

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.

ESTUDIO Y SIMULACION DE TRANSITORIOS  
ANORMALES EN SISTEMAS DE POTENCIA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ENERGETICA

POR:

LUIS ENRIQUE CAMARGO REYES

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 2008

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.®**

**ESTUDIO Y SIMULACION DE TRANSITORIOS  
ANORMALES EN SISTEMAS DE POTENCIA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ENERGETICA**

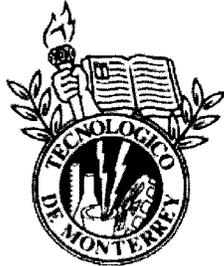
**POR:**

**LUIS ENRIQUE CAMARGO REYES**

**MONTERREY, N. L.**

**DICIEMBRE DE 2008**

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ANORMALES  
EN SISTEMAS DE POTENCIA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

ELABORADA POR:  
LUIS ENRIQUE CAMARGO REYES

MONTERREY, N.L.

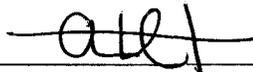
DICIEMBRE 2008

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis del ingeniero Luis Enrique Camargo Reyes sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias con especialidad en:

**Ingeniería Energética**

Comité de Tesis:



PhD. Armando Llamas Terrés

Asesor



M.C. Enrique Luis Cervantes J

Sinodal



M. C. Jesús Báez Moreno

Sinodal

Aprobado:



Dr. Joaquín Acevedo Mascarúa

Director de Investigación y Posgrado  
Diciembre, 2008

# AGRADECIMIENTOS

A Dios porque siempre me ha otorgado oportunidades en el transcurso de mi vida. No me ha dado pero me ha puesto donde hay.

A mis Padres, quienes siempre han sido apoyo incondicional en mi desarrollo profesional y toda su vida se han esforzado por otorgarme la mejor preparación académica que ha estado a su alcance y un poco más.

A Paola, mi novia, que ha estado a mi lado todo el transcurso de mis estudios profesionales y de posgrado y siempre ha sido testigo activo de mis logros y metas alcanzadas. Siempre me ha ayudado sin condiciones.

A mis hermanas porque siempre han creído en mí y me han otorgado su apoyo y ayuda incondicionalmente.

A mis amigos: Ángel (Pavo), Toño, Pepe, Korn, Jimmy, Gaibo, Memo, Pako, Chuy, Chava, Super Arthur, Jaime Cucharitas, Hugo Chupete y todos los que faltan. Fueron parte de mi vida durante la realización de la maestría en más o menor medida. Lo importante es la calidad no la cantidad.

Al Dr. Armando Llamas por su asesoría y apoyo durante la realización de la tesis y por ser un cuate durante toda la maestría. Agradezco también en conjunto al Dr. Federico Viramontes, ya que ellos dos me impartieron gran parte de los cursos de maestría. He aprendido mucho de ellos.

Al departamento de Ingeniería eléctrica y al Ingeniero Homero Nuñez Ramírez por darme la confianza y oportunidad de la beca para la maestría. Gracias al Ingeniero por creer en mí y otorgarme su apoyo.

A todas las personas (familiares, suegros, vecinos, conocidos) que siempre han tenido grandes expectativas de mí. Espero no defraudarlas nunca. Me han ayudado a mantenerme siempre honesto y tratando de dar lo mejor de mí.

Nada lo he logrado solo por mi cuenta, muchas gracias por todo.

Luis Enrique

# RESUMEN

La calidad de la energía es la rama de la ingeniería eléctrica, que se encarga de establecer los límites y rangos en el voltaje, que tienen que ser alcanzados para garantizar la operación de los equipos de uso final, dentro de sus condiciones de diseño. La realidad es que los disturbios y problemas de calidad de energía no pueden ser evitados.

Dentro de los problemas en calidad de energía, los transitorios eléctricos constituyen las perturbaciones más difíciles de detectar y comprender en la operación de un sistema eléctrico. El intervalo de tiempo que el sistema emplea en el transitorio es insignificante comparado con la operación normal. Sin embargo, en estos períodos, es cuando el sistema se somete a los más grandes esfuerzos debido a los sobrevoltajes y sobrecorrientes generadas. La comprensión de los fenómenos transitorios es indispensable para obtener un panorama completo de la operación de los sistemas de potencia.

Los transitorios eléctricos son generados normalmente por alguna operación de conmutación o por descargas atmosféricas. Los transitorios que tienen una tasa de ocurrencia muy baja y sobrevoltajes inusuales se conocen como transitorios anormales y son el objeto de estudio de este proyecto de tesis. Se abordan dos transitorios anormales: corte de corriente y ferorrresonancia. Son explicados, y se llevan cabo experimentaciones y simulaciones de los fenómenos.

El fenómeno conocido como supresión o corte de corriente, es una situación generada por ciertos interruptores donde la corriente se interrumpe en un instante distinto del cruce natural por cero. Se presenta normalmente al cortar corrientes inductivas pequeñas, como la corriente de excitación de un transformador. Esto provoca que la energía almacenada en el transformador o reactor se desvíe a la capacitancia distribuida y provoque sobrevoltajes inusuales en estos elementos.

