

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ACTUALIZACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE DISTURBIOS Y  
DISEÑO DE REDES DE PUESTA A TIERRA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR**

**ELMER ESTUARDO LEMUS GUDIEL**

**ASESORADO POR ING. FRANCISCO RIVERA CANECK**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**GUATEMALA, MARZO DE 2004**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central**

DL  
08  
T(5645)

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL 1º.	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL 2º.	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL 3º.	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL 4º.	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL 5º.	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

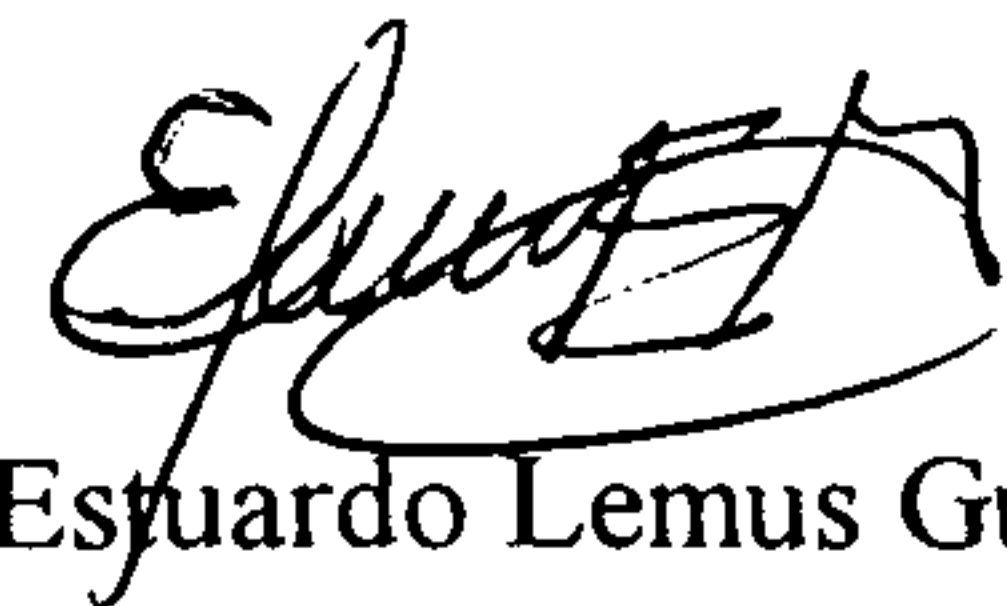
DECANO:	Ing. Herbert René Miranda Barillas
EXAMINADOR:	Ing. Julio Cesar Solares Peñate
EXAMINADOR:	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR:	Ing. Jorge Fernando Alvarez Girón
SECRETARIO:	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ACTUALIZACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE DISTURBIOS Y  
DISEÑO DE REDES DE PUESTA A TIERRA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 26 de Septiembre de 2001, No. EIME 159.2001.



Elmer Estuardo Lemus Gudiel

Guatemala, 03 de Septiembre de 2003

Ingeniero  
Erwin Segura  
Coordinador del Area de Electrotecnia  
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente.

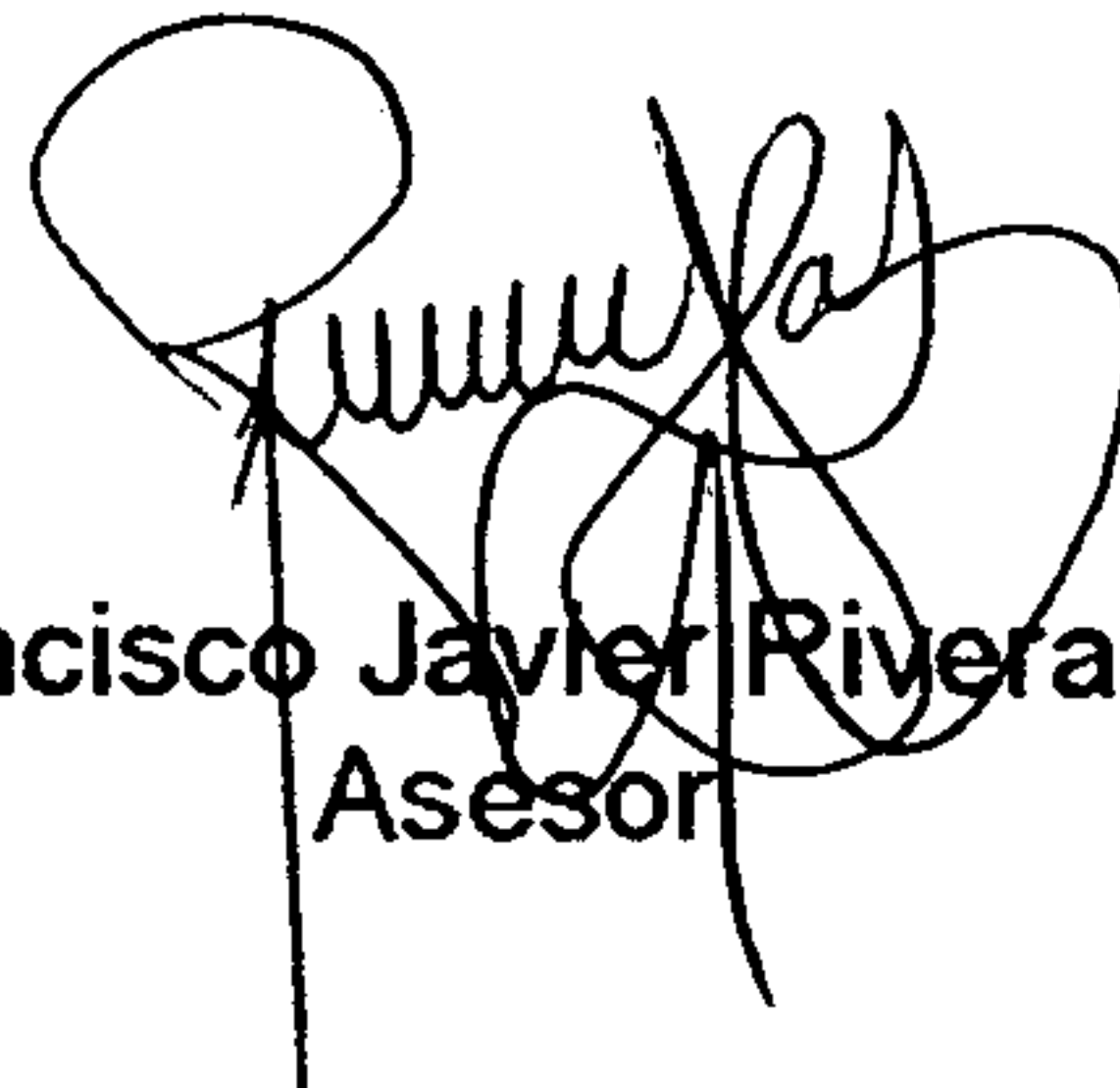
Ingeniero Segura:

De conformidad a la designación que me hicieran, he realizado la asesoría del trabajo de graduación titulado **ACTUALIZACION DE METODOS PARA EVALUACIÓN DE DISTURBIOS Y DISEÑO DE REDES DE PUESTA A TIERRA**, elaborado por el estudiante universitario **ELMER ESTUARDO LEMUS GUDIEL**, con carné # 9212219, como requisito para optar al Título de Ingeniero Electrónico.

Luego de revisar el contenido y verificar la consistencia de los temas expuestos, recomiendo la aprobación del presente trabajo.

Las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo son responsabilidad únicamente del Autor y Asesor.

Muy atentamente,



Ing. Francisco Javier Rivera Canek  
Asesor





FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 2 de marzo 2004.

Señor Director  
Ing. Enríque Edmundo Ruiz Carballo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Actualización de métodos para evaluación de disturbios y diseño de redes de puesta a tierra**, desarrollado por el estudiante Elmer Estuardo Lemus Gudiel, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Erwin S.', written over the printed name below.

Ing. Erwin Efraim Segura Castellanos  
Coordinador Area de Electrotécnia

EESC/mro

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**

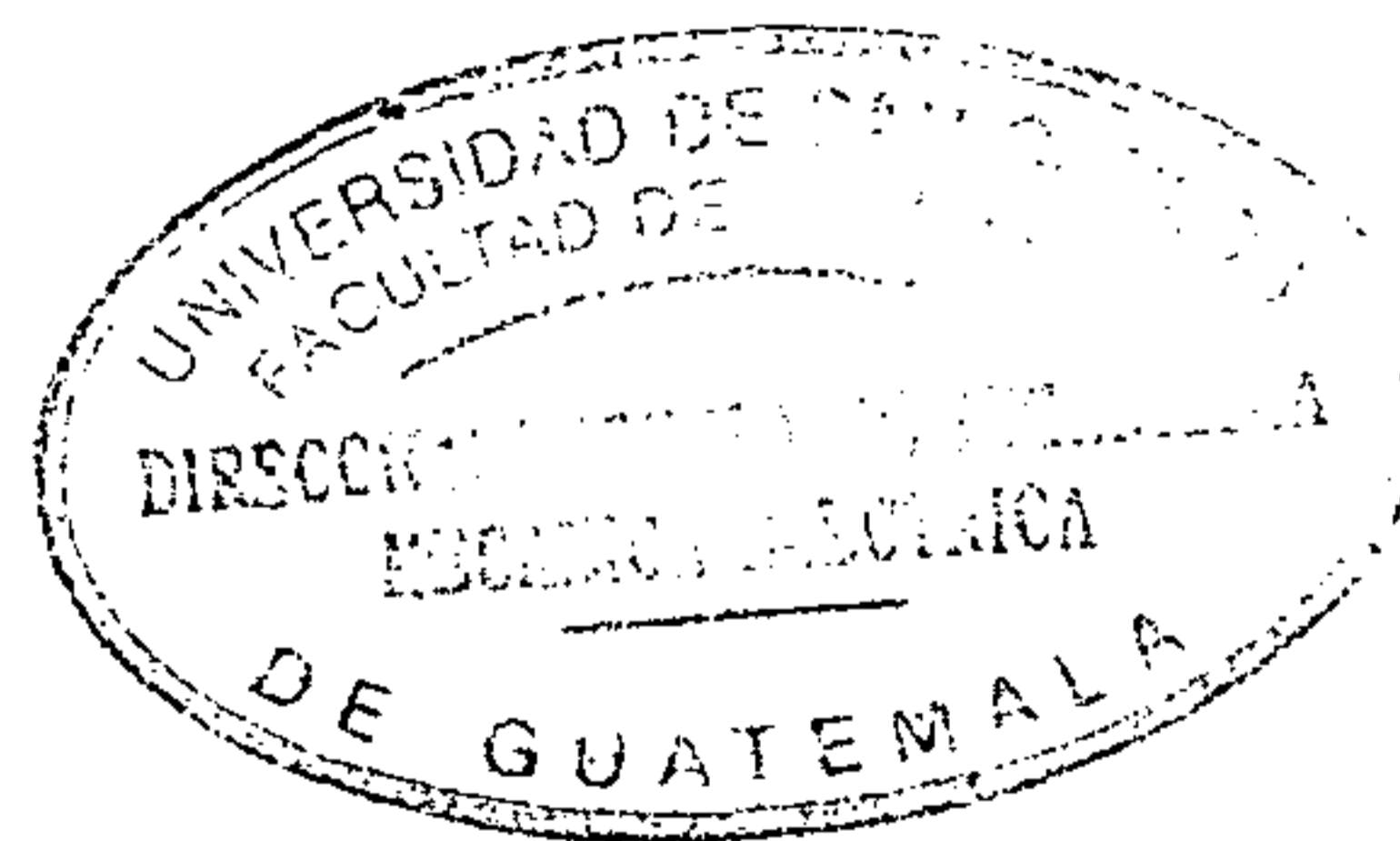


**FACULTAD DE INGENIERIA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante: Elmer Estuardo Lemus Gudiel titulado: **Actualización de métodos para evaluación de disturbios y diseño de redes de puesta a tierra**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Enrique Edmundo Ruiz Garballo

**DIRECTOR**

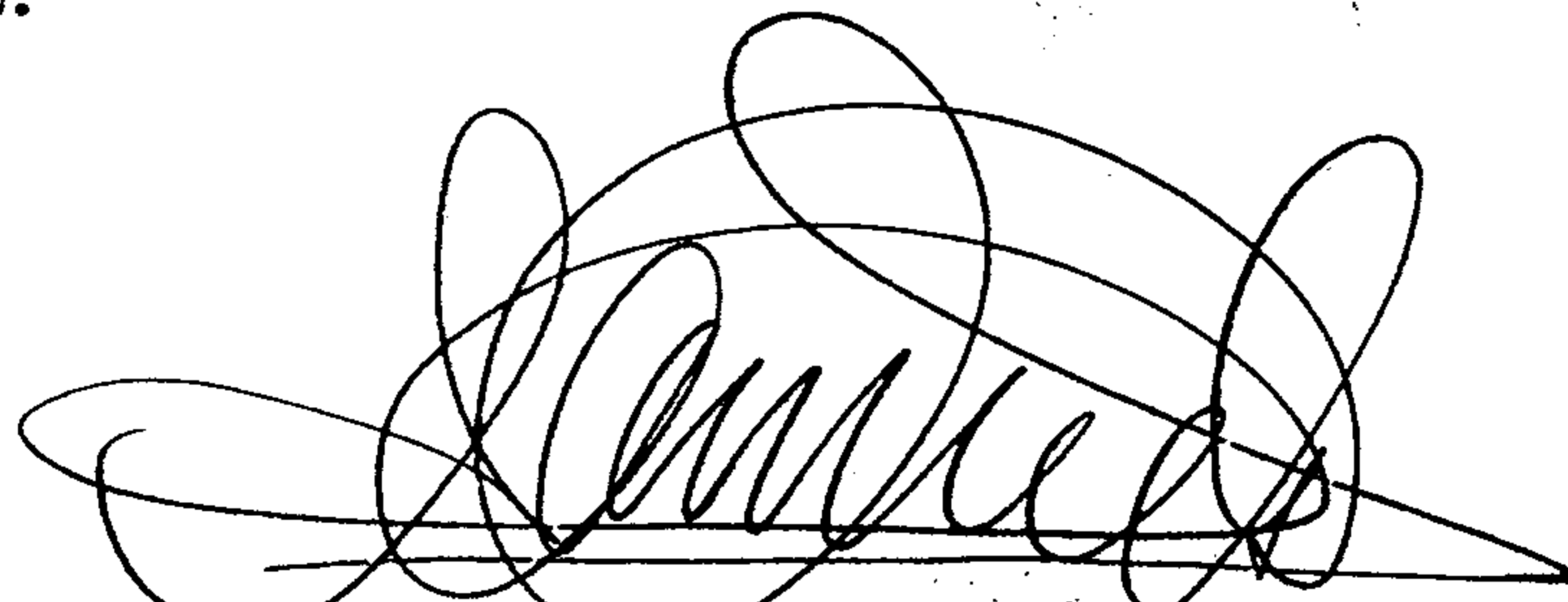


Guatemala, 9 marzo de 2,004.

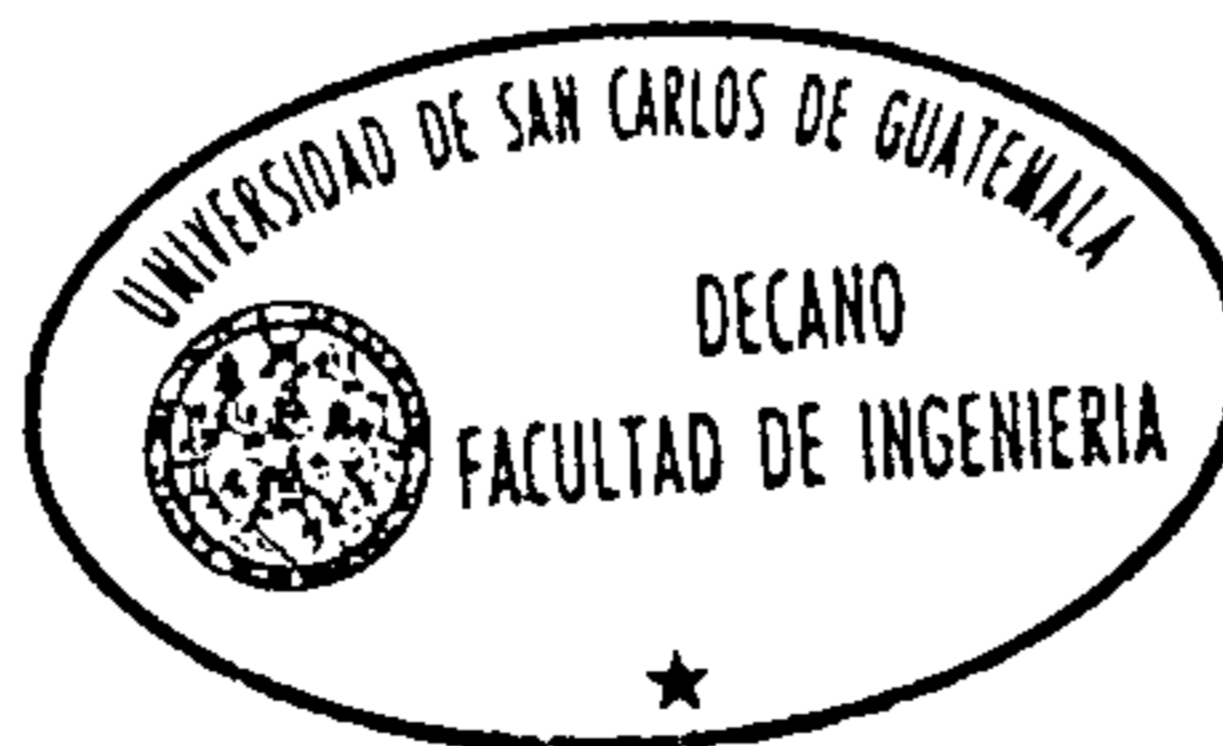
Ref. DTG-101-2003

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ACTUALIZACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE DISTURBIOS Y DISEÑO DE REDES DE PUESTA A TIERRA**, presentado por el estudiante universitario, **Elmer Estuardo Lemus Gudiel**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

**IMPRÍMASE:**



**Ing. Sydney Alexander Samuels Milson**  
**DECANO**



Guatemala, marzo 25 de 2004

/lmcb.

## ACTO QUE DEDICO

- A DIOS Por ser la fuerza generadora de todo cuanto existe.
- A MIS PADRES Elmer Arnoldo Lemus Orellana  
Teresa Arcely Gudiel de Lemus.  
Gratitud eterna por todo el amor y apoyo brindado,  
para ellos con cariño.
- A MI ESPOSA Ligia Orozco de Lemus.  
Con amor y apoyo.
- A MI HIJO Andres Estuardo.  
Con amor y que mi sacrificio le sirva de ejemplo.
- A MIS HERMANOS Ketty Arcely y Miguel Arnoldo.  
En reconocimiento al apoyo y a los múltiples  
consejos.
- A MIS AMIGOS Ing. Gabriel Catalán y compañeros en general.  
Por demostrarme que puedo contar con ellos.
- A MI ASESOR Ing. Francisco Rivera Caneck.  
Gratitud sincera por todo el apoyo brindado.
- A TODA MI FAMILIA  
EN GENERAL Respetuosamente.



## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	vii
<b>GLOSARIO</b> .....	xi
<b>RESUMEN</b> .....	xiii
<b>OBJETIVOS</b> .....	xv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	xvi
<b>1 GENERALIDADES</b> .....	1
1.1 Calidad de energía.....	2
1.1.1 Filosofía de los conflictos de diseño y seguridad.....	3
1.1.2 Consideraciones de la calidad de energía.....	4
1.2 Clasificación de disturbios.....	4
1.2.1 Origen de los disturbios.....	5
1.3 Fuentes de los disturbios de los transitorios de voltaje y sus características.....	7
1.3.1 Cargas de paso.....	8
1.3.2 Corrientes de irrupción.....	8
1.3.3 Corrientes de falla.....	10
1.3.4 Interacciones del regulador de voltaje.....	11
1.4 Consecuencias de los disturbios de los transitorios de voltaje.....	11
1.4.1 Pérdida completa de energía AC a las cargas electrónicas.....	11
1.4.2 Variaciones de voltaje de corta duración.....	13
1.4.3 Transitorios de fase debido a un cambio reactivo de las las cargas.....	13

1.4.4	Variaciones de frecuencia.....	13
1.5	Fuentes de distorsión de voltaje en estado estable y sus características.....	14
1.5.1	Cargas no lineales.....	14
1.5.2	Cargas reactivas.....	15
1.6	Consecuencias de las distorsiones de corriente en estado estable.....	17
1.6.1	Calentamiento en transformadores causado por las corrientes de <i>Eddy</i> , debido a las corrientes armónicas.....	17
1.6.1.1	Degradación de la capacidad convencional en los transformadores.....	17
1.6.1.2	Factor K de capacidad de transformadores.....	19
1.6.2	Resonancia debido a corrientes de carga armónicas.....	21
1.6.3	Calentamiento debido a fuentes de voltaje no senoidal.....	21
1.6.4	Desplazamiento de fase.....	21
1.7	Transitorios de voltaje.....	22
1.7.1	Transitorios de potencial.....	22
1.7.1.1	Transitorios de <i>switches</i> .....	22
1.7.1.2	Transitorios inducidos por el ambiente.....	28
1.7.1.2.1	Transitorios inducidos por rayos.....	28
1.7.1.2.2	Redistribución de cargas en atmósfera antiaéreos.....	29
1.7.1.2.3	Descargas electrostáticas.....	29
1.7.2	Transitorios por mecanismos de acoplamiento.....	30
1.7.2.1	Acoplamiento de espacio libre.....	30
1.7.2.1.1	Acoplamiento inductivo magnético.....	31
1.7.2.1.2	Acoplamiento capacitivo electrostático.....	32
1.7.2.2	Acoplamiento lejos del campo.....	33
1.7.3	Transitorios por interacción con cable subterráneo.....	33
1.7.4	Transitorios por interacción con cable de guarda.....	34
1.8	Potencial de impacto de los transitorios.....	35
1.8.1	Disrupcion de los datos.....	35

1.8.2	Tensión de <i>Hardware</i> .....	35
1.8.3	Dstrucción del <i>Hardware</i> .....	36
1.9	Interacción entre la fuente y la carga.....	37
1.10	Protecciones contra disturbios.....	38
1.11	Especificación y selección de dispositivos contra los disturbios.....	41
1.11.1	Dispositivos comúnmente utilizados.....	41
1.11.1.1	Filtros de aislamiento.....	41
1.11.1.2	Filtros de ruido.....	43
1.11.1.3	Filtros de corriente de armónicos.....	44
1.11.1.4	Supresores de sobrevoltaje.....	45
1.11.1.5	Reguladores de voltaje.....	45
1.11.1.6	Sistemas de energía de <i>stand-bye</i> .....	46
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS SOBRE LA IMPEDANCIA</b> .....	<b>49</b>
2.1	Consideraciones sobre la impedancia.....	49
2.1.1	Frecuencias de interés.....	49
2.1.1.1	Rango seguro de alimentación.....	49
2.1.1.2	Rango de desempeño.....	50
2.1.2	Impedancia de la fuente de alimentación.....	50
2.1.2.1	Impedancia interna.....	51
2.1.2.2	Transferencia de la impedancia de entrada.....	51
2.1.2.3	Impedancia de salida.....	52
2.1.3	Impedancia de carga.....	53
2.1.4	Consideraciones de la resonancia.....	55
2.1.4.1	Resonancia en serie.....	56
2.1.4.2	Resonancia en paralelo.....	59
2.1.4.3	Efectos de la autoresonancia de los conductores.....	64



<b>3</b>	<b>EQUIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA Y DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>67</b>
3.1	Generalidades.....	67
3.2	Detector Infrarrojo.....	67
3.3	Voltímetro de Respuesta RMS verdadera.....	68
3.4	Amperímetros de verdadero valor eficaz (RMS).....	68
3.5	Consideraciones en medición de corriente.....	69
3.5.1	Medición de componente DC en AC.....	69
3.5.2	Valores de estado estable.....	70
3.5.3	Valores de corriente instantánea.....	70
3.5.4	Factor de cresta.....	71
3.6	Osciloscopio.....	71
3.7	Analizadores de forma de onda.....	72
3.8	Analizadores de espectro, con procesamiento por computadora.....	72
3.9	Especificaciones del equipo utilizado en las mediciones.....	73
3.9.1	Multímetro digital.....	73
3.9.2	<i>Tester</i> de resistencia a tierra digital.....	74
3.9.3	Medidor de energía.....	74
<b>4</b>	<b>ESTUDIO DEL SITIO Y ANÁLISIS DE LA ENERGÍA.....</b>	<b>77</b>
4.1	Estudio de sitio.....	77
4.2	Técnicas para la captura de datos de calidad de voltaje AC.....	78
4.2.1	Auditoría cuarto de control turbogeneradores.....	82
4.2.2	Auditoría cuarto de control calderas cogeneración.....	84
4.2.3	Auditoría cuarto de control calderas fábrica.....	87
4.3	Técnicas para la recolección de datos de resistencia a tierra.....	90

<b>5</b>	<b>DISEÑO DE LA RED DE TIERRA</b>	<b>93</b>
5.1	Diseño de la red de tierra	93
5.1.1	Tipos de puesta a tierra	93
5.1.2	Estándares sobre tierra	94
5.2	Electrodos de tierra	95
5.2.1	Varillas de tierra	95
5.2.2	Tuberías metálicas	95
5.2.3	Otros electrodos	96
5.3	Resistencia a tierra	98
5.4	Conductividad del suelo	98
5.5	Conductor del electrodo de tierra	99
5.5.1	Tamaño	100
5.5.2	Resistencia física	100
5.5.3	Conductos de protección	100
5.5.4	Conexiones	101
5.5.5	Barras colectoras	102
5.6	Referencia única a tierra	102
5.7	Sistemas de tierra	103
5.7.1	Sistemas eléctricos de CA	103
5.7.2	Generadores de CA permanentes	106
5.7.3	Sistemas DC	108
5.7.4	Tierra de equipos	110
5.7.5	Tierra de rayos	112
5.7.6	Tierra aislada	113
5.7.6.1	Conductor de tierra aislada	114
5.7.6.2	Zona de tierra aislada	115
5.7.7	Tierra de generadores móviles	116
5.7.8	Tierras de múltiples edificios	118

5.7.9	Tierra de sistemas de baterías.....	121
5.7.10	Tierras en sala de computadoras.....	122
5.8	Diseño de la red de puesta a tierra edificio calderas fábrica.....	124

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>127</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>129</b>
<b>REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS.....</b>	<b>131</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>133</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Ciclo de trabajo de un motor de 40 hp.....	9
2	Corriente de corto circuito simétrica en máquinas sincronas.....	10
3	Curvas características de disparo para interruptor automático.....	12
4	Relación entre los voltajes generado de un alternador para tres tipos de carga.....	16
5	Generalización de una red de energía.....	23
6	Sistema de cableado de distribución típico en un edificio AC.....	24
7	Transitorio de voltaje por <i>switcheo</i> .....	25
8	Transitorio de corriente por <i>switcheo</i> .....	26
9	Capacitor para corrección del factor de potencia.....	27
10	Voltajes inducidos dentro de circuitos sensitivos.....	31
11	Diseño típico de las metas de alimentación de los fabricantes de equipo.....	39
12	Relación entre amplitud, duración, razón de cambio de los disturbios y sus efectos en los equipos.....	40
13	Transformadores de aislamiento.....	43
14	Esquemático filtro LC.....	44
15	Esquemático filtro para armónicas.....	44
16	Esquemático UPS.....	47
17	Modelo de la transformada de la impedancia de primer orden.....	50
18	Carga pasiva resistencia contra frecuencia.....	54
19	Carga pasiva reactancia inductiva contra frecuencia.....	54



20	Carga pasiva reactancia capacitiva contra frecuencia.....	55
21	Admitancia contra frecuencia en circuito serie RLC.....	56
22	Circuito serie RLC.....	57
23	Curva de circuito serie RLC.....	58
24	Impedancia contra frecuencia en circuito paralelo RLC.....	60
25	Circuito paralelo RLC.....	61
26	Curva de circuito paralelo RLC.....	63
27	Características de resonancia en los conductores.....	65
28	Unifilar Ingenio Madre Tierra.....	79
29	Gráfica de corriente vs tiempo.....	83
30	Gráfica de voltaje vs tiempo.....	83
31	Gráfica de corriente vs tiempo.....	86
32	Gráfica de voltaje vs tiempo.....	86
33	Gráfica de corriente vs tiempo.....	88
34	Gráfica de voltaje vs tiempo.....	89
35	Medición por tres puntos.....	90
36	Resistencia por método de tres puntos.....	91
37	Variación de resistencia contra distancia.....	92
38	Tierra química.....	96
39	Anillo de tierra.....	97
40	Sistema monofásico 2 hilos.....	103
41	Sistema monofásico 3 hilos.....	104
42	Sistema trifásico 4 hilos.....	105
43	Sistema derivado no separadamente.....	107
44	Sistema derivado separadamente.....	108
45	Generador dc ubicado fuera del edificio.....	109
46	Generador dc ubicado dentro del edificio.....	110
47	Equipo conectado con conductor de tierra aislada.....	114
48	Receptáculo instalado con tierra aislada.....	115

49	Generador móvil conectado al edificio.....	118
50	Conexión a tierra para dos edificios.....	118
51	Conexión a tierra para dos edificios.....	119
52	Una tierra para dos edificios.....	120
53	Sistema conectado a tierra suministrado por baterías.....	122
54	Distribución de cargas en un tablero.....	123
55	Ubicación y sistema de tierra de edificaciones Ingenio MT.....	124
56	Ubicación y configuración de las varillas de tierra.....	125

## TABLAS

I	Factor K para transformadores.....	20
II	Umbral de fallo de semiconductores.....	36
III	Inmunidad características de los equipos contra disturbios en voltaje.....	37
IV	Inmunidad características de los equipos contra disturbios en corriente.....	38
V	Impedancias para diferentes frecuencias.....	58
VI	Admitancia para diferentes frecuencias.....	62
VII	Especificaciones de <i>fluke 87 III</i> .....	73
VIII	Especificaciones medidor de resistencia a tierra AEMC 4610.....	74
IX	Especificaciones <i>Power Measurement</i> .....	75
X	Instrumentos recomendados para la inspección en el sitio.....	76
XI	Datos tablero de control edificio de turbos.....	82
XII	Datos cuarto de control calderas cogeneración.....	85
XIII	Datos cuarto de control calderas fábrica.....	87
XIV	Datos de tierras físicas.....	92



## GLOSARIO

<b>ANSI</b>	<i>American National Standard Institute</i> (Instituto Nacional Americano de Estándares).
<b>EMI</b>	<i>Electromagnetic interference</i> (Interferencia electromagnética.).
<b>Factor de cresta</b>	Es la relación entre el valor pico y el valor rms de una forma de onda periódica.
<b><i>Flashover</i></b>	Conocido como efecto corona, se da en aisladores en mediana y alta tensión.
<b><i>Flicker</i></b>	Una variación del voltaje de entrada de duración suficiente que permite observar un cambio en la intensidad del alumbrado.
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronical Enginners</i> (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comisión Internacional Electrotécnica)
<b><i>Inrush</i></b>	Corriente que alcanza la carga cuando es energizado por primera vez.
<b>NEC</b>	<i>National Electrical Code</i> (Código eléctrico nacional).

<b><i>Notch</i></b>	Es un disturbio provocado por <i>switcheo</i> en la forma de onda normal que sucede en la ultima mitad de ciclo, el cual es inicialmente de polaridad opuesta a la forma de onda es por ello que se resta de la forma de onda normal en términos de valor de pico, esto incluye la pérdida completa de medio ciclo
<b>RFI</b>	<i>Radio frequency interference</i> (Interferencia de radio frecuencia).
<b>RMS</b>	<i>Root medium square</i> (Raíz cuadrática media).
<b><i>Sag</i></b>	Es la reducción del valor rms en voltaje AC a la frecuencia nominal con una duración desde medio ciclo hasta unos pocos segundos.
<b><i>Swell</i></b>	Es un incremento del valor rms en la forma de onda de voltaje AC en la frecuencia nominal y tiene una duración desde medio ciclo hasta unos pocos segundos
<b>THD</b>	<i>Total harmonic distortion</i> (Distorsión armónica total).
<b>UPS</b>	<i>Uninterruptible power supply</i> (Fuente de poder ininterrumpible).

## RESUMEN

Este trabajo de graduación, muestra los efectos dañinos que producen los disturbios eléctricos y la mala o inexistente instalación de tierra a las cargas conectadas. Los disturbios tienen cuatro parámetros que se pueden tomar de referencia para clasificarlos, estos son: frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría.

La protección contra disturbios, por tanto, toma dos aspectos: caracterización del ambiente, y la caracterización del equipo susceptible. Los niveles de susceptibilidad de los equipos, esta sujeto a que es un poco difícil de cuantificar porque requiere la revelación de información por los fabricantes.

Una apropiada conexión a tierra es fundamental para la seguridad y un buen desempeño de la red de energía. Hay tres requerimientos para un aterrizaje seguro: proveer un camino de baja impedancia para el retorno de las corrientes de falla, mantener una diferencia de potencial bajo entre las partes de metal para evitar desgracias personales y el control del sobrevoltaje.

Un entendimiento eléctrico de la impedancia es fundamental para el diseño de sistemas de potencia. La impedancia total de los sistemas puede ser agrupada en tres partes fundamentales: la fuente, la distribución y la impedancia de la carga. Es importante anotar que la naturaleza y magnitud de la impedancia varia con la frecuencia.

El monitoreo de la calidad de energía en los sitios de inspección y el estudio de tierras requieren una instrumentación apropiada para que puedan ser efectivos. Hay una extensa variedad de equipo de medición disponible para este uso.

Se encuentran varios estándares internacionales y leyes nacionales para saber, si nuestros valores de calidad de energía y de puesta a tierra están bajo normas, dependiendo de la configuración de la instalación que se tenga.

Por lo tanto, de los resultados obtenidos seleccionaremos el equipo adecuado para proteger y asegurar las cargas que sean importantes para nuestra operación.

## OBJETIVOS

- **General**

Presentar a los profesionales y estudiantes de ingeniería eléctrica, las consideraciones técnicas que deben llevarse a cabalidad para poder efectuar una puesta a tierra efectiva de los sistemas eléctricos de corriente alterna, en áreas sometidas a la presencia de armónicos en la red así como expuestas a tormentas electroatmosféricas.

- **Específicos**

1. Describir los diversos sistemas de puesta a tierra, en sistemas eléctricos de corriente alterna de uso industrial.
2. Definir los disturbios eléctricos a los que está expuesta las cargas eléctricas dentro de la red de energía.

## HIPÓTESIS

"En la actualidad los sistemas eléctricos de corriente alterna en la industria, necesitan consideraciones y prácticas actualizadas para puestas a tierras para el desempeño adecuado de sus funciones".



## INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las plantas industriales, es bastante común que se tengan una diversidad de cargas eléctricas, dentro de las cuales, podemos mencionar: motores eléctricos, transformadores de potencia, aires acondicionados, equipos de control, computadoras por mencionar algunas.

Con el advenimiento de la electrónica a través de los años, el tipo de las cargas eléctricas no lineales ha ido en aumento, teniendo como consecuencia un aumento de los disturbios dentro de la red de energía.

Sin embargo, en algunos procesos se requiere continuidad en los mismos, para evitar que los equipos fallen, por una mala calidad de energía, es necesario que conozcamos los diferentes parámetros que envuelven dicha variable.

Por otra parte, se analiza la forma correcta de aterrizar el equipo, el cual nos permite disminuir las pérdidas de los mismos por alguna falla eléctrica y a la vez, realizar un trabajo más seguro para quienes operan este equipo al conducir la corriente por un camino seguro.

Por esta razón, el presente trabajo, presenta los métodos y herramientas que sirven para estudiar y evaluar la calidad de energía y los sistemas de puesta a tierra.

Es importante saber que se trata de pruebas en donde simplemente se toma valores de voltaje, corriente, distorsión de voltaje, resistencia a tierra etc. Y en donde, con estos resultados, se puede elaborar un diagnóstico de la calidad de energía y resistencia a tierra con que el equipo esta operando, y tener así, un indicativo si se está bajo los estándares seguros de operación y en el caso de existir una falla saber que los dispositivos de protección accionarán efectivamente.

Al inspeccionar el sitio de estudio, se puede verificar la calidad de energía con que se alimenta al equipo y prever que éstos no tengan un funcionamiento errático o sufran algún tipo de daño por causa de la deformación de la onda senoidal de voltaje.

Por ello, se presentan los métodos para realizar un estudio en sitio y las herramientas más adecuadas para hacerlo, y que técnicas, formas y dispositivos para minimizar los efectos de los disturbios y malas conexiones a tierra.



# 1 GENERALIDADES

Es necesario brindar un suministro de energía confiable que alimente a los equipos eléctricos, esto significa que el voltaje y la frecuencia sean estables. La realidad de nuestra red de energía es que ésta no está libre de los disturbios. Los disturbios que ocurren dentro de las condiciones normales de operación como en las anormales con llevan a daños en los equipos. Por tanto, una comprensión a este problema dará las posibles soluciones al mismo.

Por años, la potencia eléctrica (electricidad) ha sido la fuente de energía confiable que ha hecho funcionar callada y efectivamente las máquinas y sistemas de los negocios y la industria. De hecho, la potencia eléctrica hace usualmente tan buen trabajo y dependemos tanto de ella que la damos por garantizada. Sin embargo, en los últimos años el ambiente eléctrico ha estado cambiando. Las cargas tradicionales, iluminación y motores han sido actualizados con nuevos y eficientes diseños de distribución de energía que los hace operar de manera diferente a los anteriores y en consecuencia, reaccionan en diferente forma con la fuente del sistema de distribución eléctrica de la instalación.

Nuevas tecnologías como redes inalámbricas, sistemas de teléfono, radios celulares y portadores de línea de potencia, han introducido nuevas fuentes de interferencia al ambiente (electromagnético). El equipo existente y los sistemas son algunas veces susceptibles a esas nuevas fuentes de interferencia, la cual, puede resultar en problemas propios de la instalación muchas veces mal diagnosticados.

Las industrias de hoy se han vuelto más dependientes en esos equipos y sistemas electrónicos. No solo han influenciado la productividad, sino que la utilidad de la operación que está directamente relacionada a la funcionalidad del equipo y los sistemas.

A través de los años se han resuelto diferentes tipos de problemas, como por ejemplo: en los años cincuenta, los aires acondicionados se volvieron populares, los primeros modelos demandaban mucha energía en el arranque de sus compresores esto causaba que el voltaje bajara de amplitud. Afortunadamente este problema fue resuelto agregando capacitores para corregir el factor de potencia en el sistema.

La razón por la cual hoy se quejan de que la calidad de energía no se puede manejar de una forma sencilla, se debe a que en la actualidad existen una multitud de problemas diferentes y una gran variedad de sensibilidades por parte de los equipos que son afectados.

### **1.1 Calidad de energía**

No hay definición estándar para calidad de energía: Es diferente para cada quien. " Si usted puede cumplir con lo que quiere de la potencia disponible entonces generalmente se considera como una buena calidad de energía. La simple disponibilidad es solamente un determinante de la calidad de energía. El equipo susceptible, instalación, tierra física, la amplitud de la interferencia y frecuencia son otros determinantes. Cuando los problemas no dejan trabajar efectivamente al equipo, la falla a menudo se describe como ruido en la línea de potencia. Contrario a la opinión popular, la compañía de luz no tiene dos conjuntos de generadores, uno marcando como "potencia con ruido" y otra marcando con "potencia limpia". De hecho, la electricidad generada es bastante limpia, vista desde una perspectiva eléctrica. Con la excepción de unos pocos elementos relacionados con el clima y accidentes al azar, la mayoría de los problemas de la calidad de energía son creados por el usuario y son resultado de la utilización de la energía eléctrica. Típicamente se piensa en problemas de calidad de energía como sobrecargas, bajones, picos, cortes y apagones.

Estos puntos son todavía cosas válidas de importancia, pero las nuevas cargas aportan nuevos retos en la forma de armónicas, interferencia respectiva y distorsión.

El enfoque tradicional ha sido investigar los problemas de la calidad de energía en el orden en que vayan apareciendo, un enfoque reactivo. Este enfoque, puede ser funcional donde los problemas son pocos y no tan frecuentes. Sin embargo, la nueva realidad de densidades de equipo pesado y la creciente propagación de interferencia obliga continuamente (o al menos regularmente) a monitorear para reconocer y corregir problemas antes de que tomen proporciones desastrosas. El énfasis en un programa continuo reconoce la importancia de la calidad del ambiente eléctrico y su influencia en una operación confiable para los actuales equipos y sistemas electrónicos.

#### **1.1.1 Filosofía en conflictos de diseño y de seguridad**

Las confusiones en lo que respecta a la calidad de energía son hechas por las diferentes filosofías que tienen las personas técnicas y por los que tienen intereses comerciales. Un ejemplo de este problema es encontrado en conflictos aparentes, resultado de las diferentes interpretaciones en los requerimientos de aterrizaje. Los requerimientos generales para una configuración segura y una operación segura para redes de energía es respaldado por todas las partes (usuarios, cuerpos reguladores, organizaciones voluntarias de estandarización, etc.), pero en algunas instancias estos requerimientos son trasladados en prácticas de cableado supuestas a interferir con la operación tranquila de los sistemas electrónicos.

### **1.1.2 Consideraciones de la calidad de energía**

Las redes de energía operan con una línea de voltaje constante, sufriendo de potencia a una gran variedad de cargas de los equipos. Los rangos de los niveles de potencia van desde unos pocos watts a megawatts, y los voltajes en los cuales la energía es generada, transportada y distribuida están en el rango de cientos de volts y cientos de kilovoltios. La transmisión de esta distribución primaria de potencia esta hecha en altos voltajes, decenas de cientos de voltios a fin de proveer una eficiente y económica transportación de la energía en distancias largas. La utilización final es generalmente en el rango de 120 V (una típica residencia) unos miles (en la industria), y unos cuantos en cargas grandes.

Todos estos voltajes y niveles de potencia, no importando que tan altos, los equipos dependen en que se mantenga el voltaje por encima de la operación normal porque estos solo tienen la capacidad de resistir voltajes que exceden los niveles normales de voltaje. En niveles mas bajos que los normales el desempeño de los equipos es generalmente insatisfactorio, o hay riesgo en que el equipo sufra daño. Estos dos disturbios, un voltaje alto y un voltaje bajo son descritos por diferentes nombres dependiendo de su duración.

### **1.2 Clasificación de los disturbios**

En la red de energía se encuentran 4 parámetros, estos son: frecuencia, amplitud, forma de la onda y simetría. Nos pueden servir como marco de referencia para clasificar los disturbios acordes a su impacto sobre la calidad de energía. Una breve discusión se muestra a continuación como una necesidad para evaluar el impacto sobre cargas sensitivas.



Variaciones de frecuencia, estas son raras en sistemas conectados, pero la ingeniería de generadores basada en los sistemas de distribución nos permiten saber por experiencia que una variación de frecuencia se debe a variaciones en la carga y por el mal funcionamiento de los equipos.

Variaciones de amplitud, pueden ocurrir de muchas formas su descripción es difícil de describir asociado con su duración. Los rangos de duración son extremadamente pequeños, sus causas y sus efectos necesitan ser examinados a fondo para comprender los mecanismos y de esta manera definir una apropiada solución.

Variaciones en la forma de onda, ocurren cuando una carga no lineal dibuja una corriente que no es sinusoidal. Uno podría describir una variación de amplitud como una momentánea variación de la forma de onda, pero proyectar un significado para este término es una constante de la forma de onda. Este tipo de disturbio puede ser descrito como distorsión armónica porque es una forma fácil de analizar como las armónicas se superponen a la frecuencia normal de la red de energía.

Disimetría, también llamado desequilibrio, ocurre cuando una carga monofásica desigual es conectada a un sistema trifásico y por lo tanto hay una pérdida de simetría. Este tipo de disturbio concierne primordialmente a máquinas rotativas y rectificadores trifásicos.

### **1.2.1 Origen de los disturbios**

El término "origen de los disturbios" puede ser comprendido de dos maneras diferentes. Una de estas interpretaciones sobre el origen de los disturbios concierne a que sí es externo o interno a la red de energía.

La otra interpretación concierne sobre la naturaleza del origen, los disturbios pueden ser descritos en formas técnicas, como relámpagos, *switcheo* de cargas, fallas en la red de energía y cargas no lineales. Dependiendo de las condiciones locales, unas pueden ser más importantes que otras, pero todas necesitan ser reconocidas. El mecanismo de la generación de disturbios puede ser complicado de determinar si la ocurrencia de estos es de forma aleatoria.

Las ondas reflejadas son el resultado de golpes directos a los conductores de la red de energía como también, el resultado de efectos indirectos. Los golpes directos inyectan la corriente total en el sistema. Los rangos de amplitud de la corriente van desde algunos cientos de amperios a unos miles de amperios. El cambio rápido de la corriente a través de la impedancia de los conductores produce altos voltajes que causan arqueos hacia tierra. Como consecuencia el equipo conectado al final de los conductores raramente es expuesto a la descarga total de la corriente de los rayos. Una descarga eléctrica a la red de energía puede activar una protección, produciendo una severa reducción o una pérdida completa del voltaje en la red de energía por un medio ciclo

El *switcheo* de cargas es la mayor causa de disturbios. Cuando un circuito contiene capacitancias e inductancias es el comienzo entre el conectar y desconectar, un transitorio ocurre porque las corrientes y voltajes no alcanzan su valor final instantáneamente. Este tipo de disturbio es inevitable y su severidad depende del nivel de energía que la carga consume cuando es *switchada*.

El *switcheo* de grandes cargas por el encendido o apagado puede producir cambios de voltajes de larga duración más allá de la respuesta inmediata del circuito al transitorio.

La ocurrencia de disturbios por *switcheo* de cargas es de alguna forma predecible, pero no necesariamente bajo condiciones controladas.

La introducción de equipo de conversión de energía y reguladores de voltaje que operan conectándose y apagándose en altas frecuencias han creado un nuevo tipo de disturbio por *switching* de cargas.

Fallas en la red de energía ocurren en ambos lados de la medición, resultado por fallas en el equipo o por causas externas (colisiones de vehículos, tormentas, errores humanos). Estos disturbios pueden tener una reducción en el rango de su voltaje hasta una pérdida de energía de unos minutos horas o días. Su origen accidental los hace impredecibles. Aunque la configuración de la red de energía y su ambiente puede hacer que este sea un poco más o un poco menos propenso a este tipo de disturbio.

Cargas no lineales dibujan corrientes no senoidales en la red de energía aunque cuando el voltaje en la red de energía sea una onda senoidal perfecta. Estas corrientes producen voltajes no senoidales en el sistema. Una típica carga no lineal es una fuente de poder dc con un capacitor de filtro de entrada, como es usado en la mayoría de computadoras, dibujando la corriente solo en los picos de la onda senoidal de voltaje.

