grande del voltaje promedio y el valor promedio será 460. Así,

$$437 < E_{bc} < 460 \text{ y } 437 < E_{ca} < 460.$$

La suma vectorial de los voltajes de línea es  $\bar{E}_{ab} + \bar{E}_{bc} + \bar{E}_{ca} = 0$ , ya que el voltaje de secuencia cero sería cero en ausencia de una falla. Esta ecuación puede ser resuelta como sigue:

$$E_{ab} \angle 0^\circ + E_{bc} \angle \theta_{bc} + E_{ca} \angle \theta_{ca} = 0$$

$$483 + E_{bc} \cdot \cos \theta_{bc} + j E_{bc} \cdot \sin \theta_{bc} + (897 - E_{bc}) \cdot \cos \theta_{ca} + j(897 - E_{bc}) \cdot \sin \theta_{ca} = 0 \quad (2.2.7)$$

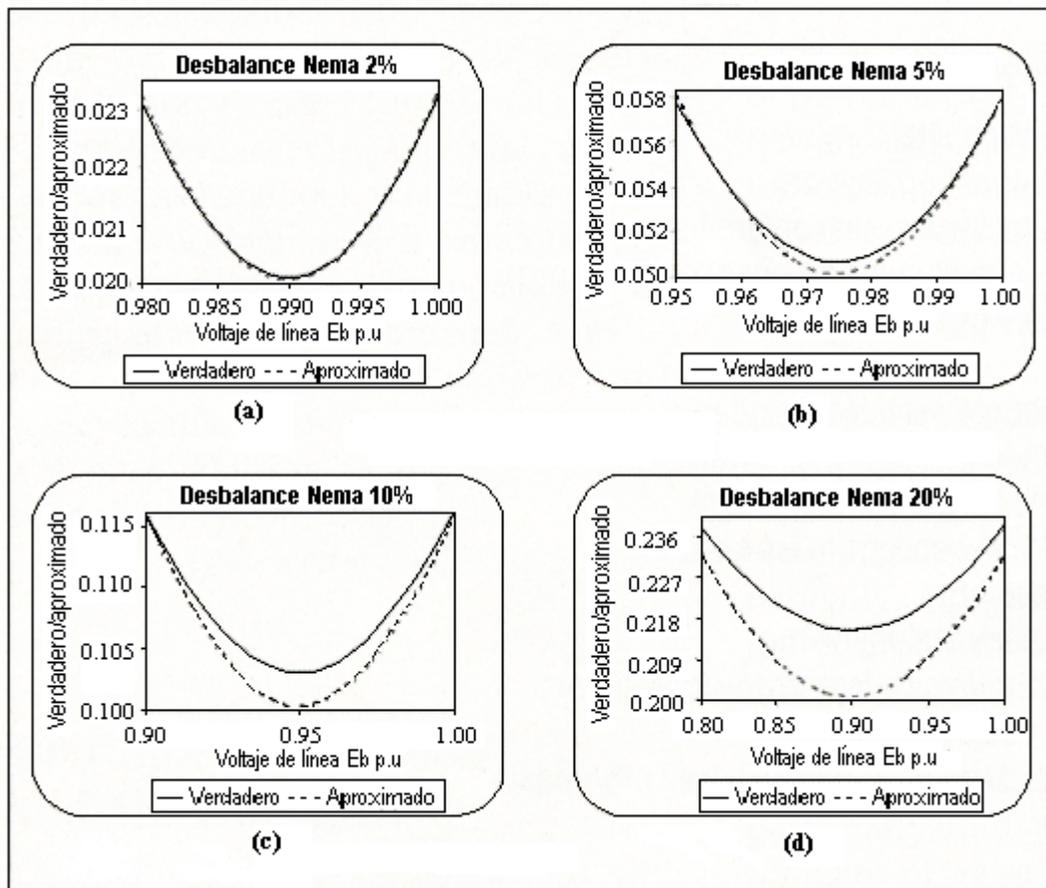
Así para un  $E_{bc}$  dado, los ángulos  $\theta_{bc}$  y  $\theta_{ca}$  se pueden obtener de (7) separando las dos partes, real e imaginaria, y resolver las dos ecuaciones.

De los cálculos, la definición verdadera de desbalance de voltaje será:

$$\% VUF = \frac{483 \angle 0^\circ + a^2 \cdot E_{bc} \angle \theta_{bc} + a \cdot (897 - E_{bc}) \angle \theta_{ca}}{483 \angle 0^\circ + a \cdot E_{bc} \angle \theta_{bc} + a^2 \cdot (897 - E_{bc}) \angle \theta_{ca}} \cdot 100 \quad (2.2.8)$$

donde  $a = 1 \angle 120^\circ$  y  $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ . La fórmula de aproximación de la definición verdadera será dada por:

$$\% \text{ de desbalance de voltaje} = \frac{82 \cdot \sqrt{(483 - 460)^2 + (E_b - 460)^2 + ((897 - E_b) - 460)^2}}{460} \quad (2.2.9)$$



**Figura 2.2.1**

**Relación entre la definición verdadera de desbalance de voltaje y la definición NEMA para 2%, 5%, 10%, y 20% valores de desbalance NEMA.**

De este análisis, se encuentra que para un valor dado de % de desbalance, basado en la definición NEMA, hay un rango de % de desbalance, basada en la definición verdadera y también usando la formula de aproximación. Esto es mostrado en la figura 2.2.1 para 2%, 5%, 10%, y 20% para la definición de desbalance de voltaje NEMA. La línea sólida representa la definición verdadera y la línea punteada representa la formula de aproximación.

La figura 2.2.1(a) muestra que para un desbalance de 2% NEMA, la definición verdadera y la formula de aproximación tienen una coincidencia muy cerrada. Para un desbalance de 5% NEMA mostrado en la figura 2.2.1(b) la formula de aproximación inicia con una desviación pequeña de la definición verdadera. Las figuras 2.2.1(c) y 2.2.1(d) muestran que como el % de desbalance NEMA se incrementa, la formula de aproximación se desvía aun mas de la definición verdadera.

Tabla 2.2.1.

Rango de desbalance de voltaje		
NEMA	Definición verdadera	Formula de aproximación
%	%	%
2	2 – 2.3	2 – 2.3
5	5 – 5.8	5 – 5.8
10	10.3 – 11.6	10 – 11.6
20	21 – 23.8	20 – 23.2

La diferencia entre la definición NEMA y la definición verdadera pueden diferir sustancialmente cuando el desbalance de voltaje es extremadamente alto, como se muestra en la figura 2.2.1(d). La tabla 2.2.1 muestra el rango de % de desbalance obtenido de la definición verdadera y la formula aproximada a 2%, 5%, 10%, y 20% de desbalance NEMA.

Por debajo de un desbalance NEMA de 5%, la máxima diferencia entre el NEMA y la definición verdadera es 0.8%. Esta diferencia no puede ser significativa cuando se determina el redimensionamiento de maquinas de inducción, por ejemplo. Más allá de, 20%, la diferencia puede ser tan alta como 3.8%. El motor respondería a el valor verdadero de 23.8%, pero NEMA asumiría un desbalance de 20%.

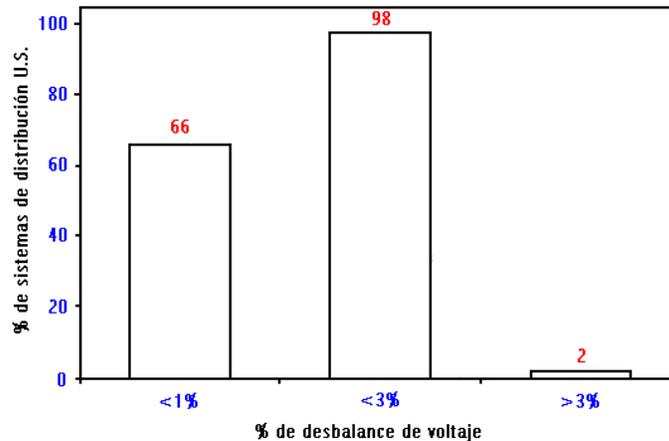


Figura 2.2.2

**Porcentaje de desbalance de voltaje aproximado de un sistema de distribución de EE.UU.**

La figura 2.2.2, presenta el desbalance aproximado del voltaje en porcentaje en el sistema de distribución de Estados Unidos obtenido de estudio de campo [19]. Muchas distribuidoras no registran las rutas de sus desbalances de voltaje en el interés de la priorización de tiempo/trabajo, porque los efectos nocivos no son inmediatamente evidentes o reconocidos y son tratados solamente cuando hay una queja. Por lo tanto, las encuestas sobre la calidad de la energía prestan poca atención a las perturbación que implican los siguientes tipos de acontecimientos de voltajes: *sag*, *swell*, sobrevoltajes, bajovoltajes, impulsos, transitorios e interrupciones (*outages*), que puede también causar desbalances severos del voltaje pero no

son del interés de este documento [20], [21], los problemas asociados a desbalance de voltaje serán discutidas en la siguiente sección.

## **2.2 Efectos del desbalance de voltaje.**

Los voltajes desbalanceados pueden dar lugar a efectos nocivos sobre el equipo y sobre el sistema de energía, que es intensificado por el hecho que un desbalance pequeño en los voltajes de fase puede causar un desbalance desproporcionado más grande en las corrientes de fase [12], [13]. Bajo condiciones de desbalance, el sistema de energía incurrirá en más pérdidas y efectos térmicos, y será menos estable porque cuando las fases son equilibradas, el sistema está en una posición mejor para responder a las transferencias de la carga de emergencia [18]. El efecto del desbalance de voltaje puede también ser severo en equipos tales como motores de inducción, convertidores electrónicos de potencia y Accionamientos de velocidad variable (ASDs). Los métodos para determinar la cantidad de desbalance de voltaje se presentan en la sección siguiente, seguida por los efectos sobre los equipos.

### **2.2.1 Efectos del desbalance de voltaje en las máquinas.**

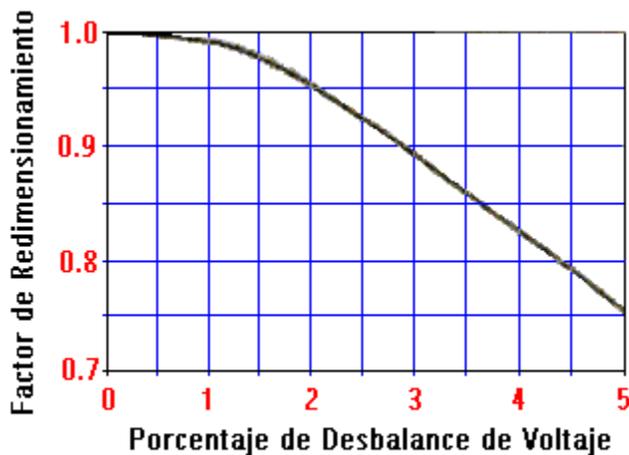
Los efectos nocivos de voltajes desbalanceados en los motores de inducción se han documentado desde los años 50 [13]. En 1954, Williams probó que un motor de inducción que funciona bajo condiciones de desbalance de voltaje experimentaría una reducción de su eficiencia. En 1959, Gafford et al. demostró que en la operación de los motores de inducción los efectos de calentamiento aumentaban con el desbalance del voltaje, que podrían conducir a la falla prematura del motor [25]. En 1963, Berndt y Schmitz presentaron un método para reducir la capacidad normal de los motores de inducción que funcionaban con los voltajes desbalanceados en los cuales se toma la corriente en la bobina del estator como la máxima permitida [9].

Los efectos nocivos de voltajes desbalanceados en los motores de inducción representan el hecho que el voltaje desbalanceado se analiza en dos componentes de oposición que se puedan describir usando el método de componentes simétricas. Con el uso de componentes simétricas, un sistema trifásico desbalanceado de voltajes o corrientes fasoriales pueden describirse usando tres sistemas balanceados de fasores llamados de secuencia positiva, negativa y cero. Sin embargo, en el caso de máquinas, las componentes de secuencia cero serán cero puesto que los motores son conectados típicamente en delta o sin aterrizar y no hay trayectoria por la cual fluyan las componentes de secuencia cero. Los sistemas totalmente balanceados contendrán solamente componentes de secuencia positiva de voltaje, corriente e impedancia.

Por lo tanto, el voltaje desbalanceado del motor contiene solo componentes de secuencia positivas y negativas, las cuales tienen secuencias de fase opuestas es decir, "abc" y "acb", respectivamente. El voltaje de secuencia positiva produce el esfuerzo de torsión positivo deseado, mientras que el voltaje de secuencia negativa produce un flujo en el entre hierro que rota en contra de la rotación del rotor, generando así un esfuerzo de torsión (que invierte) negativo indeseable. El resultado es una reducción neta en el esfuerzo de torsión y velocidad, y la posibilidad de pulsaciones de velocidad, esfuerzo de torsión y de ruido creciente del motor. Además el componente de secuencia negativa en los voltajes desbalanceados generan corrientes de secuencia negativas grandes debido a la impedancia de secuencia negativa baja, que aumenta las pérdidas y las temperaturas de la máquina.

A velocidades de funcionamiento normales, los voltajes desbalanceados hacen que las corrientes de línea sean desbalanceadas en el orden de 6 a 10 veces el desbalance del voltaje [22]. En general, el efecto neto del desbalance del voltaje es una reducción de la eficiencia y una disminución de la vida del motor.

Debido al exceso de calentamiento, el estándar MG 1-1993 de NEMA recomienda que los caballos de fuerza nominales del motor se deben multiplicar por un factor que reduce la capacidad normal, basado sobre el grado de desbalance del voltaje según lo demostrado en la figura 2.2.3, [22], [26]. La curva asume que el motor está funcionando ya en su carga nominal. Sin embargo, muchos motores no operan a la carga nominal y debido a esto no pueden manejar más desbalance de voltaje, puesto que el porcentaje de carga afecta significativamente los efectos de desbalance [27], [26].



Desbalance de voltaje	Redimensionamiento aproximado
1%	ninguno
2%	95%
3%	88%
4%	82%
5%	75%

Para evaluar motores mayores que 500 hp, Consulte al vendedor sobre el redimensionamiento.

**Figura 2.2.3**

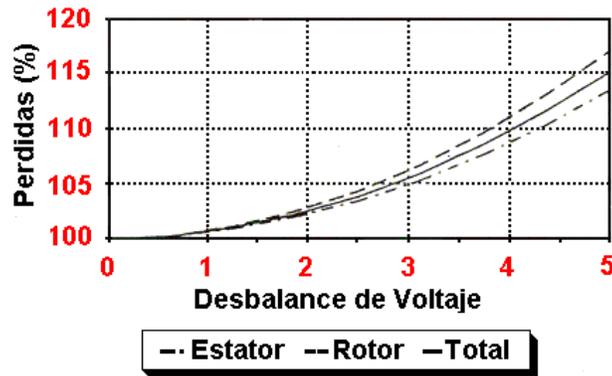
**Grafica y tabla de redimensionamiento para motores de inducción sobre desbalance de voltaje (del estándar NEMA MG1-1993: motores y generadores).**

De la figura 2.2.3, se puede ver que un desbalance de voltaje del 2% requiere alrededor de un motor de 5% más grande. Un desbalance del voltaje del 3% requiere alrededor de un motor de 12% más grande, o motores con un factor de servicio de 1,15.

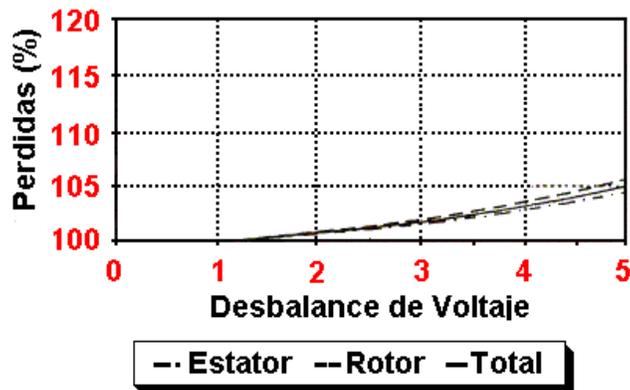
La manera en la cual los voltajes son desbalanceados tiene un efecto marcado en las pérdidas y es requerido un factor de redimensionamiento [28]. Hay varias condiciones posibles del desbalance de voltaje incluyendo: el desbalance monofásico de bajo voltaje, el desbalance bifásico de bajo voltaje, desbalance monofásico de sobre voltaje, desplazamiento monofásico desigual del ángulo, etc.

Para ilustrar el efecto de diversas condiciones del desbalance, Kersting y Phillips aplican dos métodos de voltaje desbalanceado a un motor de inducción de 25 hp a 240 V [28]. El primer método (el caso A) se lleva a cabo tomando en cuenta el promedio de las magnitudes del voltaje de línea  $|V_{bc}|$  constante a 240 V e incrementando  $|V_{ab}|$  en la misma proporción y  $|V_{ca}|$  se reduce para los desbalances arriba del 5%. En el caso B, el voltaje promedio se mantiene nuevamente constante en 240 V permitiendo que  $|V_{ab}|$  y  $|V_{ca}|$  incrementen, mientras que

$|V_{bc}|$  disminuye, otra vez para los desbalances arriba del 5%. Las figuras 2.2.4 y 2.2.5 exhiben el aumento total de los porcentajes en las pérdidas para el estator, el rotor y el total del motor para el caso A y B, respectivamente, [25]. En figura 2.2.4 (el caso A), el estator, el rotor y las pérdidas totales han aumentado a 114%, 117%, y 115%, respectivamente. En la figura 2.2.5 (el caso B), los aumentos son de 104%, 106%, y 105%, respectivamente.



**Figura 2.2.4**  
Perdidas para voltajes desbalanceados en el caso A, para el motor de inducción de 240 V y 25 Hp



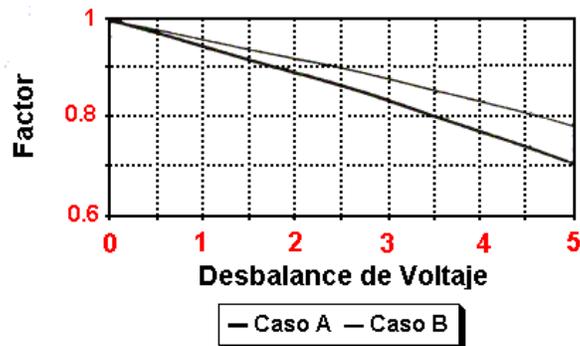
**Figura 2.2.5**  
Perdidas para voltajes desbalanceados en el caso B, para el motor de inducción de 240 V y 25 Hp

Las figuras 2.2.4 y 2.2.5 ilustran tres puntos [28]:

- 1) La manera en la cual los voltajes son desbalanceados tiene un efecto marcado en el incremento en pérdidas.

- 2) Mientras que los voltajes llegan a ser más desbalanceados, las pérdidas del rotor aumentan más rápido que las pérdidas del estator.
- 3) Con desbalance de alto voltaje, el circuito del estator y el rotor experimentan un aumento significativo de las pérdidas, que conducirán a calentamiento excesivo.

Para demostrar el efecto de las diferentes formas de desbalance sobre el redimensionamiento adecuado, fue estudiado el mismo motor de 25 hp, mientras se mantenía fija la corriente del estator al valor nominal según lo sugerido [9], mientras que los voltajes eran desbalanceados para los casos A y B. El factor de redimensionamiento para los dos casos se muestra en la figura 2.2.6, donde el factor de redimensionamiento del caso A para el desbalance de voltaje del 5% es 0,7018, mientras que para el caso B es 0,7773 [28]. Éstos comparan al valor de la NEMA de 0,75 en la figura 2.2.3. Así, no es suficiente saber simplemente el desbalance del voltaje en por ciento, sino que es igualmente importante saber como están desbalanceados [28].



**Figura 2.2.6.**

**Grafico de redimensionamiento para motores de inducción 240V 25 hp basado sobre el porcentaje de desbalance de voltaje utilizando el método de redimensionamiento presentado en [9].**

### **2.2.2 Efectos del desbalance de voltaje en convertidores y accionamientos de electrónica de potencia.**

Los convertidores de potencia electrónicos sirven como el interfaz para las cargas electrónicas grandes que se extienden de las fuentes de alimentación continuas trifásicas (UPSs) a los motores que funcionan a velocidades variables con el uso de ASDs. La mayoría de estos convertidores contienen un puente rectificador, según lo muestra la figura 2.2.7, y un condensador de acoplamiento cd para convertir el voltaje ca entrante a un voltaje cd de bajo rizado. En la figura 2.2.11, el inversor modulado por ancho de pulso (PWM) convierte al voltaje de nuevo a la variable trifásica ca. La magnitud y la frecuencia del inversor de PWM permite controlar la velocidad del motor.

Los convertidores trifásicos con el puente rectificador frontal dibujan corrientes sinusoidales en armónicos impares. Para los sistemas rectificadores alimentados por voltajes comerciales balanceados, los armónicos característicos de la corriente de entrada se determinan por:

$$h = kq \pm 1$$

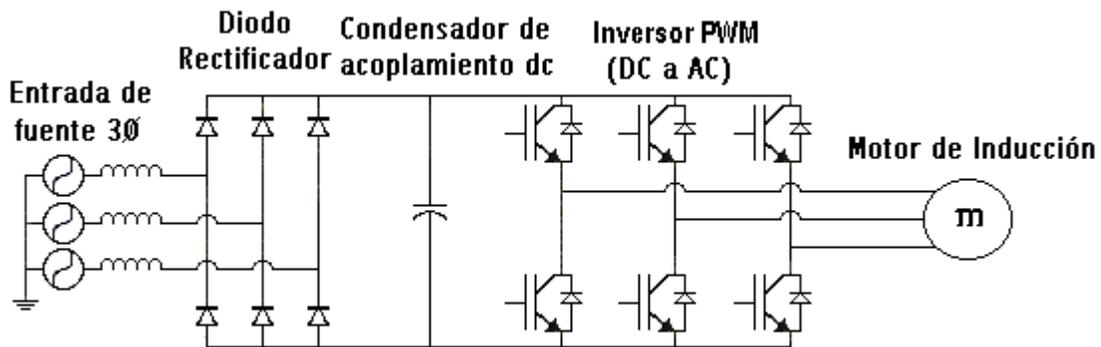
Donde

$h$  = orden armónico;

$k = 1, 2, 3, 4\dots$ ;

$q$  = número de pulsos del sistema rectificador.

El ASDs convencional como se muestra en la figura 2.2.7, tiene rectificadores de "seis-pulsos" ( $q = 6$ ), definido por el hecho de que el voltaje del bus cd consiste en porciones de la forma de onda ca de línea a línea y de repeticiones con una duración de  $60^\circ$ , por ejemplo, conteniendo seis pulsos en  $360^\circ$ .



**Figura 2.2.7.**  
**Sistema típico de accionamientos de velocidad variable (ASD)**

Por lo tanto las corrientes armónicas características presentes en la entrada del ASD estarán en  $h = 5^a$  (300 hertzios),  $7^a$  (420 hertzios),  $11^a$  y  $13^a$  etc., demostrado en la figura 2.2.8 para un ASD de 80 KVA a 460 V. Observe en la figura 2.2.8 la forma de onda característica de corriente de doble pulso dando por resultado una distorsión armónica total (THD) para la corriente de entrada del ASD de 79,4% [29].

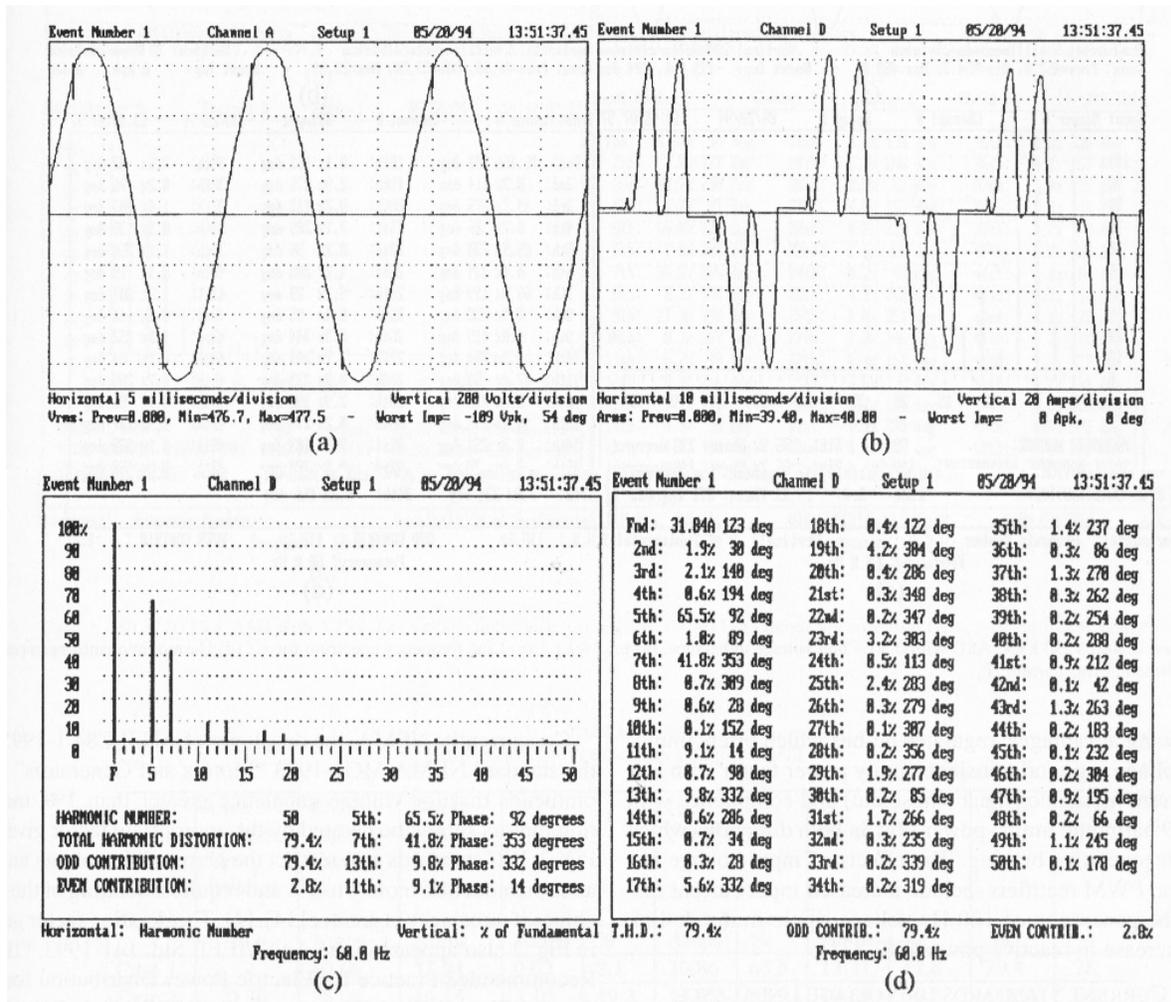
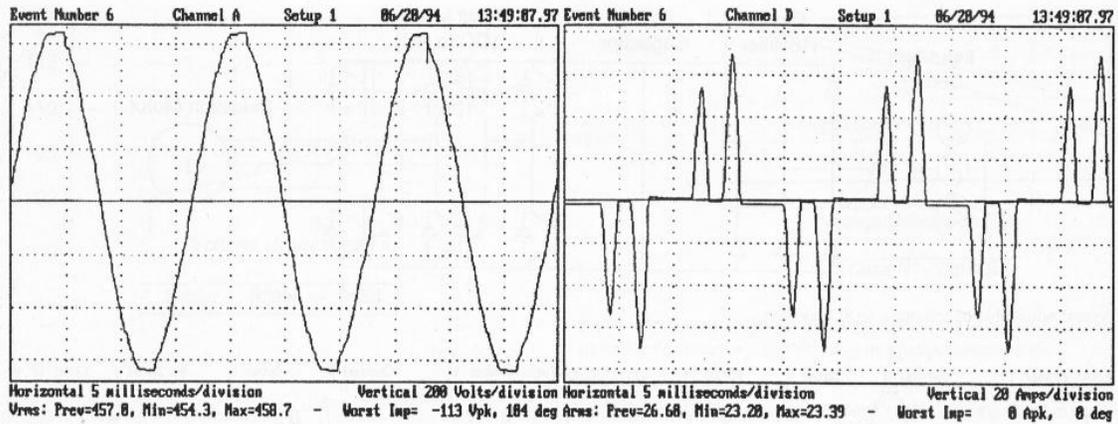


Figura 2.2.8.

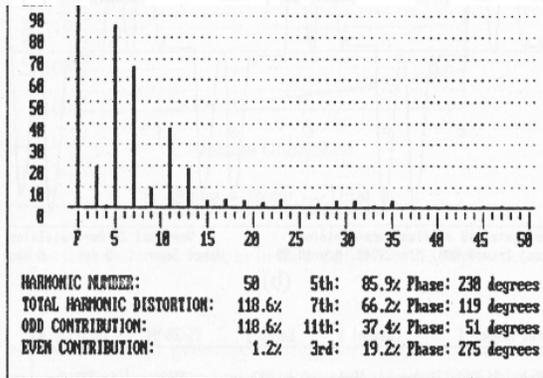
Caso 1: 460V, 80kVA ASD. (a)  $V_{ab}$ . (b)  $i_a$ . (c) espectro de línea de frecuencia para  $i_a$ . (d) suma de armónicas en porcentaje de la corriente rms fundamental  $I_a$ .

Bajo condiciones de desbalance de voltaje comercial, las corrientes armónicas de la entrada no se restringen a los armónicos característicos del convertidor, y los armónicos característicos y armónicos múltiplos de tres no característicos pueden aparecer, por ejemplo, en los 3<sup>a</sup> y 9<sup>a</sup> armónica, como se muestra en las figuras 2.2.9 y 2.2.10 con un desbalance de voltajes de 0.3% y 3.75%, respectivamente, en 460 V, 30 KVA ASD [29].



(a)

(b)



Horizontal: Harmonic Number Vertical: % of Fundamental  
 Frequency: 60.8 Hz

(c)

2nd: 0.3% 114 deg	19th: 2.9% 275 deg	36th: 0.2% 76 deg
3rd: 19.2% 275 deg	20th: 0.2% 112 deg	37th: 1.4% 383 deg
4th: 0.7% 26 deg	21st: 2.1% 289 deg	38th: 0.1% 136 deg
5th: 85.9% 230 deg	22nd: 0.2% 36 deg	39th: 1.1% 354 deg
6th: 0.4% 334 deg	23rd: 4.2% 208 deg	40th: 0.1% 79 deg
7th: 66.2% 119 deg	24th: 0.2% 23 deg	41st: 1.3% 303 deg
8th: 0.4% 332 deg	25th: 0.4% 65 deg	42nd: 0.1% 144 deg
9th: 9.0% 119 deg	26th: 0.3% 344 deg	43rd: 1.0% 252 deg
10th: 0.3% 264 deg	27th: 1.7% 204 deg	44th: 0.1% 04 deg
11th: 37.4% 51 deg	28th: 0.2% 329 deg	45th: 0.7% 208 deg
12th: 0.1% 275 deg	29th: 2.9% 192 deg	46th: 0.1% 86 deg
13th: 18.6% 295 deg	30th: 0.2% 270 deg	47th: 1.3% 287 deg
14th: 0.2% 251 deg	31st: 3.5% 183 deg	48th: 0.1% 328 deg
15th: 3.1% 30 deg	32nd: 0.1% 289 deg	49th: 0.5% 159 deg
16th: 0.2% 186 deg	33rd: 1.3% 110 deg	50th: 0.0% 318 deg
17th: 3.0% 294 deg	34th: 0.2% 166 deg	

T.H.D.: 118.6% ODD CONTRIB.: 118.6% EVEN CONTRIB.: 1.2%  
 Frequency: 60.8 Hz

(d)

Figura 2.2.9.

Caso 2: 460 V, 30kVA ASD con 0.30% de voltaje de línea desbalanceado. (a)  $V_{ab}$ . (b)  $i_a$ . (c) espectro de línea de frecuencia para  $i_a$ . (d) suma de armónicas en porcentaje de la corriente rms fundamental  $I_a$ .

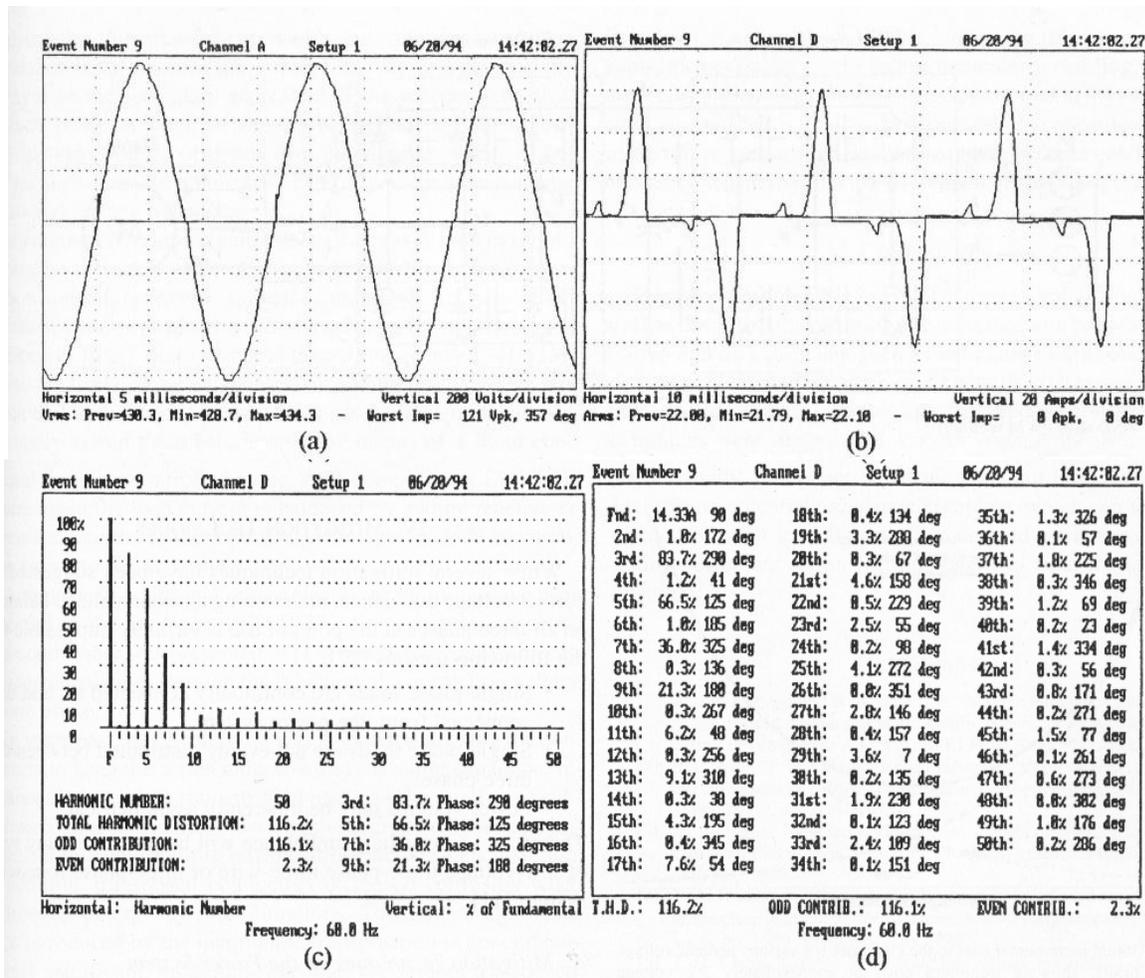


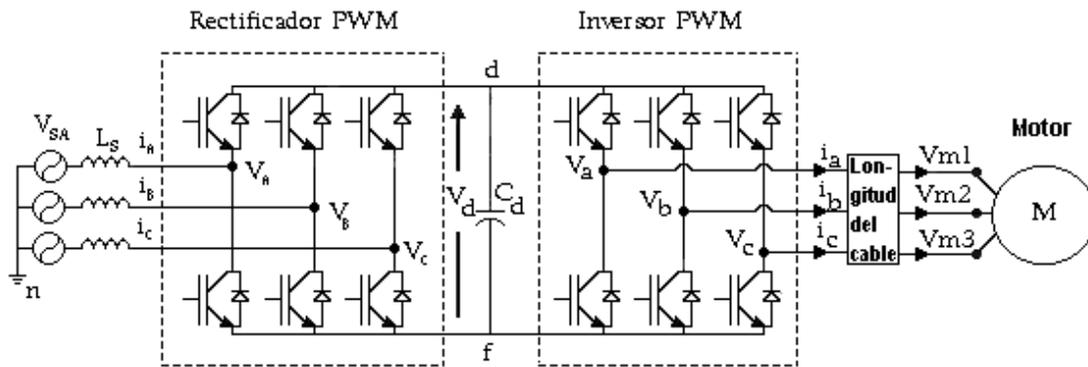
Figura 2.2.10

Caso 3: 460V, 30kVA ASD con 3.75% de voltaje de línea desbalanceado. (a)  $V_{ab}$ . (b)  $i_a$ . (c) espectro de línea de frecuencia para  $i_a$ . (d) suma de armónicas en porcentaje de la corriente rms fundamental  $I_a$ .

Tabla 2.2.2.  
Comparación de casos de desbalance de voltaje

	Desbalance de voltaje de línea	Corriente de entrada rms $I_s$	Corriente de línea rms $I_1$ a 60Hz	$I_3$ (% de $I_1$ )		$I_5$ (% de $I_1$ )		$I_7$ (% de $I_1$ )		THD	f.p. de entrada
				Amperios	%	Amperios	%	Amperios	%		
Caso 1	-	40.66	31.84	0.67	2.10	20.86	65.5	13.31	41.8	79.4	.78
Caso 2	0.30	25.04	16.15	3.10	19.2	13.87	85.9	10.69	66.2	118.6	.64
Caso 3	3.75	21.96	14.33	12.0	83.7	9.53	66.5	5.16	36.0	116.2	.65

Note como a medida que el desbalance del voltaje de entrada del ASD aumenta, la corriente de entrada se transforma significativamente más desbalanceada y cambia de una forma de onda de doble pulso a una forma de onda de un pulso (figura 2.2.10) debido a la conducción asimétrica de los diodos. El desbalance del voltaje puede causar corriente excesiva en una o dos fases, que pueden disparar los circuitos de protección de sobrecarga [30]. El incremento de la corriente puede también causar calentamiento excesivo de los diodos y disminuir la vida del condensador o requerir el uso de un condensador más grande. La tabla 2.2.2 da una comparación de los tres casos. Observe el aumento en los porcentajes del 3er armónico a partir de 2,1 % es de 19,2% a 83,7% cuando el desbalance del voltaje aumenta. El 3er armónico significativo puede aumentar los problemas de armónico y de resonancia en el sistema así como requerir valores de filtros más grandes.



**Figura 2.2.11**  
**Rectificador ASD con PWM.**

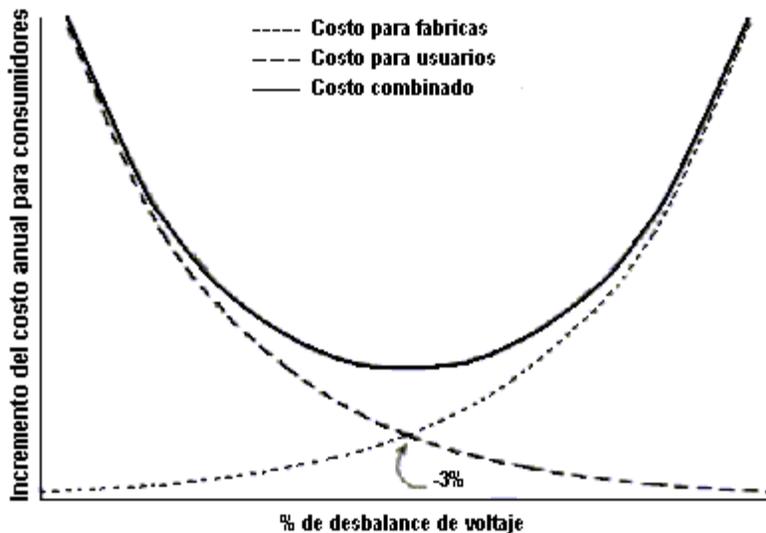
La figura 2.2.11 muestra un ASD con un rectificador activo PWM, el cual se está convirtiendo en una oferta más común entre fabricantes de ASD. Reemplazando el puente rectificador de diodos por un rectificador activo PWM se obtienen las siguientes ventajas: bus cd controlado que ofrece inmunidad a los *sags de voltaje* y los transientes; factor de potencia unitario con corrientes armónicas en la entrada baja (cerca de sinusoidal) y conforme con límites armónicos de IEEE 519; el flujo de potencia en ambas direcciones que permite un freno regenerador. Los efectos del desbalance de voltaje de entrada en rectificadores PWM incluyen el incremento de distorsión de corriente de la entrada, la generación de rizado de voltaje a 120 Hz en el acoplamiento cd y un aumento en la potencia reactiva [ 31]-[34].

### 2.3 Estándares actuales en desbalance de voltaje.

El norma C84.1-1995 del *American National Standards Institute (ANSI) "for Electric Power Systems and Equipment-Voltage Ratings (60 Hertz)"* fue desarrollada por la *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*. El estándar ANSI C84.1-1995 recomienda que los sistemas de suministro eléctrico deben ser diseñados y operados para limitar el desbalance máximo del voltaje al 3% cuando se hacen mediciones de la distribuidora eléctrica bajo condiciones sin carga [19]. La *International Electrotechnical Commission (IEC)* recomienda que el desbalance máximo del voltaje de los sistemas de suministro eléctrico sean limitados al 2% [30].

Al mismo tiempo, NEMA, quien desarrollo la norma ANSI C84.1-1995, también desarrollo la norma NEMA MG1-1993 "motores y generadores" la cual recomienda que para desbalances de voltaje mayores al 1% del voltaje, los motores de inducción deberían ser redimensionados por el factor apropiado dado en la figura 2.2.3. Los estándares IEC también restringen el desequilibrio permitido del voltaje en los motores de inducción a 1 % y requieren redimensionamiento de las máquinas si el desbalance es mayor [17], [7]. El gráfico del factor de redimensionamiento en la figura 2.2.3 también aparece en el estándar ANSI/IEEE 141-1993, "Práctica Recomendada IEEE para la Distribución de la Energía Eléctrica para las Plantas Industriales" (libro rojo), y el norma ANSI/IEEE 241-1990, "Práctica Recomendada IEEE para los Sistemas de Energía Eléctrica en Edificios Comerciales" (libro gris). El libro rojo y el libro gris indican que algunos equipos electrónicos, tal como computadoras, pueden experimentar problemas si el desbalance de voltaje es más que 2 o 2.5%. Indican también que cargas monofásicas generales, no deben ser conectadas con los circuitos trifásicos de bajo voltaje cuando se suministrando voltaje monofásico a equipo sensible al desbalance. En lugar de esto, se debe utilizar un circuito separado [35], [36].

La contradicción evidente en el estándar (ANSI) C84.1-1995 (que permite un desbalance de voltaje de 3% en sistemas de potencia) y el NEMA MG1-1993 (recomienda el redimensionamiento de motores en presencia de desbalance de voltaje mayor al 1 %) se pueden explicar por la racionalización siguiente.



**Figura 2.2.12.**

**Incremento del costo anual al consumidor para varios porcentajes de límites de voltaje desbalanceado, mostrando los costos mínimos aproximadamente 3 % del desbalance de voltaje.**

En el desarrollo de la recomendación ANSI C84.1 para el desbalance de voltaje, los estudios económicos que fueron conducidos indicaban lo siguiente [19]:

- 1) En última instancia, el cliente termina pagando por las ganancias relacionados con los costos requeridos para reducir el desbalance de voltaje, y en las fabricas se relacionó el costo requerido para ampliar el rango de operación del desbalance de voltaje de un motor,
- 2) Los costos de las empresas de servicios se incrementan y son máximos a medida que el desbalance de voltaje se acerca a cero y se reducen tanto como el incremento del desbalance se lo permite,
- 3) Los costos en las fabricas relacionados con el incremento de motores son los más bajos cuando el desbalance de voltaje es cero y aumentan rápidamente cuando el desbalance aumenta.

Cuando estos costos (excluyendo los costos energéticos relacionados con motores), son combinados, las curvas pueden ser desarrolladas según lo muestra la figura 2.2.12, que indican el costo del incremento anual al consumidor para varios límites de porcentajes de desbalance de voltaje. El rango óptimo del desbalance de voltaje ocurre cuando el costo del consumidor se reduce al mínimo, que se toma en cuenta en ANSI C84.1 y es aproximadamente 3% del desbalance de voltaje mostrado en la figura 2.2.12.

En un informe a la asociación eléctrica canadiense (CAE) sobre el desbalance de voltaje en sistemas de la distribución, *Bergeron* presenta otro comentario en la contradicción evidente en niveles apropiados de desbalance en sistemas de potencia y en las instalaciones comerciales e industriales [6]. Hasta los años 70, los ahorros de energía no eran considerados un factor de diseño significativo, como es ahora, y la ayuda basada en computadoras para diseñar aparatos de potencia no estaba disponible. Por lo tanto, diseños de equipos y motores antiguos tienen permitido niveles de perturbación mucho más altos de los que se pueden tolerar ahora. Los fabricantes de motor y usuarios están requiriendo un suministro de potencia por consiguiente con un nivel de desbalance de voltaje más bajo, qué les permitiría operar con la capacidad normal al mínimo, y usar los motores más pequeños posibles. Sin embargo, *Bergeron* indica que debido a la cantidad creciente de cargas monofásicas incluyendo el tren eléctrico y cargas de fuerza motriz, el desbalance de voltaje en los sistemas de distribución de potencia está aumentando realmente, por lo que las distribuidores de energía quisieran para que el equipo pudiera tolerar un desbalance de voltaje más alto [6].

#### **2.4 Técnicas de mitigación.**

Se han sugerido varias técnicas de mitigación para corregir desbalance de voltaje. Mantener un balance de voltaje exacto en las tres fases actualmente es virtualmente imposible por las razones siguientes [30]:

- Las cargas monofásicas están continuamente conectadas y desconectadas del sistema de potencia,
- Las cargas monofásicas no se distribuyen uniformemente entre las tres fases,
- Los sistemas de potencia pueden ser intrínsecamente asimétricos.

Por lo tanto, un cierto desbalance de voltaje estará presente en cualquier tipo de sistema de bajo voltaje de tres hilos trifásico o de cuatro hilos trifásico [14].

### 2.4.1 Técnicas de mitigación en el sistema de potencia.

Las cargas desbalanceadas son la causa principal de voltajes desbalanceados en los circuitos de distribución y se pueden tener grandes beneficios si se procura distribuir las cargas monofásicas igualmente a través de todas las fases del sistema trifásico [4]. Los sistemas de distribución eléctrica pueden ser balanceados cambiando la configuración del sistema a través de operaciones manuales y automáticas de conmutación del alimentador para transferir cargas entre los circuitos. Esta reconfiguración puede ser realizada para reducir pérdidas, y tiene la tendencia natural a balancear cargas entre los circuitos [18]. Varios algoritmos de reconfiguración se han desarrollado para optimizar las posiciones del interruptor del alimentador utilizando algoritmos de estimación de carga proporcionando información de carga para cada punto de tiempo bajo análisis [18]. Puesto que esto se realiza en una manera discreta, no puede balancearse dinámicamente la carga del sistema. Las impedancias desbalanceadas, incluyendo transformadores y sus conexiones, son a menudo el siguiente productor más grande de voltajes desbalanceados. Por lo tanto, la selección apropiada de los transformadores de distribución es un paso muy importante en la prevención del desbalance de voltaje, prestando atención particular al balance de los bancos de transformador en delta abierta y estrella abierta. Debe también observarse que los bancos delta abierta y estrella abierta pueden aumentar significativamente el desbalance de voltaje del sistema primario cuando convierte el voltaje de secuencia cero del sistema primario en el voltaje de secuencia negativa del sistema secundario [14]. Si la cantidad de desbalance tiende a variar con la carga del cliente, es una buena posibilidad que el transformador sea la causa de la condición de desbalance. Una forma para determinar la contribución del banco de transformadores al desbalance de voltaje es medir los voltajes en el primario y los voltajes en el secundario y calcular el porcentaje de desbalance en cada punto. Un banco de tres reguladores monofásicos puede también proporcionar una cierta corrección para los voltajes desbalanceados, pero los ajustes se deben controlar cuidadosamente para evitar causar desbalance adicional de voltaje. Además, las condiciones de sobrecarga en el sistema de potencia se deben corregir siempre cuanto antes por un número de razones de protección y de seguridad así como de compensación por desbalance. La compensación del desbalance se puede alcanzar por medio de filtros pasivos de energía que balancean la impedancia de la carga [37], [38], donde la corriente de la carga es balanceada agregando elementos reactivos en paralelo a la carga. Para las cargas variables, el desbalance de voltaje en los sistemas puede ser corregido por medio de un compensador de var estático controlado por tiristor conectado en paralelo [37]-[39], donde la corriente de carga es balanceada agregando elementos reactivos en paralelo a la carga. Las desventajas incluyen la inyección de armónicos en el sistema. Un número de soluciones adicionales de electrónica de potencia se han divulgado en la literatura [12][17][40]. Por ejemplo, un acondicionador activo de línea fue presentado en [17] que corrigen dinámicamente los desbalances de voltaje a través de la inyección de un voltaje de corrección en una fase. En años pasados, se prestó mucha atención a transponer los conductores para mantener la inductancia serie y la reactancia capacitiva paralela balanceada en líneas de transmisión. Mientras que el número de subestaciones conectadas creció con las líneas de transmisión, llegó a ser impráctico tener transposiciones múltiples entre cada estación. Además, los conductores transpuestos aumentaron la confusión al tratar situaciones de emergencia por fallas. Así, desde que el desbalance introducido por la transposición incompleta no es comparativamente significativo, las líneas de potencia modernas se transponen rara vez, a través de un intercambio

en las posiciones de los conductores que se pueden hacer en las estaciones de conmutación para balancear la inductancia de las fases más cercanas [41].

#### **2.4.2 Técnicas de mitigación ventajas para el usuario.**

Primero, una de las ventajas del usuario es, todo el equipo sobrecargado debe ser corregido. Además, los filtros pasivos de potencia y los compensadores de VAR estáticos conectados en paralelo, similares a los descritos en la sección 2.4.1 para la mitigación en sistemas de potencia, se pueden utilizar para la compensación del desbalance en las instalaciones del usuario [37]-[39].

La mitigación de los efectos nocivos del voltaje desbalanceado en ASDs se puede alcanzar a través del uso de los reactores de tamaño apropiado en la línea ca y los reactores de acoplamiento cd [42]. Los resultados de la prueba han demostrado que conectando la línea ca y los reactores de acoplamiento cd al ASD tienen el efecto más grande en el desbalance de corriente de fase, reduciéndolo más de la mitad. Se demostró que cualquier reactor puede atenuar adecuadamente la distorsión de corriente y para reducir la corriente de línea rms, y así reducir el riesgo de sobrecargar al ASD. Los reactores también mejorarán el funcionamiento del rectificador PWM en los ASDs en condiciones de voltaje desbalanceados. Además, las estrategias modificadas de control del rectificador PWM se ha propuesto para reducir el rizado del acoplamiento cd y para la distorsión de corriente de entrada causada por los voltajes desbalanceados [31]-[34]. Finalmente, a lo largo de las líneas de protección, el estudio de *Cummings* proporciona los métodos que emplean diversos contactores para proteger los motores de inducción contra los voltajes desbalanceados, donde los ajustes y los usos de contactores dependen de los caballos de fuerza del motor, de la carga, de la clase de aislamiento y del factor de servicio [43]. *Lerley* demostró [44] que los contactores de corriente de secuencia negativa son más confiables y eficaces porque los contactores que miden voltaje de secuencia negativa pueden carecer de la sensibilidad necesaria en algunas configuraciones del sistema y de la carga.

## 2.5 Referencias

- [1] Motors and Generators, ANSI/NEMA Standard MG1-1993.
- [2] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, 1991.
- [3] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, and H.W. Beaty, *Electrical Power System Quality*. New York: McGraw-Hill. 1996.
- [4] A. von Jouanne and B. B. Banerjee, "Voltage unbalance: Power quality issues, related standards and mitigation techniques," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, EPRI Final Rep., May 2000.
- [5] R. F. Woll, "Effect of unbalanced voltage on the operation of polyphase induction motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-11, no.1, pp. 38-42, Jan./Feb. 1975.
- [6] R. Bergeron, "Voltage unbalance on distribution systems—Phase I," Canadian Electrical Association, Montréal, Québec, Project no. 231 D 488, Jan. 1989.
- [7] T. A. Kneschke, "Control of utility system unbalance caused by single phase electric traction," *IEEE Trans. Industry Application*, vol. IA-21, no. 6, pp. 1559-1570, Nov./Dec. 1985.
- [8] T.-H. Chen, "Criteria to estimate the voltage unbalances due to high-speed railway demands," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1672-1678, Aug. 1994.
- [9] N. L. Schmitz and M. M. Berndt, "Derating polyphase induction motors operated with unbalanced line voltages," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, pp. 680-686, Feb. 1963.
- [10] J. W. Williams, "Operation of 3 phase induction motors on unbalanced voltages," *AIEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-73, pp. 125-133, Apr. 1954.
- [11] S. C. Seematter and E. F. Richards. "Computer analysis of 3-phase induction motor operation of rural open delta distribution systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-12, pp. 479-486, Sept./Oct. 1976.
- [12] E. Muljadi, R. Schiferl, and T. A. Lipo, "Induction machine phase balancing by unsymmetrical thyristor voltage control," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-21, no. 4, pp. 669-678, May/June 1985.
- [13] C.-Y. Lee, "Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 202-208, June 1999.
- [14] D. R. Smith, H. R. Braunstein, and J. D. Borst, "Voltage unbalance in 3-and 4-wire delta secondary systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, no.2,pp.733-741, Apr. 1988.
- [15] J. D. Kueck, D. A. Casada, and P. J. Otaduy, "A comparison of two energy efficient motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 13, no. 2,pp. 140-146, June 1998.
- [16] A. Wallace, A. von Jouanne, P. Andrews, C. Wohlgemuth, and G. Wainwright, "The effects of voltage and winding abnormalities on the measured performance of induction motors," in *IAS97 Conf. Proc.*, pp. 478-452,
- [17] V. B. Bhavaraju and P. N. Enjeti, "An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 287-292, Mar./Apr. 1996.
- [18] R. P. Broadwater, A. H. Khan, H. E. Shaalan, and R. E. Lee, "Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 294-300, Jan. 1993.

- [19] Electric Power Systems and Equipment-Voltage Ratings 160 Hertz), ANSI Standard Publication no. ANSI C84-1-1995,
- [20] D. S. Dorr, M. B. Hughes, T. M. Gruz, R E. Jurewicz, and J. L. Mc-Claine, "interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, no. 6, pp. 14B0-1487. Nov./Dic. 1997.
- [21] C- J. Melhorn and M. F. McGranaghan, "Interpretation and analysis of power quality measurements," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 31, no. 6, pp. 1363-1370. Nov./Dec. 1995.
- [22] Motors and Generators, NEMA Standards Publication no. MG 1-1993.
- [23] A, I. Maswood, G. Jóos, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsey, "Problems and solutions associated with the operation of phase-controlled rectifiers under unbalanced input voltage conditions," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 27 no. 4, pp. 765-772. July/Aug. 1991.
- [24] J. Reeve and P. C. S. Krishnayya, "Unusual current harmonics arising from high voltage DC transmission," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-87, no. 3, pp. 883-893, Mar. 1968.
- [25] Gaffofd, W. C. Duesterhoeft, and C. C. Mosher, "Heating of induction motors on unbalanced voltages," AIEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-78, pp. 282-297, June 1959.
- [26] EPRI Power Electronics Applications Center, "Matching utilization voltages to motor nameplates," Power quality testing network PQTN Application no. 12, 1997.
- [27] A. Wallace, A. R. von jouanne, E. J. Wiedenbrüg, and P. S. Andrews. "The measured effects of under-voltage, over-voltage and unbalanced voltage on the efficiency and power factor of induction motors over wide ranges of load," in PEVD Conf. Proc., 1997.
- [28] W. H. Kersting and W. H. Phillips, "Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, no. 2, pp. 415-420. Mar./Apr. 1997.
- [29] A. von Jouanne, J. G. Rangel, P. Enjeti, and W. Gray, "Harmonics generated by variable speed AC motor drives: Case studies," in PCIM Conf. Proc., 1994.
- [30] EPRI Power Electronics Applications Center, "Input performance of ASDs during supply voltage unbalance," Power quality testing network PQTN Brief no. 28, 1996.
- [31] P. N. Enjeti and S. A. Choudhury, "A new control strategy to improve the performance of a PWM AC lo DC converter under unbalanced operating conditions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 8, pp. 493-500, Oct. 1993.
- [32] H. S. Song and K. Nam, "Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions," IEEE Trans, Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 953-959, Oct. 1999.
- [33] J.-K. Kang, S.-K. Sul, and S.-D. Kwanak-Ku, "Control of unbalanced voltage PWM converter using instantaneous ripple power feedback," in IEEE Conference, 1997, pp. 503-508.
- [34] L. Moran, P. D. Ziogas, and G. Joos, "Design aspects of synchronous PWM rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 28, no. 6, pp. 1286-1293, Nov./Dec. 1986.
- [35] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, ANSI/IEEE Std. 141-1993, (Red Book).

- [36] IEEE Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings, ANSI/IEEE Std. 241-1990, (Gray Book).
- [37] A. Campos, G. Joos, P D. Ziogas, and J. F. Lindsay, "Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching functions," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 269-274, May 1994.
- [38] J.-H. Chen, W.-J. Lee, and M.-S. Chen, "Using a static var compensator to balance a distribution system," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 35, no. 2, pp. 298-304, Mar./Apr. 1999.
- [39] T.J.E. Miller, Reactive Power Control Electric Systems. New York Wiley, 1982.
- [40] D. Rendusara, A. von Jouanne, P. Enjeti, and D. A. Paice, "Design considerations for 12-pulse diode rectifier systems operating under voltage unbalance and pre-existing voltage distortion with some corrective measures," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1293-1303, Nov./Dic. 1996.
- [41] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, power System Analysis: McGraw-Hill. Inc. 1994.
- [42] EPRI Power Electronics Applications Center, "Input performance of an ASD with AC and DC reactors during supply voltage unbalance," Power quality testing network PQTN Brief no. 29, 1996.
- [43] P. B. Cummins, J. R. Dunki-Jacobs, and R. H Kerr, "Protection of induction motors against unbalanced voltage operation," IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-21, no. 4, pp. 778-792. May/june 1985.
- [44] P. Lerley, "Applying unbalanced detection relays with motor loads," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 35, no. 2, pp. 689-693, May/June 1999.
- [45] M. E. Galey, "Benefits of performing unbalanced voltage calculations," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 24, no. 1, pp. 15-24, Jan./Feb. 1988.
- [46] L. G- Grainger and R- C. Spencer, "Residual harmonics in voltage unbalance power systems," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, no. 5, pp. 1398-1405, Sept/Oct. 1994.
- [47] Y.-J. Wang and L. Pierrat, "Probabilistic modeling of current harmonics produced by an AC/DC convener under voltage unbalance," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 2060-2065, Oct. 1993.

# Capítulo 3

## Armonicas

### 3 ARMONICAS

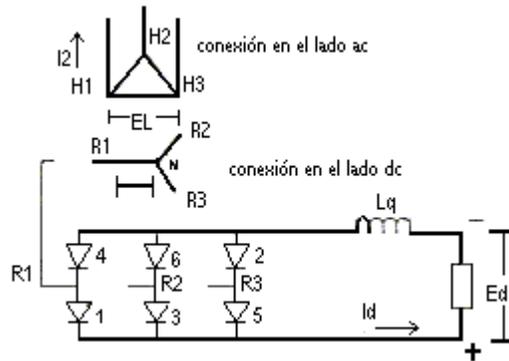
#### 3.1 Generación de armónicos.

##### 3.1.1 Convertidores.

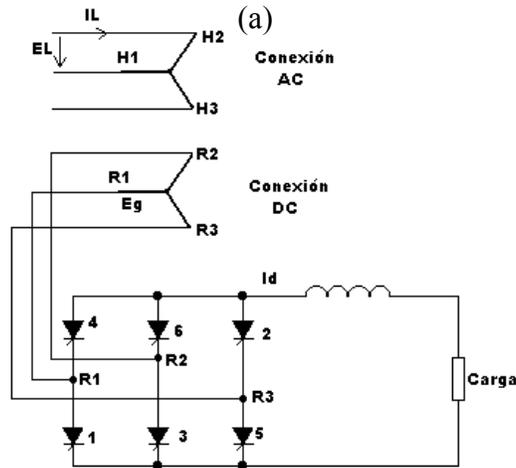
En este contexto "ideal" simplifica... ignorar los efectos de la inductancia en el circuito ca.

##### 3.1.1.1 Onda de voltaje ideal.

La figura 3.1.1 muestra una fuente trifásica que alimenta un puente rectificador. Se asume sin carga, la línea es conectada a la carga cd dando la forma de onda de voltaje mostrada en la figura 3.1.2.

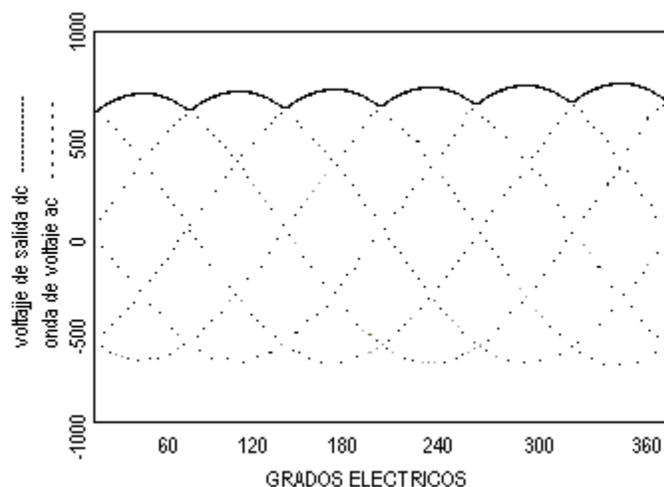


$$i = \sqrt{2} I_1 \left[ \sin wt - \frac{\sin 5wt}{5} - \frac{\sin 7wt}{7} + \frac{\sin 11wt}{11} + \frac{\sin 13wt}{13} + \dots + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \frac{\sin nwt}{n} + \dots \right]$$

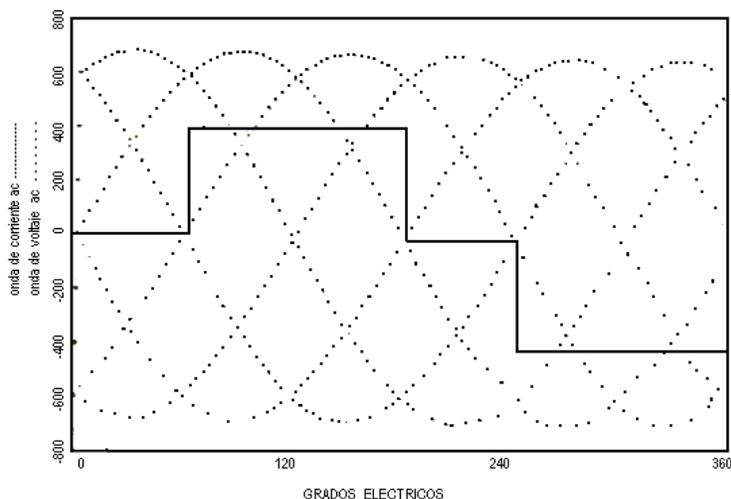


$$i = \sqrt{2} I_1 \left[ \sin wt - \frac{\sin 5wt}{5} - \frac{\sin 7wt}{7} + \frac{\sin 11wt}{11} + \frac{\sin 13wt}{13} + \dots + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \frac{\sin nwt}{n} + \dots \right]$$

**Figura 3.1.1.**  
**Circuito rectificador de puente trifásico (a) ANSI 23, (b) ANSI 24**



**Figura 3.1.2**  
**Forma de onda ideal a la salida del rectificador**



**Figura 3.1.3**  
**Forma de onda ideal de la ca a la entrada del rectificador**

### 3.1.1.2 Forma de onda ideal de la corriente.

La figura 3.1.3 muestra la forma de onda ideal de corriente de entrada para un puente rectificador. Su forma está basada en la asunción de que la corriente  $i_d$  no tiene rizado (carga inductiva), que esa corriente de  $i_d$  se transfiere de una fase a otra, en el instante en que el voltaje en la fase entrante excede el voltaje en la fase saliente. La fórmula para los componentes armónicos de la onda de corriente  $i_a$  es:

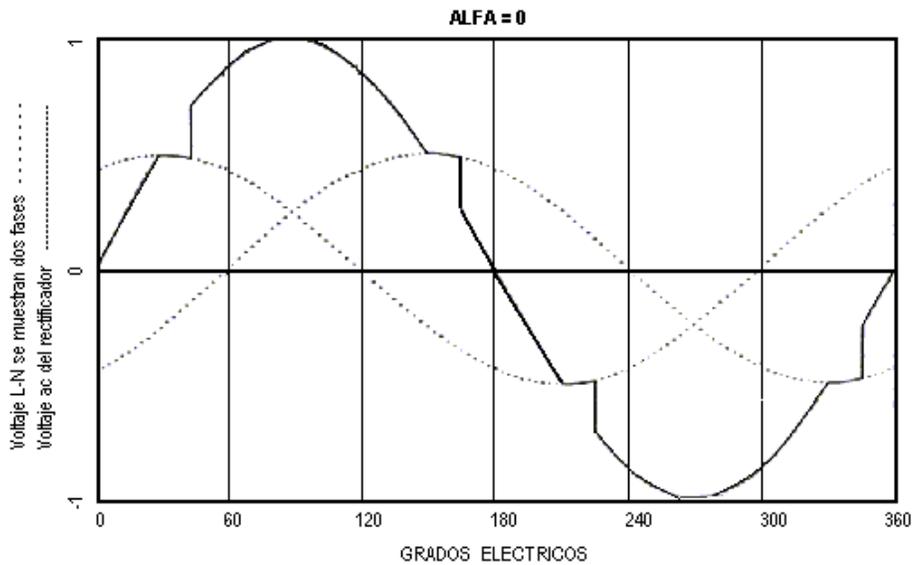
$$h = k \cdot q \pm 1 \quad (3.1)$$

$$I_h = 1/h \quad (3.2)$$

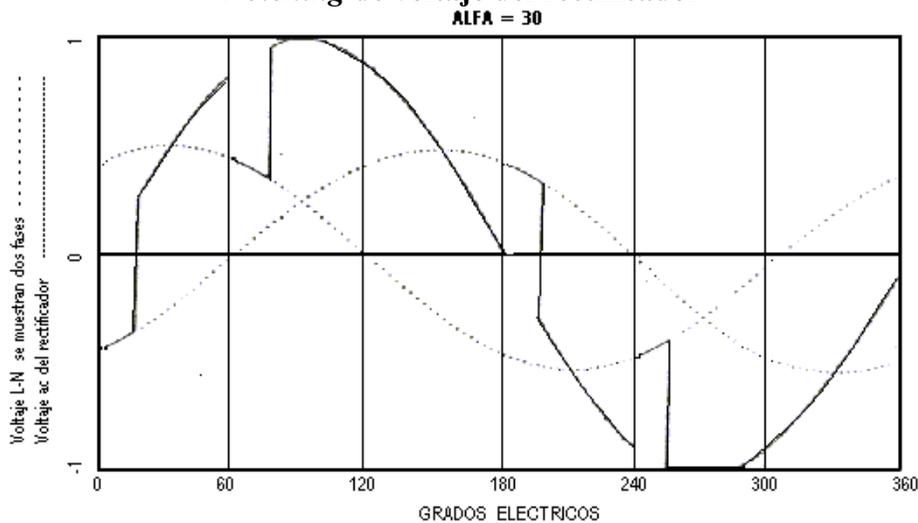
Donde:

$h$  es el orden armónico

k es cualquier entero positivo  
q es el número del pulso del circuito del rectificador  
 $I_h$  es la amplitud de la corriente armónica de orden h



**Figura 3.1.4**  
*Notching* de voltaje del rectificador



**Figura 3.1.5**  
*Notching* de voltaje del rectificador

### 3.1.1.3 *Notching*<sup>1</sup> de Voltaje.

El notching de voltaje ca (figuras 3.1.4, 3.1.5) es causado por la acción de conmutación del rectificador. La forma de onda es un resultado de este *notching*. Tradicionalmente la forma de onda de corriente se usa como la base para el análisis armónico, y el voltaje de *notching* se calcula de las caídas  $I \cdot Z$  de la corriente armónica. La profundidad del *notching* en puntos

<sup>1</sup> *Notching*: Corte de voltaje según el Multilingus Dictionary of Electricity, Electronic and Telecommunication de la IEC [h]

cercanos a la fuente depende más del alimentador de potencia proporcional a la impedancia del sistema a ese punto.

$$\mu = \alpha - \cos^{-1}[\cos \alpha - (X_s + X_t)] \quad (3.1.3)$$

$$\cos \mu = 1 - \frac{2E_x}{E_{do}} \quad (3.1.4)$$

Donde :

$\alpha$  = Angulo de retardo

$\mu$  = Angulo de traslape

$X_s$  = reactancia del sistema, en la base del convertidor

$X_t$  = reactancia del transformador del convertidor, sobre la base del convertidor

#### 3.1.1.4 Multiplicación de fase.

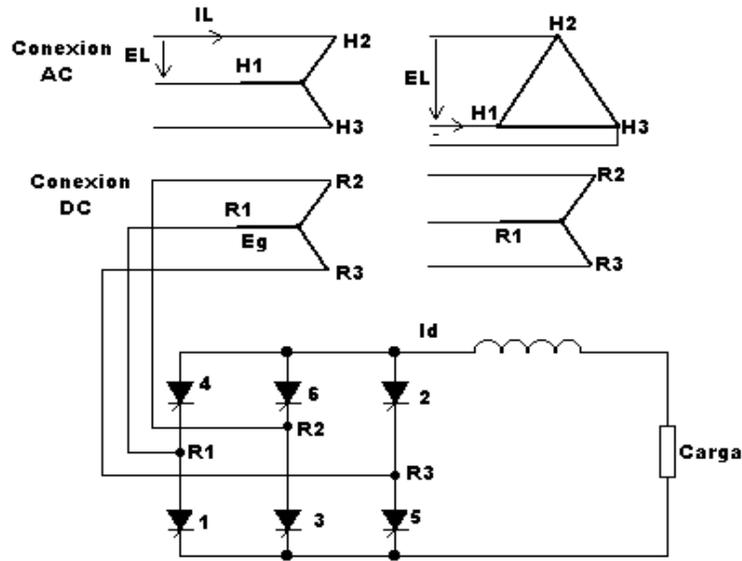
Los armónicos se pueden reducir por medio de la multiplicación de fases. Si  $m$  secciones rectificadoras de seis pulsos en el rectificador cumplen las siguientes características:

- Tiene las mismas relaciones de transformación,
- Tiene transformadores con impedancias idénticas,
- Están desfasados  $60/m$  grados entre ellos,
- Se controla exactamente con el mismo ángulo de retardo,
- Comparten igualmente la corriente de carga  $cd$ ,

Entonces las únicas armónicas presentes serán del orden,  $kq \pm 1$ , las armónicas características.  $6/m$  es denominado el número de pulsos y se simboliza por 'q' [7].

Ninguna de las dos secciones del rectificador es idéntica en todo lo tratado, por consiguiente en la práctica los armónicos no característicos siempre estarán presentes al grado que los requisitos anteriores no se reúnen.

Por ejemplo, dos fases de secciones de rectificador desfasadas por 30 grados producen 12 pulsos con el armónico mínimo en  $11^a$ , mientras que tres fases rectificadoras desfasadas a  $20^\circ$  resultando en 18 pulsos con el armónico más bajo en  $17^a$ ; y 4 fases del rectificador desfasadas  $15^\circ$  el resultado es 24 pulsos con el armónico mínimo en  $23^a$ . La norma ANSI C34.2 1968. "Recommended Practices and Requirements for Semiconductor Power Rectifiers" [1], nos dan detalles y fórmulas para muchos arreglos de circuitos que son útiles para comunicaciones sobre los circuitos del rectificador.



**Figura 3.1.6.**  
**Circuito para suprimir la quinta armónica.**

### 3.1.2 Hornos de arco.

Los armónicos producidos por hornos de arco eléctricos usados para la producción de acero son imprevisibles debido a la variación ciclo por ciclo del arco, particularmente al entrar el nuevo trozo de acero. La corriente del arco es no periódica, y el análisis revela un espectro continuo de frecuencias [Tanto de ordenes enteros como no enteros]. Sin embargo, las medidas armónicas han mostrado que las frecuencias armónicas de orden entero, particularmente de bajo orden empezando con la 2ª y finalizando con la 7ª, predominan sobre los no enteros, y la amplitud disminuye con el orden. Al aumentar la cantidad de metal fundido, el arco se vuelve más estable dando lugar a corrientes más firmes con mucho menos distorsión y menos actividad armónica. La corriente es simétrica alrededor del eje cero que elimina los órdenes armónicos y armónicos no enteros.

La tabla 3.1.1 muestra el contenido típico armónico de la corriente del horno de arco en dos fases del ciclo de la fusión en un horno de arco típico para la producción de acero. Debe darse énfasis a que otros hornos exhibirán modelos algo diferentes de corriente armónica pero estos valores pueden ser útiles en estudios armónicos si los datos más específicos para un horno particular no están disponibles.

**Tabla 3.1.1**  
**Contenido armónico de la corriente del horno de arco en el segundo ciclo de fundición**

CONDICION DEL HORNO	% DE LA CORRIENTE ARMONICA FUNDAMENTAL				
	ORDEN DE ARMONICOS				
	2	3	4	5	7
FUSION INICIAL (ARCO ACTIVO)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
REFINADO (ARCO ESTABLE)		2		2.1	

### 3.1.3 Compensador de var estático.

El Reactor Controlado por Tiristor (TCR) se ha usado extensivamente como un compensador de la desviación estática para los hornos de arco en sistemas de distribución eléctricos y otras aplicaciones, para mantener el nivel de voltaje, reducir el *flicker* de voltaje (por ejemplo. Hornos de arco:), mejorar el factor de potencia, el equilibrio de la fase y mejorar la estabilidad del sistema de potencia.

La corriente del reactor que contiene sólo un pequeño componente en fase debido a las pérdidas de potencia, el reactor que solo contiene corriente en fase está retrazado cerca de 90 grados. La corriente total de conducción es sinusoidal, pero el retardo del tiristor reduce la magnitud de corriente, y altera la forma de la onda. Las corrientes armónicas producidas por conducción parcial pueden ser todas de orden impar si el ángulo de atraso es equilibrado para ambos tiristores en un par.

El valor rms de la componente armónica es dado por la ecuación 3.1.5:

$$I_h = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X} \left[ \frac{\sin(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\sin(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos\alpha \frac{\sinh\alpha}{h} \right] \quad (3.1.5)$$

Donde:

$h = 3, 5, 7$

$V =$  el voltaje fundamental de línea a línea.

$X =$  reactancia inductiva total de reactores en cada fase

$\alpha =$  el ángulo de avance

La tabla 3.1.2 muestra las amplitudes máximas de los armónicos hasta el orden 25<sup>a</sup>. Puede notarse que los máximos no ocurren al mismo ángulo de retardo. Asumiendo condiciones balanceadas, los valores que se expresan en porcentaje de la amplitud de la fundamental en plena conducción, son las mismas para las fases y las corrientes de la línea. Los valores en paréntesis son *triples*<sup>2</sup> que estarán presentes en las corrientes de fase pero no estarán en las corrientes de línea si las condiciones son balanceadas. Sin embargo, en una aplicación de horno

<sup>2</sup> Triples: terceras armónicas o múltiplos de terceras armónicas

de arco típico donde las condiciones desbalanceadas prevalecen durante los periodos del arco inestables, aparecerán algunos múltiplos de terceras armónicas en las corrientes de la línea. Donde las corrientes de fase están desbalanceadas, los armónicos de las fases individuales aparecerán en las corrientes de línea como sumas armónicas fasoriales en su propio dominio armónico.

**Tabla 3.1.2**  
**Amplitudes máximas de corrientes armónicas en el TCR**

ORDEN DE ARMONICA PRESENTE		ORDEN DE ARMONICA PRESENTE	
1	100	3	(13.78)
5	5.05	7	2.59
9	(1.57)	11	1.05
13	0.75	15	(0.57)
17	0.44	19	0.35
21	(0.29)	23	0.24
25	0.2		

Nota: Esos armónicos en () son *múltiplos de terceras armónicas*.

### 3.1.4 Inversores para la generación dispersa.

La aparición de alternativas de fuentes de energía renovables, ha dado como resultado el uso de variadas topologías como acondicionadores de potencia o inversores para operaciones de conexión con la distribuidora. Los inversores están disponibles como monofásicos y trifásicos y sus salidas pueden ser sinusoidales con el factor de potencia cerca de la unidad o pueden contener varias armónicas características y no características, y factores de potencia que pueden causar calidad de potencia inaceptable, en la red de distribución eléctrica o pueden interferir con sus controles o reles.

Estos inversores pueden actuar como fuentes de corriente unidos a la distribución eléctrica o como fuentes de voltaje en la distribución eléctrica a través de una serie de impedancias, normalmente un inductor, para limitar la corriente entre el inversor y la red de distribución eléctrica.

Esta sección discutirá varias topologías de inversores y los armónicos asociados con cada una. Los tipos de inversores incluirán (1) el conmutado de la línea, (2) el modulado por ancho de pulso (auto conmutación PWM), (3) con enlace conmutado de alta frecuencia, y (4) amplificador de pulsos programados auto-conmutados.

#### **3.1.4.1 Inversores monofásicos.**

Los inversores monofásicos para la generación dispersa generalmente están dimensionados para menos de 10 kW y típicamente no causarían ningún problema para la distribuidora en pequeños números. Sin embargo, su uso aumenta y los inversores grandes unidos al mismo alimentador pueden causar problemas si los armónicos de los inversores son excesivos.

#### **3.1.4.2 Inversores trifásicos.**

Los inversores trifásicos para generación dispersa típicamente están dimensionados entre 10kW y 1MW y es más probable por lo menos en el corto plazo, que causen formas de onda inaceptables para la distribuidora si las formas de onda a la salida de los inversores contienen porcentajes altos de armónicas. Al igual que los inversores monofásicos, el trifásico puede ser de línea auto conmutada o la misma topología auto conmutada (algunas veces llamada forzada). Al igual que el inversor monofásico, las armónicas a la salida dependen de muchas variables. El nivel de voltaje de funcionamiento en cd para estos inversores varía sobre un amplio rango, para las fuentes de energía renovables. Estas variaciones dependen del tiempo, del día, temperatura, algoritmos de rastreo, envejecimiento de colectores y otros factores incontrolables.

Adicionalmente, el servicio eléctrico en ca puede tener efectos indeseables en el rendimiento del inversor. Variables como armónicas de distribución, voltajes de línea desbalanceados, separación de fases desbalanceadas, niveles altos y bajos de voltajes ca, y las impedancias de las líneas, son muchas variables que afectan el rendimiento armónico del inversor.

#### **3.1.5 Control de fase electrónico.**

El control de potencia en la fase de una carga con tiristor produce corrientes armónicas. El TCR discutido en la sección 3.1.3 es simplemente un caso especial de control electrónico donde el factor de potencia es esencialmente cero. Las cargas de calefacción, que tienen casi 100% del factor de potencia de desplazamiento, son controladas a veces por control de fase de tiristores. La forma de la onda será diferente al caso de 0% de factor de potencia, pero todavía se producen armónicos solo de orden impar, aunque con magnitudes diferentes.

Excepto para aplicaciones con TCR, las cargas no son ni inductancia pura ni resistencia pura. Para el caso general las cargas con factor de potencia diferente a 0 ó 100%, las magnitudes armónicas máximas están entre los valores de estos casos. La referencia [B23] tiene ecuaciones para el caso general que pueden usarse para calcular magnitudes de corrientes armónicas.

#### **3.1.6 Ciclo convertidores armónicos.**

La expresión para la corriente armónica del ciclo convertidor es extremadamente compleja. Varían como una función de la relación de frecuencia del ciclo convertidor.

La ecuación (3.1.6) muestra las frecuencias que están presentes. El primer término en la ecuación representa componentes del convertidor de seis pulsos y el segundo término denota el ancho de banda característico en frecuencia del ciclo convertidor.

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_o \quad (3.1.6)$$

Donde:

$f_h$  Es la frecuencia armónica impuesta en el sistema de ca.

$k$  y  $n$  son enteros

$f_o$  es la frecuencia a la salida del ciclo convertidor

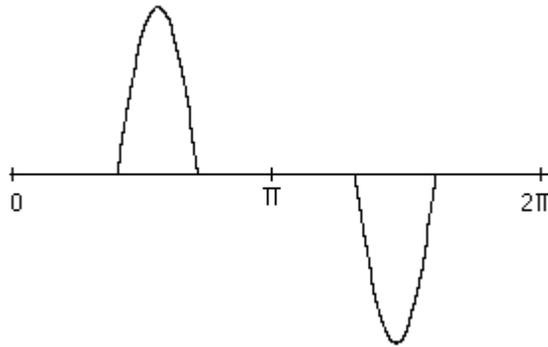
### 3.1.7 Alimentadores de potencia de modo conmutado (SMPS<sup>3</sup>).

Los equipos electrónicos más recientes usan un dispositivo de control del alimentador para proporcionar el voltaje al equipo. Éste es un alimentador de potencia barato que no es afectado por cambios de voltaje menores en el sistema de potencia. Este alimenta un condensador que proporciona el voltaje a la circuitería electrónica. Puesto que la carga vista desde el sistema de potencia es un condensador, la corriente del alimentador de potencia es discontinua. Es decir, que la corriente fluye solamente durante una porción del medio-ciclo. La figura 3.1.7 muestra la forma de este tipo de alimentador de potencia. El espectro de la corriente armónica de la onda se muestra en la tabla 3.1.3.

**Tabla 3.1.3**  
**Espectro de corriente de un SMPS típico.**

ARMONICO	MAGNITUD	ARMONICO	MAGNITUD
1	1	9	0.157
3	0.81	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.37	15	0.079

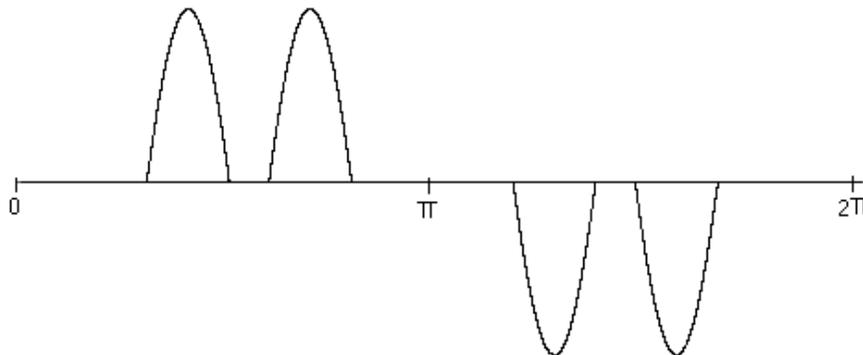
<sup>3</sup> SMPS: Switched Mode Power Supplies



**Figura 3.1.7**  
**Onda de corriente de un SMPS.**

### 3.1.8 Accionamiento por ancho de pulso (PWM).

Este accionamiento se diferencia de la mayoría los circuitos de convertidores de potencia estáticos por el hecho de que tiene un rectificador de diodo que le da un factor de potencia de desplazamiento elevado, pero tiene un condensador grande en el enlace cd que regula el voltaje en esta conexión. Como resultado, a cargas leves, (a 30 - 50%) la corriente sólo fluye cuando la salida del rectificador de voltaje de diodo está más allá del condensador. Para cargas leves la corriente en el circuito de ca es discontinua. La figura 3.1.8 muestra esta forma de onda, la cual es similar al SMPS exceptuando que el primero es un circuito trifásico rico en corrientes de quinto armónico. A medida que la carga en el dispositivo aumenta, la corriente es continua. El punto donde la corriente es discontinua es determinado por el tamaño de la inductancia de enlace cd.



**Figura 3.1.8**  
**Onda de corriente de un alimentador PWM de 6-pulsos bajo condiciones de carga ligera (corriente discontinua)**

## **3.2 Respuesta características del sistema.**

### **3.2.1 Generalidades.**

El efecto de una o más fuentes armónicas en un sistema de potencia dependerá principalmente de las respuestas características en frecuencia de los sistemas. Generalmente pueden representarse los dispositivos no-lineales descritos en la Sección 3.3.4 como fuentes de corrientes de armónicas. Por consiguiente, las características de la distorsión de voltaje armónica en el sistema de potencia dependerán de la impedancia vs. frecuencia vista por estas fuentes de corriente.

La respuesta característica de frecuencia del sistema es afectada por varios factores. Estos factores deben ser considerados al realizar un análisis para un sistema específico.

#### **3.2.1.1 Capacidad de corto circuito del sistema.**

La capacidad de corto circuito del sistema es una indicación de la impedancia del sistema a la frecuencia fundamental en un punto del sistema. Para los alimentadores inductivos simples, ésta es también una medida de la impedancia del sistema cuando la frecuencia armónica es multiplicada por el orden armónico. Sistemas más robustos (capacidades del corto circuito más altas) tienen menor distorsión de voltaje para el mismo tamaño de la fuente de corriente armónica que los sistemas débiles (capacidades del corto circuito menores).

#### **3.2.1.2 Bancos de condensadores y cables aislados.**

Los bancos de condensadores usados para el control de voltaje y para mejorar el factor de potencia y los cables aislados son los componentes principales que afectan la característica de respuesta en frecuencia del sistema. La conexión de condensadores puede causar condiciones de resonancia (tanto serie como paralelo) que puede amplificar los niveles armónicos. Los efectos de las condiciones de resonancia se discuten en la Sección 3.2.2 más adelante.

Los bancos de condensadores son usados como una fuente de voltaje para la conmutación de algunos convertidores estáticos de potencia. Ellos pueden ser considerados en paralelo con el sistema cuando se calcula la reactancia de conmutación, y así incrementar el  $di/dt$  de la conmutación.

La capacitancia de carga de línea de las líneas de transmisión y de cables aislados está también en paralelo con la inductancia del sistema. Por tanto, son similares a los condensadores paralelos ya que afectan la característica de respuesta en frecuencia del sistema. Usualmente, los bancos de condensadores son los dominantes en sistemas industriales y distribución aérea.

#### **3.2.1.3 Características de las cargas.**

La carga del sistema tiene dos efectos importantes sobre las características de respuesta en frecuencia del sistema.

1. La porción resistiva de la carga provee amortiguación que afecta la impedancia del sistema cerca de las frecuencias de resonancia. La carga resistiva reduce la

magnificación y amplificación de los niveles armónicos cerca de las frecuencias de resonancia paralela.

2. Los motores y otras cargas dinámicas que contribuyen a la capacidad de corto circuito del sistema pueden desplazar las frecuencias a las cuales ocurre la resonancia. Estas cargas aparecen en paralelo a las inductancias de corto circuito del sistema cuando se calculan las frecuencias de resonancia. Los motores no proveen amortiguación significativa de los picos resonantes.

El efecto de la carga del sistema se discute con mayor detalle en la Sección 3.2.3.

#### **3.2.1.4 Condiciones de sistemas balanceados vrs desbalanceados.**

Cuando las condiciones del sistema (robustez de la fuente, bancos de condensadores, carga, característica de línea, fuentes armónicas, por ejemplo sistemas industriales) son completamente balanceados, entonces se pueden emplear modelos de secuencia positiva para evaluar las características de respuesta en frecuencia del sistema. Bajo estas condiciones balanceadas, las corrientes armónicas tendrán características de secuencia (Ver tabla 3.3.1)

Cuando las condiciones del sistema no son completamente balanceadas, (por ejemplo sistemas de distribución y sistemas de transmisión), entonces debería ser aplicado el análisis de las componentes simétricas. Estas condiciones incluirían fuentes armónicas desbalanceadas en el sistema. Por ejemplo fuentes monofásicas, banco de condensadores monofásicos, o carga del sistema desbalanceada. En algunos casos, aún el desbalance introducido por líneas de transmisión no transpuestas pueden ser importantes. En todos estos casos, es importante usar una representación de sistema trifásico para el análisis. En estos sistemas, cada armónico tiene sus propias componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

*Nota: Se requiere una representación de sistema trifásico para estudiar las respuestas armónicas cuando pueden ocurrir cargas e impedancias desbalanceadas.*

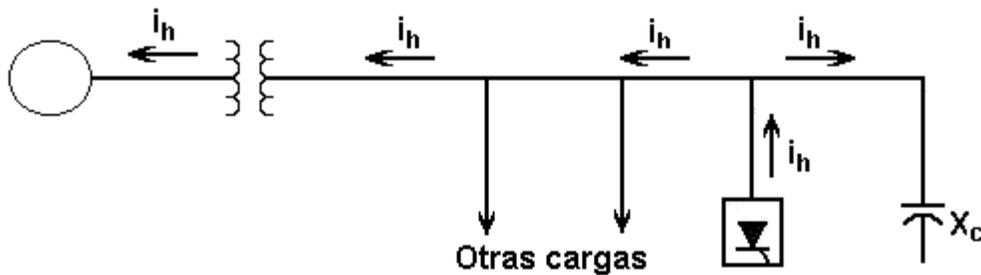
#### **3.2.2 Condiciones de resonancia.**

Las condiciones de resonancias del sistema son el factor más importante que afecta los niveles armónicos del sistema. La resonancia paralela es una impedancia elevada al flujo de la corriente armónica, mientras la resonancia serie es una impedancia baja al flujo de la corriente armónica. Cuando las condiciones de resonancia no son un problema, el sistema tiene la capacidad para absorber cantidades importantes de corrientes armónicas. Es solamente cuando estas corrientes ven impedancias elevadas debido a resonancia paralela que puede ocurrir distorsión de voltaje y amplificación de corriente significativa. Por lo tanto, es importante ser capaz de analizar las características de respuesta en frecuencia del sistema y evitar problemas de resonancia en este.

##### **3.2.2.1 Flujo normal de corrientes armónicas.**

Las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no-lineales (fuentes armónicas) hacia la impedancia más baja, usualmente la de la fuente de la distribuidora (figura 3.2.1). La

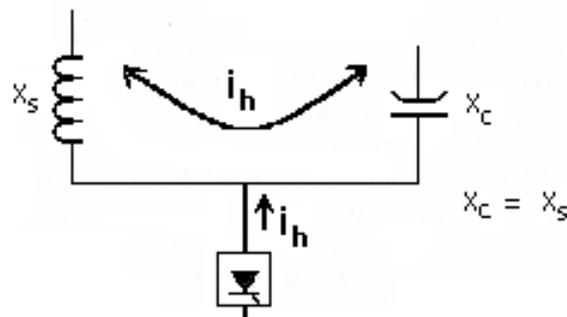
impedancia de la fuente es mucho menor que las trayectorias paralelas ofrecidas por las cargas. Sin embargo, la corriente armónica se divide dependiendo de las relaciones de impedancia. Las armónicas de orden elevado fluirán hacia los condensadores que son una baja impedancia para las altas frecuencias.



**Figura 3.2.1**  
Flujo normal de corrientes armónicas

### 3.2.2.2 Resonancia paralelo.

La resonancia paralelo (figura 3.2.2) ocurre cuando la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva del sistema son iguales en alguna frecuencia. Si la combinación de los bancos de condensadores y la inductancia del sistema da como resultado una resonancia paralela cerca de una de las armónicas característica generadas por la carga no lineal; la corriente armónica excitará el circuito "tanque", provocando que una corriente amplificada oscile entre el almacenamiento de energía en la inductancia y el almacenamiento de energía en la capacitancia. Esta corriente de oscilación elevada puede provocar distorsión de voltaje e interferencia telefónica si el circuito de distribución y el circuito telefónico están físicamente cercanos.

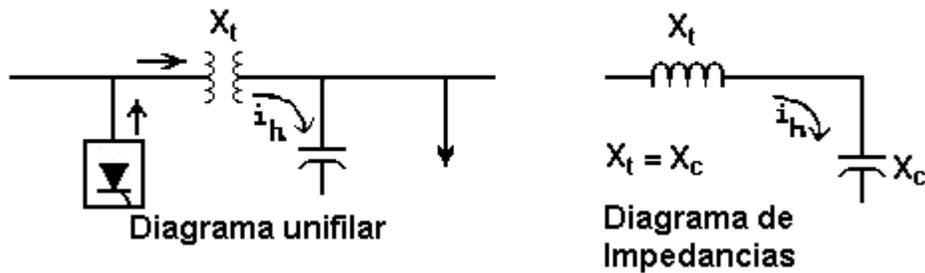


**Figura 3.2.2**  
Condición de resonancia paralela

### 3.2.2.3 Resonancia en serie.

La resonancia en serie es el resultado de la combinación en serie de los bancos de condensadores y la inductancia de los transformadores o las líneas. La resonancia en serie presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas y tiende a "atrapar" cualquier corriente armónica a la cual está sintonizada. La resonancia en serie puede dar como resultado niveles de distorsión de voltaje elevados entre la inductancia y el condensador en el circuito serie. Un ejemplo de un circuito serie es un transformador de un centro de carga con condensadores conectados a su secundario (figura 3.2.3).

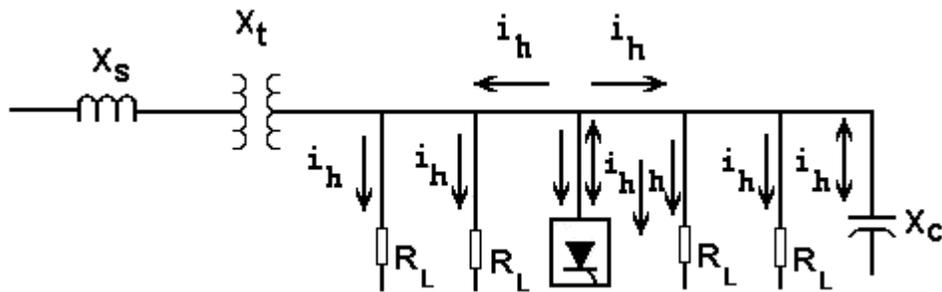
Esto aparece como un circuito serie cuando se ve desde el primario del transformador.



**Figura 3.2.3**  
Resultado del banco de capacitores en la resonancia serie

### 3.2.3 Efecto de las cargas en el sistema.

Las cargas no tienen efecto significativo sobre las características de respuesta en frecuencia del sistema excepto, cerca de las frecuencias resonantes. Los componentes importantes de la carga, vistos desde el primario de un sistema de distribución, se muestran en la figura 3.2.4. Cada uno de estos componentes puede ser importante para el análisis armónico.



**Figura 3.2.4**  
Representación de cargas para el análisis del sistema

### 3.2.3.1 El transformador reductor.

El transformador reductor se representa por su reactancia de dispersión de fuga serie y resistencias en el circuito. Para armónicos de bajo nivel, la reactancia de dispersión es pequeña comparada con la impedancia (resistencia) de la carga. Sin embargo, para armónicos de alto nivel, la reactancia del transformador reductor se vuelve grande comparada a la carga. El transformador aísla esencialmente la carga para las frecuencias armónicas elevadas.

### 3.2.3.2 Componente resistivo.

El componente resistivo de la carga se vuelve muy importante en el punto de resonancia del sistema. La trayectoria de resistencia (qué ofrece una impedancia menor) es tomada por los armónicos cuando existe una condición de resonancia paralela. Por lo tanto, niveles de carga más elevados en el sistema dan como resultado una impedancia menor cerca de una resonancia paralela. La respuesta del sistema con un nivel de carga variable se muestra en la figura 3.2.5 para un sistema con una resonancia paralela cerca de la quinta armónica.

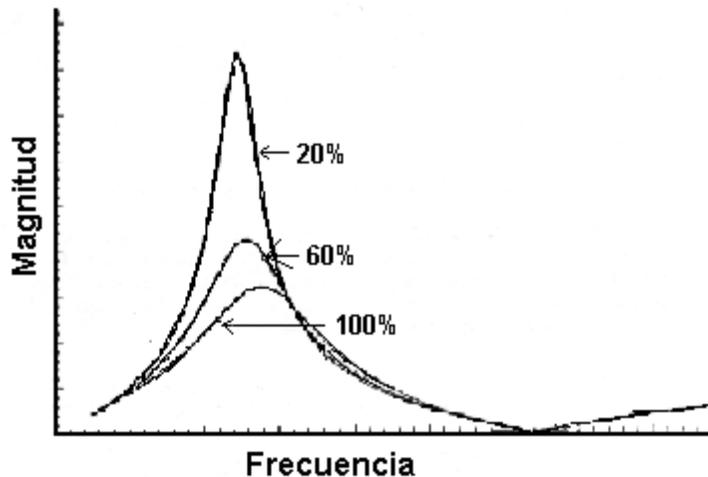


Figura 3.2.5

Respuesta del sistema ilustrando el efecto de la carga sobre el pico de resonancia paralelo

### 3.2.3.3 Motores.

Los motores aparecen principalmente como cargas inductivas a las frecuencias armónicas. La representación correcta para motores a las frecuencias armónicas es la impedancia del corto circuito (rotor bloqueado, sub-transitoria). Esta inductancia no provee amortiguación significativa de los picos de resonancia pero desplazará un poco la frecuencia de resonancia puesto que es esencialmente paralelo con la inductancia de la fuente. Esto es importante si la resonancia está cercana a un problema armónico, cambios en la carga del motor en el sistema pueden desplazar la resonancia a la frecuencia armónica. Los motores son particularmente importantes en sistemas industriales, residenciales y de distribución comercial; con un alto porcentaje de cargas de aire acondicionado, en donde las cargas de motores son una porción significativa de la carga total del sistema.

### 3.2.4 Características típicas del sistema.

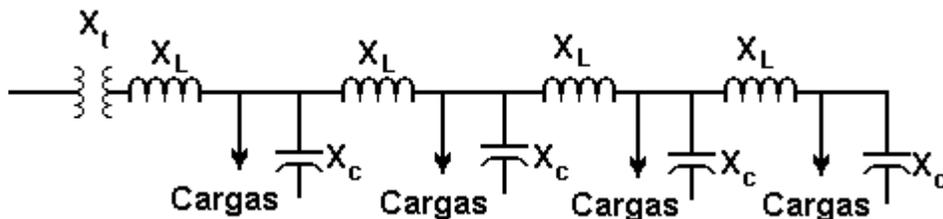
Es difícil desarrollar cualquier característica de respuesta de frecuencia del sistema, debido al número de factores que afectan la respuesta. Pero, es importante mirar algunas características básicas para diferentes sistemas y las causas de estas características, las cuales junto con las técnicas de cálculo que se describirán en la sección 3.5, pueden ser usadas para determinar si se requiere o no un análisis detallado para un sistema específico.

#### 3.2.4.1 Sistemas de distribución.

Las características de respuesta en frecuencia en sistema de distribución son dominadas por la interacción entre las capacitancias paralelas y las inductancias del sistema (tal como se muestra en la figura 3.2.6). El amortiguamiento provisto por las cargas del sistema es importante. Junto a los bancos de condensadores, la capacitancia de los cables aislados puede influir sobre las resonancias del sistema.

La mayoría de condiciones resonantes severas ocurren cuando el único gran banco de condensadores es el medio principal de compensación paralelo en el sistema (por ejemplo, un gran banco de condensadores en la subestación). En este caso, hay un punto de resonancia en el sistema y puede ocurrir distorsión de voltaje significativo y amplificación de corrientes armónicas si esta resonancia coincide con una corriente armónica generada por cargas no lineales. Es muy frecuente que esta resonancia ocurra cerca de la quinta armónica, como es el caso para las características de respuesta en frecuencia ilustradas en la figura 3.2.5.

Cuando un número de bancos de condensadores de menor tamaño son aplicados a lo largo del sistema de distribución, existirá un número de frecuencias de resonancia diferentes. Si estos condensadores son conmutados, las características resonantes del sistema se vuelven más difíciles de determinar. Cada una de las resonancias generalmente tendrá magnitudes que son menores a las magnitudes que serían asociadas con una resonancia principal. Por lo tanto, el efecto de distribuir los condensadores alrededor del sistema puede reducir el potencial de problemas debido a resonancias principales. La colocación de un condensador introduce una resonancia paralelo adicional que podría interactuar con las corrientes armónicas. La distorsión de voltaje armónica es generalmente peor cuando los condensadores están en servicio cerca de los extremos del alimentador, dando como resultado una inductancia mayor de la línea que sintoniza la resonancia a frecuencia menor e incrementa la distancia entre las corrientes armónicas que van a circular.



**Figura 3.2.6**  
Característica típica de un sistema de distribución

Tal como se mencionó previamente, la amortiguación provista por las cargas es muy importante en sistemas de distribución. Este es a menudo el factor que evita que las condiciones de resonancia causen problemas armónicos significativos. El componente resistivo de la carga es el factor más importante.

El análisis de sistemas balanceados no se aplica en muchos casos. Sin embargo, este nos da información útil en casos con fuentes armónicas trifásicas de gran dimensión o en donde la ubicación de fase de cargas monofásicas no es conocida. Cualquiera de las condiciones siguientes puede dar como resultado que se necesite analizar la respuesta del sistema de distribución con una representación trifásica completa:

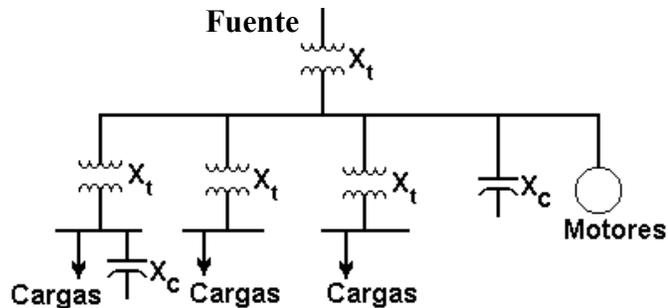
- Fuentes armónicas monofásicas de gran tamaño (cargas no lineales)
- Características de cargas desbalanceadas significativamente
- Banco de condensadores monofásicos en el sistema

Nota: El análisis desbalanceado requiere que se conozcan las fases (a-b-c) a la cual se conectan las cargas monofásicas y condensadores.

#### **3.2.4.2 Sistemas industriales.**

Los sistemas de potencia industriales son parecidos a los sistemas de distribución compactos (ver ejemplo en la figura 3.2.7), siendo entre ellas las diferencias más importantes:

1. La respuesta en frecuencia está sumamente dominada por bancos de condensadores relativamente grandes y por la inductancia del corto circuito. La resonancia asociada a menudo está cerca de las armónicas de orden inferior debido a las características de factor de potencia de las cargas industriales. Las impedancias de las líneas y los cables a menudo son despreciables.
2. El porcentaje de cargas que producen armónicas es a menudo mayor que para los sistemas de distribución. De hecho, las cargas principales pueden ser dispositivos no lineales (rectificadores, hornos del arco, accionamientos de velocidad variable, etc.).
3. A menudo existe poca carga de tipo resistivo para proveer amortiguamiento cerca de la frecuencia de resonancia. Esto da como resultado una mayor distorsión armónica si la resonancia es cercana a una de las armónicas generadas. Los motores son importantes debido a que desplazan la frecuencia de resonancia.
4. La mayoría de sistemas industriales pueden ser analizadas con una representación balanceada. Las cargas son generalmente cargas trifásicas balanceadas (incluyendo las fuentes armónicas) y bancos de condensadores trifásicos.



**Figura 3.2.7**  
Sistema industrial de potencia típico

### 3.3 Efectos de las armónicas.

#### 3.3.1 Generalidades.

El grado al cual las armónicas pueden ser toleradas es determinado por la susceptibilidad de la carga (o de la fuente de potencia). El equipo menos susceptible es aquel en donde la función principal es la calefacción, como en un horno. En este caso la energía armónica es generalmente utilizada y por lo tanto es completamente tolerable. El equipo más susceptible es aquel cuyo diseño o constitución asume una entrada fundamental aproximadamente sinusoidal. Estos frecuentemente están en las categorías de equipos de comunicación o de procesamiento de datos. Un tipo de carga normalmente que está entre estos dos extremos de susceptibilidad son los motores. La mayoría de motores son relativamente tolerantes con las armónicas. Aún en el caso de equipo menos susceptible, los armónicos pueden ser perjudiciales. En el caso de un horno, por ejemplo, pueden causar fatiga térmica o de voltaje en el dieléctrico, lo cual causa envejecimiento prematuro del aislamiento eléctrico.

#### 3.3.2 Motores y generadores.

Un efecto principal de los voltajes y corrientes armónicos en las maquinarias rotativas (de inducción y sincrónico) es el incremento del calentamiento debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre a las frecuencias armónicas. De esta manera los componentes armónicos afectan la eficacia de la máquina, y también pueden afectar el torque desarrollado [B32][B7].

Las corrientes armónicas en un motor pueden dar lugar una emisión de ruido audible elevado comparado con la excitación sinusoidal. Las armónicas también producen una distribución de flujo resultante en el entrehierro que puede causar o incrementar el fenómeno llamado *cogging* (oposición al arranque suave) o desplazamiento (un alto deslizamiento) en motores de inducción [B14].

Los pares armónicos, tales como la quinta y séptima armónicas, tienen el potencial de crear oscilaciones mecánicas en una combinación turbina-generator o un sistema motor-carga. Las oscilaciones mecánicas aparecen cuando los torques de oscilación, causados por la interacción entre los campos magnéticos de las corrientes armónicas y de la frecuencia fundamental, excitan una frecuencia resonante mecánica. Por ejemplo, la quinta y séptima armónicas se pueden combinar para producir un estímulo torsional en un rotor de un generador a la frecuencia de la sexta armónica. Si la frecuencia de una resonancia mecánica existe cercana a

la frecuencia de un estímulo eléctrico, se pueden desarrollar elevadas fuerzas mecánicas tensionales.

La tabla 3.3.1 define los órdenes de las armónicas características derivados de un convertidor de seis-pulsos e implica el efecto cuando se aplica a los terminales de una máquina rotativa. Cada voltaje armónico, la 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, etc. inducirá una corriente armónica correspondiente en el estator de la máquina. Cada una de esas armónicas es una componente simétrica de secuencia positiva o negativa de la corriente total. Estas corrientes inducirán calentamiento adicional en los devanados del estator, que se suman al incremento de temperatura causado por la corriente fundamental.

Otra preocupación principal es el flujo de corrientes armónicas en el rotor [B7]. El flujo de cada corriente en el estator producirá una fuerza magnetomotriz en el entrehierro que inducirá flujo de corriente en el rotor de la máquina. De la misma manera en que cada armónica característica se puede definir siendo de secuencia positiva o negativa, la rotación de esa armónica será en la misma dirección o en oposición a la rotación del rotor. La 5<sup>a</sup> armónica rotará en dirección opuesta, (secuencia negativa) de manera que una corriente armónica será inducida en el rotor con una frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional neta entre la frecuencia del entrehierro fundamental y la 5<sup>a</sup> armónica, por ejemplo, la 5<sup>a</sup> más uno, o sea la 6<sup>a</sup> armónica. Puesto que la 7<sup>a</sup> armónica va a rotar en la misma dirección (secuencia positiva), una corriente armónica será inducida en el rotor con una frecuencia correspondiente a la diferencia rotatoria neta entre la 7<sup>a</sup> y la frecuencia del entrehierro fundamental, por ejemplo, la 7<sup>a</sup> menos uno, o la 6<sup>a</sup> armónica. Así, desde el punto de vista del calentamiento del rotor la 5<sup>a</sup> y la 7<sup>a</sup> armónica en el estator se combinan para producir una corriente de 6<sup>a</sup> armónica en el rotor. Así la 11<sup>a</sup> y la 13<sup>a</sup> actúan de la misma manera para producir corriente de 12<sup>a</sup> armónica en el rotor, y así con los pares armónicos de orden más elevado. Por lo tanto, hay dos preocupaciones importantes con estas armónicas en el rotor son:

- 1) El calentamiento resultante del rotor
- 2) Los torques pulsantes o reducidos

**Tabla 3.3.1**  
**Convertidor armónico de seis-pulsos**

ORDEN DE ARMONICO	FRECUENCIA Hz	SECUENCIA DE LA RED	ARMONICAS EN EL ESTATOR	ROTACION ARMONICA	ARMONICAS EN EL ROTOR
1	60	(+)	1	DIRECTA	
5	300	(-)	5	INVERSA	6
7	420	(+)	7	DIRECTA	6
11	660	(-)	11	INVERSA	12
13	780	(+)	13	DIRECTA	12
17	1020	(-)	17	INVERSA	18
19	1140	(+)	19	DIRECTA	18
23	1380	(-)	23	INVERSA	24
25	1500	(+)	25	DIRECTA	24

La cantidad de calentamiento del rotor que puede ser tolerado, tanto como la cantidad que es incurrida en un caso dado, depende del tipo de rotor involucrado. La maquinaria de rotor-devanado es más propensa a ser afectada seriamente que la maquinaria de rotor jaula de ardilla, y los rotores de jaula de ardilla de barra profunda son más afectados que las jaulas de la ardilla ordinaria. [B7] [B25] Las pérdidas en el devanado son generalmente más importantes que las pérdidas en el hierro. El efecto sumado de las armónicas es una reducción en la eficacia y en la vida de la maquina. Ninguna reducción es pronunciada para los contenidos armónicos encontrados normalmente, pero el calentamiento armónico típicamente reduce el desempeño a un 90-95% de lo que sería experimentado con ondas senoidales puras aplicadas. [B7] [B12]

### 3.3.3 Transformadores.

A excepción de que las armónicas aplicadas a los transformadores pueden provocar un incremento en el ruido audible, los efectos en estos componentes son usualmente aquellos originados del calentamiento parásito.