Otros disturbios, las descargas de cargas electrostáticas, generadas por el cuerpo humano u objetos pueden resultar en una inyección de voltajes o corrientes dentro de los circuitos. Este fenómeno es asociado con el contacto del operador con el equipo

### **1.3 Fuentes de los disturbios de transitorios de voltaje y sus características**

Cuando se considera los disturbios de la forma de onda de voltaje para las variaciones de un valor de voltaje sobre los circuitos de energía de interés, que son (1) no senoidal a frecuencia nominal de la fuente de alimentación y (2) las características de la fuente de alimentación y de la carga, con la distribución del sistema ac.



Estos disturbios en la forma de onda del voltaje del sistema tienden a decaer rápidamente con el tiempo.

Los cambios relacionados con la carga y eventos de switcheo causan la mayoría de disturbios de voltaje que ocurren entre el equipo sensible y su fuente de alimentación. Muchos de ellos son expuestos a continuación.

### **1.3.1 Cargas de paso**

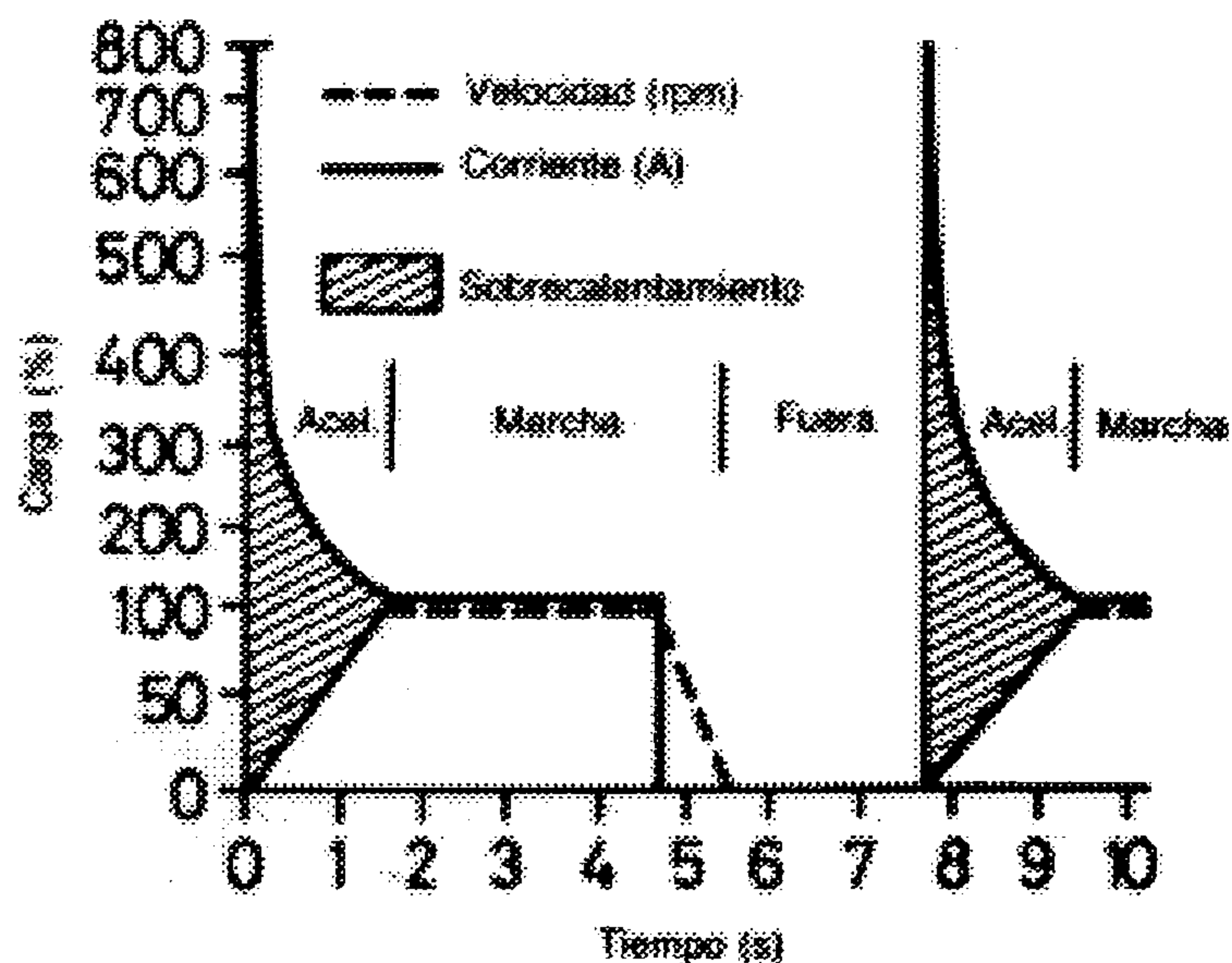
Los cambios de las cargas de paso son una de las más comunes fuentes de disturbios de voltaje. La causa básica de los disturbios de voltaje es la simple caída de voltaje causada por la corriente de la carga y la impedancia del sistema de energía. Una simple indicación, es cuando cambia la corriente de la carga, la caída de voltaje cambia. Los reguladores de voltaje tienden a corregir la caída de voltaje del sistema de energía, pero solo después de un espacio de tiempo que es inherente a las características de realimentación de los reguladores utilizados.

### **1.3.2 Corrientes de irrupción**

Las corrientes de irrupción, asociadas con la alimentación inicial de motores, filtros pasabajos tipo LC de línea y fuentes de poder encontradas típicamente en equipo electrónico sensibles.

Las corrientes de arranque de un motor ac son típicamente iguales a las corrientes con rotor fijo las cuales son típicamente 5 a 7 veces su corriente a plena carga. Estas corrientes de irrupción pueden requerir 0.3 a 3 segundos para decaer a un valor de estado estable, dependiendo del tiempo de aceleración. Las corrientes de arranque en los motores dc aparecen como cargas rectificadas sobre los sistemas de energía. Un ejemplo de la corriente de arranque de un motor ac lo podemos ver en la figura 1.

Figura 1. Ciclo de trabajo de un motor de 40 hp



Fuente: Biblioteca practica de motores eléctricos. Pág. 103

La alimentación inicial de los transformadores crea transitorios de corriente. Las corrientes de irrupción de 10 a 20 veces su valor nominal a plena carga, la corriente puede decaer dentro de varios ciclos en el peor de las condiciones. La corriente de irrupción depende del ángulo de fase de la forma de onda del voltaje inicial, del estado del flujo magnético residual del energizado anterior del transformador. Cuando un capacitor rectificador de una fuente de poder es energizado, inicialmente el cargado del capacitor puede causar niveles similares de corriente de irrupción.

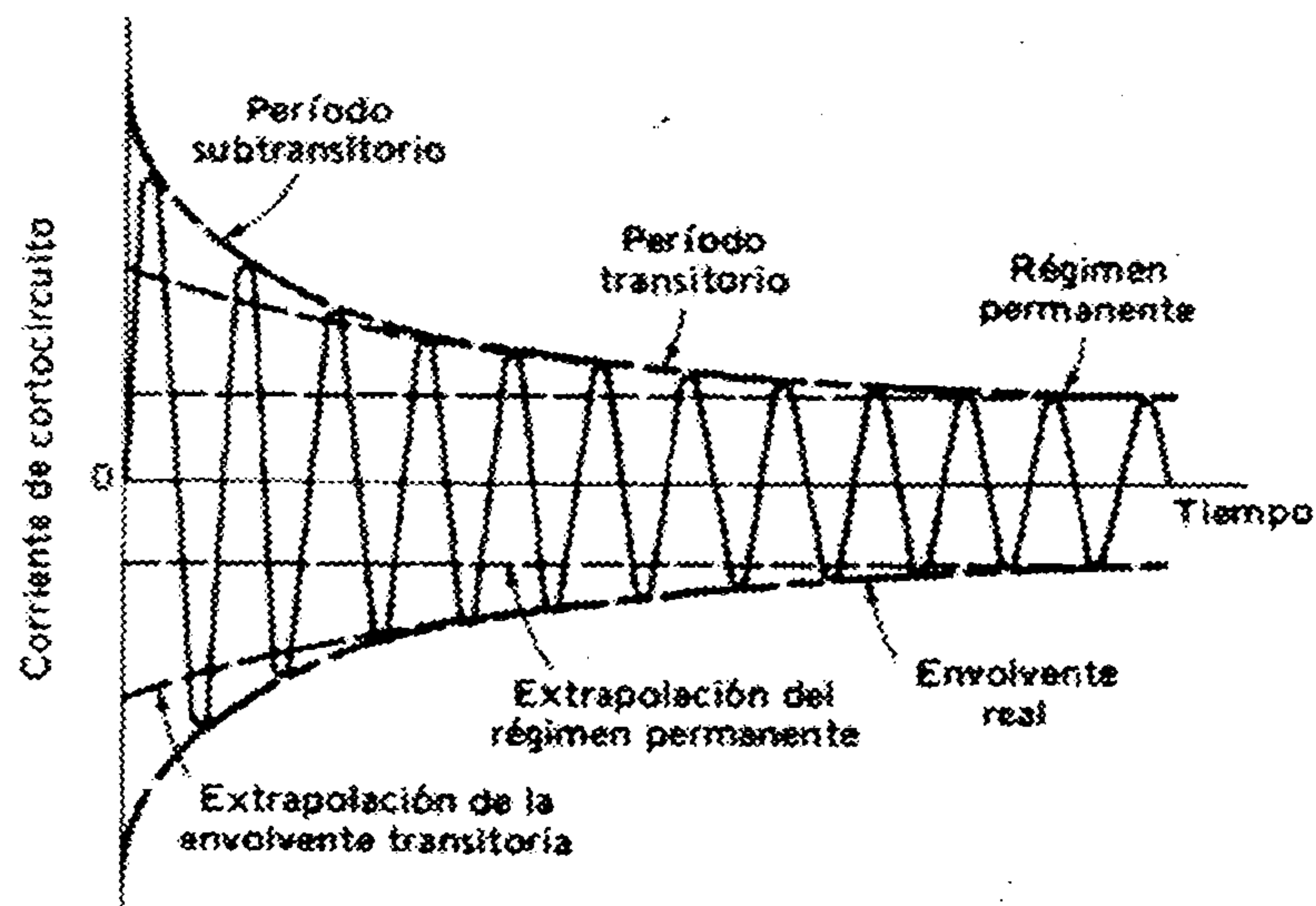
Las fuentes de poder AC/DC a menudo tienen banco de capacitores de filtro largo, cargando lo más posible en el primer medio ciclo de la corriente aplicada. En estos casos las corrientes de cargas son a menudo limitada únicamente por las impedancias del circuito.

### 1.3.3 Corrientes de falla

Las corrientes de falla representan un caso extremo de los transitorios del flujo de corriente y de sus disturbios de voltaje en la línea ac. Dependiendo de la impedancia del sistema de energía, varios ordenes de magnitud de la corriente a plena carga puede estar disponible. Reducciones de voltaje al equipo adyacente resultan hasta que la falla es limpiada. Algunas condiciones de falla no resultan en corrientes altas y esto no causa que los dispositivos de protección sean operados. Estas fallas a menudo crean transitorios de voltaje de alta frecuencia de amplitudes grandes. Un sistema de energía sólidamente aterrizado tiende a minimizar este tipo de falla.

En la figura 2 se puede ver la forma de onda, que toma la corriente en el tiempo, al momento en que sucede la falla de corto circuito en una máquina síncrona y como la misma disminuye.

**Figura 2. Corriente de corto circuito simétrica en máquinas síncronas**



Fuente: Teoría y análisis de las máquinas eléctricas. Pág. 451



#### **1.3.4 Interacciones del regulador de voltaje**

Las cargas electrónicas están regularmente equipadas con reguladores de voltaje interno. Si son mal aplicados, estos reguladores de voltaje interno, tal vez interactúan negativamente con la distribución ac. El resultado puede tener tendencia a amplificar los disturbios de voltaje de la línea ac a oscilaciones incontrolables en la entrada de voltaje ac a la carga sensible.

#### **1.4 Consecuencias de los disturbios de los transitorios de voltaje**

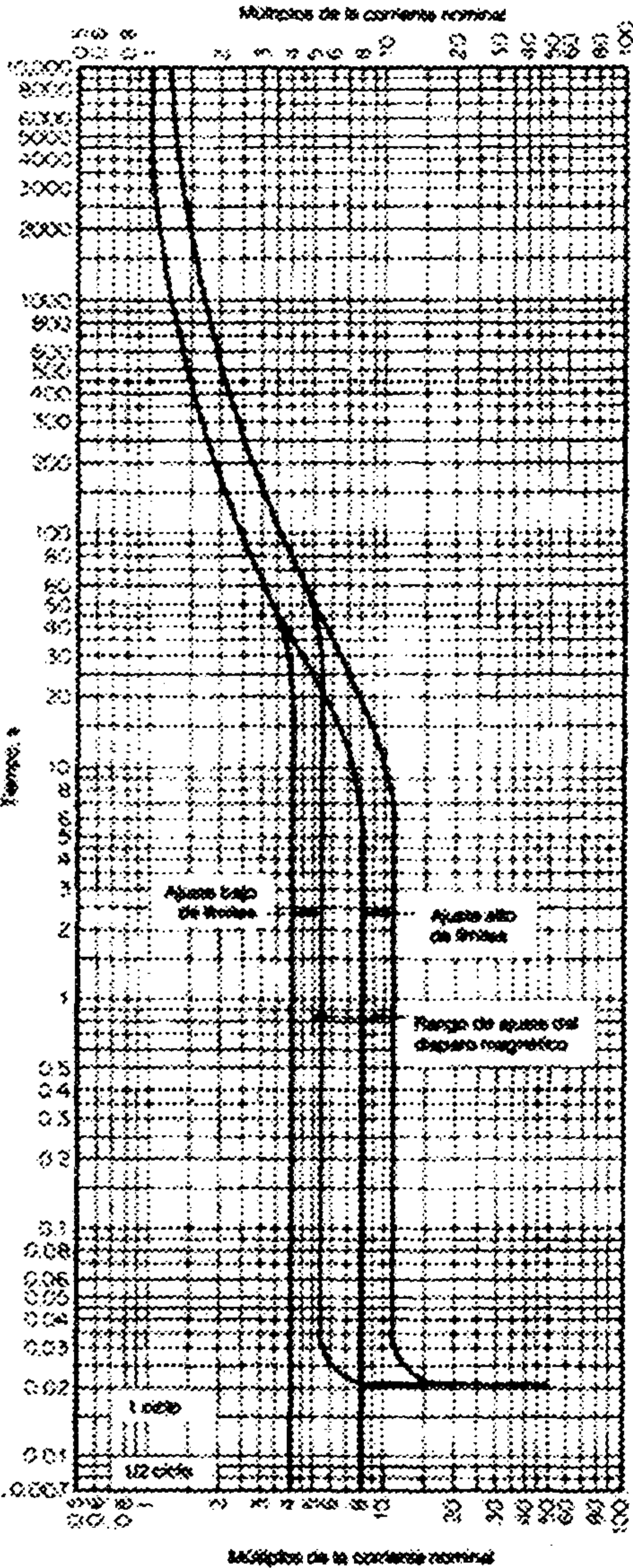
Los disturbios de la forma de onda de voltaje ac y su acompañante de corrientes armónicas tienen que mostrar un impacto significativo en los sistemas de distribución de ac y en las cargas de equipo electrónico sensible. Las más significantes de estas se muestran a continuación

##### **1.4.1 Pérdida completa de energía AC a las cargas electrónicas**

Las excesivas corrientes de irrupción de los motores y transformadores pueden exceder la curva de disparo de tiempo- corriente en el área superior de corriente de los dispositivos de protección de sobrecorriente, causando que los circuitos de las cargas se abran.

En la figura 3 se muestra la curva característica de un interruptor automático, en ella se puede observar que si se sobrepasa la corriente máxima el interruptor actuará, ocasionando de esta forma una pérdida completa de energía en los circuitos que estén atados a este interruptor.

Figura 3. Curvas características de disparo para interruptor automático



Fuente: Manual de Ingeniería Eléctrica. Pag. 19-39



#### **1.4.2 Variaciones de voltaje de corta duración**

Las reducciones temporales dentro del sistema de energía de ac pueden provocar cambios en las corrientes de fases de las cargas. Esto es cierto para corrientes de interrupción de motores, transformadores, y grandes cargas sensibles del sistema que dinámicamente desconectan o no desconectan a sus subsistemas. El tiempo de duración de bajos voltajes de AC pueden exceder el tiempo que puede sostener la fuente DC asociada a la carga sensitiva, esto es equivalente a un parpadeo o interrupción de la línea de voltaje AC.

#### **1.4.3 Transitorio de fase debido a un cambio reactivo de las cargas**

Este efecto es, principalmente el resultado de conectar y desconectar cargas con elementos inductivos y capacitivos (motores AC y capacitores *shunt*). Estos grandes cambios dinámicos dentro de la corriente de carga, suministrados por circuitos reactivos ac, resultan en un cambio de tiempo de voltaje en los circuitos ac. Ya que cuando estamos con carga resistiva la corriente de carga esta en fase con el voltaje pero cuando la carga es inductiva la corriente esta atrasada con respecto al voltaje.

#### **1.4.4 Variaciones de frecuencia**

Una maquina generadora alimenta cargas electrónicas sensitivas, las variaciones dentro de la carga pueden causar variaciones en la velocidad rotacional, este cambio hace que la frecuencia varíe.

Esto sucede cuando la carga disminuye la velocidad aumenta en la unidad generadora esto a su vez hace que la frecuencia suba, caso contrario cuando la carga aumenta la velocidad disminuye en la unidad generadora esto a su vez hace que la frecuencia baje. En la siguiente fórmula podemos ver como se relaciona la frecuencia con la velocidad mecánica.

$$f = \frac{P \cdot n}{2}$$

Donde

P = es el número de polos de la máquina

n = la velocidad de la máquina en rpm

f = expresada en hz

## **1.5 Fuentes de distorsión de voltaje en estado estable y sus características**

### **1.5.1 Cargas no lineales**

Cuando una corriente de carga instantánea es discontinua o no es proporcional al voltaje ac instantáneo, esto es denominado no lineal. El efecto es equivalente a la presencia de componentes de armónicos de corriente (frecuencia alta) superpuesta arriba de la corriente senoidal nominal. Todos los componentes sumados juntos son igual a la forma de onda de la corriente actual. Estas componentes de corriente no están en fase con la forma de onda de voltaje de distribución. Estas corrientes armónicas también interactúan con la impedancia de la fuente de energía y crean distorsión de voltaje.

Muchas cargas electrónicas sensitivas exhiben características no lineales. Las fuentes de poder usan diodos rectificadores y filtros de capacitores dc son un ejemplo común de este tipo de carga. Estos son a menudo usados por los fabricantes de los equipos electrónicos.

Un análisis exacto de las fuentes de poder es complejo, pero puede ser descrito con flujo de corriente de carga no lineal durante un ciclo ac. La duración del flujo de corriente (cada medio ciclo, en cada fase) puede ser descrito en términos de ángulo de conducción. Teóricamente el ángulo de conducción varia entre 0 180 grados (1/2 ciclo) y varia con la corriente de carga y el voltaje de línea ac. El típico ángulo de conducción para el modo de *switch* de las fuentes de poder es de 30-60 grados, y el rango de factor de cresta de corriente de 2 a 3 (versus 1.4 para cargas lineales con suministro de una fuente senoidal ac).

### 1.5.2 Cargas reactivas

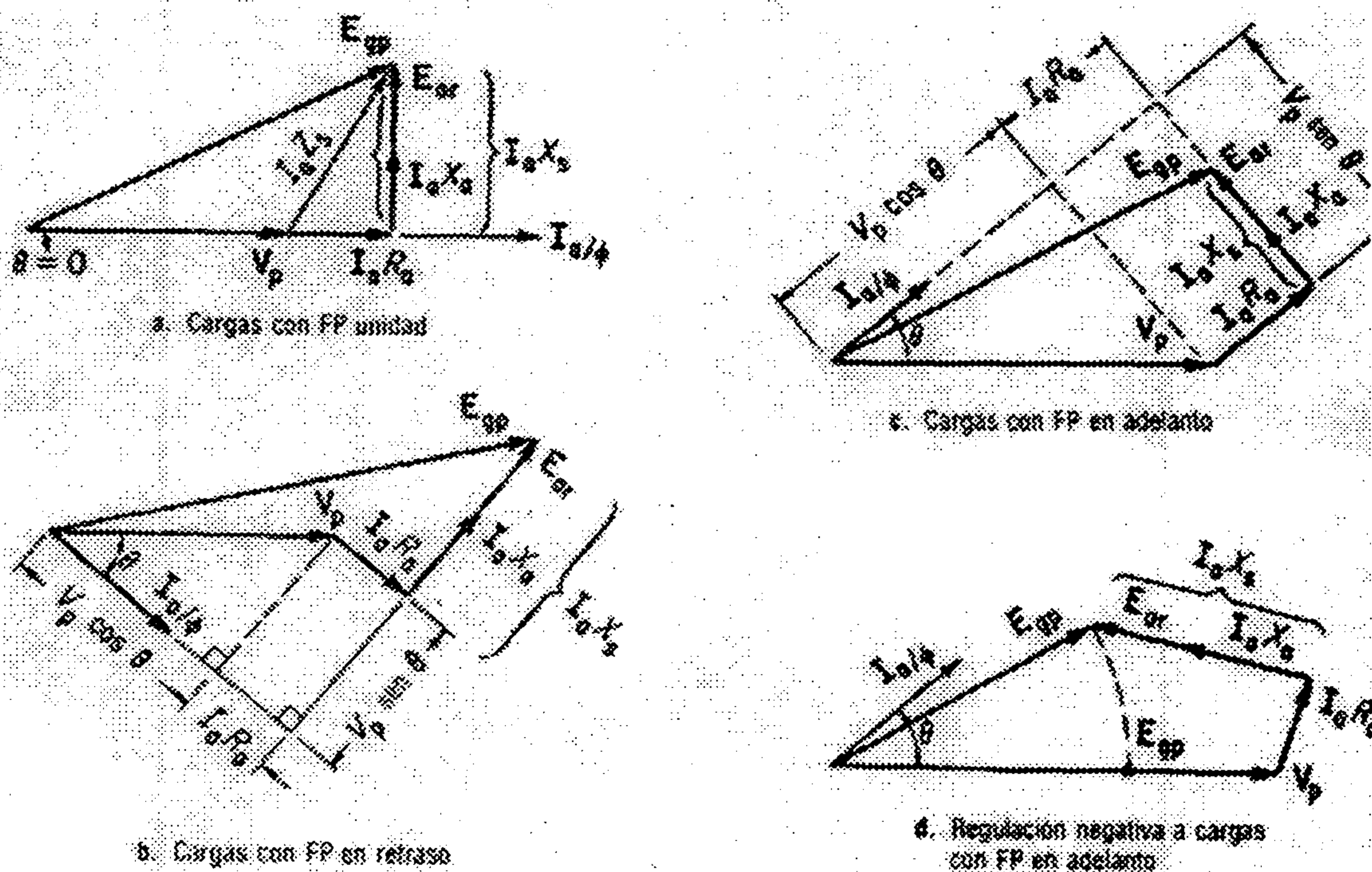
Las cargas electrónicas sensitivas pueden tener un impacto en el sistema de distribución causando un factor de potencia no unitario. Las fuentes de poder, motores ac, filtros pasa bajos LC, y otros componentes con cargas sensitivas a menudo causan un desplazamiento del factor de potencia no unitario y una distorsión del factor de potencia. Como podemos ver en la siguiente figura como afecta el factor de potencia de la carga a la fuente que la alimenta.

Como se muestra con factor de potencia uno, la corriente de fase en la armadura,  $I_a$  está en fase con el voltaje por fase a través de la resistencia efectiva de la armadura  $I_a$ . Con factor de potencia unidad, el voltaje por fase entre terminales  $V_p$  siempre es menor que el voltaje generado por fase.



Si la corriente de fase de armadura  $I_a$  está retrasada con respecto al voltaje de fase entre terminales  $V_p$  un determinado ángulo, como resultado de una carga externa, principalmente inductiva, a través del generador se pueden representar los voltajes mediante la figura 4 b . Para obtener el mismo voltaje nominal de terminales por fase  $V_p$  se necesita un voltaje inducido mayor por fase con factores de potencia en retraso que a factor de potencia unidad. Si la corriente de fase de armadura  $I_a$  está adelantada determinado ángulo con respecto al voltaje de fase  $V_p$  entre terminales como resultado de una carga externa que contenga un componente capacitivo, a través del generador se pueden representar los voltaje como en la figura 4.c Para el mismo voltaje nominal de terminales se necesita generar menos voltaje para un factor de potencia en adelanto que para uno en retraso.

**Figura 4. Relación entre los voltajes generado de un alternador para tres tipos de carga**



## **1.6 Consecuencias de las distorsiones de corriente en estado estable**

### **1.6.1 Calentamiento en transformadores causado por las corrientes de *Eddy*, debido a las corrientes armónicas.**

Los transformadores que alimentan cargas no lineales (típicamente cargas electrónicas), muestran un incremento de pérdidas producidas por calentamiento adicional en los embobinados (debido a las corrientes de *Eddy*) las cuales son generadas por las corrientes armónicas que son generadas por las cargas no lineales.

#### **1.6.1.1 Degradación de la capacidad convencional en los transformadores**

Los transformadores de potencia que alimentan cargas electrónicas, por lo regular se ven sometidos a sufrir degradación (o disminución) de la capacidad nominal de los mismos, cuando estos alimentan cargas no lineales, según lo dicta la norma ANSI C57.12.00-1987[6], para transformadores inmersos en aceite, y la norma IEEE Std C57.12.01-1989 [7], para transformadores del tipo seco. Estas normas especifican las siguientes restricciones para obtener la plena capacidad de los transformadores.

- 1- El voltaje debe ser balanceado, aproximadamente senoidal
- 2- La corriente de carga, no debe exceder el 0.5% de la distorsión total de armónicos (THD)

Estas limitaciones son primeramente debido a que las corrientes armónicas que inducen corrientes de *Eddy* en los embobinados, que son las que incrementan las pérdidas y pueden causar sobrecalentamiento.



Los armónicos de voltaje pueden también causar pérdidas adicionales en el núcleo, pero en los más prácticos casos, la relación de corrientes armónicas a pérdidas en embobinados, es el factor limitante para la capacidad del transformador. El efecto *Skin* (piel) puede jugar un papel importante a altas frecuencias y en conductores de gran diámetro, pero no es considerado en la mayoría de los casos a la frecuencia del sistema de potencia de 60 hertz.

El estándar aplica el resultado de estudios que encontramos pérdidas en embobinados provocados por corrientes de *Eddy*,. *Pec*. Que son aproximadamente proporcional al cuadrado del valor RMS de la corriente de carga a determinado armónico,  $I_h$ , y el cuadrado del número de armónico.

Si se conoce el valor de las pérdidas de las corrientes de *Eddy*, bajo condiciones nominales de un transformador (*Pec-r*), las pérdidas por corrientes de *Eddy* debido a cualquier corriente no senoidal pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$Pec = Pec-r \sum I_h^2 \cdot h^2 \quad \text{ecuación \#1}$$

**Donde :**

$I_h$  = Corriente rms al armónico h

h = Orden del armónico

Esta relación ha sido encontrada con mayor precisión para armónicos de bajo orden (tercero, quinto, séptimo), una sobre estimación de pérdidas para armónicos de mayor orden (9, 11 ... etc), particularmente para embobinados que poseen conductores de mayor diámetro y gran capacidad en KVA.

### 1.6.1.2 Factor K de capacidad de transformadores.

Los fabricantes de transformadores y los laboratorios *Underwriters*, (UL) han establecido un método de capacidad llamado FACTOR K, para transformadores tipo seco, lo cual indican su disponibilidad para servir a cargas no senoidales. Este factor K relaciona la capacidad del transformador para alimentar varios grados de cargas no lineales, sin exceder los límites de temperatura del mismo. Este factor está basado sobre cargas con pérdidas pronosticadas según lo explica el método simplificado. El factor limitante, relaciona el sobrecalentamiento, contra las pérdidas asumidas por las corrientes de *Eddy* en los embobinados. El factor K está definido sobre la base de Valores por unidad como sigue.

$$K = \sum I_h^2 \cdot h^2 \quad \text{ecuación \#2}$$

**Donde :**

$I_h$  = Corriente rms al armónico  $h$ , en valor por unidad de la corriente rms de plena carga.

Este mismo factor puede verse en la ecuación #1. Para propósitos de especificación de capacidad UI ha especificado que el valor RMS de corriente de cualquier armónico mayor que el décimo armónico, debe ser considerado como no mayor que  $1/h$  del valor rms de la componente fundamental de corriente.

Esta limitación tiende a ser un valor conservador, del valor que podrá obtenerse a frecuencias de armónicos mayores.

El estándar para capacidades del factor K son 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50. La corriente en la ecuación #2 es expresada sobre la base de valores por unidad, la cual resulta de la suma individual de la corriente por el número de armónico elevado al cuadrado, el cual deberá ser la unidad.

Esto ocurre para una corriente de carga con comportamiento lineal, el factor K es siempre la unidad. Para cualquier carga no lineal, si la componente de la corriente armónica es conocida, el factor K puede ser calculado y comparado contra el factor K de la placa del transformador. Mientras la carga se acerque al valor nominal del equipo, el factor K es igual o menor que el factor K desplegado en la placa del transformador. El factor K no es sujeto a sufrir disminución de capacidad.

La tabla 1 proporcionada por UL (*Underwriters Laboratories*) muestra el comportamiento del factor K a determinadas cargas no lineales, para transformadores del tipo seco. La prueba con carga no lineal para determinar el factor K es el método preferido para detectarlo. Aunque de hecho existen limitaciones prácticas, el método más empleado es provocar una sobrecarga en la corriente de carga para simular la existencia de armónicos. Este método es descrito en el estándar de UL (*Underwriters Laboratories*)

**Tabla I. Factor K para transformadores**

Número de armónico	Corriente de carga no lineal	$I_h^2$	$i_h^*$	$i_h^2$	$i_h^2 \cdot h^2$
$h$	$I_h$				
1	100%	1.000	0.909	0.826	0.826
3	33%	0.111	0.030	0.092	0.826
5	20%	0.040	0.182	0.033	0.826
7	14%	0.200	0.130	0.017	0.826
9	11%	0.012	0.101	0.010	0.826
11	9%	0.008	0.083	0.007	0.826
13	8%	0.006	0.070	0.005	0.826
15	7%	0.004	0.061	0.004	0.826
17	6%	0.003	0.053	0.003	0.826
19	5%	0.003	0.048	0.002	0.826
21	5%	0.002	0.043	0.002	0.826
Total		1.211		1.000	9.083
				K-factor=	9.083

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

Fuente: IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. Pág. 76



### **1.6.2 Resonancia debido a corrientes de carga armónicas**

La presencia de capacitores, tales como los utilizados para la corrección del factor de potencia, pueden provocar resonancia en paralelo, la cual puede causar excesivas corrientes, con subsecuentes daños a los capacitores, y provocan distorsión en la línea de voltaje.

### **1.6.3 Calentamiento debido a fuentes de voltaje no senoidal**

Este calentamiento depende de la impedancia de la fuente, ya que las cargas no lineales causaran formas de onda de voltajes no senoidales. El voltaje proporcionado a otro equipo (tal como motores y transformadores) con esta forma de onda de voltaje distorsionado, pueden presentar un calentamiento adicional (según norma ANSI/ NFPA 75-1992- (3))

Las corrientes armónicas es un fenómeno que sucede después de la distorsión de voltaje, ya que típicamente causa calentamiento significativo en motores AC. Los embobinados de los estatores, circuitos de rotores y laminaciones del rotor y estator, tienden a absorber la energía adicional debido primeramente a las corrientes de *Eddy*, histéresis, y en menor grado el efecto piel. La distorsión de las líneas de campo magnético, por la presencia de corrientes armónicas en el estator y en el rotor, en los laterales de los embobinados (cabezas de bobinas) también producen pérdidas extras.

### **1.6.4 Desplazamiento de fase (efectos del factor de potencia)**

El factor de potencia total, es la combinación del desplazamiento y la distorsión del factor de potencia.

El factor de potencia total en cargas de equipo electrónico sensible, raras veces alcanza el valor unitario ( ANSI/NFPA 75-1992 (3)) y siempre deberá ser considerado en el diseño de un sistema de distribución.

La distorsión por factor de potencia ocurre debido al flujo de energía reactiva, cuando la corriente de carga y la fuente de voltaje, es decir ninguno de los dos son senoidales de la misma frecuencia. Las cargas no lineales actúan como generadores de esas corrientes armónicas las cuales son alimentadas hacia la fuente de energía.

## **1.7 Transitorios de voltaje**

Hay un consenso particular para equipo electrónico sensitivo. Muy pequeños transitorios de voltaje han sido documentados que causan disrupción en el flujo e integridad en los datos. Los transitorios de voltajes de alta energía son a menudo los responsables de la destrucción de componentes en los equipos sensitivos.

### **1.7.1 Transitorios de potencial**

Existe un gran número de fuentes de potencial de ondas eléctricas que pueden causar daño a los equipos electrónicos sensitivos y a los sistemas. La mayoría de estas fuentes pueden ser divididas en dos grandes categorías: *switcheo* de circuitos y el ambiente.

#### **1.7.1.1 Transitorios de *Switcheos***

Los transitorios de *switcheo* están asociados con cambios rápidos en los rangos de flujo de corriente ( $di/dt$ ) de un sistema eléctrico dado.



Físicamente, se puede visualizar los transitorios de *switcheo* como el principio de expansión o reducción de los campos eléctricos y magnéticos.

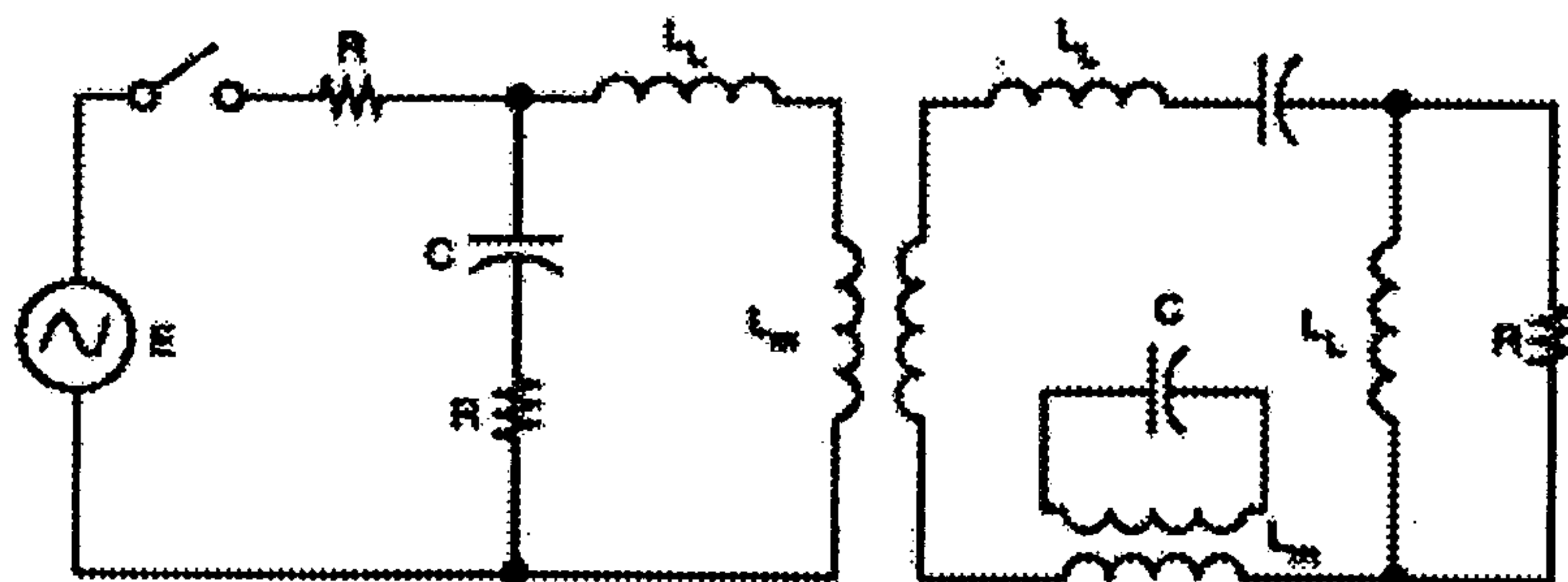
La razón del decaimiento de estos voltajes inducidos es generalmente menor que su razón de incremento, y es relativamente mayor que la constante de tiempo del sistema de energía. Los transitorios de *switcheo* pueden tomar varias formas dependiendo de la configuración del sistema y los niveles de cambio en las condiciones de operación.

Las causas más comunes se describen a continuación:

- 1 Energizado o desenergizado de una fuente de energía o una carga (reactiva) de un equipo
- 2 Arco asociado con la pérdida de conexión o falla de tierra, y
- 3 *Switcheo* del capacitor por factor de potencia.

La representación generalizada de una red de energía con inductancia propia,  $L_L$ , inductancia mutua,  $L_M$ , resistencias,  $R$ , y capacitancias,  $C$ , se ve en la figura 5. Cambios de corriente con el tiempo para este circuito puede ser descrito por las leyes *Kirckhoff*. Asumiendo  $L_L$ ,  $L_M$ ,  $R$  y  $C$  como constantes, el flujo total de corriente puede ser dividido en estado estable y transitorios. Los componentes de transitorios son los de interés.

**Figura 5. Generalización de una red de energía**



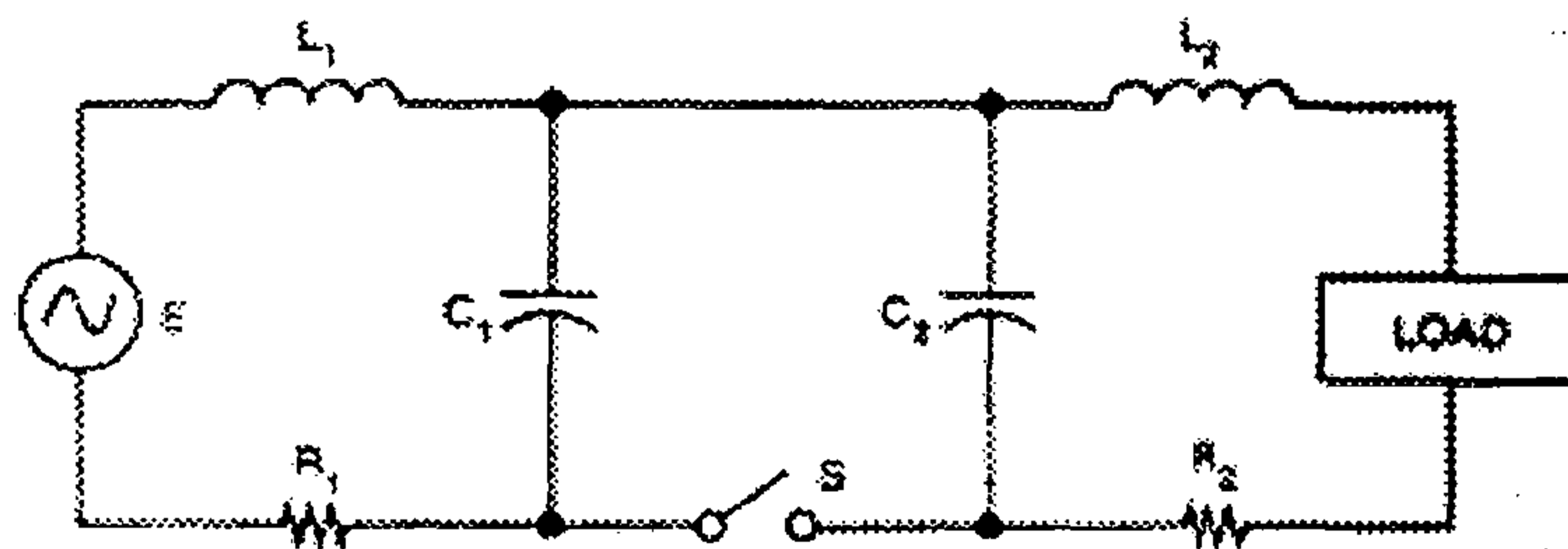
Estos transitorios de corriente producen flujos de transitorios y niveles de carga en los componentes del circuito, sus resultados son los siguientes:

- 1 No hay discontinuidad en el voltaje o corriente en el tiempo del *switcheo*.
- 2 Un decaimiento de la corriente y el voltaje se desarrolla con el tiempo.
- 3 La magnitud de los disturbios de voltaje es determinado primordialmente por el voltaje inicial y la capacitancia del circuito

Aplicando estos conceptos a los casos típicos de cableado de los sistemas de distribución con un cortocircuito distante e interrumpido por un dispositivo de protección de sobrecorriente en alguna parte de la línea da los siguientes resultados:

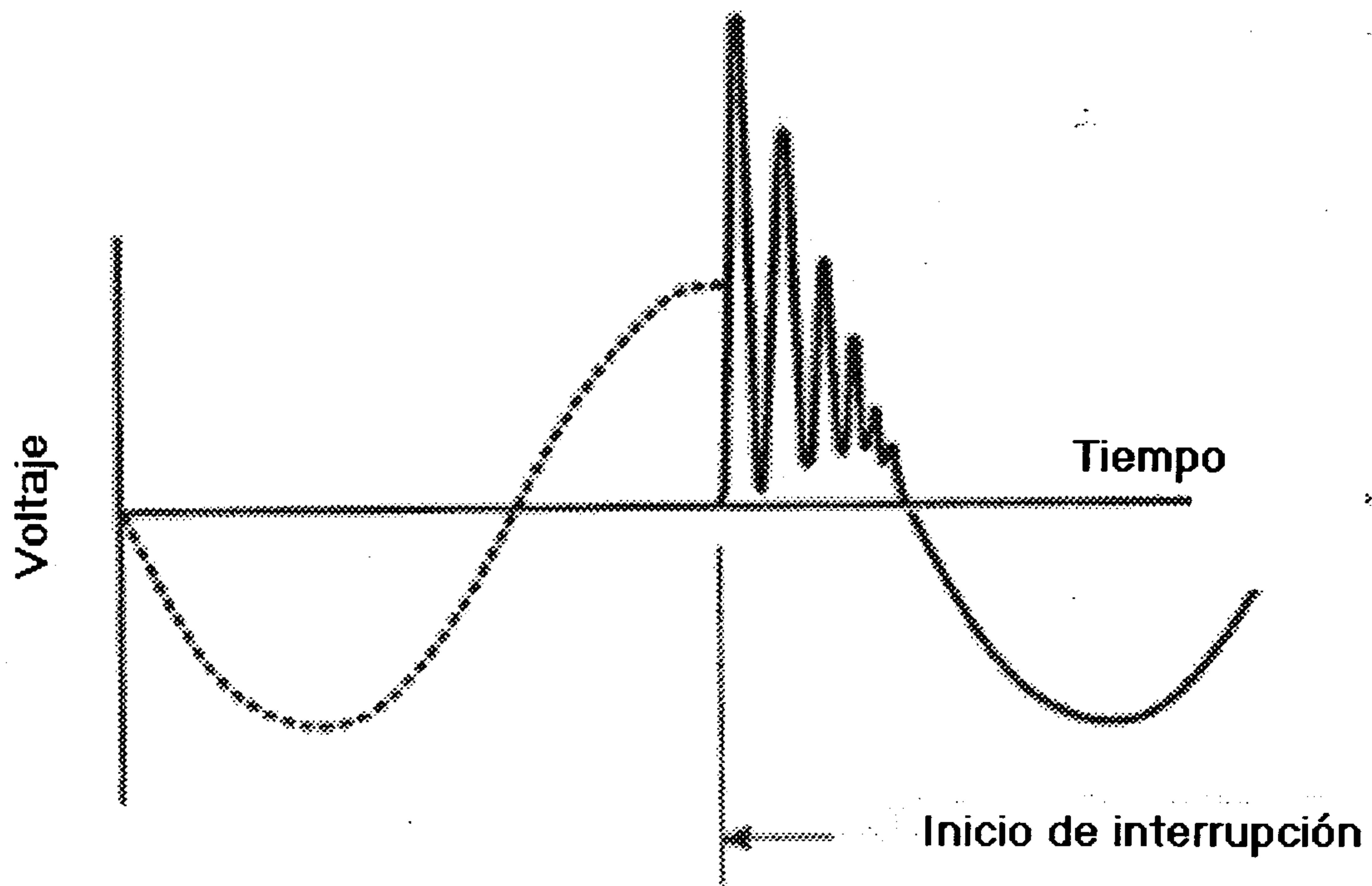
- 1 La amplitud de las oscilaciones de los transitorios son determinadas por la corriente de *switcheo* en las inductancias y el voltaje de *switcheo* en los capacitores.
- 2 La corriente de *switcheo* y el cambio de voltaje senoidal en general tienen una diferencia de fase.
- 3 Los transitorios de *switcheo* pueden alcanzar un máximo teórico de dos veces el valor de su fuente de voltaje.

**Figura 6. Sistema de cableado de distribución típico en un edificio AC**



La figura 5 y 6 indican el comportamiento general de la conexión - desconexión de una onda de voltaje y de corriente respectivamente, con un trazo de arco estable entre los contactos. Nótese que antes de la interrupción de la onda (a través del interruptor) el voltaje es cero. Entonces la onda de voltaje se incrementa lentamente después de que la separación de los contactos ocurre, seguido por una oscilación amortiguada.

**Figura 7. Transitorio de voltaje por *switcheo***

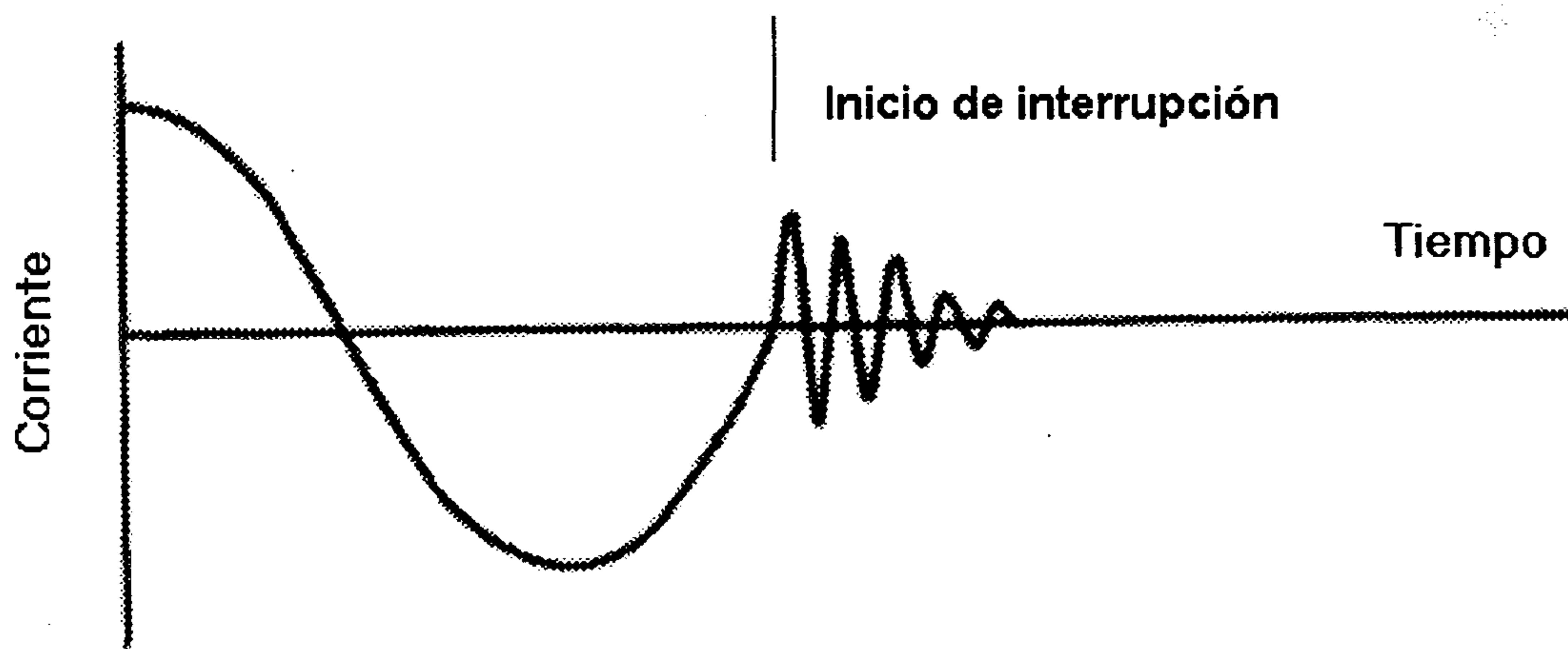


Fuente: IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. Pág. 80

Si el arco de desconexión no es estable (se presenta en circuitos inductivos y capacitivos) cuando los contactos abren, entonces la corriente es frecuentemente interrumpida y trata de iniciar de nuevo varias veces antes de que el rompimiento dieléctrico se de al incrementar la distancia de separación de los contactos, que trae como consecuencia la diferencia de voltaje a través del espacio de aire, de hecho creando una condición de circuito abierto estable.