El efecto de los armónicos en transformadores tiene dos componentes: las corrientes armónicas provocan un incremento en las pérdidas del cobre y de las pérdidas de los flujos dispersos; los voltajes armónicos provocan un incremento en las pérdidas del hierro. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, comparado al funcionamiento puramente senoidal (fundamental).

La norma IEEE C57.12.00-1980 [2] propone un límite en los armónicos en la corriente de los transformadores. El límite superior del factor de distorsión de corriente es el 5% a la corriente nominal. El estándar también dá los sobrevoltajes rms máximos que el transformador debería ser capaz de soportar en el estado estable: 5% a carga nominal y 10% en vacío. Los voltajes aplicados en las corrientes armónicas no deben exceder como resultado un voltaje rms total de esos valores nominales.

Debe notarse que las pérdidas del transformador causadas tanto por los voltajes como por las corrientes armónicas dependen de la frecuencia. Las pérdidas incrementan al aumentar la frecuencia y, por lo tanto, los componentes armónicos de frecuencias más elevadas pueden ser más importantes que los componentes de frecuencias menores como causantes de calentamiento del transformador.

Las pérdidas en los transformadores pueden ser segregadas en pérdidas con carga y pérdidas sin carga. Las pérdidas con carga pueden ser todavía divididas por  $I^2R$  (pérdidas en el devanado) y pérdidas de dispersión. Las pérdidas de dispersión son de importancia especial cuando se evalúa el calentamiento añadido debido al efecto de la forma de onda de corriente no sinusoidal.

Las pérdidas de dispersión son pérdidas de corriente de *eddy* debido al flujo electromagnético disperso en los devanados, núcleo, uniones del núcleo, blindaje magnético, paredes de tanque, y otras partes estructurales del transformador. Las pérdidas de dispersión del devanado incluyen perdidas por corrientes de *eddy* de los conductores del devanado y las pérdidas debido a las corrientes circulantes entre placas o los circuitos de devanado paralelos. Estas

pérdidas subirán en proporción al cuadrado de la corriente de la carga y al cuadrado de la frecuencia. La temperatura también aumentará en las partes estructurales debido a las corrientes de *eddy*, aproximadamente como el cuadrado de la corriente de carga y el cuadrado de la frecuencia.

La norma ANSI/IEEE C57.110 [3] proporciona un procedimiento de cálculo para obtener las pérdidas de corriente de *eddy* para un transformador dado.

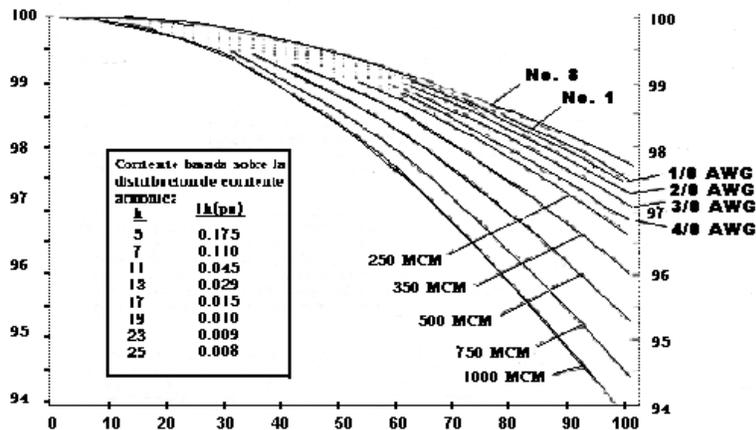
### 3.3.4 Cables de potencia.

Los cables involucrados en la resonancia del sistema, como se describió en la sección 3.2.1, pueden estar sujetos a tensión de voltaje y el efecto corona que pueden dañar el dieléctrico (aislamiento). Los cables que son expuestos a niveles "ordinarios" de corrientes armónicas son propensos al calentamiento parásito.

El flujo de corriente no sinusoidal en un conductor provocará calentamiento adicional por encima de lo que se esperaría para el valor rms de la forma de onda. Esto es debido a los dos fenómenos conocidos como "efecto superficial" y el "efecto de proximidad" ambos efectos varían como función de la frecuencia también en función del tamaño del conductor y el espaciado. Como un resultado de estos dos efectos, la resistencia efectiva para corriente alterna ( $R_{AC}$ ), se eleva por encima de la resistencia de corriente directa ( $R_{DC}$ ), sobre todo para conductores mayores. Cuando una forma de onda de corriente rica en armónicos de alta frecuencia está fluyendo en un cable, el  $R_{ca}$  equivalente para el cable se eleva aún más amplificando la pérdida  $I^2R_{ca}$ .

Curvas de *derating*<sup>4</sup> típicas han sido trazadas para un número de tamaños de cables, tal como se muestra en la figura 3.3.1 para una distribución armónica de seis pulsos. [B25]

Se puede ver de la figura 3.3.1 que el efecto del calentamiento armónico en los cables no es normalmente un asunto de gran preocupación. El diseño prudente debería, sin embargo, suministrar el *derating* requerido.



**Figura 3.3.1**  
Reacondicionamiento de cables vrs. armónicos para distribución de corriente armónica de un convertidor de seis pulsos [35].

<sup>4</sup> Derating: ajuste del valor nominal, redimensionamiento

### 3.3.5 Condensadores.

Una preocupación principal originada por el uso de condensadores en el sistema de potencia, es la posibilidad de resonancia del sistema. Este efecto (considerado en detalle en la sección 3.2.1) imprime voltajes y corrientes que son considerablemente mayores de los que serían para el caso sin resonancia.

La reactancia de un banco de condensadores disminuye con la frecuencia y de esta manera el banco actúa como un sumidero para las corrientes armónicas de orden elevado. Este efecto incrementa el calentamiento y la tensión dieléctrica. La conmutación frecuente de componentes magnéticos no-lineales (por ejemplo, núcleos de hierro), tales como transformadores y reactores, pueden producir corrientes armónicas que se añadirán a la carga de los condensadores.

El estándar ANSI/IEEE 18-1992 [4] establece limitaciones en voltaje, corriente, y potencia reactiva para bancos de condensadores. Esto puede ser usado para determinar los niveles armónicos permisibles máximo.

El resultado del incremento en calentamiento y de la fatiga de voltaje provocada por las armónicas es una reducción de la vida de los condensadores.

### 3.3.6 Equipo electrónico.

El equipo electrónico de potencia es susceptible a mal funcionamiento causado por distorsión armónica. Este equipo a menudo depende de la determinación exacta de los cruces por cero del voltaje y otros aspectos de la forma de onda del voltaje. La distorsión armónica puede dar como resultado un desplazamiento de cruce por cero de voltaje o del punto en el cuál un voltaje fase a fase se hace mayor que otro voltaje fase-fase. Ambos son puntos críticos para muchos tipos de circuito de control electrónico y por lo tanto estos desplazamientos pueden provocar mal funcionamiento.

Otros tipos de equipo electrónico pueden ser afectados por transmisión de armónicas de la alimentación ca a través de los alimentadores de los equipos, o por acoplamiento magnético de los armónicos hacia los componentes de los equipos. Las computadoras y equipos similares tales como controladores programables frecuentemente requieren fuentes de ca que no tengan más de un 5% de factor de distorsión de voltaje armónico, con la mayor armónica individual siendo no mayor de 3% del voltaje fundamental. Niveles mayores de armónicos darán como resultado, el mal funcionamiento del equipo que en algunos casos puede tener consecuencias serias. Los instrumentos pueden ser afectados de manera similar, dando datos erróneos, o funcionando de manera imprevisible. A menudo los problemas más serios son el mal funcionamiento de los instrumentos médicos. Consecuentemente muchos instrumentos médicos están dotados con acondicionadores de potencia. Efectos de interferencia menos dramáticos de los armónicos pueden ser observados ocasionalmente en equipo de radio y televisión, así como en grabadoras de video (video *recorder*)<sup>5</sup> y sistemas de reproducción de audio.

---

<sup>5</sup> Magnetoscopio

### 3.3.7 Mediciones.

La medición y la instrumentación son afectados por los componentes armónicos, particularmente si existen condiciones de resonancia las cuales dan como resultado voltajes y corrientes armónicos elevados en los circuitos. Los dispositivos de disco de inducción tales como los contadores (medidores de kilowatt-hora) normalmente ven sólo la corriente fundamental, pero el desbalance de la fase provocado por la distorsión armónica puede causar el funcionamiento erróneo de esos dispositivos. Diferentes estudios [B3], [B9], y [B10] han demostrado que errores tanto positivos como negativos son posibles con presencia de distorsión armónica, dependiendo del tipo de medidor bajo la consideración y de los armónicos involucrados. En general, el factor de distorsión debe ser muy severo (>20%) antes que se detecten errores significativos. Los transformadores de potencial y de corriente de 60 Hz, usados tanto en medición como en protecciones<sup>6</sup>, no son afectados por los niveles armónicos encontrados normalmente [B8].

### 3.3.8 Interruptores<sup>7</sup> y protecciones.

Tal como con otros tipos de equipo, las corrientes armónicas pueden aumentar el calentamiento y las pérdidas en interruptores<sup>7</sup>, reduciendo la capacidad de conducción de corriente de estado estable y reduciendo la vida de algunos componentes aislantes.

Los fusibles sufren una disminución de la capacidad nominal debido al calor generado por armónicas durante el funcionamiento "normal".

Actualmente no hay normas para el nivel de las corrientes armónicas de los dispositivos de conmutación o los fusibles que deben interrumpir o conducir. Todas las pruebas son realizadas a la frecuencia de suministro nominal.

El Comité de relés de sistemas de potencia de la IEEE ha preparado un reporte, "*Sine Wave Distortions on Power Systems and the Impact on Protective Relaying*" [B27]. Este cubre la mayoría de los tipos de distorsión que ocurren en sistemas de potencia, y discute su impacto en el funcionamiento de relés de protección. El reporte aclara la imposibilidad de definir completamente la respuesta de los relés debido a la variedad de relés en uso y a las variaciones en la naturaleza de las distorsiones que pueden ocurrir, aun sí la discusión está limitada a las armónicas características del convertidor de seis o doce pulsos. Las magnitudes de las armónicas y los órdenes armónicos predominantes no sólo pueden variar, sino que también los ángulos de fase relativos varían. Dos formas de onda con las mismas magnitudes armónicas características pueden diferir substancialmente si sus armónicos tienen ángulos de fase diferentes relativo a la fundamental. Un relé puede responder diferentemente a cada forma de onda aún que cada una contenga las mismas magnitudes armónicas. El reporte del comité de relé establece:

"Los relés de protecciones generalmente no responden a cada parámetro identificable tal como el valor rms de una cantidad primaria o la componente de frecuencia fundamental de dicha

---

<sup>6</sup> Relaying

<sup>7</sup> switchgear

magnitud. En referencia al mismo tema, el funcionamiento de un relé a un rango de entrada de frecuencia única no es una indicación de cómo ese relé responderá a una onda distorsionada conteniendo esas frecuencias. La superposición no es aplicable, los relés multi-entrada pueden ser más imprevisibles que los relés de entrada única en la presencia de distorsión de onda. La respuesta del relé bajo condiciones de distorsión puede variar entre relés que tienen las mismas características nominales a la frecuencia fundamental, no sólo entre diferentes fabricantes de relé, sino que entre los diferentes lotes de relés del mismo fabricante.

### 3.3.9 Convertidores de potencia estáticos.

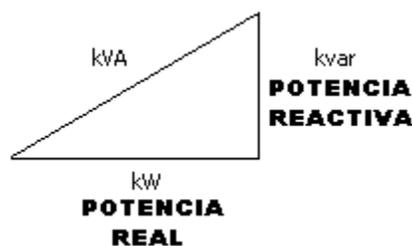
Los dispositivos de conversión de potencia estáticos generalmente, generan armónicos como parte de su funcionamiento. (Ver sección 3.3.1). En algunas situaciones, los convertidores mismos son afectados por armónicos, ya sea auto generados, o (más frecuentemente) generados por otras fuentes de armónicas. A menudo, la otra fuente de armónicos es un convertidor similar o idéntico que ha sido conectado en paralelo en el sistema de distribución.

Los convertidores existen en números de formas funcionales y topológicas, normalmente no son afectados por diodos. Sin embargo, este usa condensadores en red de voltajes compartido (por ejemplo, diodos en serie en un rectificador de alto voltaje), estos condensadores pueden estar sujetos a fatiga térmica más allá de sus valores contemplados en el diseño, debido a las elevadas corrientes impresas sobre ellos por los armónicos en la alimentación de ca. Estos armónicos también serán pasados a la carga rectificadora lo cual puede dañar o perturbar el equipo de proceso en el lado cd.

## 3.4 Compensación de potencia reactiva y control armónico.

### 3.4.1 Compensación de potencia reactiva.

Las estructuras de tarifas de las distribuidoras eléctricas están constituidas por dos componentes principales: cargos por demanda y cargos por energía. El primero es un resultado de las inversiones en equipos para suministrar dicha cantidad de potencia total al consumidor. El segundo es el resultado del combustible que debe ser gastado para generar energía.



**Figura 3.4.1**  
**Relación entre kW y kvar**

La carga total (kVA) está constituida por dos componentes en cuadratura: Potencia activa (kW) y potencia reactiva (kvar) figura 3.4.1. Si los kVA pueden ser reducidos suministrando localmente potencia reactiva, los cargos por demanda puede ser minimizados.

Las fuentes de potencia reactivas son:

1. Condensadores de potencia estáticos
2. Máquinas síncronas
3. Convertidores de potencia estáticos de conmutación forzada.

### 3.4.1.1 Compensación de potencia reactiva usando condensadores de potencia estáticos.

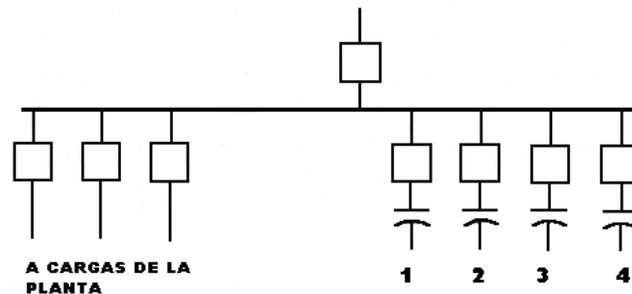
Los condensadores de potencia son una fuente barata de potencia reactiva. Ellos suministran vars de magnetización que son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado. Estos vars provocan un incremento de voltaje a través de la reactancia inductiva del sistema de potencia el cual eleva el nivel de voltaje de operación. Los condensadores deben ser conmutados a efecto de controlar los voltajes y suministrar potencia reactiva variable.

Cuatro métodos para controlar los vars usando condensadores, en orden de complejidad son:

1. Conmutación por medio de *circuit breakers* de potencia, interruptores del circuito, o interruptores de vacío.
2. Conmutación de un reactor en paralelo con el banco de condensadores controlado por fase back to back de thyristores.
3. Conmutación de condensadores que conectan o desconectan a corriente cero por medio de un tiristor back to back.
4. Reactor saturable en paralelo con banco de condensadores.

#### 3.4.1.1.1 Conmutación de condensadores de potencia por medio de *circuit breakers*, interruptores de circuito, o interruptores de vacío.

Para controlar la potencia reactiva de manera continua, la conmutación de condensadores de potencia por medio de *circuit breakers*, interruptores de circuito, o interruptores de vacío requiere un dispositivo de conmutación que puede ser operado frecuentemente y que puede interrumpir a corriente cero en un alto voltaje entre los contactos sin re-ignición. Debido a estos requisitos, este método es usado solamente para conmutar grandes bancos una o dos veces al día cuando la demanda cambia de condición de carga normal a leve. El dispositivo de conmutación tiene el requerimiento especial de ser capaz de interrumpir una corriente en adelanto al voltaje por  $90^\circ$ . En donde estas limitaciones no son una desventaja de funcionamiento, este método de control de vars es el más económico (figura 3.4.2).



**Figura 3.4.2**  
**Condensadores conmutados en valores binarios**

### 3.4.1.1.2 Control de fase back to back de un reactor controlado por un tiristor (inductor) (TCR).

El control de fase back to back de reactor controlado por tiristor en paralelo con condensadores tiene la ventaja de un control suave de los var sobre el rango de funcionamiento del equipo. Los problemas relacionados a la conmutación de condensadores, se evitan conmutando la corriente del reactor. El control por tiristores de una carga trifásica balanceada provoca las corrientes armónicas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, etc. Por lo tanto, los condensadores pueden ser divididos en dos o más secciones con reactores sintonizados para filtrar esas armónicas. La potencia reactiva nominal en var del reactor es normalmente igual al valor nominal del condensador para obtener pleno control. Más condensadores pueden ser suministrados si una base de vars se necesita en el sistema. (figura 3.4.3).

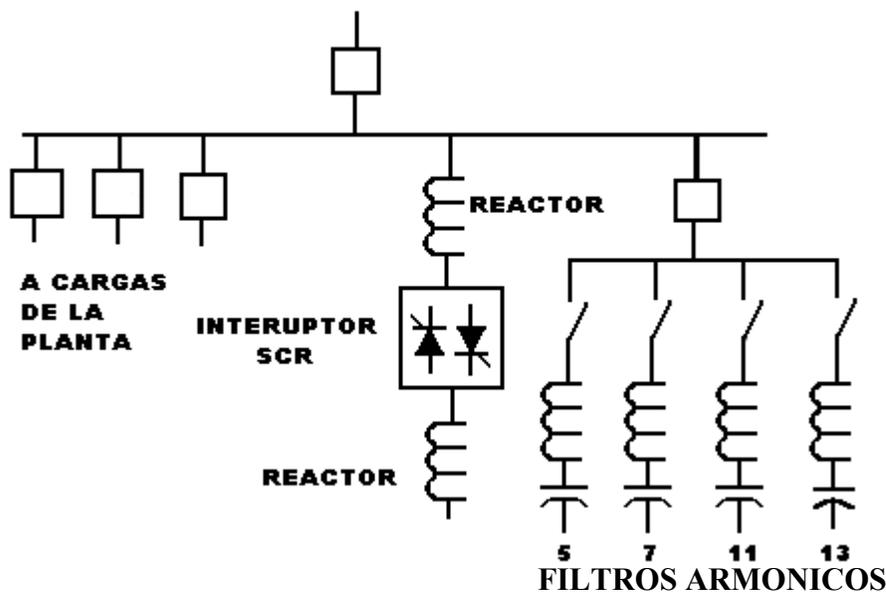


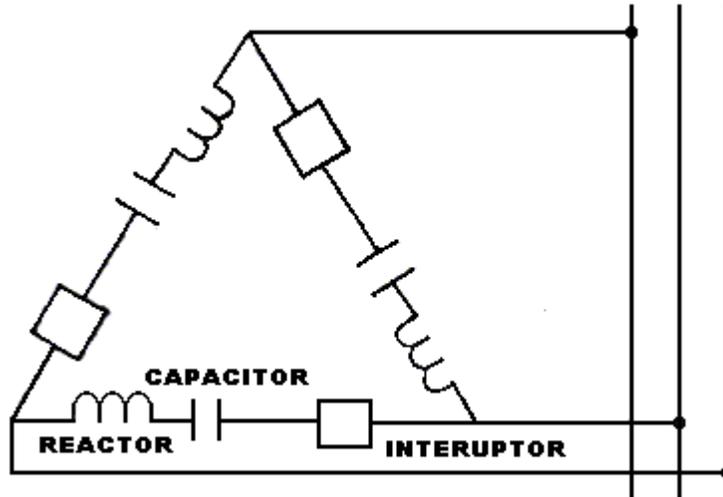
Figura 3.4.3

Compensador estático de VAR usando un reactor controlado por tiristor

### 3.4.1.1.3 Conmutación de condensadores a corriente cero por tiristor back to back (TSC).

La conmutación de condensadores a corriente cero por thyristores back to back dejan el condensador cargado ya sea con plena carga positiva o negativa en el condensador. El ajuste fino del tiristor permite la conexión del condensador cuando el voltaje del sistema es igual al voltaje que se encuentra cargado el condensador. Esto elimina cualquier transitorio en el sistema. Los condensadores son conmutados en pasos finitos a medida que se necesita potencia reactiva. Los condensadores conmutados pueden ser sintonizados con reactor para filtrar armónicos en el sistema. Este sistema también puede ser usado con una base fija de condensadores para suministrar vars de base con los condensadores conmutados a ser usados como vars variables. Una combinación de condensadores conmutados por *tiristor* y un reactor

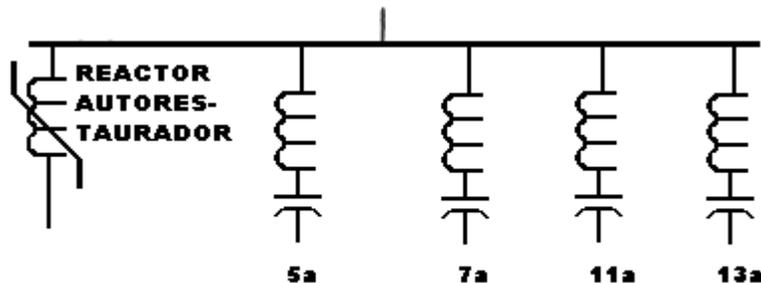
controlado por *tiristor* pueden ser usados para conseguir ajuste fino entre los pasos<sup>8</sup> del TSC (figura 3.4.4).



**Figura 3.4.4**  
**Condensador Conmutado por *Tiristor***

#### 3.4.1.1.4 Reactor saturable en paralelo con un banco de condensadores.

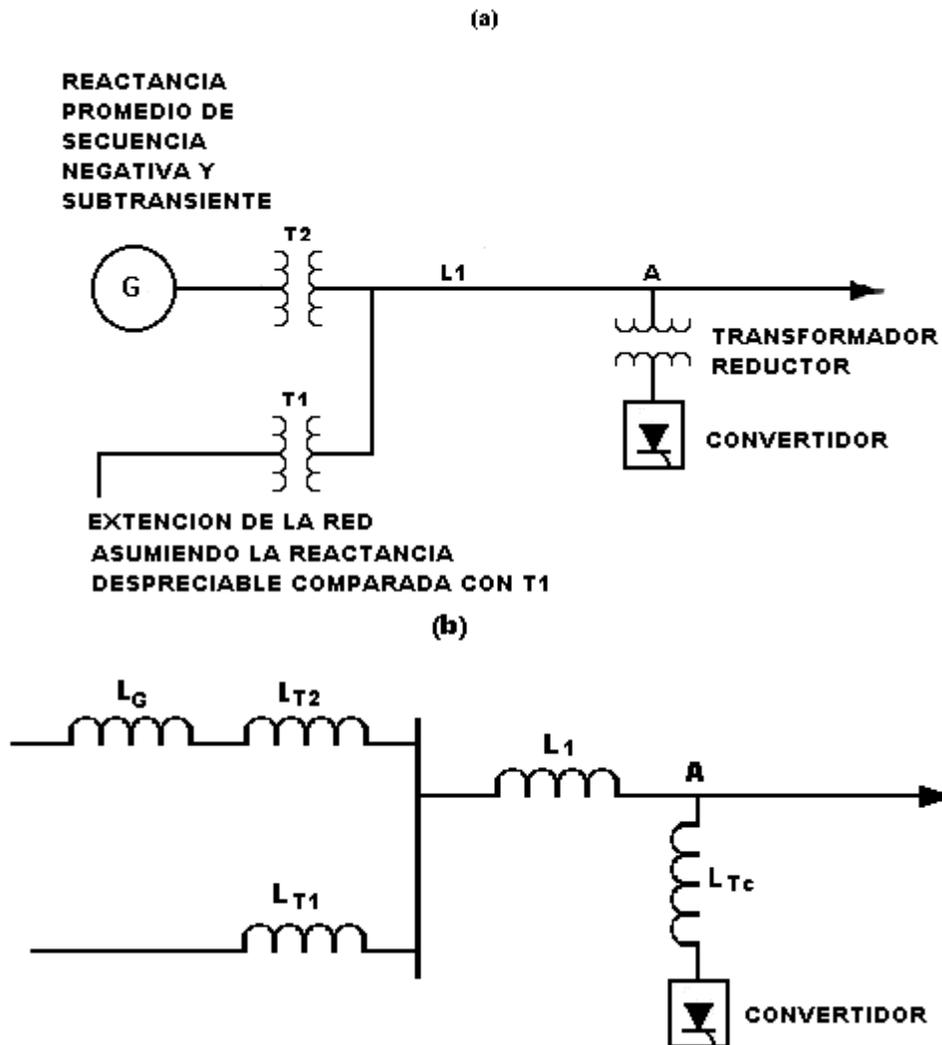
Un reactor saturable en paralelo con un banco de condensadores establece un suministro variable de var que no requiere circuitería de control externa. Este sistema consiste en un reactor auto-saturado en paralelo con un banco de condensadores el cual puede ser dispuesto en circuitos series conectados. El reactor auto-saturado maneja fuertes corrientes durante los sobrevoltajes de manera que la caída de voltaje a través de la reactancia del sistema contra resta el incremento de voltaje en la carga. Cuando el voltaje del sistema disminuye, el reactor absorbe menos corriente y los condensadores en paralelo suministran los vars necesarios en la carga. Las armónicas generadas por saturación del hierro son un poco compensadas por la configuración del devanado; sin embargo, los condensadores en paralelo usualmente se conectan con circuitos sintonizados en serie para las armónicas principales 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, etc., (figura 3.4.5).



**FILTROS ARMONICOS**  
**Figura 3.4.5**

#### Compensación de potencia reactiva usando reactor saturable

<sup>8</sup> En la literatura española esto es llamado escalón



**Figura 3.4.6**  
**Sistema de Potencia Mostrando influencia de Corriente y voltaje Armónicos**  
 (a) Diagrama esquemático; (b) Diagrama de Impedancias

### 3.4.2 Control de corrientes armónicas.

El diagrama de la figura 3.4.6 muestra un convertidor C alimentado desde una fuente de potencia G sobre una línea trifásica  $L_1$ . La reactancia de la fuente  $X_G + X_{T2}$  y la línea  $L_1$  están en serie con la reactancia del transformador del convertidor  $X_t$ . Si una corriente armónica  $I_h$  fluye entre el convertidor y la fuente, existirá un voltaje armónico  $E_h = I_h \cdot X_h$  en la posición A. ( $X_h$  es la reactancia de la fuente a la frecuencia armónica h.) Cuando hay una extensión  $L_2$  para alimentar otras cargas, el voltaje armónico en A provocará que también fluya una corriente armónica sobre esa línea, aunque la potencia para el rectificador está suministrada solamente sobre la línea  $L_1$ . A mayor valor de  $X_h$ , mayor será el voltaje armónico en A y mayor la amplitud de las corrientes armónicas circulando sobre la línea  $L_2$ . En realidad, las corrientes armónicas de un convertidor pueden fluir a cualquier parte de un sistema de ca al cual está

conectado, como se determina por las impedancias de las varias ramas del sistema a las frecuencias armónicas. Los voltajes y corrientes armónicos pueden ser calculados.

Las corrientes armónicas pueden ser controladas por varias técnicas. Estas incluyen:

1. Filtros *shunt*
2. Multiplicación de fase
3. Compensación o inyección armónica

### **3.4.2.1 Filtros *shunt* (paralelo).**

Los filtros shunt para la reducción de corrientes armónicas fluyendo en un sistema de potencia de ca consisten de uno o más circuitos sintonizados L-C serie. El filtro comúnmente usado en transmisión HVDC consiste de circuitos individuales sintonizados para las armónicas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> y 13<sup>a</sup> más un filtro paso alto sintonizado cerca de la armónica 17<sup>a</sup>. Los filtros en sistemas industriales pueden ser más simples por que el tamaño del filtro comparado con la capacidad del sistema es grande. Los filtros son usualmente diseñados para suministrar vars para compensación de factor de potencia también como para filtrar las corrientes armónicas. Como resultado, el tamaño del filtro es suficientemente grande para controlar el flujo no solo de las armónicas a las cuales está sintonizado, sino también las armónicas de orden mayor. La impedancia del filtro con respecto al sistema de potencia es baja. En sistemas de bajo voltaje, la relación X/R es pequeña, de manera que un filtro simple es suficiente debido a la amortiguación adicional. El factor de amortiguación es mayor con una relación X/R pequeña.

#### **3.4.2.1.1 Diseño de filtros *shunt*.**

Estos filtros shunt están constituidos de dos componentes, el condensador y el inductor. El condensador debe ser capaz de soportar la suma aritmética del voltaje pico de la fundamental y la caída de voltaje armónico en extremos del condensador.

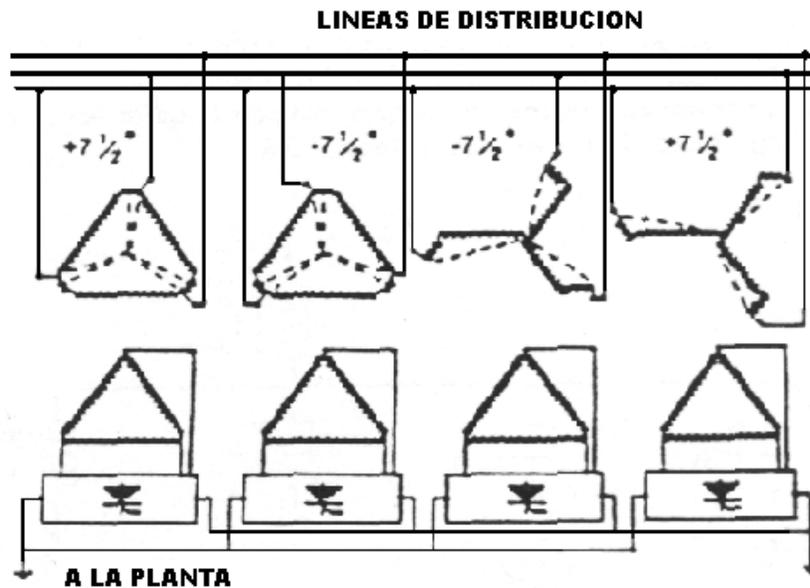
#### **3.4.2.2 Multiplicación de fase.**

Algunos convertidores monofásicos se usan comúnmente para cargas pequeñas. Para el costo inicial menor, un circuito de media onda puede ser usado donde los requerimientos de corriente son pequeños. La rectificación de media onda produce armónicos pares que tienen una componente  $c_d$  que satura los transformadores. Éstos deben ser evitados. Debe usarse rectificación de onda completa.

El convertidor polifásico básico es una unidad de seis pulsos. Teóricamente, una unidad de doce pulsos eliminará las frecuencias armónicas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup>, 19<sup>a</sup>, etc.

Multiplicación de fase adicional reducirá otras corrientes armónicas. Por ejemplo un circuito de 36 pulsos se construye usualmente con seis puentes de seis 6 pulsos, cada uno de los cuales está desplazado 10° de las otras unidades rectificadores por un transformador de desplazamiento de fase separado o por bobinas adicionales en los devanados primarios conectados en zig-zag o en hexágono, figura 3.4.7. Si una unidad de 6 de pulsos está fuera de servicio, la corriente armónica equivalente a dicha unidad estará presente. Instalaciones

grandes pueden requerir la suma de filtros shunt para reducir las corrientes armónicas. La multiplicación de fase es más efectiva para una instalación en donde convertidores del mismo tamaño con la misma carga y el mismo retardo de fase son usados.



**Figura 3.4.7**  
**Conexiones del transformador para el cambio de fase**

### 3.4.2.3 Inyección armónica.

Las corrientes armónicas pueden ser eliminadas por medio de la inducción de flujos armónicos en el núcleo de un transformador con un desplazamiento de  $180^\circ$  de los flujos armónicos inducidos por las corrientes que circulan en el secundario del transformador.

Los compensadores adaptativos aún se encuentran en la etapa experimental. Estos dispositivos están diseñados para monitorear constantemente la corriente de carga e inyectar una corriente igual y opuesta a la componente de distorsión, y de esta manera, cancelarla.

Un alimentador separado es necesario y las armónicas iguales y opuestas serán inducidas por este alimentador separado.

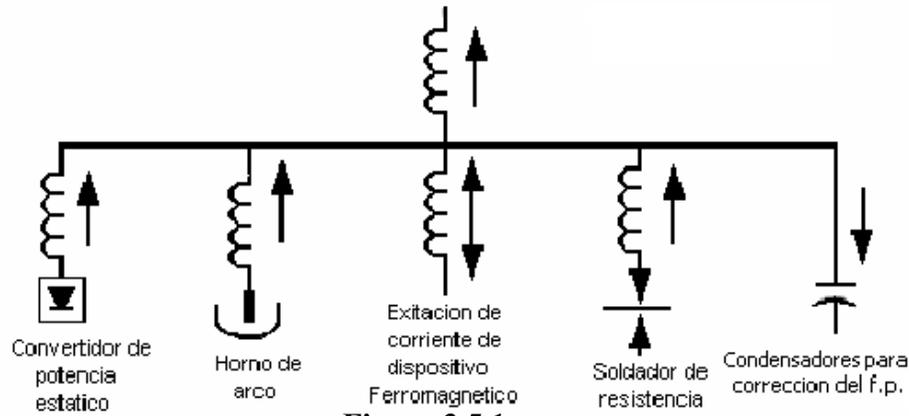
### 3.5 Métodos de análisis.

El cálculo de los niveles armónicos resultantes de las fuentes armónicas en el sistema requiere un conocimiento de las características de las fuentes de armónicos y una representación de las características de respuesta en frecuencia del sistema. Ambos aspectos del análisis están discutidos en las siguientes subsecciones.

#### 3.5.1 Cálculos de corrientes armónicas.

La mayoría de fuentes armónicas pueden representarse como fuentes de corrientes ideal para propósitos de análisis. Es decir que para el análisis en cada frecuencia armónica, el dispositivo

no lineal puede ser reemplazado por una fuente de corriente tal como se indica en la figura 3.5.1. La asunción que permite esta representación es que el voltaje del sistema no está distorsionado. Para la mayoría de dispositivos no lineales, la representación es muy adecuada hasta niveles de distorsión de voltaje de por lo menos 10%.



**Figura 3.5.1**

### **Modelando cargas no lineales como fuentes de corriente**

Las características específicas para diferentes tipos de dispositivos no lineales fueron discutidas en la sección 3.3.1. Básicamente, estos dispositivos caen en tres categorías generales:

1. Dispositivos del tipo electrónica de potencia (convertidores, etc.)
2. Dispositivos del tipo de arco ( hornos de arco, lámparas fluorescentes)
3. Dispositivos ferromagnéticos (transformadores)

Para dispositivo tipo electrónica de potencia, las características de generación armónica a menudo pueden ser determinadas analíticamente. Para dispositivos de arco y transformadores, es usualmente necesario usar características típicas a menos que se cuente con mejor información.

### **3.5.2 Cálculos de respuesta en frecuencia del sistema.**

Una vez que las características de la fuente armónica son determinadas, la respuesta del sistema a esa fuente debe ser calculada. Los elementos importantes del modelo usado para realizar esos cálculos incluyen lo siguiente:

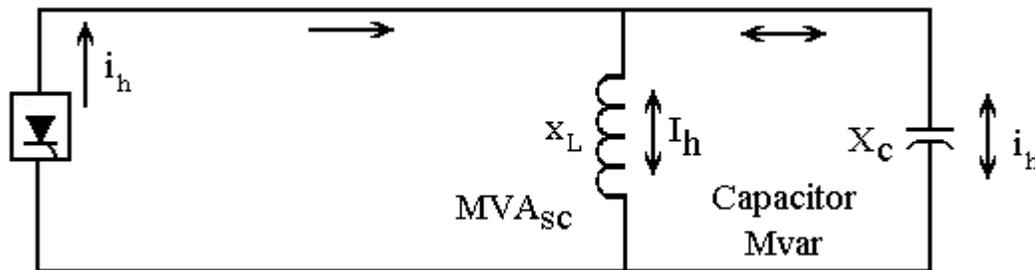
- Impedancia equivalente de cortocircuito del sistema
- Banco de condensadores
- Características de líneas y cables en el sistema
- Características de cargas

El análisis del sistema debe ser realizado usando cálculos a mano relativamente simples para algunos circuitos industriales y sistemas de distribución simples. Sin embargo, la mayoría de

sistemas requiere algún tipo de programa de simulación que pueda representar el sistema en frecuencias múltiples para el análisis.

### 3.5.2.1 Cálculos simples.

Los cálculos manuales están limitados a problemas que pueden ser simplificados para el circuito mostrado en la figura 3.5.2. Este circuito es adecuado para analizar muchos circuitos industriales y algunos circuitos de distribución en donde los condensadores son aplicados en la subestación.



**Figura 3.5.2**  
**Circuito simple para cálculos a mano**

El cálculo más importante para este circuito es la frecuencia de resonancia. Ésta viene dada por:

$$h_r = \left( \frac{MVA_{sc}}{Mvar_{cap}} \right)^{0.5} = \left( \frac{X_c}{X_{sc}} \right)^{0.5} \quad (3.5.1)$$

Donde:

$h_r$  es la frecuencia resonante como un múltiplo de la frecuencia fundamental

$MVA_{sc}$  es la capacidad de cortocircuito en el punto de estudio

$Mvar_{cap}$  es la capacidad nominal del condensador al voltaje del sistema.

$X_c$  es la reactancia capacitiva del banco de condensadores a la frecuencia fundamental

$X_{sc}$  es la reactancia de cortocircuito en la subestación

Si la resonancia calculada se encuentra cerca de una de las armónicas características de la fuente, los problemas potenciales deberían ser evaluados en forma adicional.

El siguiente paso es calcular la impedancia real del sistema a las armónicas características de la fuente bajo consideración:

$$Z(\omega) = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2(LC) + j\omega RC} \quad (3.5.2)$$

Donde:

$Z(\omega) = Z_h$  es la impedancia de sistema como una función de la frecuencia  $\omega = 2\pi f$

$R + j\omega L$  es la impedancia de la fuente como una función de la frecuencia

$1/j\omega C$  es la reactancia capacitiva como una función de la frecuencia

Una vez se obtiene para cada armónica característica  $Z_h$ , la magnitud de voltaje debe ser calculada para cada armónica de la manera siguiente:

$$V_h = (I_h)(Z_h) \quad (3.5.3)$$

Donde:  $I_h$  es la fuente de corriente para cada armónica característica.

Cálculos adicionales pueden ser realizados usando los voltajes y corrientes armónicos. Debe ser importante calcular magnitud tal como la Distorsión Armónica Total (THD).

### 3.5.2.2 Simulación de computadora.

Cuando el sistema bajo estudio es más complicado que el circuito de la figura 3.5.2, usualmente se requieren simulaciones por computadora. Con un programa de computadora, uno puede realizar tareas de análisis que incluyen:

- Barridos de frecuencia para respuesta del sistema
- Respuesta a múltiples fuentes de armónicas
- Soluciones para sistemas multifases desbalanceados

El método más común empleado en un programa de computación para análisis armónico es una solución directa de la matriz de admitancias a múltiples frecuencias. Con este tipo de solución, los dispositivos no lineales son modelados como fuentes ideales de voltaje o fuentes de corrientes a las frecuencias armónicas. La dependencia en frecuencia de los elementos del sistema (líneas de transmisión, transformadores, motores, etc.) deberían ser incluidos en los cálculos aunque el sistema se asume que es lineal en cada frecuencia armónica. Para la mayoría de sistemas, la matriz de admitancia es dispersa, permitiendo eficiencias en la velocidad de solución y en el uso de la memoria.

Otro método que ha sido usado para simulaciones armónicas ha sido denominado un flujo de carga armónica. Una formulación de la ecuación del flujo de carga se usa opuesto a la solución directa de la matriz de admitancia. Es decir que, las restricciones de potencia en los nodos de la carga y la fuente son incluidas. El método iterativo de Newton-Raphson es usado para la solución. Las implementaciones de este enfoque han sido solamente para sistemas balanceados y es generalmente más aplicable al análisis de sistema de transmisión que a sistemas distribución.

### **3.5.3 Lineamientos de modelado para análisis armónico**

Como se mencionado previamente, los lineamientos generales del modelado para análisis armónico son difíciles de desarrollar debido al número de parámetros que pueden afectar las características de respuesta en frecuencia del sistema. Sin embargo, es importante identificar la mayoría de características importantes del sistema que afectan la respuesta en frecuencia.

#### **3.5.3.1 Modelado de sistema trifásicos vrs. monofásicos.**

Para la mayoría de estudios armónicos, una representación monofásica del sistema utilizando el modelo de sistema de secuencia positiva será suficiente. Las excepciones a esta regla son las siguientes situaciones:

1. La interferencia telefónica es una preocupación. Aquí la influencia de las armónicas de corriente (secuencia cero) residual, en este caso el desbalance del sistema o de la fuente de armónicos debe ser representado para determinar exactamente las corrientes armónicas residuales.
2. Bancos de condensadores monofásicos. Los modelos balanceados monofásicos no son suficientes cuando existen condensadores monofásicos en el sistema. Un modelo completo trifásico se necesita para determinar la respuesta del sistema.
3. Fuentes armónicas monofásicos o desbalanceadas. En este caso, el desbalance de las fuentes solo puede ser representado con un modelo trifásico que es utilizado.
4. Fuentes de voltaje armónicas múltiplos de tres. Un modelo trifásico se requiere para demostrar la alta impedancia al flujo de las corrientes armónicas múltiplos de tres.

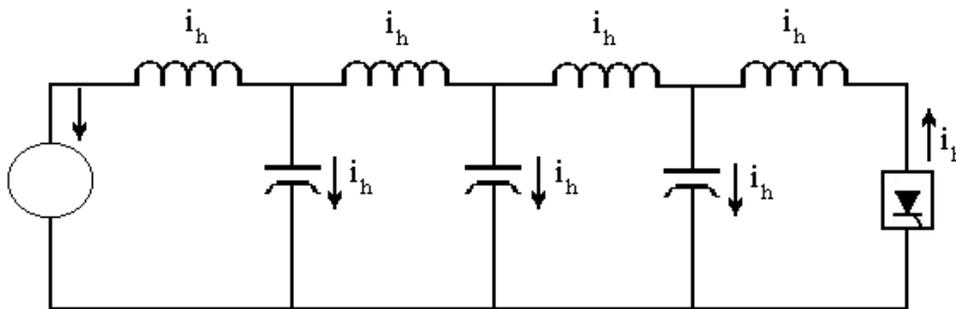
#### **3.5.3.2 Modelos de motores y maquinas.**

Los motores y máquinas son representados por su reactancia subtransitoria. Normalmente se usan los promedios del eje directo de cuadratura y eje de reactancias. Los motores de inducción son representados por su impedancia de rotor bloqueado si las características subtransientes no son conocidas. Estas reactancias son multiplicadas por los ordenes de las frecuencias armónicas. Es importante que las cargas de motores grandes sean modeladas exactamente.

### 3.5.3.3 Modelos para líneas y cables.

Para bajas frecuencias y/o para líneas cortas, una impedancia serie simple es una representación suficiente para líneas. Sin embargo, a menudo es importante incluir la capacitancia shunt en la representación para líneas y cables paralelo cuando se realizan estudios en donde frecuencias arriba de la armónica 25ª son importantes.

Para las líneas de transmisión, la corrección de líneas largas (transposición y capacitancia distribuidas) deberían ser también empleadas para representar correctamente las características de la línea, figura 3.5.3. Para modelos trifásicos, la corrección de líneas largas es realizada en los modelos de propagación separadamente y luego convertidos de nuevo a magnitudes de fase. Esto se hace por medio de los análisis vectoreigen. Para líneas balanceadas, los modos pueden ser los modos de componente simétricos de vectores eigen.



**Figura 3.5.3**  
**Circuito equivalente de línea larga**

### 3.5.3.4 Modelos de transformadores.

El transformador tiene dos componentes que son de interés:

1. Impedancia de dispersión.
2. Impedancia de magnetización.

Un modelo de impedancia distribuida es generalmente adecuado para la impedancia de fuga. Sin embargo, es importante recordar que el componente resistivo de esta impedancia no es constante con la frecuencia. Una asunción conservadora usada para estudio armónico en sistemas de distribución industrial es que la relación X/R del transformador es constante con la frecuencia y es igual a diez. Para transformadores de potencia en transmisión, la relación X/R está típicamente en el rango de 20-30. Para transformadores de distribución, un rango de 5-10 es más típico.

Si el transformador no es una fuente significativa de armónicos, la impedancia de magnetización puede ser despreciada. Si la producción armónica del transformador es significativa, la rama magnetizante puede ser modelada como una fuente de potencia armónica.

### 3.5.3.5 Modelos de cargas.

Las componentes importantes de la carga para estudios armónicos fueron descritos en la Sección 3.2.3. Ellos son:

1. Transformador reductor
2. Los componentes resistivos
3. Los componentes de motores

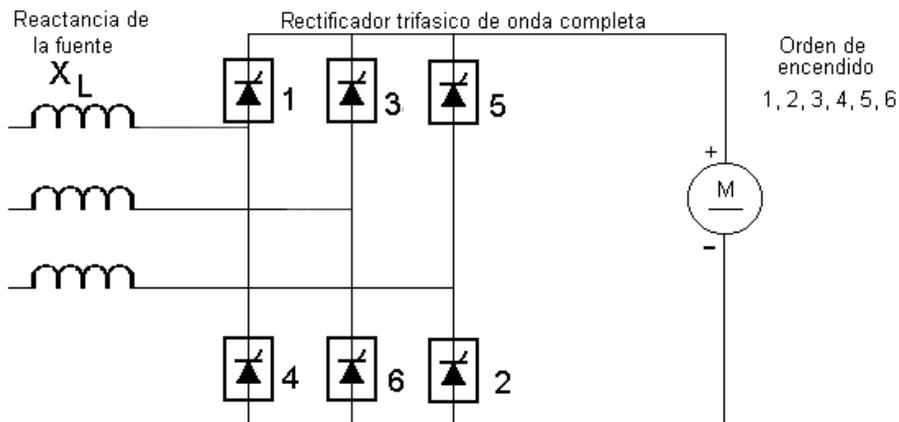
El transformador reductor su modelo se vuelve importante a altas frecuencias ya que es una reactancia en serie con la carga. La componente resistiva suministra amortiguamiento cuando la respuesta del sistema global se encuentra casi en resonancia paralelo (alta impedancia). Las componentes de los motores son importantes ya que pueden desplazar la resonancia del sistema levemente como si fueran una fuente cuya reactancia está en paralelo con la reactancia del sistema.

En general, las cargas del sistema tienen solo un efecto mínimo en las características de respuesta del sistema global a menos que el sistema se encuentre casi en una frecuencia de resonancia. Cuando se encuentran cerca de una resonancia, el efecto de la carga es reducir la impedancia de resonancia pico (amortiguación) o desplazar la frecuencia resonante (inductancia del motor).

### 3.5.4 Cálculos de *notching* de línea (para sistemas de bajo voltaje).

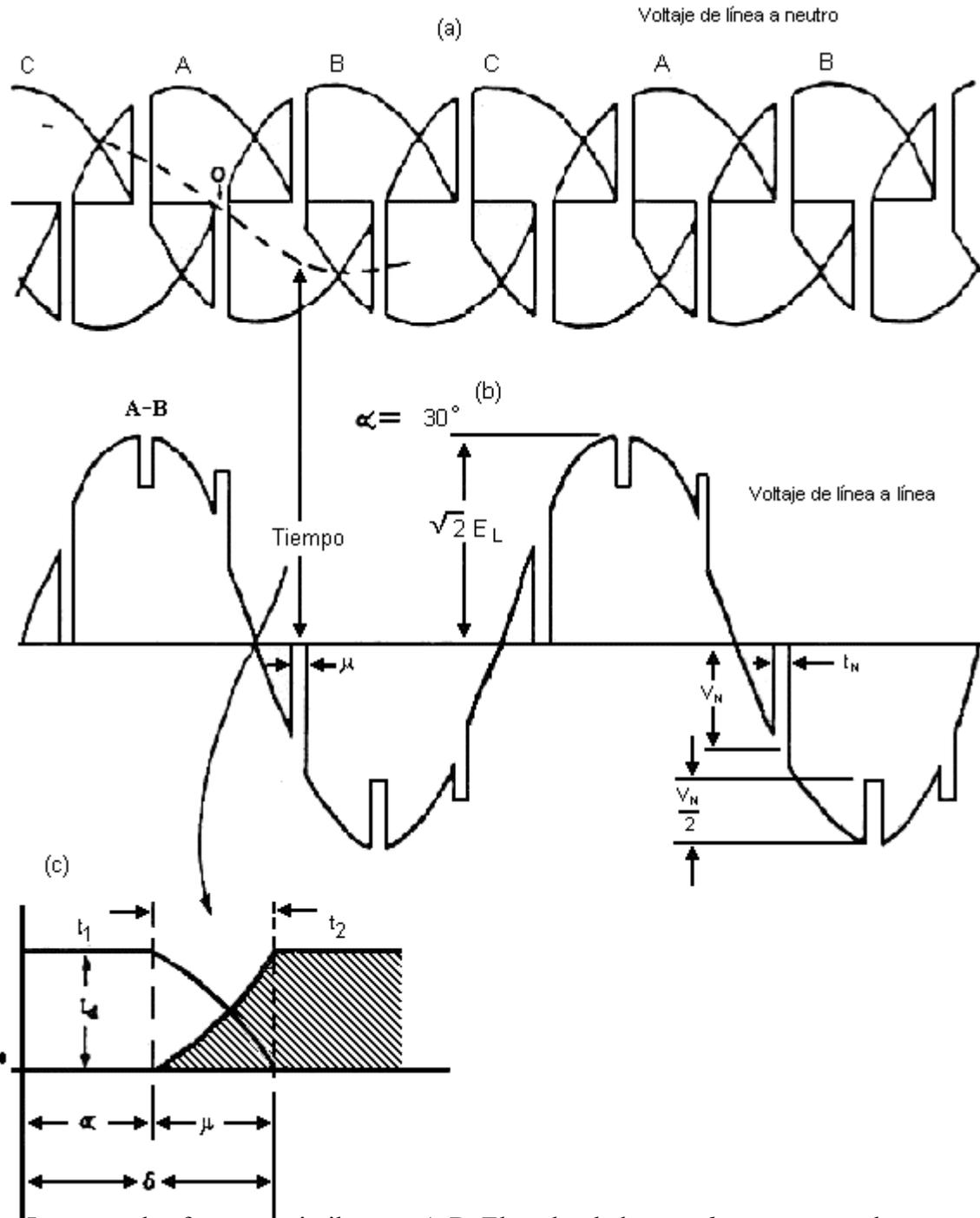
La figura 3.5.4 muestra un puente convertidor completo trifásico típico. Los tiristores funcionan en pares para convertir ca trifásica en cd, conmutando la carga entre los diferentes pares de tiristor 6 veces por ciclo. Durante el proceso, un breve cortocircuito produce un *notch* en la forma de onda de voltaje línea a línea.

La corriente en el convertidor de la figura 3.5.4 ha estado fluyendo desde la fase A, a través del tiristor 1. Cuando el tiristor 3 enciende (figura 3.5.5 (a), (b), y (c)) al tiempo  $t$  ( $30^\circ$  sobre la base del voltaje línea a línea), la corriente comienza a transferirse desde la fase A hacia la fase B. La reactancia de la fuente impide la transferencia instantánea, de manera que el tiempo de conmutación (ángulo) requerido se vuelve el ancho del *notch* ( $\mu$ ).



**Figura 3.5.4**  
**Convertidor de onda completa trifásico**

El *notch* resultante se muestra sobre la base línea a neutro en la figura 3.5.5(a) y sobre la base línea a línea en la figura 3.5.5(b). Ésta última claramente ilustra la acción de corto entre ambos tiristores 1 y 3 cuando están conduciendo simultáneamente. Los otros *notches* reflejan la acción de los tiristor en las otras fases de la circuitería ca.



Nota: Las otras dos fases son similares a A-B. El ancho de los *notches* es exagerado.

**Figura 3.5.5**  
**Notches de voltaje**

### 3.5.4.1 Cálculos del área del *notch*.

El área del *notch* depende de los voltio-segundos absorbidos en el circuito desde la fuente al punto del circuito de interés. El área del *notch* es una indicación del efecto que el convertidor de potencia estática tendrá en otras cargas.

El área del *notch* se calcula (ver la figura 3.5.6) de la manera siguiente:

$$V_N = \frac{L_L e}{L_L + L_t + L_s} \quad (3.5.6)$$

$$t_N = \frac{2(L_L + L_t + L_s)I_d}{e} \quad (3.5.7)$$

$$A_N = V_N t_N \quad (3.5.8)$$

Donde:

$V_N$  = Amplitud del *notch* en voltios (L-L) del *notch* más profundo del grupo

$t_N$  = Ancho del *notch* en microsegundos

$I_d$  = Corriente cd del convertidor en amperios

$e$  = Voltaje instantáneo (L-L) justamente antes del *notch* en las líneas a ser conmutadas

$L$  = inductancia en henrys por fase

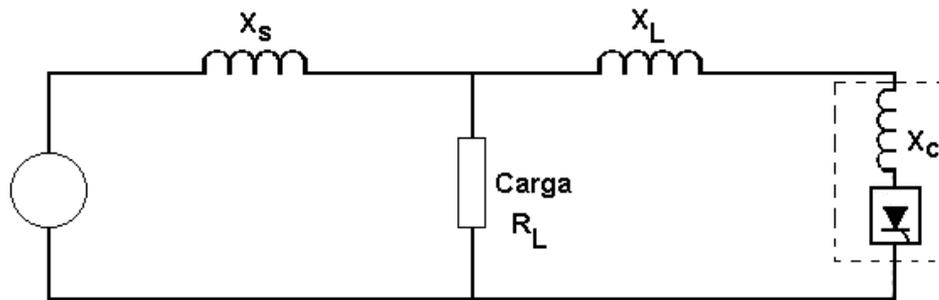
$A_N$  = Área del *notch* en voltio-microsegundos

También:

$$e = \sqrt{2}E_L \quad (3.5.9)$$

Combinando las ecuaciones anteriores:

$$A_N = 2I_d L_L \quad (3.5.10)$$



**Figura 3.5.6**  
**Diagrama de impedancia**

### 3.5.4.2 Cálculo de la inductancia de fuente, inductancia del transformador (hasta 600 V)

Los transformadores del tipo secos usados en convertidores tienen aproximadamente igual reactancia y resistencia cuando se consideran las características transitorias en el fenómeno de conmutación. Las ecuaciones siguientes pueden ser aplicadas:

$$\text{Inductancia del transformador} = \frac{X}{(\sqrt{2})(2 \cdot \pi \cdot f)} \frac{E_L}{\sqrt{3}I_1} \quad \text{Henrys} \quad (3.5.11)$$

Donde (línea neutro)

$X$  = Reactancia por unidad de placa del transformador

$E_L$  = Voltaje línea a línea nominal

$I_1$  = Carga ca nominal

$f$  = Frecuencia de línea

Lo anterior asume  $X_L = R_L$

### 3.5.4.3 Cálculo de la inductancia de línea.

Típicamente la inductancia de línea por fase en un sistema trifásico ca puede ser considerada de  $0.3 \mu\text{H} / \text{pie}$ , o  $1 \mu\text{H}/\text{m}$ .