Debe notarse que las interrupciones múltiples provocan una serie de transitorios de corriente relativamente rápidos teniendo una larga duración de tiempo, los cuales terminan cuando se da el colapso abrupto.

**Figura 8. Transitorio de corriente por *switch*eo**



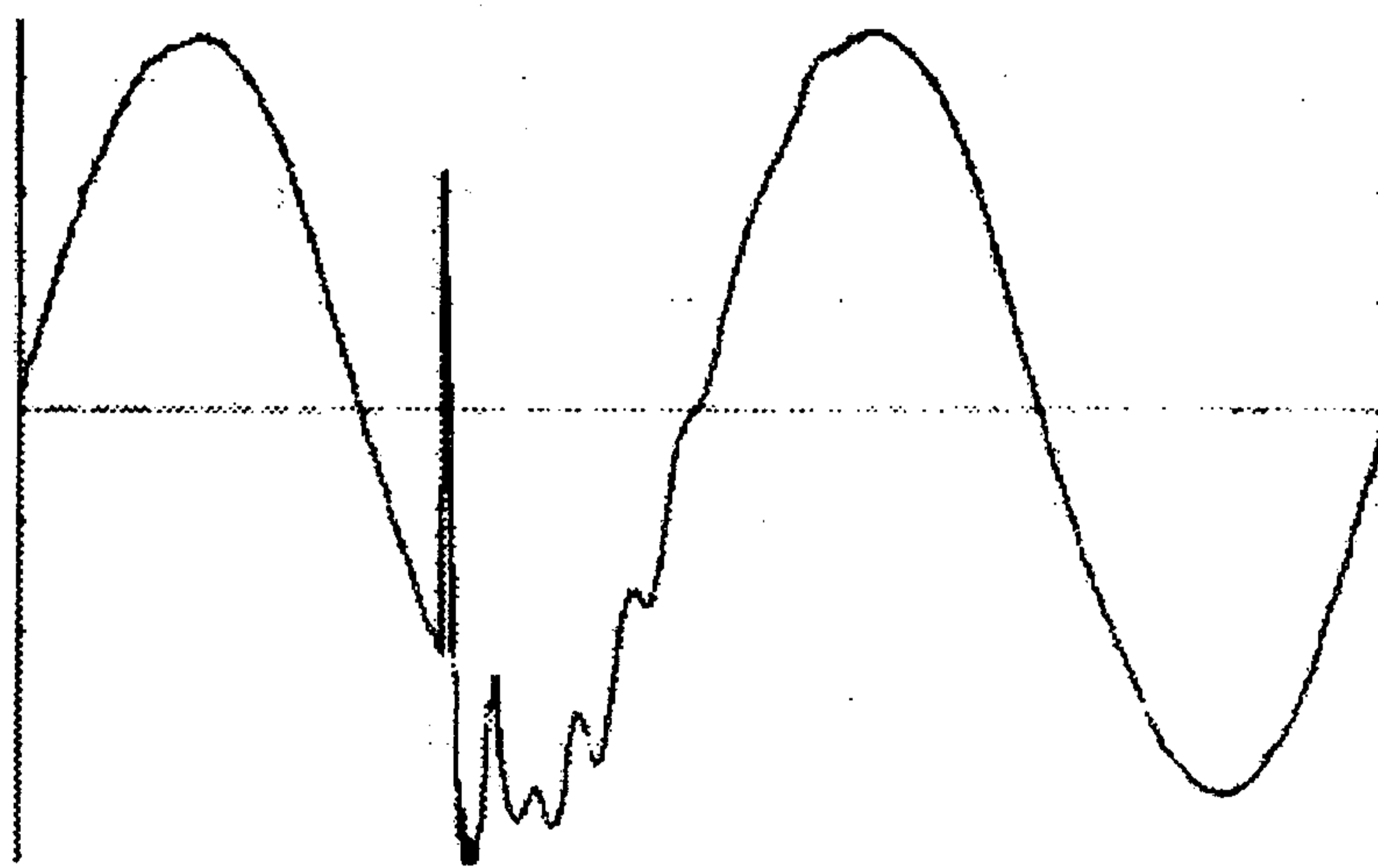
Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 80



En general, el rizado rápido del frente de onda del transitorio de *switcheo* son lentos por las discontinuidades en las inductancias y capacitancias en la distribución del sistema ac del edificio para su punto de incidencia al equipo sensitivo, y sus amplitudes son reducidas como una función de una pérdida del medio de transmisión (las pérdidas se incrementan con el incremento de las trayectorias).

A continuación se muestra la figura 9 de un banco de capacitores, en el cual automáticamente entran o salen etapas dependiendo si aumenta o disminuye la potencia reactiva. Por tanto la caída de voltaje inicial ordena el cierre de una etapa del banco.

**Figura 9. Capacitor para corrección del factor de potencia**





### **1.7.1.2 Transitorios inducidos por el ambiente**

El rayo es el ambiente mas obvio generador de transitorios eléctricos. En adición, el arco de la redistribución de la carga atmosférica y las descargas electrostáticas a la tierra son distribuidores significantes a la disrupcion de datos y al daño del equipo sensitivo.

#### **1.7.1.2.1 Transitorios inducidos por rayos**

Basta el estado en que se desarrolle un centro de carga negativa en las regiones bajas de las nubes que causa un correspondiente centro de carga positiva que sea inducida sobre la superficie de la tierra. Esto resulta en un potencial (voltaje) entre las nubes y la tierra.

Tal concentración de carga continua desarrollándose hasta que el gradiente de voltaje que se presenta en la nube excede la rigidez dieléctrica del aire y se presenta el rompimiento. El resultado es una descarga de baja corriente, y es seguido inmediatamente por una descarga de alta corriente, y a la vez es seguido por uno o más (tierra a nube) golpes de retorno.

Como mucho 4 golpes de retorno han sido observados. Su rango de corrientes están en unos cientos amperes a mas de 500000 A. El 50 por ciento es 20000 A y el 90 por ciento es aproximadamente 200000 A.

Hay grandes niveles de corriente creados por el volumen de ionización en los alrededores de la tierra (región de ionización). Con el volumen de la tierra, el arco de energía del rayo directo sobre cualquier elemento de alta conductividad, causa incrementos de voltaje considerablemente altos en áreas de tierra que están afuera del volumen de ionización.

La forma y tamaño de la región de ionización es una función de la resistividad del suelo y de la corriente del rayo. Esta región es de particular importancia en la supresión de los impactos sobre el equipo electrónico y cables de conducción debida a los golpes de rayo.

#### **1.7.1.2.2 Redistribución de cargas en atmósferas antiarcos**

Significantes niveles de energía transitoria pueden ser inducidos dentro de conductores soterrados y aéreos para una redistribución rápida del centro de carga de la atmósfera (nubes). Este fenómeno comúnmente ocurre después del golpe de rayo, y es el resultado de grandes centros de cargas movibles tratando de buscar un equilibrio con la relativa carga fija de la tierra. El movimiento rápido de cargas causa campos magnéticos similares a los golpes de nube con nube. Los transitorios de voltaje y corriente en los conductores soterrados y aéreos son similares a los golpes de rayo nube - tierra, excepto a un tiempo base alargado.

#### **1.7.1.2.3 Descargas electrostáticas**

Las descargas electrostáticas generalmente tienen referencias de potencial alto, pero una cantidad baja de energía. Varios procesos de generación de cargas existen, incluidos triboelectrificación, inducción de cargas, y carga corona. El aumento de la carga estática es generalmente resultado de acción de frotamiento entre dos materiales (sólido o líquido) de diferente características de energía y superficie, en ausencia de un camino de conductividad entre ellos. Este aumento de carga es rápidamente liberado cuando un camino de conductividad es establecido (arco de descarga). Los transitorios por descargas electrostáticas pueden ser muy dañinos para dispositivos semiconductores en los equipos electrónicos sensitivos.

Los voltajes de descarga están a menudo en el rango de 5-40 kV. Los niveles de energía tienden a estar en el orden de mJ a decenas de mJ. Uno puede caracterizar estos transitorios teniendo un muy corto tiempo de incremento (alto  $dv/dt$ ) y decremento lento (comparado a un rayo o a un *switcheo*). Desde que estos transitorios tienen poca energía, estos pueden ser fácilmente anulados con el uso de recortadores de voltaje y capacitores. El blindaje de los circuitos sensitivos es a menudo una medida efectiva de protección. Debido a sus muy cortos tiempo de incremento, los transitorios por descarga electrostática son atenuados considerablemente por el cableado de la distribución ac en el edificio.

## **1.7.2 Transitorios por mecanismos de acoplamiento**

Los mecanismos de acople para los transitorios de corto tiempo de incremento pueden ser catalogados en espacio libre o campo lejano.

### **1.7.2.1 Acoplamiento de espacio libre**

El acoplamiento en espacio libre, tal como la dispersión reactiva, de energía transitoria, la cual puede ser dividida en dos rangos: cerca del campo y lejos del campo. El rango cerca del campo incluye aquellos conductores, los cuales están suficientemente cerca, en los cuales pueden ocurrir inducción debido a efectos inductivos o capacitivos.

En el acoplamiento lejano del campo se encuentra la radiación de ondas electromagnéticas (la intercepción o interferencia) como el principal mecanismo de acoplamiento.



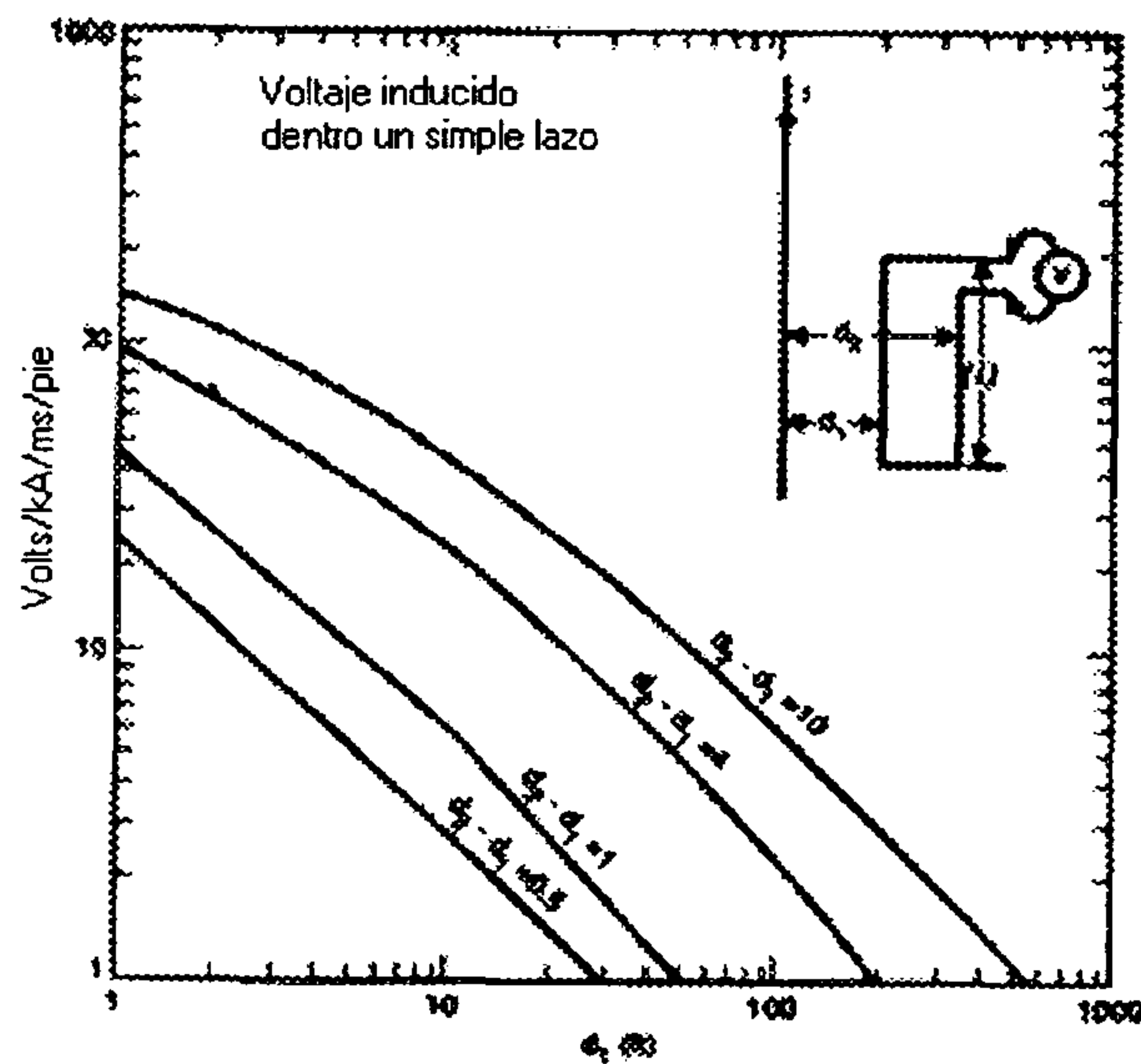
### 1.7.2.1.1 Acoplamiento inductivo magnético (cerca del campo)

Los circuitos electrónicos sensitivos que están físicamente cerca, pero no en contacto directo, con una trayectoria de un transitorio pueden experimentar daños sin que el *flashover* ocurra. Debido a la alta característica de los transitorios de  $di/dt$ .

Los voltajes pueden ser inducidos por el campo electromagnético en las cercanías de los conductores. Para el caso de que un transitorio de corriente ocurra sobre un conductor de bajada, en un sistema de intersección de pararrayos. El voltaje inducido en el circuito adyacente (malla o lazo) es una función de  $di/dt$  del transitorio de corriente que pasa a través del conductor.

El voltaje inducido es una función de la geometría de lazo, distancia del conductor de bajada, y la razón de cambio de la corriente transitoria. En la figura 3 se dibuja el voltaje inducido por unidad de longitud, (l) desarrollado sobre un circuito sensitivo, teniendo lazos de varias formas geométricas.

Figura 10. Voltajes Inducidos dentro de circuitos sensitivos



Fuente: IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. Pág. 85



Esto en general no es lo que se busca en el acoplamiento de la energía transitoria dentro de un circuito sensitivo, es posible aunque cualquier grupo de conductores similares, con uno que lleve en si el transitorio inicial de corriente, que este cerca de los demás. El área de lazo encerrada por el circuito sensitivo es el parámetro más importante. Ya que más área significa mayores problemas de acoplamiento.

El acoplamiento puede también ser reducido por el posicionamiento de cargas sensitivas en ángulos rectos a los circuitos receptores de fuentes de transitorios.

Los voltajes inducidos por radiación magnética en los circuitos sensitivos, no son una función de la impedancia del circuito sensitivo, por lo tanto la magnitud del voltaje inducido es el mismo para circuitos de baja o alta impedancia. Esta causa puede ser particularmente problemática para circuitos de baja impedancia y cualquier circuito sin protección contra transitorios.

#### **1.7.2.1.2 Acoplamiento capacitivo electrostático (cerca del campo )**

El acoplamiento capacitivo de transitorios de energía es un fenómeno electrostático, puede ocurrir entre circuitos relativamente cercanos. Los parámetros de interés en este caso son: distancia, área de exposición, constante dieléctrica entre la fuente y el circuito sensitivo.

Los niveles de acoplamiento dependen de: amplitud y la razón de cambio del transitorio de voltaje, capacitancia de acoplamiento, capacitancia de dispersión en el circuito sensitivo y la impedancia del circuito sensitivo. Los voltajes a baja frecuencia acoplados por efectos capacitivos, se incrementan con el incremento de la capacitancia de acoplamiento y con el incremento de la impedancia del circuito sensitivo. A frecuencias mas altas, el voltaje inducido por efectos capacitivos se incrementa con el incremento de la capacitancia de acoplamiento y con la reducción de la capacitancia de dispersión en el circuito sensitivo.

### **1.7.2.2 Acoplamiento lejos del campo (electromagnético)**

Para equipo sensible, el acoplamiento lejos del campo la energía electromagnética ocurre cuando el circuito sensible actúa como una antena receptora de la onda electromagnética incidente. Las corrientes inducidas de esta manera se incrementan con las líneas de fuerza del campo electromagnético en la vecindad del circuito sensible, con la efectividad de un circuito receptor tipo antena. Las líneas de fuerza del campo magnético es una función del inverso de la de la fuente de radiación. La efectividad del circuito sensible de comportarse como una antena depende de: la longitud (y geometría) relativa a la longitud de onda de la señal de ruido. El circuito sensible deberá tener las condiciones necesarias de resonancia al interferir las frecuencias respectivas del campo.

### **1.7.3 Transitorios por interacción con cables subterráneos**

La medición y análisis de voltajes inducidos por transitorios en cables soterrados, indican que los transitorios son una función de los parámetros del cable: la profundidad a la cual está el cable, la resistividad del suelo, las terminaciones en el cable, y adicionalmente la degradación adicional de la pantalla o forro en los edificios, tuberías de agua, líneas de potencia y otros conductores cercanos.

Los parámetros más importantes del cable son: la longitud, la impedancia de transferencia del "cable apantallado", y la rigidez dieléctrica de terminación aislada (mufa). La resistividad del suelo es también importante para determinar los transitorios inducidos por rayos. Las referencias indican que el pico del transitorio es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia del suelo.

Los cables soterrados profundamente generalmente sufren menos las descargas directas de los rayos, debido a la gran atenuación que sufre la onda de alta frecuencia cerca de la superficie de la tierra. Similarmente los cables de guarda sobre los cables soterrados pueden reducir considerablemente los efectos de los rayos de corrientes a tierra.

#### **1.7.4 Transitorios por interacción con cable de guarda**

El uso de conductores aéreos para interceptar el golpe de los rayos y proteger los cables debajo de ellos de los efectos directos, han sido lo suficientemente demostrado. Varias teorías han sido desarrolladas para explicar el tamaño de la zona de protección.

El uso de estos conceptos puede reducir los niveles de transitorios de voltaje y de corriente que un hilo de guarda de energía o de señal pueda experimentar al sufrir una descarga electroatmosférica.

El transitorio generado sobre un sistema de distribución ac y el usuario final, ha sido estudiado extensivamente y se ha registrado en la literatura. Los tipos de daños observados y los transitorios medidos en la terminación de un sistema de distribución es también discutido. Las estrategias de protección para equipo terminal ha sido desarrollado también y consiste en la utilización de cables de guarda y divisores de corrientes.

En general las formas de onda de voltaje inducido en los conductores aéreos (resultado de un golpe de rayo) es un rápido pulso unipolar seguido por un largo decaimiento. Los picos de corriente de estos lazos teóricamente determinados considerando una carga puesta en corto circuito.



## **1.8 Potencial de impacto de los transitorios**

Dependiendo de la susceptibilidad de los transitorios de los equipos sensitivos, tres tipos de ocurrencia son posibles (en adición al daño causado a los cables y conductores): disrupcion de datos, tensión del *hardware*, y destrucción del mismo.

### **1.8.1 Disrupción de los datos**

Los circuitos llevan señales que son susceptibles a la interferencia de los transitorios a través de la conducción, acoplamiento inductivo y capacitivo y radiación electromagnética. Cuando los transitorios son observados en las líneas de señales, a menudo se asume, que porque los circuitos de señales siguen trabajando, el ruido esta por debajo del umbral, pero esto puede causarnos problemas.

Las características de los circuitos digitales es que tienen un seguro es decir tienen un estado alto o bajo el cual es relativamente estable. Muchos de estos circuitos pasan la mayoría de tiempo de trabajo en un estado o en el otro, y muy poco tiempo en transición entre estados.

Como sea, cuando un circuito bi-estable esta en transición es muy susceptible a las interferencias.

### **1.8.2 Tensión de *hardware***

Un simple rayo o unos transitorios de *switchero* causa daños físicos que contribuyen a que los dispositivos fallen latentemente. La exposición a magnitudes bajas de los transitorios puede causar un deterioro gradual y/o una operación intermitente.



En muchos casos es difícil diferenciar si los fallos vienen del *software* o *hardware*. Los fallos son generalmente observados en los dispositivos semiconductores y materiales de aislamiento.

### 1.8.3 Destrucción del *Hardware*

La tercera posibilidad en los transitorios de impacto es la destrucción de los componentes del hardware en un simple incidente. La tabla II muestra los voltajes de umbral y los niveles de energía para la destrucción de semiconductores seleccionados que son los más comúnmente utilizados en los equipos electrónicos sensibles. De una manera parecida los dispositivos grandes como transformadores, bobinas, pueden ser destruidos.

**Tabla II. Umbral de fallo de semiconductores**

Tipo de dispositivo semiconductor	Energía de disrupción (joules)	Energía de destrucción (joules)
Circuitos digitales integrados	1.0.E-08	1.00E-05
Circuitos analógicos integrados	1.0.E-07	1.00E-05
Transistores y diodos de bajo ruido	1.0.E-06	1.00E-05
Transistores e lcs de alta velocidad	1.0.E-05	1.00E-04
Transistores y diodos de bajo poder	1.0.E-04	1.00E-03
Transistores de mediano poder	1.0.E-03	1.00E-02
Rectificadores y zeners	1.0.E-02	1.00E-01
Transistores de alto poder	1.0.E-01	1.00E+00
Tiristores y diodos de poder	1.0.E+00	1.00E+01

**Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 89**

## 1.9 Interacción entre la fuente y la carga

Las interacciones de interés entre el equipo electrónico sensible, su fuente de alimentación, y su ambiente, inicialmente resultan en disturbios transitorios o distorsiones de la forma de onda de voltaje en un sistema de energía de estado estable. La tabla 3 y tabla 4 resumen los disturbios de la forma de onda así como también las distorsiones y sus características. Cuando aminoramos estas variaciones, es frecuentemente útil conocer las formas de ondas de corriente. Ciertas interacciones entre la fuente y la carga, por ejemplo el *switch*eo, dan por resultado ondas transitorias de voltaje de corta duración.

**Tabla III. Inmunidad características de los equipos contra disturbios en voltaje**

Parametros de voltaje que afectan la carga	Rango tipico de fuentes de Voltaje	Inmunidad tipica de cargas electronicas		
		Normal	Crítica	Unidades afectadas y comentarios
Sobre y bajo voltaje	6%, -13.3%	10%, -15%	±5%	Fuentes de poder, capacitores, motores. Componentes de calentamiento y de datos.
Swells y Sags	10%, -15%	20%, -30%	±5%	Los mismos que arriba
Transitorios, impulsos y oscilaciones en la línea de poder	Varia: 100 - 6000 V	Varia: 500-1500 V	Varia: 200 - 500 V	Rompimiento dieléctrico, sobretensión de voltaje fallo de componentes y trastorno de datos
Transitorios, impulsos y oscilaciones en la línea de datos	Varia: 100 - 6000 V	Varia: 50-300 V	Varia: 15 - 50 V	Lo mismo que arriba
Descargas electrostaticas	< 45 kV 1000 - 1500 V	Varia mucho 200 -500 V	Varia mucho 15-50 V	Circuitos de señales, rompimiento dieléctrico, fallo de componentes, trastorno de datos, cambio en el voltaje de referencia de la señal
RFI/EMI (Conducida)	10 V arriba de 200 kHz	Varia mucho 3 V tipico	Varia mucho 0.3 V tipico	Circuitos de señales, trastorno de datos, cambio rapido en el voltaje de referencia de la señal
RFI/EMI (radiada)	<50 kV/m, <200 kHz <1.5 kV/m, >200 kHz	Varia mucho con blindaje	Varia mucho con blindaje	Lo mismo que arriba
Distorsion de voltaje	5-50 % THD	5-10%	3-5%	Reguladores de voltaje, circuito de señales, bancos de capacitores, sobrecalentamiento, sobrecarga
Desequilibrio de fase	2-10%	5% max.	3% max.	Rectificadores de varias fases, motores, sobrecalentamiento

Fuente: Basado en FIPS PUB 94

**Tabla IV. Inmunidad características de los equipos contra disturbios en corriente**

Parámetros de corriente que afectan la fuente	Rango típico de la corriente de carga	Susceptibilidad típica de las fuentes de poder		
		Normal	Critica	Unidades afectadas y comentarios
Factor de potencia	0.85-0.6 atrasado	0.8 atrasado	< 0.6 atrasado o < 0.9 adelantado	Reduccion de la capacidad nominal de las fuente de poder o incremento de la fuente de poder con reduccion del rendimiento total.
Factor de amplitud	1.4-2.5	1.0-2.5	>2.5	Normal 1.414; función de impacto en la impedancia a 3ro y armónicos mayores (3-6% Z)
Distorsión de corriente	0-10% rms total	5-10% total 0-5% largest	5% max total 3% largest	Reguladores, circuitos de poder, sobrecalentamiento
Corriente DC	Despreciable a 5% o más	< 1%	Tan bajo como 0.5%	Las cargas en los rectificadores de media onda pueden saturarse y disparar el interruptor
Corriente de tierra	0-10 A rms + ruido y transitorios de corriente	>0.5 A	< 0.1 A	Puede disparar los dispositivos de GFI, causa un cambio rápido en el voltaje de referencia de la señal

Parámetros de frecuencia que afectan la carga	Rango típico de fuentes de poder	Inmunidad típica de cargas electrónicas		
		Normal	Critica	Unidades afectadas y comentarios
Frecuencia de la línea	± 1%	± 1%	± 0.5%	Contadores de cruce por cero
Rango de cambio de	1.5 Hz/s	1.5 Hz/s	0.3 Hz/s	Circuitos de sincronización de fase

**Fuente: Basado en FIPS PUB 94**

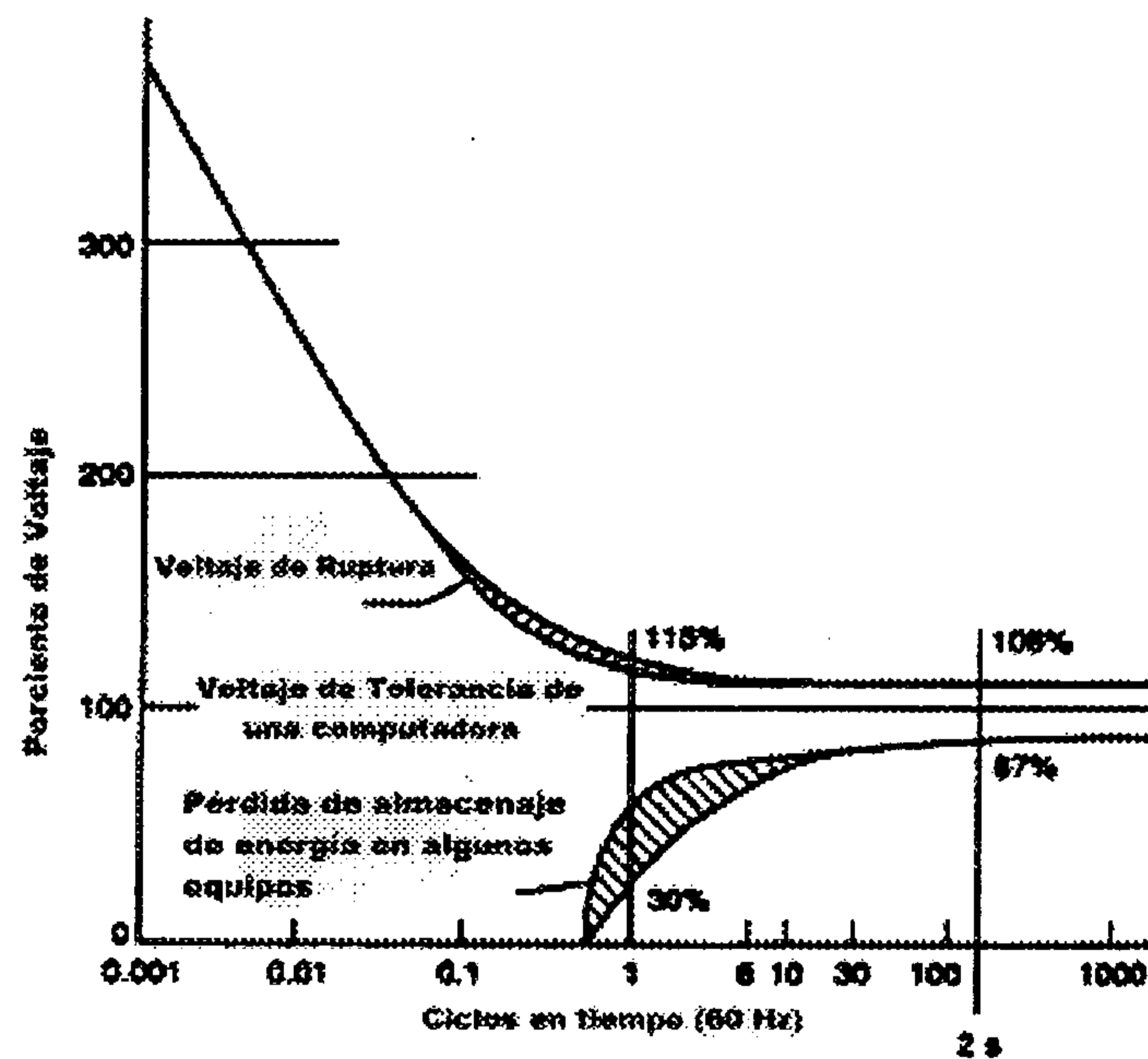
### 1.10 Protección contra disturbios

El concepto de protección implica la confrontación de un ambiente hostil y de un equipo susceptible. La protección del equipo contra ambientes hostiles es una meta de la tecnología de compatibilidad electromagnética. La discusión de necesidad de protección, por tanto toma dos aspectos: caracterización del ambiente, y la caracterización del equipo susceptible.



Los niveles de susceptibilidad de los equipos, esta sujeto a que es un poco difícil de cuantificar porque requiere la revelación de información por los fabricantes que son un poco reacios de proveer, por miedo a ser comprendido de mala forma. Sin embargo, un consenso en el proceso, ha producido una gráfica útil de los niveles típicos de susceptibilidad contra los niveles de tolerancia. La gráfica que a continuación se muestra tiene como variables la magnitud de voltaje y la duración de los disturbios.

**Figura 11. Diseño típico de las metas de alimentación de los fabricantes de equipo**



Fuente: IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. Pág. 47

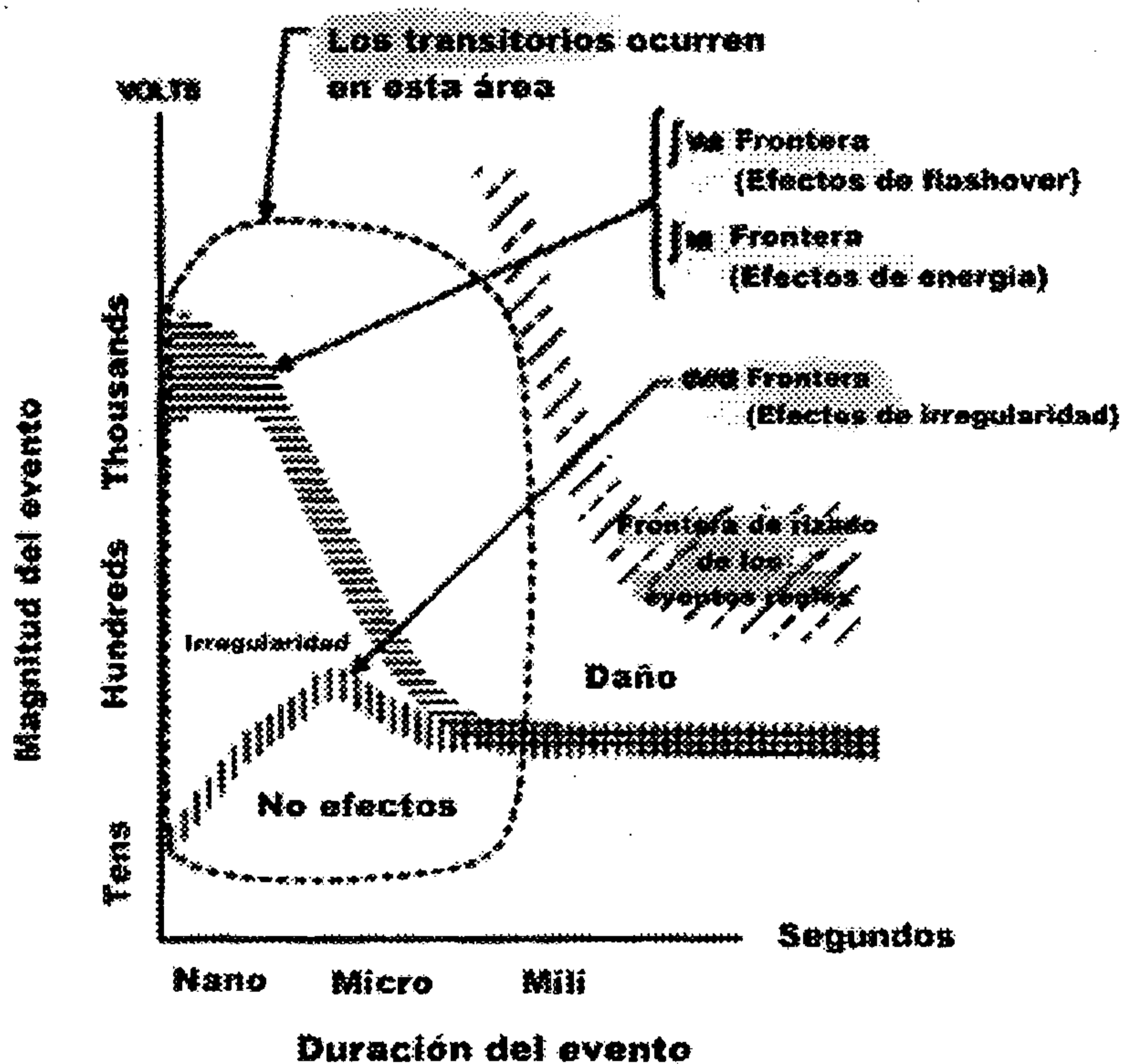
Un aspecto es que en esta gráfica no tiene como variable y que es significativo es la razón de cambio en los disturbios de voltaje, esta razón de cambio es importante en dos aspectos:



1. Un cambio rápido tiene mayor capacidad de producir un disturbio en circuitos adyacentes por acoplamiento capacitivo e inductivo.
2. Un cambio lento puede hacer inefectivo un dispositivo de protección basado en la inserción de inductancias en serie en la línea de poder.

La gráfica que a continuación se muestra ilustra la razón de los cambios

**Figura 12. Relación entre amplitud, duración, razón de cambio de los disturbios y sus efectos en los equipos**



Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 48

## **1.11 Especificación y selección de dispositivos contra los disturbios**

Se describirá los muchos tipos de dispositivos para mejorar la energía y tenerla a un nivel aceptable. Las funciones de estos dispositivos son como la eliminación del ruido o la estabilización de voltaje, frecuencia y forma de onda.

El manejo de la energía y los requerimientos de desempeño varían en cada aplicación. Una gran variedad de productos para el mejoramiento de la energía están disponibles que utilizan un amplia gama de tecnología y proveen diferentes grados de protección a la carga conectada.

El trabajo de seleccionar el dispositivo apropiado para la mejora de energía de una carga es bastante básico. Los requerimientos para mas de una carga debe ser considerado. Para sistemas grandes que soportan muchas cargas, los requerimientos de todas las cargas necesitan ser considerados, pues existe la interacción de potencial entre estos, entonces hay que decidir el equipo apropiado de mejora de energía.

### **1.11.1 Dispositivos comúnmente utilizados**

#### **1.11.1.1 Filtros de aislamiento**

Es uno de los dispositivos mas ampliamente utilizados la figura 6 ilustra la configuración de un transformador de aislamiento. Se incorpora separadamente los embobinados primario (entrada) y el secundario (salida). Estos proveen muchas funciones. Una es la habilidad de transformar o cambiar los niveles de voltaje de la entrada o salida y/o para compensar un alto o bajo nivel de voltaje en un lado.

Típicamente el 480 V es distribuido hasta el punto de uso y luego es transformado a 120 o 120/208 V. Otra función del embobinado separado es proveer el establecimiento de una referencia de tierra de la energía cerca del punto de uso. Esto reduce considerablemente los problemas de ruido de modo común inducidos a través lazos de tierra o caminos de corrientes múltiples en los circuitos de tierra mas arriba de lo establecido del punto de referencia de tierra. Estos dispositivos pasivos introducen una corriente mínima de distorsión hacia la fuente de entrada.

En adición, pueden además reducir los armónicos de corriente por el lazo de realimentación hacia la fuente debido a las cargas no lineales trifásicas. Cuando una conexión delta primario, estrella secundario, un transformador de aislamiento es utilizado para alimentar una carga tal como un rectificador, los armónicos de corriente de tercer orden circulan por el lazo que se forma en la conexión delta de manera que ellos no son vistos por la fuente de alimentación (empresa que alimenta).

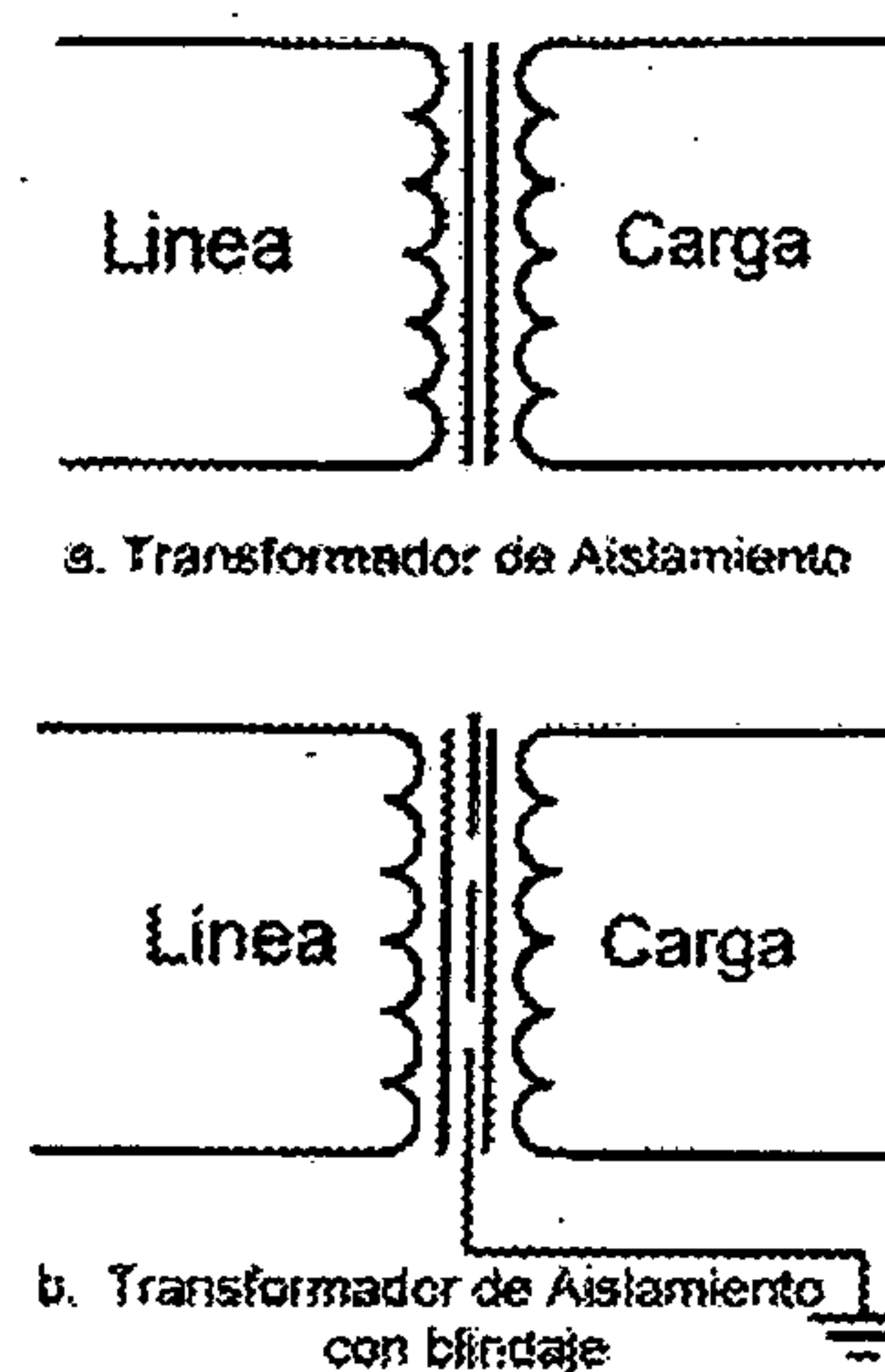
Para propósitos de acondicionamiento de energía, los transformadores de aislamiento deben ser equipados con blindaje electrostático (ley de *faraday*) entre el embobinado primario y secundario. Un blindaje electrostático es hecho con una fina capa de material no magnético (puede ser cobre o aluminio) conectado a la tierra, lo cual reduce los efectos de la capacitancia de acoplamiento entre los embobinados entre primario y secundario y mejora la habilidad del transformador de aislar la carga del ruido de modo común presente en la fuente de energía.

Un simple blindaje incrementa un poco el costo, tamaño o el peso del transformador. Los transformadores de acoplamiento no proveen ninguna regulación de voltaje en la línea y de echo pueden causar una adicional degradación de la regulación de voltaje esto debido a su impedancia serie. Tal como se menciona el blindaje tiende a producir efectos adversos a la regulación de voltaje. Los transformadores de aislamiento tienden a mantener una eficiencia bastante estática del orden de 95-98%.



Ya que ellos pueden generar una pequeña cantidad de calor y son relativamente silenciosos. Pueden ser obtenidos en cubiertas los cuales pueden ser utilizados en instalación de cuartos de computación.

**Figura 13. Transformadores de aislamiento**



#### **1.11.1.2 Filtros de ruido**

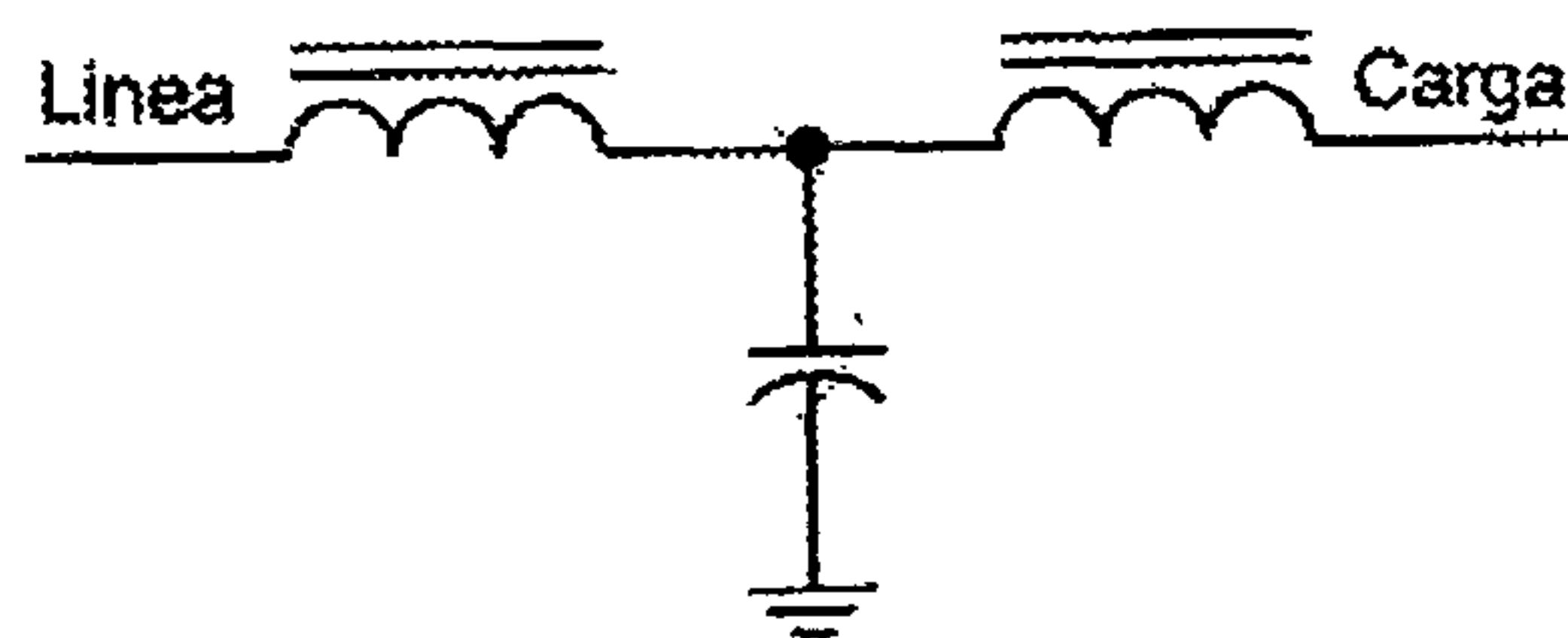
Los filtros de línea tienen como función el reducimiento de la conducción de interferencia electromagnética y la interferencia de radio frecuencia. La figura 7 muestra la representación de un tipo de filtro LC. La mayoría de equipos electrónicos sensitivos tienen alguna forma de filtro que limitan el ruido de alta frecuencia.

La forma de filtro mas simple es un pasa bajos diseñado para que deje pasar el voltaje de 60 Hz pero que bloquee las frecuencia altas o el excesivo sobretensión del frente de onda. Estos dispositivos contienen inductores en serie seguidos de capacitores a tierra. La inductancia ofrece un camino de baja impedancia para la alimentación de 60 Hz, pero ofrece una alta impedancia al ruido de alta frecuencia. El capacitor conduce el remanente de ruido de alta frecuencia a tierra antes que alcance la carga.



Los filtros pueden conectarse línea a línea o línea neutral para rechazo del ruido de modo transverso.

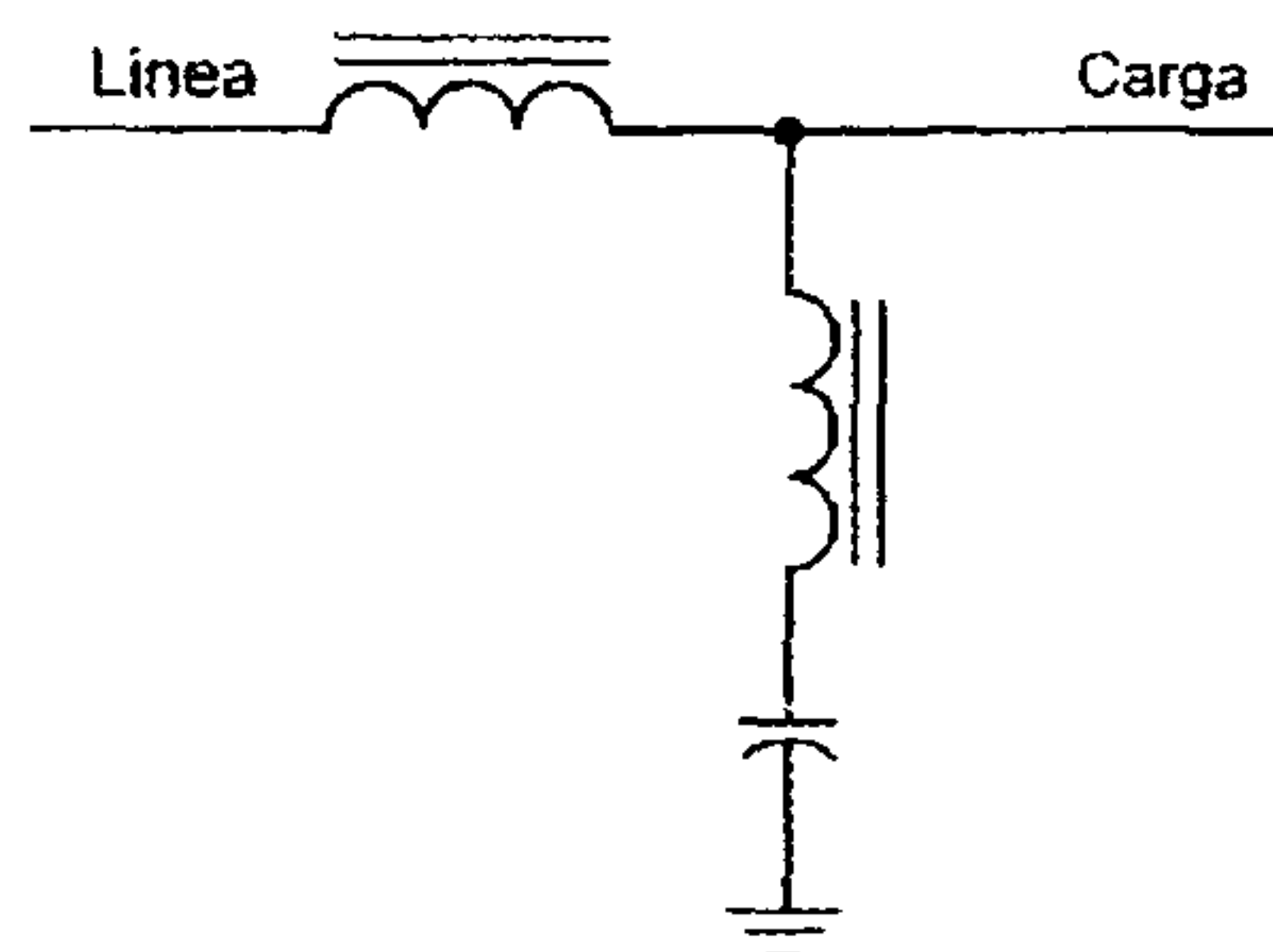
**Figura 14. Esquemático filtro LC**



### 1.11.1.3 Filtros de corrientes de armónicos

Los filtros de corrientes de armónicos son usados para prevenir los armónicos de las cargas electrónicas no lineales del comienzo del *feedback* dentro del servicio de alimentación donde ellos causan el calentamiento de los conductores, transformadores y la correspondiente distorsión de voltaje. Estos dispositivos pueden ser pequeñas unidades para conectarse a las cargas o dispositivos grandes para cargas de cableados difícil.

**Figura 15. Esquemático filtro para armónicos**



#### 1.11.1.4 Supresores de sobrevoltaje

Los supresores de voltaje comprenden una vasta categoría de dispositivos que van desde, los pararrayos hasta pequeños supresores usados para protección que se conectan con el *plug* del aparato. Una efectiva protección de sobrevoltaje requiere del uso coordinado de dispositivos de gran capacidad y manejo de corriente en la entrada del servicio seguidos de dispositivos de bajo voltaje.

Los pequeños supresores de sobretensión son generalmente simples y relativamente de bajo costo. Usualmente contienen varistores de óxido de metal, diodos de avalancha u otros dispositivos de voltaje *clamping*. Que están conectados a través de la línea de alimentación o desde una fase de voltaje hacia otra o a tierra. Los supresores absorben o desvían la energía de la sobretensión que excede su voltaje de umbral (típicamente el 100% del voltaje nominal de línea).

#### 1.11.1.5 Reguladores de voltaje

La mayoría de disturbios de baja frecuencia, excepto la interrupción, puede ser manejada apropiadamente por un regulador de voltaje. Hay una gran cantidad de tipos de reguladores de voltaje en uso en estos días. Dispositivos de estado sólido, tal como de voltaje constante y transformadores de cambio de *tap* son usados hoy exclusivamente, muy raramente los de tipo de acción electromecánica.

En el comienzo los reguladores electromecánicos tenían un operador motor que movía un *tap* deslizable en el transformador. Estos reguladores de inducción son bastante rápidos para seguir los cambios de voltaje que ocurren durante un día debido a la aplicación y remuevo de carga estable. Estas unidades no son apropiadas para prevenir cargas de equipo electrónico sensible contra los cambios rápidos de voltaje.

#### 1.11.1.6 Sistemas de energía de *stand-by*

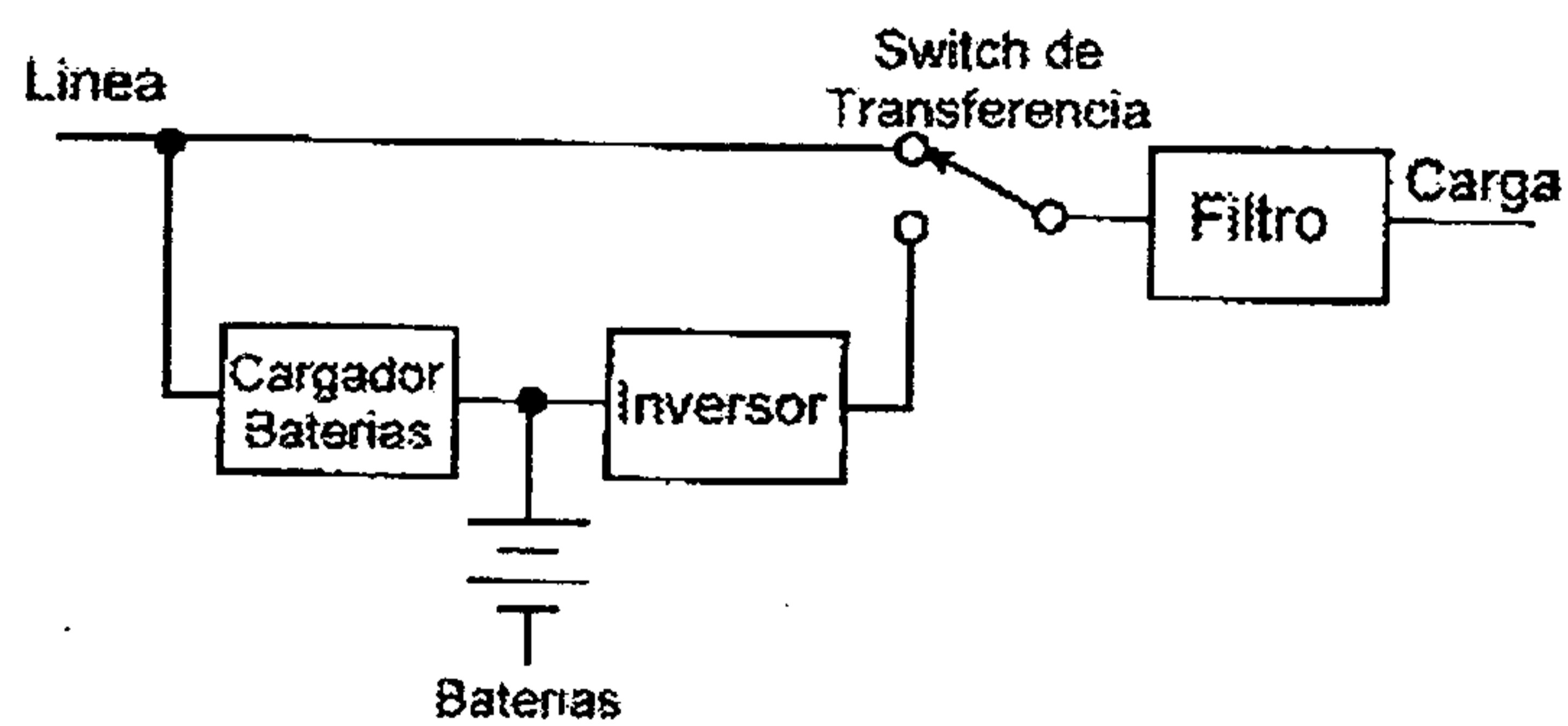
Los sistemas de energía en *stand by* son aquellos sistemas en la cual la carga es normalmente alimentada por la energía de la empresa de distribución eléctrica. La figura 9 muestra una configuración de un sistema en *stand by* el sistema solamente alimenta la carga cuando una fuente de energía satisfactoria esta disponible. Estos sistema de energía son fabricados para cargas que pueden tolerar una perdida de energía momentánea en el momento en que se efectúa la transferencia. Estos sistemas vienen en una gran variedad de configuraciones y usan una cantidad de tecnologías, y son usados para una diversidad de cargas las cuales pueden ser desde luces de emergencia hasta computadoras personales. La más simple forma de un sistema de *stand by* tiene la carga conectada a la fuente de alimentación a través de un interruptor de interferencia durante la operación normal. En el caso en que la fuente de alimentación falle, la carga es transferida a un inversor que genera energía ac de una calidad satisfactoria la cual puede soportar la carga. El inversor es alimentado de un banco de baterías que a sido mantenido a un ciclo de carga completa desde una unidad rectificadora que es alimentada de la fuente de energía. El diseño de este tipo de alimentación presenta varias ventajas económicas

1. El inversor no maneja la carga en una condición normal ya que solo opera durante las perdidas de energía o bien la vida promedio de sus baterías.
2. La sección del rectificador solamente debe ser capaz de recargar las baterías y no maneja la plena carga de l inversor.

La eficiencia normal de operación de este tipo de unidades es alta debido a que la carga esta siendo alimentada de la fuente de alimentación primaria bajo una condición normal. Las perdidas son aquellas las cuales están asociadas con los elementos de acondicionamiento de línea (si son usados), rectificadores y el inversor, de hecho todos los componentes que operen cuando la fuente se quede sin energía.

A mayor requerimientos de este tipo de unidades esta la capacidad de sensor todos los tipos de falla de energía y hacer la transferencia al inversor sin tener una perdida de energía de larga duración inaceptable hacia la carga. Estas unidades son típicamente instalada en sistemas de energía que tienen la alimentación las cuales pueden tolerar interrupciones de poca duración en la entrada, son frecuentemente usadas con cargas que utilizan su alimentación en modo de *switcheo* las cuales no requieren una entrada de voltaje regulado y puede tolerar una perdida de energía momentánea durante la transferencia en la adición los *switchs* de transferencia electrónicos rápidos puede ser utilizados grandemente para reducir el tiempo de transición.

Figura 16. Esquemático UPS





## 2. FUNDAMENTOS SOBRE LA IMPEDANCIA

### 2.1 Consideraciones sobre la impedancia

Una comprensión adecuada acerca de la impedancia eléctrica es fundamental para el diseño de sistemas de potencia para equipo electrónico. La impedancia total de los sistemas puede ser agrupada en tres partes fundamentales: la fuente, la distribución y la impedancia de la carga. Es importante anotar que la naturaleza y magnitud de la impedancia, varía con la frecuencia.

#### 2.1.1 Frecuencias de interés

Las características más importantes de los sistemas de potencia para equipo electrónico son, que ellos operan dentro de un rango desde cero hasta decenas de *megahertz*. Este rango total de frecuencia puede ser visto como dos rangos distintos de frecuencia: rango seguro de alimentación y un rango de desempeño.

##### 2.1.1.1 Rango seguro de alimentación

Típicamente se lleva a cabo en rangos de frecuencia desde cero hasta varias decenas de *hertz* arriba de la frecuencia nominal de la fuente de alimentación (60 HZ). Las impedancias en este rango tienden a ser dominadas por un conjunto de resistencias, inductancias y capacitancias.

### 2.1.1.2 Rango de desempeño

El rango de desempeño se extiende desde cero hasta decenas de *megahertz*. La parte más alta de este rango es históricamente dominada por los ingenieros de radio frecuencia, y es identificada en general como un área especial, diferente a los ingenieros de potencia. El término de rango de desempeño es definido aquí para denotar que la conducción y la radiación de la energía electromagnética (dentro del rango de decenas de *kilohertz* y decenas de *megahertz*) pueden tener un impacto significativo en el desempeño de la operación del equipo electrónico. Las impedancias en este rango tiende a ser caracterizadas por resistencias distribuidas, elementos inductivos y capacitivos, particularmente en frecuencias elevadas.

### 2.1.2 Impedancia de la fuente de alimentación

El conocimiento de la impedancia de la fuente de alimentación es crítico para entender las interacciones entre la carga y la fuente. La impedancia de la fuente de alimentación es la relación de un diferencial de voltaje y un incremento de la corriente de carga brindado por la fuente. Esto es que la impedancia es  $Z = dE/dI$ . Estos conceptos de la impedancia de la fuente pueden ser ilustrados por un simple diagrama equivalente de la transformada.

Figura 17. Modelo de la transformada de la impedancia de primer orden



Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 58

### **2.1.2.1 Impedancia interna**

La impedancia interna es la impedancia de la fuente de alimentación para su frecuencia diseñada. Por ejemplo, la determinación del porcentaje de la transformada interna de la impedancia (%Z) requiere el conocimiento de lo siguiente:

- 1) La entrada de voltaje necesaria para hacer que la corriente de corto circuito secundaria sea igual al rango de la corriente
- 2) El rango del voltaje de entrada.

La transformada de la impedancia interna, expresada en porcentaje es la relación de (1) dividido por (2) multiplicado por 100. La impedancia interna es muchas veces nombrada como transformada.

Una transformada con 5% de impedancia interna permite 20 veces su rango de flujo de corriente en condiciones de cortocircuito, asumiendo que la corriente de falla esta sobre el primario.

### **2.1.2.2 Transferencia de la impedancia de entrada**

La transferencia de la impedancia de entrada es un atributo similar a la impedancia interna, pero son a otras frecuencias de la nominal del sistema de energía (60 Hz). Conociendo la transferencia de la impedancia de entrada permite al diseñador la capacidad de evaluar la fuente de alimentación para proveer la corriente de carga y los armónicos de frecuencia necesarios para preservar la forma de onda de salida de voltaje apropiado. Generalmente las frecuencias mas altas de interés son de 3 kHz para sistemas de energía de 50-60 Hz y 20 -25 kHz para sistemas de energía de 400 Hz.

Un método común para determinar la transferencia de la impedancia de entrada de transformadores y de filtros es medir simultáneamente la señal de voltaje de entrada y la corriente de salida con los terminales en cortocircuito. La relación es la transformada de la impedancia de entrada.

Generalmente la transformada de la impedancia de entrada crecerá con un incremento de la frecuencia. Esto es deseable para tener una baja transformada de la impedancia de entrada.

### **2.1.2.3 Impedancia de salida**

La impedancia de salida de la fuente de alimentación es un atributo similar a la transformada de la impedancia de entrada pero esta describe la impedancia del sistema de energía visto desde la carga.

Si la carga genera armónicos de corriente, entonces estas corrientes retornan hacia la fuente de alimentación. Estas corrientes producen caídas de voltaje a través de la impedancia de la fuente, los cuales pueden sumarse (o restarse) del voltaje de la fuente de alimentación.

La amplitud y la forma de onda del voltaje de la línea, puede cambiar significativamente, por lo tanto es muy importante que la fuente de alimentación tenga una muy baja impedancia de salida cuando estos armónicos están presentes. A frecuencias mayores que aquellas producidas por las armónicas, una alta impedancia de salida proporciona algún tipo de filtro de alta impedancia antes de que estas afecten a la carga.



La impedancia de salida por lo regular se incrementa con la frecuencia, pero algunas capacitancias distribuidas pueden permitir que el sistema entre en resonancia, misma que puede hacer que la impedancia de salida sea menor a algunas frecuencias específicas.

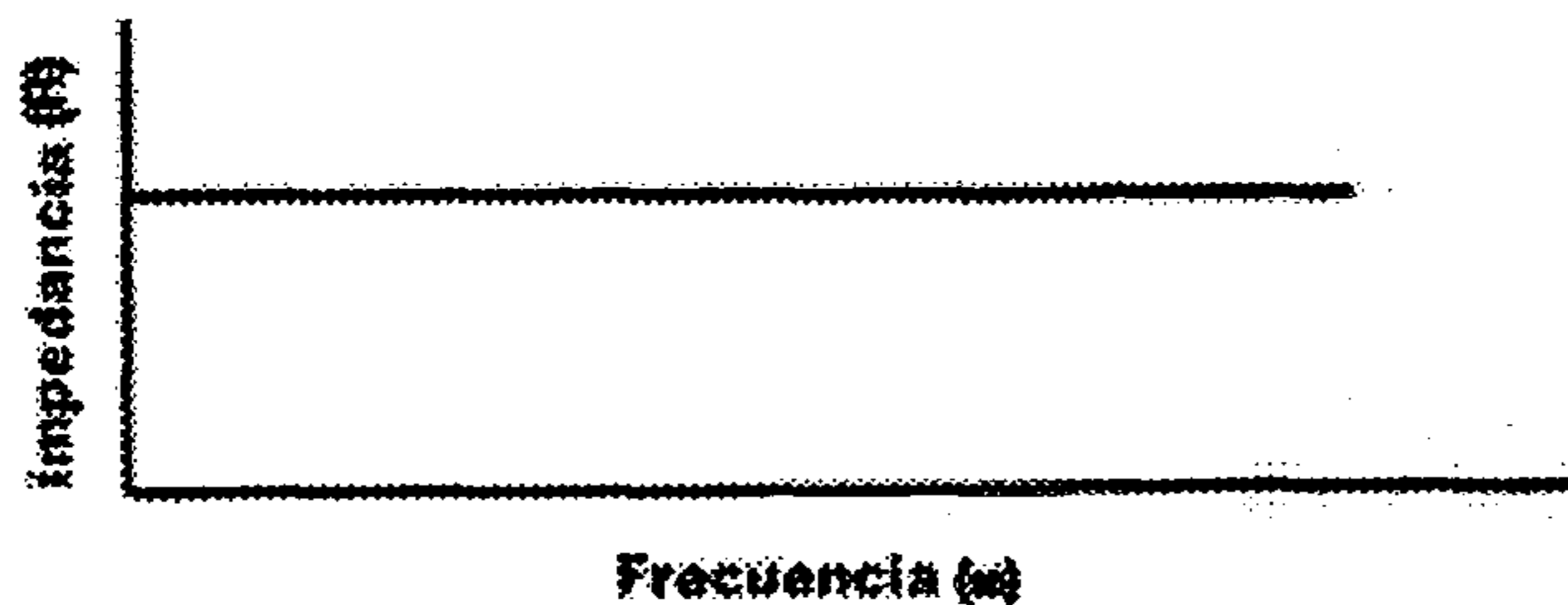
La capacitancia distribuida del primario, vista desde el secundario en un transformador puede actuar para acentuar transitorios de alta frecuencia sobre el lado de la carga con relación a la frecuencia de la alimentación.

Agregando blindaje dentro del transformador (en trafos encapsulados) puede reducir la capacitancia del primario a secundario. Utilizando adicionalmente capacitores y filtros para atenuar estos transitorios de alta frecuencia puede sufrir consecuencias inesperadas e indeseables si un puente de capacitores (los cuales es común utilizar) elevaran el voltaje de la señal de alimentación. Estos componentes deberán ser utilizados con mayor cuidado.

### 2.1.3 Impedancia de carga

Los equipos electrónicos sensitivos típicamente contienen transformadores y rectificadores. Las salidas de estos transformadores y rectificadores son regulados para proveer un voltaje constante a la carga sensitiva de los circuitos. Los componentes básicos de la impedancia de carga tienen una variación distinta con la frecuencia. La resistencia,  $R$ , idealmente no tiene cambio con respecto a la frecuencia. Su curva es una línea horizontal con una magnitud  $R$ .

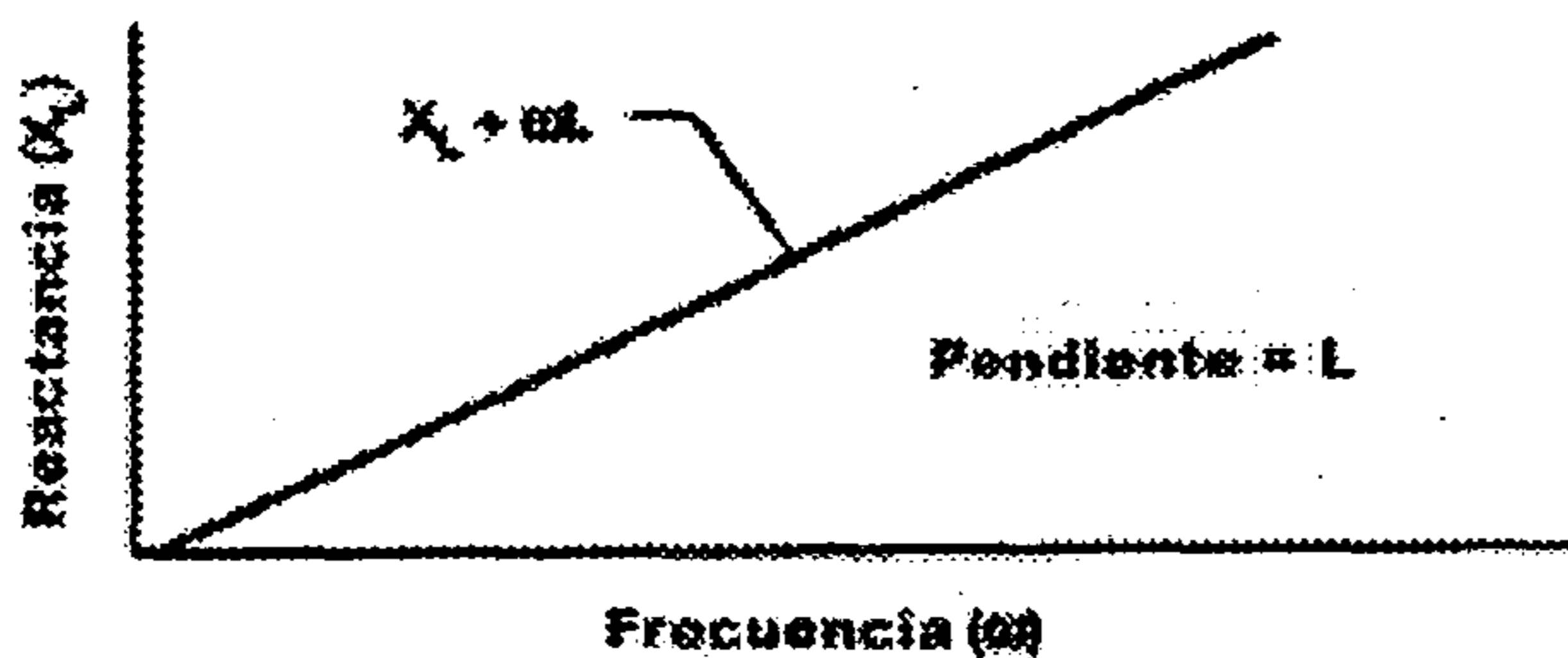
**Figura 18. Carga pasiva resistencia contra frecuencia**



Fuente: IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. Pág. 63

La reactancia inductiva,  $X_L$ , se incrementa linealmente con el incremento de la frecuencia (de la forma  $y = mx + b$ ). La reactancia inductiva es plotada contra la frecuencia en la siguiente gráfica:

**Figura 19. Carga pasiva reactancia inductiva contra frecuencia**

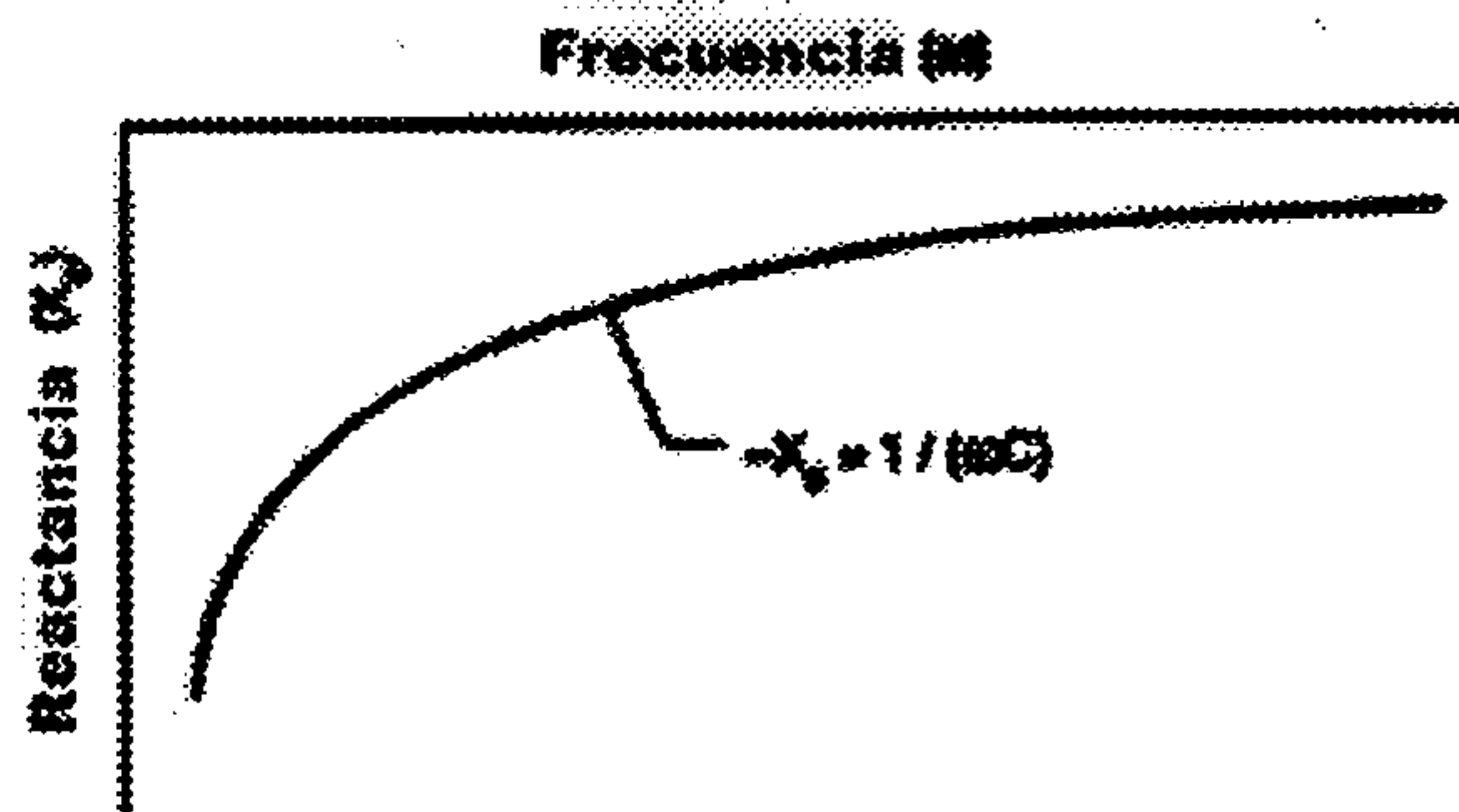


Fuente: IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. Pág. 63

La reactancia capacitiva,  $X_C$ , es una función hiperbólica de la frecuencia (de la forma  $yk = k$ ) donde la frecuencia,  $\omega$ , es una variable independiente y  $1/C$  es la constante. La reactancia capacitiva contra la frecuencia ( $X_C = -1/(\omega C)$ ).

De las gráficas se puede observar, que un incremento de la frecuencia, la reactancia inductiva se vuelve en el factor dominante.

**Figura 20. Carga pasiva reactancia capacitiva contra frecuencia**



**Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág 64**

#### **2.1.4 Consideraciones de la resonancia**

Las características de los circuitos AC es que tienen elementos inductivos y capacitivos, esto significa que dentro de los mismos existe una transferencia oscilatoria de energía. A frecuencias donde las impedancias inductivas y capacitivas son iguales, ocurre la resonancia y su resultado es que la impedancia puede ser muy alta (resonancia en paralelo) o muy baja (resonancia en serie).

Si una fuente de corriente AC existe o esta cerca de la frecuencia de resonancia del circuito, el voltaje del circuito a la frecuencia de resonancia puede incrementarse significativamente, con pequeñas o sin cargas no resistivas para proveer una amortiguación. Si el circuito tiene conductor de tierra, este se comportara como un circuito abierto a la frecuencia de resonancia. Es posible también que la corriente del circuito también se incremente.



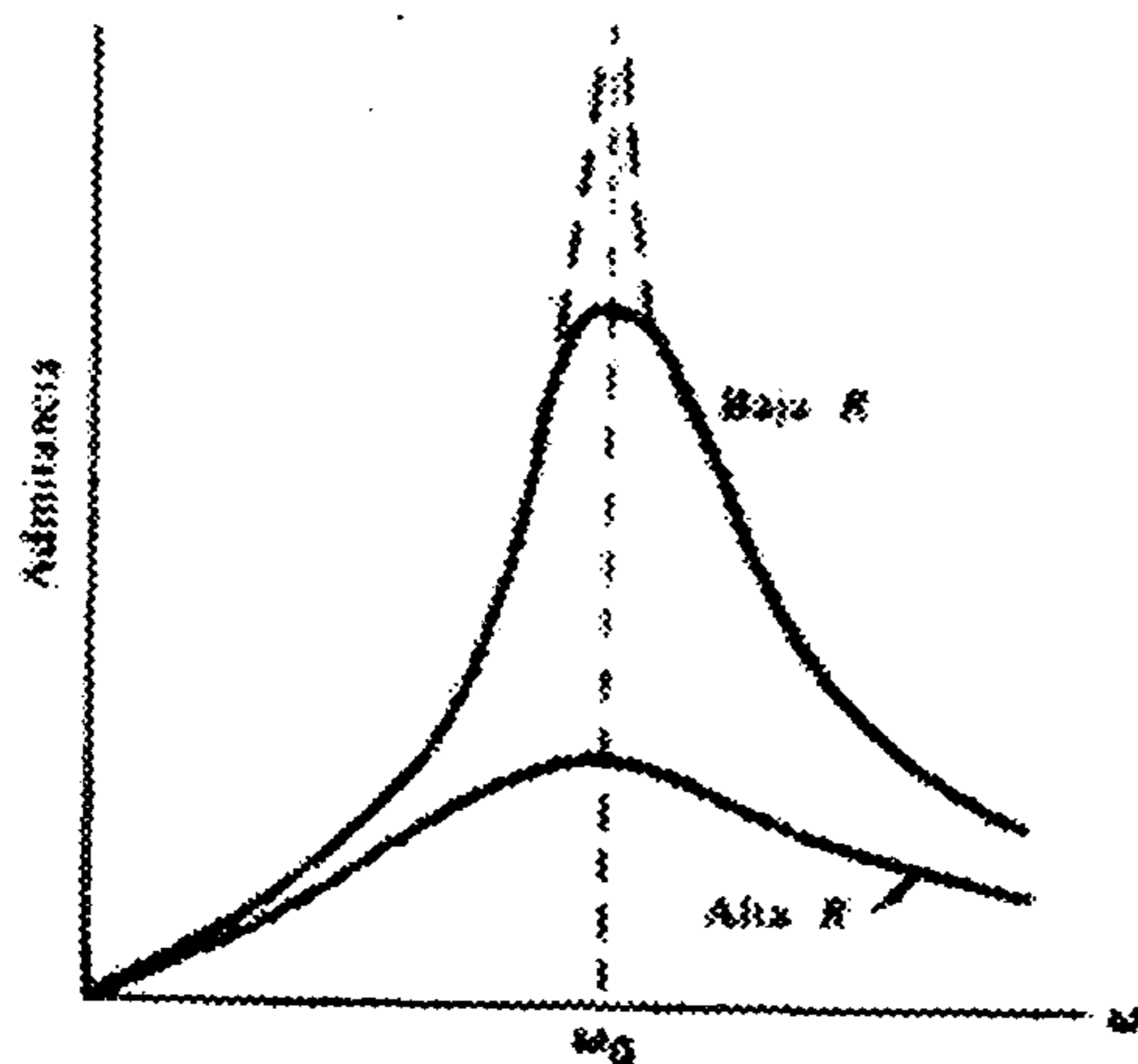
El incremento que sufra el voltaje o la corriente depende del tipo de resonancia que se presente en el circuito y en que parte del mismo sean los parámetros medidos.

Es por ello importante analizar la respuesta en frecuencia de los sistemas de energía, con el objeto de detectar los problemas de resonancia. Las frecuencias de resonancia de un típico sistema de energía (equipo electrónico sensible) tienden a ocurrir dentro del rango de las frecuencias de diseño.

#### 2.1.4.1 Resonancia en serie

La resonancia en serie es el resultado de la combinación en serie de las inductancias de los transformadores de línea, resistencias, banco de capacitores en un sistema de energía AC, ver figura 21. La resonancia en serie ocurre a la frecuencia  $\omega_0$ , donde  $X_L = -X_C$ . La impedancia mínima ocurre a la frecuencia de resonancia,  $\omega_0$ , y es igual a la resistencia  $R$  del circuito. La resonancia en serie se comporta como un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas que se presentan en un circuito sintonizado.

Figura 21. Admitancia contra frecuencia en circuito serie R-L-C

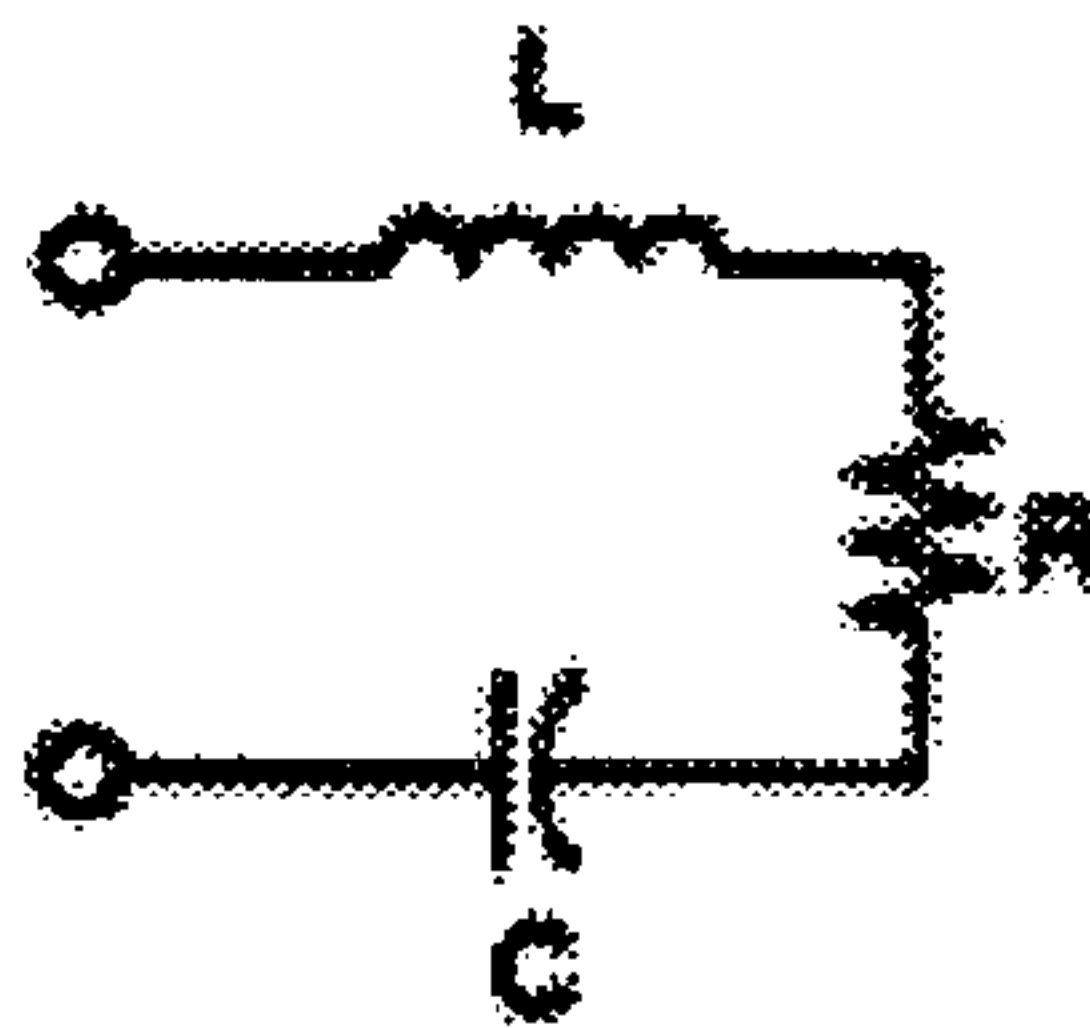


Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 65



A continuación se resuelve un circuito serie  $LRC$  en el cual se hallará la frecuencia de resonancia y su comportamiento a diferentes frecuencias en el que  $R= 10$  ohmios,  $L= 5$  milihenrios, y  $C= 12.5$  microfaradios.

**Figura 22. Circuito serie RLC**



$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{(5 \times 10^{-3}) (12.5 \times 10^{-6})} = 4000 \text{ rad/s}$$

$$X_{L0} = \omega_0 L = 4000(5 \times 10^{-3}) = 20 \Omega$$

$$X_{C0} = 1/\omega_0 C = 1/(4000 \times 12.5 \times 10^{-6}) = 20 \Omega$$

$$Z_0 = R + j(X_{L0} - X_{C0}) = 10 + j(20 - 20) = 10 \angle 0^\circ$$

Como  $X_L = \omega L$  y  $X_C = 1/\omega C$ , con lo que  $X_L/X_{L0} = \omega/\omega_0$  y  $X_C/X_{C0} = \omega_0/\omega$ . Podemos calcular los valores de  $X_L$ ,  $X_C$  y  $Z$  para otras frecuencias.

Por ejemplo para  $\omega = 3200$  se tiene:

$$X_L = \omega X_{L0}/\omega_0$$

$$X_L = (3200)(20)/4000$$

$$X_L = 16$$

$$X_C = \omega_0 X_{C0}/\omega$$

$$X_C = (4000)(20)/3200$$

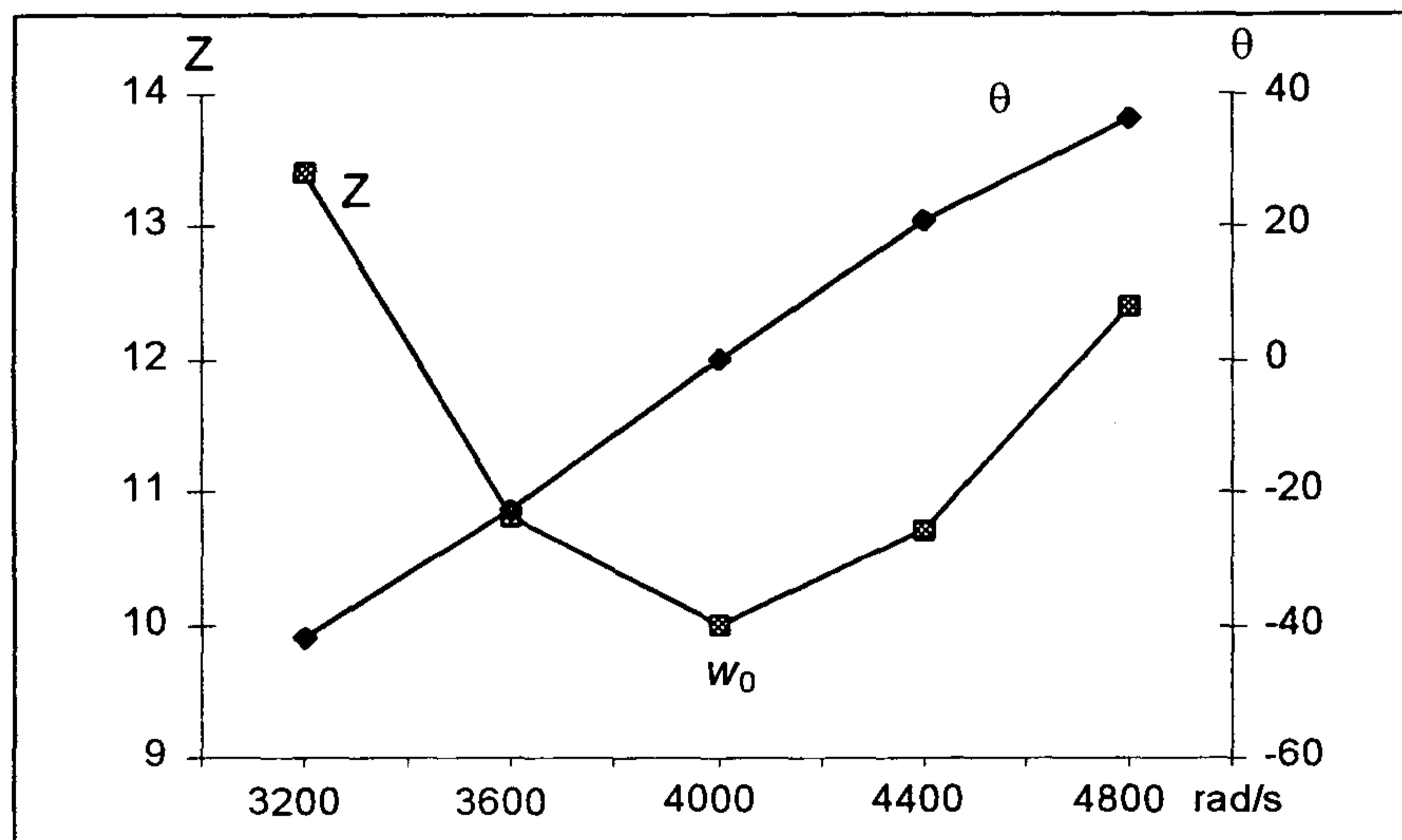
$$X_C = 25$$

De esta forma, se hace para diferentes frecuencias y se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla V. Impedancias para diferentes frecuencias**

$\omega$	$X_L$	$X_C$	$Z$	
3200	16	25	$10 - j9$	$13.4 \angle -42^\circ$
3600	18	22.2	$10 - j4.2$	$10.8 \angle -22.8^\circ$
4000	20	20	10	$10 \angle 0^\circ$
4400	22	18.2	$10 + j3.8$	$10.7 \angle 20.8^\circ$
4800	24	16.7	$10 + j7.3$	$12.4 \angle 36.2^\circ$

**Figura 23. Curva de circuito serie RLC**



En la gráfica anterior nos podemos dar cuenta que en la frecuencia de resonancia  $\omega_0$  la impedancia es mínima.

Si a ese circuito se le aplica una tensión  $V = 100 \angle 0^\circ$ , se encontrara la caída de tensión en cada elemento para  $\omega = 3600, 4000$  y  $4400$  radianes por segundo

Para 3600 rad/s

$$I = V/Z = (100 \angle 0^\circ) / (10.8 \angle -22.8^\circ) = 9.26 \angle 22.8^\circ$$

$$V_R = 9.26 \angle 22.8^\circ (10) = 92.6 \angle 22.8^\circ$$

$$V_L = 9.26 \angle 22.8^\circ (18 \angle 90^\circ) = 167 \angle 112.8^\circ$$

$$V_C = 9.26 \angle 22.8^\circ (22.2 \angle -90^\circ) = 206 \angle -67.2^\circ$$

Para 4000 rad/s

$$I = V/Z = (100 \angle 0^\circ) / (10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 0^\circ$$

$$V_R = 10 \angle 0^\circ (10) = 100 \angle 0^\circ$$

$$V_L = 10 \angle 0^\circ (20 \angle 90^\circ) = 200 \angle 90^\circ$$

$$V_C = 10 \angle 0^\circ (20 \angle -90^\circ) = 200 \angle -90^\circ$$

Para 4400 rad/s

$$I = V/Z = (100 \angle 0^\circ) / (10.7 \angle 20.8^\circ) = 9.34 \angle -20.8^\circ$$

$$V_R = 9.34 \angle -20.8^\circ (10) = 93.4 \angle -20.8^\circ$$

$$V_L = 9.34 \angle -20.8^\circ (22 \angle 90^\circ) = 206 \angle 69.2^\circ$$

$$V_C = 9.34 \angle -20.8^\circ (18.2 \angle -90^\circ) = 170 \angle -110.8^\circ$$

En este caso cuando el circuito esta en resonancia la impedancia es menor, por tanto la corriente aumenta..