### 3.5.5 Distorsión total armónica.

La distorsión total armónica (THD) es usada para definir los efectos de los armónicos en el voltaje del sistema de potencia. Se usa en sistemas de bajo voltaje, medio voltaje, y alto voltaje. Se expresa como un porcentaje de la fundamental y está definida como:

$$THD = \left( \frac{\text{suma de los cuadrados de las amplitudes}}{\text{de todos los voltajes armónicos}} \right)^{1/2} \cdot 100\% \quad (3.5.12)$$

$$\frac{\text{el cuadrado de la amplitud}}{\text{del voltaje fundamental}}$$

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (3.5.13)$$

( Ver la sección 3.1 para armónicos específicos generados por cargas diferentes.)

### 3.5.5.1 Relación entre *notching* de línea y distorsión para armónicos.

De lo anterior:

Para  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  y  $E_L = 460 \text{ V}$

$$V_H = \sqrt{\sum_{h=5}^{\infty} (V_h^2)} = \sqrt{\frac{2^* V^2 t_N + 4^* \left(\frac{V_N}{2}\right)^2 t_N}{\frac{1}{f_1}}} \quad (3.5.14)$$

\* El (2) se refiere a los dos *notches* profundos y el (4) se refiere a los cuatro medio *notches*

$$V_H = \sqrt{3V^2 t_N f_1} \quad (3.5.15)$$

$$\rho = \frac{L_L + L_t + L_s}{L_L} \quad (3.5.16)$$

$$V_{NMAX} = \frac{\sqrt{2} E_1}{\rho} \quad (3.5.17)$$

$$A_N = V_N t_N \quad (3.5.18)$$

$$TDH_{MAX} = \sqrt{\frac{3\sqrt{2} \cdot 10^{-6} A_N f_1}{\rho E_L}} \cdot 100\% \quad (3.5.19)$$

Donde :

$$TDH_{MAX} = 0.074 \sqrt{\frac{A_N}{\rho}} \% \quad (3.5.20)$$

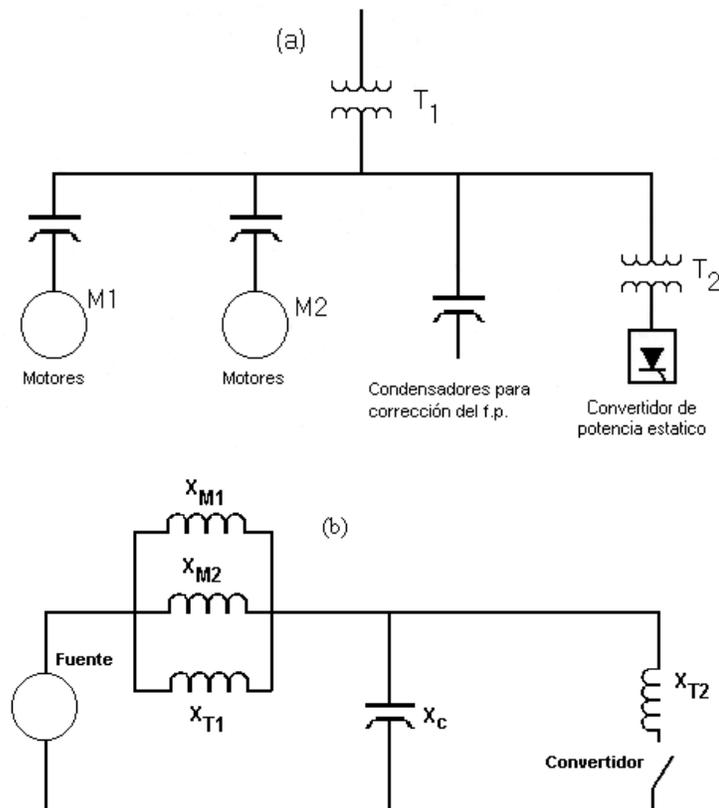
$\rho$  = La relación de la inductancia total entre la inductancia común del sistema

$f_1$  = Frecuencia fundamental del sistema de potencia

$V_H$  = Suma de voltajes armónicos rms

### 3.5.6 Cálculos del sistema ( Bajo voltaje, menos de 1000 V).

Una sistema de distribución de una planta típica se muestra en la figura 3.5.7(a) y un diagrama de impedancia en la figura 3.5.7(b). El sistema puede ser considerado un circuito RLC. Puesto que el rectificador puede ser considerado un cortocircuito, durante la conmutación, se reemplaza por un interruptor de cuchilla en el circuito simplificado. La impedancia equivalente del transformador debe ser incluida en el diagrama simplificado.



**Figura 3.5.7**

**(a) Sistema típico de potencia y (b) Diagrama de impedancia equivalente**

### 3.5.6.1 Factor de amortiguamiento del sistema.

En la mayoría de los sistemas, el transformador rectificador más la impedancia de línea es mucho mayor que la impedancia del transformador de distribución de manera que el transformador de distribución puede ser despreciado al calcular el factor de amortiguación y la frecuencia natural.

En un circuito resonante serie las siguientes ecuaciones pueden ser empleadas:

$$\text{Factor de amortiguamiento} = \frac{R}{2} \left( \frac{C}{L} \right)^{0.5} \quad (3.5.21)$$

$$\text{Frecuencia Natural, } \omega = \left( \frac{1}{LC} \right)^{0.5} \text{ rad/s} \quad (3.5.22)$$

$$\text{Frecuencia Natural, } f = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{LC} \right)^{0.5} \text{ Hz} \quad (3.5.23)$$

Para equipo de bajo-voltaje, el factor de amortiguación del sistema debería ser mayor que 0.5 cuando la frecuencia natural del sistema es menor que 2100 Hz (la armónica 35ª sobre la base de 60 Hz). A frecuencias mayores que 2100 Hz, el incremento en las pérdidas del sistema, tales como el efecto piel, proveen amortiguación adicional.

### 3.5.7 Cálculo para corrección del factor de potencia.

Ya que la potencia reactiva varía en un accionamiento de velocidad variable (ASDs) a tiristores de un motor dado, dependiendo de la velocidad de funcionamiento y el torque, los requerimientos pueden incrementar en más del 100% desde la velocidad máxima hasta la velocidad inferior. No se puede aplicar un solo valor de capacitancia a un accionamiento simple para mantener una potencia reactiva constante a lo largo de los rango de operación. (los convertidores PWM con rectificadores a diodo son una excepción.)

Sin embargo, un grupo de tales ASDs pueden, por su diversidad, reflejar un requerimiento más uniforme de kilovar. Los datos de medidores de potencia y medidores de var obtenidos sobre un período representativo de tiempo establecerán la factibilidad de aceptar condensadores fijos para mejorar el factor de potencia. En muchos casos las facturas de las compañías distribuidoras, suministrarán esta información para dimensionar un condensador de potencia o para ahorro de energía. Las tarifas de las compañías distribuidoras difieren con respecto a la potencia reactiva de manera que cada uno debe ser estudiado y evaluado sobre una base individual.

El conocimiento detallado del modo de operación de los ASDs individuales en un grupo puede ser usado para establecer un valor meta de kvars a añadir para compensación reactiva. Cada valor en kW y kvar del accionamiento se derivan de los datos característicos de carga y

velocidad, tomando en cuenta las variaciones básicas del modo de operación. La suma de esos valores en kW y kvar junto con otros datos similares para otras cargas establecerán una base global sobre la cual dimensionar los requerimientos suplementarios en kvar. Si los convertidores son usados para otros propósitos diferentes de ASDs de motores, consideraciones similares serán requeridas para la carga en cada caso.

A continuación se muestra un ejemplo que ilustra este método, el cual está basado en la carga de una planta particular. Por brevedad, la carga real de la planta se consolida en este listado.

Motores de inducción:

$$1200 \text{ kW @ } 0.80 \text{ PF} = 900 \text{ kvars}$$

$$900 \text{ kW @ } 0.70 \text{ PF} = 918 \text{ kvars}$$

Accionamientos cd Tiristor:

$$600 \text{ kW @ } 0.70 \text{ PF} = 612 \text{ kvars}$$

$$1100 \text{ kW @ } 0.50 \text{ PF} = 1905 \text{ kvars}$$

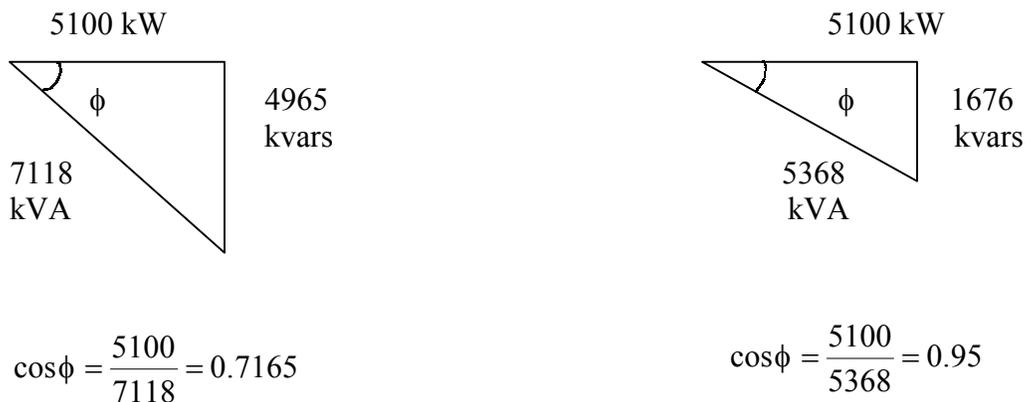
Otras Cargas:

$$1300 \text{ kW @ } 0.90 \text{ PF} = 630 \text{ kvars}$$

---


$$\text{Total } 5100 \text{ kW @ } 0.716 \text{ PF} = 4965 \text{ kvars}$$

La figura 3.5.8 ilustra el bajo factor de potencia (0.7165) asociado con esta carga y que un agregado de 3289 kvars es necesario para mejorar el factor de potencia a 0.95. La cantidad de compensación reactiva, dependerá de la economía de compensación respecto a la facturación de la compañía distribuidora. Una estructura de tarifas dadas podría hacer que la compensación al factor de potencia unitario sea económica.



**Figura 3.5.8**  
**Triángulo de potencia reactiva para mejorar el factor de potencia.**

Un banco de condensadores de 3300 kvar es construido fácilmente con unidades estándar. Asumiendo que cada banco se aplica en una planta para un bus de alimentación de 4160V, la resonancia en quinta armónica ocurrirá si la capacidad de cortocircuito es aproximadamente 80MVA.

$$H_{res} = \left( \frac{MVA_{sc}}{M \text{ var}_{cap}} \right)^{0.5} = \left( \frac{80}{3.3} \right)^{0.5} = 4.92 \quad (3.5.24)$$

Similarmente, la resonancia a la séptima armónica ocurrirá en aproximadamente 150 MVA.

$$H_{res} = \left( \frac{150}{3.3} \right)^{0.5} = 6.74 \quad (3.5.25)$$

Dependiendo del nivel de cortocircuito real del sistema, se puede requerir un inductor de sintonización en cada fase. De ser necesario, se debería seleccionar para la supresión de la quinta armónica. Cambiando el tamaño del condensador también se puede controlar el punto de resonancia con algún sacrificio en corrección del factor de potencia.

El inductor de sintonización está dimensionado para tomar en cuenta los kvar del banco de condensadores reales (medida), los cuales pueden ser hasta un 5% mayores del valor nominal de placa. La reactancia del condensador ( $X_{cap}$  a la frecuencia fundamental) es:

$$\begin{aligned} X_{cap} &= \frac{kV^2}{MVA} = \frac{4.16^2}{(3.3)(1.05)} \\ &= 4.99 \Omega \end{aligned} \quad (3.8.26)$$

$$X_r = \frac{X_c}{h^2} = \frac{4.99}{25} = 0.20 \Omega$$

Donde:

$X_r$  = Reactancia del inductor de sintonización a la frecuencia fundamental

1.05 = Tolerancia del condensador

Así, el inductor de sintonización debería de tener 0.20  $\Omega$  por reactancia de fase a frecuencia fundamental y una disponibilidad de conducción de corriente por lo menos igual a la requerida por el condensador.

La pregunta con respecto al efecto de los bancos de condensadores de potencia a veces proviene de la respuesta del convertidor. Ningún efecto adverso en la respuesta se debería

esperar mientras la resonancia armónica no se presenta a una armónica característica. Realmente, un banco de condensadores de potencia robustece la respuesta transitoria ca del sistema y mejora teóricamente el tiempo de respuesta.

### **3.6 Mediciones.**

#### **3.6.1 Generalidades.**

Las mediciones de corriente y los voltajes armónicas son esenciales para la distribución fiable de energía eléctrica. Siguiendo algunas razones que destacan la importancia de las mediciones:

1. Verificar los niveles existentes de armónicas y chequear contra los niveles recomendados o admisibles.
2. Probar equipos que generan armónicos.
3. Diagnosticar y corregir situaciones en donde el desempeño del equipo es inaceptable para la distribuidora o el usuario.
4. Observar niveles de fondo existentes y rastrear las tendencias en el tiempo de los voltajes y corrientes armónicos (patrones diarios, mensuales y estacionales).
5. Medir para verificación de estudios de simulación que incluyen cargas y flujos armónicos.
6. Medición de voltajes y corrientes armónicas con su respectivo ángulo de fase. Tales mediciones pueden ser hechas con y sin una fase de las cargas no lineales conectadas, que pueden ayudar a determinar la impedancia en el punto de accionamiento armónico en un punto dado.

Las técnicas usadas para las mediciones armónicas difieren de las mediciones ordinarias en sistema de potencia. El ancho de banda de las medidas ordinarias de voltaje, corriente y potencia puede ser realizado con atención a una banda estrecha de frecuencias cerca de la frecuencia de distribución. Anchos de banda sustancialmente más amplios (hasta 3 kHz) son requeridos en el estudio de los armónicos en los sistemas de potencia.

#### **3.6.2 Equipo básico usado para el análisis de voltajes y corrientes no sinusoidales.**

##### **3.6.2.1 Osciloscopio.**

La presentación de la forma de onda en el osciloscopio da información cualitativa inmediata sobre el grado y tipo de distorsión. Algunos casos de resonancias son identificables por medio de la distorsión visible que es presente en las formas de onda de voltaje y corriente.

### **3.6.2.2 Analizadores de Espectro.**

Estos instrumentos muestran la distribución de potencia de una señal como una función de la frecuencia. Un cierto rango de frecuencias es barrido y todos los componentes, armónicos y ínter armónicos de la señal analizada son mostrados. El formato de presentación puede ser un dispositivo de *tubo de rayos catódicos* (CRT) o un registro de papel.

### **3.6.2.3 Analizadores de Armónicas o Analizadores de onda.**

Estos instrumentos miden la amplitud (en unidades más complejas, del ángulo de fase) de una función periódica. Estos instrumentos proveen espectro de línea de una señal observada. La salida puede ser registrada o puede ser monitoreada con medidores analógicos o digitales.

### **3.6.2.4 Analizadores de Distorsión.**

Estos instrumentos indican directamente la *Distorsión Armónica Total* (THD)

### **3.6.2.5 Equipo de medición Armónico Digital.**

El análisis digital puede ser realizado por dos técnicas básicas.

1. Por medio de filtro digital. Este método es similar al filtrado análogo. Los analizadores de señal digital de doble canal incluyen filtrado digital. En el montaje para una medición particular, el rango de frecuencia al ser recibido establece los filtros digitales para dicho rango. También, el ancho de banda se varía para optimizar la captura de armónicos pequeños en presencia de una fundamental muy grande.
2. La Técnica *Transformada Rápida de Fourier* (FFT). Estos son métodos muy rápidos en tiempo real para realizar análisis de espectro, que permiten la evaluación de un gran número de funciones. La conversión analógico-digital Multicanal y micro o mini computadoras son usadas para adquisición de datos en tiempo real.

Cuando la forma de onda es registrada con ancho de banda adecuado utilizando ya sea técnicas analógicas o digitales, *on-line*, en calculo FFT de componentes armónicos, conversión a unidades de ingeniería, cálculo de estadísticas, graficación e impresión de resultados puede ser realizada en el laboratorio utilizando cualquier recurso adecuado.

## **3.7 Prácticas recomendadas para los consumidores individuales.**

### **3.7.1 Generalidades.**

Esta sección describe los límites de distorsión de corriente que aplican a consumidores individuales de energía eléctrica. La sección 3.8 describe la calidad de la potencia eléctrica que el productor debe suministrar al consumidor. Estas limitaciones son para el beneficio de todas las partes involucradas. Esta recomendación reemplaza la norma IEEE 519-1981 y se

concentra en el punto de acoplamiento de común (PCC) con la interfase consumidor distribuidora. Ésta específicamente excluye aquellas instalaciones de corriente directa alto voltaje (HVDC) y sistemas de control de var estático (SVC) que son propiedad y son operados por la distribuidora. Tales instalaciones, que son generalmente grandes en capacidad nominal en MVA con impacto sustancial sobre el funcionamiento del sistema de potencia completo, justifican estudios armónicos más extensivos y un método más conservador del control armónico que aquellos recomendados aquí.

Sería ideal si fuera posible controlar los armónicos, a tal grado que los efectos de las armónicas provocados por la conexión de cargas productoras de armónicas, fueran nulas en todos los puntos en el sistema completo abarcando los circuitos propios del consumidor, el circuito de la distribuidora, y los circuitos de otros consumidores. Sin embargo, en realidad, los factores económicos y la efectividad del control armónico deben ser balanceados, y algunos efectos armónicos son inevitables en algunos puntos del sistema. La recomendación descrita en este documento intenta reducir los efectos de los armónicos en cualquier punto en el sistema completo estableciendo límites sobre ciertos indicadores armónicos seguros (corrientes y voltajes) al *punto de acoplamiento común* (PCC), un punto de medición, o cualquier punto, en tanto la distribuidora y el consumidor pueden acceder al punto para las mediciones directas de los índices armónicos significativos para ambos o estimar los índices armónicos en el punto de interferencia (POI) por medio de métodos aceptables para ambos. Dentro de una planta industrial, el PCC es el punto entre la carga no lineal y las otras cargas.

Los buenos índices armónicos están caracterizados por:

- Los valores dados por los índices armónicos deberían ser físicamente significativos y correlacionados estrechamente a la severidad de los efectos armónicos.
- Debería ser posible determinar por medio de mediciones si los límites sobre los índices armónicos se cumplen.
- Los índices armónicas deben tener orígenes simples y prácticos de manera que puedan ser usados ampliamente con facilidad.

Los índices armónicos recomendados son:

- Profundidad de *notch*, área total de *notch*, y distorsión (RSS) del voltaje del bus distorsionado por los *notches* de conmutación ( sistemas de bajo voltaje).
- Distorsión Individual y distorsión total de voltaje.
- Distorsión Individual y distorsión total de corriente.

Las mediciones armónicas deberían ser desarrolladas de vez en cuando para determinar comportamiento del sistema y el desempeño del equipo. El consumidor debería confirmar:

- Que los condensadores de corrección del factor de potencia o filtros armónicos no están siendo sobre saturados por armónicas excesivas.
- Que no tiene lugar resonancia serie y paralela.
- Que el nivel de armónica en PCC y los puntos de utilización no es excesiva.

### **3.7.2 Desarrollo de Límites de Distorsión de corriente.**

La filosofía para desarrollar límites armónicos en este estándar es:

1. Limitar la inyección armónica para los consumidores individuales de manera que ellos no van ha provocar niveles de distorsión voltaje inaceptable para características de sistema normales.
2. Limitar la distorsión armónica total del voltaje de sistema suministrado por la distribuidora.

Para desarrollar límites para la inyección de corrientes armónica para consumidores individuales, primero es necesario definir qué se entiende por características normales del sistema.

Para este propósito, se asume que el sistema puede ser caracterizado por una impedancia de cortocircuito. El efecto de condensadores se desprecia. Ésta es una asunción conservadora para frecuencias más altas en donde los condensadores pueden proveer trayectorias de baja impedancia para que circulen las corrientes armónicas. A frecuencias menores, las condiciones resonantes poden provocar que la impedancia del sistema sea mayor que la impedancia asumida de cortocircuito. Los efectos de las cargas también son despreciados. El efecto más importante de las cargas es proveer amortiguamiento cerca de frecuencias sonoras, los efectos más importantes de las cargas es que establecen amortiguamiento cerca de la frecuencia de resonancia reduciendo la impedancia vista por la fuente corriente armónica.

La distorsión de voltaje armónico será dada como una función de la corriente armónica total inyectada en el sistema y la impedancia de sistema en cada una de las frecuencias armónicas. La corriente armónica inyectada total dependerá del numero de consumidores individuales inyectando corrientes armónicas y el tamaño de cada consumidor. Por lo tanto, un método razonable para limitar las corrientes armónicas para consumidores individuales es hacer que los límites dependan del tamaño del consumidor. Los grandes consumidores tendrán límites más estrictos puesto que ellos representan una porción mayor de la carga total de sistema. En la tabla 3.7.2. el tamaño de consumidor se expresa como la relación entre la capacidad de corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común de los consumidores con la distribuidora, y la corriente de carga máxima del consumidor. Para todos los límites de corrientes armónicas individuales son expresados como porcentaje de esta corriente de carga máxima (demanda).

Los objetivos de los límites de corriente son limitar la armónica individual de voltaje máximo al 3% de la fundamental y el THD de voltaje de 5% para sistemas sin una resonancia paralela de importancia como una de las frecuencias armónicas inyectadas. Estos límites de distorsión de voltaje son desarrollados en la Sección 3.8.

Los límites de corrientes desarrolladas asumen que hay alguna diversidad entre las corrientes armónicas inyectados por diferentes consumidores. Esta diversidad puede estar en forma de componentes armónicos diferentes, siendo inyectados, diferencias en los ángulos de fase de las corrientes armónicas individuales, o diferencias en la inyección armónica vrs. perfiles de tiempo. En reconocimiento de esta diversidad de límites de corrientes, son desarrollados de manera que la frecuencia armónica de nivel máximo de voltaje provocada por un solo consumidor no excederá los límites en la tabla 3.7.1 para sistemas que pueden ser caracterizados por una impedancia de cortocircuito.

**Tabla 3.7.1**  
**Bases para los límites de corrientes armónicas.**

SCR a PCC	Armónico individual de voltaje máximo en %	Suposición relacionada
10	2.5-3.0%	Sistema dedicado
20	2.0-2.5%	1-2 o grandes consumidores
50	1.0-1.5%	Unos pocos consumidores relativamente grandes
100	0.5-1.0%	5-20 consumidores de tamaño medio
1000	0.05-0.10%	muchos consumidores pequeños

Si los consumidores individuales cumplen con los límites de distorsión de corriente y no hay suficiente diversidad entre la inyección armónica de los consumidores individuales, entonces puede ser necesario implementar alguna forma de filtrado sobre el sistema de la distribuidora para limitar los niveles de distorsión de voltaje. Sin embargo, es más probable que esos problemas de distorsión de voltaje sean causados por características de respuesta en frecuencia del sistema que dan como resultado la ampliación de corrientes armónicas a una frecuencia armónica particular. Este cambio en las impedancias del sistema versus la característica de frecuencia es un resultado de la configuración física del sistema. Esta situación debe ser resuelta en el sistema de la distribuidora ya sea cambiando las ubicaciones de los tamaños de los condensadores o diseñando un filtro armónico.

### **3.7.3 Límites del *Notch* de Conmutación.**

La profundidad del *notch*, el factor de distorsión total (THD), y el área del *notch* de voltaje línea a línea en PCC debería ser limitado tal como se muestra en la tabla 3.7.2.

**Tabla 3.7.2**  
**Clasificación de sistema de bajo voltaje y limites de distorsión**

	Aplicaciones Especiales <sup>a</sup>	Sistemas generales	Sistemas Dedicados <sup>b</sup>
Profundidad del <i>notch</i>	10%	20%	50%
TDH (voltaje)	3%	5%	10%
Area del <i>notch</i> (A <sub>N</sub> ) <sup>c</sup>	16,400	22,800	36,500
Nota: El valor de A <sub>N</sub> para sistemas diferentes de 480V voltaje debería ser multiplicado por V/480			

En donde:

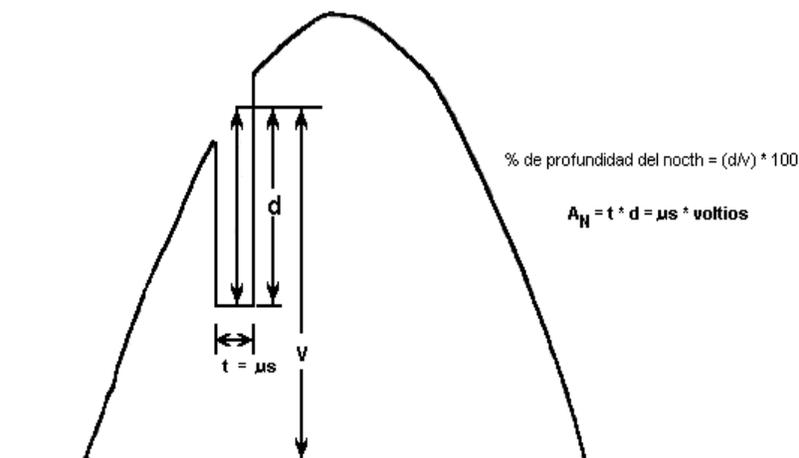
<sup>a</sup> Aplicaciones especiales incluye hospitales y aeropuertos

<sup>b</sup> un Sistema dedicado es exclusivamente para la carga del convertidor.

<sup>c</sup> - en voltios-microsegundos a voltajes y corrientes nominal

Estos límites son recomendados para los sistemas de bajo voltaje donde el área de *notch* es fácilmente medida en un osciloscopio. Debe notar que el factor de distorsión de voltaje total se relaciona al área de *notch* total A<sub>N</sub> por la igualdad dada en la Sección 3.5.5, ecuación 3.5.20.

La figura 3.7.1 define la profundidad en el área del *notch*.



**Figura 3.7.1**  
**Definición del área y profundidad del *notch***

### 3.7.4 Límite de distorsión de corriente.

Idealmente, la distorsión armónica causada por un solo consumidor debería estar limitada a un nivel aceptable en cualquier punto del sistema. El sistema completo debería ser operado sin distorsión armónica sustancial en cualquier lugar del sistema. Los límites de distorsión

armónica recomendados aquí establecen la distorsión de corriente permisible máxima para un consumidor. Los límites de distorsión de corriente recomendados se relacionan con el índice siguiente:

TDD: *Distorsión de Demanda Total, (RSS)* es la *distorsión de corriente armónica* en % de la corriente de carga de demanda máxima (demanda de 15 a 30 minuto).

Los límites citados en las tablas 3.7.3, 3.7.4, y 3.7.5; deberían ser usados como valores de diseño del sistema para el " caso peor " para la operación normal (condiciones que duran más de una de hora). Para períodos cortos, durante los arranques o condiciones inusuales, los límites pueden ser excedidos por 50%.

Estas tablas son aplicables a los rectificadores de seis pulsos y a situaciones de distorsión general. Sin embargo, cuando se usan los transformadores de desplazamiento de fase o convertidores con números de pulso (q), mayores que seis, los límites para las ordenes armónicas características se incrementan por un factor igual a:

$$\sqrt{\frac{q}{6}}$$

dado que las amplitudes de ordenes armónicas no características son menores que el 25% de los límites especificados en las tablas (Vea Sección 3.10.1 por ejemplo).

**Tabla 3.7.3**  
**Limites de distorsión de corriente para un sistema de distribución general**  
**(De 120 hasta 69000 voltios)**

LIMITE DE CORRIENTE ARMONICA MAXIMO EN PORCENTAJE (%) DE I <sub>L</sub>						
ORDEN ARMONICO INDIVIDUAL (ARMÓNICOS IMPARES)						
I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
< 20*	4.0	20.	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
Las armónicas pares están limitadas al 25% de los limites de los armónicos impares mostrados arriba.						
La distorsión de corriente que dan como resultado un desplazamiento de corriente directa, por ejemplo en los convertidores de media onda no son permitidos.						
*Todos los equipos de generación de potencia están limitados a esos valores de distorsión de corrientes indiferentemente del I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub> real.						
Donde I <sub>sc</sub> = Es la corriente de corto circuito máxima de PCC I <sub>L</sub> = Es la corriente de carga de demanda máxima( componente de frecuencia fundamental) de PCC						

La tabla 3.7.3 lista los límites de corrientes armónica basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia al cual la carga es conectada. La relación  $I_{cs}/I_L$  es la relación de la corriente de cortocircuito disponible en el punto de acoplamiento común (PCC), y la corriente de carga fundamental máxima. Es recomendable que la corriente de carga  $I_L$ , sea calculada como la corriente promedio de la máxima demanda para los doce meses anteriores. De esta manera a medida que el tamaño de la carga del usuario disminuye con respecto al tamaño del sistema, mayor es el porcentaje de corriente armónica que se le permite al usuario inyectar dentro del sistema de la distribuidora. Esto protege a otros usuarios en el mismo alimentador también como a la distribuidora, la cual está obligada a suministrar una cierta calidad de la potencia a sus consumidores.

**Tabla 3.7.4**  
**Limites de Distorsión de corriente para Sistemas de Subtransmisión Generales**

Los Limites de corriente armónica para cargas no lineales en el punto de acoplamiento común con otras cargas, (69-161 KV)						
ORDEN ARMONICO INDIVIDUAL (ARMONICO IMPAR)						
Isc/IL	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
< 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
Las armónicas pares se limitan al 25% de las armónicas impares mencionadas arriba.						
*Todos los equipos de generación de potencia están limitados a estos valores de distorsión de corrientes, sin considerar real						
Donde Isc = Corriente de corto circuito máxima de PCC y IL = Corriente de carga de demanda máxima( componente de frecuencia fundamental) de PCC						

**La tabla 3.7.5**  
**Limites de distorsión de corriente para sistemas de alto voltaje (> 161 kV) y para generación Dispersa y Cogeneración.**

ORDEN ARMONICO INDIVIDUAL (ARMONICO impares)						
Isc/IL	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<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
Los armónicos pares se limita al 25% de las armónicas impares mencionadas arriba.						

### **3.7.4.1 Consideraciones para calentamiento de transformadores.**

Los límites de distorsión de corriente armónica tal como se describen en las tablas 3.7.3 y 3.7.4 son permisibles solamente si el transformador conectando al usuario con el sistema de distribución no está sujeto a corrientes armónicas mayores que el 5% de la corriente nominal de transformador tal como se establece en el estándar ANSI/IEEE C57.12.00 - 1980 [2]. Si el transformador conectando al usuario está sujeto a niveles armónicos mayores al 5%, debería de considerar que en la instalación de una unidad de mayor tamaño, capaz de soportar los niveles generados de armónica. Cuando la corriente armónica fluyendo a través del transformador es mayor que el nivel de diseño del 5% de la corriente nominal, el efecto de calentamiento del transformador debería ser evaluado aplicando la metodología contenida en el Estándar ANSI/IEEE C57.110 [3]. Esta evaluación asegurará que el aislamiento de transformador no sea saturado más allá de los límites de diseño.

## **3.8 Practica recomendadas para las distribuidoras.**

### **3.8.1 Generalidades.**

Los factores que definen la calidad de servicio eléctrico incluyen distorsión armónica además de factores más familiares tal como seguridad de servicio (protección contra transitorios y voltaje de paso y toque), continuidad de servicio, regulación de voltaje, y *flicker*. Los límites de distorsión recomendados en esta sección establece la distorsión de voltaje máxima en el punto de acoplamiento común (PCC) a cada consumidor.

Si los límites se han excedido, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Realizar mediciones armónicas en puntos seleccionados dentro del circuito de la distribuidora incluyendo PCC y buscar consumidores con convertidores que operan con la distorsión de corriente más allá de los límites. Si son identificados, a tales consumidores deberían solicitar mantener la distorsión armónica dentro de los límites instalando filtros, reduciendo la generación armónica, o mediante otros medios.

Instalar filtros para controlar las armónicas. Instalar un nuevo alimentador. Esto es efectivo para robustecer la fuente y aislar los problemas armónicos. Sin embargo, no siempre es factible económicamente.

Se debe notar que es posible agregar nuevas cargas convertidoras a un circuito ya contaminado con armónicos dentro de los límites recomendados, si se instalan filtros diseñados adecuadamente.

### **3.8.2 Suma de armónicas.**

La relación de fase de las corrientes armónicas generada por un convertidor a la fuente de voltaje del convertidor está determinado por el ángulo de fase al cual comienza la conmutación y el orden armónica. Las corrientes armónicas generadas por convertidores pertenecientes a diferentes consumidores conectados a la misma sección del circuito de alimentador se sumarán

posteriormente de acuerdo a las impedancias armónicas del circuito. La suma de armónica es conceptualmente simple, pero la suma rigurosa de armónica es prácticamente imposible y virtualmente carente de significado debido a la naturaleza estadística de la generación de corriente armónica y la cantidad prohibitiva de datos detallados que son requeridos.

Un método simple, aproximado y conservador de suma de armónicas es recomendable; primero resolver separadamente el circuito para cada fuente armónica y determinar las corrientes de rama y el voltaje de nodo provocados por la fuente armónica, y luego sumarlos aritméticamente. Los factores de coincidencia de las cargas convertidoras pueden ser usados para refinar la suma de tales datos ya establecidos.

Las mediciones armónicas deben ser realizadas desde un buen punto, en puntos seleccionados en donde se sospecha una distorsión armónica de alto nivel, para determinar el comportamiento del sistema, y confirmar:

- Que los condensadores de la distribuidora, filtros, cables, y transformadores no están siendo sobre tensionados por armónicos excesivos.
- Que un grado peligroso de resonancia en serie o paralelo no está teniendo lugar.
- Que el nivel de armónicos está dentro de los límites

El análisis armónico basados en los factores de coincidencia de las cargas convertidoras debe ser hecho para evaluar el resultado de las mediciones y para extrapolar los resultados para la evaluación de los efectos de los nuevos convertidores a ser instalados. No se recomienda depender solamente de una suma analítica extensiva de los armónicos.

### **3.8.3 Armónicos de corta duración.**

Los dispositivos tales como ASDs controlados por tiristores aplicados a laminadores generan ráfagas de corta duración de corrientes armónicas a medida que el material pasa a través del laminador. La generación de armónicas intermitentes y el seccionamiento de voltaje resultante de los condensadores, transformadores, y otros aparatos de potencia es algunas veces más tolerable que el tensionamiento causado por la generación constante de armónicos. Los armónicos intermitentes y los armónicos constantes van a causar efectos similares en lo referente a interferencias armónicas a circuitos de control, circuitos de comunicación, y equipo electrónico. Es probable, sin embargo, que el *flicker* sea el mayor problema, en este caso y los problemas armónicos sean secundarios. Una solución al problema de *flicker* también puede eliminar los problemas armónicos.

### **3.8.4 Condiciones anormales para problemas armónicos.**

Algunas de las condiciones menos comunes que se conocen que causen problemas armónicos se describen aquí. Ellos son la resonancia natural de la línea de transmisión, sobreexcitación de transformadores, y resonancia armónica en circuitos de secuencia cero.

Cada línea de transmisión puede tener muchas frecuencias o resonancias naturales determinadas por la longitud, la geometría, y la terminación. La impedancia de entrada en una línea de transmisión puede llegar a ser cercana a cero y resistiva (resonancia serie) o infinitamente grande (resonancia paralela) a las frecuencias resonantes naturales. Si la frecuencia de resonancia serie es cercana a uno de los armónicos dominantes generado por convertidores, existe un riesgo de interferencia telefónica severa. El problema puede ser corregido cambiando la frecuencia natural de la línea de transmisión (cambiando la terminación o la longitud de línea) o evitando el flujo de corriente armónica en la línea por medio de un filtro de rotor serie, un filtro shunt o ambos. Desafortunadamente, estas soluciones son generalmente muy costosas.

Debido a las características del núcleo del transformador, los transformadores sobreexcitados generan armónicos de orden impar. Existe una tendencia a operar circuitos de alto voltaje con voltajes excesivamente mayores que los nominales por la conexión de bancos de condensadores justo antes que incremente la carga diaria. Esto asegura un flujo de carga deseado y estabilidad de voltaje, pero puede causar problemas armónicos. El Exceso de potencia reactiva durante condiciones de carga leves pueden causar problemas similares.

Una resonancia armónica puede ocurrir en el circuito de secuencia cero bajo las siguientes condiciones:

- a) Los neutros del generador conectados en estrella están puestos a tierra por medio de reactores.
- b) Los generadores están conectados a los alimentadores directamente o a través de los transformadores con devanados conectados a estrella en el lado del generador, puestos a tierra sólidamente o a través de reactores de neutros.
- c) Los condensadores de corrección de factor de potencia conectados en un arreglo de estrella aterrizada son aplicados a lo largo del alimentador.

Estas condiciones pueden ser satisfechas en pequeños sistemas aislados. El voltaje del generador siempre contiene voltajes armónicos de secuencia cero. Estos voltajes armónicos actúan como fuentes de voltaje debido a las pequeñas impedancias internas involucradas. Las fuentes de voltaje armónicos están conectadas a una combinación serie de una reactancia inductiva (reactancia de generador, reactancia de transformador, reactancia del alimentador, y reactancia de puesta a tierra del neutro) y una reactancia capacitiva. Si las dos son similares en magnitud a una de las frecuencias armónicas, una gran cantidad de corriente armónica fluirá en el lazo y puede causar problemas inusuales tales como voltaje de paso y toque, operación errónea a la medidora que sirve kWh para consumidores monofásicos, y operación errónea de relé de sobre corriente de tierra. Una solución es romper el lazo de tierra cambiando los sistemas de puesta a tierra para generador y condensadores. El uso apropiado de devanados conectados en delta de transformadores elevadores también rompe el lazo de tierra.

### 3.8.5 Límites de distorsión de voltaje.

Los límites de distorsión de ( tabla 3.8.1) están relacionados con el siguiente índice:

THD: Es la distorsión de voltaje armónico total (RSS) en % del voltaje nominal a la frecuencia fundamental.

**Tabla 3.8.1**  
**Límites de distorsión de voltaje**

voltaje del Bus a PCC	Distorsión De voltaje individual (%)	Distorsión de Voltaje total TDH (%)
69 kV y menores	3.0	5.0
69001 kV a 161 kV	1.5	2.5
161 kV y mayores	1.0	1.5

Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden tener hasta 2.0% de THD en donde la causa es una terminal HVDC que se atenuara cuando sea conectado a un usuario

### 3.9 Metodología recomendados para evaluar nuevas fuentes de armónicas.

#### 3.9.1 Generalidades.

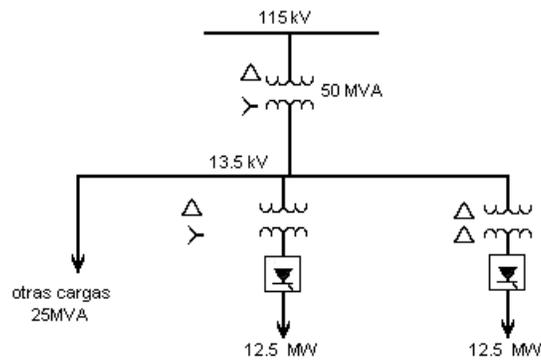
Un procedimiento de análisis general de armónica debería ser adoptado para él calculo del proceso de la planificación del sistema. Este procedimiento debería ser empleado siempre que existan grandes fuentes de armónicos conocidas o cuando se proponen generadores dispersos significativos.

#### 3.10 Ejemplos de aplicación.

Para entender mejor lo que significa este estándar en términos prácticos, se discuten las siguientes dos aplicaciones del estándar.

##### 3.10.1 Ejemplo de gran planta industrial alimentada a niveles de voltaje de transmisión.

La figura 3.10.1 muestra una planta industrial grande tal como una refinería de aceite o una planta química siendo alimentada desde un voltaje de transmisión de la distribuidora a 115 kV. La demanda sobre el sistema de la distribuidora es de 50 MVA y el 50 por ciento de su carga es la carga de los convertidores de potencia estáticos de doce pulsos. La tabla 3.10.1 muestra las características de distorsión de corriente armónica equivalente de esta carga.



**Figura 3.10.1**

**Diagrama unifilar de una planta industrial grande alimentada del voltaje de transmisión usada en cálculos de distorsión de corriente y voltaje.**

En el PCC de 115 kV, la corriente de carga  $I_L$ , es 250 amperios y la corriente del convertidor estático de potencia (SPC) es 125 amperios. La magnitud de cada corriente armónica está basada en los factores que están dictados en la tabla 3.10.1. La tabla 3.10.3 ha clasificado la distorsión de corriente armónica permitida porcentual de acuerdo con el orden armónico para el rango de 69 a 161 kV. Los resultados se muestran en la tabla 3.10.2. Así para una relación de cortocircuito  $R_{SC}$ , de 40, la distorsión permitida causada por armónicos menores que la undécima, es 3.5 por ciento. De la once a la diecisiete, 1.75 por ciento es permitido, etc. Ejemplo, la distorsión de las armónicas características de 12 - pulsos es de ( $11^a$ ,  $13^a$ ,  $23^a$ ,  $25^a$ ,  $35^a$ , etc.) son más altas de lo permitido aunque está dentro del límite para la quinta y la séptima armónica y otras categorías.

**La tabla 3.10.1**  
**Corriente fundamental por unidad ( $f_h$ ) para corrientes armónicas**  
**basados en  $X_c = 0.12$  y  $\text{Alpha} = 30^\circ$**

Armónico	Valor p.u	Armónico	Valor p.u
1	1.00		
5	0.192	29	0.014
7	0.132	31	0.012
11	0.073	35	0.011
13	0.057	36	0.010
17	0.035	41	0.009
19	0.027	43	0.008
23	0.020	47	0.008
25	0.016	49	0.007

La magnitud de las corrientes armónicas en un convertidor de 12 - pulsos que son mostrados en el tipo negro son normalmente tomados como un diez por ciento de los valores para 6-pulsos.

Para convertidores usados en accionamiento PWM (Modulación por ancho de Pulso) en donde el rectificador alimenta un condensador en enlace cd, los valores de la 5th armónica pueden ser mucho más altos (0.3 p.u.).

En el ejemplo, la distorsión de la carga con las corrientes armónicas once y trece son mayores que lo que la tabla 3.7.3 permite para  $R_{SC}$  igual a 40 a 115 kV. El sistema de doce pulsos no cumple los criterios para  $R_{SC}$  de 50 o más. La habilidad del sistema para absorber las corrientes armónicas sin exceder la distorsión de voltaje se muestra en la tabla 3.10.3. En este caso particular, una revisión con la distribuidora podría hacerse para ver si el exceso de distorsión de corriente es aceptable en tanto la distorsión de voltaje este dentro de los límites.

La tabla 3.10.3 lista los voltajes armónicas resultantes asociados con las corrientes armónicas listadas en la tabla 3.10.2. Los voltajes armónicas dependen de la impedancia en el sistema a través de la cual las corrientes armónicas deben fluir. El listado en la tabla 3.10.3 demuestra cuanto disminuyen los voltajes armónicas con el tamaño del sistema. Es evidente que las corrientes armónicas de esta planta no distorsionan el voltaje más allá de lo que está recomendado en el estándar. Si hay otros usuarios en esta línea, sin embargo, el sistema de la distribuidora puede estar distorsionado más allá de lo que es permitida por el estándar y si ese es el caso, el usuario debe corregir estas corrientes armónicas para que estén dentro de los límites recomendados en el estándar.

**Tabla 3.10.2**  
**Cálculos de la corriente de distorsión para una planta industrial grande a 115 kV**

Tamaño del Sistema		Relación	Demanda de carga		Carga SPC		Corriente armónica I <sub>h</sub>												
MVA <sub>SC</sub>	I <sub>SC</sub>	I <sub>SC</sub> /I <sub>L</sub>	MVA	I <sub>L</sub>	MW	I <sub>S</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>17</sub>	I <sub>19</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>25</sub>	I <sub>29</sub>	I <sub>31</sub>	I <sub>35</sub>	TDH	
	(kA)	(R <sub>SC</sub> )		(Amp)			Corriente en amperios												%
			50	250	25	125	2.4	1.65	9.12	7.12	0.44	0.34	2.50	2.00	0.17	0.15	1.37		
							Corriente de distorsión en %												
							0.96	0.66	3.63	2.84	0.13	0.14	1.00	0.80	0.07	0.06	0.55	4.96	
2000	10.0	40	Limites en % de la IEEE			(0.9) 3.5	(2.5) 1.8	(0.3) 1.3	(0.7) 0.5	(0.1) 0.5	(0.36) 0.25	4.0							
3500	17.6	70	Limites en % de la IEEE			(1.2) 5.0	(3.3) 2.3	(0.5) 2.0	(1.1) 0.8	(0.2) 0.8	(0.5) 0.35	6.0							
5000	25.1	1000	Limites en % de la IEEE			(1.5) 6.0	(4.0) 2.8	(0.6) 2.5	(1.4) 1.0	(0.25) 1.0	(0.7) 0.5	7.5							

**Nota: Los limites de distorsión de corriente son la mitad de los listados en la tabla 3.10.3 para un nivel de 115 kV**

$$I_h = (I_s)(f_h)$$

Donde: I<sub>s</sub> es la corriente nominal del convertidor estático de potencia  
f<sub>h</sub> factor armónico en por unidad de I<sub>s</sub> ±

Distorsión armónica total

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_L} * 100\%$$

Los valores en ( ) están basados en los incrementos de las armónicas características por  $\sqrt{\frac{q}{6}}$  y decrementos de las armónicas características en 0.25 de los valores en las tablas 3.10.2, 3.10.3.

**Tabla 3.10.3**  
**Cálculos del voltaje de distorsión para una planta industrial grande a 115 kV**

Tamaño del Sistema		Relación	Z <sub>sys</sub> *	Voltaje armónico a 115 kV (porcentaje)												THD	Limites IEEE	
MVA <sub>SC</sub>	I <sub>SC</sub>	I <sub>SC</sub> /I <sub>1</sub>	%	V <sub>5</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>11</sub>	V <sub>13</sub>	V <sub>17</sub>	V <sub>19</sub>	V <sub>23</sub>	V <sub>25</sub>	V <sub>29</sub>	V <sub>31</sub>	V <sub>35</sub>	%	Individual	THD	
2000	10.0	40	0.5	0.119	0.115	0.999	0.92	0.075	0.064	0.573	0.498	0.049	0.046	0.478	1.64	1.5	2.5	
3500	17.6	70	0.286	0.068	0.066	0.571	0.527	0.429	0.037	0.328	0.285	0.028	0.026	0.273	0.94	1.5	2.5	
5000	25.1	100	0.2	0.048	0.026	0.400	0.369	0.017	0.026	0.230	0.199	0.020	0.018	0.199	0.66	1.5	2.5	
Distorsión del bus a 13.8 kV																		
435	18.2	8.7	2.3	0.571	0.552	4.795	4.426	0.360	0.307	2.750	2.390	0.096	0.221	2.294	7.88	3	5.0	

\*10 MVA Base

$$V_h = \frac{I_h}{I_{base}} (h)(Z_{sys})(100) \quad \%volts$$

Ejemplo  $V_{11} = \frac{9.12}{50.20} (11)(0.005)(100) = 0.999 \% \text{ volts}$

### 3.11 Referencias

- [1] ANSI C34.2-1968 (Withdrawn), American National Standard Recommended Practices and Requirements for Semiconductor Power Rectifiers.
- [2] IEEE C57.12.00-1987, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers (ANSI).
- [3] IEEE C57.110-1986, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents (ANSI).
- [4] IEEE Std 18-1992, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
- [5] IEEE Std 59-1962 (Withdrawn), IEEE Standard for Semiconductor Rectifier Components.
- [6] IEEE Std 100-1992, The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms.
- [7] IEEE Std 223-1966 (Withdrawn), IEEE Standard Definitions of Terms for Thyristors.
- [8] IEEE Std 368-1977 (Withdrawn), IEEE Recommended Practice for Measurement of Electrical Noise and Harmonic Filter Performance of High-Voltage Direct-Current Systems.
- [9] IEEE Std 444-1973, IEEE Recommended Practices and Requirements for Thyristor Converters and Motor Drives: Part 1---Converters for DC Motor Armature Supplies.
- [10] IEEE Std 469-1988, IEEE Recommended Practice for Voice-Frequency Electrical-Noise Tests of Distribution Transformers (ANSI).
- [B1] IEEE Std 518-1982 (Reaff 1992), IEEE Guide for the Installation of Electrical Equipment to Minimize Noise Inputs to Controllers From External Sources (ANSI).
- [B2] Arrillaga, J., Bradley, D.A., and Bodger, P.S., *Power System Harmonics*. New York: John Wiley & Sons, Wiley Interscience, 1985.
- [B3] Baggot, A. J., The Effects of Waveshape Distortion on the Measurement of Energy by Tariff Meters, International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, London, England, Apr. 22-24, 1974, pp. 261-267.
- [B4] Ball, W. C. and Poarch, C. K., Telephone Influence Factor and Its Measurement *AIEE Transactions on Communications and Electronics*, vol. 79, Jan. 1961, pp.659-664.
- [B5] Christensen, E. F., et al., Analysis of Rectifier Circuits, *AIEE Transactions*, vol. 63, 1944, pp. 1048-1058.
- [B6] Concordia, C., Selection of Buffer Reactors and Synchronous Condensers on Power Systems Supplying ArcFurnace Loads, *AIEE Transactions*, vol 76, pt. II, July 1957, pp. 123-135.
- [B7] Cummings, P. G., Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Nov./Dec. 1986, pp. 1121-1126.

- [B8] Douglass, D. A., Potential Transformer Accuracy at 60 Hz Voltages Above and Below Rating and at Frequencies Above 60 Hz, Paper 80SM 635-3, IEEE/PES Summer Meeting, July 1980.
- [B9] Downing, W. C., Watthour Meter Accuracy on SCR Controlled Resistance Loads, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974.
- [B10] Faucett, M. A. and Keener, C. A., Effect of Harmonics on Watthour Meter Accuracy, *Electrical World*, Oct. 27, 1945, pp. 82-84.
- [B11] Frank, H. and Landstron, B., Power Factor Correction with Thyristor-Controlled Capacitors, *ASEA Journal*, vol. 44, 1971, pp. 180-184.
- [B12] Graham, A. D. and Schonholder, E.T. Line Harmonics of Converters With DC Motor Loads, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jan./Feb. 1983, pp. 84.
- [B13] Inductive Coordination Aspects of Rectifier Installations, Committee Report, *AIEE Transactions*, vol. 65, 1946, pp. 417-436.
- [B14] Jain, G. C., The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a Three-Phase Induction Motor, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-84, 1964, pp. 561-566.
- [B15] Johnson, E. R., Static High Speed VAR Control for Arc Furnace Flicker Reduction, *Proceedings of the American Power Conference*, vol. 34, 1972, pp. 1097-1105.
- [B16] Jost, F. A., Menzies, D. F., and Sachdev, M. S., Effect of System Harmonics on Power System Relays, CEA, System Planning and Operation Section, Power System Protection Committee, Spring Meeting, Mar. 1974.
- [B17] Kendall, P. G., Light Flicker in Relation to Power-System Voltage Fluctuation. *Proceedings of the IEE*, vol. 133, 1966, pp. 471-479.
- [B18] Kimbark, E. W., *Direct Current Transmission Ñ Vol. I*. New York: Wiley-Interscience, 1971, Ch. 8.
- [B19] Lembo, F., J. and D'Onofrio, V. H., Distribution Harmonics Cause Breaker Problems, *Electrical World*, Sep. 1981, pp. 121-122.
- [B20] Miller., T. J. E., *Reactive Power Control in Electric Systems*. New York: Wiley-Interscience, Ch. 4, 9, and 10.
- [B21] Mulcahy, J. A. and Ludbrook, A., ÒA New Flicker Correcting System for Arc Furnaces, *Journal of Metals*, Apr. 1967, pp. 63-66.
- [B22] Oltrogge, A. R., Fundamental Criteria for Large Arc Furnace Power Systems, *Journal of Metals*, Jan. 1971, pp. 53-64.
- [B23] Pelly, B. R., *Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters*. New York: John Wiley, 1971.
- [B24] Read, J. C., The Calculation of Rectifier and Converter Performance Characteristics, *Journal of the IEEE*, vol. 92, pt. II, 1945, pp.495-509.
- [B25] Rice, D. C., Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics - Their Effect on Power Systems Components, IEEE paper no. PCIC-84-52, pp. 269-287.
- [B26] Shepherd, W., Steady-state Analysis of the Series Resistance-inductance Circuit Controlled by Silicon Controlled Rectifiers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, July/Aug. 1965.

[B27] Sine Wave Distortions on Power Systems and the Impact on Protective Relaying, Draft #5, Power System Relay Committee of the PES Report, Nov. 1982.

[B28] So You Don't Think You Have a Harmonic Problem, IEEE Wave Shape Distortion Working Group, Paper presented at the annual meeting of the IEEE Industry Applications Society, 1979.

[B29] Survey of Arc-Furnace Installations on Power Systems and Resulting Lamp Flicker, Subcommittee Report, *AIEE Transactions*, vol. 76, pt. II, Sep. 1957, pp. 170-183.

[B30] Thyristor-Switched Capacitors Curb Furnace Flicker, *Electrical Review*, Aug. 9, 1974, pp. 164-166.

[B31] Truxal, J. G., *Automatic Feedback Control System Synthesis*. New York: McGraw-Hill, 1955, pp. 375-390.

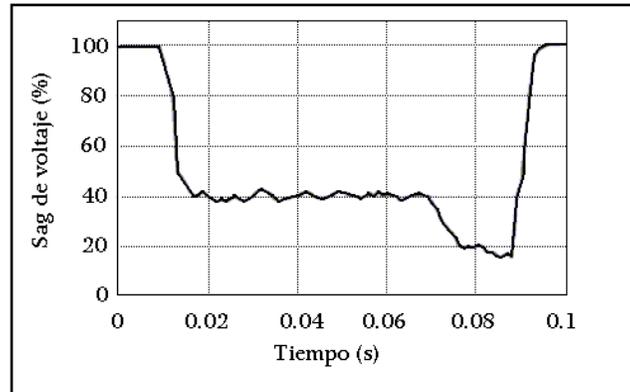
[B32] Wood, W. S., Flynn, F. P., and Poray, A., Effects of Supply Voltage Waveform Distortion on Motor Performance, International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, London, England, Apr. 22-23, 1974, pp. 261-267.

# Capitulo 4

## SAG / SWELL

## 4 SAG/SWELL

### 4.1 Efectos de los *sags de voltaje* sobre las protecciones de los sistemas de distribución.



**Figura 4.1.1**  
**Características típicas de un *sag* de voltaje**

Este tipo de perturbaciones, mostrados en la figura 4.1.1, tienen las siguientes características:

- *Magnitud*: La reducción de voltaje no es constante. Las corrientes de falla usualmente cambian debido al comportamiento del arco eléctrico, dispositivos de protección a reacción, cargas preconectadas, etc.
- *Salto del ángulo de fase*: El *sag* de voltaje es una magnitud vectorial que resulta de la diferencia entre el generador de voltaje, que puede ser considerado constante en magnitud y fase, y la caída de voltaje en la impedancia en el punto de acoplamiento común. Como la magnitud de la corriente cambia lo mismo que el ángulo de fase. Algunos equipos electrónicos son muy sensibles a los saltos del ángulo de fase por ejemplo los ADSs.
- *Duración*: Normalmente el tiempo que se toma como normal en una situación de *sag* es relativamente importante, por lo tanto la determinación precisa de la duración de *sag* es difícil de valorar. Una de las causas es la presencia de un motor en el circuito, que inicialmente opera como generador, actuando al final del *sag* de voltaje como carga extra y extendiendo la duración del *sag*.

#### 4.1.1 Probabilidad de ocurrencia de los *sags de voltaje*.

La probabilidad es importante para predecir que un *sag* de duración y profundidad dada pueda ocurrir, así como ciertos equipos quedan fuera durante un periodo de tiempo. Además, es de interés conocer como la predicción será afectada por cambios en el esquema de protección.

La protección puede ser alterada para mejorar la calidad de energía, ya que hay numerosas mediciones que pueden hacerse por la compañía de transmisión y por el usuario final. Cada uno de los cambios tiene ventajas y costos; por lo tanto, solamente un estudio optimizado daría la respuesta completa y correcta.

La determinación de la probabilidad de ocurrencia de un *sag* de voltaje dado se puede hacer de dos formas. Una es del índice de fiabilidad de todos los componentes del sistema de potencia, llamado *valoración de fiabilidad*, y de otros datos experimentales del sistema bajo estudio o un sistema similar, conocido como fiabilidad histórica.

#### **4.1.2 Valoración de confiabilidad (pronosticado).**

El estudio está basado en la determinación de la probabilidad de que los componentes del sistema fallaran, usando el índice de fiabilidad dado en el estándar IEEE del Gold Book [2]. El conocimiento completo de la topología de los circuitos también es necesario. La probabilidad de mal operación de los dispositivos de interrupción es aproximadamente 5%. En los cálculos hay algunas incertidumbres, tales como:

- Impedancia de falla (prácticamente solo resistencia) y su variación durante el periodo de falla,
- efectos de los niveles de voltajes antes de que ocurra la falla,
- tipo de falla,
- cargas conectadas en el sistema antes que ocurra la falla.

Algunas pistas se pueden encontrar que muestren el problema a ser abordado. La primera incertidumbre es la resistencia de falla, para calcular la corriente de falla mínima, que es normalmente asumida entre 2 y 5  $\Omega$ . Esto es muy diferente del valor usualmente aplicado en cálculos de cortocircuito, por lo tanto el valor será más grande para garantizar la detección de falla.

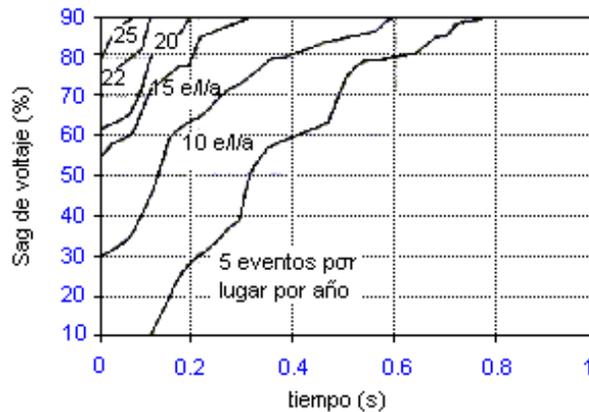
Las graficas de los equipos sensitivos son para fracciones de voltajes. Si este no es el caso, la corrección se puede hacer aplicando el concepto de energía constante; en otras palabras la sensibilidad es asumida como proporcional al cuadrado del voltaje.

Para el tipo de falla, es conveniente referirse a la falla registrada del circuito bajo estudio, ya que la falla frecuente varia de un sistema a otro. Para las líneas de distribución descritas los siguientes valores pueden ser usados: Monofásico fase a tierra 65%, fase a fase 10%, fase a fase a tierra 20%, y trifásico 5%. Para cables subterráneos los porcentajes son 35% para monofásico y 65% para fallas multifásicas [3].

El último ítem es el efecto de la pre-falla de la carga conectada y como se comporta durante el periodo del *sag*. La expresión más popular para este análisis, que ha sido extensivamente usado en estudios de flujos de potencia, es el modelo de carga exponencial cuyo exponente varía entre 1.7 y 2.

#### **4.1.3 Confiabilidad histórica (pronosticado).**

La metodología para la determinación de la probabilidad de ocurrencia es claramente descrito en el estándar 1346 de IEEE y otras publicaciones; las conclusiones son mostradas en la figura 4.1.2.



**Figura 4.1.2**  
**Grafica del perfil del sag de voltaje e interrupciones**

Los siguientes datos son deducidos de consideraciones severas:

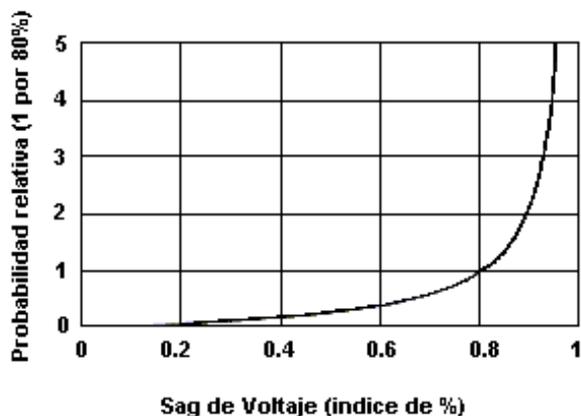
- Las variaciones temporales en la ocurrencia de disturbios: Principalmente durante mayo-julio donde el número promedio de *sags de voltaje* es aproximadamente el doble en la mitad del año.
- Una correlación fuerte entre la incidencia del *sag* y la densidad de iluminación: Aproximadamente el número de *sag* es el doble a la densidad de descargas de rayos.
- Las variaciones de disturbios: más frecuentemente durante días de semana, iniciando 2.5 veces a la mitad de la semana.
- Variaciones horarias de disturbios: más frecuentes durante horas de trabajo normal (8am-5pm), especialmente temprano en la mañana, cerca de tres veces la mitad del día.
- Porcentajes de fallas monofásicas y multifásicas, debido a ocurrencias de *sag*.

#### 4.1.4 Tendencia general.

Mostrando los resultados encontramos una tendencia general del numero de eventos versus la magnitud del *sag* de voltaje como puede ser visto en la figura 4.1.3 usando la formula

$$N = V_s / (1 - V_s)$$

donde  $V_s$  es la magnitud del *sag* de voltaje y  $N$  es el número de eventos [4]. La curva en la figura 4.1.3 ha sido normalizada a 80% de voltaje nominal, ya que el número de eventos cambia de un sitio a otro.



**Figura 4.1.3**  
**Variación de probabilidad relativa de *sags de voltaje* vrs. magnitud**

#### 4.1.5 Índices de confiabilidad.

Bajo las nuevas demandas estrictas del cliente previamente aplicado el índice de fiabilidad, índice de frecuencia interrupción del sistema promedio (SAIFI) y el índice de frecuencia de interrupción del cliente promedio (CAIFI), no están habilitadas para proveer información desde el punto de vista del rendimiento de la fuente de *sags de voltaje*. El nuevo índice proveerá información a cerca del número de disturbios (*sags de voltaje*), tomando en cuenta la profundidad y duración, ya que el equipo sensitivo es una función de estos dos parámetros. A parte de, los estudios de fiabilidad da los resultados en el mismo sentido. El concepto es para dividir la magnitud del *sag* de voltaje en intervalos de duración en secciones de 10, 50, 70, 80, y 90% para la magnitud del voltaje, y de 0.5 a 30 ciclos, 30 ciclos a 3 seg., y 3 a 60 seg. Para la duración del *sag*, cubriendo todo el espectro en este sentido. Para cada, índice de fiabilidad es definido con otros índices que incluyen la duración completa, que en términos medios de la información es propuesta en forma de matriz.

Últimamente, se han presentado los siguientes índices de fiabilidad [5]:

- Índice<sub>voltaje</sub> de frecuencia de sistema promedio rms (variación) (SARFI<sub>x</sub>)
- Índice<sub>voltaje</sub> de frecuencia de sistema instantáneo promedio rms (variación) (SIARFI<sub>x</sub>).
- Índice<sub>voltaje</sub> de frecuencia de sistema momentáneo promedio rms (variación) (SMARFI<sub>x</sub>).
- Índice<sub>voltaje</sub> de frecuencia de sistema temporáneo promedio rms (variación) (STARFI<sub>x</sub>).

## 4.2 *Sags de voltaje* en sistemas industriales.

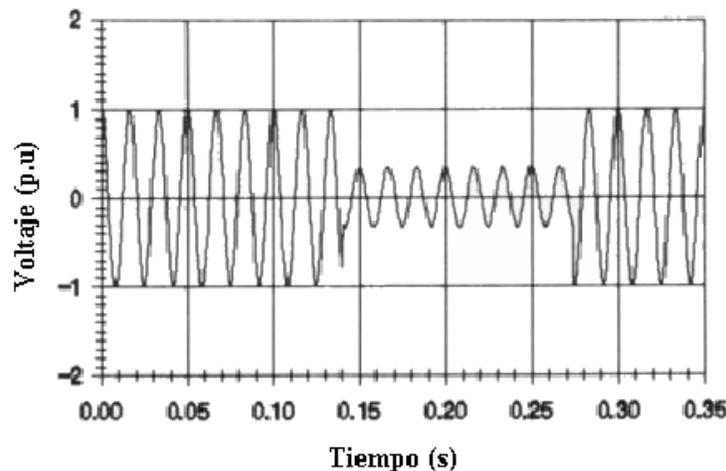
### 4.2.1 Generalidades.

Un *sag* de voltaje es un decremento momentáneo en la magnitud del voltaje RMS (por ejemplo 0.5-30 ciclos), usualmente causada por fallas remotas en alguna parte del sistema de potencia (figura. 4.3.1). Los *sags de voltaje* son los más importantes en los problemas de calidad de potencia en muchos consumidores industriales. El equipo usado en plantas modernas industriales ( controladores programables, controladores lógicos programables, dispositivos de velocidad ajustable, robóticas) son mas sensitivos a los *sags de voltaje* a medida que se incrementa la complejidad del equipo. Incluso los relays y los contactores en el arranque de motores puede ser sensible a *sags de voltaje*, deteniendo un proceso cuando suceden estas fallas.

Es importante entender la diferencia entre una interrupción (perdida completa del voltaje) y un *sag* de voltaje.

Una interrupción ocurre cuando un dispositivo de protección actúa en un circuito de un consumidor particular. Esto ocurrirá solamente si hay una falla en ese circuito. Los *sags de voltaje* ocurren durante el periodo de una falla por fallas en una parte del sistema de potencia. Las fallas sobre circuitos paralelos o sobre el sistema de transmisión causara *sags de voltaje* pero no resultara en interrupción real. Por lo tanto, los *sags de voltaje* son más frecuentes que las interrupciones. Si el equipo es sensible a estos *sags de voltaje*, la frecuencia de problemas serán mucho más grandes que si el equipo fuera solamente sensible a interrupciones.

Este documento describe las características del *sag* de voltaje y la sensibilidad del equipo. Con esta información, el rango de localizaciones sobre el sistema de potencia que pueden causar problemas puede ser estimado(área de vulneraribilidad). Las opciones para mejorar el rendimiento del equipo en presencia de *sag* de voltaje incluye condicionamiento de potencia o modificaciones en los diseños de los equipos. Ambas opciones son descritas.



**Figura 4.3.1**

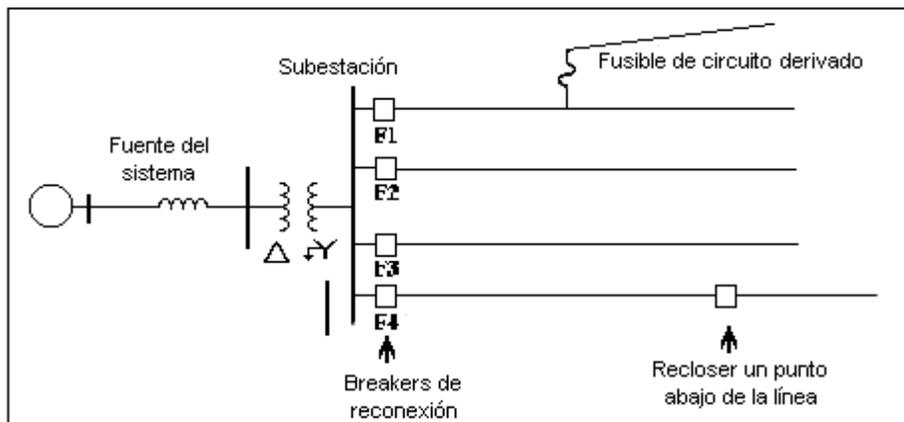
**Forma de onda de *sag* de voltaje causada por una condición de falla remota (seis ciclos)**

### 4.3 Causas de *sag* de voltaje

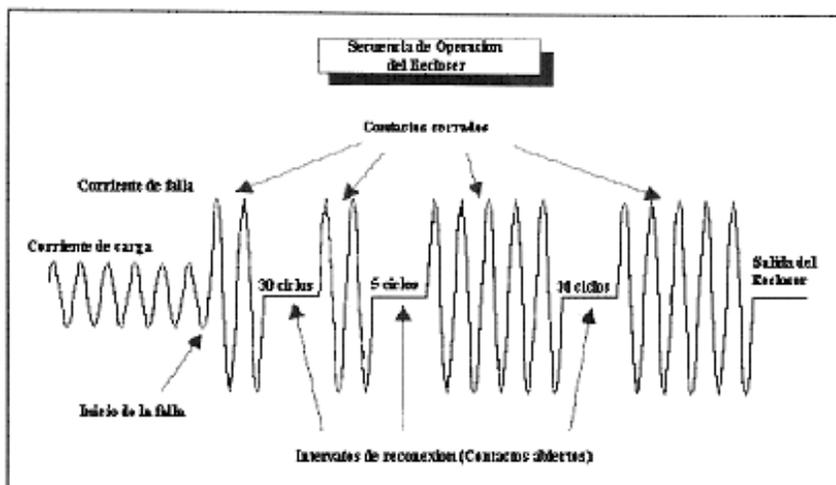
Los *sags de voltaje* son típicamente causados por condiciones de fallas. El arranque de motor puede también resultar en bajos voltajes, pero estos son típicamente más grandes en duración que 30 ciclos y la magnitud del voltaje asociado no es tan baja. Las variaciones de voltajes en el arranque de motores son a menudo referidas como "voltaje *flicker*" especialmente si el arranque del motor ocurre frecuentemente.

Las fallas resultantes en *sags de voltaje* pueden ocurrir dentro de la planta o sobre el sistema de distribución. Las últimas condiciones de *sag* de voltaje hasta la falla se evitan con el dispositivo de protección. En la planta, esto será típicamente un fusible o *breaker* que alimentan la planta. Sobre el sistema de distribución, la falla se puede evitar por una rama de fusible o una subestación de desconexión. Si es usada la reconexión por la distribuidora, la condición de *sag* de voltaje puede ocurrir múltiples veces.

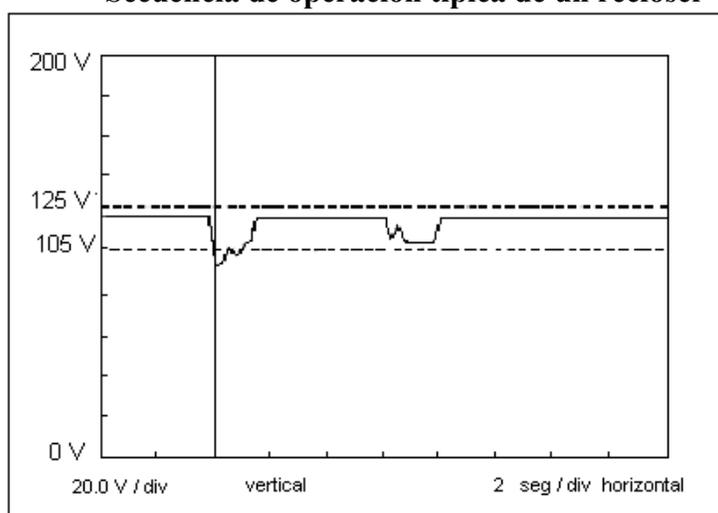
Las fallas sobre el sistema pueden ocurrir sobre el sistema de distribución o sobre el sistema de transmisión. La figura 4.3.2 ilustra una configuración de sistema de distribución con un número de alimentadores desde un bus común. Una falla sobre el alimentador F1 causara una interrupción que afectara al consumidor de ese alimentador. Sin embargo, todos los consumidores conectados en los tres alimentadores paralelos experimentarán un *sag* de voltaje mientras la falla este en el sistema. Con los *breaker* de reconexión a la subestación, los consumidores sobre los alimentadores en paralelo pueden experimentar tanto como cuatro sucesiones de *sags de voltaje*, teniendo un rango de duración de un par de ciclos a más de 10 ciclos ( ver secuencia típica de reconexiones figura 4.3.3). El voltaje característico en la ubicación del consumidor sobre un alimentador en paralelo se vera algo como la grafica de la figura 4.3.4 (Una operación de reconexión).



**Figura 4.3.2**  
**Diagrama unifilar de un sistema de distribución típico ilustrando clases de dispositivos de protección**



**Figura 4.3.3**  
**Secuencia de operación típica de un recloser**



**Figura 4.3.4.**

***Sag* de voltaje para la ubicación de un consumidor con una operación de recloser.**

Las fallas sobre el sistema de transmisión puede afectar incluso a más consumidores. Los consumidores a cientos de millas de la localización de la falla pueden también experimentar un *sag* de voltaje, resultando en inoperancia del equipo cuando la falla ocurre en el sistema de transmisión.

La mayoría de fallas sobre un sistema de distribución son fallas monofásica línea a tierra (SLGF). Las fallas trifásicas son más severas, pero menos comunes. Las SLGF's a menudo resultan de condiciones climáticas tales como rayos, viento, y hielo. Contaminación de aisladores, contacto animal, y accidentes envueltos en actividades de construcción o transporte también causa fallas. Aunque las fallas en los usuarios que se encuentran a grandes distancias no se pueden evitar completamente.

Los rayos son la causa más común de fallas sobre las líneas principales de transmisión y distribución. Los rayos pueden causar una falla por descarga directamente a un conductor de fase (descarga directa) o por descarga a objetos aterrizados, tal como el cable de protección o

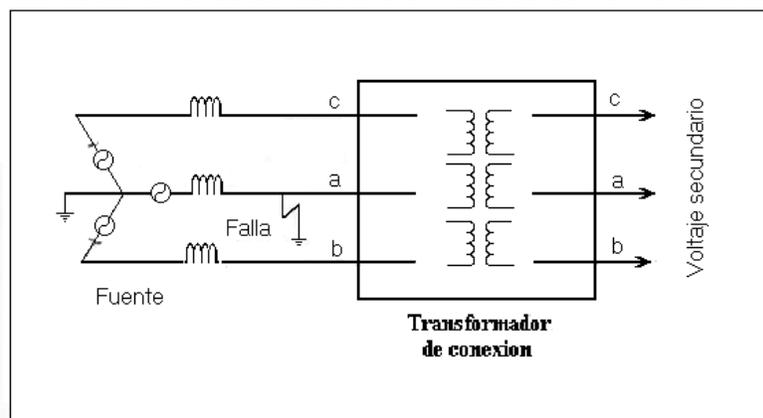
torre (respaldo de descargas). En cada caso, el voltaje desarrollado a través de los aisladores del conductor de fase, cercano en el punto de la descarga pueden causar una descarga a través del aire resultando en el flujo de corriente de falla. Usualmente, estas fallas son temporales, y los medios de prevención no reinicializaran después que han sido liberados y luego la línea es reconectada.

La probabilidad de arqueo durante una descarga de rayo puede ser reducida por medio de arrestadores de transitorios para desviar la corriente del rayo a tierra. La probabilidad de reducir los arcos se puede hacer minimizando la resistencia de tierra. Algunas distribuidoras están considerando la aplicación de arrestadores a lo largo de la línea de transmisión para reducir la incidencia de fallas inducidas por descarga de rayos en los sistemas de transmisión. Sin tener en cuenta las mediciones hechas, las fallas inducidas por rayos no pueden ser eliminadas completamente. Habrá todavía descargas de rayos con magnitudes de corrientes grandes y rizados de voltajes que causaran arqueo. Por lo tanto, es importante para los consumidores estar seguros que sus equipos de sensibilidad crítica a los *sags de voltaje* están protegidos adecuadamente.

#### 4.4 Voltaje en la fabrica durante una falla monofásica línea a tierra en un sistema de distribución.

Las fallas monofásicas línea a tierra (SLGF's) en los sistemas de distribución son la causa más común de *sags de voltaje* en una planta industrial. El voltaje en la fase fallada en el punto de ubicación de la falla se hace cero. El voltaje en la subestación y en los alimentadores paralelos dependerán de la distancia de la falla a la subestación. En los sistemas de transmisión, los voltajes de las fases falladas en un punto remoto dependerán en general de la impedancia de la red.

Las cantidades importantes en la sensibilidad del equipo son el voltaje en el bus del consumidor. Estos voltajes dependerán de la conexión de los transformadores entre el sistema fallado y el bus del consumidor. Para fallas en un sistema de distribución, el peor caso ocurre cuando la falla está cercana al bus de la subestación. Efectivamente, esto es lo mismo como una falla cerca del transformador primario del consumidor (figura 4.4.5). Los voltajes en el bus serán una función de las conexiones de los transformadores como indica la tabla 4.4.1.



**Figura 4.4.5**  
**Falla monofásica línea a tierra cerca de la subestación.**

Las relaciones en la tabla 4.4.1 son muy importantes. Se podría pensar que un SFGL en transformador primario estrella aterrizada/delta podría resultar en voltaje cero a través del secundario. Entonces, la circulación de la corriente de falla en la bobina secundaria dará como resultado un voltaje en cada bobina. La magnitud del voltaje secundario depende de la relación

$$\alpha = \frac{X_T}{X_T + X_S} \quad 0 < \alpha < 1$$

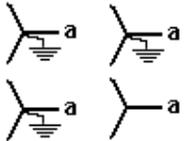
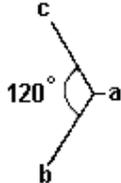
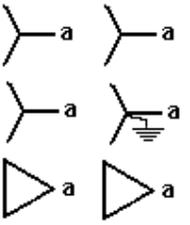
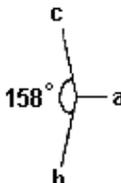
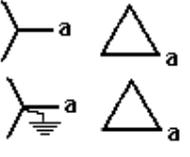
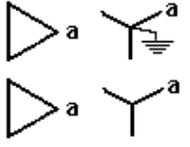
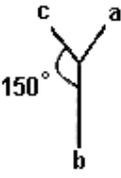
Donde

$X_T$  Reactancia de corto circuito del transformador

$X_S$  Reactancia equivalente de la fuente.

Para distribución de potencia industrial, la relación  $\alpha$  será usualmente cercana a la unidad y la relación en la tabla 4.4.1 es para este caso.

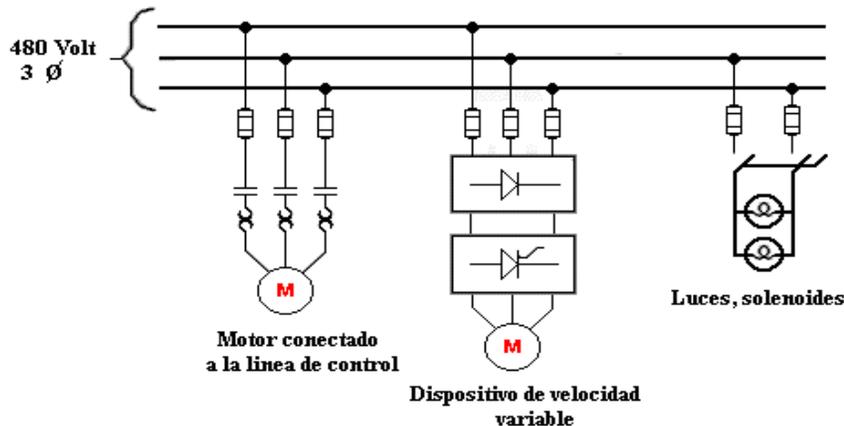
**Tabla 4.4.1**  
**Voltajes en el lado secundario del transformador con una SLGF en el primario.**

Conexión del transformador	Fase a fase			Fase a neutro			Diagrama fasorial
	V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>	V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>	
	0.58	1.00	0.58	0.00	1.00	1.00	
	0.58	1.00	0.58	0.33	0.88	0.88	
	0.33	0.88	0.88	----	----	----	
	0.88	0.88	0.33	0.58	1.00	0.58	

Incluso con una SLGF en el lado primario del transformador, el *sag* de voltaje en el bus del consumidor no será *tan bajo como 33% del valor normal*. Este tipo de fallas es la gran mayoría que se presenta en los sistemas de potencia.

#### 4.5 Sensibilidad del equipo a *sags* de voltaje.

La potencia en una planta industrial es a menudo distribuida por alimentadores trifásicos a 480 V. Las cargas pueden ser caracterizadas por el tipo y conexión al sistema de potencia (figura 4.5.6):

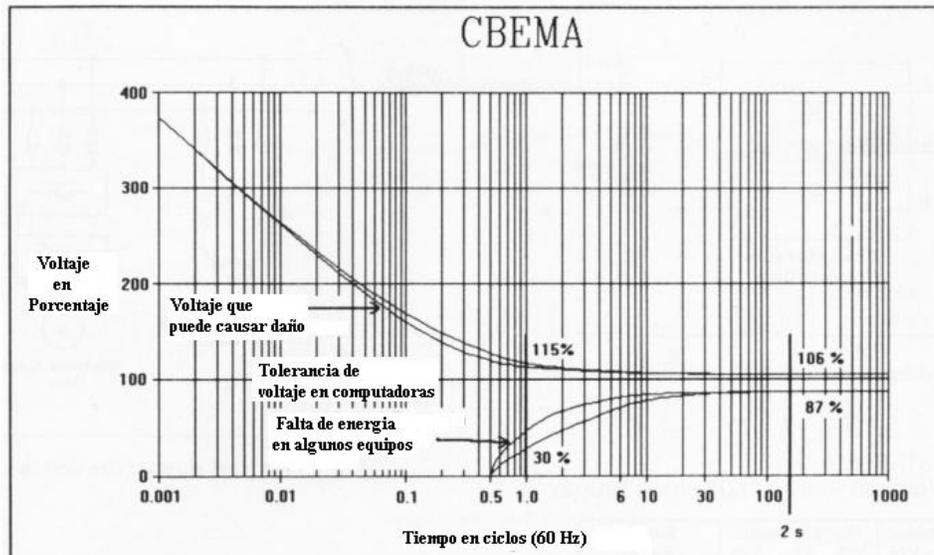


**Figura 4.5.6**  
**Cargas monofásicas y trifásicas típicas.**

- Los motores, elementos de calefacción, y otras cargas trifásicas pueden ser conectadas directamente a alimentadores a 480 V.
- Los dispositivos de velocidad ajustable y otros dispositivos de electrónica de potencia que usan potencia trifásica serán conectados directamente a alimentadores a 480 V o a través de un transformador de aislamiento.
- En iluminación a menudo se utilizan conexiones a 277 V de fase a neutro o puede usar 480 V o conexiones monofásicas a 120 V.
- Los dispositivos de conexión tales como computadoras, contactores y controladores lógicos programables utilizan transformadores monofásicos 480/120 V con 120 V de control.

Los *sags de voltaje* experimentados durante una condición de *sag* de voltaje dependerá de la conexión del equipo. La tabla 4.4.1 muestra que los voltajes de fases individuales y los voltajes de fase a fase son bastante diferentes durante una condición de SLGF en el lado primario del transformador. Algunas cargas monofásicas no serán afectadas pero otras si, incluso sus sensibilidades a *sags de voltaje* puede ser idéntica. Un desbalance de voltaje es también una preocupación en el calentamiento del motor. Sin embargo, la duración de un desbalance de voltajes durante una condición de falla es tan corta que el calentamiento del motor no es una preocupación importante.

Las diferentes categorías de equipo e incluso las diferentes marcas dentro de una categoría (por ejemplo dos modelos diferentes de dispositivos de velocidad ajustable) tienen sensibilidades significativamente diferentes a *sags de voltaje*. Esta dificultad hace difícil desarrollar un estándar único que defina la sensibilidad de equipos de procesos industriales.



**Figura 4.5.7**  
**Curva CBEMA sobre el voltaje de operación.**

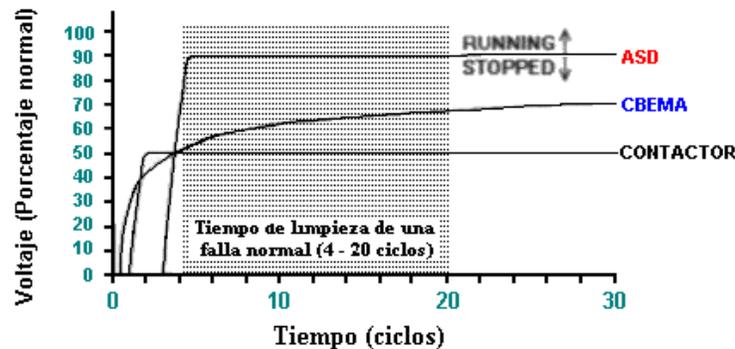
El documento creado para un estándar es la curva CBEMA dada en la figura 4.5.7, que fue desarrollada por la *Computer Business Manufacturers Association* [8]. Aplicados primeramente a equipos de procesamiento de datos. La curva muestra que la carga sensible es muy dependiente de la duración del *sag*. El rango de *sag* permitido de 0% de voltaje para  $\frac{1}{2}$  ciclo a solamente 87% de voltaje para 30 ciclos.

Mientras la CBEMA sugiere límites para un "estándar" de sensibilidad para *sags de voltaje*, un equipo real de la fábrica tiene una variedad de características operacionales durante los *sags de voltaje*. Unos pocos ejemplos son listados aquí.

- 1) *Contactores de motores y relays electromecánicos*. Un fabricante ha proporcionado datos que indican, que su línea de contactores tendrá una caída de voltaje de 50% si la condición dura más haya de un ciclo. Este dato debería de presentarse en para varios fabricantes, y algunos contactores pueden tener una caída de voltaje normal a 70% o incluso mayor [9].
- 2) *Lámparas de alta intensidad de descarga (HID)*: Las lámparas de mercurio se apagan a un 80% del voltaje normal y requieren tiempo para volver a encender [10]. Un *sag* de voltaje que apaga la iluminación HID es a menudo debido a errores de accionamiento que se cometen en la fábrica por el personal.
- 3) *Dispositivos para motor de velocidad ajustable (ADSD's)*: Algunos dispositivos son diseñados para funcionar con *sags de voltaje*. El funcionamiento a veces puede ser en alguna parte de 0.05 a 0.5 s, obviamente dependiendo del fabricante y el modelo.

Algunos modelos de un fabricante monitorean la línea ca y luego una caída de *sag* de voltaje a 90% del voltaje normal es detectada por 50 ms.

- 4) *Controladores Lógicos Programables(PLC's)*: Ésta es una categoría importante de equipos para procesos industriales porque el proceso completo está bajo el control de estos dispositivos. La sensibilidad a *sags de voltaje* varía grandemente en partes de un sistema general de PLC, y han sido creados para ser muy sensibles. Las unidades de I/O, por ejemplo, han sido creadas para una caída de voltaje tan alta como 90% para unos pocos ciclos [11].



**Figura 4.5.8.**  
**Rango de sensibilidad de equipos a *sags de voltaje*.**

El rango de sensibilidad para estos tipos de equipos es mostrada en la figura 4.5.8, con la duración de la falla inducida también indica el *sag* de voltaje. El amplio rango de sensibilidades bajo las líneas de impedancias de trabajo del fabricante hace que el equipo pueda trabajar seguro en el ambiente donde será usado y basado en especificaciones de desarrollo sobre condiciones de sistema de potencia realista.

Es importante para reconocer que los procesos enteros en una planta industrial pueden de la sensibilidad de una pieza del equipo. Los controles de los procesos generales envuelven, dispositivos, contactores de motores, robótica, etc., que están integrados para la operación de la planta. Esto puede hacer difícil la identificación de la pieza sensible del equipo después de detener un proceso completo.

#### 4.6 Estimando la probabilidad de un problema de *sag* de voltaje.

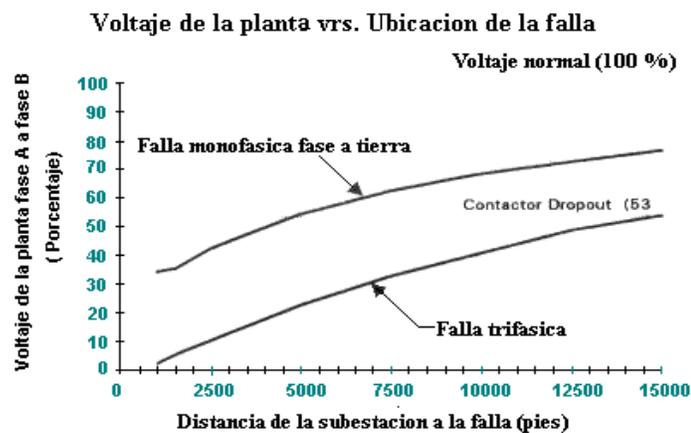
La causa más frecuente de *sags de voltaje* en una planta industrial grande son los rayos. Los rayos están relacionados con las condiciones del tiempo, y las condiciones del tiempo pueden ser extremadamente variables de una estación a otra, o de un año a otro. Pero sobre periodos largos de tiempo, las condiciones del tiempo serán más próximas siguiendo ciertos patrones.

Las actividades tales como estas son establecidas por la red nacional de detección de rayos, la cantidad de descargas de rayos en un área determinada se verificara durante un periodo largo de tiempo. Los resultados de este reporte sobre densidad de arqueo a tierra (Ng) para todas las áreas de la ciudad. La densidad de arqueo a tierra es una medida de las descargas de rayos a tierra por kilómetro cuadrado por año. Es más preciso que el nivel isoceraunico usado antes para determinar la interpretación correcta de los rayos en las líneas de transmisión. El nivel

isoceraunico es el número de rayos por días por año y puede ser multiplicado por un factor de proporcionalidad para convertir a factor de densidad de descarga a tierra.

Utilizando la geometría de las líneas de transmisión, los niveles de BILs de los aisladores, la densidad de descarga a tierra, y el número de fallas por kilómetro de línea por año esperadas pueden ser calculadas [7].

Afortunadamente ninguna falla en la red de distribución y transmisión interrumpirá la producción en una planta industrial. Los efectos de una falla en los equipos de una fábrica dependen de las veces que la falla es liberada y la ubicación de la falla. Con cálculos computacionales se puede determinar el voltaje versus la ubicación de la falla sobre un sistema de distribución y curvas similares para esto en la figura 4.6.9 pueden ser usadas para ilustrar el rango de ubicación de las fallas que pueden causar problemas.

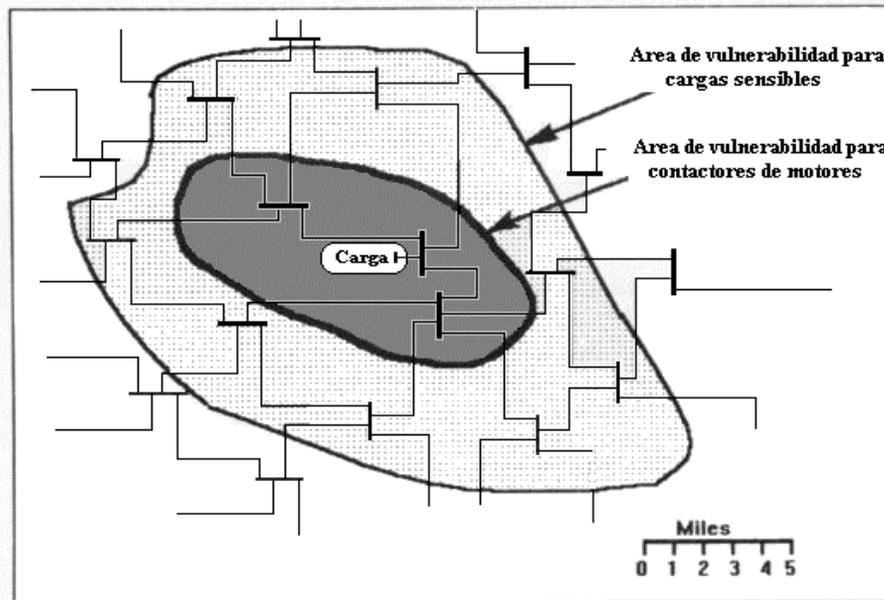


**Figura 4.6.9**  
**Sag de voltaje versus ubicación de la falla**

Los factores que influyen en la magnitud y duración de los *sags de voltaje* incluyen la impedancia y ubicación del punto de falla, la configuración de la red de potencia y el diseño de los relays de protección del sistema. La figura 4.6.9 ilustra una relación entre la ubicación de la falla y la magnitud del *sag* de voltaje, para un ejemplo de un sistema de distribución (A través de una conexión de transformador estrella/delta).

La limpieza de la falla a veces es dependiente de las prácticas de protección del sistema de la compañía distribuidora. Si es usada una limpieza instantánea, de 4-6 ciclos es una duración probable de *sag* de voltaje. Si es usado un retardo de tiempo intencional, la duración podría ser tan grande como 15 ciclos.

En un sistema de transmisión, es más difícil determinar el rango de ubicación de las fallas que pueden resultar en *sags de voltaje* inaceptables. Se pueden usar simulaciones por computadora para determinar los voltajes alrededor de un sistema para la ubicación de algunas fallas. Estos cálculos pueden ser usados para definir un "área de vulnerabilidad" para un consumidor particular (figura 4.6.10). La probabilidad de una falla en esta área puede entonces ser calculada.



**Figura 4.6.10**  
**Área de vulnerabilidad para fallas en un sistema de transmisión tomando en cuenta la ubicación de un consumidor en particular**

#### **4.7 Evaluación y soluciones para problemas de sag de voltaje.**

La interrupción de un proceso industrial debido a un *sag* de voltaje puede resultar en costos sustanciales de operación. Estos costos incluyen pérdida de productividad, costos laborales por limpieza y reinicio de labores, productos dañados, calidad del producto reducida, retardos en las entregas, y reducción en la satisfacción de los consumidores.

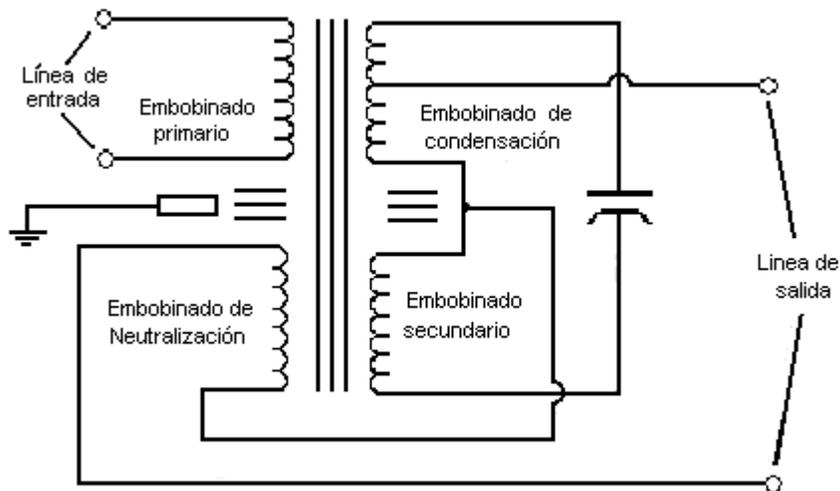
La verdadera evaluación de alternativas para mejorar el funcionamiento de los equipos de la fábrica y la red de distribución de potencia requiere una comparación de costos versus beneficios. Por ejemplo, una vez encontrado el costo sensible en los procesos con algún método de mejoramiento del *sag* de voltaje se podrá determinar, los beneficios de recuperación de baja productividad, material, calidad del producto, y la responsabilidad del consumidor. La siguiente es una experiencia en una planta industrial que provee datos sobre pérdida de producción para una ocurrencia de *sag* de voltaje dado. Puede incluso ser un registro de el número de interrupciones debido a *sags de voltaje* en meses o años pasados. Si es necesaria la existencia de datos, el costo de implementar una solución puede ser evaluado contra el flujo de dinero esperado en la recuperación de la pérdida de producción.

Las soluciones al problema de *sag* de voltaje son implementadas casi siempre en las instalaciones de los consumidores. Como se menciono previamente, es posible para la distribuidora reducir el número de fallas en el sistema a través de prácticas de diseño y equipo adicional, pero nunca es posible eliminar las fallas en el sistema. El equipo de la fabrica podría ser diseñado para funcionar con las condiciones de *sag* de voltaje más comunes o ser adaptado a condiciones de potencia adecuados.

A largo plazo, la mejor solución a problemas de *sag* de voltaje será adquirir equipo que tenga la capacidad necesaria para funcionar. Los fabricantes deben estar concientes cada vez más de la necesidad de esta capacidad, y hacer estándar cada vez más y más relacionados a equipos de procesos industriales. Incluso ahora, los fabricantes ofrecen nuevos modelos o modificaciones simples que permiten extender su capacidad.

Hasta poder manejar el equipo directamente con *sags de voltaje*, será necesario para aplicar condiciones de potencia al equipo en una carga sensible en particular. La mayoría de condiciones de *sag* de voltaje pueden ser manejadas por transformadores ferroresonantes, o de voltaje constante (CTV's). Los CTV's son especialmente atractivos para cargas con requerimientos de potencia relativamente bajos y cargas que son constantes. Las cargas variables son mas un problema para los CTV's debido al circuito de salida.

Estas condiciones de potencia de trabajo a la curva de saturación para un transformador de excitación alta, tanto que la salida de voltaje no es afectada significativamente por las variaciones de voltaje a la entrada. El diseño y construcción real es más complicado. Un circuito ferroresonante típico es mostrado en la figura 4.7.11.



**Figura 4.7.11**  
**Circuito típico de un transformador ferroresonante**

**Tabla 4.7.2**  
**Sag de voltaje permitido versus carga del transformador ferroresonante**

Cantidad de carga	Voltaje de entrada mínimo <sup>a</sup>
¼ de carga	36 V (30% de 120 V)
½ carga	55 V (46% de 120 V)
carga completa	85 V (71% de 120 V)
cargado 150% (sobre cargado) <sup>b</sup>	Perdida de voltaje, incluso con la entrada a 100%
<sup>a</sup> Si la entrada de voltaje está por encima del voltaje mínimo de entrada, el voltaje de salida permanecerá en el rango de +3% a -6% del valor normal. Estos transformadores están también disponibles con voltaje de entrada de 480 V.	
<sup>b</sup> El aumento de la corriente hasta un rango de 150% causara la caída del voltaje. Las cargas inductivas tales como contactores requieren especial consideración para asegurar que el transformador tiene la capacidad adecuada para proporcionar los requerimientos de corrientes.	

La salida de los transformadores ferroresonantes sobre un voltaje normal de 90% tan grande como el voltaje de entrada está por encima del valor mínimo, al que la salida de voltaje cae a cero. La tabla 4.7.2 muestra que el voltaje mínimo de entrada es una función de la carga. Es notable que a un ¼ de carga, la salida del transformador ferroresonante tendrá el voltaje necesario incluso durante la presencia de *sags de voltaje* tan bajos como 30%. Esto es importante aunque es virtualmente imposible para una condición SLGF en el sistema de distribución y causar una condición de *sag* de voltaje de 30% en el bus del consumidor cuando este está conectado a un transformador ya sea delta /estrella o estrella /delta.

Los CTV's podrán manejar la mayoría de condiciones de *sag* de voltaje. Los *sag* voltajes que son más severos para los CTV's, tales como aquellos debido a fallas trifásicas cercana a la ubicación del consumidor, o interrupciones reales, podrían aun causar interrupción de procesos. La protección para cargas extremadamente críticas, tales como sistemas de seguridad personal y equipos de procesamiento de datos críticos, incluso sistemas UPS o el equivalente de capacidad completa de respaldo.

## 4.8 Referencias

- [1] IEEE Standard 1346, "IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment," 1998.
- [2] ANSI/IEEE Standard 493, "Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems," 1990.
- [3] Power Technologies Inc., Distribution Fault Current Analysis, EPRI Report EL-3085, 1983.
- [4] M.H.J. Bollen, "Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-32, pp. 1414-1423, 1996.
- [5] D.L. Brooks, et al., "Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance," IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-13, pp. 254-259, 1998.
- [6] L. Tang and M. McGranaghan, "Power quality definitions and standards terms development," EPRI, Res. Project RP3098-1, June 1990.
- [7] J. G. Anderson, "Lightning performance in transmission lines," in Transmission line Reference Book, pp. 545-597.
- [8] Recommended Practice for Emergency and Standby Power for Industry and Commercial Applications, IEEE Standard 446-1987.
- [9] D. M. Sauter, "Voltage fluctuations on power systems," in Westinghouse Electric Utility Engineering Reference Book, Distribution Systems.
- [10] Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industry Plants, ANSI-IEEE Standard 141-1986.
- [11] V. E. Wagner, A. A. Andreshak, and J. P. Staniak, "Power quality a factory automation," IAS Annu. Meeting, vol. 35, no. 6, pp. 1391-13

# Capítulo 5

# Transitorios

## 5 TRANSITORIOS

### **Practicas recomendadas IEEE para transitorios de voltaje para circuitos de potencia CA en niveles de bajo voltaje.**

#### **5.1 Alcance.**

El propósito de estas practicas recomendadas es para proveer información sobre transitorios de voltaje en aquellos niveles de sistemas de potencia ca de bajo voltaje<sup>9</sup>. Con esta información, los diseñadores de equipo y los usuarios pueden evaluar los ambientes de operación para determinar las necesidades de dispositivos de protección contra transitorios.

El documento caracteriza a aquellos sistemas de distribución eléctrica dentro de los cuales existen transitorios, basado sobre datos que han sido registrados en el interior de locales, en sistemas de distribución de potencia para lugares residenciales, comerciales e industriales monofásico y trifásico.

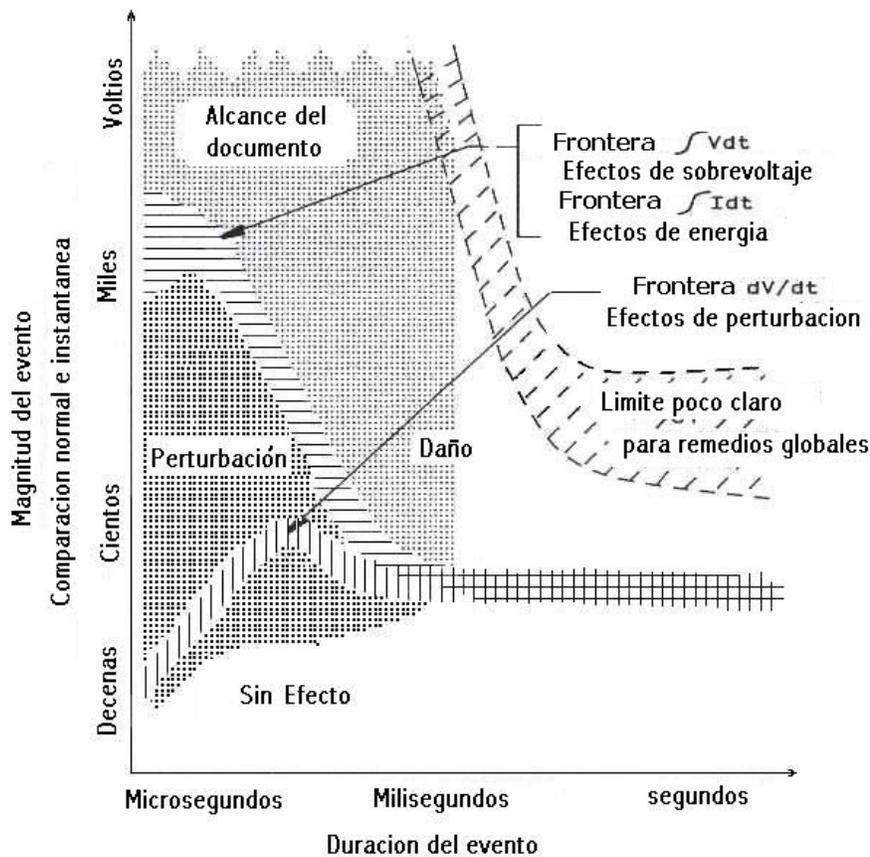
No existen modelos específicos que sean representativos de todas las condiciones en los cuales pueden haber transitorios.

La complejidad del mundo real necesita ser simplificada para poder producir un conjunto manejable de pruebas de transitorios estándar. Para este fin, es presentado un esquema de clasificación de transitorios. Esta clasificación provee una base práctica para la selección de formas de ondas y amplitudes de voltajes transitorios, corriente transitorias, que pueden ser aplicadas para poder evaluar la capacidad de resistencia en condiciones de transitorios de aquellos equipos conectados a esos circuitos de potencia. Es importante reconocer que se requiere una coordinación adecuada de las capacidades del equipo y de las características del ambiente: cada ambiente y equipo a ser protegido tiene que ser caracterizado y los dos reconciliados.

Los transitorios considerados en este documento no exceden en más de la mitad de un periodo de duración de la forma de onda del sistema de potencia normal, ellos pueden ser eventos periódicos o aleatorios y pueden aparecer en cualquier combinación de los conductores de línea, neutro y puesta a tierra. Aquellos transitorios con suficiente amplitud, duración o su razón de cambio pueden causar daño a los equipos o anormalidades de funcionamiento. Mientras que los dispositivos de protección contra transitorios que actúan principalmente sobre la amplitud de voltaje son aplicados a menudo para desviar los transitorios que pueden causar daños, los transitorios que causan daños menores a los equipos pueden requerir otros remedios.

---

<sup>9</sup> Nótese que voltaje bajo está definido por la IEEE y la IEC hasta 1000 voltios rms



**Figura 5.1.1**  
**Relaciones simplificadas entre voltaje, duración, razón de cambio y sus efectos sobre los equipo**

## 5.2 Como utilizar este documento.

### 5.2.1 Generalidades.

El propósito de esta sección es para asistir al lector en la aplicación de las recomendaciones de este documento para cada caso particular de interés.

### 5.2.2 Logrando inmunidad practica contra transitorios.

En esta práctica recomendada no se especifica procedimientos de desempeño. Lo que se recomienda es un método racional, aprovechamiento deliberado para el reconocimiento de las variables que necesitan ser consideradas simultáneamente, utilizando la información presentada aquí y para definir un conjunto de situaciones representativas.

Para aplicaciones específicas, el diseñador tiene que tomar en consideración no solamente el índice de ocurrencia y las formas de ondas descritas, en este documento, si no que también el

ambiente de los sistemas de potencia específicos que trabajan en sus respectivos entornos y las características del equipo que necesitan protección. Por lo tanto, en esta práctica recomendada no se pueden incluir requerimientos generalizados ni de desempeño específico.

Como un ejemplo, las consideraciones siguientes son necesarias para lograr la meta de la inmunidad práctica contra transitorios:

- *protección deseada*
  - *integridad de hardware*
  - *inmunidad de procesos.*
- *Sensibilidad de equipos específicos*
- *Ambiente de potencia.*
  - *características de los transitorios.*
  - *Sistemas eléctricos.*
- *Desempeño de dispositivos de protección contra transitorios...*
  - *protección*
  - *tiempo de vida*
- *el ambiente de prueba*
- *costos totales y relativos*

Las respuestas puede que no existan a todas las preguntas que surgen por las consideraciones listadas arriba. En particular, aquellas relacionadas a sensibilidades de equipos específicos en términos de fallas de componentes y especialmente en términos de errores de procesamiento, pueda que no estén disponibles para el diseñador. El objetivo del lector puede ser seleccionado dentro de varios dispositivos de protección contra transitorios y de equipos protegidos por ellos. Existe un subconjunto de parámetros en esta sección que pueden ser aplicados y la meta del lector puede ser entonces los diversos dispositivos de protección contra transitorios bajo condiciones de prueba idéntica. Lo que continua puede ser una guía para que el lector pueda identificar parámetros, buscando cuestiones futuras o cuantificando un plan de prueba.

#### **5.2.2.1 Protección deseada.**

La protección deseada puede variar generalmente dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, en aplicaciones que no involucran un desempeño en línea la protección puede ser deseada solamente para reducir las fallas de hardware en un cierto porcentaje. En otros casos, tales como procesamiento de datos, diagnóstico crítico o procesos de manufacturación, cualquier interrupción o falla de esos procesos pueden ser inaceptables. Por ello, el diseñador debe cuantificar el propósito deseado con respecto a las preguntas separadas, de falla de hardware e interrupción de procesos.