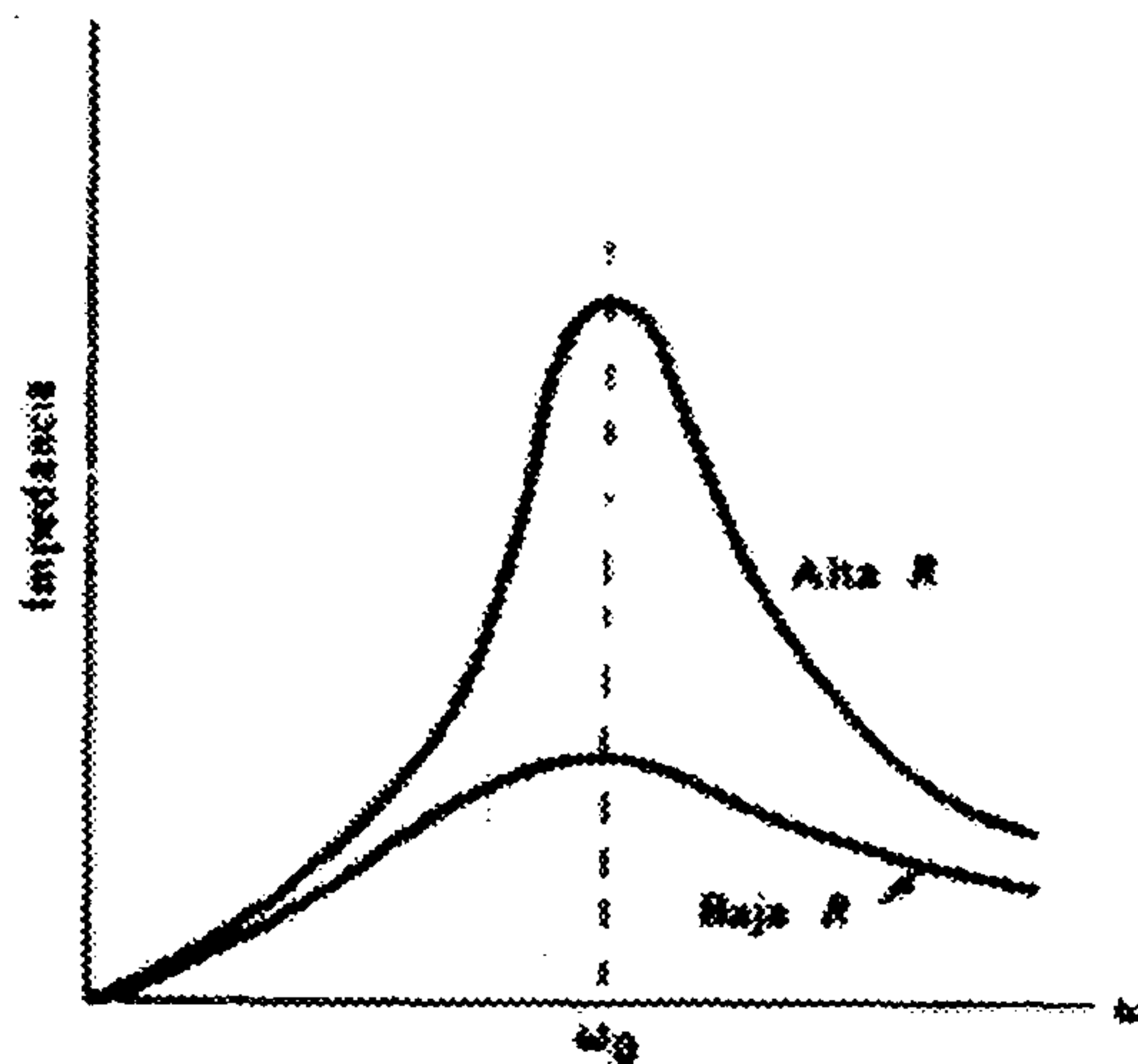
#### 2.1.4.2 Resonancia en paralelo

La resonancia en paralelo es el resultado de la colocación *de circuitos tanques o circuitos LC*. En un sistema de distribución AC cuando este es excitado a frecuencias donde las impedancias inductivas y capacitivas se igualan. El camino que representa un circuito resonante en paralelo representa un camino de muy alta impedancia para corrientes a la frecuencia de resonancia y pueden crear condiciones para que se presente un rompimiento de voltaje sobre los conductores y los componentes conectados al mismo.

Las corrientes armónicas a la frecuencia de resonancia crean condiciones de grandes armónicos de voltaje a través de las terminales del circuito, los cuales son también conectados a la fuente y su carga. Esta frecuencia depende de los armónicos de voltaje sumados algebraicamente a la frecuencia fundamental de voltaje y a otras formas de onda con armónicos de voltaje del circuito, para producir una distorsión armónica de la forma de onda de voltaje.

Los circuitos de resonancia en paralelos se comportan inversamente a los circuitos con resonancia en serie. Ellos exhiben una muy alta impedancia de resonancia, donde la resonancia en serie del circuito exhibe una muy alta admitancia ( baja impedancia ) ver figura 23.

**Figura 24. Impedancia contra frecuencia en circuito paralelo R-L-C**



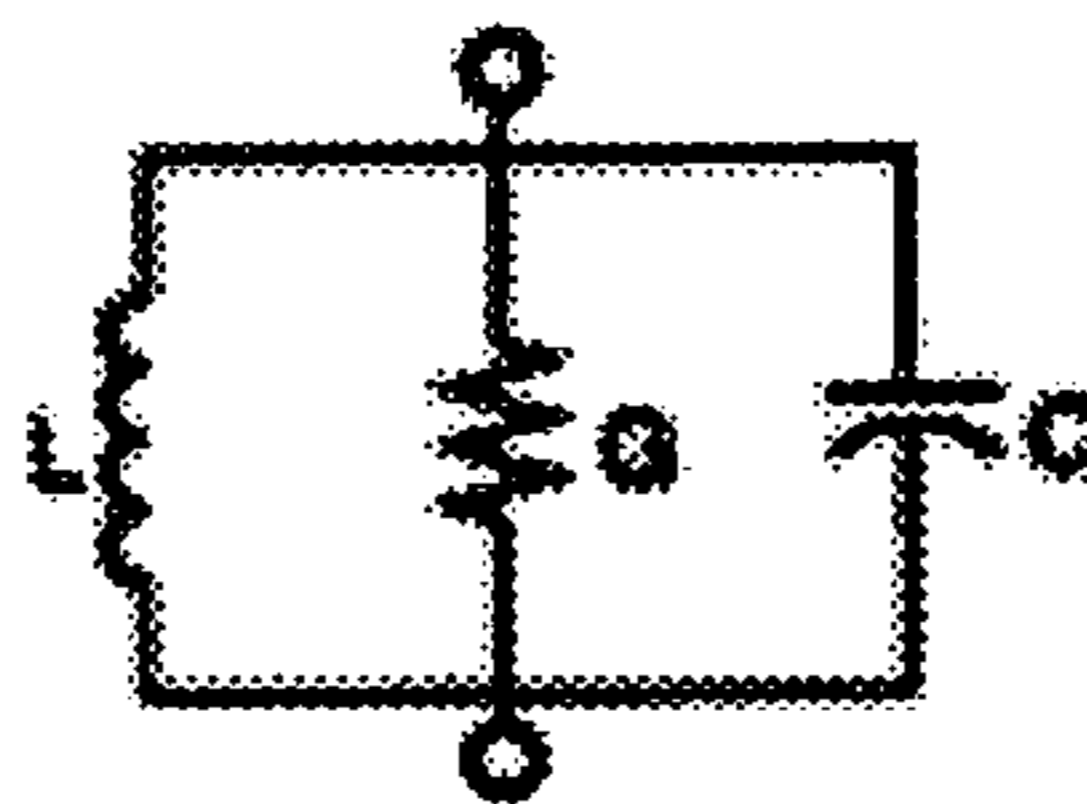
Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 66



Una corriente considerable puede oscilar entre la inductancia y capacitancia, los cuales son elementos de almacenamiento del circuito, cuando las cargas no lineales con características armónicas cercanas a la frecuencia de resonancia en paralelo, existe dentro del circuito. La distorsión de voltaje resulta de estos altos niveles de corrientes oscilantes. Bajo ciertas condiciones, las corrientes oscilantes pueden también irradiar energía electromagnética, la cual puede interferir con señales de circuitos adyacentes. En los circuitos resonante en serie la corriente oscila en la carga y la fuente, mientras que los circuitos con resonancia en paralelo la corriente es limitada a su propio lazo. Por lo tanto, los circuitos resonantes en serie involucran la fuente y la carga con la corriente a la frecuencia de resonancia, y los circuitos con resonancia en paralelo afectan al voltaje ( a la frecuencia de resonancia ) sobre su fuente y carga .

A continuación se resuelve un circuito paralelo formado por tres mallas en el cual se hallará la frecuencia de resonancia y su comportamiento a diferentes frecuencias. Donde  $C = 12.5 \mu\text{F}$ ,  $R = 10 \text{ ohmios}$  y  $L = 6 \text{ mH}$

**Figura 25. Circuito paralelo RLC**



$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = 1/\sqrt{(5 \times 10^{-3})(12.5 \times 10^{-6})} = 4000 \text{ rad/s}$$

$$Y = G + jB$$

$$G = 1/10$$

$$B = B_C - B_L$$

$$B = \omega C - 1/\omega L$$

$$B_{C0} = \omega_0 C = 4000 (12.5 \times 10^{-6}) = 0.05$$

$$B_{L0} = 1/\omega_0 L = 1/4000 (5 \times 10^{-3}) = 0.05$$

$$Y_0 = 1/10 + j(0.05 - 0.05) = 0.1 \angle 0^\circ$$

$$B_L = 1/\omega L \quad y \quad B_{L0} = 1/\omega_0 L$$

$$B_L = B_{L0} (\omega_0/\omega)$$

$$B_C = \omega C \quad y \quad B_{C0} = \omega_0 C$$

$$B_C = B_{C0} (\omega/\omega_0)$$

Para  $\omega = 3200$  rad/s

$$B_L = (4000)(5 \times 10^{-3}) / (3200) = 0.0625$$

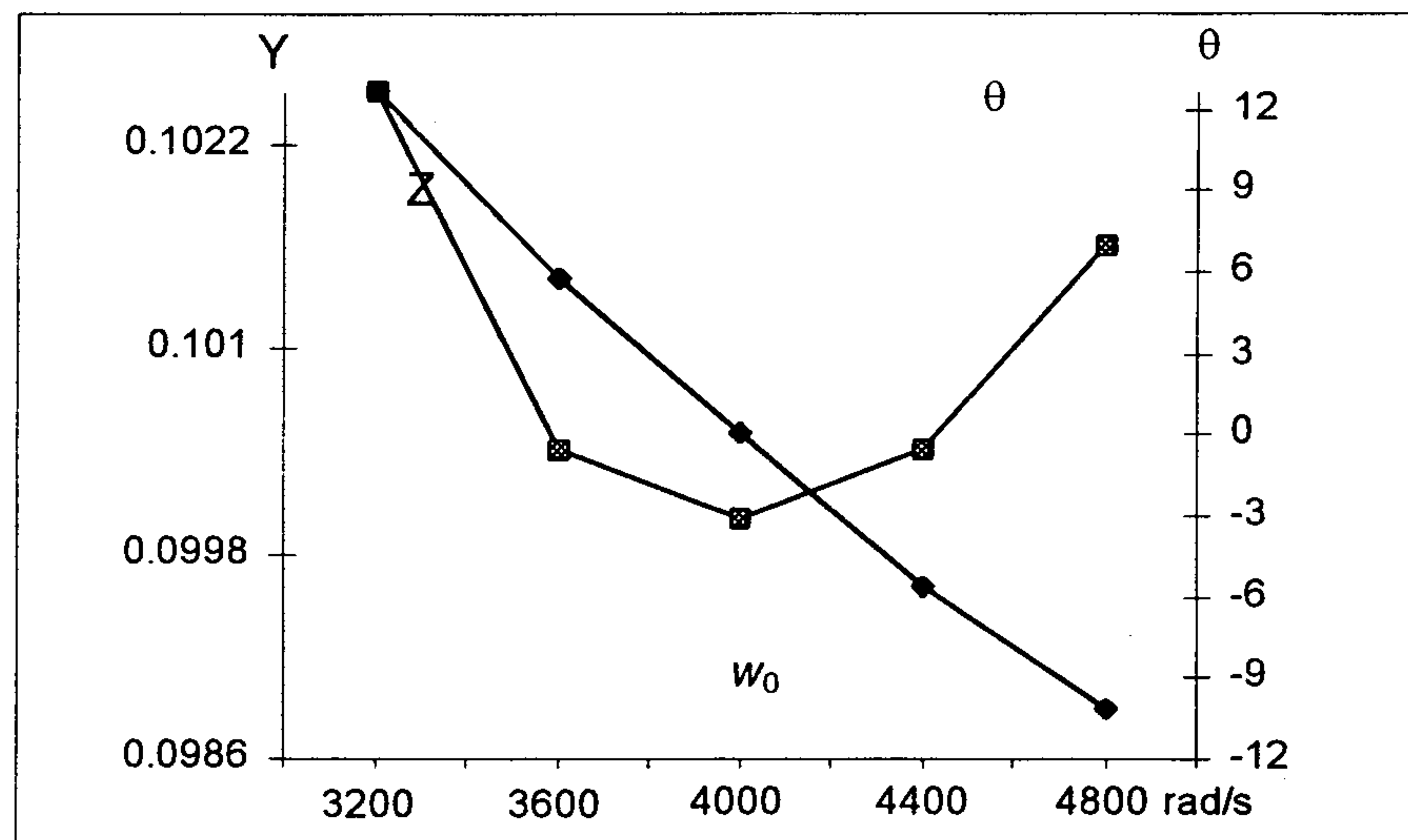
$$B_C = (3200)(12.5 \times 10^{-6}) / (4000) = 0.04$$

De esta forma, se hace para diferentes frecuencias y se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla VI. Admitancias para diferentes frecuencias**

$\omega$	$B_L$	$B_C$	$Y$	
3200	0.0625	0.04	$0.1 + j0.022$	$0.1025 \angle 12.68^\circ$
3600	0.055	0.045	$0.1 + j0.01$	$0.1004 \angle 5.71^\circ$
4000	0.05	0.05	0.1	$0.1 \angle 0^\circ$
4400	0.045	0.055	$0.1 - j0.01$	$0.1004 \angle -5.71^\circ$
4800	0.042	0.06	$0.1 - j0.018$	$0.1016 \angle -10.2^\circ$

Figura 26. Curva de circuito paralelo RLC



En la gráfica anterior nos podemos dar cuenta que en la frecuencia de resonancia  $\omega_0$  la admitancia es mínima.

Si a ese circuito se le aplica una tensión  $V = 100 \angle 0^\circ$ , se encontrara la caída de tensión en cada elemento para  $\omega = 3600, 4000$  y  $4400$  radianes por segundo

Para 3600 rad/s

$$I = V/Z = (100 \angle 0^\circ) / (9.96 \angle -5.71^\circ) = 10.04 \angle 5.71^\circ$$

$$V_R = 10.04 \angle 5.71^\circ (10) = 100.4 \angle 5.71^\circ$$

$$V_L = 10.04 \angle 5.71^\circ (18.18 \angle 90^\circ) = 182.54 \angle 95.71^\circ$$

$$V_C = 10.04 \angle 5.71^\circ (22.2 \angle -90^\circ) = 223.11 \angle -84.29^\circ$$

Para 4000 rad/s

$$I = V/Z = (100 \angle 0^\circ) / (10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 0^\circ$$

$$V_R = 10 \angle 0^\circ (10) = 100 \angle 0^\circ$$

$$V_L = 10 \angle 0^\circ (20 \angle 90^\circ) = 200 \angle 90^\circ$$

$$V_C = 10 \angle 0^\circ (20 \angle -90^\circ) = 200 \angle -90^\circ$$

Para 4400 rad/s

$$I = V/Z = (100 \angle 0^\circ) / (9.96 \angle 5.71^\circ) = 10.04 \angle -5.71^\circ$$

$$V_R = 10.04 \angle -5.71^\circ (10) = 100.4 \angle -5.71^\circ$$

$$V_L = 10.04 \angle -5.71^\circ (22.22 \angle 90^\circ) = 223.11 \angle 84.29^\circ$$

$$V_C = 10.04 \angle -5.71^\circ (18.18 \angle -90^\circ) = 182.54 \angle -95.71^\circ$$

En este caso cuando el circuito esta en resonancia la impedancia es mayor, por tanto la caída de tensión aumenta.

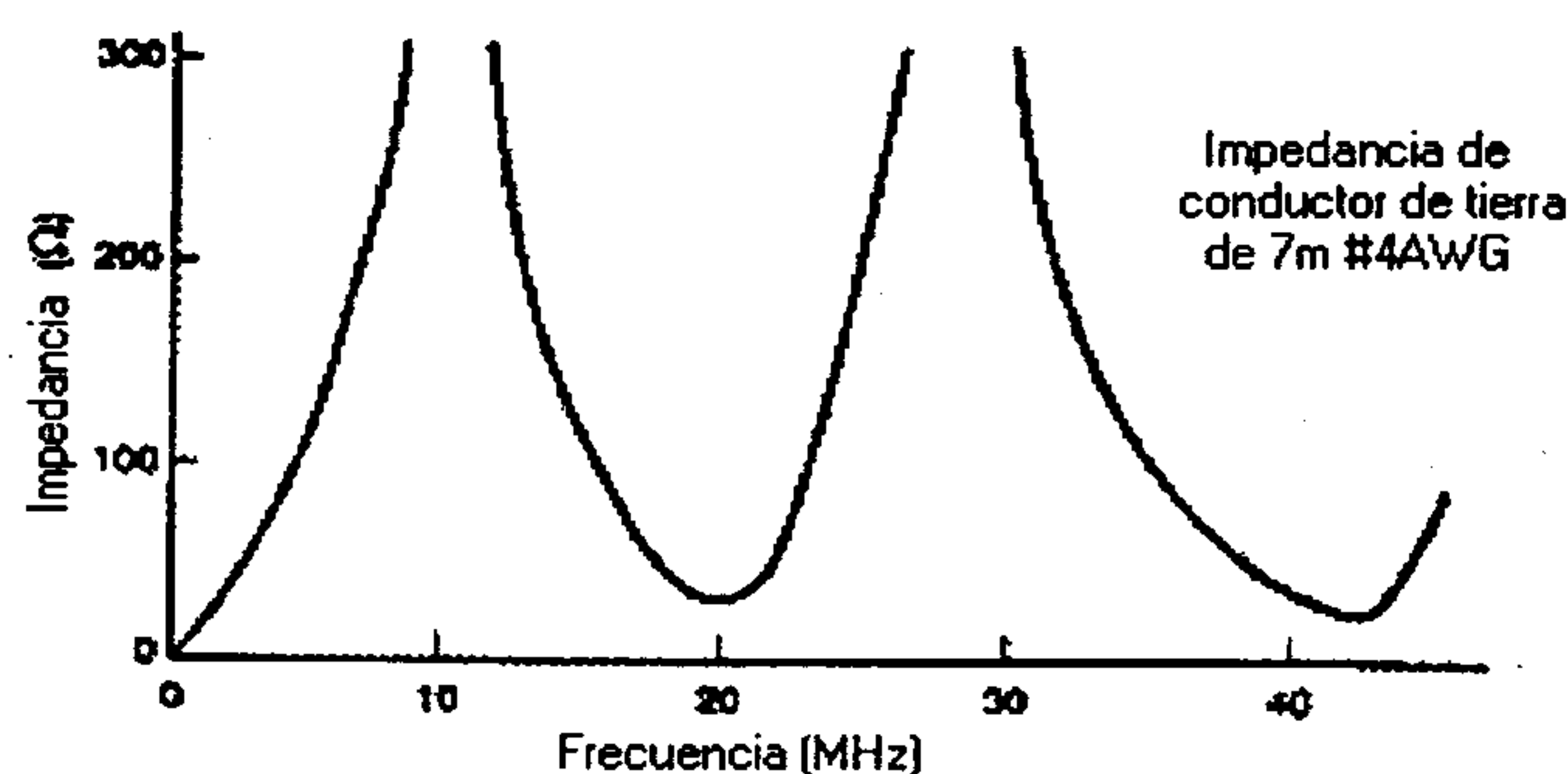
#### 2.1.4.3 Efectos de la autoresonancia de los conductores

La resonancia ocurre en los conductores, primordialmente debido a su falta de agrupamiento de elementos capacitivos e inductivos. Por lo tanto, los conductores de un sistema de energía de ac que exhiben solo capacitancias e inductancias distribuidas, oscilan cuando son excitadas por ciertas formas de onda de voltaje. Ellos, en esencia actúan como una inadvertida antena. Este tipo de problema no es muy a menudo observado en los conductores que completan una línea de transmisión, como son los sistemas de alimentación AC o los circuitos ramales, pero concierne en mayor esencia a la agrupación de conductores instalados de aterrizaje y cables de datos que forman parte de los lazos abiertos. La resonancia propia de los conductores ocurre cuando la longitud de un conductor iguala a un múltiplo impar a 1/4 de la longitud de onda de señal de voltaje.



El conductor deja de conducir corriente a esta frecuencia de resonancia. La conducción de corriente a otras frecuencias, ampliamente diferentes que la frecuencia de resonancias, no son afectas según la norma ANSI/NFPA 75-1992, la figura 27 muestra esta relación de resonancia.

**Figura 27. Características de resonancia en los conductores**



**Fuente: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. Pág. 67**

La relación que existe de resonancia en un conductor debido a la longitud y la frecuencia es como sigue:

$$L_{\text{resonancia}} = (cn)/(4f_{\text{resonancia}})$$

donde

$L_{\text{resonancia}}$  = longitud del conductor resonante (m)

$n$  = cualquier entero impar (1, 3, 5...)

$c$  = velocidad de la luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

$f_{\text{resonancia}}$  = frecuencia de excitación dentro del conductor (Hz)

En la práctica los diseñadores deben considerar las frecuencias bajas a la cual la longitud del conductor de tierra/guarda resonara en ( $n=1$ ). Por lo tanto los conductores de tierra/guarda deberán de ser elegidos de manera que no posean longitud física que se acerque a las condiciones de resonancia (un cuarto de la longitud de onda y un múltiplo par), debido a que cualquier frecuencia de ruido eléctrico sea impuesta al conductor. Una forma de evitar esto es el empleo de conductores múltiples de tierra/guarda entre los mismos puntos, los cuales poseen cada uno diferente longitud que los otros. Esto se utiliza mientras se busca la manera de investigar la forma de evitar las condiciones de resonancia en los conductores, puesto que uno o más de los otros no estarán en resonancia. Por lo regular una diferencia del 20% en la longitud del conductor será suficiente para evitar la resonancia.

### **3. EQUIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA Y DE PUESTA A TIERRA**

#### **3.1 Generalidades**

La calidad de energía en los sitios de inspección y los programas de monitoreo a largo plazo requieren una instrumentación apropiada para que puedan ser efectivos. Hay una extensa variedad de equipo de medición disponible para este uso. El reto está en seleccionar la más apropiada instrumentación para tener una medición adecuada a lo que se recomienda medir.

La mayor parte de problemas por cableado y aterrizaje está en la alimentación y particularmente en los circuitos ramales que alimentan a las cargas críticas.

#### **3.2 Detector infrarrojo**

El sobrecalentamiento de transformadores, interruptores y otros aparatos eléctricos es a menudo imposible de detectar con mediciones de corriente y voltaje. Los detectores de infrarrojo producen imágenes del área bajo investigación. El calentamiento de las áreas aparecen en contraste a las imágenes con temperatura normal pudiendo hacer o efectuar un diagnóstico del problema

### 3.3 Voltímetro de respuesta RMS verdadera

Las formas de onda complejas se miden con más precisión mediante un voltímetro de respuesta rms. Este instrumento produce una indicación de medición detectando la potencia calorífica de la onda, la cual es proporcional al cuadrado del valor rms del voltaje. Esta potencia calorífica se puede medir alimentando la señal de entrada y amplificada al elemento calefactor de un termopar, cuyo voltaje de salida es proporcional a  $E_{rms}^2$ .

La gráfica de la forma de onda de voltaje, en un sistema de distribución de corriente alterna, es diseñada para ser predominantemente senoidal. Las cargas eléctricas grandes han sido históricamente elementos resistivos utilizados para calefacción y alumbrado, como también motores eléctricos de inducción. Estas cargas poseen características lineales, en las que la corriente es aproximadamente proporcional al voltaje y predominantemente senoidal.

La proliferación de cargas electrónicas, ha cambiado la naturaleza del comportamiento de la carga, la cual se esperaba tener en un sistema de distribución. Estas cargas representan características no lineales las cuales se caracterizan por tener formas de onda de voltaje y corriente distorsionadas. Los grandes picos de corriente siguen el trazo de la forma de onda de voltaje pero no todo el tiempo. El resultado es la forma de onda de la corriente de la carga la cual resulta distorsionada, la cual por provoca una caída de voltaje para la fuente, también distorsionada.



### **3.4 Amperímetros de verdadero valor eficaz (RMS)**

Dentro de esta clasificación se encuentran dos tipos, los cuales funcionan con lecturas indirectas: a través de transformadores de corriente Cts y del tipo Efecto *Hall*.

Las consideraciones tomadas en cuenta en la medición de voltaje son igualmente validas en la medición de corriente. Para formas desconocidas de corriente o no senoidales, lo recomendable es utilizar un amperímetro de verdadero valor eficaz. El crecimiento de cargas eléctricas con componentes electrónicos ha incrementado de manera considerable la distorsión en la forma de onda de la corriente. La utilización de amperímetros del tipo de gancho de verdadero valor eficaz se recomienda, debido a su fácil uso, aunque otros tipos pueden funcionar satisfactoriamente.

### **3.5 Consideraciones en medición de corriente**

#### **3.5.1 Medición de componente DC en AC.**

Todos los amperímetros mencionados anteriormente pueden ser capaces de responder a corrientes de AC con componentes de DC. La respuesta a baja frecuencia del amperímetro cae rápidamente como la componente de DC del incremento de la corriente medida. Otro posible efecto de la corriente DC se origina del hecho que cualquier núcleo magnético puede ser magnetizado pasando grandes corrientes a través de él. El resultado es que se necesita una neutralización del campo magnético periódica.

### **3.5.2 Valores de estado estable**

La mayoría de multímetros comúnmente usados por la industria eléctrica tienen la intención de proveer valores de estado estable de corriente y voltaje. Las mediciones rms de corriente o voltaje es muestreada o promediada en varios ciclos. Por necesidad las medidas en tiempo real pueden ser mostradas ciclo a ciclo para un sistema de 60 Hz. El tiempo de respuesta al movimiento de las medidas análogas es mucho mayor que 16 ms en periodos de 60 Hz. En efecto, los medidores digitales manejan un retardo en la actualización del dato desplegado en pantalla para eliminar el molesto parpadeo que ocurre cuando la actualización del dato se da tan rápido como 0.1 seg.

La corriente de carga de estado estable en todas las fases y en el conductor neutral deberá ser medido con un amperímetro de verdadero valor eficaz así como las pruebas del cableado y el aterrizaje con un osciloscopio y una sonda o punta de prueba de corriente. La medición con un equipo de bobina móvil o amperímetro del tipo retención del pico puede dar una información errónea.

### **3.5.3 Valores de corriente instantánea o *inrush***

Es a veces deseable medir con precisión la corriente transitoria y el voltaje, el cual resulta al conectar una carga electrónica junto con otros equipos. Cuando la carga es mayormente reactiva (tal es el caso de motores y transformadores), esta corriente inicial toma varias veces el valor de estado estable.

Para medir estos valores que se presentan de manera instantánea, un amperímetro de rápida respuesta es requerido, el cual puede desplegar el valor del pico de corriente que se presente (tal es el caso de un medidor), o bien grabarlo (o graficarlo en un graficador). Es también posible utilizar un osciloscopio, un monitor de energía con una punta de prueba del tipo CT de respuesta rápida.

#### **3.5.4 Factor de cresta**

Se define como la relación del valor pico al valor RMS de corriente, esta medida es importante en el estudio del comportamiento de cargas no lineales.

$$F_{\text{cresta}} = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{eficaz}}}$$

#### **3.6 Osciloscopio**

Un osciloscopio, en su forma más sencilla es un equipo que provee una indicación visual de la representación de un voltaje dibujado como una función del tiempo en un tubo de rayos catódicos. Aunque posee procedimientos limitados, este puede ser utilizado en la detección de señales armónicas presentes dentro de una señal eléctrica de voltaje.

### **3.7 Analizadores de forma de onda**

Los equipos de análisis de forma de onda, son equipos de monitoreo que detectan, capturan y graban disturbios en la línea de energía, aunque los mismos pueden ser complementados con una descripción alfanumérica de los mismos, la cual es común a los monitores de texto.

La capacidad de capturar, guardar y reportar disturbios en la forma de onda, hace que el analizador de forma de onda sea la elección preferida cuando se necesita hacer un extensivo análisis de calidad de energía. Los disturbios individuales son grabados de acuerdo al numero de incidencia (ocurrencia) junto con la forma de onda que representa al disturbio y la designación alfanumérica que se le asigne dentro de un intervalo de tiempo específico. El despliegue de los datos, puede ser a través de un reporte escrito (vía una impresora) o a través de un medio electrónico, acompañado con una señal de alarma.

### **3.8 Analizadores de espectro, con procesamiento por computadora**

El análisis de armónicas, ruido eléctrico, y desviaciones de frecuencia pueden ser medidos con un analizador de energía equipado con un módulo adecuado para medir el parámetro deseado. También existen medidores de armónicos de propósito especial, analizadores de espectros de baja frecuencia, o ancho de banda definido (esto depende de que quiera medirse, armónicos o relación señal a ruido), junto con una combinación de instrumentos que permitan el análisis de los mismos a través de una computadora.

Los instrumentos a elegir deberán utilizar puntas de prueba de voltaje y corriente, así como tomar en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas con respecto a los osciloscopios.



Si interesa estudiar el flujo de energía, la medición de voltajes armónicos y corriente deberá ser hecha simultáneamente. Los analizadores de armónicos utilizan la transformada rápida de *Fourier* para brindar datos sobre la amplitud de la señal, posición de la fase y la contribución total a la distorsión de cada componente armónica.

### 3.9 Especificaciones del equipo utilizado en las mediciones

#### 3.9.1 Multímetro digital

En las mediciones de corriente y voltaje generales se utilizó un multímetro digital marca *Fluke* modelo 87 III, a continuación se listan sus principales características y especificaciones.

Mediciones en verdadero valor eficaz, ancho de banda de 200 kHz, registro de picos máximo de 250  $\mu$ s.

**Tabla VII. Especificaciones *Fluke* 87 III**

Funciones	Máximo	Maxima resolución	87 III
Tensión DC	1000 V	10 $\mu$ V	$\pm(0.05\%+1)$
		0.1 mV	
Tensión AC	1000 V	10 $\mu$ V	$\pm(0.7\%+2)$
		0.1 mV	
Intensidad DC	10 A	0.01 $\mu$ A	$\pm(0.2\%+2)$
		0.1 $\mu$ A	
Intensidad AC	10 A	0.01 $\mu$ A	$\pm(1.0\%+2)$
		0.1 $\mu$ A	
Resistencia	40 M Ohms	0.01 ohms	$\pm(0.2\%+1)$
		0.1 ohms	
Continuidad	50 ns	0.01 ns	$\pm(1\%+10)$
Capacidad	5 $\mu$ F	0.01nF	$\pm(1\%+3)$
Frecuencia	200 kHz	0.01 Hz	$\pm(0.005\%+1)$

### 3.9.2 Tester de resistencia a tierra digital

En las mediciones de resistencia a tierra se utilizo un modelo 4610 de la marca AEMC las principales características de este medidor son las siguientes.

Permite una precisión en la medición de resistencia a tierra usando dos y tres electrodos sobre una simple varia o permite calcula una malla, este modelo permite hacer mediciones de resistividad utilizando 4 polos y por esta razón puede ser utilizado para verificar mediciones de potencial de contacto.

**Tabla VIII. Especificaciones medidor de resistencia a tierra AEMC 4610**

Rangos	20 ohmios	200 ohmios	2000 ohmios
Mediciones	0.00 a 19.99 ohms	20.00 a 199.9 ohms	200.00 a 1999 ohms
Resolución	10 m ohms	100 m ohms	1 ohmio
Corriente de test	10 mA	1 mA	0.1 mA
Presición	± 2% lectura	± 2% lectura	± 3% lectura

### 3.9.3 Medidor de energía

Para la medición continua de todos los parámetros para evaluar la calidad de energía se utilizo un 7500 *Power Measurement*, sus principales características se detallan a continuación:

- Mediciones

Precisión superior a la clase 0.2. Voltaje, corriente, frecuencia y factor de potencia instantáneos, energía: bidireccional, absoluta, neta, tiempo de uso y compensación de pérdidas. Demanda: ventana móvil, demanda previsible y térmica. Armónicos: distorsión armónica individual y total hasta el armónico 127 (con *software*). Detección de transitorios y detección de pandeos y dilataciones.

- Comunicaciones

Puerto 10Base-T o 10Base-FL con *EtherGate*™ para la transmisión directa de datos de *Ethernet* al RS-485. Dos puertos RS-485, uno con opción RS-232. Un puerto óptico del panel frontal. Soporte para los protocolos *Modbus*™ RTU y DNP 3.0

- Almacenamiento de datos

Almacenamiento programada o por ocurrencia de eventos hasta 640 parámetros. Secuencia de eventos y almacenamiento de mínimos/máximos.

**Tabla IX. Especificaciones *Power Measurement 7500***

Parámetro	Presición $\square$ %lectura	Límites de registro
	1 segundo	1 segundo
Voltaje (l-l) (l-n)	0.10%	0 a $1 \times 10^6$ V
Frecuencia	0.01%	47 a 63 Hz
Corriente (I1, I2, I3)	0.10%	0 a $1 \times 10^6$ A
Corriente (I4, I5, I6)	0.40%	0 a $1 \times 10^6$ A
kW, kVAR, kVA	clase 0.2	0 a $0.3 \times 10^7$
kWh, kVARh, kVAh	clase 0.2	0 a $0 \times 10^7$
Demandas kW, KVA	clase 0.2	
Factor de potencia	0.50%	-0.01 a 100.00, 100.00 a 0.01
Armónicos (hasta 63)	1%	0.0001 a 100.00
Factor K	5%	0 a $1 \times 10^6$
Factor de cresta	1%	0 a 10

A continuación se muestra una tabla del equipo a utilizar según la medición que se desee realizar.

**Tabla X. Instrumentos recomendados para la inspección en el sitio**

Instrumento	Multímetro de valor rms	Ampe. de gancho valor rms	Medidor de aterrizaje a tierra	Osciloscopio	Analizador de Armónicos	Analizador de Energía
Medición	Voltaje	Corriente	Resistencia, Impedancia	Forma de onda de voltaje	Armónicos, ruidos	Armónicos, Forma de onda, Voltaje, Corriente
<b>Conexión neutro-tierra</b>						
(1) Conexión del electrodo al conductor de tierra	.			.		.
(2) Conexión del conductor principal a los puentes	.			.		.
(3) Conexión externa de bajada de la entrada de servicio o conexiones derivadas del secundario	.	.		.		.
<b>Dimensionamiento del conductor neutro</b>						
(1) Igual o mayor que el conductor de fase el tamaño del neutral		.				.
(2) Neutrales compartidos		.				.
<b>Aterrizaje y sistema de electrodo de aterrizaje</b>						
(1) Equipo para ver la integridad del aterrizaje de un conductor cuando es usado con electrodos adicionales	.					
<b>Alimentadores de propósito especial</b>						
(1) Otros equipos sobre el circuito de interés		.				
(2) La mezcla de distintas tierras significa problemas		.				.
<b>Impedancia del electrodo de tierra</b>						
(1) Resistencia del electrodo de tierra			.			
(2) Integridad del conductor de tierra		.				
<b>Continuidad de tubería/ aterrizaje de gabinetes</b>						
(1) Cajas metálicas, tuberías aéreas y tableros	.			.		.
(2) Puentes de conexión cuando tubería no metálica es usada	.			.		.
(3) Continuidad de las juntas expansión,	.			.		.
<b>Sistemas de aterrizaje con separación derivada</b>						
(1) Verificación del neutral como una separación derivada y no interconectada	.					
(2) Impedancia neutral-tierra conexión sobre secundario				.		.
(3) Conexión del conductor del electrodo de aterrizaje				.		.
<b>Aisladores de los sistemas de tierra</b>						
Aislamiento del conductor de la tubería del sistema de tierra	.					
<b>Disturbios de alimentación</b>						
(1) Bajo y sobrevoltajes	.			.		.
(2) Sag y swells momentáneos				.		.
(3) Transitorios				.	.	.
(4) Notches				.		.
(5) Paralización y paralización momentánea				.		.
(6) Ruido eléctrico				.	.	.
(7) Armónicos					.	.
(8) Desviaciones de frecuencia					.	.

Fuente IEEE *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment* p.p. 104



## **4. ESTUDIO DEL SITIO Y ANÁLISIS DE LA ENERGÍA**

### **4.1 Estudio del sitio**

Los sistemas y equipos electrónicos de alta velocidad pueden ser más sensitivos a los disturbios dentro de la red de energía AC más que las cargas convencionales. Estos efectos de los disturbios de energía sobre el equipo electrónico sensitivo pueden tomar una gran variedad de formas las cuales pueden causar errores de datos, paro de los sistemas, fallas de memoria, programas perdidos y equipo dañado. En muchos casos es dificultoso determinar si los sistemas de hardware o software tienen un comportamiento erróneo debido a los disturbios causados por el sistema de energía que alimenta este equipo. Usualmente algunos niveles de estudio y análisis de los sistemas de energía son requeridos para determinar si los disturbios de energía afectan el desempeño de los sistemas.

Los objetivos básicos del estudio del sitio y análisis de la energía son los siguientes:

- 1 Determinar la solidez de la distribución de energía (cableado) y el sistema de aterrizaje que alimenta al equipo.
- 2 Determinar la calidad de energía que alimenta al equipo
- 3 Determinar la fuente e impacto de los disturbios sobre el desempeño de los equipos.
- 4 Analizar los datos del estudio para identificar el costo-ganancia para mejorar o corregir el problema.

## 4.2 Técnicas para la captura de datos de calidad de voltaje AC

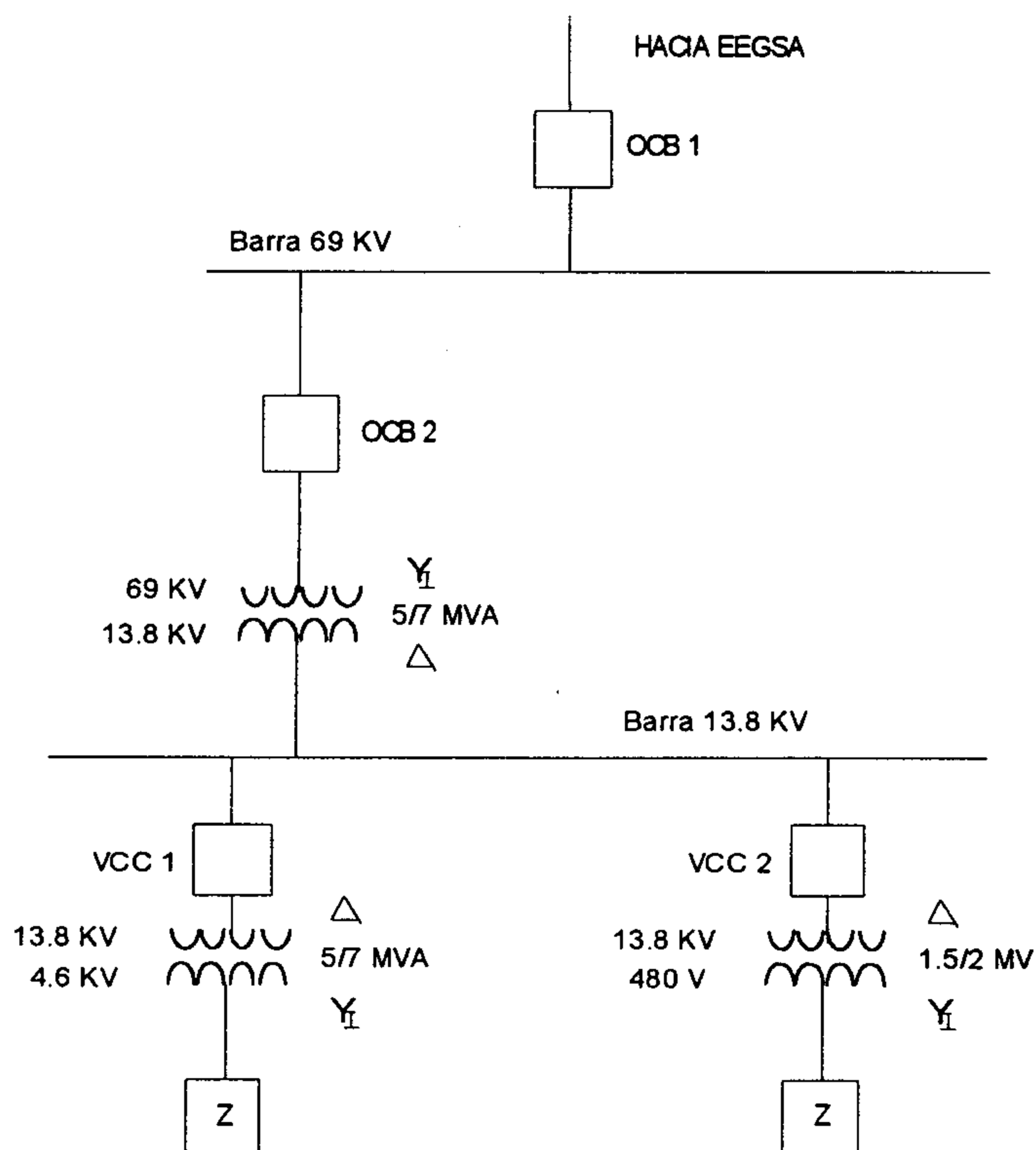
La técnica empleada para la recolección de datos, consistió en utilizar un medidor de energía *Power Measurement* modelo 7500 el cual es un medidor diseñado para uso industrial y comercial, este cuenta con un programa asociado el cual registra y procesa la información, además se utilizó el analizador de armónicos *Fluke* modelo 39.

Según el Artículo 17 Capítulo I Título IV de las normas técnicas del servicio de distribución de la Comisión Nacional de Energía,(CNE), la calidad del producto suministrado por el distribuidor deberá ser evaluada por los siguientes parámetros:

- Regulación de tensión
- Desbalance de tensión en servicios trifásicos
- Distorsión armónica
- *Flicker*.

Teniendo en cuenta lo que manda la norma anterior, el primer punto de medición fue en la acometida principal de 69 KV, en el pórtico de la subestación del Ingenio Madre Tierra, para comprobar la calidad de energía que se recibe. Se puede observar en la siguiente figura el unifilar de dichas instalaciones, el período de medición fue de 7 días continuos en intervalos de 10 minutos.

**Figura 28. Unifilar Ingenio Madre Tierra**



El índice de calidad de regulación de tensión será el valor absoluto de la diferencia ( $\Delta V_k$ ) entre la media de los valores eficaces (RMS) de tensión ( $V_k$ ) y el valor de tensión nominal ( $V_n$ ), medidos en el mismo punto, expresado como un porcentaje de la tensión nominal.

$$\Delta V_k (\%) = (|V_k - V_n| / V_n) \times 100$$

$$\Delta V_k (\%) = (69341.72 - 69000) / 69000 \times 100$$

$$\Delta V_k (\%) = 0.4952$$

Según el Artículo 24 de la CNNE el valor obtenido esta dentro de las tolerancias admisibles que es de un 6 % en tensión media.

El índice para evaluar el desbalance de tensión en servicios trifásicos se determina sobre la base de los valores eficaces (RMS) de tensión de cada fase, medidos en el punto de entrega y registrados en cada intervalo de medición. Este índice está expresado como un porcentaje.

$$\Delta DTD (\%) = [3(V_{\max} - V_{\min}) / (V_a + V_b + V_c)] \times 100$$

$V_{\max}$  = Es la tensión máxima de cualquiera de las fases.

$V_{\min}$  = Es la tensión mínima de cualquiera de las fases.

$V_a$  = Es la tensión de la fase a

$V_b$  = Es la tensión de la fase b

$V_c$  = Es la tensión de la fase c

$$\Delta DTD (\%) = [3(40580 - 39434) / (39999 + 39996 + 40190)] \times 100$$

$$\Delta DTD (\%) = 2.86$$

Según el Artículo 28 de la CNNE el valor obtenido está dentro la tolerancia admisible que es un 3 % para el desbalance de tensión.

El índice de calidad de la distorsión armónica de la tensión expresado como un porcentaje, y se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$DATT (\%) = (\sqrt{\sum V_i^2} / V_1) \times 100$$

$V_i$  = Componente de tensión de la armónica de orden i.

$V_1$  = Componente de tensión de la frecuencia fundamental (60 Hz).

$$DATT (\%) = 2.10$$



Según el Artículo 32 de la CNE el valor obtenido está dentro de la tolerancia admisible que es un 3% para el DATT.

Durante la medición, no se registró ningún transitorio, cresta o valle. La tolerancia admisible en el voltaje con que se programó el medidor fue de  $\pm 10\%$ , y como se mencionó, no se registró ningún valor en el voltaje fuera de este rango respecto al voltaje nominal.

Los puntos de medición en baja tensión, fueron los que a continuación se detallan:

1. Tablero de control edificio de turbos
2. Cuarto de control calderas cogeneración
3. Cuarto de control calderas fábrica

Todos ubicados en las instalaciones del Ingenio Madre Tierra

Los datos obtenidos serán comparados contra los datos publicados por *la Federal Information Processing Standards Publication 94*, los cuales se muestran en la tabla No 1, esta tabla muestra los porcentajes típicos de inmunidad de los diferentes disturbios que poseen las cargas electrónicas. Y nos sirve de referencia para saber los valores de tolerancias que deben de tener nuestras mediciones para estar bajo normas aceptables.

#### 4.2.1 Auditoria cuarto de control turbogeneradores

Se efectuó auditoria de calidad de energía en el cuarto de control de turbos, en esta área se han presentado problemas con la comunicación de datos entre computadora de turbogeneradores y computadora situado en edificio adyacente, problemas con las líneas telefónicas que resulta en daños a tarjetas de modem .