#### **5.2.2.2 Sensibilidad de equipos.**

La sensibilidad en equipos debería ser definida en concertación con las metas mencionados anteriormente, las sensibilidades serán diferentes para las fallas de hardware o para interrupciones de procesos. Tales definiciones pueden incluir: ***Amplitud remanente máxima de transitorios que pueden ser tolerada, en formas de ondas o sensibilidad de energía, etc.***

### **5.2.2.3 Ambientes de potencia de transitorios.**

En cuanto a las formas de ondas recomendadas las pruebas aplicables en este documento, deberían ser cuantificadas en base a las categorías de ubicación y niveles de exposición definidos aquí.

### **5.2.2.4 Ambiente de potencia del sistema eléctrico.**

La magnitud del voltaje de línea de potencia rms, incluyendo cualquier variación anticipada, debería ser cuantificada. Los voltajes en los sistemas de potencia son generalmente regulados para que cumplan con la norma ANSI C84.1-1989 [1], esta norma especifica dos rangos de voltaje (A y B) de servicio y de utilización y reconoce explícitamente la ocurrencia de condiciones anormales que provoquen que esos voltajes sean excesivos. La aplicación exitosa de dispositivos de protección contra transitorios requiere tomar en consideración esas ocurrencias anormales ocasionales. Una selección apropiada de los valores nominales de voltajes de recorte y el voltaje de línea continuo es esencial.

### **5.2.2.5 Desempeño de los dispositivos de protección contra transitorios.**

La evaluación de un dispositivo de protección para transitorios debería verificar un tiempo de vida ya sea en presencia de transitorios y en el ambiente del sistema eléctrico descrito anteriormente. Al mismo tiempo, su remanente y niveles de voltaje deberían brindar un margen de los niveles de sensibilidad del equipo para alcanzar la protección deseada. Es esencial considerar simultáneamente todos esos parámetros. Por ejemplo, el uso de un dispositivo de protección con un valor nominal cercano al valor nominal del voltaje que puede proveer remanentes que sean atractivos, pero puede ser inaceptable cuando un rango amplio de desviaciones anormales en la amplitud de la forma de onda de potencia son consideradas.

Ni el tiempo de vida ni el desempeño normal debería ser sacrificado a cambio de un bajo remanente.

### **5.2.2.6 Ambiente de prueba.**

El ambiente de prueba de los transitorios debe diseñarse cuidadosamente con respecto a las consideraciones precedentes y cualquier otro parámetro que el usuario sienta que es importante. Una descripción de ambiente de prueba típica incluirá definiciones de voltajes de corrientes simultáneas, junto con las demostraciones de corrientes del corto circuito apropiadas. Es importante reconocer que la especificación de un voltaje de circuito abierto sin la capacidad simultánea de corriente en cortocircuito carece de significado.

### **5.2.2.7 Costos.**

Los costos de la protección contra transitorios puede ser pequeños comparados con los costos globales del sistemas y beneficios al desempeño. Por lo tanto, las mejoras en calidad y desempeño en la protección contra transitorios pueden ser escogidas como un método de ingeniería conservador, para compensar variables desconocidas en otros parámetros. Este

acercamiento puede brindar, excelentes desempeños dentro de los mejores intereses del usuario, al tiempo que no afecte significativamente el costo global.

### **5.3 Definiciones.**

Las definiciones de los términos usados en este documento son las encontradas en la norma IEEE 100-1988[9], *The IEC Multilingual Dictionary of Electricity* [3], o el *IEC International Electrotechnical Vocabulary* [B95]. En algunas instancias, la definición IEEE en el diccionario actual, puede que sea muy amplia o demasiado restrictiva; en tal caso, una definición adicional o nota se incluye en esta sección.

*Mains* (Red de electricidad).

La fuente de potencia ca disponible en el punto de utilización en una instalación. Consiste del conjunto de conductores eléctricos para entregar potencia a las cargas conectadas en el nivel de voltaje de utilización.

*Surge* (dispositivo de protección contra transitorios.)

Un onda transitoria de corriente, potencial, o potencia en un circuito eléctrico.

*Swell*

Un incremento momentáneo en el voltaje a la frecuencia de potencia entregada por el sistema de potencia, por fuera de las tolerancias normales, con una duración de más de un ciclo y unos pocos segundo.

### **5.4 El origen de los voltajes transitorios.**

#### **5.4.1 Generalidades.**

Los transitorios de voltaje que aparecen en circuitos de potencia ca de bajo voltaje, se originan a partir de dos fuentes principales: los efectos de los rayos (directos o indirectos) en los sistemas de potencia y en los transitorios por conmutación.

#### **5.4.2 Los rayos.**

Los modelos de los efectos de rayos consistentes con mediciones disponibles. Han sido hechos con el propósito de conducir a predicciones en los niveles de transitorios, aunque los mecanismos exactos para producirlos no son del todo conocidos. Los principales mecanismos por los cuales los rayos producen voltaje transitorio son los siguientes:

Descarga atmosférica cercana a objetos en la tierra o dentro de la capa de las nubes que producen campos electromagnéticos que pueden inducir voltaje en los conductores de los circuitos primarios o secundarios.

En los rayos el flujo de corriente hacia tierra es la resultante de una descarga cercana de nubes a la tierra, así la resultante que se acopla en trayectoria de impedancia de tierra común de la red de puesta a tierra, causan diferencias de voltajes a través de su longitud y ancho.

La caída rápida de voltaje que puede ocurrir, cuando un tipo de entrehierro primario limita el voltaje primario, y es acoplado por medio de la capacitancia de un transformador y produce voltajes transitorios en adición a aquellos voltajes acoplados en el circuito secundario debido a la acción normal del transformador.

Un impacto directo de rayo a los circuitos primarios de alto voltaje inyecta corrientes altas dentro de los circuitos primarios, produciendo voltajes ya sea fluyendo a través de la resistencia de puesta a tierra y provocando un cambio de potencial de tierra o fluyendo a través de la impedancia de los conductores primarios. Algo de este voltaje se acopla desde el primario hacia el secundario de los transformadores de servicio, por mecanismos capacitivos o de transformador o ambos, apareciendo en circuitos de potencia ca de bajo voltaje.

El rayo impacta directamente a los circuitos secundarios, muy altas corrientes involucradas y voltajes resultantes muy altos pueden estar involucrados, excediendo la capacidad de resistencia del equipo y los dispositivos de protección contra transitorios especificados para el uso de circuitos secundarios.

### **5.4.3 Transitorios de conmutación.**

Los transitorios de conmutación del sistema pueden ser divididos ya sea en transitorios asociados con las condiciones normales o anormales, de la manera siguiente:

Conmutaciones menores cerca del punto de interés, tal como el apagado de algún aparato dentro de algún establecimiento o apagar cualquier otra carga dentro de un sistema individual.

Transitorios periódicos (*notching* de voltaje) estos ocurren durante cada ciclo de la conmutación en conductores de potencia eléctricas. El *notch* de voltaje es causado por un cortocircuito fase a fase de límite momentáneo con un rápido cambio en el voltaje, con duración en el rango de los 100 microsegundos.

Reigniciones múltiples durante una operación de conmutación es otro ejemplo. Los contactores de aires o los interruptores de mercurio pueden producir a través de escalamiento de formas de onda complejas, voltajes transitorios y de amplitudes varias veces mayores que los voltaje normales.

Perturbaciones de conmutación del sistema de potencia, tales como conmutación por bancos de condensadores, limpieza de falla o conmutación de la grilla (*grid*). Los sobre voltajes transitorios asociados con la conmutación de los diferentes niveles de capacitores para la corrección del factor de potencia, al menos en el caso de conmutación de re-disparo, generalmente menos que el doble del voltaje normal, aunque los niveles de los transitorios pueden ser 1.5 veces el voltaje normal (es decir, el valor absoluto puede ser 2.5 veces el pico normal). Estos transitorios pueden ocurrir diariamente, y sus formas de ondas generalmente

muestran duraciones de tiempo mayores tal como varios cientos de microsegundos, comparados con la duración típica en el orden de décimas de microsegundos para otros eventos conmutados y transitorios inducidos por rayos. Si ocurren re-encendidos múltiples o re-disparos múltiples en el dispositivo de conmutación de condensadores durante la apertura, entonces el sobre voltaje transitorio puede exceder tres veces el voltaje del sistema normal e involucrar niveles de energía elevados.

Fallas diversas del sistema, tales como cortocircuito y fallas que producen arco. Un tipo de transitorio de conmutación, por ejemplo, resulta de los dispositivos de protección de sobre corrientes de acción rápida tales como los fusibles de limitación de corriente y *circuit breakers* con tiempos de arco menores de 2  $\mu$ s. Estos dispositivos dejan energía inductiva atrapada en el circuito arriba del punto de falla. Junto al colapso del campo se generan voltajes elevados.

## **5.5 Resumen de la base de datos.**

### **5.5.1 Generalidades.**

Las perturbaciones sobre circuitos de potencia ca de bajo voltaje (“red eléctrica”) se pueden clasificar de varias maneras tales como incremento de voltaje o reducción del valor nominal rms, una variación de forma de onda de voltaje o corriente y las características de las formas de onda. Ésta última incluye amplitud, duración, tiempo de subida, frecuencia de oscilación, polaridad, capacidad de entrega de energía, amplitud de densidad espectral, posición con respecto a la fase de las formas de ondas de potencia y frecuencia de ocurrencias. El alcance de este documento se limita a perturbaciones que tienen una duración a menos de medio ciclo de la forma de onda de los circuitos de potencia ca de bajo voltaje. Las consecuencias causadas por otros eventos semejantes como *sag*, *outages*, *swell* y distorsiones armónicas no son consideradas en esta discusión de la base de datos, no obstante su importancia o los porcentajes de ocurrencia comparado a la de los transitorios.

Es difícil asignar valores mínimos o máximos a algunas de las características de los transitorios debido al efecto y la significativa dependencia natural del equipo sujeto a transitorios. Algunas de esas perturbaciones ocurren sin causar ningún problema al equipo, aunque pueden alterar al equipo y otros pueden causar que el equipo se dañe (figura 5.1.1).

### **5.5.2 Notaciones y definiciones.**

Un transitorio en el sistema de potencia ca de bajo voltaje debería ser descrito como un fenómeno en el dominio del tiempo; los términos utilizados para describir tal evento pueden estar dentro de las aplicaciones definidas en todas las mediciones. En particular, nótese que las unidades serán mostradas después en designación de una forma de onda, por ejemplo 5/50 ns.

El diseño para equipo sobre la inmunidad de transitorios requiere el conocimiento de cómo se presentan los transitorios en el equipo: el diseñador necesita conocer el modo de acoplamiento de los transitorios. Para evitar las ambigüedades que pueden ocurrir cuando se utiliza el término modo común, se utiliza la notación siguiente en este documento:

L-N: Medición de fase(s) a neutro para sistemas monofásicos y trifásico.

L-L: Es la medición de fase a fase en un sistema polifásico o de una línea a otra línea en sistemas monofásicos.

L-G: Es la medición de fase al equipo en su conductor aterrizado en la línea terminal del equipo. En norte América, en los sistemas monofásicos y trifásicos de cinco hilos, el conductor puesta a tierra del equipo se une al conductor del neutro en la entrada de servicio.

N-G: Mediciones del neutro en el conductor puesta a tierra del equipo en las terminales de la línea del equipo.

## **5.6 Selección recomendada de transitorios representativos.**

### **5.6.1 Generalidades.**

La base de datos resumida de eventos registrados en la literatura, ilustra la gran variedad de transitorios que se espera puedan ocurrir en sistemas de potencia ca de bajo voltaje. Evaluación de la habilidad del equipo para resistir esos transitorios o de la operación de los dispositivos de protección contra transitorios, pueden ser facilitados por una reducción de la base de datos.

### **5.6.2 Razón de ocurrencia de niveles de voltaje de circuitos sin protección.**

#### **5.6.2.1 Generalidades.**

La razón de ocurrencia de los transitorios varía sobre límites amplios, dependiendo del sistema de potencia particular. La predicción de la razón para un sistema particular es difícil y frecuentemente imposible. La razón se relaciona al nivel de los transitorios; los transitorios de bajo nivel son más prevaletes que los transitorios de alto nivel.

En esencia reconocer que un voltaje transitorio observado en un sistema de potencia puede ser el transitorio original o el remanente, el resultante del dispositivo de acción limitadora de una instalación o de un dispositivo de protección en el sistema.

De aquí, el termino circuito no protegido, debería ser entendido como un circuito en el cual no se sabe que un dispositivo de protección de bajo voltaje ha sido instalado, pero en el cual el arqueo entre espacios limitará eventualmente el voltaje máximo de los transitorios.

La distribución de los niveles de transitorios, por lo tanto, está influenciada por los mecanismos productores de transitorios, también por el nivel de arqueo de los espacios (entre partes energizadas, también entre las partes energizadas y tierra) y la operación de dispositivos de protección no identificados. Es importante reconocer el efecto del aumento del número de dispositivos de protección contra transitorios instalados dentro y alrededor de los equipos.

Esta distinción entre el voltaje de excitación real y el voltaje limitado por arqueo entre espacios es particularmente importante en la interfase entre equipo externo y el equipo interno.

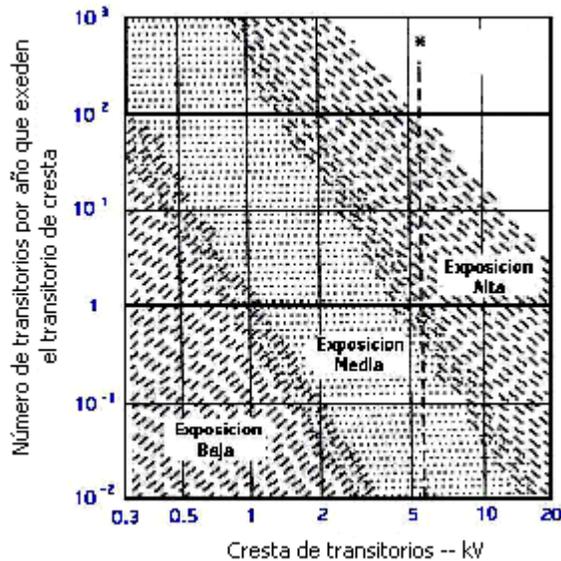
El equipo externo puede tener separaciones mayores entre espacios, niveles de arqueo mayores; 10 kV pueden ser típicos, pero 20 kV es posible (valores pico para una onda de 1.2/50  $\mu$ s). En la entrada de servicio, los contadores de energía pueden incluir entrehierros de

protección entre los conductores de fase y tierra con niveles de arqueo en el orden de 8 kV. En contraste, la mayoría de los dispositivos internos de la instalación eléctrica usados en sistemas de 120 V , 240 V y 480 V tienen niveles de arqueo entre fases o entre fase y tierra alrededor de 6 kV. Por lo tanto este nivel de 6 kV puede ser seleccionado como un límite típico pero no un límite garantizado para la magnitud de transitorios en un sistema de potencia interno.

Nota: este límite de 6kV establecido como un límite superior es probable que sea excedido en ambientes de bajo voltaje por razones establecidas.

### 5.6.2.2 Razón de ocurrencia contra nivel de voltaje

Los datos recogidos de muchas fuentes han llevado al diagrama en log-log mostrado en la figura 5.6.1. Este diagrama muestra los valores de cresta de los transitorios, independientemente de otras formas de onda y ubicación de registro, de todos los registros en toda la literatura.



**Figura 5.6.2**  
**Razón de la ocurrencia de los transitorios versus el nivel de voltaje en sitios sin protección.**

Nota:

- (1) En algunos lugares, las descargas a través del aire pueden limitar los sobre voltajes.
- (2) La figura muestra una medida de la severidad de los transitorios. Otras posibles mediciones de corriente pico, tiempo de subida, y transferencia de energía.

Los datos reportados por muchos observadores en los lugares donde ellos monitorearon muestran un número decreciente de ocurrencias más elevadas, con una pendiente de cresta más elevada, sin embargo, el número de ocurrencia varia de sitio a sitio. Así, un conjunto de estos registros pueden establecer la razón de ocurrencia de los eventos más probables de baja

amplitud, entonces es menos probable que ocurran los eventos partiendo de la pendiente general. Las tres regiones mostradas en la figura 6 y definidas baja, media, y alta expresan la presentación de los datos en forma empírica que es aplicable, si algún conocimiento está disponible o si alguna suposición se hace en el nivel de la exposición del sitio, como es definido a continuación.

### 5.6.2.3 Niveles de exposición.

El nivel de exposición del ambiente puede ser relacionado con las del los sistemas de potencia a los transitorios inducidos. La siguiente descripción se ofrece sobre los niveles de exposición:

**Exposición Baja.** Sistemas en áreas geográficas conocidas por su baja actividad de rayos con pocas cargas o con poca actividad de carga o condensadores.

**Exposición Media.** Sistemas en áreas geográficas conocidas por su media a alta actividad de rayos, o con transitorios de conmutación significativos.

**Exposición Alta.** Esas instalaciones que tiene exposiciones de transitorios mayores que aquellos definidos por exposición baja y exposición media. Las condiciones más severas resultan a partir de la exposición extensa al rayo o transitorios de conmutación inusualmente severos.

El nivel de exposición alta necesita ser reconocido, pero no debe ser indiscriminadamente aplicada a todos los sistemas. Tal aplicación general penalizaría a la mayoría de instalaciones donde la exposición es menor.

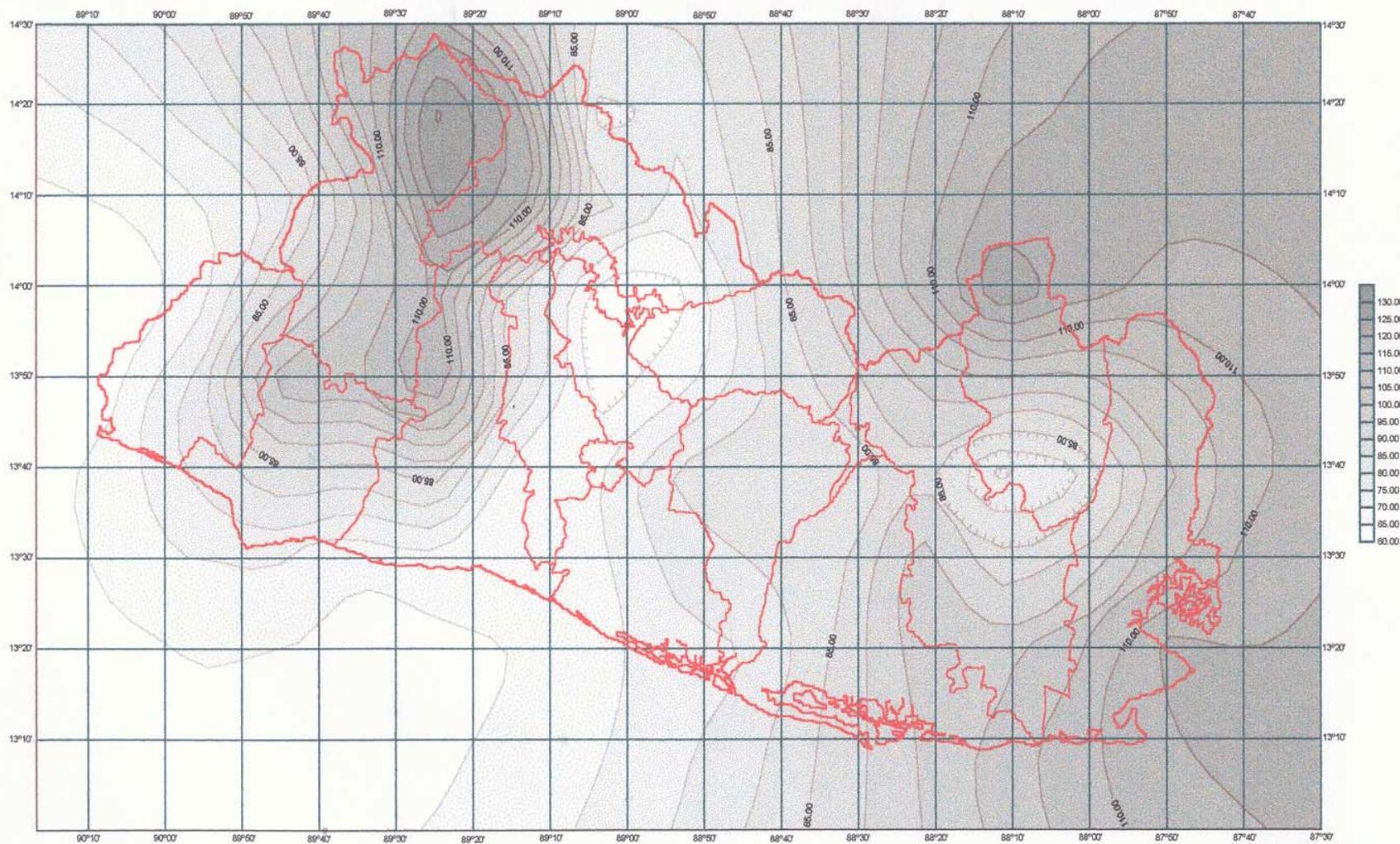
Varias fuentes principales han sido identificadas; la definición de exposición depende de que fuente está involucrada. La frecuencia de ocurrencia y el nivel de transitorios por rayos están influenciados por los niveles isocerámicos (figuras 5.6.2 y 5.6.3) y la densidad de rayos. La naturaleza del sistema de distribución de potencia (líneas aéreas abiertas, líneas tensadas abiertas, cables) las practicas de puesta a tierra también influirán en los niveles de los transitorios.

La frecuencia de ocurrencia y los niveles de transitorios en la conmutación de los sistemas de potencia dependen del modo de operación de las distribuidoras que suministra al usuario. Por ejemplo, es probable que la presencia de bancos de condensadores conmutados repercuta en el nivel de transitorios afectando a la entrada de servicio.

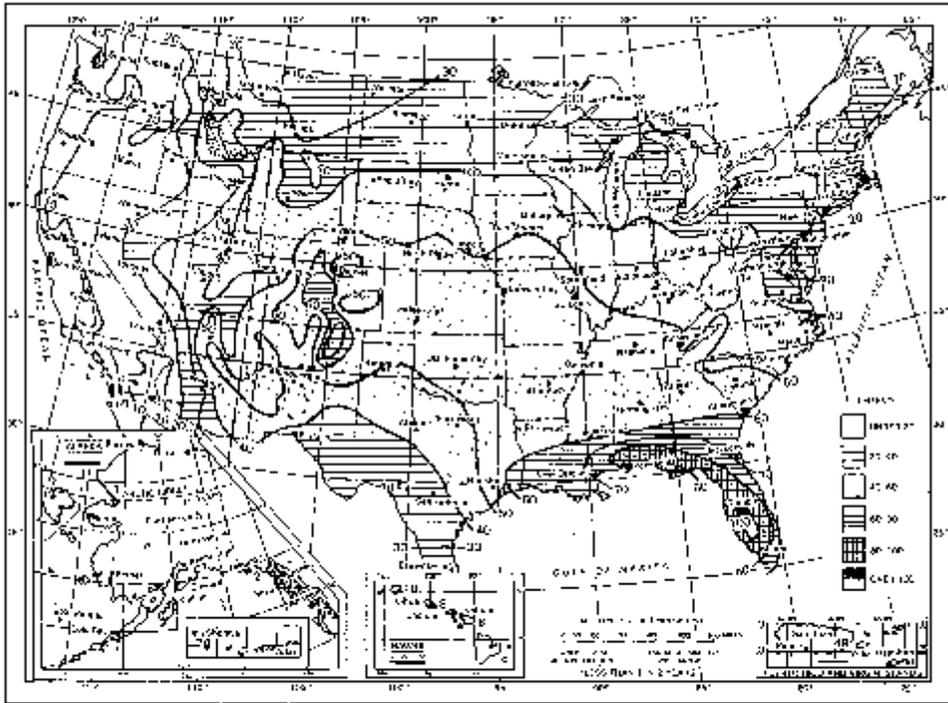
La frecuencia de ocurrencia y el nivel de transitorios por conmutación de carga depende de la naturaleza y las impedancias de carga adyacentes a ser conmutadas, también como su distancia eléctrica desde el punto de interés, el lugar de la situación geográfica o de las prácticas de la distribuidora.

Así, los niveles de exposición mostrados en la figura 5.6.1 cubre una gama amplia de situaciones y representa niveles relativos en lugar de absolutos.

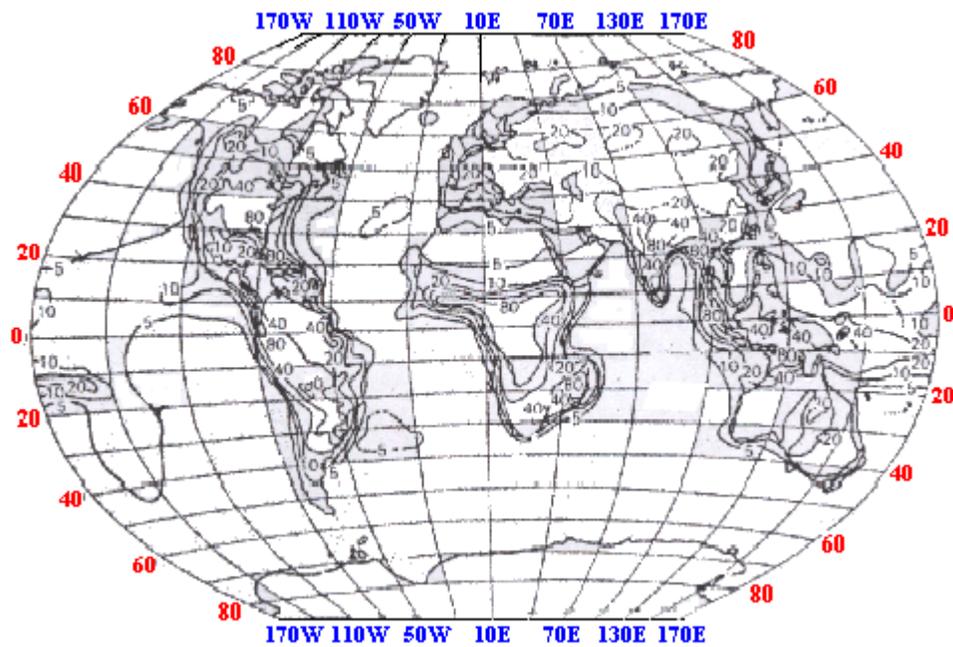
El arqueo de los dispositivos de alambrados, indica que a pesar de que una capacidad de resistencia de 6 kV puede ser suficiente, para garantizar la supervivencia del dispositivo en interiores, una capacidad de resistencia de 10 kV o mayor puede ser requerida en exteriores. Este método práctico se ha aplicado en la propuesta de la matriz de niveles de la sección 9 para formas de onda estándar y en la sección 10 para formas de onda adicionales.



**Figura 5.6.3.**  
**Mapa isoceraunico de El Salvador**



**Figura 3.6.3**  
**Nivel isoceraunico para los Estados Unidos**



**Figura 5.6.5**  
**Nivel isoceraunico para todo el mundo.**

### **5.6.3 Formas de onda recomendada.**

#### **5.6.3.1 Generalidades.**

La gran variedad de eventos reportados en la base de datos puede ser clasificada en tres tipos de transitorios, esos tres tipos serán descritos en detalle en las siguientes subsecciones; en resumen, ellos se caracterizaran de la siguiente manera:

Transitorios oscilatorios de frecuencia relativamente alta, generalmente es designado como onda oscilatoria. Aquellos al extremo más alto del rango de frecuencia tienen capacidad de deposición de energía limitada, pero puede tener voltajes de cresta altos. Aquellos al extremo más bajo del rango de frecuencia pueden tener capacidad de deposición de energía más alta pero los voltajes de cresta más bajos.

Transitorios de alta energía de varias formas de onda que generalmente se aceptan para representar niveles de sobre carga apropiados asociados con descarga directa de rayos, operación de fusibles, o conmutación de condensadores en las cercanías.

Ráfagas de transitorios muy rápidas, asociadas con conmutación de carga local, con poca energía pero capaz de producir interferencia seria o alterar los equipos.

#### **5.6.3.2 Ondas oscilatorias.**

Las mediciones en el campo y en el laboratorio indican que la mayoría de voltajes transitorios que se propagan en sistemas de bajo voltaje interiores tienen formas de onda oscilatorias. Un transitorio impactando en el sistema, aun si inicialmente era unidireccional excita la frecuencia de resonancia natural del sistema. Como consecuencia los transitorios no solo son típicamente oscilatorios, sino que pueden tener amplitudes y formas de ondas diferentes en diferentes lugares en el sistema. La frecuencia de oscilación de esos transitorios varía desde menos de 1 kHz (principalmente conmutación de condensadores) a más de 500 kHz (principalmente oscilaciones locales).

Así, más de una onda oscilatoria puede ser necesaria para representar este tipo de transitorio en la edición 1980, una onda oscilatoria “*Ring wave*” se definía con un tiempo de subida de 0.5  $\mu$ s y una oscilación decadente a 100 kHz, cada pico con el 60% de la amplitud del pico precedente de la polaridad opuesta. En la sección 10 se propone una onda oscilatoria con una frecuencia menor como una onda adicional.

La rápida velocidad de cambio del frente de la onda oscilatoria puede producir los efectos asociados con distribución de voltaje no lineal en devanados. Algunos semiconductores son también sensibles a los efectos  $dv/dt$ , en particular cuando ellos son forzados dentro o fuera de los estados de conducción, o cuando un transitorio se aplica durante una porción particular del ciclo de suministro a la frecuencia de potencia.

Tiempos de subida menores se encuentran en muchos transitorios, pero como se propagan en el alambrado o se reflejan desde discontinuidades en el alambrado, los tiempos de subida se hacen mayores.

El voltaje de pico puede producir ruptura de aislamiento en componentes y equipos conectados, aun si la energía involucrada en la onda oscilatoria de 100 kHz es pequeña. Los transitorios con capacidad de deposición de energía mayor serán representados por otras formas de onda.

### **5.6.3.3 Transitorios con capacidad de deposición de energía elevada.**

Varios tipos de eventos pueden ser el origen de transitorios con capacidad de deposición de energía elevada capaces de entregar significativamente más energía para hacer daño:

- Transitorios por rayos sobre sistemas de distribución aéreos (A)
- Transitorios por rayos originándose en líneas y viajando en cables (B)
- Transitorios generados por operación de fusibles involucrando energía atrapada en la inductancia del sistema de potencia (C)
- Transitorios generados por conmutación de condensadores de corrección de factor de potencia (D)

(A) Transitorios por rayos sobre líneas aéreas han sido representados durante mucho tiempo por medio de un transitorio de voltaje de  $1.2/50 \mu\text{s}$  y un transitorio de corriente de  $8/20 \mu\text{s}$  (IEEE C62.1-1984, [7]), lo cual se describe como “impulso” en el documento IEC 99 [B97], y como la onda combinada en este documento. Estas dos formas de onda han sido usadas durante mucho tiempo, y son fácilmente generadas en muchos laboratorios, y son una simplificación apropiada del ambiente cerca de la entrada de servicio de un edificio conectado a un sistema de distribución aéreo. También tienen capacidad de deposición de energía sustancial, cuando se aplican desde un generador con capacidad inherente para suministrar tanto una forma de onda de voltaje como de corriente (IEEE C62.45-1987 [8]), para suministrar sobrecargas representativas al equipo conectado.

Debido al tiempo frontal relativamente corto de  $8 \mu\text{s}$ , tal transitorio de corriente postulada no debería propagarse mucho dentro de un edificio. Las caídas de voltajes asociadas con la propagación de un frente transitorio de corriente de gran amplitud (así un  $di/dt$  muy elevada) en la impedancia inductiva del alambrado requeriría un voltaje de excitación en la entrada de servicio suficientemente alto para causar arqueo de la separación entre espacios. Esta limitación establece la base de la selección de formas de onda asociadas con las categorías de ubicación y hace que sus máximas amplitudes sean menos dependientes del sistema de voltajes que en los espacios reales.

(B) Transitorios por rayos viajando en sistemas subterráneos involucran duraciones mayores. Transitorios por rayos que han viajado a lo largo de un cable largo tienen frentes de onda con una pendiente menos pronunciada que la de la onda inicial, como resultado de las características de propagación del cable. El pico de transitorio de iniciación es probable que refleje la operación de un aparta rayos en la interfase entre el sistema aéreo y el cable.

(C) Transitorios generados por operación de fusibles involucrando cables largos son transitorios unidireccionales que duran varios cientos de microsegundos, dependiendo de la inductancia del cable y del transformador que está alimentando la falla siendo limpiada por el fusible.

(D) Transitorios de conmutación de condensadores y algunos otros transitorios de conmutación involucran oscilaciones amortiguadas a baja frecuencia (desde unos pocos de hertz hasta unos pocos kilohertz durando como máximo unos pocos milisegundos. Desde el punto de vista de intercambio de energía, semejante oscilación larga puede ser simplificada por la envolvente de la oscilación. Tal envolvente tendría una duración del mismo orden de magnitud que los transitorios generados por operación de fusibles.

Estos últimos tres tipos de transitorios, (B), (C), y (D), tienen amplitudes máximas que reflejan el voltaje de sistema en lugar de la separación entre espacios, en contraste con el transitorio (A). Una representación simplificada común podría ser adecuada para estos tres fenómenos.

Por ejemplo, la forma de onda unidireccional de 10/1000  $\mu$ s ha sido especificada durante mucho tiempo para requerimientos de protección de transitorios en las industrias de telecomunicaciones y control de procesos, y una forma de onda 100/1300  $\mu$ s ha sido recomendada en varios borradores de documentos IEC sobre compatibilidad electromagnética. Así, la practica recomendada actual añade dos formas de onda adicionales de mayor duración: un transitorio unidireccional (10/1000  $\mu$ s) y una onda oscilatoria de 5 kHz de baja frecuencia si la aplicación garantiza tales formas de onda.

No es inusual para la frecuencia de un transitorio de conmutación de condensadores ser mucho menor de 5 kHz, y tan baja como 300 Hz. A menor frecuencia, mayor energía disponible. Esta energía puede ser demasiado grande para un dispositivo de protección contra transitorios intentando recortar ese transitorio particularmente si el dispositivo de conmutación debe reencender durante aperturas y existe poca impedancia entre el dispositivo de conmutación y el dispositivo de protección.

Sin embargo, la dificultad es que la base de datos a cerca de esas formas de onda más largas es limitada en lo concerniente a las impedancias de fuente representativas o a las corrientes disponibles para esos transitorios de larga duración. Pruebas significativas se pueden conseguir solamente si la impedancia de fuentes o la corriente de corto circuito son definidas en adición a la forma de onda de voltaje.

Por lo tanto, en el presente estado del conocimiento, esta práctica recomendada puede solo urgir a los diseñadores y usuarios a considerar el ambiente de aplicación específico y reclama formas de onda adicionales si su conocimiento del ambiente justifica la complicación adicional de probar con esas formas de ondas adicionales.

En la ausencia de mediciones de eventos reales, algunas consideraciones teóricas acerca de la impedancia del transitorio y la impedancia de la fuente brindan lineamientos acerca de los valores apropiados de la impedancia de fuente o de la corriente disponible.

Para ondas largas en cables de sistemas de potencia, con tiempos de viajes mayores que el tiempo frontal del transitorio, la impedancia de fuente debería ser la impedancia característica del cable típicamente de  $10 \Omega$  a  $100 \Omega$  para los cables de potencia, en oposición a los valores mayores para líneas de alambres abiertos aéreos. Sin embargo, si los tiempos de viajes son menores que el tiempo frontal de transitorios, entonces la impedancia inductiva debería prevalecer, y su valor debería ser tan bajo como una fracción de unos ohmios en las frecuencias menores implicadas por tales ondas largas.

Para transitorios generados por operación de fusibles, la corriente de falla máxima involucrada en la energía atrapada ( $1/2 Li^2$ ) tiene el valor correspondiente a la corriente que deja pasar el fusible en cuestión (no la corriente de falla disponible), también la inductancia del sistema, incluyendo el cable y el transformador que alimenta la falla. La corriente que deja pasar el fusible se encuentra típicamente entre 100 y 1000 A en circuitos residenciales o comerciales y es posiblemente más elevada en circuitos industriales.

#### 5.6.3.4 Transitorios rápidos.

Apertura de circuitos por interruptores de entre hierro de aire (*relay* y contactores) han sido reconocido como productor de una sucesión de apertura y re-encendido que generan ráfagas de transitorios de oscilaciones rápidas en los circuitos que han sido conmutados. Estos transitorios han sido asociados algunas veces con fenómenos de formación de arcos bajo el título de “*showering arc*” chorro de arcos. Bajo el nombre de “transitorios rápidos eléctricos (EFT)” la IEC 801-4 (1988) requiere una prueba involucrando ráfagas de transitorios con 5 ns de tiempo de subida y 50 ns de duración para varios niveles de severidad.

La nueva versión de prueba de capacidad resistiva a transitorios (SWC) (IEEE C37.91.1-1989), destinada a *relays* de protección y sistemas de *relays*, también incluye una especificación para transitorios rápidos.

Las formas de onda para las pruebas de transitorios de capacidad resistiva SWC pide un tiempo de subida menor a 10 ns y una duración de 150 ns no muy diferente de 5 ns y 50 ns de la EFT de (los aspectos que los diferencian principalmente están asociados con el tiempo de subida, así que la diferencia entre una duración de 50ns y 150 ns podría no ser una diferencia significativa).

Más aun, la prueba SWC está principalmente propuesta para el ambiente de las subestaciones de alto voltaje, mientras que la prueba EFT esta propuesta para los equipos industriales en general. Por lo tanto esta práctica recomendada alienta el uso de la prueba EFT sobre la prueba SWC. Actualmente cuando son tomadas en consideración las tolerancias, las diferencias en los efectos en una forma de onda respecto a otra podría no ser muy significativo. Adoptando la forma de onda EFT para representar el nuevo ambiente próximo a dispositivos conmutados aparece como una alternativa razonable de selección, en armonía con las normas internacionales, para equipos sometidos a dichos ambientes.

En contraste a las otras formas de onda discutidas anteriormente, la duración de estos transitorios rápidos es corta comparado al tiempo de viaje en sistemas de alambrado de los edificios (50 ns es el tiempo requerido para viajar 10 m). Por lo tanto los conceptos de línea de transmisión son aplicables para describir la propagación de estos transitorios de sistemas eléctricos de edificios y de equipos grandes. Este hecho tiene dos implicaciones para incluir esos transitorios rápidos en la descripción de los ambientes transitorios:

Dentro de un edificio la impedancia característica del alambrado en los sistemas de bajo voltaje es típicamente de 100 ohm a 300 ohm para configuraciones L-N o L-L, y de 25 ohm a 75 ohm típicamente para configuraciones LL-G o LN-G. Esta impedancia limitara la corriente asociada con este transitorio rápido.

Después de solo una corta distancia de recorrido dentro del alambrado, la amplitud, tal como la razón de subida, de estos transitorios rápidos es atenuado. Mas aun con una pequeña resistencia o carga capacitiva al final de la línea de transmisión puede reducir el transitorio entrante (). Así, el diseño de el equipo y su método de conexión para las instalaciones eléctricas, así como también la capacitancia interna conectada a tierra, tendrá un gran efecto en el equipo con capacidad resistiva que cambia en las formas de onda y la amplitud de impacto con transitorios rápidos.

Por lo tanto, finos detalles en las especificaciones de formas de onda de los transitorios rápidos no son significantes para el funcionamiento del equipo; la única especificación para una descripción específica de las formas de onda es necesariamente reconocida por la uniformidad en los procesos de prueba. La EFT busca emular un fenómeno que ocurre en grupos repetidos de pulsos que pueden variar en amplitud y duración durante un periodo de tiempo indefinido. No es un esfuerzo por reproducir los transitorios cuando aparecen en la interfase de la instalación eléctrica; cuando se hacen otras formas de onda de transitorios; es un compromiso práctico por evaluar la inmunidad del equipo para transitorios rápidos.

Esta recomendación práctica da énfasis a la importancia de mantener una distinción clara entre los conceptos de una descripción de la ocurrencia de los transitorios y una especificación de prueba. La discusión precedida de cómo la prueba de EFT relaciona al ambiente no será tomada como “representativa” el medio es un buen ejemplo de la necesidad para mantener esta distinción.

*Nota: Apoyando el procedimiento de prueba EFT no debe llevar a la mala interpretación de que hay tales transitorios rápidos frecuentes y extendidos con crestas de 4 kV en sistemas de ca de bajo voltaje.*

La prueba EFT es la consideración que prevalece únicamente en el paso para la aceptación del equipo requerido, al parecer para el resultado en el mejoramiento de la confiabilidad del equipo. Un buen ejemplo para considerar la necesidad de transitorios rápidos es el caso de dos piezas de equipo electrónicos operando desde el mismo receptáculo, estrechamente acoplado. Desconectando la potencia de uno conservando la potencia del otro puede mantenerse con potencia el equipo para transitorios de frecuencia alta como la EFT ().

Así, una recomendación teniendo en cuenta la EFT como una forma de onda adicional es directamente relacionada a una prueba de equipo demostrando la inmunidad a perturbaciones por transitorios rápidos, en lugar de una deducción de que esta forma de onda específica puede ser hallada en el ambiente. Los transitorios rápidos ocurren durante el contacto de la formación del arco, y los circuitos digitales son lo bastante rápidos para responder (de una manera no deseada) a estos transitorios rápidos.

Especificaciones detalladas sobre los procedimientos de prueba están en la IEC 801-4 (1988) [5].

#### 5.6.4 Amplitud, energía e impedancia de la fuente.

Para cada forma de onda seleccionada como una de las posibles representaciones de los transitorios en los ambientes, el pico del voltaje en circuito abierto y el pico de corriente en corto circuito debe declararse para proporcionar una descripción completa y significativa.

Ocasionalmente, se harán esfuerzos para describir transitorios en términos de energía para ayudar a seleccionar la clasificación de un candidato para el dispositivo de protección contra transitorio. Sin embargo, este concepto puede ser una falsa simplificación porque la energía de distribución entre los elementos del circuito involucrado en un evento de transitorios depende de la impedancia de fuente (incluyendo alambrados ca) así como la impedancia del dispositivo de protección contra transitorios llamados para desviar el transitorio. Esto no es independientemente, significativo y la descripción por si misma contenida de un termino de transitorio de energía aislada. La energía entregada al equipo final es el factor significativo pero es dependiente de la distribución por medio de la fuente y la carga (equipo o dispositivo de protección de desviación de transitorios, o ambos).

En un dispositivo de protección tipo entre hierro, la baja impedancia del arco después de las más altas fuerzas de arqueado de la energía de transitorios para ser disipados en otra parte. En un sistema de protección enclavado, por lo natural, una parte sustancial de la energía transitoria es disipada en el dispositivo de protección. Además esto es esencial para usar efectivamente los dispositivos de supresión que una asunción realista será realizado en la impedancia de fuente o será duplicada por pruebas.

Observe que las formas de ondas de voltaje propuesta en esta sección es un intento para representar las formas de ondas que una fuente de transitorio produciría a través de un circuito abierto. Las formas de onda cambian cuando la fuente es conectada a una carga con impedancia finita, y el grado al cual ésta es menor es función de la impedancia de la fuente.

Los dispositivos serían capaces de resistir una corriente inyectada a través de ellos por la fuente de transitorios. También un generador de prueba con impedancia demasiado alta no podrá ser sometido a un dispositivo bajo prueba a suficiente tensión. Mientras un generador con impedancia demasiado baja podrá someterse a dispositivos de protección para tensiones severas irreales. Una prueba de la onda de voltaje específica sin la referencia para una impedancia de fuente puede significar una impedancia de fuente cero capaz de producir voltaje a través de alguna impedancia, aún en corto circuitos. Este implicará una fuente de corriente infinita, una situación claramente irreal como una impedancia excesivamente alta de generación.

La amplitud de un transitorio, como el registrado en los lugares encuestados, es citado con mucha frecuencia en voltios y es un parámetro significativo para equipos de alta impedancia expuestos a transitorios en ese lugar. Sin embargo, la amplitud de voltaje de un transitorio observado en un lugar específico depende de la interacción de la fuente y de la carga conectada en el tiempo, porque la serie de impedancia contra corriente desde el punto de observación y las impedancias shunt con la corriente abajo del punto de operación actúan como un divisor de voltaje. Desafortunadamente, hay pocos datos sobre las corrientes transitorias reales.

La capacidad de un evento transitorio para entregar una corriente transitoria real a un dispositivo conectado en shunt a través de la línea en un punto específico de la instalación es la preocupación significativa para equipo de baja impedancia expuesto a ese evento transitorio. La interacción de la fuente, alambrado y carga es aplicable a este problema debido a la acción de

corriente limitada de la fuente e impedancia de la instalación eléctrica. La resistencia efectiva de dispositivos de protección contra transitorios,  $V/I$ , es típicamente menor que  $1 \Omega$ . La impedancia eficaz de la fuente es típicamente más grande que aquella del dispositivo protección y va de unos ohmios a unas decenas de ohmios.

Una aproximación para proporcionar una descripción significativa de los transitorios es citar un voltaje de circuito abierto, aplicable a los circuitos de alta impedancia, y una corriente del corto circuito, aplicable al circuito de baja impedancia.

### **5.6.5 Razón de cambio de voltaje.**

Como se indica por el diagrama representado en la figura 5.1.1, la razón de cambio de un voltaje transitorio es un parámetro significativo para la sensibilidad del equipo a causa de perturbaciones por el acoplamiento de transitorios rápidos dentro del circuito lógico.

La discusión precedente de la EFT prueba el concepto además da perspectivas sobre el problema. Consideración recomendada de esta prueba de EFT, en el momento apropiado, también enfocara la susceptibilidad para la razón de cambio.

### **5.6.6 Categorías de ubicación.**

Debido a la amplia gama de las posibles impedancias de la fuente y de la dificultad para seleccionar un valor específico, tres amplias categorías de circuitos locales han sido definidos en este documento. Estas categorías representan la inmensa mayoría de situaciones, de aquellos servicios de entrada cercanas a aquellos inalcanzables.

Para transitorios que afectan los edificios y que se originan en las fuentes de servicio, las impedancias de fuente deben considerarse constantes, mientras las impedancias en serie de los alambros aumenta del exterior aun punto en el interior del edificio. Voltajes de circuito abierto (impedancia de carga de valores altos) para los transitorios, por otro lado los transitorios rápidos muestran poca variación dentro de un edificio porque la instalación eléctrica sencilla proporciona una pequeña atenuación.

El incremento de la impedancia en el alambrado entre la entrada de servicio y el punto de conexión para una pieza de equipo tendrá un efecto en la corriente transitoria. Esta área de impedancia es un límite en la razón máxima en el cambio de la corriente que puede ocurrir en la instalación eléctrica porque los cambios rápidos de corriente requieren un voltaje de operación que produciría arco en el alambrado de la fuente, cortando el transitorio antes que pueda viajar más allá dentro del edificio.

La figura 5.6.7 y 5.6.8 muestra la aplicación de tres categoría de ubicación para la instalación eléctrica de sistemas de potencia ca de bajo voltaje.

Estas tres categorías de ubicación pueden parecer similares a tres de las cuatro categorías de sobrevoltaje definidas en IEC 664 (1980) [4]. Sin embargo, las categorías de la IEC 664 (1980) [4] son categorías de voltaje, mientras que las categoría de ubicación definidas aquí son categorías de impedancias.

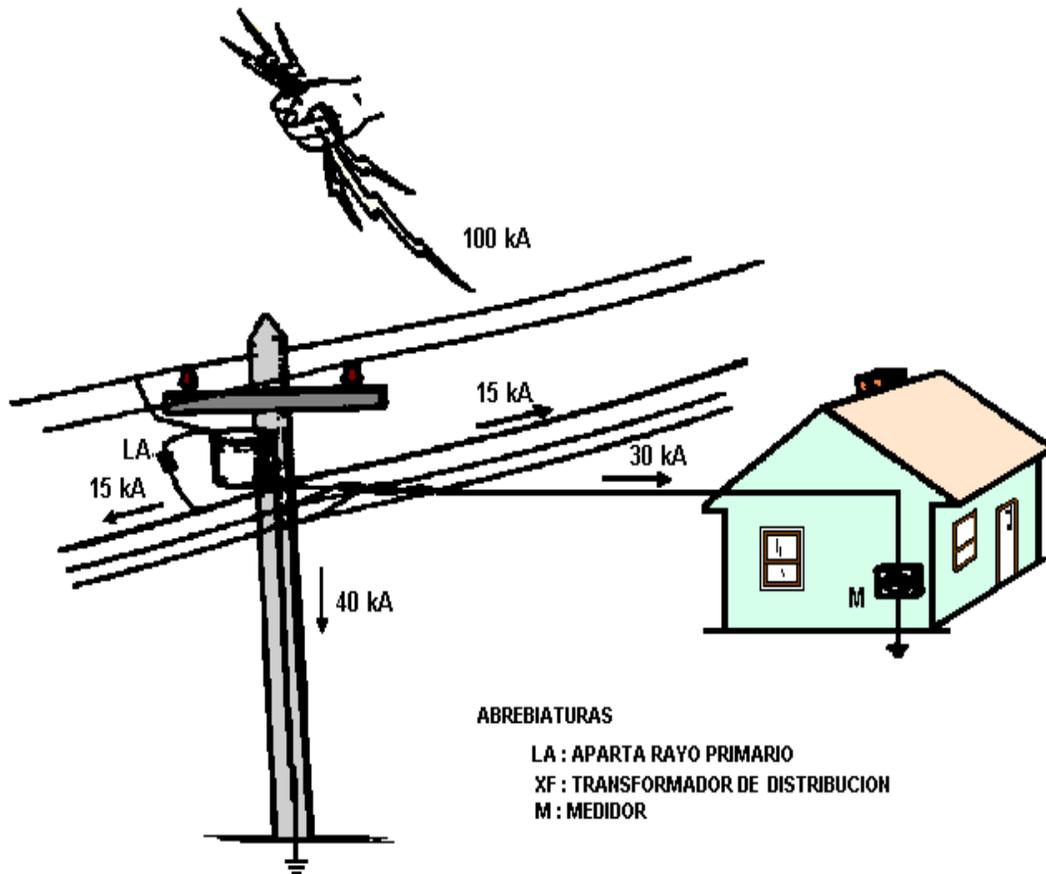
La categoría de ubicación C es probablemente para ser expuesta considerablemente a grandes voltajes que la categoría de ubicación B porque las limitaciones de rayos ocurren a valores grandes. En particular, el efecto de limitar el arco en entre hierros u otros soportes que podrían existir en medidores de vatios-hora más allá de la corriente transmitida no está disponible en la categoría de ubicación C. La razón de exposición alta de la figura 5.6.2 puede

aplicarse, con excesos de voltajes de circuito abierto de 10 kV y corrientes de descarga de 10kA o más. La experiencia en el campo provee alguna información: aparta rayos secundarios tendrán un rango de 10 kA, 4/10  $\mu$ s siendo aplicados por muchos años en la categoría de ubicación C y ha demostrado su capacidad por desviar eficazmente la mayoría de corrientes transitorias asociadas con ese ambiente. Esta observación proporciona un límite superior razonable a los niveles de transitorios exceptuando los ambientes típicos de la categoría de ubicación C.

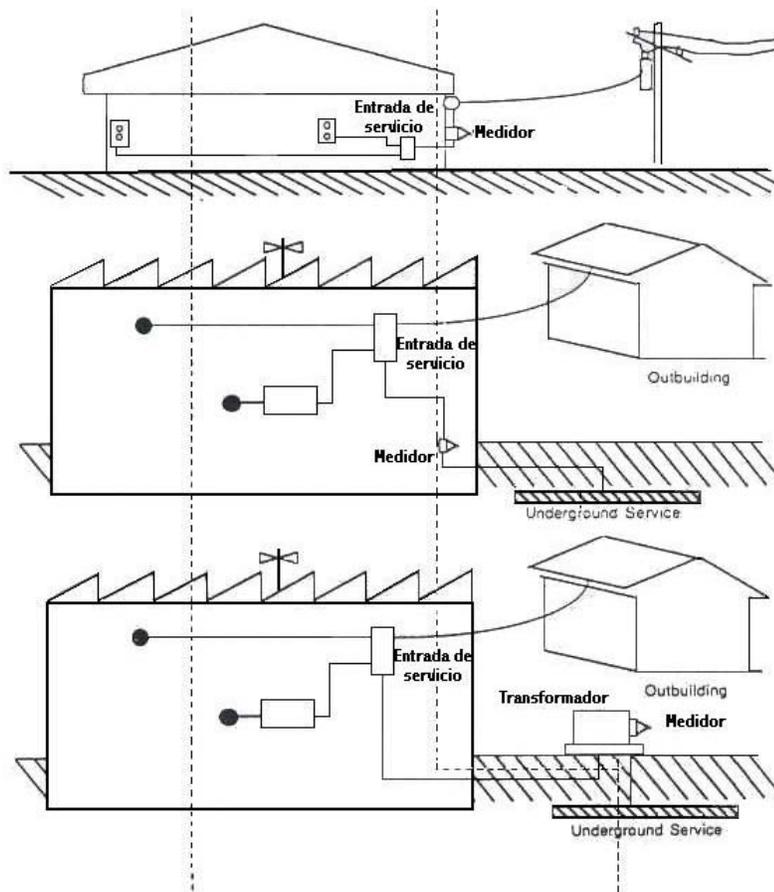
Por supuesto, el choque de rayo directo en un punto de interés producirá grandes voltajes y corrientes.

En las tablas de la sección 5.9 y 5.10, tres categorías de situaciones son consideradas, A, B, y C. Esto no es generalmente necesario.

La mayoría de aplicaciones se involucran dentro de ambientes de corrientes bajas desde la conexión de la entrada de servicio, lejos de los niveles de tensión involucrados en la categoría de ubicación C. Así, la descripción del ambiente en la categoría de ubicación C no será indiscriminadamente cambiada dentro de los requerimientos de operación específicos para todo el equipo, solamente con el objetivo de conservar el diseño. Para un nivel dado de exposición, los voltajes son los mismos en la categoría de ubicación A y B; solo los niveles de corriente cambian.



**Figura 5.6.6. Efectos de un rayo impactando en un sistema de distribución**



**Figura 5.6.7**  
**Categorías de Ubicación**

**A**

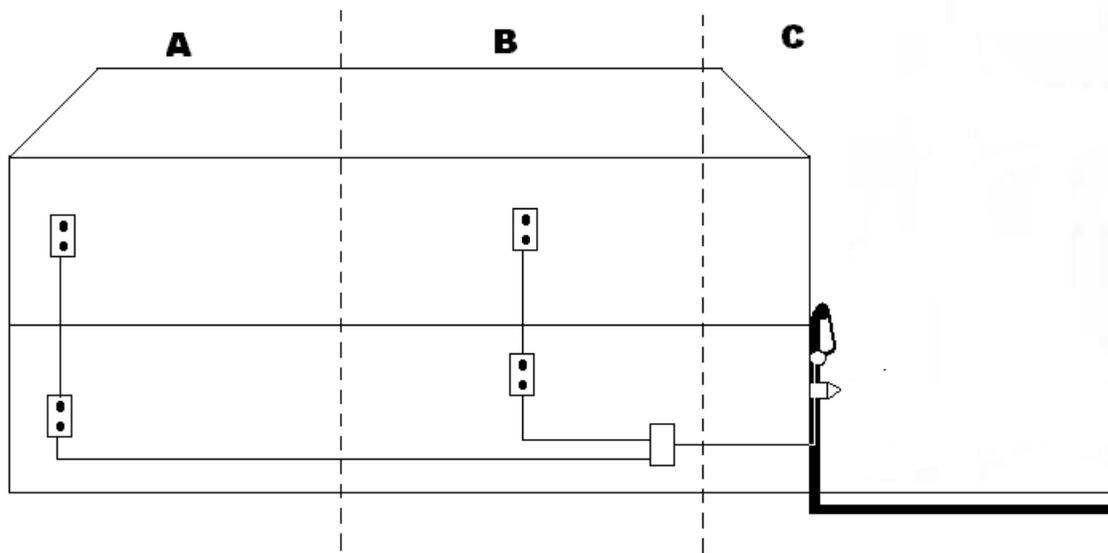
- Tomas de corriente y Paneles auxiliares lejanos
- Todos los toma de corriente a más de 10 m (30 ft) de la Categoría B.
- Todos los toma de corriente a más de 20 m (60 ft) de la Categoría C.

**B**

- Alimentadores y paneles auxiliares cercanos.
- Componentes de panel de distribución.
- Alimentadores de planta industrial y barra de conexión.
- Componentes industriales pesados cercanos a la acometida.
- Sistemas iluminación en edificios grandes.

**C**

- Acometida
- Caída de tensión desde el poste hasta el edificio
- Distancia entre medidores y tableros de distribución
- Línea subterránea a sistema



**Figura 5.6.8.**  
**Escuela de Ingeniería Eléctrica**

## **5.7 Planificación recomendada para inmunidad de transitorios.**

### **5.7.1 Generalidades.**

Esta sección presenta recomendaciones paso a paso para ser tomadas y para lograr inmunidad de transitorios en equipos conectados a instalaciones eléctricas de sistemas de potencia ca de bajo voltaje. Este acercamiento implica el reconocimiento de la relación de susceptibilidad del equipo, hostilidad del ambiente y el grado de fiabilidad requerido para el equipo.

Las formas de ondas típicas discutidas en la sección 5.7 podrán ser usadas como recomendaciones específicas para una representación del ambiente básico con dos formas de onda estándar (sección 5.9) y tres formas de onda adicionales (sección 5.10).

Debe notarse que la recomendación de pruebas de formas de onda no es exclusivamente la especificación del desempeño de un equipo. Otros documentos, basados en formas de onda recomendadas aquí, han sido o se desarrollarán para describir el desempeño del equipo o dispositivos de protección en sistemas de potencia ca de bajo voltaje.

Los procedimientos de prueba para las formas de onda son descritos en detalle en la norma IEEE C62.45-1987 [8].

### **5.7.2 Reconocimiento de la susceptibilidad del equipo y el ambiente de prueba.**

La operación de estabilidad o antidisturbios de los equipos en los ambientes de transitorios que han sido descritos (y simplificados) en la sección 7 presenta una técnica como un estímulo económico. Una aproximación que podría proveer suficiente capacidad de resistencia en los

equipos a los transitorios para los peores ambientes puede no ser económica y técnicamente fiable.

Dependiendo de los requerimientos de operación del equipo de un operario, y el tipo de ambiente en que es usado el equipo de otro operario, un diseñador puede hacer una protección efectiva de ambos. Dos pasos son necesarios para lograr esto. El primero es el reconocimiento del ambiente en el cual el equipo será instalado. El siguiente paso es seleccionar las características apropiadas para la interfase: niveles necesarios para la protección del equipo, y capacidad operativa a los transitorios en ambientes severos.

La inmunidad del equipo a los transitorios impactando en la interfase principal puede ser económica sobre la base de un diseño tomando en cuenta la descripción realista del ambiente de transitorios. La actividad de diseño incluye coordinación de la capacidad inherente a los transitorios de los componentes del circuito interno del equipo, con las respuestas de voltajes a algunos frentes transitorios de los dispositivos de protección, para ambientes específicos.

Para sistemas simples, puede ser suficiente comparar el funcionamiento de los dispositivos de protección a la capacidad de resistencia de los componentes en funcionamiento. Para sistemas más complejos o no lineales, y para circuitos de protección de transitorios, las pruebas son siempre necesarias. El comportamiento de los circuitos no lineales es difícil de predecir, y su interacción con transitorios de un usuario y los equipos electrónicos complejos de otro usuario es común. Consecuentemente, las mediciones son inevitables. Como ayuda en este proceso, la sección 5.9 y 5.10 provee definiciones precisas (formas de onda, tolerancias, modelos de ecuaciones) de varias formas de onda representativas que han sido identificadas en la sección 5.7.

### **5.7.3 Diseño del peor caso y compromiso económico.**

Las pruebas de transitorios en equipos de interfases principales es generalmente realizada para determinar la capacidad de resistencia de los equipos a los transitorios a que pueden ser expuestos para los ambientes de transitorios esperados en la interfase. De la cantidad de experiencias de campo descritas en la sección 5.6, las formas de onda representativas que han sido recomendadas en la sección 5.7 ordenadas para reducir el programa de pruebas a un número manejable de pruebas requeridas.

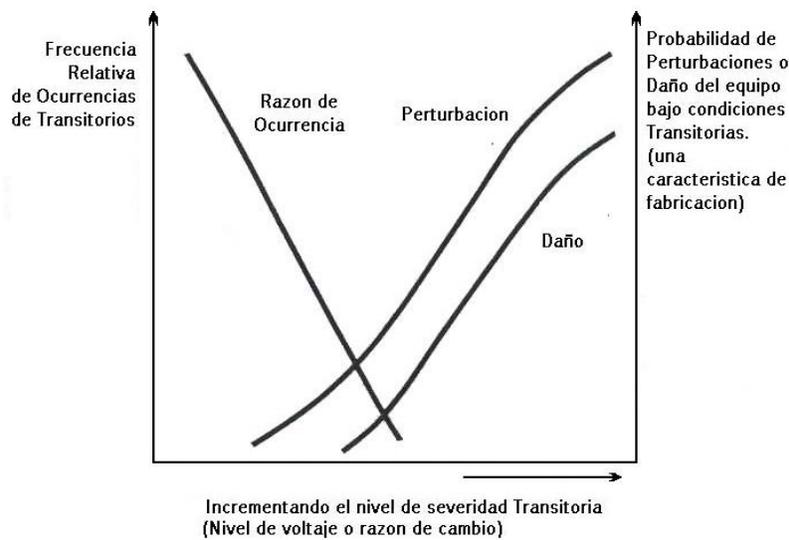
Planificación excesivamente conservadora de los requerimientos de los dispositivos especificando también un número mayor de tipos de formas de ondas posibles de transitorios y niveles altos de esfuerzos, para tener una máxima fiabilidad del equipo. El diseño de equipos de protección contra transitorios puede ser poco económico y dar un sentido falso de seguridad.

Especificando solo el máximo esfuerzo en un programa de pruebas basada en las especificaciones de los niveles severos en los ambientes puede que no se brinde protección completa y ser evitado por dos razones:

Las fallas pueden ocurrir a niveles bajos como en una simple prueba de esfuerzo máximo, por lo tanto puede obtenerse información incompleta sobre los niveles donde ocurre la falla.

Algo peor aun, pueden existir lugares en el equipo, donde las pruebas resultan exitosas a niveles de esfuerzo grandes, pero a niveles de esfuerzo bajo puede producir una falla o resultados inesperados. Hay una tendencia a creer que más corriente o voltaje producen resultados devastadores. Esto no es necesariamente cierto. Frecuentemente, un transitorio de alta energía puede hacer que un dispositivo de protección reaccione más rápido que un transitorio de baja energía.

En general, un compromiso basado sobre análisis de riesgo es un elemento necesario para el diseño y especificaciones del equipo. Mas aun, el nivel específico de inmunidad de los equipos sin un diseño particular (numero de catalogo y selección) no es un parámetro de valor simple, pero es representado por una distribución estadística. En ese sentido, la amplitud de los transitorios a que son expuestos los sistemas de bajo voltaje son una distribución estadística. Aunque, el reconocimiento de la susceptibilidad del equipo involucrado con el ambiente y el nivel de transitorios es la intercepción probabilística, como se ilustra por la figura 5.7.9.



**Figura 5.7.9.**  
**Concepto de la inmunidad contra transitorios.**

El rango de ambiente electromagnético puede variar mucho en el cual una pieza particular de equipo puede hacerse operar. Algunos equipos son hechos para ambientes específicos mientras que otros para una variedad de ambientes. En adición, los ambientes particulares pueden cambiar con el tiempo, como una función de muchos factores, incluyendo geografía, cambio de clima, y cambios anuales en locales de incidencia de rayos. Otros cambios concernientes al tiempo los complementos existentes acerca de sistemas eléctricos y equipo electrónico que puede generar interferencia o transitorios dañinos.

Se proveen varios estándares para equipo industrial, grupos de industria y una guía a la selección de la resistencia de los equipos a niveles severos de EMI, y el ambiente de transitorios discutido aquí son sugeridos. En áreas comerciales y consumidores grandes, sin embargo, las mediciones son hechas a menudo con un excesivo mal funcionamiento o daños sobre un usuario y excesivos costos sobre otro. Una solución para este dilema actual es diseñar

productos cuya inmunidad básica a los transitorios es coordinada con niveles de exposición bajo o medio, mientras se ofrecen mejores opciones, o protecciones adicionales para ambientes más hostiles.

Independientemente del nivel de inmunidad requerido o proveer opciones sin alteración o daño, algunas clases de protección son tal que se incluyen para evitar daños consecuentes, tal como incendios o explosiones, mientras no se permita la falla del equipo.

Para hacer evaluaciones acerca de estas y otras alternativas, para toda clase de equipo, sobre la inmunidad de transitorios han sido preparadas en esta sección

#### **5.7.4 Efectos de los transitorios.**

El propósito natural y funcional del equipo influye en el juicio del efecto de un transitorio que será considerado aceptable o inaceptable. Cuando las consecuencias de una falla no son relacionadas con la seguridad solamente representan una pérdida económica, puede ser apropiado un cambio en los costos de protección contra la probabilidad de una falla causada por alta energía. Pero con poca frecuencia encontraremos transitorios. Raramente ésta puede tomar dos aspectos diferentes cuando o donde:

Durante la operación de la inmensa mayoría de equipos en servicio, pueden ocurrir en raras ocasiones transitorios con niveles relativamente altos de voltajes o corrientes, tal como el causado por los rayos o múltiples descargas durante la descarga de energía del banco de condensadores ¿la pregunta es cuando ?

Entre todos los equipos de servicio, unos pocos lugares de instalación raramente son inspeccionados y consistentemente dañados por transitorios similares a transitorios de conmutación local, por ejemplo, el banco de condensadores para corrección del factor de potencia ¿la pregunta es cuando?

Las consecuencias de un transitorio afectando en la interfase del alambrado puede ser clasificado en cuatro amplias categorías, como se discute a continuación en los siguientes numerales, considerando varios aspectos:

- (1) *Cambio no observado.* Esta ausencia de cambios visibles, que demostraría que el equipo está actualmente inmune al nivel de transitorios en cuestión; sin embargo las apariencias pueden ser engañosas. El equipo puede continuar operando normalmente sin los límites especificados, así el criterio conocido de “no hay pérdida de función u operación” no obstante las posibles consecuencias significativas son: degradación instantánea del funcionamiento sin límites pero con la probabilidad de una gran degradación de una falla latente en un componente, o una consecuencia imprevista en cualquier lado en la operación del equipo ().
- (2) *Perturbación.* Esta consecuencia puede ser una alteración recuperable por si misma por diseño del software y por lo tanto aparentemente no inmediato, o puede ser una perturbación permanente requiriendo la intervención del operador o la acción automáticamente programada después de un tiempo de retardado. Muchos documentos

sobre los métodos de prueba sugieren tres clases para este tipo de consecuencia, como los siguientes:

(a) Menor: pérdidas temporalmente aceptables de la función pero sin falla de operación.

(b) Mayor: fallas temporales de operación o funcionamiento (que son resueltas por sí mismas).

(c) Crítica: falla de operación o funcionamiento que requiere de la intervención del operador o reiniciar el sistema. Otra consecuencia que podría ser clasificada en esta categoría es una alteración causada por la acción limitadora de las instalaciones aéreas sin la degradación permanente del aislante sólido adyacente.

(3) *Daño*. Este incluye la consecuencia leve y obvia. Como se discutió en el numeral 1, los daños pueden ocurrir sin ser detectados a menos que se haga una evaluación especial del equipo que está operando uno de los problemas más agraviantes en la prueba de aislantes es el riesgo de creación de un defecto incipiente por la aplicación de la prueba de transitorios.

(4) *Consecuencias de los Daños*. Estas consecuencias incluyen la posibilidad de que el equipo sujeto a transitorios pueda causar daños de importancia en los alrededores y más allá del daño o la alteración sufrida por el equipo mismo. Puede ocurrir una explosión o iniciarse un incendio. El daño podría ocurrir desde las alteraciones no observadas del hardware, durante la cual los datos se convierten en datos distorsionados que pueden degradar sutilmente otros elementos en la base de datos, con el operador ausente que ignora la situación.

El criterio para aceptar o rechazar tiene que tomar en cuenta estas diferentes consecuencias. Por ejemplo, las alteraciones pueden ser controladas hasta que se alcance un nivel específico de severidad, como anteriormente se dijo las ocurrencias de una falla es declarada aceptable; en algunos niveles de severidad altos, el daño puede ser decretado aceptable, con tal de que la seguridad no sea expuesta y no ocurra ningún daño consiguiente. En todo caso, es indispensable que la validez de los datos, donde se aplique, sea verificado siguiendo cada prueba para asegurar que el daño de la base de datos no ha ocurrido.

Además, el nivel a que una perturbación o daño ocurra depende de la misión del equipo. Por esta razón, niveles universales de resistencia no deben asignarse a todo el equipo. Por lo tanto, los valores de niveles de ambiente propuestos en las próximas secciones no deberían ser ciegamente construidos como requerimientos de pruebas de niveles de severidad.

### **5.7.5 Selección de las formas de onda.**

Cinco tipos de formas de ondas transitorias son descritas en términos generales en 5.6.4 dos de esas son formas de ondas estándar recomendadas y tres como formas de onda adicionales. La tabla 5.7.1 presenta un resumen de estas formas de onda, mostrando en cual categoría de ubicación son aplicables. Información adicional sobre formas de onda estándar son presentadas en la sección 5.9, y sobre las formas de ondas adicionales en la sección 5.10. estas dos secciones proponen definiciones precisas, incluyendo tolerancias sobre el funcionamiento del equipo de prueba y ecuaciones para las formas de onda normal. Las tolerancias son propuestas para ayudar a asegurar formas de onda reproducibles en laboratorios diferentes y

para proveer una perspectiva realista sobre las limitaciones de las pruebas de generación y medición de transitorios.

*NOTA: El factor de las cinco formas de ondas que son listadas en este documento no deben ser construidas como un requisito de tal manera que todos los equipos sean sujetos a los cinco tipos de transitorios. La onda oscilatoria de 100 kHz y la onda combinada son recomendadas como un diseño básico y para prueba de transitorios. Las formas de onda adicionales (la EFT, la onda de 10/1000  $\mu$ s, y la onda oscilatoria de 5kHz) necesitan ser incluidas sólo cuando existe suficiente evidencia para garantizar su uso.*

De esta manera, una transición se hace entre la descripción del ambiente transitorio, el cual fue el primer objetivo enunciado en el alcance de estas prácticas recomendadas, y de las recomendaciones de las pruebas de forma de onda específicas, que es el segundo objetivo. La amplitud de la prueba de transitorio es aún así una característica seleccionada por las partes involucradas, tomando en consideración la exposición al ambiente listado en las tablas de la sección 5.9 y 5.10. En la selección de estos niveles, el concepto de Nivel de Control transitorio puede proveer una guía en la determinación de los márgenes de diseño y procedimientos de prueba.

**Tabla 5.7.1.  
Resumen de formas de onda estándar y adicionales aplicables a categorías de ubicación  
A, B y C**

Categoría de ubicación	Onda oscilatoria de 100 kHz	Onda combinada	Ráfagas EFT 50 ns	Onda 10/1000 $\mu$ s	Onda oscilatoria 5 kHz
<b>A</b>	<b>Estándar</b>	<b>Ninguno</b>	<b>Adicional</b>	<b>Adicional</b>	<b>Adicional</b>
<b>B</b>	<b>Estándar</b>	<b>Estándar</b>	<b>Adicional</b>	<b>Adicional</b>	<b>Adicional</b>
<b>C</b>	<b>Ninguno</b>	<b>Estándar</b>	<b>Ninguno</b>	<b>Adicional</b>	<b>Adicional</b>

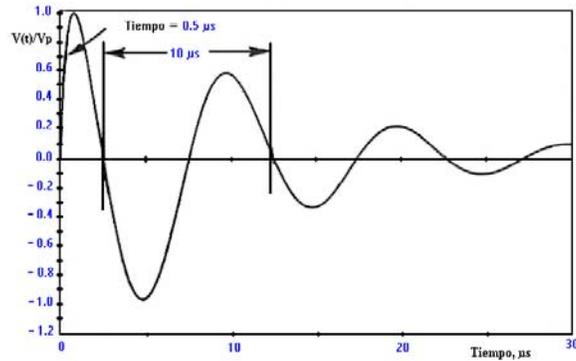
La experiencia ha mostrado que la generación improvisada de transitorios, pueden producir en poco tiempo una tensión útil para la evaluación de la inmunidad interna del usuario, pueden producir también formas de onda que pueden no ser fácilmente reproducibles dentro de otros laboratorios. La salida de formas de onda de generación construidas desde un circuito público son dominadas a menudo por componentes parásitas y no producen las formas de onda deseadas. La generación improvisada puede carecer de características críticas de seguridad. Por consiguiente, la revisión de este documento provee información precisa sobre el diseño de formas de onda, pero no provee descripciones amplias de los circuitos para generación de transitorios.

## **5.8 Definiciones formas de onda estándar para pruebas de transitorios.**

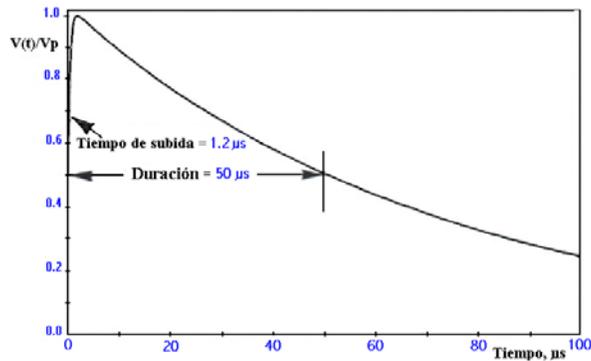
### **5.8.1 Generalidades.**

Los dos formas de onda estándar recomendados son la onda oscilatoria de 100 kHz y la onda combinada de 1.2/50  $\mu$ s – 8/20  $\mu$ s. Los parámetros de estas dos formas de onda estándar se resumen en 5.9.1.1 y 5.9.1.2. Los dibujos de las tres formas de ondas normales (una para la onda oscilatoria, dos para la onda combinada) son mostradas en las figuras 5.8.1-5.8.3. El

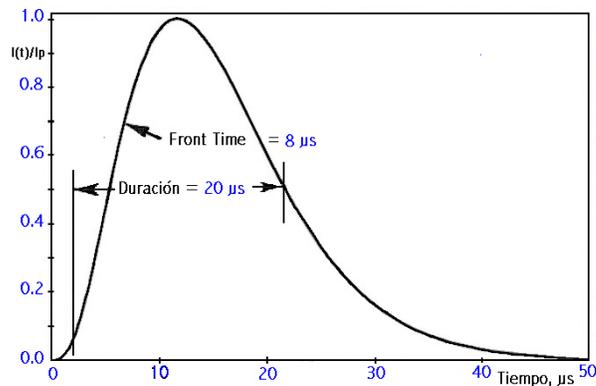
criterio para la selección de las crestas de voltaje y las corrientes que corresponden a varios ambientes de exposición son discutidos en la sección 5.9.2 con referencia a las tablas 5.9.3, 5.9.4, 5.9.5. Las implicaciones para las condiciones de prueba son discutidas en la sección 5.9.3. Una descripción detallada incluyendo tolerancia, de estas dos formas de onda estándar son dados en la sección 5.9.4. En la sección 5.9.5 se dan las ecuaciones que describen las formas de onda.



**Figura 5.8.10**  
**Onda oscilatoria de 100kHz.**



**Figura 5.8.11**  
**Onda combinada, voltaje circuito abierto.**



**Figura 5.8.12.**  
**Onda combinada corriente corto circuito.**

### **5.8.1.1 Onda oscilatoria de 100 Khz.**

Un dibujo de la onda oscilatoria normal se muestra en la figura 5.8.10, y otros detalles adicionales son dados en la sección 5.8.4.1. Ninguna corriente de corto circuito es especificada para la onda oscilatoria de 100 kHz. Sin embargo, un pico de corriente de corto circuito es propuesta en la sección 5.8.2 de acuerdo a la categoría de ubicación. La relación nominal del pico de voltaje de circuito abierto al pico de corriente de corto circuito (impedancia efectiva) es especificada a 12 ohmios para simulaciones de ambientes de categorías de ubicación B o 30 ohmios para simulaciones de ambientes de categorías de ubicación A. La amplitud nominal del primer tipo de cualquiera de los voltajes de circuito abierto o de las corrientes de corto circuito son seleccionadas por las partes involucradas (ver sección 5.8.2), de acuerdo a la severidad deseada.

### **5.8.1.2 Onda combinada.**

Las ondas combinadas involucran dos formas de ondas un voltaje de circuito abierto y una corriente de corto circuito, mostradas en las figura. 5.8.11 y 5.8.12 respectivamente. Detalles adicionales se dan en la sección 5.8.4.2. La onda combinada es entregada por un generador que aplica una onda de voltaje de  $1.2/50\mu\text{s}$  a través de un circuito abierto y una corriente de onda de  $8/20\mu\text{s}$  dentro de un corto circuito. La forma de onda exacta que es entregada está determinada por el generador y la impedancia para que el transitorio sea aplicado.

El valor de cualquier pico de voltaje de circuito abierto o del pico de corriente de corto circuito será seleccionado por las partes involucradas (Ver sección 5.8.2), de acuerdo a la severidad deseada. La relación nominal del pico de voltaje de circuito abierto al pico de corriente de corto circuito es 2 ohmios para todos los niveles de severidad.

### **5.8.2 Selección del valor pico de la forma de onda estándar.**

Las tablas 5.8.2, 5.8.3 y 5.8.4 incluyen una matriz de nivel múltiples de categorías de ubicación, tipos de transitorios, y picos de voltaje y corrientes, suministrados como una guía hacia la selección de un conjunto apropiado de parámetros de diseño o prueba. Las tablas 5.8.2, 5.8.3 y 5.8.4 proveen solamente un menú. ***No son requisitos obligatorios.***

**Tabla 5.8.2.**  
**Onda oscilatoria estándar de 0.5  $\mu$ s – 100 kHz**  
**Voltajes y corrientes transitorias esperadas en las Categorías de ubicación \* A y B<sup>†</sup>**  
**Exposiciones<sup>‡</sup> baja, media y alta**  
**Modos monofásicos<sup>∞</sup>: L-N, L-G y [L&N]-G**  
**Modos Polifásicos: L-L, L-g y [L's]-g**  
**(Véase tabla 5 para el modo N-G)**

Categoría de Ubicación *	Sistema Exposición <sup>‡</sup>	Valores pico <sup>**</sup>		Impedancia efectiva <sup>††</sup> ( $\Omega$ )
		Voltaje (kV)	Corriente (kA)	
A1	Baja	2	0.07	30
A2	Media	4	0.13	30
A3	Alta	6	0.2	30
B1	Baja	2	0.17	12
B2	Media	4	0.33	12
B3	Alta	6	0.5	12

\* ver sección 7.7 para definición y discusión de las categorías de ubicación.

<sup>†</sup> Ninguna prevención es hecha para una Ondas oscilatoria de 100 kHz en la categoría C.

<sup>‡</sup> Ver la sección 7.3.3 para la definición y discusión de la exposición en sistemas.

<sup>∞</sup> Véase IEEE C62.45-1987 [8] para la discusión de los modos de acoplamiento.

<sup>\*\*</sup> Los tres valores mostrados en la categoría de ubicación, para los tres sistemas de simulación dentro de la categoría de ubicación, ha sido determinado por acuerdo general para proporcionar una guía y uniformidad en los procedimientos de prueba. Otros niveles pueden ser negociados entre las partes involucradas.

Haciendo pruebas de simulación, aprovechando los valores de voltaje mostrados por voltajes de circuito abierto de las pruebas del generador o los valores de corriente mostrados de la corriente de corto circuito de las pruebas del generador (con acoplamiento de red y filtro de respaldo local).

<sup>††</sup> Impedancia efectiva de la fuente transitoria, emulada por la prueba del generador, es definida como la razón de pico de voltaje al pico de corriente. Tiene las dimensiones de una resistencia, pero no es una resistencia pura (véase 9.4.1).

**Tabla 5.8.3.**  
**Onda combinada estándar 1.2/50  $\mu$ s- 8/20  $\mu$ s**  
**Voltajes y corrientes transitorias esperadas en las Categorías de ubicación \* B y C<sup>†</sup>**  
**Exposiciones<sup>‡</sup> baja, media y alta**  
**Modos monofásicos<sup>∞</sup>: L-N, L-G y [L&N]-G**  
**Modos Polifásicos: L-L, L-g y [L's]-g**  
**(Véase tabla 5 para el modo N-G)**

Categoría de Ubicación *	Sistema Exposición <sup>‡</sup>	Valores pico**		Impedancia efectiva <sup>††</sup> ( $\Omega$ )
		Voltaje (kV)	Corriente (kA)	
B1	Baja	2	1	2
B2	Media	4	2	2
B3	Alta	6	3	2
C1	Baja	6	3	2
C2	Media	10	5	2
C3	Alta	20	10	2

<sup>†</sup> Ninguna prevención es hecha para una onda combinada en la categoría A; sin embargo, equipo conectado a circuitos de derivábamos pequeños pueden estar expuestas a un nivel moderado de transitorios de ondas combinadas (UL 1449-1988 [B96]).

<sup>‡</sup> Ver la sección 7.3.3 para la definición y discusión de las exposición de sistemas.

<sup>∞</sup> Véase IEEE C62.45-1987 [8] para la discusión de los modos de acoplamiento.

\*\* Los tres valores mostrados en la categoría de ubicación, para los tres sistemas de simulación dentro de la categoría de ubicación, ha sido determinado por acuerdo general para proporcionar una guía y uniformidad en los procedimientos de prueba. Otros niveles pueden ser negociados entre partes involucradas.

Haciendo pruebas de simulación, aprovechando los valores de voltaje mostrados por voltajes de circuito abierto de las pruebas del generador o los valores de corriente mostrados de la corriente de corto circuito de las pruebas del generador (con acoplamiento de red y filtro back local).

<sup>††</sup> Impedancia efectiva de la fuente transitoria, emulada por la prueba del generador, es definida como la razón de pico de voltaje a el pico de corriente. Tiene las dimensiones de una resistencia, pero no es una resistencia pura (véase 5.9.4.2).

**Tabla 5.8.4.**  
**Modo Neutro-Tierra (N-G)**  
**Estándar para formas de onda representativa y niveles máximos de voltajes y corrientes**  
**transitorios en interiores de edificios para modo N-G, dependiendo de la aplicación**  
**neutro tierra o conexiones practicas.<sup>φ%ψ</sup>**

		Transitorio aplicado				
		0.5 μs – 100 kHz			1.2/50 μs – 8/20 μs	
Practica neutro a tierra	Distancia de Entrada o fuente de transitorio	Exposición del sistema	voltaje pico (kV)	Impedancia efectiva (Ω)	voltaje pico (kV)	Impedancia efectiva (Ω)
Neutro aterrizado en la entrada de servicio	Muy cerca	Todas	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
	Cercano	Todas	1	30	Ninguno	Ninguno
	Lejos	Todas	3	30	Ninguno	Ninguno
Neutro no aterrizado en entrada de servicio	Muy lejos	Baja	2	12	2	2
	Muy lejos	Media	4	12	4	2
	Muy lejos	Alta	4	12	4	2

<sup>φ</sup>Los valores de voltaje pico e impedancia efectiva están en tipo de letra itálica para enfatizar que no hay base de datos para sustentar estos valores. En lugar de ello, estos números y formas de onda han sido seleccionados en consenso para proveer procedimientos de prueba uniformes. Estos valores no son propuestos como requerimientos obligatorios.

<sup>χ</sup>Conectando el neutro de los equipos con conductor a tierra (aterrizado) y a la red de aterrizaje del edificio en la entrada de servicio, o a una separación derivada de la fuente del sistema de potencia ca, impide la propagación de transitorios externos en modo N-G.

Esta situación, que incluye la separación derivada de la fuente de potencia ca, correspondientes a los requerimientos de ANSI/NFPA 70-1990 [2]. En tales instalaciones, los transitorios N-G pueden incluso ser generados por la conmutación de cargas internas o por modo de conversión cuando las corrientes fluyen en la inductancia del neutro o conductores de tierra, o en ambos. La onda oscilatoria es una representación apropiada del voltaje inducido en el alambrado.

<sup>ψ</sup> Cuando el neutro de los equipos con conductor a tierra no es conectado (proteccion atierra) ni la red de tierra del edificio a la entrada de servicio, los transitorios N-G pueden ser requeridos en una manera similar a los definidos para los modos L-L, L-N, L-G, como se muestran en las tablas 5.8.2 y 5.8.3. Todas estas situaciones severas se encontraran en instalaciones no sujetas a ANSI/NFPA 70-1990 [2]. Son practicas estandar en ciertas ciudades de europa.

Las recomendaciones del presente documento se orienta a la necesidad de deliberar para crear alternativas. Pero deja la opción a las partes interesadas en los problemas, quién se presume tener el mejor conocimiento disponible de esta situación. Ya que los niveles de exposición de los sistemas pueden ser diferentes con respecto a las fuentes de los transitorios y a las formas de onda, se mantienen tablas separadas de la onda oscilatoria y de la onda combinada. Por ejemplo, una instalación puede ser localizada en un área de alta actividad de descarga eléctrica pero pequeña actividad de conmutación (dando más peso a la onda combinada) o viceversa.

Sin embargo, tomando en cuenta cada opción puede ser difícil. Por otra parte, la naturaleza y misión del equipo tienen una influencia grande sobre las opciones. Algunos equipos probablemente serán operados en una exposición de ambiente y categoría de ubicación bien-definido; Otros pueden ser operados en una amplia variedad de exposiciones y categorías de ubicación. Por lo tanto, la consecuencia de una falla, y así la selección de un grado de margen, se relaciona a la misión del equipo.

Por otra parte, en atención a equipos grandes, sería impráctico o poco realista ajustar las especificaciones de resistencia del equipo contra transitorio en un ambiente de exposición específico. En tales casos, una selección debe hacerse para protección de una situación típica, ningún extremo a menos que la vida de apoyo o los requisitos similares son asignados a un diseño conservador.

### **5.8.3 Condiciones de prueba.**

#### **5.8.3.1 Mediciones de la potencia eléctrica.**

Durante las mediciones de la potencia eléctrica de los equipos conectados a la línea principal, es necesario interponer un filtro de respaldo entre el equipo bajo prueba (EBP) y la línea principal, usando una red de acoplamiento entre el generador de transitorios y el EBP, como se describe la norma IEEE C62.45-1987 [8]. La presencia de los filtros de respaldo, la red de acoplamiento y la impedancia baja de la red, alterara el área de la forma de onda comparada con la observada en las terminales del mismo generador de transitorios.

Con el intento de medir los transitorios se aplican sobrevoltajes a la conexión principal del EBP mientras el equipo está operando, el efecto de los filtros de respaldo y la red de acoplamiento sobre la forma de onda del transitorio se incluyen cuando se determina el área de la forma de onda del transitorio. Que es la expresión de “voltaje de circuito abierto” desconectando el EBP, pero con la red de acoplamiento y el filtro de respaldo. Estos son partes del generador de transitorios, aunque pueden afectar la forma de onda aplicada al EBP.

#### **5.8.3.2 Verificación del generador de prueba.**

Como consecuencia de estos efectos, es necesario que las especificaciones de la forma de onda del transitorio para la onda oscilatoria sea de  $0.5 \mu\text{s}$ -100 kHz y la combinación de onda de  $1.2/50 \mu\text{s}$  -  $8/20 \mu\text{s}$  para una satisfacción adecuada. Una verificación inicial se puede hacer de las siguientes condiciones:

El generador de transitorios es conectado al filtro de respaldo por la red de acoplamiento en el modo de acoplamiento pertinente, y todos los conductores de la conexión principal que alimentan el filtro de respaldo, incluyendo protecciones a tierra, son desconectados de la línea e interrumpido en un punto corriente arriba del filtro de respaldo.

Para cortar corriente arriba la línea principal del filtro de respaldo (previo para las mediciones reales del sistema de potencia), los efectos causados por impedancias diferentes de la red principal de un laboratorio a otro son evitables. Tomando en cuenta las fuentes principales a ser desconectadas y la impedancia baja de la red principal cortocircuitando los conductores, es un procedimiento recomendado para determinar el voltaje y la corriente pico. La corriente

transitoria de cortocircuito disponible y el voltaje transitorio de circuito abierto en la interfase de la línea de potencia y el EBP puede ser realmente verificada. Note, que este procedimiento establece el voltaje pico del transitorio mismo.

Durante las pruebas de los componentes o equipos de potencia, la forma de onda del transitorio puede ser aplicada a cualquier ángulo de fase específico de la forma de onda principal, como se describe en IEEE C62.45-1987 [8]. Con la medida del tiempo de la aplicación del transitorio con respecto a la frecuencia de potencia de la onda seno se determina el pico del transitorio total. Porque este transitorio total es el parámetro significativo en la respuesta y el esfuerzo de tipo abrazadera de los dispositivos de protección, estos efectos pueden ser reconocidos en las mediciones de amplitud de transitorios para mediciones de niveles bajos de transitorios. Con niveles de transitorios en el rango de los kilovoltios, la variación introducida por el valor del voltaje de la onda seno y el instante de la aplicación del transitorio es menos significativa.

Las pruebas donde el valor de  $di/dt$  es grande (tanto como el  $8/20 \mu s$  de la forma de onda de la corriente o los 100 kHz de la onda oscilante con tiempos de rizo relativamente cortos), es particularmente importante para el uso de longitudes cortas de conductores y mantener un área cerrada mínima de conductor entre el generador de transitorios y el dispositivo bajo prueba.

### **5.8.3.3 Tolerancia sobre los parámetros más importantes.**

La combinación de tolerancia practica sobre los componentes internos del generador de transitorios, lugares de operación, y la incertidumbre de los instrumentos de calibración pueden producir variaciones significativas a las pruebas hechas en diferentes lugares. Para reducir los efectos de estas diferencias inevitables, el propósito de la prueba podría ser reconocido cuando se especifican los parámetros más importantes de la prueba.

- (1) Cuando se mide el aislamiento, el pico de voltaje de circuito abierto es el parámetro más importante. Por lo tanto, el voltaje podría ser ajustado al nivel deseado antes de conectar el EBP al generador.
- (2) Cuando se hacen mediciones de absorción de energía no lineal a los dispositivos de protección contra transitorios, la corriente pico de corto circuito es el parámetro más importante. Aun que, la corriente fluyendo en el EBP no puede ser ajustada durante la prueba para obtener el nivel deseado.

La razón para el punto (2) es que las pruebas pueden hacerse usando un generador especificando el voltaje de circuito abierto y la forma de onda de corriente de corto circuito. Para someter un EBP específico a una prueba de transitorios en un ambiente específico, el valor de voltaje y corriente del EBP durante la prueba podría dejar remanentes de ellos. Este asunto es muchas veces desconocido y, aunque, no puede ser sobre enfatizado.

### **5.8.3.4 Pruebas sin potencia eléctrica.**

Cuando se usa la onda combinada  $1.2/50 \mu s - 8/20 \mu s$  para pruebas de componentes sin energía, el generador, con filtro de respaldo en algún lugar, puede ser usada. Aunque, la red

principal podría ser desconectada corriente arriba del filtro de respaldo y todos los conductores de la entrada de potencia cortocircuitados a tierra.

Alternativamente, el filtro de respaldo y la red de acoplamiento pueden ser removidos del generador de transitorios que tiene un circuito interno para determinar la presencia o ausencia del filtro de respaldo/red de acoplamiento y hacer los ajustes apropiados a la forma de onda. Tales circuitos están incluidos en algunos generadores de transitorios comercialmente disponibles.

#### **5.8.4 Detalles y especificaciones de las formas de onda.**

##### **5.8.4.1 Onda oscilatoria 0.5 ms – 100 khz.**

La forma de onda del voltaje de circuito abierto es definida por los siguientes parámetros:

Tiempo de subida:  $0.5 \mu\text{s} \pm 0.15 \mu\text{s}$

Frecuencia de oscilación:  $100 \text{ kHz} \pm 20 \text{ kHz}$

La amplitud decaerá tanto que la relación de amplitud del pico adyacente de polaridad opuesta es como se muestra: la relación del segundo pico al primero está entre el 40 y el 110%. La relación del tercer pico y el segundo está entre el 40 y el 80%. Una grafica de la onda transitoria a 100 kHz es mostrada en la figura 5.8.10.

El tiempo de levantamiento es definido como una diferencia de tiempo entre el 10 y 90% de la amplitud, puntos leídos en el límite de la forma de onda. La frecuencia es calculada desde el primer y el tercer cruce por cero antes del inicio del pico.

La amplitud nominal del primer pico del voltaje de circuito abierto,  $V_p$ , o la corriente de cortocircuito,  $I_p$ , o ambas son seleccionados por las partes involucradas, acordado para la severidad deseada, con una tolerancia de  $\pm 10\%$ .

La relación  $V_p/I_p$  es especificada como  $12 \Omega \pm 3 \Omega$  para simulación de ambientes de categoría ubicación B o  $30 \Omega \pm 8 \Omega$  para simulación de ambientes de categoría de ubicación A. Cuando el pico de voltaje de circuito abierto es ajustado a 6 kV exactamente, el pico nominal de la corriente de cortocircuito podrá ser 500 Amp. para ambientes de categoría de ubicación B y 200 Amp. para ambientes de categoría de ubicación A. Para voltajes de pico bajos, el pico de la corriente de cortocircuito podría ser proporcionalmente baja, tanto que la relación nominal  $V_p/I_p$  ambos con remanente de  $12 \Omega$  o  $30 \Omega$ .

Sin la forma de onda de la corriente de cortocircuito es especificada para la onda transitoria a 100 kHz. Un pico de corriente de cortocircuito, sin embargo, es propuesto en 5.8.2, de acuerdo a las categorías de los lugares. Porque el propósito de esta onda transitoria no es proveer esfuerzos de alta energía al equipo bajo prueba, la especificación precisa de la forma de onda de corriente es innecesaria.

El corto tiempo de levantamiento de 0.5  $\mu\text{s}$  leído en el límite de la forma de onda, junto con una corriente de pico grande, correspondiente a un valor grande de  $dI/dt$ , que producirá un efecto inductivo significativo en las conexiones del dispositivo bajo prueba. La acción del divisor de voltaje de la impedancia del generador de transitorios y la impedancia del EBP es probable que sea significativa; es agregado para especificar la corriente de cortocircuito.

La primera edición de este documento especifica un rango nominal de decaimiento y de amplitud de 60% entre picos adyacentes de polaridad opuestas, pero no especifica tolerancias. No es posible obtener la relación de amplitud del 60% del segundo al tercer pico mientras, también se obtiene la relación del 60% del pico subsiguiente con una forma de onda coseno simple amortiguada. Como resultado, la forma de onda del primer ciclo de la onda transitoria varia dramáticamente entre diferentes modelos de generadores de transitorios comercialmente disponibles porque los circuitos de diseños difieren de los circuitos de la red y de la forma de onda usada en un intento para mostrar las especificaciones de la forma de onda nominal. Cuando son agregadas las tolerancias a este documento, las tolerancias grandes son aplicadas a la relación del primero y segundo pico tanto que una forma de onda coseno con una amplitud decayendo exponencialmente podría mostrar los requerimientos para la onda transitoria. Aunque existen generadores aceptables, es necesario que los nuevos generadores de ondas transitorias a 100 kHz usen la forma de onda coseno amortiguada descrita en 5.8.5. Una grafica nominal de la forma de onda coseno amortiguado es mostrada en la figura 5.8.10.

No hay requerimientos puestos sobre la onda transitoria más allá del cuarto pico. La amplitud del quinto y los siguientes picos es mucho más pequeña que el pico inicial y tendrían poco efecto incluso sobre los equipos más vulnerables o susceptibles.

La frecuencia de oscilación de esta forma de onda puede excitar resonancias en el EBP. Aunque, estos efectos no pueden ser positivamente identificados con la frecuencia fija de la onda transitoria; una prueba de barrido de frecuencia podría ser necesaria para este propósito.

#### **5.8.4.2 Onda combinada de 1.2/50 – 8/20 $\mu\text{s}$ .**

La onda combinada es entregada por un generador que puede aplicar una onda de voltaje a 1.2/50  $\mu\text{s}$  a través de un circuito abierto. La forma de onda exacta que es liberada se determina por el generador y la impedancia a la cual el transitorio es aplicado. Una grafica del voltaje nominal de circuito abierto es mostrada en la figura 5.8.11 y una grafica de la corriente de cortocircuito nominal es mostrada en la figura 5.8.12.

Forma de onda del voltaje de circuito abierto:

Tiempo de frente: 1.2  $\mu\text{s} \pm 0.36 \mu\text{s}$

Duración: 50  $\mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$

El tiempo de frente para la forma de onda de voltaje es definida (IEC 60-2 (1973) [B92]; IEEE Std 4-1978 [B88]) como:

$$1.67(t_{90} - t_{30}) \quad (5.8.1)$$

donde:

$t_{90}$  y  $t_{30}$  = Son el tiempo medido en los puntos a 90% y 30% de la amplitud de la forma de onda

La duración es definida como el tiempo entre el origen virtual y el tiempo en el punto a 50% sobre la cola. El origen virtual es el punto donde una línea recta entre el punto a 30% y 90% leídos sobre los límites de la forma de onda e intercepta la línea de  $V=0$ .

Forma de onda de la corriente de cortocircuito:

Tiempo de frente:  $8 \mu\text{s}$  (+1.0, -2.5)  $\mu\text{s}$

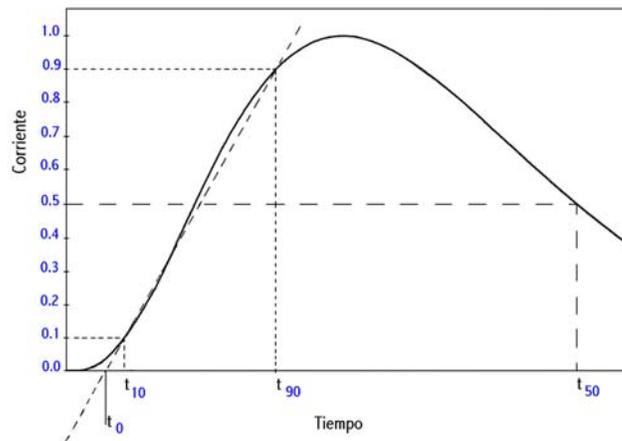
Duración:  $20 \mu\text{s}$  (+8, -4)  $\mu\text{s}$

El tiempo de frente para la forma de onda de corriente es definida por (IEC 60-2 (1973) [B92]; IEEE Std 4-1978 [B88]) como:

$$1.25(t_{90} - t_{10}) \quad (5.8.2)$$

Donde:

$t_{90} - t_{10}$  = Son el tiempo medido en los puntos a 90% y 10% de la amplitud de la forma de onda



**Figura 5.8.13.**

**Mediciones de la forma de onda normal a  $8/20 \mu\text{s}$ : tiempo de frente, origen virtual y duración.**

La duración es definida como el tiempo entre el origen virtual y el tiempo del 50% de la amplitud en el punto de la cola. El origen virtual es la intersección de la línea recta entre los puntos del 90% y el 10% de la amplitud de la forma de onda y la línea  $I=0$ . La figura 5.8.13 muestra estas características de la forma de onda nominal a  $8/20 \mu\text{s}$ .

El valor de pico del voltaje de circuito abierto,  $V_p$ , y la corriente de corto circuito,  $I_p$  o ambos, son seleccionados por las partes involucradas, acordado para la severidad deseada, con una tolerancia de  $\pm 10\%$ .

La impedancia efectiva de la fuente, la relación  $V_p/I_p$ , es especificada como  $2.0 \Omega \pm 0.25 \Omega$ . Esta relación determina el comportamiento de la forma de onda para diferentes cargas, tal como dispositivos de protección contra transitorios, que están conectados al generador.

Tradicionalmente, la forma de onda de voltaje de 1.2/50  $\mu\text{s}$  ha sido usado para pruebas de nivel básico de impulso de aislamiento (BIL), que es aproximadamente un circuito abierto hasta que falla el aislador. La forma de onda de corriente a 8/20  $\mu\text{s}$  ha sido usada para inyectar grandes corrientes a los dispositivos de protección. Aunque el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito son aspectos diferentes del mismo fenómeno, tal como una sobre tensión causado por rayo, son necesarios para combinar una forma de onda única cuando la carga no es conocida.

Las tolerancias para la forma de onda de la corriente a 8/20  $\mu\text{s}$  son ampliados en IEC 60-2 (1973) y IEE Std 4-1978. Las tolerancias en estos estándar son para una forma de onda a 8/20  $\mu\text{s}$  sin especificar el voltaje de circuito abierto. También no incluyen los efectos de un filtro de respaldo y una red de acoplamiento, como se requiere aquí.

### 5.8.5 Ecuaciones para formas de onda estándar.

Las representaciones matemáticas de la forma de onda nominal son dadas en la tabla 5.8.5. Estas ecuaciones, y el valor de las constantes de tiempo, son útiles para diseños de generadores de transitorios y para simulación del comportamiento de los transitorios en computadoras digitales.

**Tabla 5.8.5.**  
**Ecuaciones para pruebas de transitorios de formas de onda estándar**

<p>Onda oscilatoria 0.5 <math>\mu\text{s}</math>-100 kHz  <math>V(t) = AV_p (1 - \exp -t/\tau_1) \exp(-t/\tau_2) \cos(\omega t)</math>                      Donde:  <math>\tau_1 = 0.533 \mu\text{s}</math>  <math>\tau_2 = 9.788 \mu\text{s}</math>  <math>\omega = 2 \pi 10^5 \text{ rad/s}</math>  <math>A = 1.590</math></p>
<p>Forma de onda 8/20 <math>\mu\text{s}</math>  <math>I(t) = A I_p t^3 \exp(-t/\tau)</math>                      Donde:  <math>\tau = 3.911 \mu\text{s}</math>  <math>A = 0.01243(\mu\text{s})^{-3}</math></p>
<p>Forma de onda 1.2/50 <math>\mu\text{s}</math>  <math>V(t) = AV_p (1 - \exp -t/\tau_1) \exp(-t/\tau_2)</math>                      Donde:  <math>\tau_1 = 0.4074 \mu\text{s}</math>  <math>\tau_2 = 68.22 \mu\text{s}</math>  <math>A = 1.037</math></p>

NOTA: En todas las ecuaciones anteriores

t = Tiempo

$V_p$  = Valor máximo o pico del voltaje de circuito abierto

$I_p$  = Valor pico de la corriente de cortocircuito

Una prueba de forma de onda en el laboratorio, de rutina, no será exactamente igual a la forma de onda dada por las ecuaciones de forma de onda nominal, debido a las tolerancias de los componentes en la formación de pulsos en la red y capacitancias e inductancias parásitas en los componentes de cada generador e instalaciones eléctricas.

La carga en el EBP puede causar discrepancia apreciable entre el voltaje de circuito abierto o corriente de cortocircuito nominal programado y el voltaje o corriente en la carga.

Este efecto es la razón por la que los parámetros de la forma de onda del transitorio no son especificados con el EBP conectado. En simulaciones por computadora, algunos de los efectos de carga pueden ser tomados en cuenta incluyendo la impedancia efectiva de salida,  $V_p/I_p$ , con el voltaje o corriente de fuente ideal.

## **5.9 Definición de formas de onda adicionales para pruebas de transitorios.**

Las tres formas de onda adicionales son la ráfaga EFT, la onda unidireccional a 10/1000  $\mu$ s, y la onda oscilatoria a 5 kHz. Cada una de estas formas de onda tiene un único dominio de aplicación (interferencia de contactores, operación de fusibles, y swicheo de condensadores). Consecuentemente, la definición de forma de onda, la selección de amplitud, y los procedimientos de pruebas son discutidos separadamente para cada forma de onda en 5.9.1, 5.9.2, y 5.9.3. Las graficas de la forma de onda nominal son mostradas en las figuras 5.9.14-5.9.17. El voltaje de pico sugerido y la impedancia de fuente que corresponde a varios ambientes expuestos son mostrados en las tablas 5.8.6, 5.8.7, y 5.8.8.

### **5.9.1 Transitorios rápidos de electricidad (EFT).**

Esta forma de onda consiste de ráfagas repetitivas, cada una conteniendo pulsos individuales unidireccionales. Como se discutió en 5.6.4.4, esta forma de onda ha sido propuesta como un método para evaluar la inmunidad del equipo con interferencia; no es una “representación” de los ambientes de transitorios. Los niveles de amplitud propuestos para los diferentes grados de severidad han sido dados por consenso como representación de un esfuerzo real para un equipo típico expuesto a prueba. No podrían ser construidos con niveles de voltajes reales ocurriendo en la instalación eléctrica. Las características de estas formas de onda y el correspondiente procedimiento de prueba son resumidos en los siguientes párrafos, basados en las especificaciones de la IEC 801-4 (1988) [5].

#### **5.9.1.1 Definición de forma de onda.**

Los pulsos individuales de EFT en una ráfaga son definidos como:

Tiempo de subida: 5 ns  $\pm$  1.5 ns

Duración: 50 ns  $\pm$  15 ns

El tiempo de subida es definido como la diferencia de tiempo entre el punto de amplitud del 10% y el 90% sobre las líneas de la forma de onda.

La amplitud es definida como el ancho total a la mitad del valor máximo (FWHM), que es, la diferencia del tiempo entre el punto a 50% sobre la línea principal y la línea detrás de cada pulso.

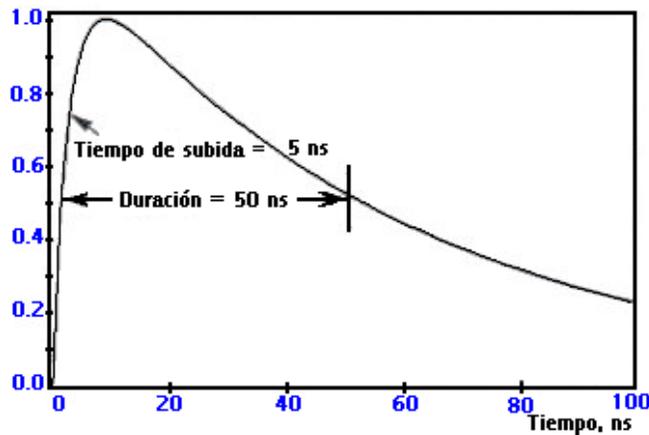
Los pulsos individuales ocurren en ráfagas con una duración de 15 ns  $\pm$  3 ns. Dentro de cada ráfaga, el rango de repetición de pulsos es especificado como una función del voltaje pico de circuito abierto:

Para picos  $\leq$  2kV : 5 kHz  $\pm$  1 kHz

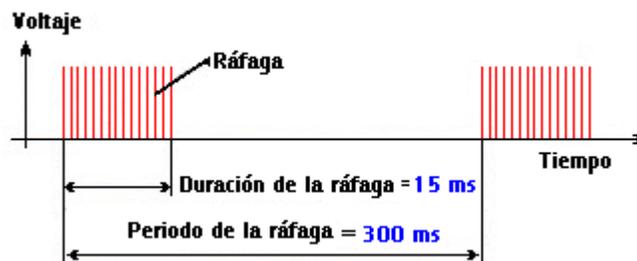
Para picos  $>$  2kV : 2.5 kHz  $\pm$  0.5 kHz

(Estos dos valores de la razón de repetición son especificados en IEC 801-4 (1988) [5] y solamente reflejan limitación en el funcionamiento de generadores de pulsos, sin características

del ambiente.). El periodo de la ráfaga repetitiva es  $300 \text{ ms} \pm 60 \text{ ms}$ . Una grafica de un pulso simple es mostrado en la figura 5.8.14 y el patrón de ráfagas es mostrado en la figura 5.8.15.



**Figura 5.9.14.**  
**Forma de onda del pulso EFT**



**Figura 5.9.15.**  
**Patrón de ráfaga EFT**

### 5.9.1.2 Amplitud.

La amplitud de los pulsos es especificada por la IEC 801-4 (1988) [5] como una prueba de voltaje de circuito abierto, mientras la forma de onda es definida cuando el generador es conectado a una carga de  $50 \Omega$ . El generador es definido con una impedancia de fuente de  $50 \Omega$  entre 1 MHz y 100 MHz. En resumen, cuando los pulsos son aplicados al EBP acordados para los métodos descritos en 5.9.1.3, no es definido a la frecuencia asociada con la forma de onda del EFT aunque pudiera depender de la impedancia exhibida por el EBP. Como el propósito de la prueba es para evaluar la inmunidad a la interferencia, sin capacidad de energía, la especificación de amplitud de corriente no es esencial. Dadas estas definiciones de niveles de prueba, el valor específico podría seleccionarse por las partes involucradas, acordados para la severidad deseada, con una tolerancia de  $\pm 10\%$ .

En la norma IEC 801-4-(1988) [5], se especifican cinco pruebas de niveles de severidad, desde 0.5 kV a 4 kV para circuito abierto, con disposición adicional, y niveles especiales para

diversas pruebas. Tomando en cuenta los niveles apropiados en la presente recomendación práctica, en la tabla 5.9.6 se muestran solamente los niveles I, II, y III. Porque las formas de onda descritas en el presente documento solamente son sugerencias, siempre hay que tener en cuenta las precauciones necesarias cuando se incluyen otros niveles.