**Tabla XI. Datos tablero de control edificio de turbos**

##### Promedio

Voltaje	Corriente	Potencia
114.8 Vrms	2.31 Arms	0.19 KW
163.7 Vpk	5.95 Apk	0.26 kVA
1.5 %THD	63.4%THD	0.70 FP
60 HZ	60 HZ	0.90 DFF

##### Mínimo

Voltaje	Corriente	Potencia
111.4 Vrms	2.19 Arms	0.17 KW
157.9 Vpk	5.50 Apk	0.24 kVA
1.0 %THD	58.4%THD	0.69 FP
59.5 HZ	59.5 HZ	0.88 DFF

##### Máximo

Voltaje	Corriente	Potencia
117.6 Vrms	2.94 Arms	0.26 KW
168.1 Vpk	7.55 Apk	0.34 kVA
2.8 %THD	66.2%THD	0.76 FP
60.6 HZ	60.6 HZ	0.96 DFF

Figura 29. Gráfica de corriente vs. tiempo

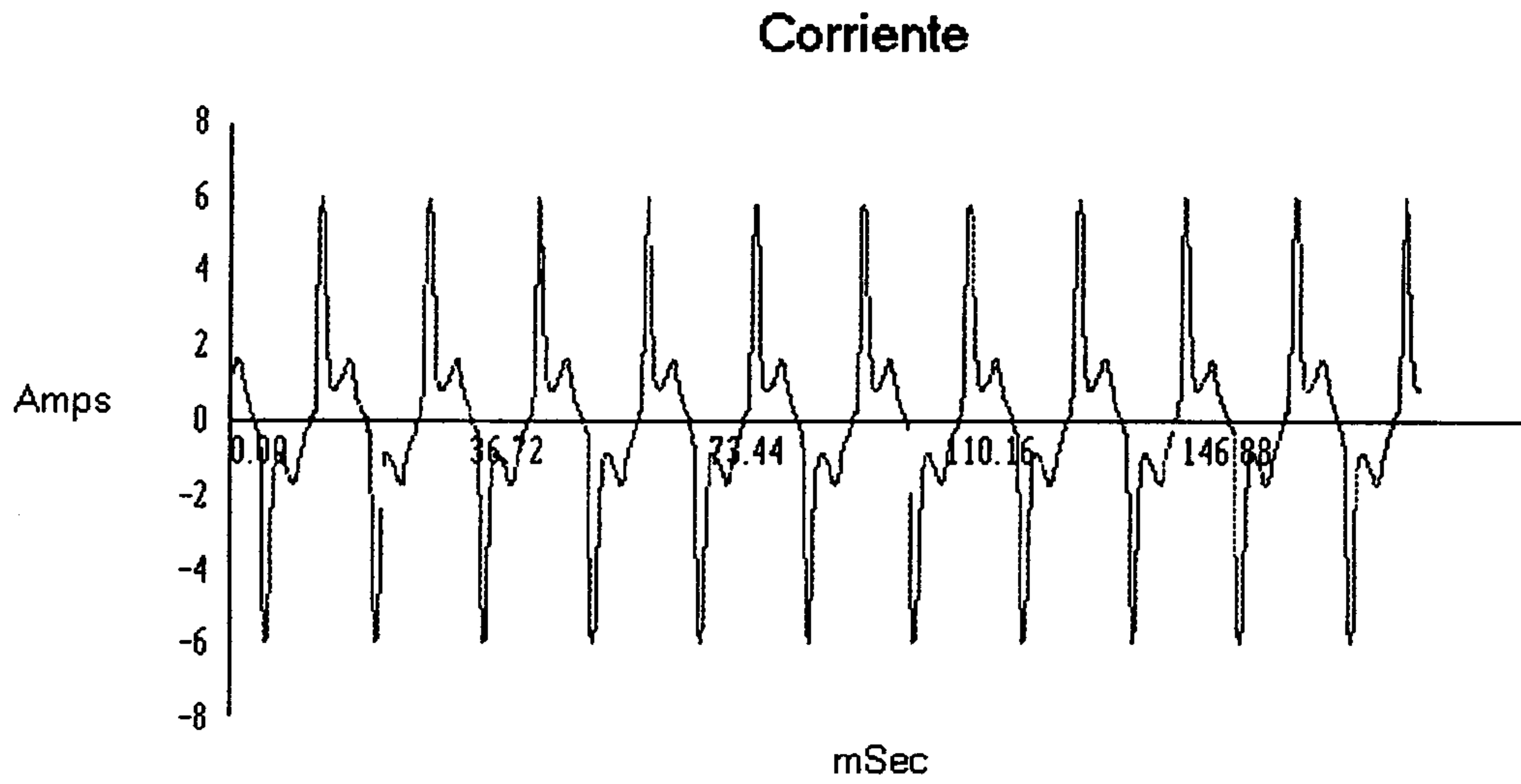
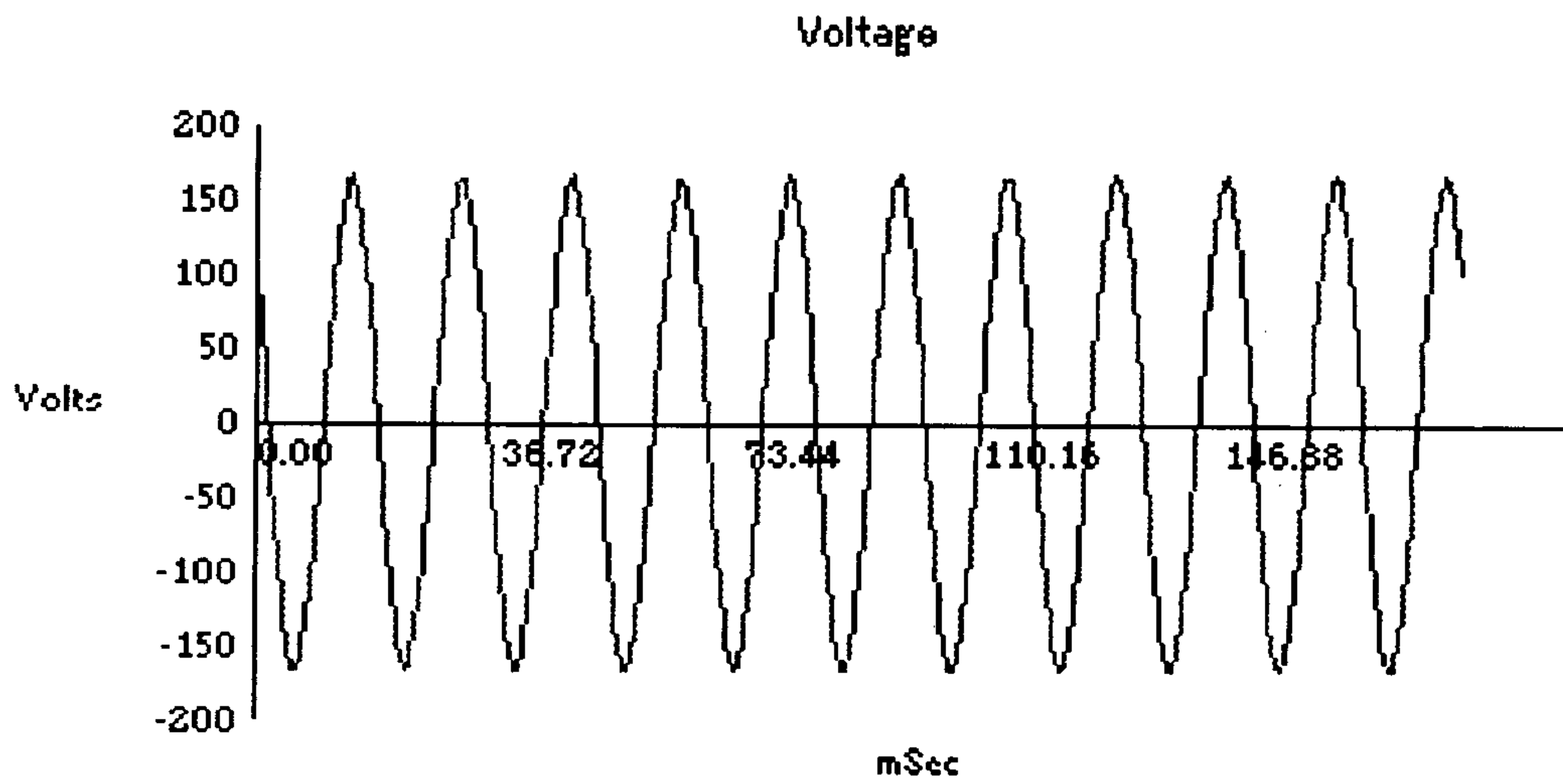


Figura 30. Gráfica de voltaje vs. tiempo



Las gráficas anteriores muestran que el sobre y bajo voltaje se encuentran bajo los parámetros normales +10%, -15%, del voltaje nominal. Debido a que el voltaje nominal es de 120VAC y el intervalo de valores aceptables se encuentra dentro del rango entre 132 y 102 VAC.

El THD de tensión se encuentra en tolerancias normales ya que se encuentra debajo de un 10 %.

El factor de potencia se encuentra en tolerancias ya que el valor crítico en las cargas electrónicas es de 0.6 en atraso o menor.

El THD de corriente no se encuentra en una tolerancia admisible ya que debería ser menor a un 10%

La frecuencia se encuentra en una tolerancia normal, ya que debe ser un  $\pm 1$  % de la frecuencia nominal en este caso 60 Hz. por lo que el rango debe estar entre 60.6 y 59.4 Hz.

#### **4.2.2 Auditoría cuarto de control calderas cogeneración**

Se efectuó auditoría de calidad de energía en el cuarto de control calderas cogeneración, en esta área se han presentado problemas con desconexión de PLCs que controlan quemadores de *fuel oil*.



**Tabla XII. Datos cuarto de control calderas cogeneración**

**Promedio**

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Potencia</b>
114.5 Vrms	5.2 Arms	0.50 KW
163.8 Vpk	12.4 Apk	0.60 kVA
1.5 %THD	50.0 %THD	0.83 FP
60 HZ	60 HZ	0.97 DPF

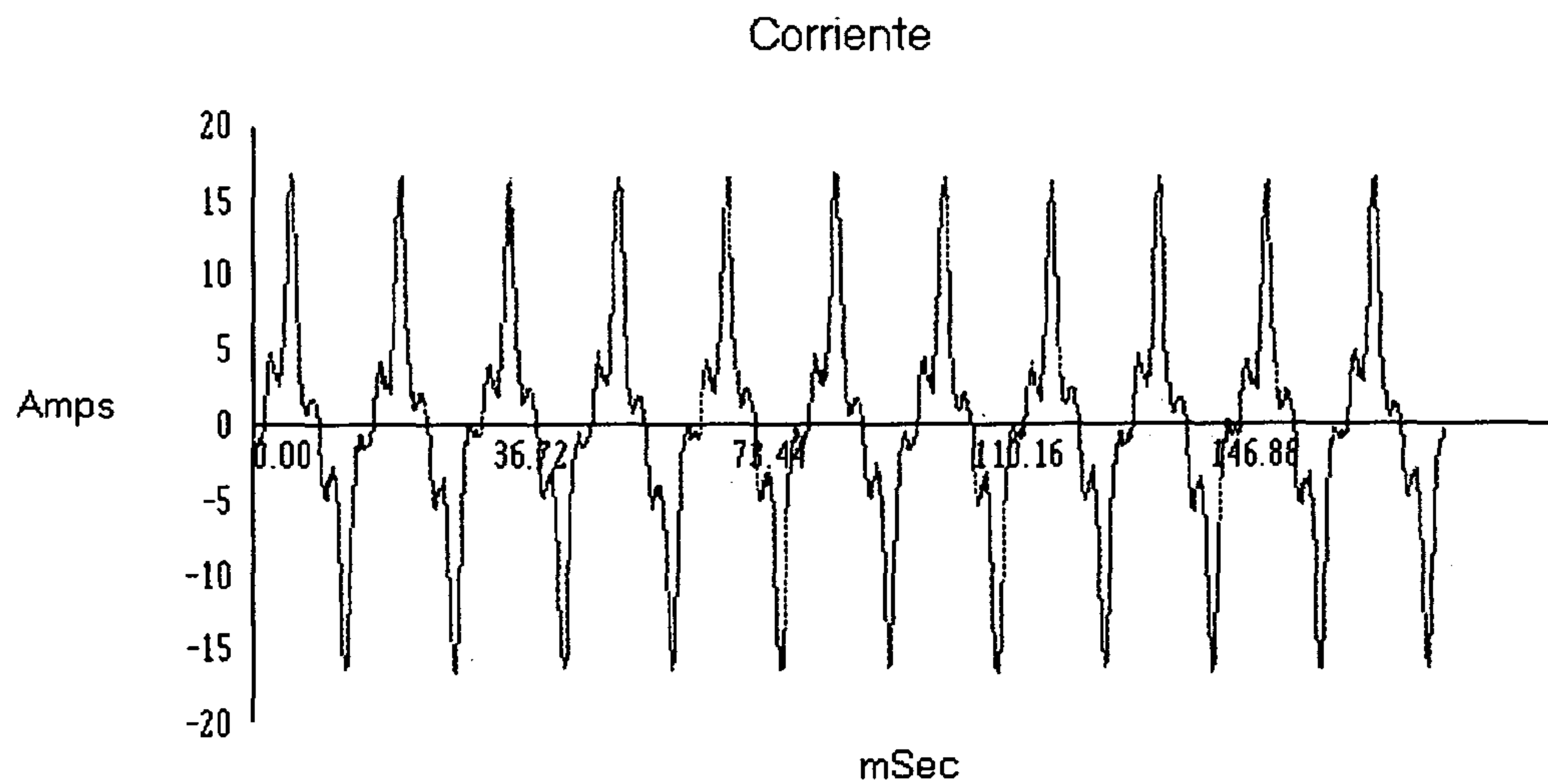
**Máximo**

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Potencia</b>
116.9 Vrms	8.2 Arms	0.87 KW
167.5 Vpk	18.0 Apk	0.94 kVA
2.2 %THD	68.3%THD	0.93 FP
60.6 HZ	60.6 HZ	1.00 DPF

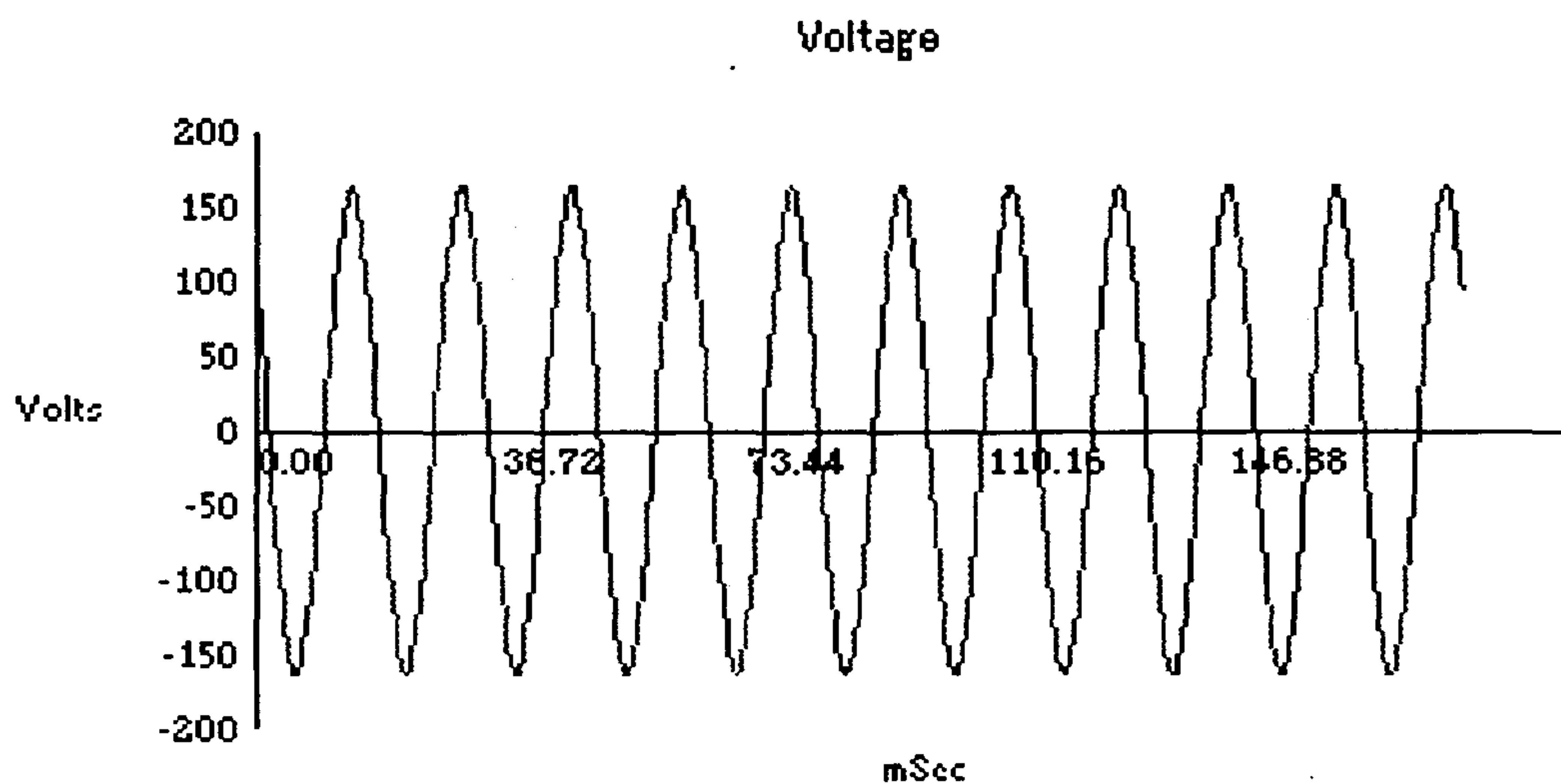
**Mínimo**

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Potencia</b>
112.2 Vrms	3.9 Arms	0.24 KW
159.9 Vpk	9.0 Apk	045 kVA
1.1 %THD	36.8%THD	0.50 FP
59.5 HZ	59.5 HZ	0.68 DPF

**Figura 31 . Gráfica de corriente vs. tiempo**



**Figura 32. Gráfica de voltaje vs. tiempo**



Las tablas anteriores muestran que el sobre y bajo voltaje se encuentran bajo los parámetros normales +10%, -15%, del voltaje nominal. Debido a que el voltaje nominal es de 120VAC y el intervalo de valores aceptables se encuentra dentro del rango entre 132 y 102 VAC.

El THD de tensión se encuentra en tolerancias normales ya que se encuentra debajo de un 10 % .

El factor de potencia se encuentra en tolerancias ya que el valor crítico en las cargas electrónicas es de 0.6 en atraso o menor.

El THD de corriente no se encuentra en una tolerancia admisible ya que debería ser menor a un 10%

La frecuencia se encuentra en una tolerancia normal, ya que debe ser un  $\pm 1$  % de la frecuencia nominal en este caso 60 Hz. por lo que el rango debe estar entre 60.6 y 59.4 Hz.

#### **4.2.3 Auditoría cuarto de control calderas fábrica**

Se efectuó auditoría de calidad de energía en el cuarto de control de fabrica, se ha tenido problemas de falla de equipo electrónico tales como, daño en pantallas de controles modulares, parpadeo de monitores, daño en fuentes de computadoras.

**Tabla XIII. Datos cuarto de control calderas fábrica**

##### **Promedio**

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Potencia</b>
114.9 Vrms	4.2 Arms	0.37 KW
158.7 Vpk	9.5 Apk	0.48 kVA
3.3 %THD	55.7%THD	0.77 FP
60 HZ	60 HZ	0.93 DPF

## Continuación

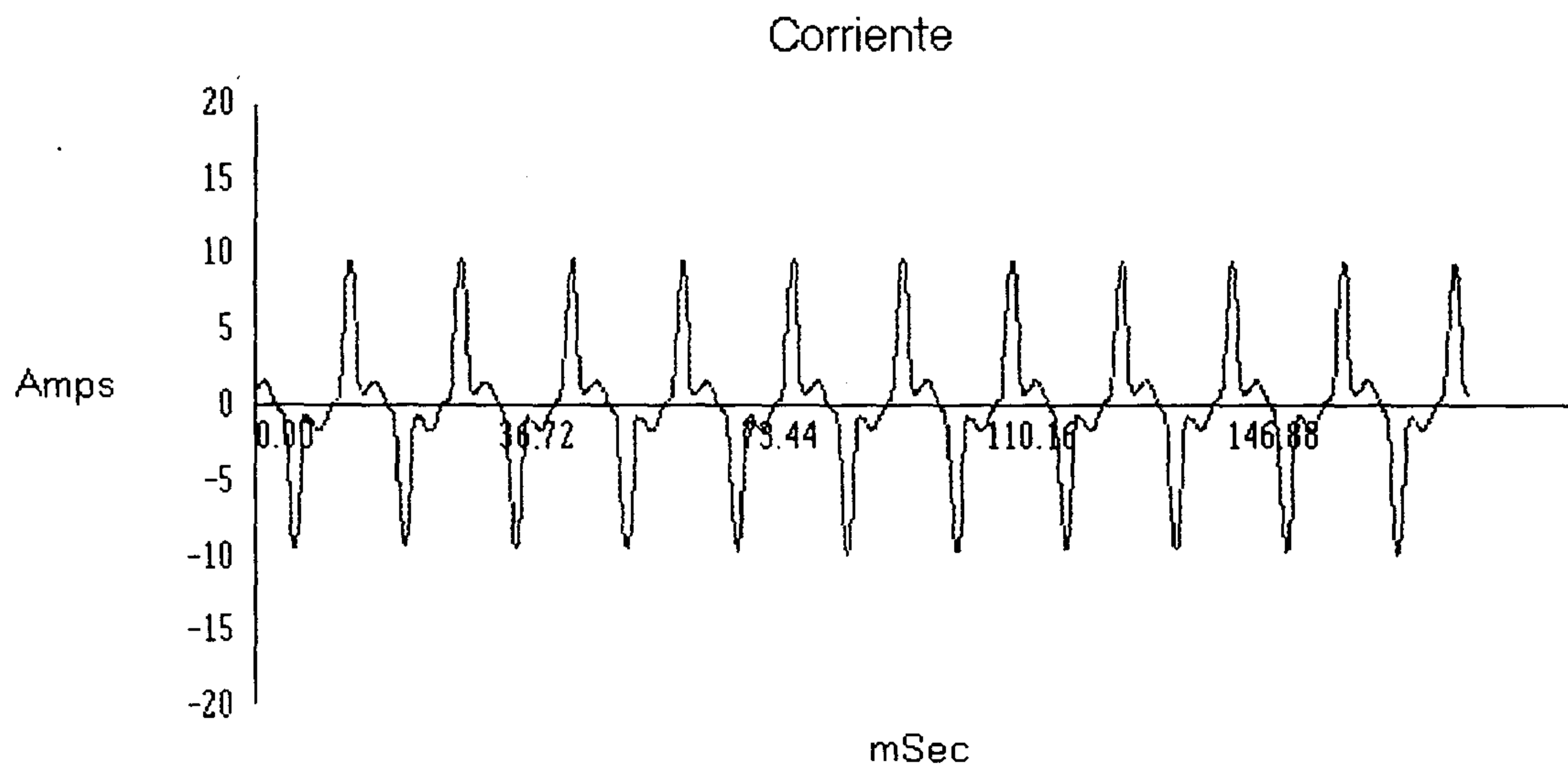
### Mínimo

Voltaje	Corriente	Potencia
90.3 Vrms	1.9 Arms	0.13 KW
126.4 Vpk	4.3 Apk	0.17 kVA
1.8 %THD	40.7%THD	0.55 FP
59.7 HZ	59.7 HZ	0.81 DPF

### Máximo

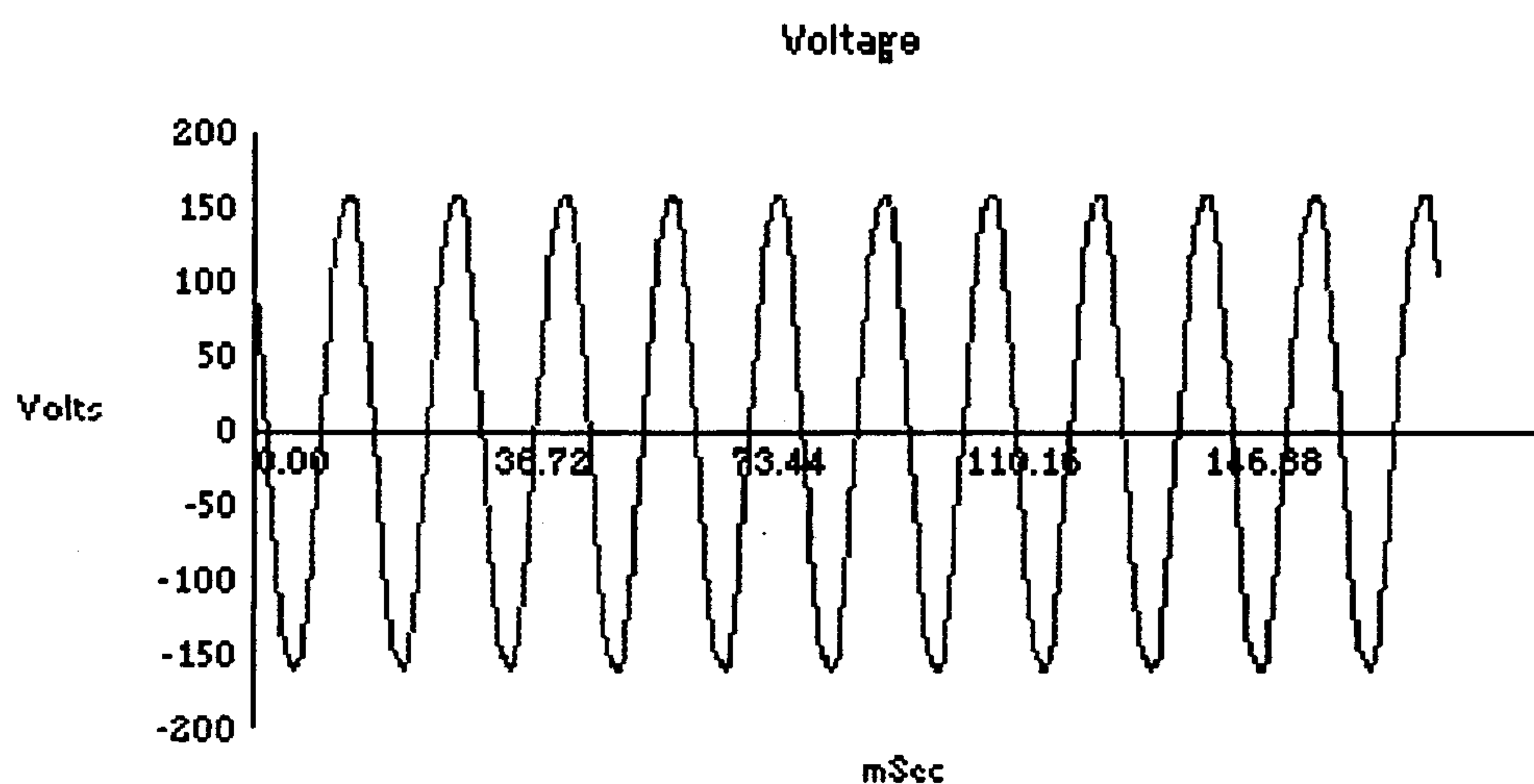
Voltaje	Corriente	Potencia
118.9 Vrms	4.6 Arms	0.41 KW
163.9 Vpk	10.3 Apk	0.53 kVA
3.7 %THD	62.1%THD	0.79 FP
60.4 HZ	60.4 HZ	0.98 DPF

Figura 33. Gráfica de corriente vs. tiempo





**Figura 34. Gráfica de voltaje vs. tiempo**



Las tablas anteriores muestran que el sobre voltaje se encuentran bajo los parámetros normales +10 %, pero el bajo voltaje que debe estar en un -15%, del voltaje nomina se encuentra fuera de rango

El THD de tensión se encuentra en tolerancias normales ya que se encuentra debajo de en un 10 %.

El factor de potencia se encuentra en tolerancias ya que el valor crítico en las cargas electrónicas es de 0.6 en atraso o menor.

El THD de corriente no se encuentra en una tolerancia admisible ya que debería ser menor a un 10%

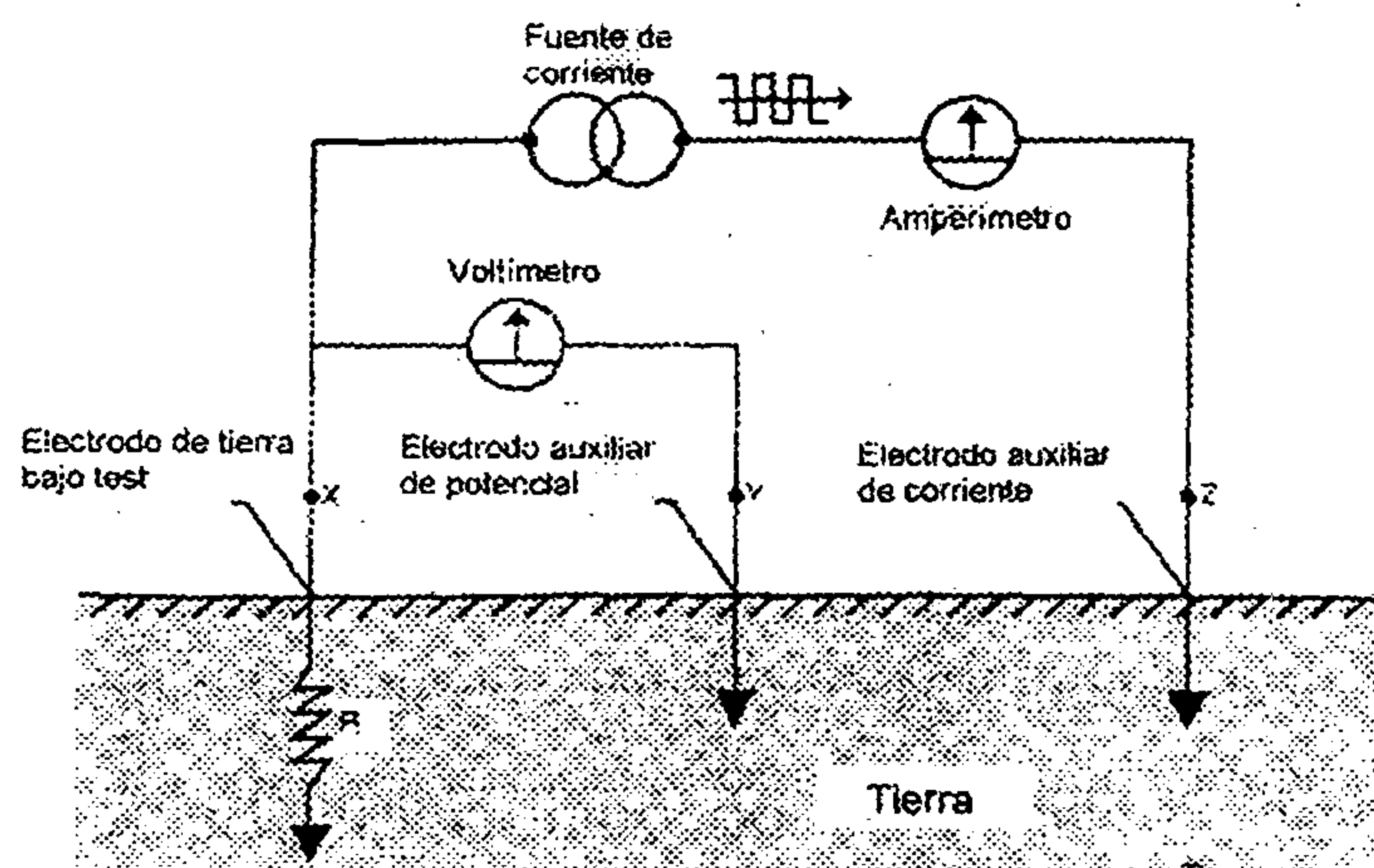
La frecuencia se encuentra en una tolerancia normal, ya que debe ser un  $\pm 1\%$  de la frecuencia nominal en este caso 60 Hz. por lo que el rango debe estar entre 60.6 y 59.4 Hz.

### 4.3 Técnica para la recolección de datos de resistencia a tierra

La medición de tres puntos es usada para la medición de resistencia a tierra de la varilla a tierra y la parrilla. La diferencia de potencial entre las varillas X y Y es medida por un voltímetro y la corriente entre la varilla X y Z es medida por un amperímetro.

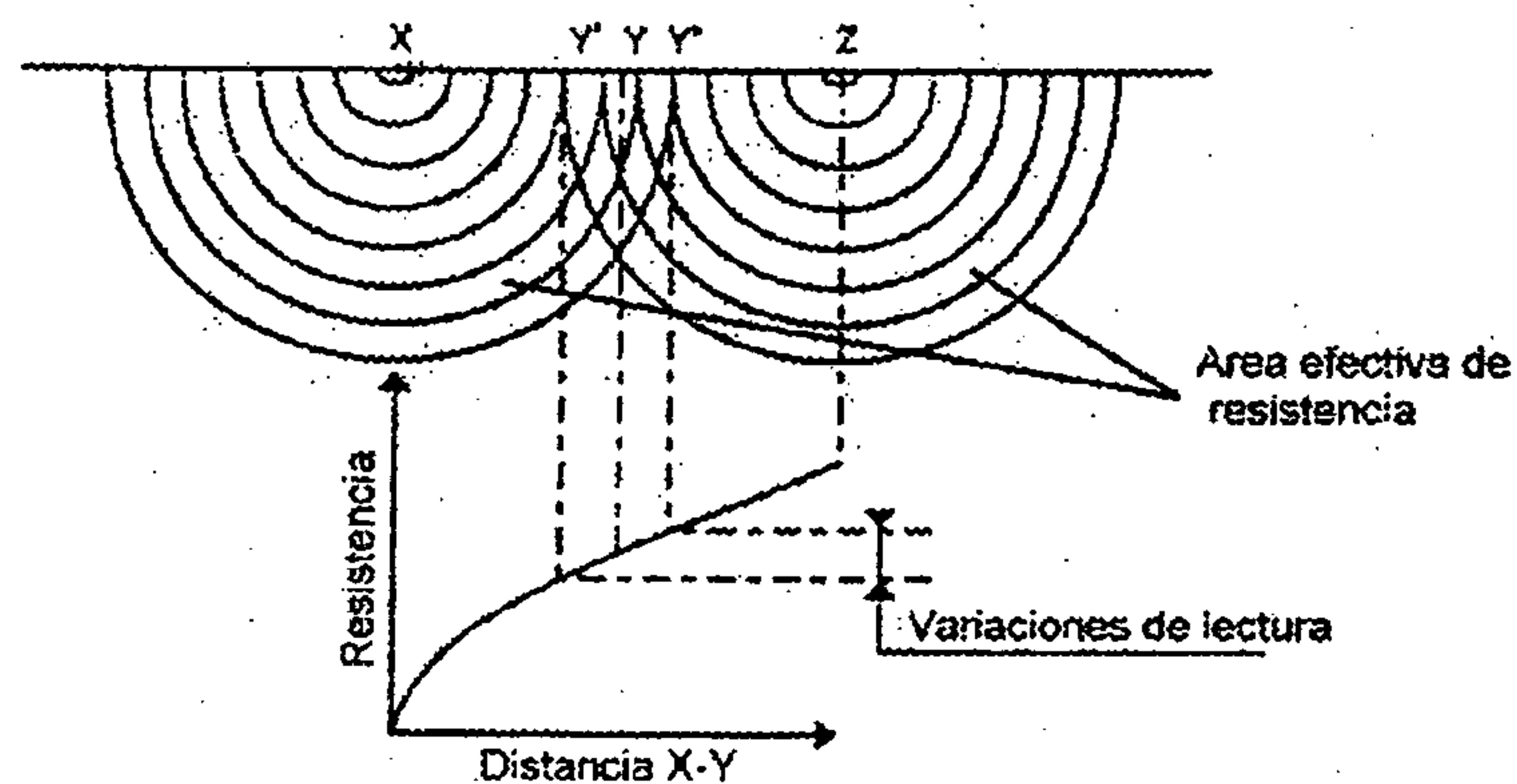
Por la ley de Ohm  $E=RI$  o  $R=E/I$ , con lo cual obtenemos que la resistencia del electrodo a tierra es R.

Figura 35. Medición por tres puntos



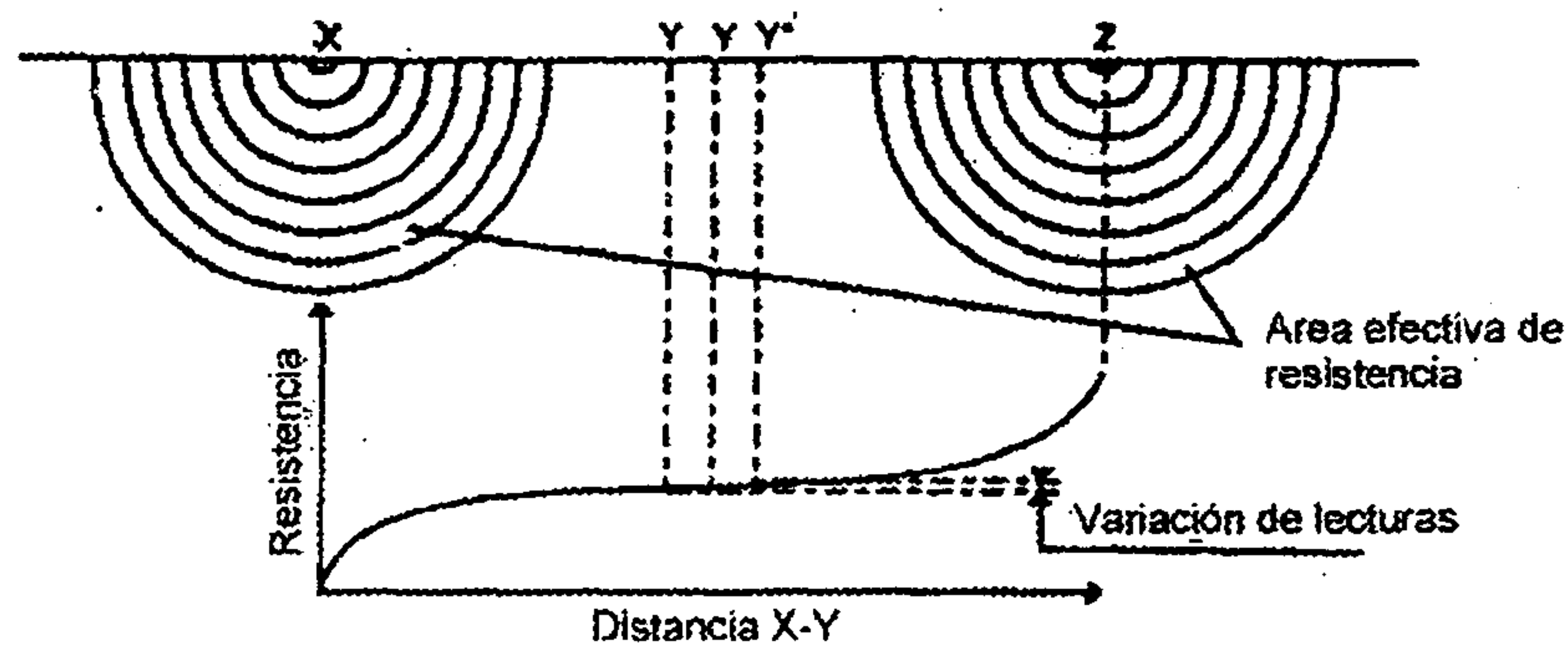
La meta de la medición precisa de la resistencia a tierra en el lugar, es poner el electrodo Z lo suficientemente lejos del electrodo que esta bajo test para que el potencial auxiliar del electrodo y este afuera del área de resistencia efectiva de los dos electrodos de tierra. La mejor forma de encontrar que el potencial auxiliar de la varilla Y esta fuera del área de resistencia efectiva es moverla entre X y Z y tomar lecturas en cada locación. Si la varilla de potencial auxiliar Y esta dentro del área efectiva de resistencia un valor no exacto para la resistencia a tierra puede ser determinada, por lo tanto las variaciones entre las mediciones variaran notablemente.

**Figura 36. Resistencia por método de tres puntos**



En otro caso cuando la varilla de potencial auxiliar Y esta localizada fuera del área efectiva de resistencia y Y es movida para delante y para atrás la variación de las lecturas es mínima.

**Figura 37. Variación de resistencia contra distancia**



Usando el método descrito anteriormente se procedió a tomar varias mediciones en varios lugares del ingenio, para esto se utilizó un tester de resistencia a tierra digital marca AEMC modelo 4610. Los resultados de estas mediciones se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla XIV. Datos de tierras físicas**

Item	Ubicación	Resistencia a tierra				Observaciones
		52%	62%	72%	100%	
1	Turbos Cogeneración	0.4	0.6	0.8		Existe malla de tierras
2	Calderas de Cogeneración	0.4	0.53	0.65		Existe malla de tierras
3	Calderas Fábrica	1870	1880	1900		No existe red de tierras

15.84 mt 18.89 mt 21.94 mt 30.48 mt

Como se puede observar en los sitios donde existe una red de tierras los valores de resistencia a tierra están dentro de los parámetros que exige el NEC, y en los sitios donde se carece de una red de tierras están fuera de norma.

Por consiguiente en estos sitios se tendrá que instalar una red de tierras para que de esta forma dichos valores estén dentro de los valores deseados.



## **5. DISEÑO DE LA RED DE TIERRA**

### **5.1 Diseño de la red de tierra**

Existen tres razones básicas para una conexión a tierra:

1. Para limitar los voltajes causados por descargas atmosféricas o por contacto accidental con conductores de más alto voltaje.
2. Para estabilizar el voltaje durante operaciones normales.
3. Para facilitar la operación de los dispositivos de sobrecorrientes, tales como fusibles, relés, bajo condiciones de falla a tierra.

Existen otras razones adicionales muy importantes las cuales podemos resumir a continuación, seguridad de las personas que utilizan el equipo o sistema, protección del equipo conectado al sistema, operación correcta del equipo especialmente cuando se administran datos, economía mayor efectividad de costo, legal exigido por las leyes.

#### **5.1.1 Tipos de puesta a tierra**

Existen varios sistemas y circuitos de tierra, los cuales se conectan a tierra, estos sistemas son los siguientes:

1. Sistema de CA
2. Sistema de tierra de CD
3. Sistema a tierra de protección frente a rayos
4. Tierra del equipo
5. Tierra para ruidos eléctricos
6. Tierra de protección frente a EMI/RFI y ESD

Los circuitos pueden encontrarse en varios de los sistemas mencionados. Todos los sistemas son conectados a tierra (tierra física) u otro objeto que haga las veces de tierra.

### 5.1.2 Estándares sobre tierra

A través de los años se han desarrollado técnicas efectivas de tierra. También se han encontrado problemas comunes que deben evitarse. Estas técnicas han sido compiladas en códigos de seguridad y publicaciones adoptados como estándares.

Uno de los códigos es el Código Eléctrico Nacional conocido como el (NEC), que rige para los Estados Unidos, el cual es un muy buen estándar para tomar como base para nuestros estándares. El código, en particular Artículo 250 o conexión a tierra es el que se tratará.

Por otra parte el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) publica estándares para instalaciones eléctricas. Generalmente sus publicaciones son manuales de diseño y explican en más detalle la teoría del NEC y explica las consecuencias a las variaciones del código. Estos manuales son publicados como estándares y son reconocidos por *American National Standards Institute (ANSI)*.

IEEE publica dos estándares aplicables a este respecto, uno de ellos se llama "*The Green Book*" y se conoce como el estándar IEEE Standard 142, este libro se titula "*Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*".

El otro libro se llama el "*Esmerald Book*", y se titula "*Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*". Se conoce como el IEEE STD 1100.

## **5.2 Electrodo de tierra**

### **5.2.1 Varillas de tierra**

El NEC permite un número de opciones para las conexiones a tierra, tales como tuberías metálicas de agua. Las varillas de tierra son generalmente preferidas debido a que proporcionan un electrodo conocido y controlable.

El código especifica para varillas de tierra en la sección 250-52 (c):

- 5/8" de diámetro o mayor si son fabricadas de hierro o acero
- 1/2" diámetro o mayor si son fabricadas de material no ferroso y listadas para este servicio.
- 8 pies mínimo de longitud y deben extenderse 8 pies como mínimo en el suelo
- Varillas de aluminio no son permitidas.

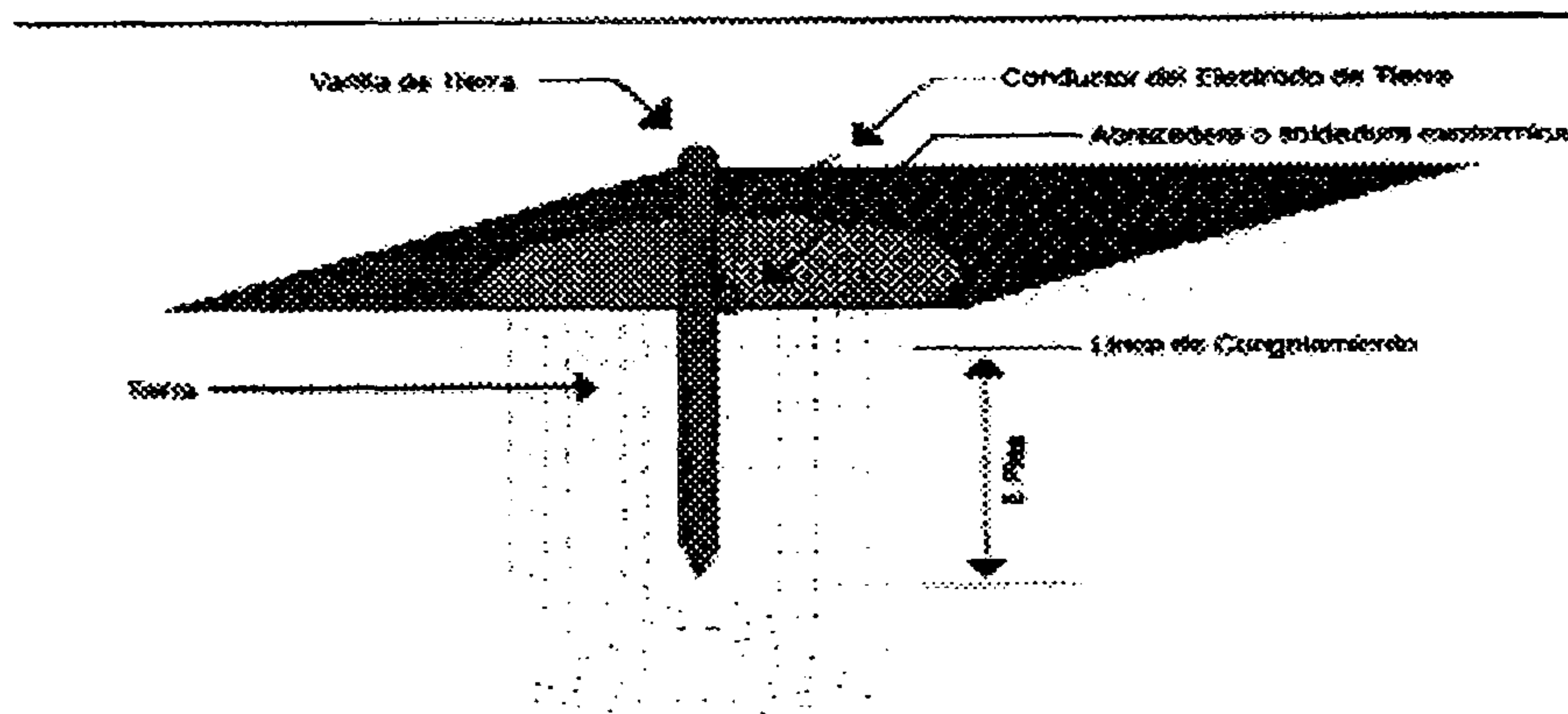
### **5.2.2 Tuberías metálicas**

El código permite tuberías como electrodos de tierra, si son:

- De 3/4" de diámetro o mayores
- Galvanizadas o revestidas para la protección contra la corrosión

La industria ha desarrollado un electrodo de tierra especial usando una tubería metálica. Es el electrodo llamado tierra química. Un hueco mayor de lo necesario se prepara y se rellena de ciertos químicos alrededor del tubo. El propósito de los materiales químicos utilizados es incrementar los iones libres disponibles reduciendo la resistencia de contacto

**Figura 38. Tierra química**



### 5.2.3 Otros electrodos

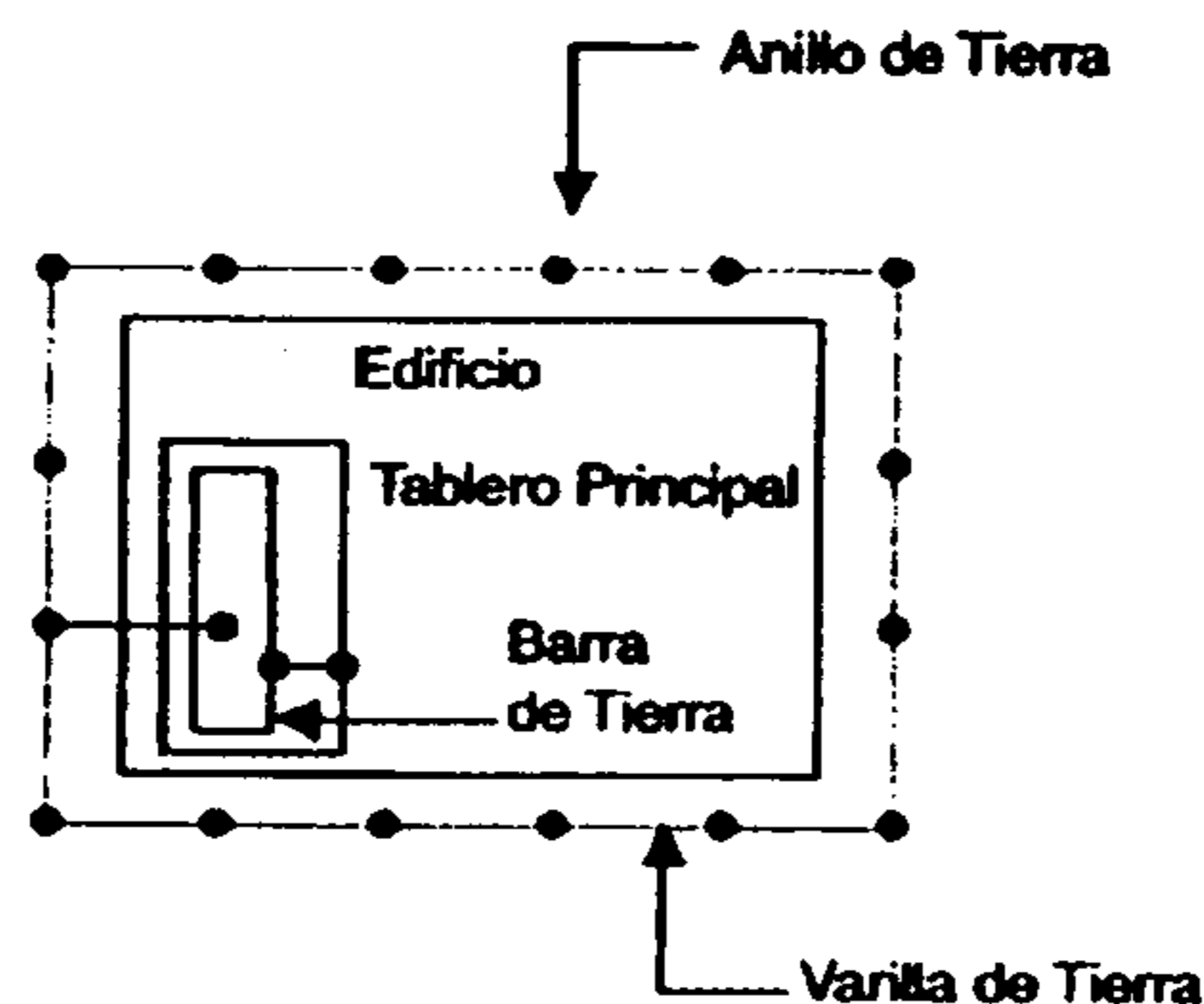
El código permite otros electrodos de tierra:

1. Placas metálicas
  - a. Con un mínimo de 2 pies cuadrados expuestos en la tierra.
  - b. 1/4" de espesor de hierro o acero
  - c. 0.06" de espesor de una placa de material no-ferroso
  - d. al menos 2 1/2 pies debajo de la superficie del suelo
  - e. placas de aluminio no son permitidas
  
2. Tubería metálica de agua
  - a. Si tiene conductividad eléctrica
  - b. Con 10 pies o más de contacto con la tierra



3. Electrodo encajado en concreto
  - a. En contacto directo con la tierra
  - b. Al menos 2" de concreto
  - c. Al menos 20 pies de longitud
  - d. Puede ser acero de refuerzo o conductor desnudo de cobre.
  
4. Estructura metálica del edificio efectivamente conectada a tierra
  
5. Sistemas o estructuras locales metálicas bajo tierra
  - a. Tubería metálica
  - b. Tanques metálicos bajo tierra
  
6. Anillo de tierra
  - a. Cable de cobre instalado en una zanja alrededor del edificio o estructura
  - b. El cable debe ser de al menos 20 pies de longitud
  - c. El cable no debe ser menor que cable número 2AWG
  - d. El cable debe ser enterrado debajo de la línea de congelamiento
    1. todas las varillas deben ser unidas con el cable
    2. enterradas al menos 2 1/2 pies debajo de la superficie

**Figura 39. Anillo de tierra**



### **5.3 Resistencia a tierra**

Resistencia a tierra es un término aplicado a la resistencia entre un electrodo de tierra y la misma tierra.

Para cumplir con los requerimientos del código la resistencia deberá ser 25 ohmios o menor. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que este nivel no es adecuado para sistemas sensitivos tales como sistemas de transmisión de datos. La resistencia a tierra para estos sistemas deben ser de 5 ohmios o menor. Una resistencia baja es requerida para minimizar ruidos eléctricos en sistemas sensitivos tales como computadoras.

Este nivel de 5 ohmios de resistencia de contacto no está especificado por el código. Los requerimientos del código son los requerimientos mínimos para seguridad. El código no fue preparado como guía de diseño para la operación de equipo. Los requerimientos de la industria electrónica, industria de telecomunicaciones y computadoras exigen resistencia a tierra de 5 ohmios o menor y en áreas de alta incidencia de rayos una resistencia a tierra de 1 ohmio o menor.

### **5.4 Conductividad del suelo**

La resistencia de contacto es la resistencia entre el área de superficie de la varilla de tierra y el suelo. La resistencia es función de la varilla de tierra y el suelo donde es instalado. Esto representa uno de los componentes de la resistencia a tierra. Las variables más importantes son:

1. Diámetro de la varilla de tierra
  - a. Un diámetro mayor aumenta el área de superficie y la resistencia
  - b. Doblando el diámetro produce 10% de reducción en resistencia

## 2. Longitud de la varilla de tierra

- a. Mayor longitud aumenta la superficie y reduce la resistencia
- b. Doblando la longitud produce un 40% de reducción en resistencia

## 3. Humedad del terreno

- a. El contenido de humedad baja la resistencia del suelo
- b. Durante el año la humedad varía y así mismo la resistencia a tierra

## 4. Temperatura

- a. Altas temperaturas bajan la resistencia a tierra
- b. Durante el año la temperatura varía y así mismo la resistencia a tierra
- c. Tierra congelada conduce pobremente

## 5. Minerales

- a. Un contenido alto de minerales proporciona más iones libres, reduciendo la resistencia a tierra
- b. La mayoría de suelos contienen sales y otros minerales, aún en cantidades pequeñas
- c. El agua de mar contiene sales lo que lo convierte en un buen conductor

## 6. Composición del suelo

- a. Terrenos arenosos son malos conductores, ya que la arena no es conductiva
- b. Los terrenos con materiales orgánicos son buenos conductores
- c. Los suelos rocosos no son conductivos y presentan un problema.

### 5.5 Conductor del electrodo de tierra

Es el conductor que conecta el electrodo de tierra (puede ser una varilla de tierra), con el conductor de tierra del equipo.

El conductor de tierra de acuerdo a la definición del código requiere ser conectado a los otros componentes del sistema de conexión a tierra del sistema.

El conductor del electrodo de tierra debe ser de un tamaño suficiente para transportar la corriente de diseño. También debe ser lo suficientemente robusto para resistir abuso físico o debe ser protegido con revestimiento adecuado. Este conductor puede ser permanentemente conectado en ambos extremos.

### **5.5.1 Tamaño**

El factor determinante para dimensionar el conductor del electrodo de tierra en sistemas de CA es el tamaño de los conductores de fase en el equipo de servicio. La tabla 250-66 del código provee los tamaños requeridos, basados en el tamaño kcmil de los cables de potencia.

### **5.5.2 Resistencia física**

De acuerdo a la sección 250-62, el conductor puede ser de cobre, aluminio o aluminio revestido de cobre. Estos materiales deben ser resistentes a la corrosión o deben ser protegidos contra la corrosión. Pueden ser sólidos o multifilares. Deben tener continuidad y sin empalmes, puede estar aislado, cubierto o desnudo. El cobre es el material preferido para el conductor del electrodo de tierra



### **5.5.3 Conductos de protección**

La sección 250-64 del código cubre lo relacionado en como proteger los conductores del electrodo de tierra entre el electrodo de tierra y la edificación. Si este conductor es lo suficiente largo y se encuentra en un área donde no existen posibilidades de daño, puede ser extendido desnudo y asegurado a la pared de la edificación. Si el cable es corto y existen posibilidades de daño a este, debe ser extendido a un conducto de protección.

El código permite extender el cable en conducto metálico, pero esta práctica no es recomendable. Sobrevoltajes causados por conmutación de cargas y descargas atmosféricas pueden inducir ruidos eléctricos en conductos metálicos los cuales afectan equipo electrónico sensible. El conducto metálico actúa como un obturador que restringe el flujo de energía a tierra, lo cual puede causar daños al equipo. Los conductos no metálicos son el método preferido para la protección del conductor del electrodo de tierra.

### **5.5.4 Conexiones**

La sección 250-8 del código permite la utilización de abrazaderas listadas como adecuadas para este propósito, conectores de presión, herrajes listados lo mismo que soldadura exotérmica. (Soldadura o tornillos para uso metálico no son permitidos). El código requiere que la conexión sea accesible para que pueda ser inspeccionada con facilidad. El método preferido para efectuar conexiones permanentes al electrodo de tierra es la utilización de soldadura exotérmica. Esta conexión elimina problema de corrosión, el aflojamiento de abrazaderas u otros herrajes tal como los de compresión.

### **5.5.5 Barras colectoras**

La sección 250-24 permite que el conductor del electrodo de tierra sea conectado a una barra colectoras. La misma sección también permite barras colectoras para la conexión del puente de unión principal y para el conductor de tierra del equipo. Generalmente se utilizan dos barras colectoras en el equipo de servicio. Una de ellas es la barra neutro y la otra es la barra de tierra donde el conductor conectado a tierra, el conductor del electrodo de tierra y el conductor de tierra del equipo pueden ser conectados. El puente de unión principal se utiliza para conectar estas dos barras conjuntamente.

### **5.6 Referencia única tierra**

El código permite múltiples electrodos de tierra, tales como varillas de tierra, tubería metálica y electrodos de placa. El código requiere que estos electrodos sean interconectados conjuntamente, a esto se le llama sistema de electrodo a tierra.

Esta unión de varios electrodos unidos conjuntamente es también conocido como única referencia a tierra, el objetivo es que las tierras suban y bajen de potencial conjuntamente. Como ejemplo tomemos la tierra del edificio el cual consiste del electrodo de tierra y una tierra separada para la protección contra rayos, el cual consiste de la varilla pararrayos o antena de captación, el conductor bajante y su propio electrodo de tierra, separado del sistema de tierra del edificio.

## 5.7 Sistemas de tierras

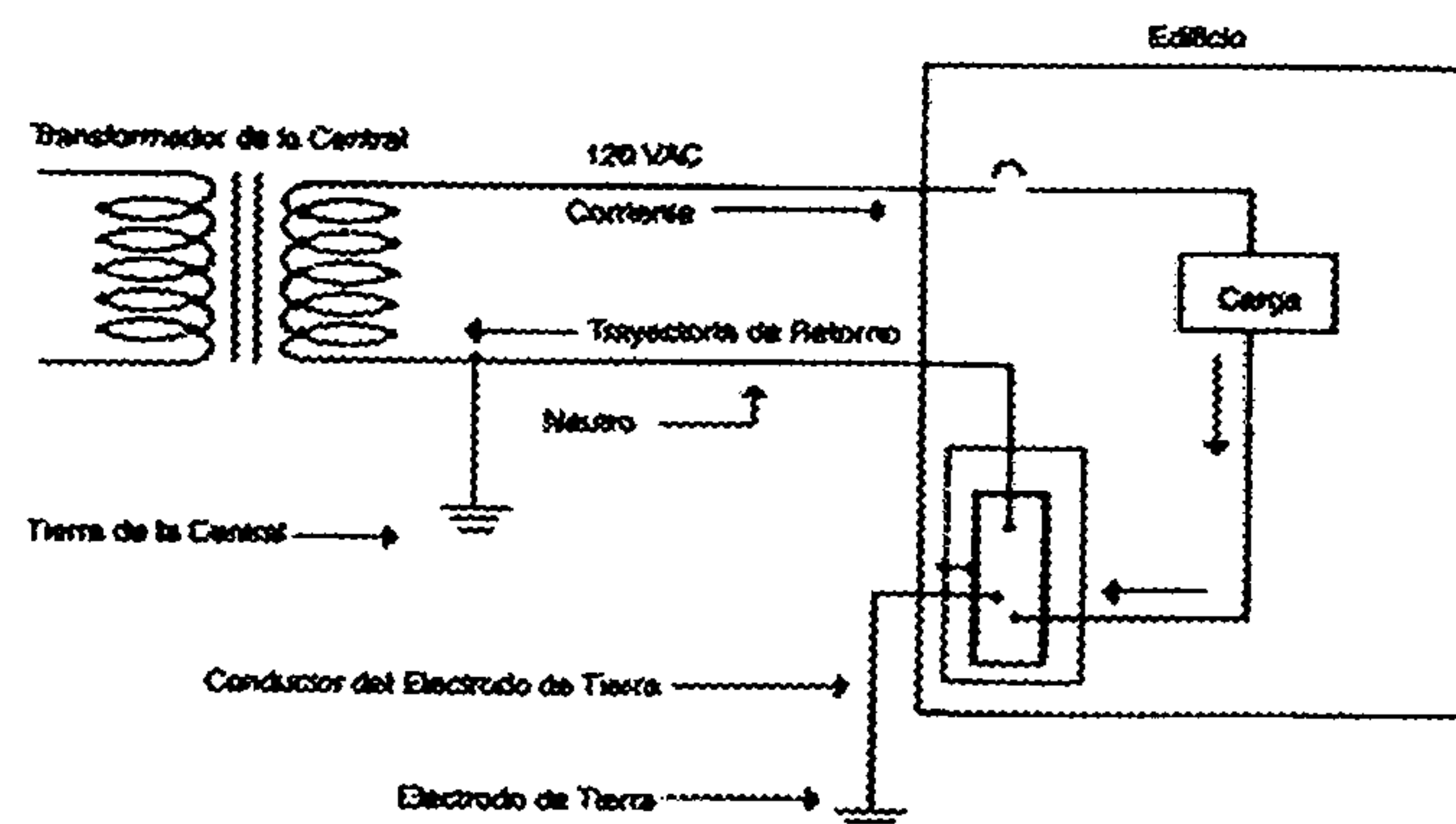
### 5.7.1 Sistemas Eléctricos de C.A.

El código requiere una conexión a tierra para un sistema eléctrico de CA mayor de 50 voltios cuando cumple con cierto criterio. Generalmente el conductor conectado a tierra es llamado conductor neutro.

El neutro es un conductor que transporta corriente. Es diseñado como conductor que transporta la corriente de retorno.

En un sistema monofásico menor de 150 volts, el neutro es la trayectoria de retorno para el sistema de distribución. La tierra no es la trayectoria de retorno sino el punto de referencia del sistema ver figura 40. Toda la corriente transportada por la fase o conductor vivo, debe retornar por el neutro. El neutro se conecta a tierra en el equipo de servicio o tablero principal.

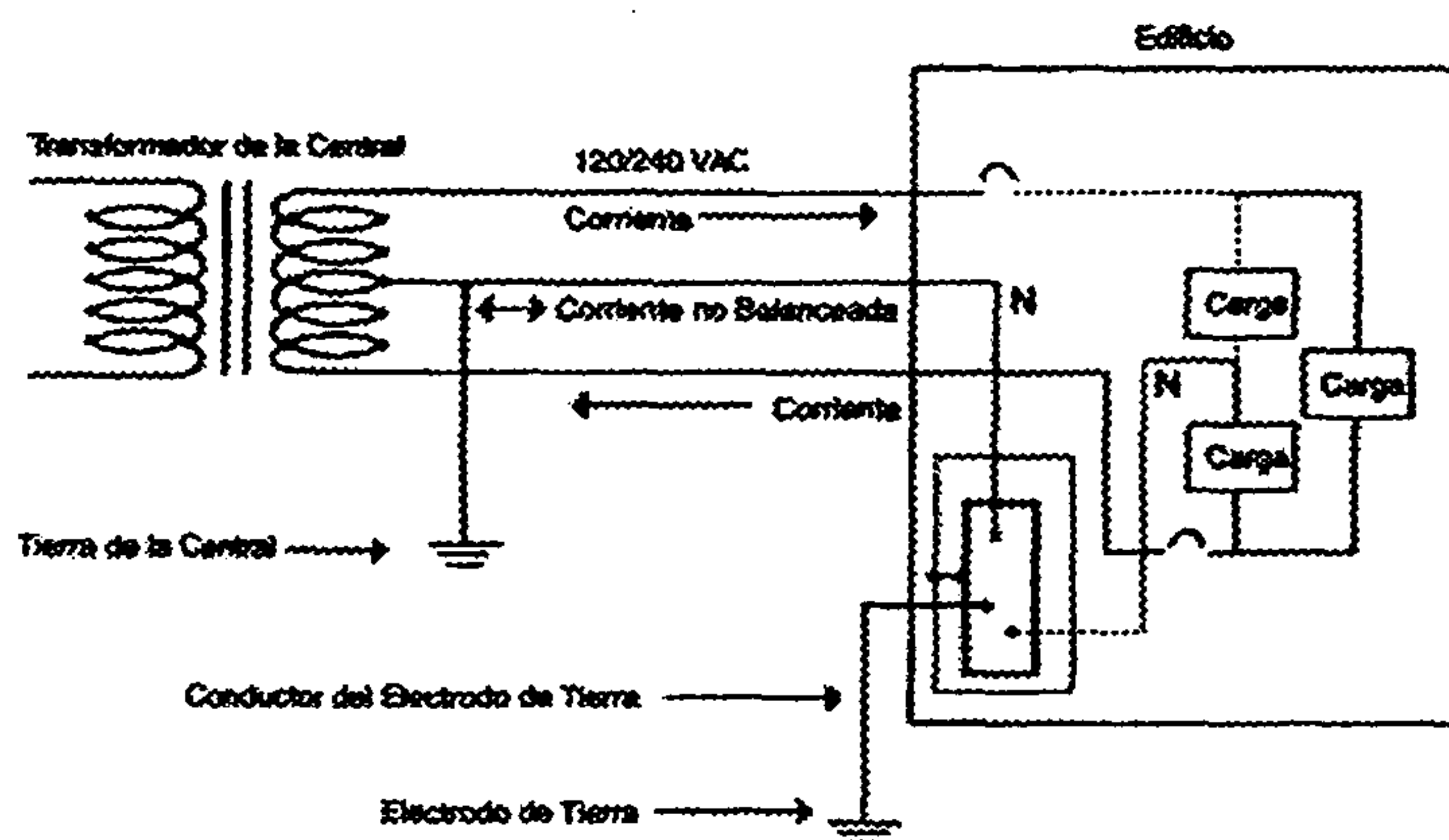
Figura 40. Sistema monofásico 2 hilos





En un sistema de fase dividida o sistema monofásico de tres hilos (dos fases y un neutro), utilizado en residencias y estructuras comerciales, se espera que el neutro transporte diferentes intensidades de corriente como se muestra en la figura 41.

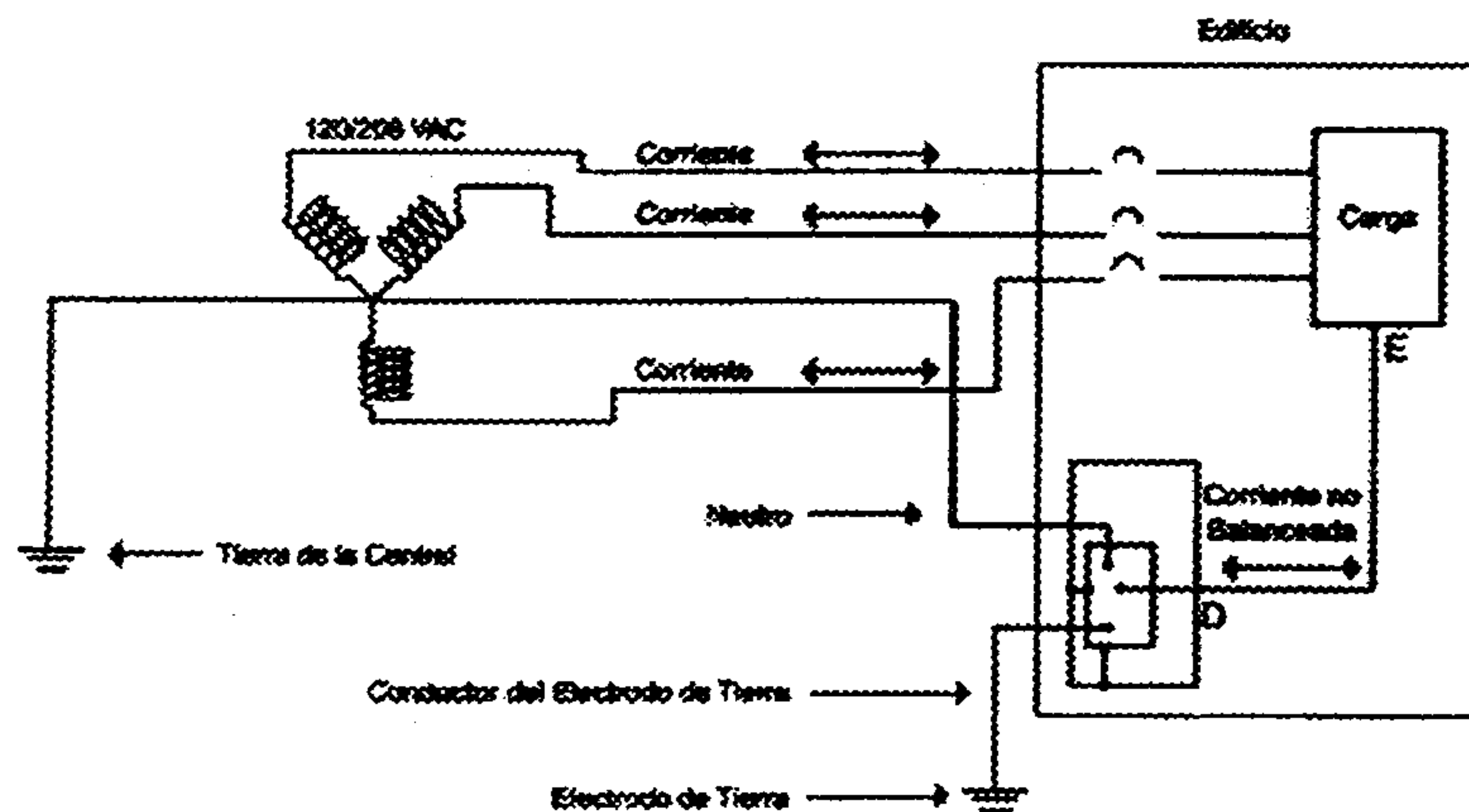
**Figura 41. Sistema monofásico 3 hilos**



La figura 32 muestra un sistema trifásico de 4 hilos conectado en estrella. Si la carga se encuentra balanceada no existirá corriente en el neutro. Pero en el mundo real siempre se encuentran alguna corriente en el neutro. Esto es debido a que no todas las cargas son trifásicas. Se puede observar que el voltaje entre el punto D y tierra no es necesariamente cero. Existe un potencial equivalente al potencial entre el punto D y E debido a un imbalance de cargas y a la impedancia del conductor neutro y sus conexiones. Con cargas no lineales y corrientes armónicas, el voltaje entre el neutro y tierra puede ser alto. El punto D se encuentra referenciado a tierra. La longitud del conductor de tierra puede afectar el voltaje entre el punto D y tierra.



Figura 42. Sistema trifásico 4 hilos



El código proporciona guías para calibrar el neutro en dos categorías: neutro del servicio de entrada y alimentadores. Dimensionar el neutro es muy importante, es un conductor que acarrea corriente y además transporta corrientes armónicas.

Entrada de servicio: Sección 250-24(b) del código indica que el tamaño del neutro o conductor conectado a tierra debe basarse en el criterio siguiente:

- No menor que el conductor del electrodo de tierra requerido en la tabla 250-66
- No mayor que el mayor conductor no conectado a tierra o conductor de fase.
- No menor que un 12.5% del mayor conductor de fase de servicio, si el conductor de fase es mayor que 1100 kcmil de cobre o 1750 kcmil de aluminio.

El código hace referencia acerca del tamaño del neutro para cargas no lineales.

Neutro alimentador: La sección 220-22 del código cubre el tamaño del neutro como alimentador. Un neutro alimentador es el conductor neutro entre el desconectar de servicio y el último interruptor de circuito de un sistema derivado ramal. Estos neutros deben ser dimensionados para un 200% a 12.5% para cargas de enseres domésticos de acuerdo al código.

Esta sección también indica que no habrá reducción de la capacidad del neutro para la porción de carga que consista de cargas no lineales, en este caso el neutro debe tener la misma capacidad que los conductores de fase de servicio.

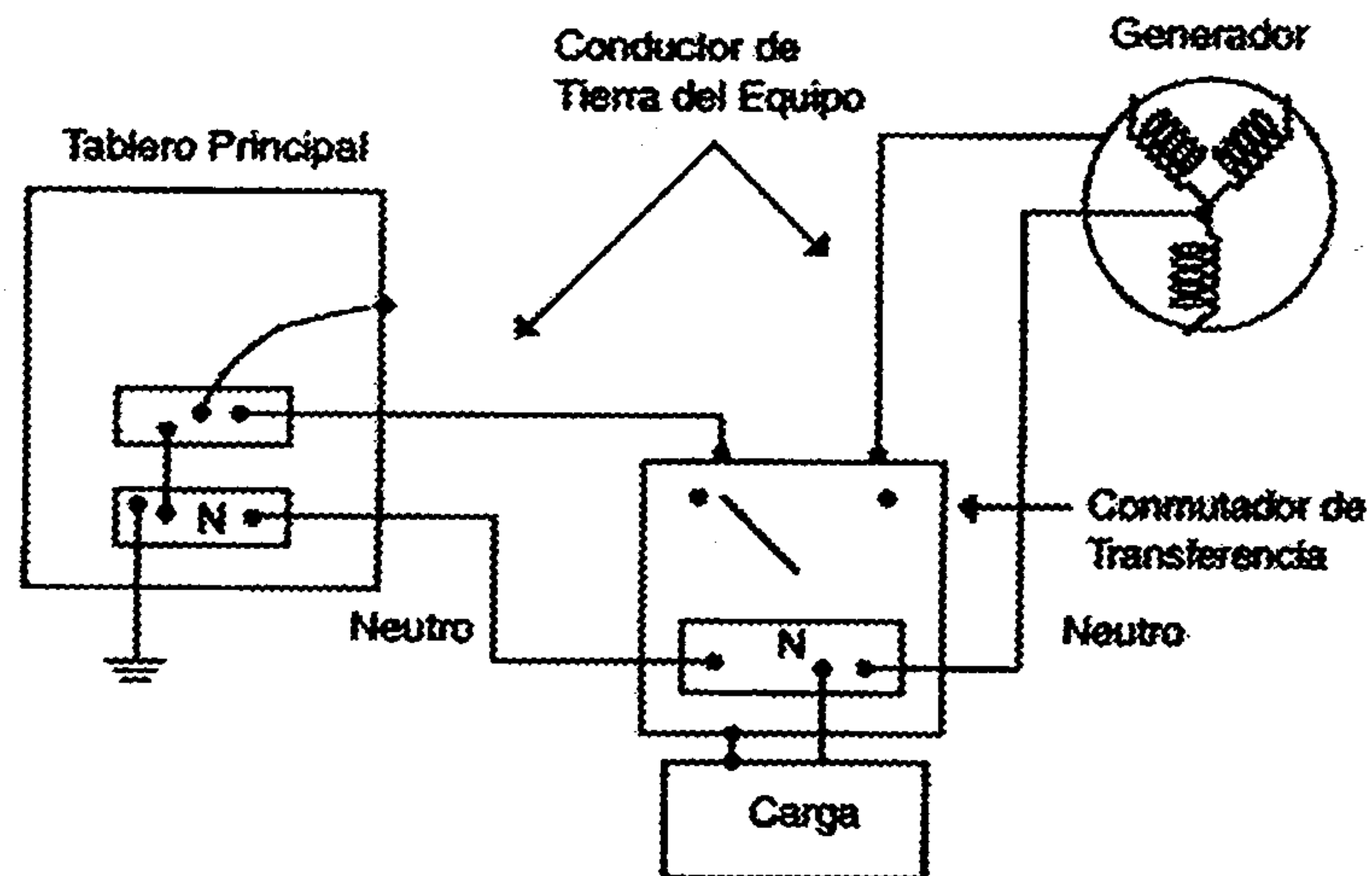
### **5.7.2 Generadores de CA permanentes**

En la industria de telecomunicaciones, es práctica común instalar generadores de respaldo en sitios remotos y oficinas de conmutación. Estos generadores suministran la energía de emergencia en el evento de una interrupción de la energía de la central eléctrica. Esta práctica es vital para la industria de teléfonos y telefonía celular.

Estos generadores usualmente se instalan dentro del edificio que al que suministran. Usualmente tienen un conmutador de transferencia, manual o automático, para transferir el servicio de la central al generador y de nuevo al servicio de la central cuando este servicio es renovado. Estos generadores fijos o permanentes pueden ser cableados como sistemas derivados separadamente o como parte del sistema eléctrico del edificio.

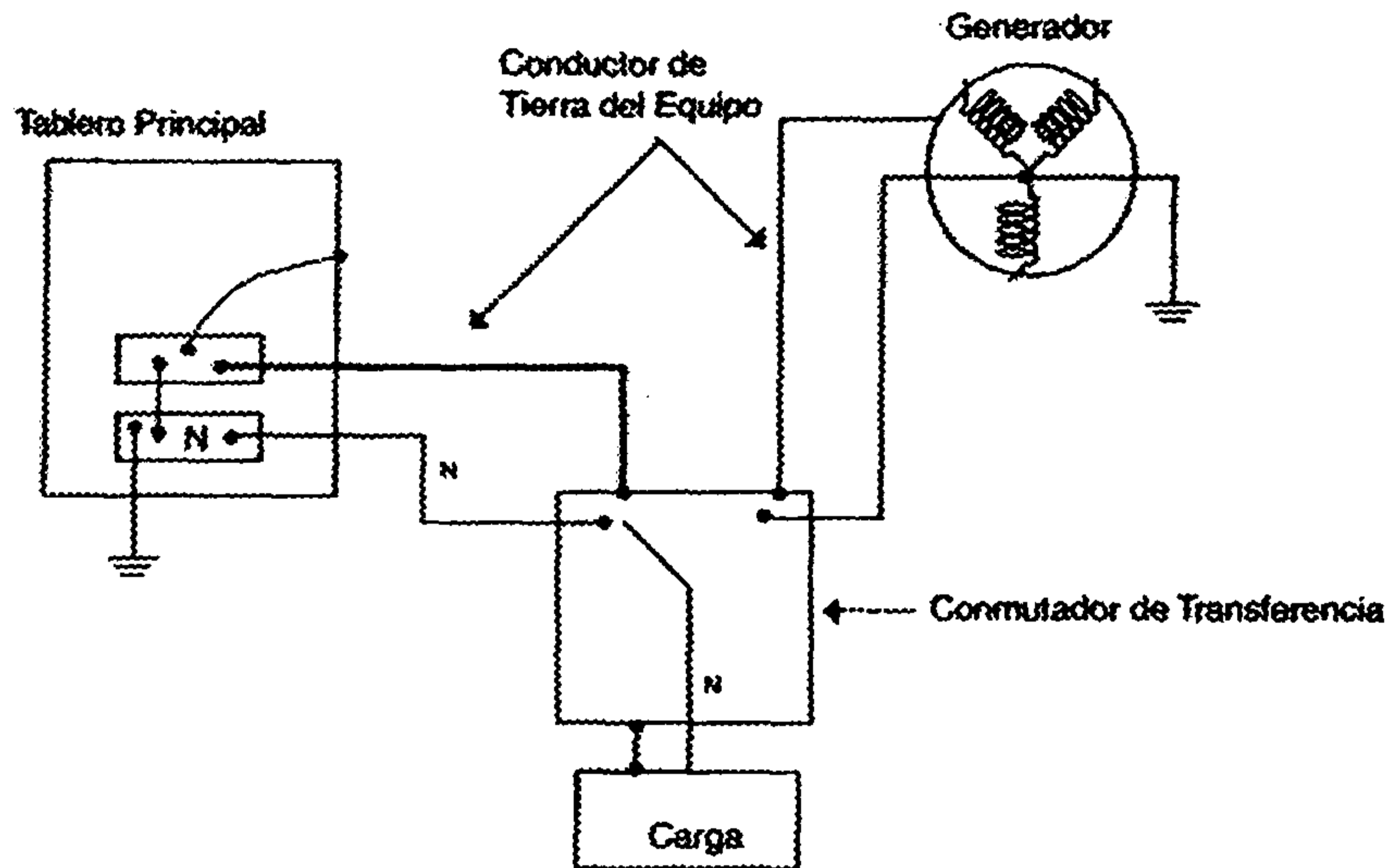
Se puede afirmar que el cableado interno del generador determina la forma de su instalación. Si el neutro a la carga que alimenta, no se desconecta por medio del conmutador de transferencia, el generador no se considera como un sistema derivado separadamente ver figura 43. Se debe observar que el neutro del generador y el neutro del servicio están sólidamente conectados y estos conductores se conectan en el equipo de servicio.

Figura 43. Sistema no derivado separadamente



Si el neutro es desconectado por el conmutador de transferencia el sistema se considera como un sistema derivado separadamente. El generador requiere entonces un puente de unión entre el marco del generador y el neutro del generador. El conductor de electrodo de tierra del generador debe ser conectado a un electrodo de tierra. El electrodo debe ser ubicado tan cerca al generador como sea posible. Ver la siguiente figura 44 y como un generador es considerado como un sistema derivado separadamente

**Figura 44. Sistema derivado separadamente**



### 5.7.3 Sistemas de DC

La parte H de la sección 250 trata sobre los sistemas de CD. La sección 250-162 trata dos sistemas uno de dos hilos y el otro de tres hilos. Estos dos sistemas son:

- Un sistema de dos hilos entre 50 y 300 voltios
- Un sistema de 3 hilos que suministra el cableado del edificio.

Sistema de dos hilos: un sistema de 2 hilos mayor de 50 voltios, pero menor de 300 voltios será conectado a tierra, con tres excepciones. Las excepciones son listadas en 250-162(a).

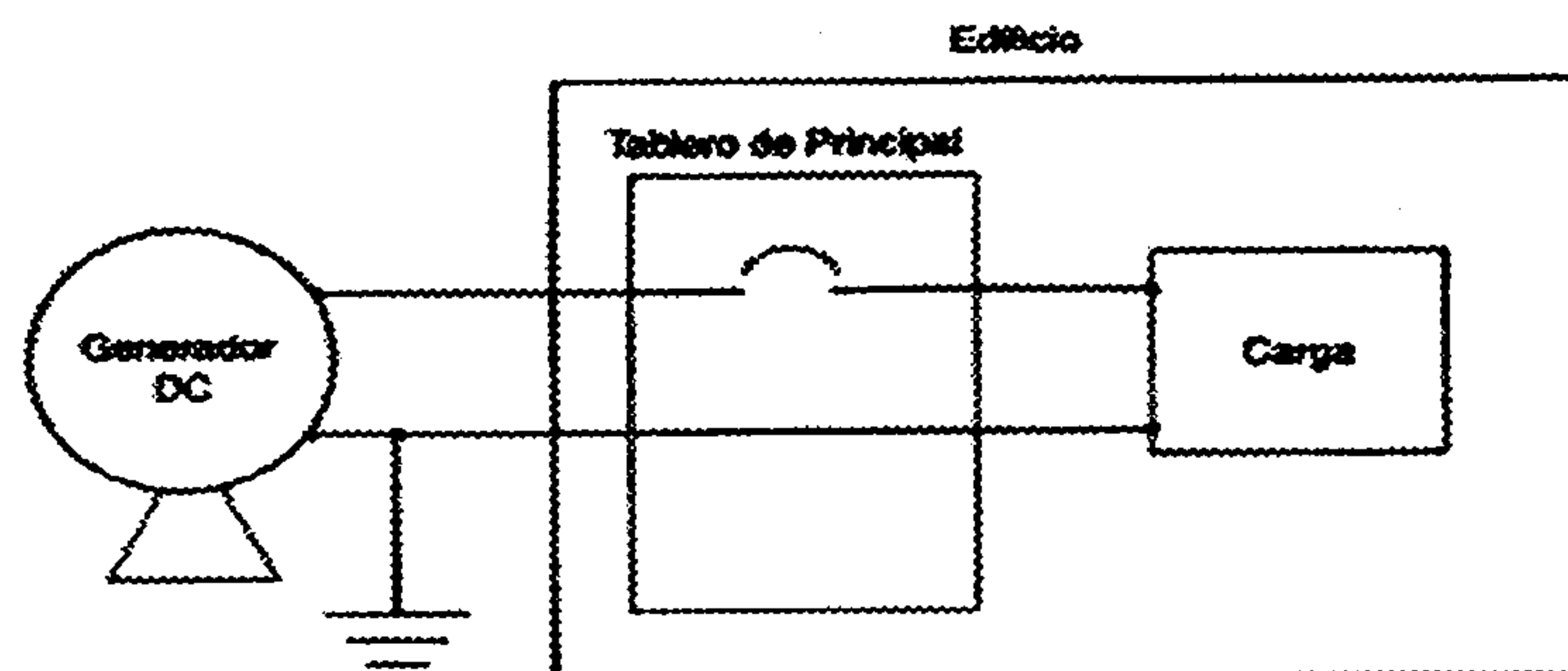
Sistema de tres hilos: el código requiere que el neutro de un sistema de CD de tres hilos sea conectado a tierra. Sección 250-162(b). No existe ninguna excepción.



Los requerimientos de conexión a tierra es el mismo para los dos sistema. Estos requerimientos dependen de si la fuente se encuentra fuera o dentro del edificio.

Si el sistema de CD fuera del edificio, la conexión a tierra se hace en una o mas estaciones de suministro y no se hace en los servicios individuales o en el cableado dentro del edificio figura 45.

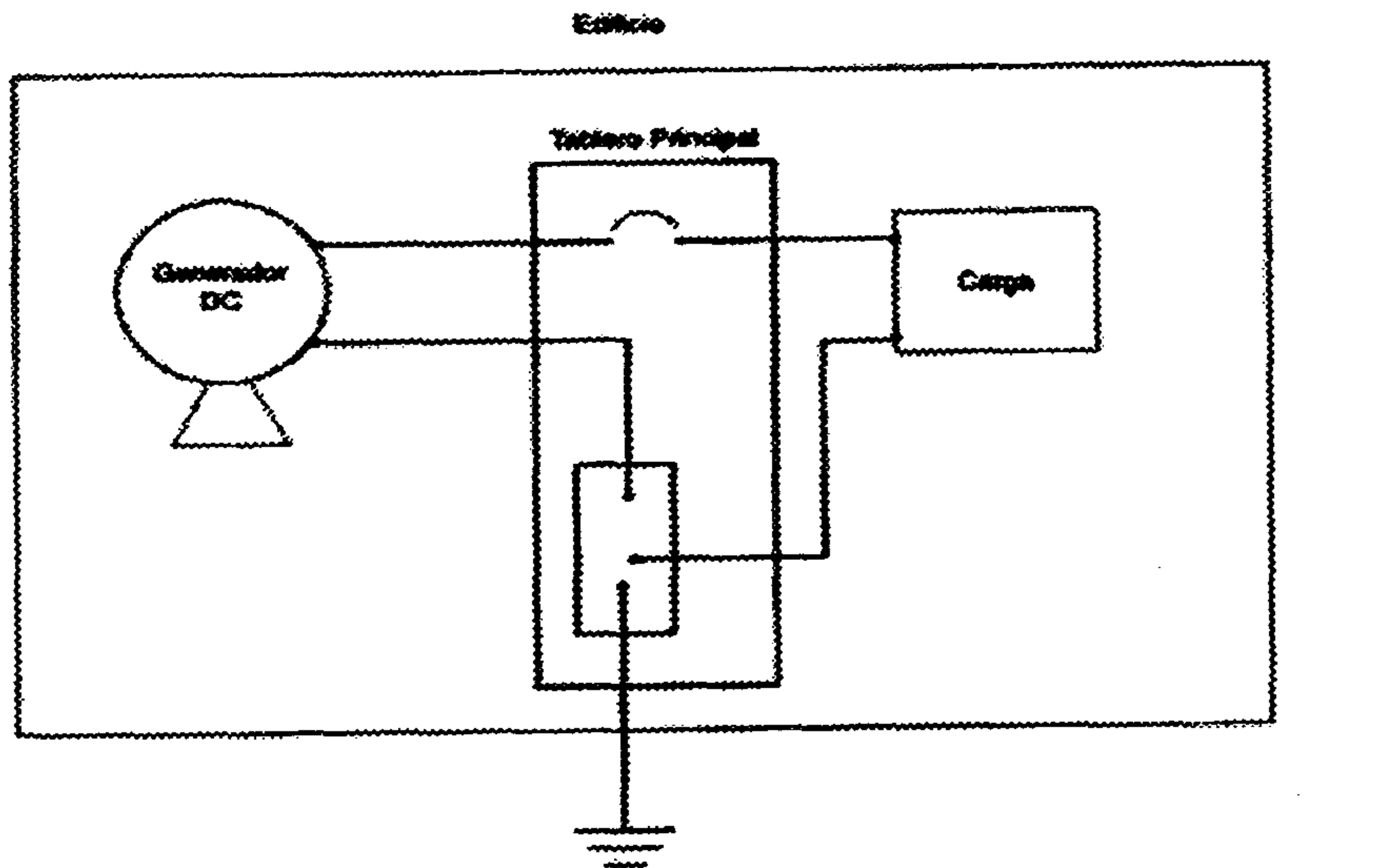
**Figura 45. Generador DC ubicado fuera del edificio**



Si la fuente de CD esta ubicada dentro del edificio, una conexión a tierra debe hacerse en uno de los puntos siguientes:

- La fuente
- El primer desconectador de servicio o interruptor de circuito
- Por medios que logren un sistema equivalente de protección utilizando equipo listado y aprobado ver figura 46.

**Figura 46. Generador DC ubicado dentro del edificio**



#### **5.7.4 Tierras de equipos**

Los requerimientos para la conexión a tierra del equipo se encuentran a lo largo del artículo 250 del NEC, partes de otros capítulos también tratan algunos aspectos de conexión a tierra del equipo.

La sección 250-2b requiere que los materiales conductivos donde se encuentran los equipos o conductores o que forman parte del equipo sean conectados a tierra para limitar el voltaje a tierra de estos materiales.

La sección 250-90 indica que unión eléctrica debe ser proporcionada para asegurar continuidad eléctrica y debe tener la capacidad para conducir de una forma segura cualquier corriente de falla que pueda ser impuesta sobre cualquier punto del circuito.

La sección 250-110 requiere que las partes metálicas, que no transportan corriente, y que pueden ser energizadas, serán conectados a tierra, bajo cualquiera de las siguientes condiciones:

- Donde suministradas por medio de conducto metálico u otro método de cableado que suministra una tierra del equipo.
- Donde el equipo opera con cualquier terminal por encima de 150 voltios a tierra.

La sección 250-112 indica que las partes expuestas, que no transporten corriente serán conectadas a tierra sin importar el nivel de voltaje. Existen excepciones específicas en algunos lugares del código, pero la mayor parte de los objetos metálicos deben ser conectados a tierra. Básicamente el código enfatiza la puesta a tierra de partes metálicas que pueden ser energizadas y donde existe la posibilidad de contacto.

La sección 250-2d que la trayectoria de la corriente de falla debe ser permanente, continuidad eléctrica, y ser capaz de conducir de una forma segura la máxima corriente de falla que pueda ser impuesta y de suficiente baja impedancia para facilitar la operación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente bajo condiciones de falla.

La sección 250 -118 discute los diferentes tipos de conductores de tierra que pueden ser utilizados. Tipos permitidos, pero no se limitan a los siguientes:

- Alambre de cobre (u otro alambre resistente a la corrosión)
- Conducto rígido metálico
- Conducto flexible metálico
- Bandeja portacables

La sección 517-13 cubre una conexión a tierra desde el punto de vista de una facilidad para el cuidado de la salud. Esta sección exige un alambre de tierra aislado que se extiende junto con los conductores del circuito al equipo. Existen ciertas situaciones especiales en hospitales, las cuales requieren mayor cuidado.

### **5.7.5 Tierra para rayos**

Proporcionar protección para un edificio es más fácil que la protección para equipo electrónico o eléctrico.

Un buen sistema de protección contra rayos debe consistir en:

- Varillas pararrayos a antenas de captación
- Conductores bajantes de calibre necesario
- Electrodo de tierra con una resistencia a tierra de baja impedancia
- Electrodo de tierra interconectado al sistema electrodo de tierra del edificio.

Los rayos no tienen que caer de forma directa al equipo. Una caída de un rayo en el sistema de protección contra rayos puede aún dañar equipos electrónicos, especialmente si cae en las líneas de energía, teléfonos, cables de tv. Los daños causados por caídas directas de rayos al equipo son obvios. Pero los rayos no tienen que caer directamente para causar daños a estos equipos. Una caída de un rayo en la vecindad de las líneas de teléfonos puede causar daños en el equipo electrónico. La caída de un rayo en la vecindad de las líneas de servicio generará un sobrevoltaje en el transformador ubicado en el poste, y de éste al edificio. Este sobrevoltaje puede viajar dentro del edificio a través de los conductores de corriente y producir sobrevoltajes transitorios en los circuitos electrónicos de los equipos.



Los sobrevoltajes pueden destruir equipos electrónicos inclusive cuando el rayo fue originado aproximadamente 1/4 de milla de distancia.

Este mismo rayo puede inducir sobrevoltajes transitorios por las longitudes de los cables de teléfonos extendidos por los mismos postes de los cables de energía. Estos sobrevoltajes transitorios pueden viajar a través de las líneas telefónicas entrar al edificio y dañar los equipos de telecomunicaciones conectados a estas.

La protección contra rayos del edificio no proporciona la adecuada protección contra sobrevoltajes transitorios en las líneas de servicio o en las líneas de teléfono. La instalación de equipo apropiado en las líneas de entrada es la mejor protección.

El sistema básico de la protección contra rayos consiste en un número de varillas pararrayos, un mínimo de dos conductores bajantes en una estructura pequeña y los electrodos de tierra. El NFPA 780 proporciona los detalles específicos de estos requerimientos.