### 5.9.1.3 Procedimientos de prueba.

Los métodos de acoplamiento para las pruebas de EFT son especificados en IEC 801-4 (1988) [5], las características esenciales son mostradas más adelante. Dos métodos de acoplamiento son especificados, dependiendo de la naturaleza del cable de interfase del EBP.

**Tabla 5.9.6.**  
**Niveles para ráfagas de EFT**

Pruebas de severidad	Voltaje pico (Circuito abierto)
I	1 kV
II	2 kV
III	4 kV

Un método en particular, para interfaces ca simples y polifásicas, usan acoplamiento directo para cada cable conductor seleccionado por condensadores discretos. El otro método usa un “acoplamiento *clamp*” que de hecho produce acoplamiento capacitivo en el cable de interfase sobre el *clamp* que está instalado, en un modo de acoplamiento global.

Hasta ahora, ambos métodos de acoplamiento han resultado en un divisor capacitivo (acoplamiento de condensadores y la capacitancia interna del EBP) que aplica los pulsos a la entrada del EBP. El valor real de los pulsos aplicados a la entrada del EBP es influenciado por el diseño interno del EBP; no es una mezcla impuesta sobre el EBP. Aunque el arreglo externo del EBP, incluye cables y posiciones de valla con respecto al plano de referencia de tierra, afectando el acoplamiento capacitivo. Por lo tanto, la configuración de la prueba de perturbación, ha de ser claramente especificada y documentada.

## 5.9.2 La onda 10/1000 ms.

### 5.9.2.1 Definición de forma de onda.

El tiempo de frente y la duración, como se definió en 5.8.4.2, son definidos a continuación:

Voltaje de circuito abierto:

Tiempo de frente: 10  $\mu$ s (+0, -5)  $\mu$ s

Duración: 1000  $\mu$ s (+1000, -0)  $\mu$ s

Corriente de cortocircuito:

Tiempo de frente: 10  $\mu$ s (+0, -5)  $\mu$ s

Duración: 1000  $\mu$ s  $\pm$  200  $\mu$ s

Existen algunas ambigüedades en las definiciones de esta forma de onda dadas en otras referencias, dependiendo de la especificación del “frente” de 10  $\mu$ s. Porque el mayor propósito de estas formas de onda, en el presente contexto, es para proveer un esfuerzo de energía, la



Por ejemplo, La cresta de voltaje total aplicada a un equipo determinado al final de un cable largo, sobre la limpieza total de una falla por un fusible y ocurriendo la cresta cerca de la potencia en la frecuencia de la onda seno, se encuentra, para un sistema de 120 V rms L-N y para un nivel de exposición alto:

$$V_{\text{total}} = 170 V_{(\text{onda seno})} + 1.3 * 170 V_{(\text{Transitorio aislado})} = 390 V$$

† La base de datos no suministra suficiente información para determinar un valor de impedancia. Los valores mostrados en esta tabla tienen que ser determinados por consenso como un valor razonable para suministrar una guía y uniformidad en los procesos de prueba.

‡ Impedancia efectiva de la fuente transitoria, emulada por la prueba del generador, es definida como la razón de pico de voltaje al pico de corriente. Tiene las dimensiones de una resistencia, pero no es una resistencia pura.

### 5.9.2.3 Procedimiento de prueba.

La norma IEEE C62.45-1987 [8] aconseja que para mediciones de equipos en sistemas de potencia sea preferida, un método que es muy recomendado en el presente documento para formas de onda estándar. Sin embargo, la prueba de la forma de onda 10/1000  $\mu$ s es sugerido principalmente para características de energía alta, esforzando algunos dispositivos de protección contra transitorios que puede contener el EBP.

La duración del tiempo de la onda necesita un filtro de respaldo difícil de implementar.

Tres estrategias pueden ser aplicadas para resolver esta dificultad. El primero podría ser para realizar pruebas sobre equipos sin energía con el propósito de valorar la capacidad del EBP, para operar la energía asociada con esta forma de onda. Si tal estrategia fuera adoptada, la amplitud del transitorio aplicado podría ser definida como  $V_{\text{total}}$  en el primer pie de nota de la tabla 5.9.7, sin el valor de transitorio, incrementando el nivel de voltaje para el esfuerzo equivalente.

Sin embargo, el resultado de estas pruebas no son responsabilidad de la compañía, tales como esfuerzo pre-transitorios, modelos de falla, o la necesidad de tener un EBP operacional discutidos en la norma IEEE C62.45-1987 [8]. Por lo tanto, excepto cuando se hacen pruebas de componentes simples (el reconocimiento de todas las limitaciones) no es la recomendación apropiada.

La segunda estrategia está basada sobre el método de prueba que ha sido propuesto en un estándar VDE<sup>10</sup> [B94] que son requeridos para aplicaciones donde se obtienen transitorios por descarga de condensadores grandes en el EBP a voltaje pico en las instalaciones eléctricas. Los parámetros exactos del circuito de prueba han sido modificados desde la primera publicación del estándar VDE y pueden ser modificados de nuevo. Por lo tanto, a pesar del esfuerzo de conveniencia de armonización, las especificaciones apropiadas de la compañía no pueden ser definidas en el presente contexto.

La tercera estrategia es para obtener la forma de onda completa (frecuencia de potencia antes y después del transitorio, y el total de transitorios) de un generador de una forma de onda digital, amplificándola por medio de un amplificador lineal de alta potencia. Este método requiere que el amplificador sea capaz de entregar voltaje o corriente pico durante el transitorio (dependiendo de la impedancia del EBP, en un modo similar a la combinación de una forma de onda estándar), tal como la corriente de carga normal del EBP. Esta estrategia podría ser una

---

<sup>10</sup> VDE = Verband Deutscher Elektrotechniker e.V. IEC recomendaciones para pruebas de inmunidad, aun bajo desarrollo, pueden incorporarse en este procedimiento en documentos futuros.

salida radical del método clásico de usar la descarga de la energía almacenada. Podría ofrecer ventaja, una vez la fuente de cada sistema este disponible para ser usada, haciendo fáciles otras pruebas de forma de onda a implementar.

### 5.9.3 Onda transitoria a 5 khz.

#### 5.9.3.1 Definición de forma de onda.

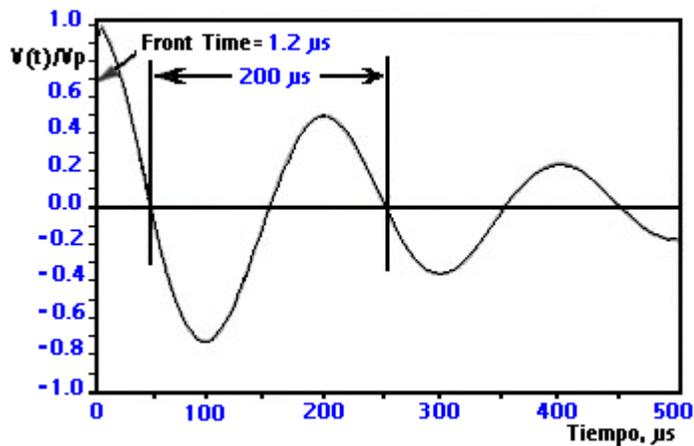
Esta forma de onda es definida solamente por sus parámetros de voltaje de circuito abierto:

Tiempo de levantamiento:  $1.5 \mu\text{s} \pm 0.5 \mu\text{s}$

Frecuencia de oscilación:  $5 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$

Relación de picos adyacentes de polaridad opuesta: 60% a 80%

El tiempo de subida es definido como la diferencia entre los puntos de amplitud de 10% y 90% leídos sobre la línea de la forma de onda del primer pico. La frecuencia es calculada desde el primer y tercer cruce por cero después del pico inicial. Una grafica de la forma de onda nominal es mostrada en la figura 5.9.17.



**Figura 5.9.17.**  
**Forma de onda para onda oscilatoria a 5 kHz.**

#### 5.9.3.2 Amplitud.

Hay una gran diferencia en la aplicación de esta forma de onda comparada a las dos formas de onda estándar: el concepto de categorías de ubicación que fue usado para formas de onda estándar no es mayormente aplicable. (El concepto está basado sobre los efectos limitantes de la inductancia de los circuitos ramales a la frecuencia asociada en pruebas de transitorios de las dos formas de onda estándar, que causan la amplitud de la corriente decreciendo con la distancia al incremento del transitorio.)

La inductancia del circuito ramal tiene un efecto despreciable sobre la propagación de esta onda transitoria a 5 kHz. Sin embargo, todavía hay un rango de niveles de exposición a ser considerado, dependiendo del lugar en el cual está expuesto el sistema. Por lo tanto, los valores mostrados en la tabla 5.9.8 son aplicables a todas las categorías de ubicación.

La impedancia efectiva de fuente para el generador de prueba es la relación del voltaje de circuito abierto a la corriente de cortocircuito,  $V_p/I_p$ , es especificada como  $5 \Omega \pm 2 \Omega$ .

La amplitud nominal del primer pico del voltaje de circuito abierto es seleccionada por las partes involucradas, acordados para las severidades deseadas, con una tolerancia de  $\pm 10\%$ . Este pico de voltaje transitorio es proporcional al voltaje pico en las instalaciones eléctricas. La impedancia de fuente, por lo tanto, podría tomar en cuenta el rango de los elementos del sistema involucrados en la generación de transitorios de conmutación. Cada caso particular de instalación podría tener sus propias características: tipos de dispositivos de conmutación, inductancia del sistema, tamaño del banco en kVAR, y con frecuencia el banco es conmutado.

**Tabla 5.9.8.**  
**Niveles para formas de onda oscilatorias a 5kHz.**

<b>Exposición</b>	<b>Crestas de voltajes transitorios*</b>	<b>Impedancia de fuente†</b>
Baja (Lejos de bancos conmutados)	Ninguna	
Medio	1.0 $U_{pk}$	1.0 a 5.0 $\Omega$
Alta (Cerca de bancos conmutados)	1.8 $U_{pk}$	0.5 a 1.0 $\Omega$

\* La cresta de voltaje transitorio es proporcional a el voltaje de cresta del sistema,  $U_{pk}$ . Los valores mostrados en estas columnas son algunos de los transitorios aislados. Para ser agregado a cualquier valor de voltaje del alambrado es para el ángulo de la fase al cual el transitorio es aplicado.

Por ejemplo, La cresta de voltaje total aplicada a un equipo determinado en caso de un re-disparo ocurriendo cerca de la cresta de la potencia a la frecuencia de la onda seno puede ser durante la operación de conmutación de un banco de condensadores, para un sistema de 120 Vrms y para un nivel de exposición alto:

$$V_{total} = 170 V_{(onda\ seno)} + 1.8 * 170 V_{(Transitorio\ aislado)} = 476 V$$

† La base de datos no suministra suficiente información para determinar un valor de impedancia. Los valores mostrados en esta tabla tienen que ser determinados por consenso como un valor razonable para suministrar una guía y uniformidad en los procesos de prueba.

### 5.9.3.3 Procedimiento de prueba.

La onda transitoria a 5 kHz es definida de modo que puede ser aplicada a las conexiones de las instalaciones eléctricas de los equipos mientras está operando. Para este tipo de prueba, es necesario interponer un filtro de respaldo entre el EBP y la instalación eléctrica, también para usar una red de acoplamiento entre el generador de transitorios y el EBP, como se describió en IEEE C62.45-1987 [8].

La presencia del filtro de respaldo, la red de acoplamiento y la baja impedancia de la red eléctrica, pueden alterar la forma de la onda del transitorio comparada a la observada en las terminales de salida del generador mismo.

Cuando se hacen pruebas aplicando transitorios a la conexión principal del EBP mientras el equipo está operando, el efecto del filtro de respaldo y la red de acoplamiento pueden ser incluidos cuando se determina la forma de la onda transitoria. Que es, la expresión “voltaje de circuito abierto” sin conectar el EBP. Estos dos elementos son parte del sistema del generador de transitorios, aun que pueden afectar la onda aplicada al EBP.

Es por lo tanto recomendado que las especificaciones para la onda transitoria a 5 kHz satisfice prioridades para las pruebas del EBP cuando:

El generador de transitorios es conectado al filtro de respaldo a través de la red de acoplamiento en el modo relativo de acoplamiento, y

Todos los conductores de las conexiones de la red eléctrica, incluyendo protecciones a tierra, son desconectados temporalmente de la red eléctrica y cortocircuitados en un punto de falla arriba del filtro de respaldo

Para cortocircuitos en la red eléctrica adelante del filtro de respaldo (de prioridad para pruebas de potencia eléctrica), los efectos causados por las diferentes impedancias de la red eléctrica de un laboratorio a otro son evitables. Permitiendo la desconexión de la compañía distribuidora de la red eléctrica y simulando la baja impedancia de la red eléctrica cortocircuitando los conductores es un procedimiento recomendado para determinar el voltaje y corriente pico. De esta forma, obtener la corriente transitoria de cortocircuito y el voltaje transitorio de circuito abierto (como se definió antes) en la interfase de la línea de potencia del EBP puede ser realmente verificable. Note, sin embargo, que este procedimiento establece el voltaje pico del transitorio aislado. La frecuencia con que se aplica el transitorio con respecto a la frecuencia de potencia de la onda seno determinara el pico total del transitorio, el cual es un parámetro significativo en la respuesta y el esfuerzo de un dispositivo de protección contra transitorios.

#### **5.9.4 Ecuaciones para formas de onda adicionales.**

Las representaciones matemáticas de las formas de ondas normales son dadas en la tabla 5.9.9. Estas ecuaciones, y el valor de las constantes son muy usadas para diseñar generadores de transitorios y para simulaciones de aplicación de transitorios en computadoras digitales.

Una prueba de forma de onda en el laboratorio, no será exactamente igual a la forma de onda dada por las ecuaciones de la forma de onda nominal debido a las tolerancias de los componentes en la formación de pulsos en la red y las inductancias y capacitancias parásitas de los generadores y las instalaciones eléctricas de prueba.

La carga del EBP puede causar discrepancia apreciable entre el voltaje de circuito abierto o la corriente de cortocircuito nominal programado y el voltaje o corriente real a través de la carga.

Este efecto es la razón por la que los parámetros de la onda transitoria no son especificados con el EBP conectado. En simulaciones por computadora, algunos efectos de carga pueden ser tomados en el calculo incluyendo la impedancia efectiva de salida,  $V_p/I_p$ , con el voltaje o corriente ideal de la fuente.

**Tabla 5.9.9**  
**Ecuaciones de formas de onda adicionales para hacer pruebas de transitorios**

Forma de onda 10/1000 $\mu$ s $I(t) = A I_p(1 - \exp(-t/\tau_1) \exp(-t/\tau_2))$ Donde $\tau_1 = 3.827 \mu$ s $\tau_2 = 1404 \mu$ s $\omega = 2 \pi 10^5$ rad/s $A = 1.019$
Onda oscilatoria de 5kHz $V(t) = AV_p (1 - \exp(-t/\tau_1) \exp(-t/\tau_2) \cos(\omega t))$ Donde $\tau_1 = 0.7356 \mu$ s $\tau_2 = 280.4 \mu$ s $\omega = \pi 10^4$ rad/s $A = 1.027$
Forma de onda EFT $V(t) = AV_p (1 - \exp(-t/\tau_1) \exp(-t/\tau_2))$ Donde $\tau_1 = 3.5$ ns $\tau_2 = 55.6$ ns $A = 1.270$

Nota: En todas las ecuaciones anteriores:

t = Tiempo

$V_p$  = Valor máximo o pico del voltaje de circuito abierto

$I_p$  = Valor pico de la corriente de cortocircuito

## 5.10 Referencias

- [1] ANSI C84.1-1989 American National Standard Voltage Ratings for Electric Power Systems and Equipment (60 Hz).<sup>4</sup>
- [2] ANSI/NFPA 70-1990, National Electrical Code.<sup>6</sup>
- [3] IEC Multilingual Dictionary of Electricity Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1983.<sup>6</sup>
- [4] IEC 664 (1980), Insulation Coordination Within Low-Voltage Systems Including Clearances and Creepage Distances for Equipment.
- [5] IEC 801-4 (1988), Electromagnetic Compatibility for Industrial Process Measurement and Control Equipment—Part Four: Electrical Fast Transient/Burst Requirements.
- [6] IEEE C37.90.1-1989 IEEE Standard Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Protective Relays and Relay Systems.<sup>7</sup>
- [7] IEEE C62.1-1984, IEEE Standard for Gapped-Silicon Carbide Surge Arresters for AC Power Circuits.
- [8] IEEE C62.45-1987, IEEE Guide on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits.

Capitulo 6  
**Capitulo 6**  
Fluctuaciones de voltaje  
**Fluctuaciones de voltaje**  
(Flicker)  
(Flicker)

## 6 Fluctuaciones de voltajes

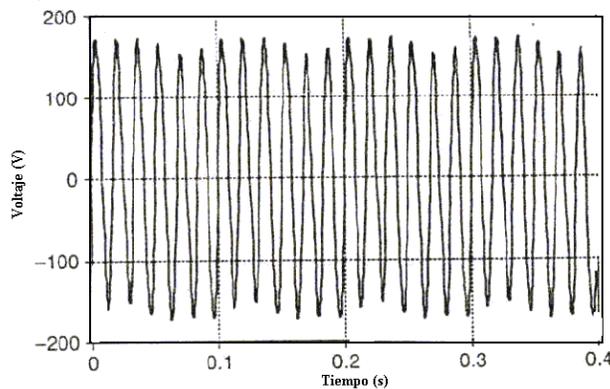
### 6.1 Fuentes de *flicker* y mitigación.

#### 6.1.1 Fluctuación de voltaje

El *flicker* está definido como la “impresión de fluctuaciones de brillo o color, ocurridas cuando la frecuencia de falsas variaciones observadas entre unos cuantos hertz y la fusión de frecuencia de imágenes”. Cuando la magnitud de voltaje varía debido a cambios rápidos de carga, el flujo de potencia para el equipo varía normalmente si la variación es suficientemente larga o está dentro de un rango de frecuencia crítico, la operación del equipo podría ser afectado. El problema dominante de las fluctuaciones de voltaje es generalmente el efecto sobre las cargas de luz dominando cuando la iluminación de las lámparas varía entre las frecuencias de 1 a 10 Hz. Adicionalmente, puede afectar ligeramente otro tipo de cargas, por ejemplo: motores, aparatos electrónicos y controladores de procesos. La figura 6.1, muestra el *flicker* de voltaje en el bus.

La fluctuación de voltaje es un asunto de regulación de voltaje, el cual es un problema importante en la industria de potencia eléctrica. La fuente principal de fluctuaciones de voltaje principalmente para *flicker* es el horno de arco eléctrico. Los servicios eléctricos generalmente consideran a los hornos de arco como cargas deseables debido al alto monto de potencia requerida y al factor de potencia alto (alrededor del 75 y 90 %); sin embargo, los hornos de arco causan numerosos problemas al servicio. Otras cargas que pueden generar fluctuaciones de voltaje como soldadores y turbinas de viento no alcanza la magnitud de perturbaciones del horno de arco.

Algunas veces el termino fluctuaciones de voltaje es erróneamente utilizado como *sag* de voltaje debido al antiguo concepto que cualquier cambio de la intensidad de la lámpara es un “parpadeo de luz”. El *sag* es una reducción en la magnitud rms del voltaje desde el 10 hasta el 90% con una duración desde 0.5 ciclos a un minuto [1]. El *flicker* no cíclico está definido como la correspondiente fluctuaciones de voltaje ocasionales (con una frecuencia menor a 1 vez por hora) tal como la causada por el arranque de un motor, un fenómeno considerado ahora como *sag* de voltaje [2]. El carácter repetitivo y la magnitud de cambio de voltaje son las principales diferencias entre los dos fenómenos.



**Figura 6.1.**  
***Flicker* de voltaje en el bus.**

El concepto de fluctuación involucra la magnitud de voltaje y la frecuencia con la cual ocurre. La preocupación principal de un servicio es normalmente la restricción puesta en una industria individual debido al efecto en otros clientes. Algunos servicios son considerados con tantas fluctuaciones de voltaje son consideraciones inaceptables en un sistema que será el resultado de la inconformidad de los clientes que actualmente experimentan parpadeo.

### 6.1.2 Efecto humano

La percepción del parpadeo es un proceso fisiológico en el cual el ojo y el cerebro toman parte. Estos son tres mecanismos importantes que deben ser tomados en consideración para entender el fenómeno:

- Característica dinámica de la lámpara
- Característica no lineal del ojo/cerebro
- Tiempo de adaptación del ojo/cerebro.

Estos mecanismos deberían ser incluidos en orden en cualquier dispositivo de medición de *flicker* para reproducir el efecto humano.

### 6.1.3 Efecto del equipo

No ha sido reportado ningún daño al equipo debido al fenómeno *flicker*. Las quejas son emitidas de vez en cuando, pero más se originan por razones de *sags de voltaje* que de *flicker* de voltaje.

### 6.1.4 Niveles aceptables de *flicker*.

Como el parpadeo de iluminación es el principal efecto de las fluctuaciones de voltaje, el procedimiento para determinar la detección y los niveles aceptables serán considerados según el desarrollo Americano y Europeo.

El factor humano es de gran importancia y el tipo de iluminación e intensidad tienen considerable influencia sobre el fenómeno. Otros factores, tal como el nivel de iluminación del ambiente, decoración del cuarto, interés y conocimiento del observador, debe ser observado.

Las lámparas incandescentes de potencia menor cambian la iluminación más rápidamente con un cambio de voltaje que las lámparas con filamentos más robustos debido a su pequeña constante de tiempo térmica.

El ciclo o periodo de cambios de voltaje rápidos son generalmente más inaceptables que el no cíclico. Tales factores complican el problema que asignan límites a las fluctuaciones de voltaje aceptable.

El *flicker* de voltaje ha sido generalmente descrito en términos de *parpadeo* de iluminación incandescente; sin embargo, los efectos en la iluminación fluorescente, recientemente atrae la atención de ambos servicios e investigadores [3].

Numerosos investigadores han estudiado el *parpadeo* de iluminación; posiblemente el tratamiento más completo llevado a cabo ya en 1937, con uno de los resultados que ha sido una curva mostrando el periodo de pulsos del voltaje al cual el *parpadeo* de iluminación de una

lámpara de filamento de tungsteno de 115 V es perfectamente aceptable. El rango de frecuencia investigado ha sido de 1 a 20 Hz, entonces, a frecuencias más altas, el fenómeno conocido como frecuencia de fusión de *flicker* (FFF) o Frecuencia de fusión crítica (CFF) llega a ser más dominante. El FFF es el nivel de frecuencia (aproximadamente entre 40 y 56 Hz) arriba del cual el ojo humano no percibe el *flicker*. Las fluctuaciones de voltaje tan bajas como 0.3 V fueron aceptables en el 10 % de las observaciones cuando la razón de la variación fue de 8 ciclos por segundo. Para que las variaciones sean perceptibles en 90% de las observaciones, para la misma frecuencia, el voltaje debe ser más de 1 V. El rango de 6 a 12 Hz era el espacio de frecuencia más crítico.

Otro estudio interesante hecho en Inglaterra sobre la frecuencia única de percepción del *parpadeo* de iluminación [5]. Los resultados mostraron una sensibilidad considerablemente baja (perceptibilidad mínima de 0.37 % en lugar de 0.25 %) que la curva GE, a pesar que la forma general de ambas curvas concuerdan razonablemente. En este trabajo, fue investigada la manera en la cual el ojo humano percibe el *parpadeo* de iluminación causado por múltiples perturbaciones de voltajes de la onda seno.

Los resultados muestran que el ojo percibe el *parpadeo* de iluminación en términos de raíz de los pesos de la suma de los cuadrados de los componentes de frecuencia individuales.

Si las dos frecuencias estuvieran en estrecha proximidad, entonces la suma de los componentes sería más apropiada. Ésta es una de las primeras referencias en las que el *flicker* es considerado como un efecto combinado de varios componentes de frecuencia que actúan juntos, un concepto que, después de un gran desarrollo, lleva al medidor de *flicker* Europeo [5]. Por otro lado, en años recientes las empresas americanas de servicios públicos eléctricos han hecho pequeñas investigaciones en el tema del *flicker*.

La Comisión Internacional Electrotécnica (IEC) ha estandarizado un medidor de *flicker* que incorpora curvas con pesos que representan la respuesta del ojo humano a las variaciones de luz producidas por una lámpara incandescente de filamento de doble bobina de 60 W, 230 V. La salida del medidor se da como *flicker* de voltaje por unidad, donde uno por unidad es el nivel que debe causar apreciables y molestos *parpadeo* de iluminación, considerado como el principio de percepción para 50% de la población humana.

El *flicker* es definido en términos de lámparas incandescentes por su uso común y sensibilidad a cambios de voltaje. El *flicker* también es observado con lámparas fluorescentes.

El estándar Europeo para la medición de *flicker* es el IEC 868 (inicialmente presentado en 1986), IEC 868 enmienda 1(1990), y IEC 61000-4-15 (1997), las cuales suministran las especificaciones de una medida apropiada para el *flicker* que puede ser adaptado a una amplia variedad de situaciones.

El instrumento es un analizador de amplitud Modulada (AM) en la cual la señal de frecuencia en la red de baja potencia ca, la punta de detección positiva del filtro pasa bandas imita la respuesta característica del sistema lámpara-ojo-cerebro [6].

### **6.1.5 Horno de arco.**

Las cargas eléctricas del horno de arco a menudo representan uno de los mayores clientes del sistema de servicios de potencia eléctrica. Ahora, no es inusual proveer potencia a los hornos de arco de las plantas, con fuentes de transformadores en rangos de 100 MVA. También han sido reportadas las instalaciones con rango de 200 MVA. Un típico horno de arco produce alrededor de 1 ton de acero por hora por MW de potencia de salida.

Alrededor de 450 a 600 kWh de energía calorífica, son requeridos para procesar una pequeña cantidad fría de una tonelada en acero fundido útil. El arco es sostenido por una corriente alterna y los hornos de corriente directa están empezando a ser populares. En el caso que la longitud del arco no cambiaría con el tiempo, la característica de voltaje/corriente de arco sería invariante en el tiempo. El horno no daría lugar a las fluctuaciones de voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC), pero sólo al voltaje y corriente armónica debido a la no linealidad intrínseca de los arcos característicos.

### 6.1.6 Estudios de la variación de voltaje.

Extensos estudios en cargas de hornos de arco han mostrado que esas variaciones de voltaje que genera, con frecuencias múltiples, pueden producir *parpadeo* de iluminación inaceptable. Actualmente la causa principal de quejas del cliente debido al *parpadeo* de iluminación es la fluctuación de voltaje generada por los hornos de arco.

Un horno de arco puede operar sin causar interferencia si la potencia de corto circuito en el terminal de suministro, a su nivel más bajo, es por lo menos de 80 a 100 veces más alto que la potencia del horno, una forma que debe dividirse en dos cuando se aplica para hornos cd. Esta aproximación es extensivamente usada como la regla de la mano derecha para las valoraciones iniciales [7]. Sin embargo, los dos parámetros que principalmente determinan las fluctuaciones de voltaje producidas por los hornos son los sistemas de impedancia por encima de PCC y la impedancia de los transformadores más el horno. En 1966 fue definida una nueva constante, la depresión de voltaje de corto circuito (SCVD), que relaciona el tamaño del horno de arco respecto a la potencia del sistema, es decir, el cambio en el voltaje en PCC ocurrido cuando los electrodos del horno son tomados desde el inicio del cortocircuito sumergiéndolo en la carga fundida.

El rápido avance de la tecnología de electrónica de potencia hace posible la competitividad en aplicaciones que requieren alta potencia de rectificación ca, uno de los cuales es el horno de arco cd. El número de instalaciones de horno de arco cd sea incrementado rápidamente en los recientes años (uno de los primeros se hecho a andar en Alemania en 1982), con el tamaño de una sola unidad que alcanza más de 200 MW. El horno cd típicamente es menor que un tercio a un medio de la fluctuación de voltaje de un horno de arco de tamaño similar [7]. La principal desventaja de los hornos cd es el costo de los semiconductores de alta potencia y filtros de línea ca. También, los hornos de arco cd generan muchos más armónicos que los esperados y causa problemas de *flicker* en lugares aislados (en iluminación fluorescente), aparentemente debido a un inapropiado diseño de los filtros del horno de arco. En este caso, un tercer armónico (187 Hz) se presenta con una magnitud de aproximadamente 0.7% de la fundamental, causando un fenómeno de pulsación. El mismo problema puede existir cuando un horno de arco ca y (compensador de var estático) *static var compensators* (SVC) son instalados en conjunto [3].

Una predicción de niveles de *flicker* asociado con hornos específicos requiere una representación exacta de las cargas de horno de arco. Una de las mas importantes partes de la carga del horno es el arco eléctrico ca. El cálculo de las propiedades eléctricas de arco ca es difícil porque la conducta dinámica del arco depende de varias variables que no se entienden totalmente. La variación del arco depende de los materiales a fundirse y en la longitud del arco,

y es sumamente aleatorio en la naturaleza. Se ha encontrado que las variaciones del arco no obedecen ninguna distribución uniforme.

### **6.1.7 Mitigación de fluctuaciones de voltaje.**

Cuando se compara con la calidad de energía, la emisión de *flicker* presente es bastante cara de resolver. Las repercusiones en suministros principales pueden ser moderadas, alterando condiciones en el suministro, por ejemplo, incrementado la reactancia del horno cerca del regulador de flujo instalado. Sin embargo, esto lleva a la reducción de potencia indeseable. Reduciendo el sistema de reactancias reforzando el suministro principal, o moviendo arriba el punto PCC, ambas son medidas muy costosas.

El parpadeo de iluminación causado por el horno de arco es principalmente debido al flujo de potencia reactiva desde el sistema; por lo tanto, cualquier medida tomada hacia su control reducirá fluctuaciones de voltaje parcialmente. Una mayor ventaja es que la potencia reactiva suministrada por el compensador de VAR aumenta la producción de acero considerablemente. Las metodologías de mitigación principales son como sigue.

### **6.1.8 Condensador síncrono.**

La primera solución fue implementada por la instalación de condensadores síncronos en paralelo con el sistema como una manera de reducir la reactancia del sistema. Con el desarrollo de semiconductores de alta potencia y SVCs, los condensadores síncronos fueron remplazados, sin embargo, unos todavía está en funcionamiento.

### **6.1.9 Condensador shunt.**

Es muy económico suministrar carga baja en vars por condensador shunt. El diagrama tiene una respuesta en tiempo grande y la posibilidad de compensar solamente para la frecuencia fundamental de corriente reactiva de la carga. Uno de los inconvenientes es que un capacitor shunt introduce armónicos; debe combinarse con un banco de filtro pasivo. Debido a la variación de la rapidez del voltaje, la única manera de mitigar el *flicker* es por conmutación de condensadores a una velocidad comparable con aquel de la fluctuación de voltaje.

### **6.1.10 Condensador serie.**

Estando en serie con el circuito de potencia completo, ellos son instantáneos en su efecto correctivo, estos son efectivos en sus efectos correctivos, lo cual es la mayor ventaja dado que cualquier cambio en la línea de corriente causa un cambio inmediato en el voltaje de compensación. La mayor desventaja es que los capacitores deben ser lo bastante grande como para llevar todas las cargas más allá de sus puntos de instalación. Otro inconveniente es originado en la presencia de armónicos cercanos a la frecuencia de resonancia subarmónica que puede causar el descarga del capacitor de protección de sobrevoltaje (*spark gap*). Generalmente, el costo es muy alto para la corrección obtenida.

### **6.1.11 Reactor saturado.**

El reactor de núcleo de acero opera en la región saturada y se ajusta automáticamente el var de absorción requerido por el sistema de potencia, sin acción de control externo. Su capacidad de sobrecarga inherente es alta y puede ser utilizado para limitar la dinámica de sobrevoltaje.

### **6.1.12 Reactancia de compensación estática y dinámica.**

La variación en la potencia reactiva demandada debería ser apaciguada por corrientes de compensación reactivas dinámicas y estáticas. Los dos dispositivos principales fueron llamados originalmente *thyristor-controller* reactor (TCR) y *Thyristor-switched* capacitor (TSC). Como el condensador síncrono estos componentes son conectados en paralelos con el horno en las barras de bus del horno.

En términos simplificados, el motivo es para medir la potencia reactiva o corriente del horno tan rápido como sea posible y para controlar en cada compensador de manera que la suma de la potencia reactiva del horno y la potencia reactiva del compensador sea aproximadamente una constante. Conceptualmente el compensador ha sido propuesto solo para estabilizar y compensar la frecuencia fundamental de la potencia reactiva.

Frecuentemente los filtros de armónicos son necesarios para absorber ambos generadores de armónicos hornos y compensadores.

El elemento básico de todos los compensadores controlados por semiconductores es un capacitor (o reactor) en serie con interruptores de electrónica de potencia, de donde los controles de la frecuencia fundamental de la susceptancia a través de la señal de control aplicada a la entrada del semiconductor, ciclo de control completo y fase de control respectivamente. De esta forma el suministro de susceptancia controla, o absorbe, la potencia reactiva tan requerida por el horno. Esta estrategia automáticamente reduce las fluctuaciones de voltaje en y por encima del punto de conexión del compensador. En conjunto los capacitores en arreglo paralelo con el compensador pueden ser usados para ajustar el promedio del factor de potencia. Puede concluirse que los compensadores estándar son capaces de reducir fluctuaciones de voltaje compensando la potencia reactiva en un ciclo de duración base.

### **6.1.13 Soldadores eléctricos.**

Los soldadores eléctricos son el origen de muchas preocupaciones en el servicio debido a sus características como una causa de perturbación mas como una demanda de corriente imprevista, bajo factor de potencia, desbalance trifásico, armónicos, y corrientes cd. La principal razón es que la mayoría de soldadores tienen menor tiempo de encendido que de apagado y consecuentemente el total de energía consumido es menor que la demanda instantánea. Además ellos presentan grandes fluctuaciones de voltaje. Normalmente la mayoría de soldadores están localizados en fábricas donde su demanda es solo un pequeño porcentaje del total de carga. Por otra parte, si el soldador es la mayor carga en el área puede dar lugar a graves parpadeo de iluminación. Usualmente el parpadeo de iluminación es producido por la electrónica de potencia incluida en el equipo de soldadura, cuando, al mismo tiempo, son generadores de armónicos. En la mayoría de los soldadores, la fuente de voltaje (usualmente entre 230 a 2300 voltios) está un paso abajo por unos pocos voltios (entre 1 y 20 voltios para

soldadores de resistencia y entre 15 a 80 Voltios para soldadores de arco) para enviar una corriente elevada a través de las partes hacer soldadas.

El principal problema es especialmente serio cuando un transformador alimenta una gran cantidad de soldadores que tienen operaciones aleatorias e independientes; ocasionalmente demasiados soldadores cesan su trabajo al mismo tiempo. La caída de voltaje al momento no solo produce fluctuaciones de voltaje sino que algunos causan varias soldaduras frías (malas soldaduras). El soldador presenta una carga muy particular como lo generado en grandes cantidades de perturbaciones de voltaje; y estos son muy sensitivos a fluctuaciones de voltaje. Con los soldadores de arco ca, el cambio de voltaje y corriente introduce el problema de reencendido del arco como el arco es dos veces extinguido en todo el ciclo, generando un alto nivel de armónicos.

## **6.2 *Flicker* y principios de compensación**

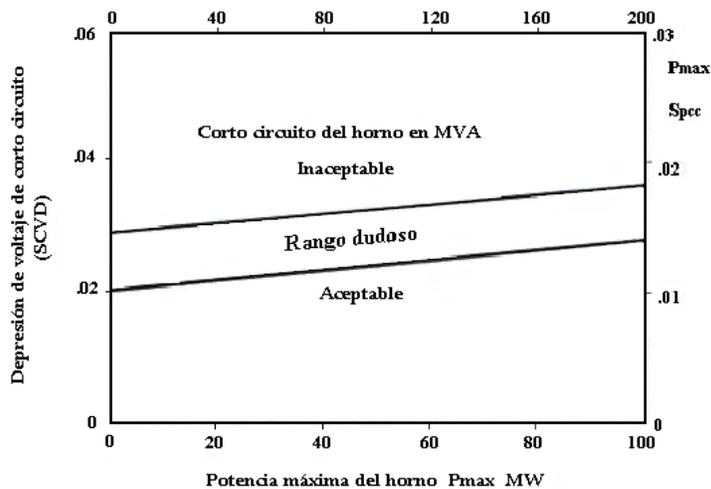
Las fluctuaciones en la corriente suministrada a los hornos de arco (y otras cargas grandes, ejemplo: rodillos de molinos, elevador usado en minas) son a veces bastante grandes para causar fluctuaciones de voltaje en el sistema de distribución, resultando en el parpadeo de las lámparas. Los receptores de televisión y equipo electrónico sensible pueden ser afectados. Para minimizar estos efectos, las fluctuaciones de voltaje se deben mantener debajo de “el umbral de irritación.” El termino “*flicker* de voltaje” es a menudo usado para tomar en cuenta todas las fluctuaciones rápidas de voltajes.

### **6.2.1 Caracterización del problema de *flicker*.**

Las distribuidoras difieren en los métodos usados para caracterizar el “Umbral de irritación” debido al *flicker*, pero en general hablan de dos apreciaciones importantes, el método SCVD y el método del *flickermeter*. Hay diferencias fundamentales entre los dos métodos. La abreviatura SVCD se entiende por Depresión de voltaje de corto circuito, discutido más adelante. Note que el SCVD será peor en el PCC (Punto de acoplamiento común) que en otro punto más remoto, del sistema de distribución donde están conectadas otras cargas.

(a) *El método SCVD.*

El método SCVD está basado en una correlación de *incidencia de quejas de flicker* consumidores cerca de plantas de acero, y la *depresión de voltaje de corto circuito* en el punto de acoplamiento común. El SCVD es usualmente expresado como el porcentaje de decrecimiento de voltaje en el PCC cuando el horno va de circuito abierto a corto circuito conectado a las tres fases. La correlación entre el SCVD y la incidencia de quejas de *flicker* es determinada de estudios anteriores y el resultado está reproducido en la figura 6.2.



**Figura 6.2.**  
**Relación típica entre el SCVD y el flicker inaceptable.**

El método SCVD de tratar con problemas de flicker tiene importantes ventajas prácticas. Es simple, y define el “umbral de irritación” de una manera que debería ser aceptable automáticamente para todos los clientes de las distribuidoras como el adecuado. Con este método es posible predecir *en la etapa de diseño* si se tiene planeado una instalación de un nuevo horno que pueda causar flicker objetable, debido a que el SCVD se puede calcular tomando en cuenta el índice de potencia y potencia reactiva del horno y la impedancia del sistema de alimentación. Todos estos parámetros usualmente se encuentran disponibles en las etapas de diseño.

(b) *El método flickermeter.*

Una dificultad con el método SCVD es que no define flicker, y por lo tanto no indica la cantidad real de flicker de voltaje que se puede cuantificar para propósitos de medición o predicción. La medición es importante en la evaluación de flicker tanto en instalaciones compensadas y no compensadas, mientras que la predicción es importante en el diseño de circuitería de control para ciertos tipos de compensadores.

La dificultad para definir con precisión el flicker se refleja en la gran variedad de flickermeters que han sido probados, usando varios principios de medición. Algunos usan una foto celda que responden a la luz de una lámpara de filamento de tungsteno, mientras que otros son sensibles directamente al voltaje de entrada. La mayoría de tipos esencialmente mide el valor rms de la fluctuación (o modulación) del voltaje, debido a que este es el factor común más importante de flicker percibido por un gran número de consumidores. Sin embargo, existen grandes diferencias en las respuestas en frecuencias y en la interpretación de los diferentes flickermeters. Algunos intentan reproducir la curva de “sensibilidad visual” del ojo humano, mientras otros no emplean procesos de respuesta en frecuencia. Algunos tipos incorporan filtros armónicos, sobre la base de los sistemas aterrizados que puedan afectar la

medición y que puedan aumentar el valor rms de la fluctuación. Los *flickermeters* también difieren ampliamente en el periodo promedio que ellos usan para determinar el valor eficaz. Algunos hacen una lectura continua; algunos una lectura muestreada en intervalos de pocos segundos o minutos; otros integran continuamente para dar una “dosis de *flicker*” acumulativo.

Parecer ser que es relativamente poco frecuente que las distribuidoras especifiquen el “umbral de irritación” en términos de una lectura en un *flickermeter* en particular, aunque el uso frecuente de estos instrumentos puede cambiar esta situación, y algunos compradores de equipo de compensación ya han usado semejante criterio en sus especificaciones.

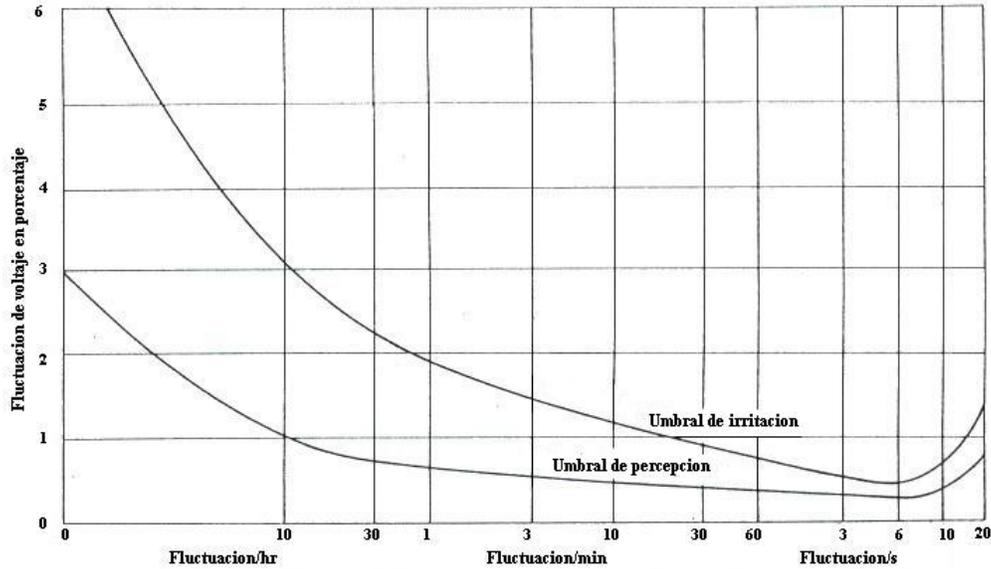
El principal valor del *flickermeter* hasta ahora ha sido tomado “antes y después” de las mediciones de *flicker* cuando un compensador se añade a una instalación de horno existente. Sin embargo esto es de poca ayuda en la etapa de planificación de una instalación de un horno nuevo o en el diseño de un compensador, debido a que no es posible predecir los datos a base de diseño y cual será la medición del *flickermeter* con o sin el compensador

Un ejemplo de una curva de “sensibilidad visual” es reproducido en la figura 6.3, no con el propósito de describir cualquier *flickermeter* en particular, es simplemente para mostrar que el ojo es sensible, a variaciones de la iluminación eléctrica, en el espectro del *flicker*, y puede detectar variaciones muy pequeñas de voltajes. El “umbral de percepción” de una modulación de voltaje senoidal continuo de 7-8 Hz ha sido puesta en 0.3% del valor rms. La figura 6.3 muestra un punto máximo sensible a fluctuaciones de voltaje en el rango de frecuencias de 6-10 Hz, pero la percepción de variaciones agudas con duraciones menores de medio ciclo. Esto sirve para mostrar que cualquier compensadores respondera de manera rápida y precisa en las reducciones de *flicker*.

Las recomendaciones SCVD de una distribuidora han sido relacionadas con un valor particular del valor rms de la fluctuación del voltaje. Los resultados de estudios reportados, basados en las quejas, el “umbral de irritación” deberían ser definidos por una fluctuación rms excediendo en 0.25% para 1% del tiempo. Esto es llamado fluctuación del punto de calibración.

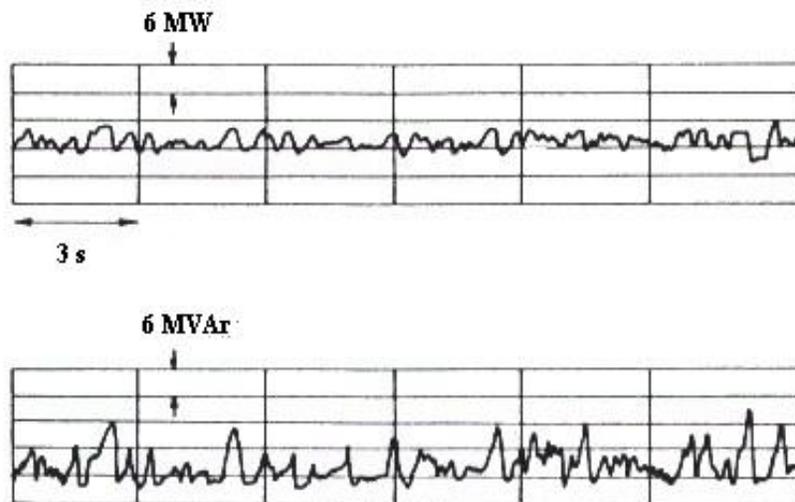
### **6.3 Naturaleza de la variación de corriente de los hornos de arco.**

Las fluctuaciones resultantes de variaciones de voltaje prolongadas y algunas veces erráticas en la corriente fluyendo a través de la impedancia de alimentación común arriba del punto de medición. Un registro en la figura 6.4 que muestra la potencia y la potencia reactiva de un horno típico. La corriente tiende a ser irregular debido al retardo de ignición y de la resistencia no lineal del arco, y debido a que el movimiento del arco, algunas veces es errático bajo la influencia combinada de las fuerzas electromagnéticas, las corrientes de convención, el movimiento de los electrodos, y la introducción y el deslizamiento de la carga a fundirse ( la cual consiste principalmente de pedazos de metal en la mayoría de los casos). Las corrientes son desbalanceadas, distorsionadas, y fluctúan grandemente en medios ciclos consecutivos.



**Figura 6.3**  
**Respuesta visual típica de flicker para iluminación incandescente.**

La variabilidad y la distorsión tiende a ser más severa durante los primeros minutos de un ciclo de fundición, a medida que los electrodos de grafito son bajados de la carga. A medida que el charco de metal fundido crece, el arco se hace más corto y es más estable, y el periodo del refinamiento subsecuente es caracterizado por corrientes mucho más firmes con distorsión relativamente pequeña. La potencia del horno se puede reducir en este periodo a una pequeña fracción de su valor, por cambio de tap del transformador del horno.



**Figura 6.4**  
**Variaciones de la potencia real y reactiva de un horno arco eléctrico típico.**

Una idea del tamaño de las variaciones de la corriente en un horno grande se puede obtener de la figura 6.4, en la cual un horno de 60 MW funcionando a un voltaje de electrodo a 700V tiene corrientes de arco mayores a 70,000 A por fase. La potencia reactiva promedio es del orden de 60 MVar, requiriendo un banco de condensadores muy grandes para la corrección completa del factor de potencia.

El análisis espectral de la corriente distorsionada del horno, no da como resultado componentes armónicos de orden entero discretas, sino un espectro continuo (aunque disparejo) cuya amplitud es inversamente a la frecuencia. No obstante, es importante extraer las amplitudes del espectrales en los múltiplos enteros de frecuencia fundamental con el propósito de dimensionar los filtros armónicos relacionados con los hornos. Esos filtros usualmente están sintonizados a las armónicas de tales ordenes (típicamente 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, y 7<sup>a</sup>).

La tabla 6.1 resume los resultados de un análisis de *Fourier* de las corrientes del horno, usado en la determinación del tamaño del filtro.

**Tabla 6.1.**

**Ilustración del contenido armónico de la corriente del horno de arco en el segundo ciclo de fusión**

CONDICION DEL HORNO	CORRIENTE EN % DE LA ARMONICA FUNDAMENTAL				
	ORDEN DE ARMONICOS				
	2	3	4	5	7
FUSION INICIAL (ARCO ACTIVO)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
REFINADO (ARCO ESTABLE)		2		2.1	

**6.4 Estrategias de compensación del flicker.**

Si el SCVD calculado de una instalación de horno planificada cae en la frontera o en la región inobjetable de la figura 6.2, o si las quejas de *flicker* han sido provocadas por una instalación existente, entonces la selección debe hacerse entre la reducción de la carga del horno, robustecer el alimentador, o instalar equipo de compensación.

El alimentador puede ser robustecido conectándolo a un nivel de voltaje más alto, o instalando líneas adicionales, o ambos. Esas opciones pueden ser costosas, pero a menudo son adoptadas cuando se anticipa una expansión futura de la carga.

Cuando se va a emplear compensación, el cambio se puede realizar entre diferentes tipos de compensadores. Algunas de las ventajas y desventajas prácticas de los diferentes tipos de compensadores son resumidos en la tabla 6.2.

**Tabla 6.2.**

**Algunas ventajas y desventajas practicas de diferentes tipos de compensadores de flicker.**

<b>Equipo y técnicas de compensacion de flicker</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Reactor controlado por tiristor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Respuesta rápida</li> <li>- Operación independiente de las fases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere condensadores en paralelo para corrección del factor de potencia</li> <li>- Generación de armónicos</li> </ul>
Condensador conmutado por tiristor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No genera armónicos</li> <li>- No requiere reactores</li> <li>- Operación independiente de las fases</li> </ul>	Velocidad limitada de respuesta
Reactor con tap / reactor saturado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Respuesta rápida da gran supresión de flicker</li> <li>- Operación independiente de las fases</li> <li>- Construcción del tipo de transformador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere un gran banco de condensadores para corrección del f.p.</li> <li>- Generación de armónicos</li> <li>- Aplicable solamente a horno monofasico</li> </ul>
Reactor saturado para compensación de armónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Respuesta rápida a la generación de armónicos despreciables</li> <li>- Construcción del tipo de transformador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere un gran banco de condensadores para corrección del f.p.</li> <li>- Transientes de conexión</li> <li>- Las fases no son controladas independientemente</li> </ul>
Condensador sincrónico	-----	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere un mantenimiento regular</li> <li>- Capacidad limitada para la supresión de flicker, incluso con el reactor del buffer</li> </ul>
Incrementar el nivel de corto circuito del alimentador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Confiabilidad elevada</li> <li>- Expansión futura de instalación de horno</li> </ul>	Costos elevados

**6.5 Generadores.**

**6.5.1 Primera acción.**

Los motores que manejan los generadores son probablemente responsables de la mayoría de los casos inusuales de flicker originados fuera de la carga. El origen de las fluctuaciones de voltaje generadas a raíz en el cambio de fuerzas tangenciales y la velocidad angular. La variación de voltaje total está igual que la variación de velocidad, con tal de que la excitación sea constante, entonces el tiempo del campo constante del motor típico manejando el generador es aproximadamente 0.5 a 2 s, el cual es muy grande en comparación con el rango inaceptable del flicker.

Recientemente, este problema es limitado a pequeños sistemas de potencia o donde son usados los respaldos de motores manejando generadores. Por ejemplo, Una variación de 0.7% de la velocidad en dos golpes, 300 rpm los primeros generarían fluctuación de voltaje del mismo porcentaje y una frecuencia de 10Hz.

### **6.5.2 Alternadores.**

Un generador simétrico con una carga constante, excitado, con una velocidad angular produce un voltaje constante en la terminal. Si cualquiera de estas condiciones cambia, el voltaje en la terminal también variara. Esto es posible para tener un grado suficiente de no uniformidad en el entre hierro del generador (rotor excéntrico y/o estator) para causar pulsaciones en el voltaje de la terminal. Sin embargo, hoy en día en la manufacturación de productos comerciales las tolerancias están suficientemente cerca que no causan fluctuación de voltaje debido a esta situación que ha ocurrido en las plantas de potencia. Debe estar fuera del punto para que siempre sea posible encontrar el problema en los alternadores diseñados incorrectamente así como los construidos, pero esto es mas una excepción que una regla general. La única acción aconsejable es la corrección del generador y primer diseño y/o construcción.

Los sistemas de excitación raramente son la causa del *flicker* de voltaje debido a los grandes valores de la constante de tiempo del campo, usualmente más que 3 s por planta de generador de potencia. Por lo tanto, no importa cómo es de rápida la excitación puede cambiar, la variación en la armadura de voltaje sería gradual.

### **6.5.3 Turbinas de viento.**

El uso de las turbinas de viento en forma aislada o en una granja el uso del viento sea venido extendido. En el presente, la calidad del voltaje generado y su impacto en la maya de potencia, especialmente en fluctuaciones de alta potencia que dan como resultado el *flicker*.

## 6.6 Referencias

- [1] IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment, IEEE Standard 1346, 1998.
- [2] M.K. Waiker, "Electric utility flicker limitations," IEEE Trans. industry Applications, vol. IA-15, no. 6, pp. 644-655, 1979.
- [3] L. Tang, et al., "Analysis of DC arc furnace operation and flicker caused by 187 Hz voltage distortion," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 1098-1107, 1994. .
- [4] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Standard 141, 1993.
- [5] W.B. Jervis, "An assessment of power system voltage disturbances in terms of lamp flicker," in Proc. IEEE Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, pp. 71-76, 1982.
- [6] IEC Flickermeter Functional and Design specifications, IEC publication 868, 1986.
- [7] S.R. Mendis, et al., "Investigation of transmission system voltage flicker due to multiple ac and dc furnace operations," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 483-496, 1995.
- [8] P.M. Anderson and M. Mirheydar, "Analysis of a diesel-engine driven generating unit and the possibility for voltage flicker," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, no. 1, pp. 37-47, 1995.
- [9] V. Cataliotti, V. Cecconi, and M. Lopis, "Sul flicker di tensione provocato da motori asincroni di grande potenza," L'energia Elettrica, no. 5, pp. 157-164, 1980.

## BIBLIOGRAFIA

ELECTRICAL POWER SYSTEMS AND EQUIPMENT–VOLTAGE RATING  
(60 HZ) ANSI C84.1-1995

IEEE POWER ENGINEERING REVIEW  
P. PILLAY, M. MANYAGE: DEFINICION OF VOLTAGE UNBALANCE

IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY  
VON JOUANNE AND BANERJEE: ASSESSMENT OF VOLTAGE UNBALANCE

IEEE RECOMMENDED PRACTICES AND REQUIREMENTS FOR HARMONIC  
CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS. IEEE Std 519-1992

IEEE POWER ENGINEERING REVIEW  
JUAN CARLOS GOMEZ, M.M. MORCOS: EFFECT OF DISTRIBUTION SYSTEM  
PROTECTION ON VOLTAGE SAGS

IEEE RECOMMENDED PRACTICE ON SURGE VOLTAGES IN LOW VOLTAGE AC  
POWER CIRCUITS. C62.41-1991.

IEEE POWER ENGINEERING REVIEW  
M.M MORCOS, J.C GOMEZ: FLICKER SOURCES AND MITIGATION