#### **5.7.6 Tierras aisladas**

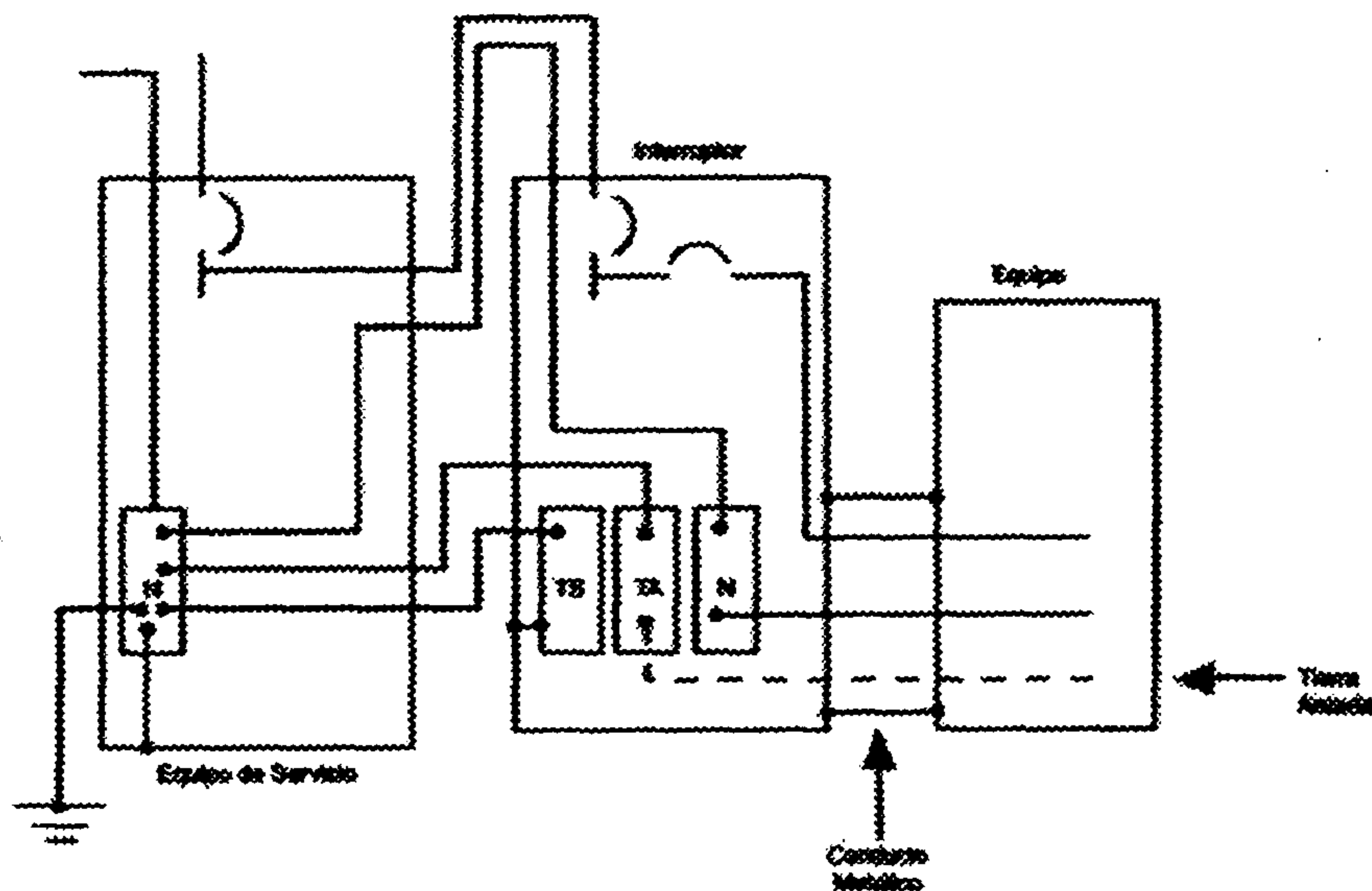
Existen dos tipos de tierras aisladas que comúnmente se conocen con el nombre de:

- El conductor de tierra aislado (tierra libre de ruido para equipo electrónico sensible)
- Zona de tierra aislada (en telecomunicaciones, un área aislada del resto del equipo, designada para equipo electrónico sensible)

Ninguno de los dos tipos de tierras aisladas esta en violación de las normas técnicas de conexión a tierra ya vistas. Todo equipo eléctrico debe estar conectado a tierra con un conductor que no es el neutro ver figura 47.

El conductor de tierra del equipo se conecta a la barra de tierra, tanto en el tablero principal como en los secundarios. En telecomunicaciones, todos los conductores de tierra del equipo se conectan a una barra llamada barra de tierra principal.

**Figura 47. Equipo conectado con conductor de tierra aislada**



#### 5.7.6.1 Conductor de tierra aislada

Este diseño fue desarrollado para equipo electrónico sensible a ruidos eléctricos de las perturbaciones de la onda senoidal. En esta técnica de tierras, un cable individual de tierra, con aislamiento se extiende desde el equipo de servicio, sin tocar ningún objeto metálico a un receptáculo especial de tierra aislada donde se conecta el equipo sensible.



### 5.7.7 Tierra de generadores móviles

Un generador móvil es definido como un generador capaz de ser transportado a través de ruedas. Generadores móviles son de alta demanda en las industrias de telecomunicaciones, especialmente en zonas costeras donde existe la posibilidad de tormentas eléctricas. También son usados en lugares remotos como un suministro de energía en caso de emergencia.

En áreas de alta actividad de tormentas, la energía de suministro AC puede ser interrumpida por varios días, a veces semanas, después de una tormenta. Los operadores de sistemas de celulares usualmente tienen tomacorrientes montados en la parte exterior del edificio los cuales reciben el cable de los generadores. Un conmutador de transferencia se instala en el edificio para cambiar el suministro, de la central al generador.

El código menciona algunas regulaciones de seguridad en referencia al chasis del generador o el vehículo donde se encuentra montado. El código permite que el generador móvil no se conecte a tierra pero que el chasis del vehículo sirva como electrodo de tierra siempre que:

- El chasis del generador sea unido con el chasis del vehículo
- El generador suministre equipo montado en el vehículo
- El generador suministra equipo conectado con tomacorrientes montados en el vehículo
- El equipo y el herraje de conexión a tierra se unan al chasis del vehículo.



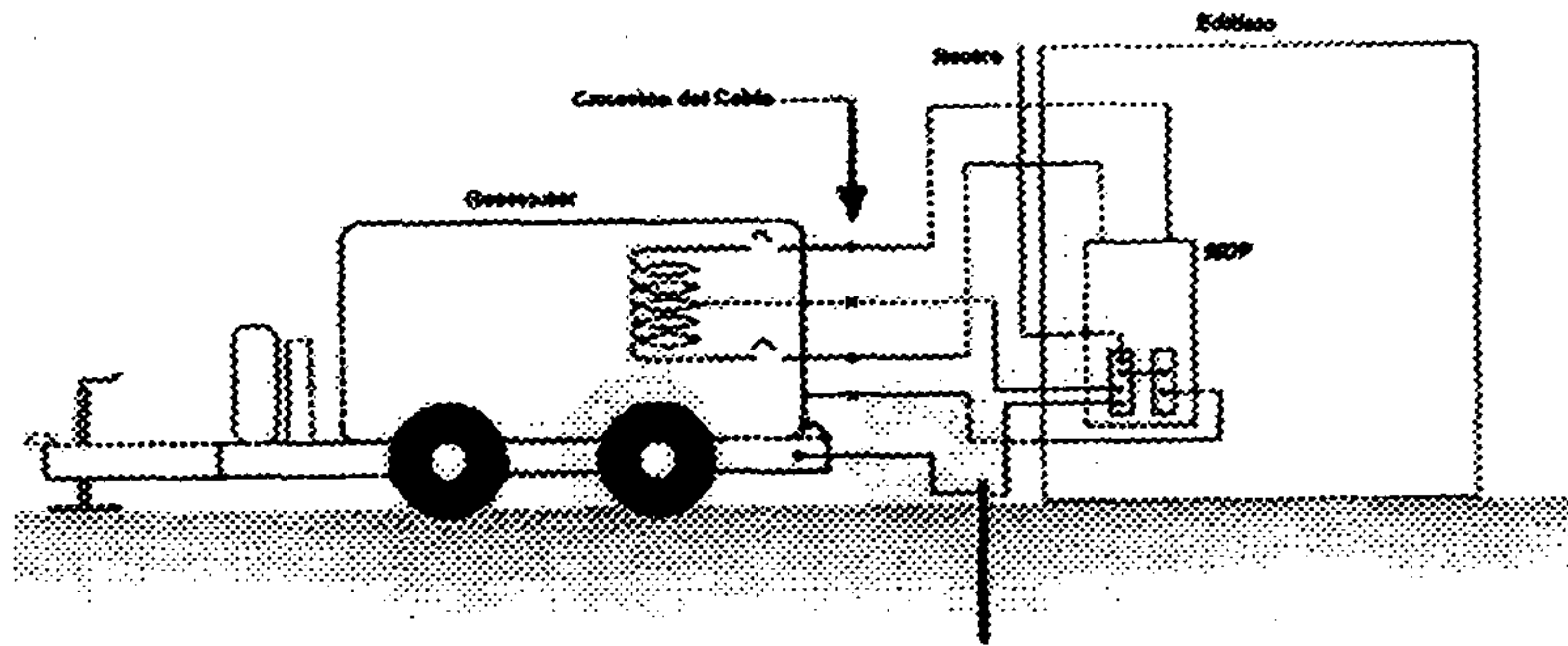
La estructura metálica de montaje del generador usualmente se nivela con gatos hidráulicos los cuales son instalados en la estructura. De esta forma existe una conexión directa a tierra. Sin embargo, el vehículo puede estar aislado de la tierra por las llantas, sin embargo, hoy la mayor parte de estas tienen franjas de acero dentro del material componente.

El código permite que el generador móvil sea conectado al marco del vehículo. La energía es suministrada por medio de un tomacorriente ubicado en su estructura o en el vehículo. Este es un ejemplo donde la conexión a tierra se hace a un objeto que hace las veces de la tierra. Se requieren dos problemas para crear una situación de peligro a la seguridad del personal. Que el neutro sea conectado a tierra, ya sea accidentalmente o debido a un cable neutro con aislamiento deteriorado. Segundo que un conductor de fase produzca un cortocircuito. Pero si el sistema se encuentra adecuadamente conectado a tierra de acuerdo al código se activarían los interruptores de seguridad en caso de falla.

En caso que un generador cuando esta enchufado en una estación celular que esta siendo servida por la compañía de suministro con energía AC antes de la interrupción de la central.

El edificio tendrá un electrodo de tierra, el neutro del edificio estará conectado al sistema electrodo de tierra del edificio. En este caso el neutro del generador y conductor de tierra del equipo se encuentran conectados a la tierra del edificio. El cable del generador al edificio es un cable multiconductor. Existe un conductor con aislamiento por para cada cable de fase, un neutro y una tierra de seguridad esto se muestra en al figura 49.

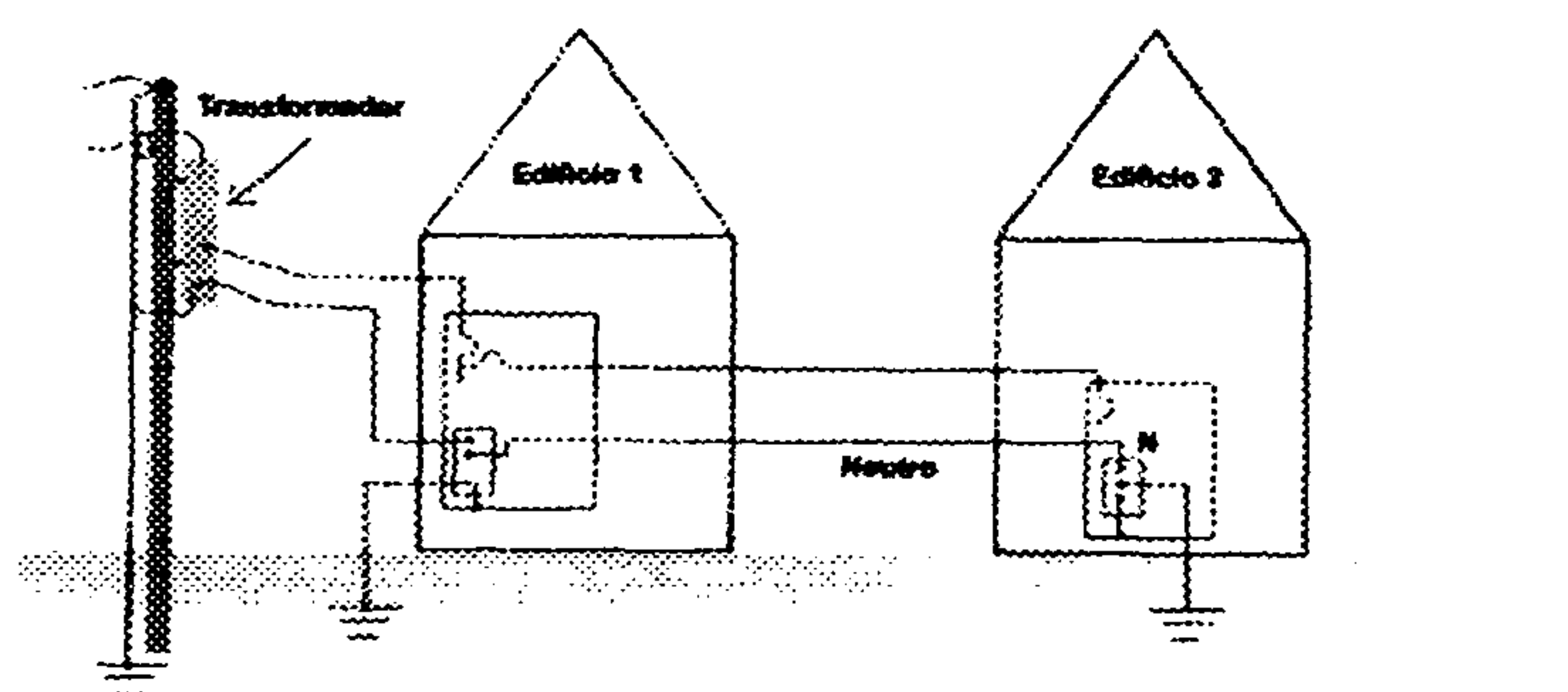
**Figura 49. Generador móvil conectado al edificio**



### 5.7.8 Tierras de múltiples edificios

Esta situación se refiere a un solo servicio de AC y dos o más edificios. El servicio de entrada se encuentra en el primer edificio, como lo muestra en la figura 50. Esta situación puede ser la de un garaje independiente de la residencia

**Figura 50. Conexión a tierra para dos edificios**



De acuerdo al código cuando existe un solo servicio y se extiende el conductor neutro al segundo edificio, se requiere una conexión a un electrodo a tierra

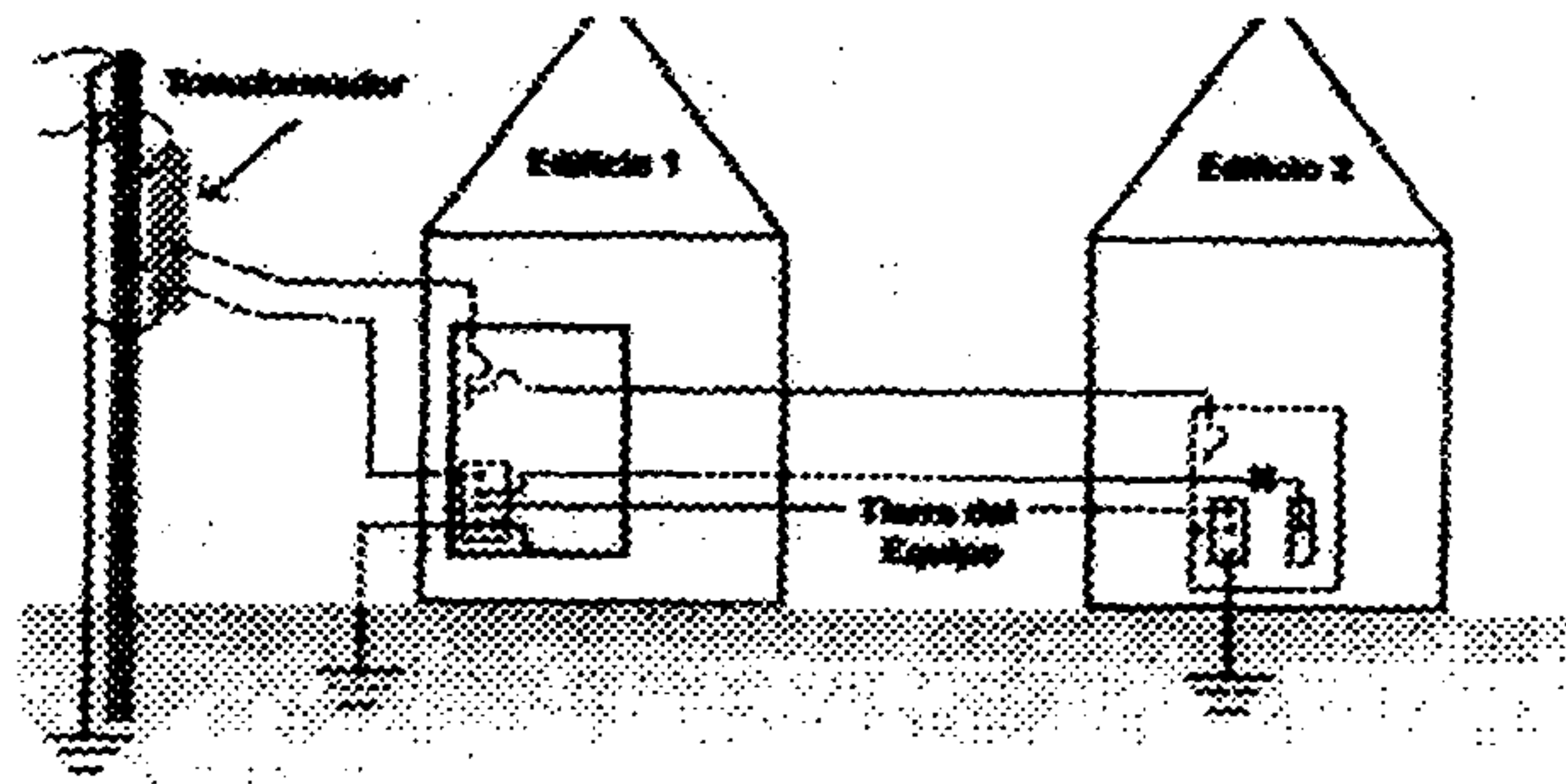
Usualmente cuando se extiende al mismo suministro al segundo edificio, el suministro en el primer edificio se puede considerar como alimentador y en el segundo edificio como entrada de servicio. Cuando no se extiende al segundo edificio ni el neutro ni el conductor de tierra del equipo, es necesario establecer una conexión a un electrodo de tierra en el segundo edificio. Se instala la barra de tierra, un puente de unión y se hace la conexión a un electrodo de tierra.

Cuando existe un solo servicio para dos edificios, con múltiples circuitos y se extienden los conductores neutro y tierra al segundo edificio, se requiere establecer la barra de tierra y conectarla a un electrodo de tierra, en el segundo edificio. También es necesario el puente de unión para la tierra del equipo. Es importante no establecer la unión neutro-tierra en el segundo edificio.

Lo mas importante en la puesta a tierra de dos o mas edificios, es que nunca deben existir trayectorias paralelas de retorno para la corriente que transporta el conductor neutro.

El cableado correcto para dos edificios se muestra en la figura 51. Ambos edificios tienen electrodos de tierra, los conductores de electrodo de tierra y tierra del equipo en el segundo edificio se interconectan. Existe un puente de unión principal en el segundo edificio, conectando la carcasa metálica del equipo con la barra de tierra. El circuito del segundo edificio se puede considerar como una entrada de servicio, lo que de acuerdo al código se requiere un electrodo de tierra.

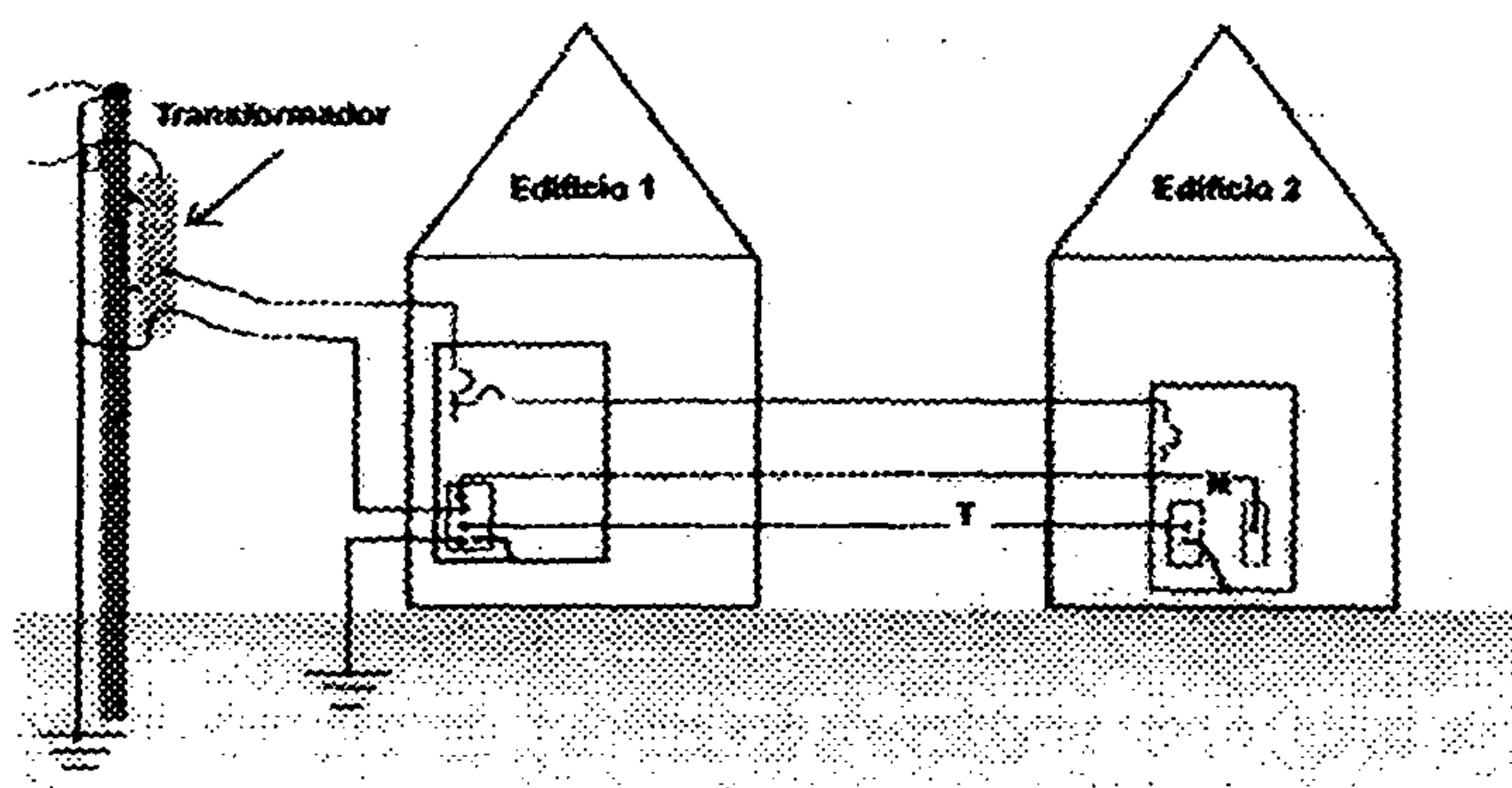
**Figura 51. Conexión a tierra para dos edificios**



Un conductor de tierra del equipo no se extiende al segundo edificio ya que el conductor neutro del primer edificio junto a los conductores de fase se consideran como los conductores de entrada de servicio para el segundo edificio. Como tal, se establece la conexión neutro-tierra en el primer edificio y se instala el electrodo de tierra conectado a esta entrada de servicio por medio del conductor del electrodo de tierra.

Otra situación especial se muestra en la figura 52, en este caso si el edificio es suministrado por un solo circuito derivado, con un conductor de tierra del equipo, no se requiere establecer un sistema electrodo de tierra o hacer una conexión si existe uno. Si se produjese una falla a tierra en el segundo edificio, se activaría el interruptor automático de seguridad.

**Figura 52. Una tierra para dos edificios**





Si existen varios circuitos o diferente equipo que requieren un conductor de tierra del equipo, tal como un serrucho eléctrico de mesa, entonces un electrodo debe instalarse. No es muy complicado enterrar una varilla y conectar el conductor del electrodo de tierra. Entonces el segundo edificio se convierte como un servicio de entrada, al igual del primer edificio.

#### **5.7.9 Tierras de sistemas de baterías**

La industria de telecomunicaciones utiliza batería para la operación de los equipos. Esto elimina los problemas transitorios e interrupción en el suministro de la central eléctrica. Si la pérdida de energía eléctrica de la central es de corta duración, tal como 30 minutos, no se experimenta ningún problema. El equipo continúa funcionando siendo suministrado por el sistema de baterías de alta capacidad.

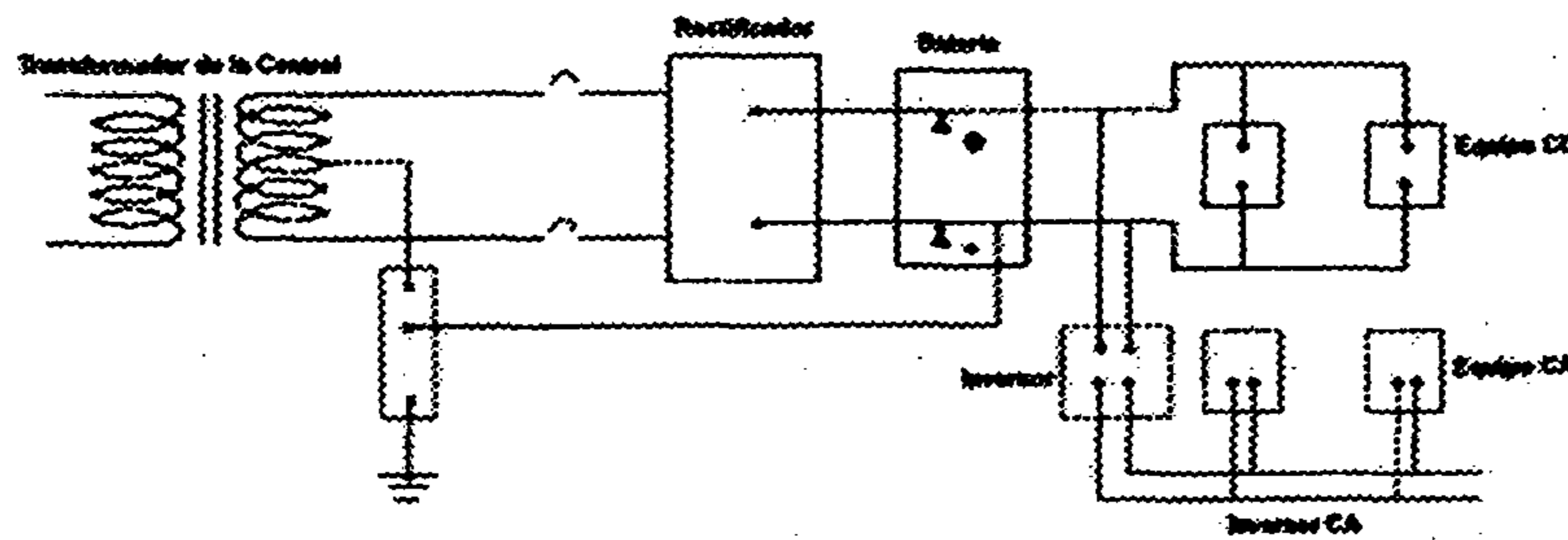
También los transmisores, controladores del sitio celular y otro equipo electrónico operan con voltaje dc suministrado por el banco de baterías. Las baterías son usualmente de 24dc o -48v dc. Las baterías se mantienen cargadas por los rectificadores/cargadores, y los rectificadores son suministrados por el sistema ac.

En sitios de telecomunicaciones el sistema de dc se encuentra ubicado en la misma estructura con el sistema ac, ya que la mayoría de los sistemas son menores de 50 voltios el código no requiere que el sistema sea conectado a tierra. Sin embargo, es una práctica de la industria conectar a tierra el sistema dc. Generalmente el positivo del de 48 voltios y el negativo del de 24 voltios si existen ambos sistemas en la misma estructura.

El terminal del sistema de dc que se va a conectar a tierra se debe conectar a la sección N de la barra de la tierra principal. También es importante tener en cuenta los problemas de armónicas los cuales pueden deteriorar los bancos de baterías de una

forma prematura. Por supuesto, el marco de los rectificadores necesita ser conectado a tierra. El marco del tablero de distribución de dc debe conectarse a la sección N de la barra de tierra principal, como se muestra en la figura 53.

**Figura 53. Sistema conectado a tierra suministrado por batería**



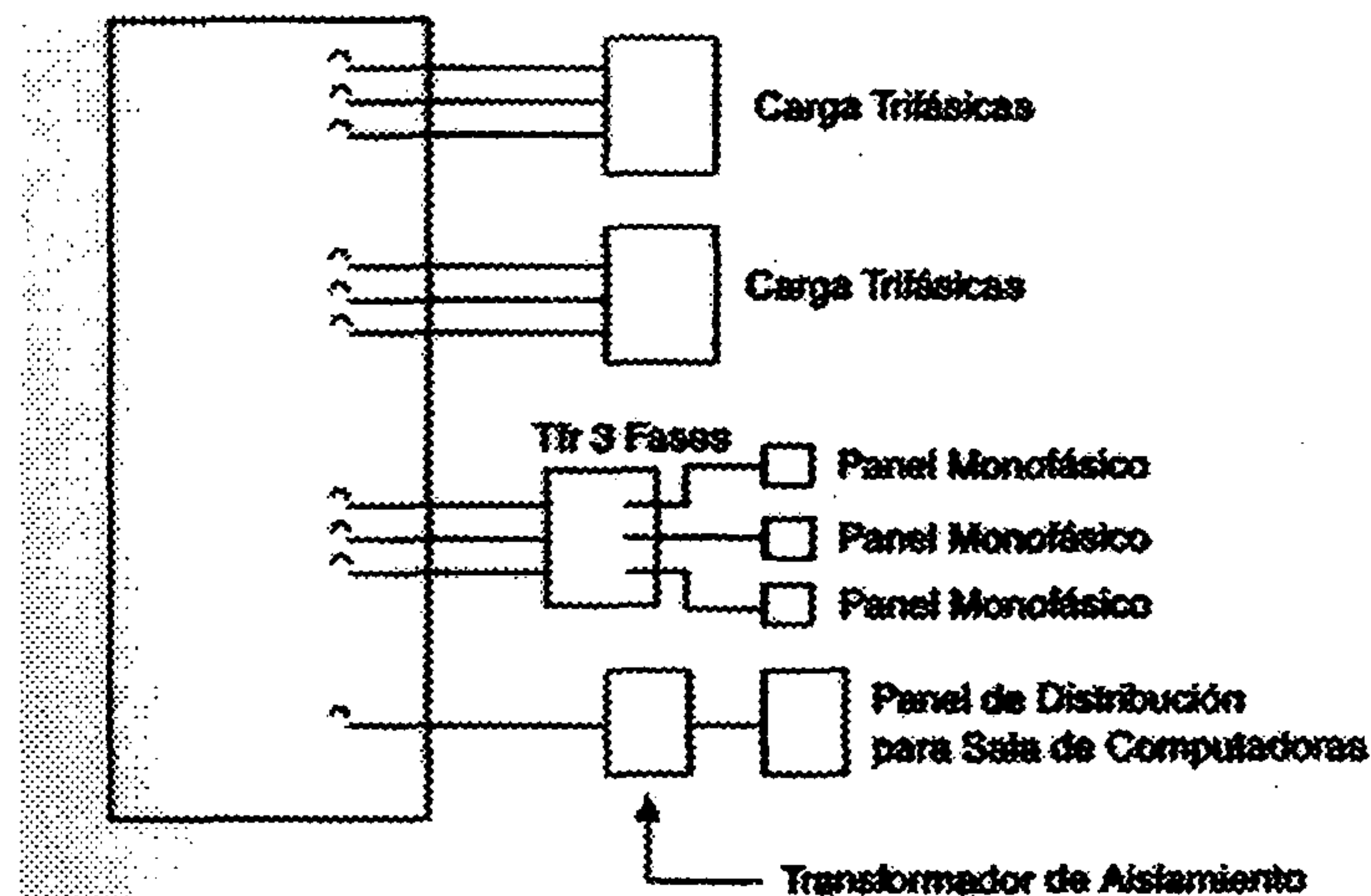
#### 5.7.10 Tierras en sala de computadoras

Una conexión a tierra correcta es mas critica para la operación del equipo electrónico que para seguridad, decimos mas critica no mas importante.

Una computadora central es una carga relativamente pesada, los computadores operan con potencia dc así que requieren rectificadores para convertir ac y dc. Los rectificadores generalmente producen armónicas. Los computadores procesan mucha información en forma de pulsos cortos 3 V dc y 0 V dc. Esto es, la línea ac y la tierra de ac requieren estar libres de transitorios.

Por estas razones, es mejor instalar un transformador de aislamiento cerca del sistema de proceso de datos, para el cuarto de computadoras. Ninguna otra carga debe ser conectada a este sistema derivado separadamente como se muestra en la figura 54.

**Figura 54. Distribución de cargas en un tablero**



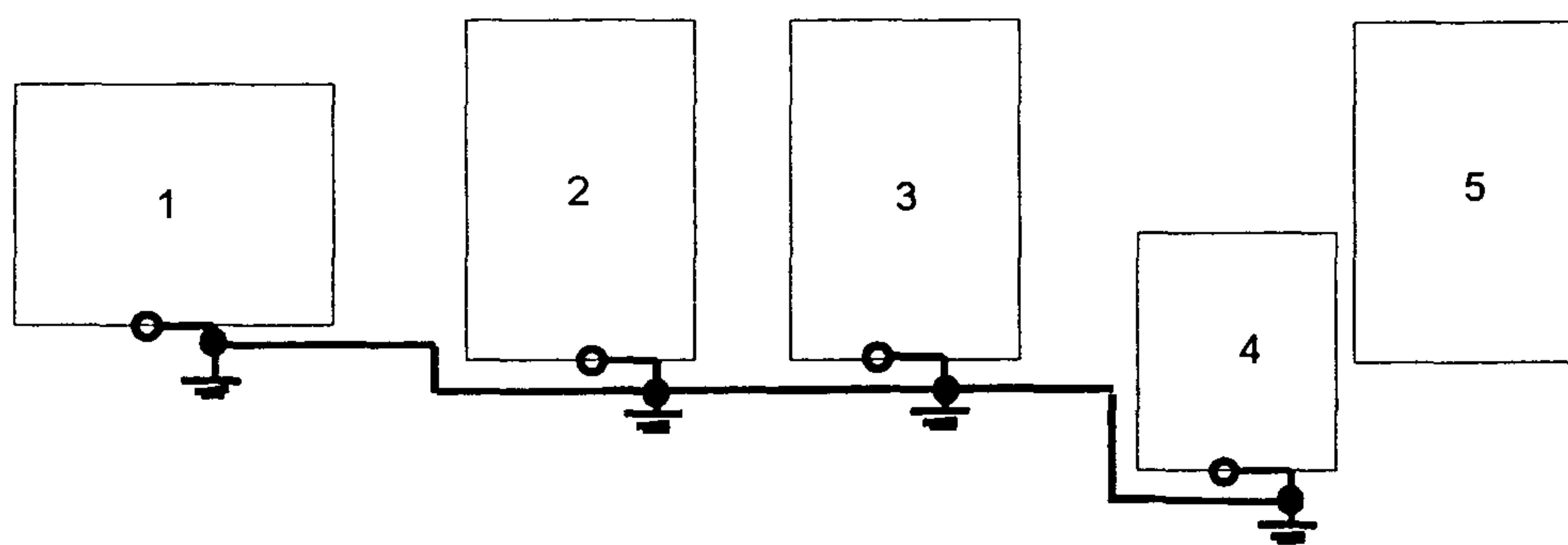
Existen varias razones para este enfoque. Un transformador de aislamiento con un blindaje de *faraday* se puede utilizar para separar los ruidos en la línea en la potencia suministrada al cuarto.

Un transformador separado no permite que otras cargas afecten la calidad de potencia suministrada al equipo. Los conductores de tierra del equipo y el neutro del transformador tendrían longitudes cortas al transformador, por lo tanto reduce las probabilidades de acoplamiento de ruidos dentro del edificio. Es importante que el transformador de aislamiento sea puesto a tierra de forma correcta con un cable conectado al sistema de tierra del edificio o por medio del acero del edificio.

## 5.8 Diseño de la red de puesta a tierra edificio calderas fábrica

A continuación se muestra un croquis de cómo se encuentran situadas las edificaciones dentro del Ingenio, y cuales de ellas tienen un sistema de tierras según estándares.

Figura 55 . Ubicación y sistema de tierra de edificaciones Ingenio MT

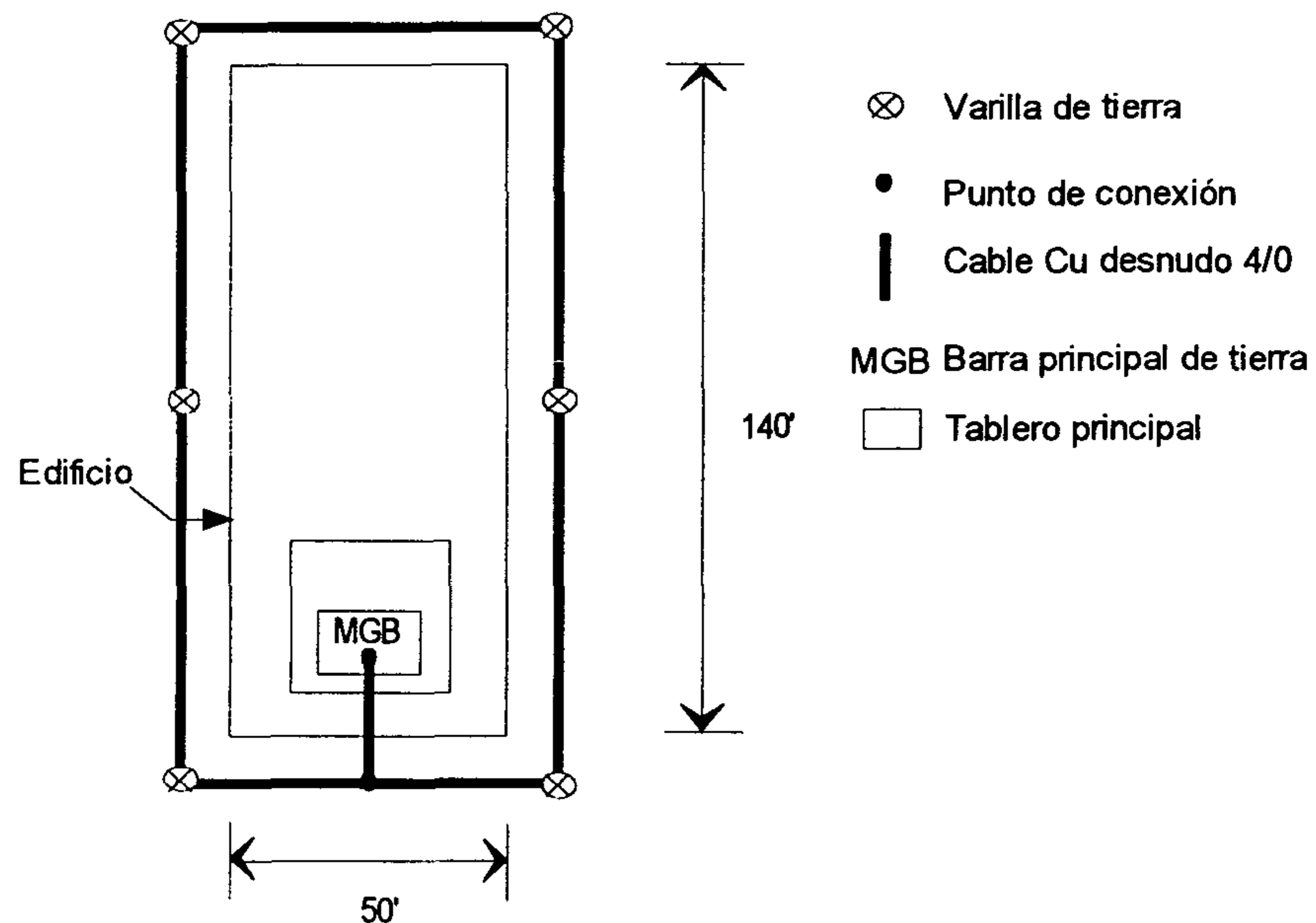


1. Subestación de 69KV
2. Edificio de turbogeneradores cogeneración
3. Edificio calderas cogeneración
4. Edificio turbogeneradores fábrica
5. Edificio calderas fábrica (no posee una tierra solidamente aterrizada y unida al sistema)

Se muestra en detalle la forma en que se procedió a la instalación del sistema de tierra del edificio de calderas, el cual al efectuar la medición de tierras (capítulo anterior) no cumplió con los estándares mínimos.



**Figura 56 . Ubicación y configuración de las varillas de tierra**



El dibujo anterior muestra una configuración en anillo alrededor del edificio, en el cual se utilizó 6 pozos de tierra. En cada pozo de tierra, se realizó un agujero de 1 m de diámetro por 3 metros de profundidad, el cual se preparó utilizando sales de sulfato de calcio, y bentonita, al centro se colocó la varilla de cobre, es importante resaltar que se utilizó accesorios de conexión que utilizan soldadura del tipo exotérmico (tipo *cadwell*), según lo manda el artículo 250 del NEC, para lograr la fusión del cable con la varilla, de esta forma se logró la interconexión de los 6 pozos de tierra los cuales fueron hechos alrededor del edificio, el cual tiene una longitud perimetral de 440 pies, se empleó cable desnudo de cobre número 4/0, el cual fue instalado a una distancia de 2.5 pies bajo tierra, justo debajo de la solera de humedad del edificio.

En cada pozo se dejó un registro circular, con tapadera de metal para poder inspeccionar las conexiones entre varillas, el cual es de fácil acceso.

Además de manejar el concepto de única conexión a tierra según NEC.

El valor obtenido de la tierra del edificio fue de 2 ohmios, antes de interconectar la tierra que se tenía en la barra principal de tierras, la cual se encuentra en el tablero principal.

La tierra de los demás sistemas colindantes fue verificada y se encontraba en el orden 0.8 ohmios. Después de la interconexión la tierra fue medida y se encontró un valor de 0.85 ohmios el cual es un valor aceptable ya que según el NEC, el valor de resistencia a tierra aceptable deberá ser menor de 25 ohmios y para áreas expuestas a rayos la resistencia a tierra deberá ser menor a 1 ohmio. Cabe mencionar que la instalación de la tierra del edificio se hizo en época de invierno, y en la región en la cual se encuentra ubicada la instalación en mención es un área bastante lluviosa por lo tanto los valores de tierra medidos son por debajo de 1 ohmio.

## CONCLUSIONES

1. Una adecuada puesta a tierra en los sistemas eléctricos de AC limita los voltajes causados por cualquier tipo de falla a tierra y facilita la operación de los dispositivos de protección.
2. Un sistema de único punto de referencia a tierra, es requerido para evitar los lazos de tierra que se forman cuando se tienen referencias de distintas de tierra..
3. La resistencia del sistema de tierra debe ser menor de 25 ohmios cuando es de uso industrial y menor de 5 ohmios cuando al sistema de tierra está conectado equipo electrónico sensible.
4. Es necesario un estudio de calidad de energía para obtener una información fidedigna de cómo se encuentra la alimentación al equipo y de esta manera, seleccionar el equipo de protección más conveniente según sea el caso.
5. Existe una gran variedad de equipo para el mejoramiento de la energía que utilizan una diversidad de tecnologías y que proveen diferentes grados de protección dependiendo de la carga conectada.
6. La configuración más conveniente para elaborar un sistema de tierras para un edificio, es la de anillo, ya que esta tiene redundancia, en caso de ruptura ya que se encuentra conectado a la barra de tierra en ambos extremos.

7. Cuando se planifique hacer una edificación nueva, es necesario efectuar un estudio de suelos, para ver que calificativo posee (arenoso, rocoso, o con materia orgánica), ya que nos indicara que procedimiento de aterrizaje sea necesario emplear ( tierra química o aterrizaje mediante electrodos directa).



## RECOMENDACIONES

1. Es importante que todas las interconexiones en la red de tierra sean efectuadas con soldadura del tipo exotérmico, ya que garantiza una conexión efectiva y permanente de los componentes de aterrizaje de los equipos.
2. Se debe verificar que todos los equipos eléctricos que sean instalados en una planta, cualesquiera, sean aterrizados según lo manda el NEC con propósitos de seguridad para las personas que efectúan inspecciones de mantenimiento de equipos o bien operación de los mismos.
3. Se debe verificar el valor de la resistencia a tierra de la instalación por lo menos dos veces al año, una en época de verano y la otra en época de invierno, con el propósito de que los equipos de protección operen adecuadamente. Obviamente el menor valor nos lo deberá dar en época de invierno..
4. Es recomendable utilizar un equipo de medición electrónico, el cual posea memoria de almacenamiento, en conjunto con un *software* para el procesamiento respectivo de la información, el tiempo de monitoreo de datos deberá ser por lo menos de 7 días consecutivos en intervalos de 10 minutos según lo indica la norma de la comisión nacional de energía.

5. Se debe tener precaución en la selección correcta del filtro ya que al seleccionarse de manera incorrecta, no se anularan las armónicas que se deseen minimizar (se habla de la 3ra, 5ta, y 7ma) las cuales son dañinas para los equipos sensitivos ..
6. Ante los transitorios que se presentan en la forma de onda de voltaje (*sags, notches* etc.) ocasionados por *switcheo* de cargas, se deberá emplear equipo de protección de transitorios con tecnología adecuada dependiendo la rapidez que se requiera para que estos actúen, dependiendo del tipo de equipo electrónico asociado al mismo.
7. Se debe recalcar la importancia de los tres conductores en una instalación domiciliar o industrial, línea de viva o de fase, línea neutra, y por último línea de tierra, ya que en muchas ocasiones, por razones económicas se prescinde de la línea de tierra, y regularmente se conectan a la estructura del edificio al cual este instalado el equipo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.

*IEEE. Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment.* United States of America 1992. pp. 33-95

## BIBLIOGRAFÍA

1. Chauvin Arnoux, Inc. **Digital Ground Resistance Tester model 4610**. United States of America 1998.
2. Robb Louis. **Engineers Dictionary**. 2<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons Inc. 1966.
3. Fink, Donalf G. **Standard Handbook for Electrical Engineers**. 12<sup>th</sup> ed. McGraw Hill Book Company. s.f.
4. Grounding Technologies, Inc. **Puesta a tierra para sistemas eléctricos de AC**. 2000.
5. IEEE. **Grounding of Industrial and Commercial Power Systems**. United States of America. 1991.
6. IEEE. **Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment**. United States of America 1992
7. IEEE. **Standard dictionary of Electrical and Electronics Terms**. New York, N.Y. 1988.
8. NFPA. **National Electrical Code Handbook**. 7<sup>th</sup> ed. United States of America 1996.
9. R.J. Lawrie. **Biblioteca práctica de motores eléctricos**. Oceano/Centrum. 1987