La ferorrresonancia se presenta normalmente en una configuración serie de capacitancia e inductancia de núcleo de hierro, de ahí el nombre. La capacitancia de la línea es normalmente la de los cables o líneas de transmisión, pero bien puede ser la de un banco de capacitores. La inductancia de núcleo de hierro es un transformador por lo general. El problema se presenta cuando una reconfiguración del sistema se lleva a cabo y un sobrevoltaje se establece de manera sostenida en las terminales del transformador. Este sobrevoltaje es de estado estable y con un contenido armónico importante. La única manera de eliminar esta situación es desenergizar el circuito.

# ABSTRACT

Power quality is the branch of electrical engineering, which establishes the set of ranges and limits in the supply voltage, that have to be accomplished, to guarantee the proper operation of user equipment within its design conditions. The engineering reality of a power system is that power quality problems and disturbances can't be avoided.

Among power quality problems, the electric transients are the most difficult problems to detect and comprehend in the operation of an electrical system. The amount of time spent in the transient stage is insignificant compared to normal operation. However, it's in these periods that the system is exposed to the largest stresses because of the overvoltages and overcurrents generated. Comprehension of the transient phenomena is necessary to achieve a complete view of a power system operation.

The electric transients are generally caused by a commutation operation or atmospheric discharges. Transients with a low incidence rate and unusual overvoltages are known as abnormal switching transients. This thesis explores two of them: current chopping and ferroresonance. The transients are thoroughly explained and laboratory tests and computer simulations are developed.

Current chopping or current suppression is a condition caused by certain interrupters, where current is interrupted at an instant different than the natural zero crossing instant. It's normally presented when small inductive currents, like the excitation current of a transformer, are chopped. This causes that the trapped energy in the transformer or reactor diverts into the distributed capacitance and lead to an unusual overvoltage.

Ferroresonance is usually presented in a series configuration of a capacitance and an iron core inductance. The line capacitance is generally from the transmission lines and cables, but it could be from a power factor correction capacitor bank. The iron core inductance is generally a transformer. This situation is originated when a reconfiguration takes place and a sustained overvoltage is established in the transformer. This overvoltage is steady state and has a large harmonic content. To remove this overvoltage the circuit has to be de-energized.

# CONTENIDO

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2</b>	<b>Calidad de Energía: Conceptos y Definiciones</b>	<b>4</b>
2.1	Introducción	4
2.2	Terminología	5
2.3	Clasificación general de problemas de calidad de energía	6
2.4	Definiciones	7
2.4.1	Transitorios	7
2.4.1.1	Transitorios impulsivos	8
2.4.1.2	Transitorios oscilatorios	8
2.4.2	Variaciones de voltaje de larga duración	9
2.4.2.1	Sobrevoltaje	9
2.4.2.2	Bajo voltaje	10
2.4.2.3	Interrupción sostenida	10
2.4.3	Variaciones de voltaje de corta duración	10
2.4.3.1	Interrupción (Instantánea, Momentánea, Temporal)	10
2.4.3.2	Abatimiento de voltaje (sag, dip)	11
2.4.3.3	Swell	11
2.4.4	Desbalance de voltaje	11
2.4.5	Distorsión en la forma de onda	13
2.4.5.1	Componente de CD	13
2.4.5.2	Armónicas	13
2.4.5.3	Interarmónicas	14
2.4.5.4	Muecas (Notching)	15
2.4.5.5	Ruido	15
2.4.6	Fluctuaciones en el voltaje	16
2.4.7	Variaciones en la frecuencia del suministro	16
2.5	Equipos acondicionadores	16
2.5.1	Supresores de sobrevoltajes transitorios (TVSS)	16
2.5.2	Apartarrays	17
2.5.3	Filtros de radio frecuencia	18
2.5.4	Filtros de armónicas	18
2.5.5	Transformadores de aislamiento	19
2.5.6	Transformadores ferromagnéticos	20
2.5.7	Fuentes ininterrumpibles de energía (UPS)	21
<b>Capítulo 3</b>	<b>Transitorios Eléctricos</b>	<b>23</b>
3.1	Introducción	23
3.2	Modelación para el análisis transitorio	24
3.3	Ejemplos de modelos para análisis transitorio y su respuesta	26

3.3.1 Energizando un capacitor con CD .....	26
3.3.2 Energizando una inductancia con CD .....	28
3.3.3 La combinación L-C energizada con CD .....	30
3.3.4 El circuito RL con excitación senoidal.....	32
3.3.5 El voltaje de recuperación transitoria al interrumpir una falla .....	34
3.4 Transitorios anormales .....	36
<b>Capítulo 4 Supresión de Corriente .....</b>	<b>38</b>
4.1 Introducción .....	38
4.2 Descripción del fenómeno .....	39
4.3 Análisis matemático .....	43
4.4 Desarrollo del experimento .....	45
4.5 Equipo de medición utilizado .....	45
4.6 Resultados del experimento.....	46
4.6.1 El disturbio aparece en el secundario.....	49
4.6.2 Probando un supresor de sobrevoltajes transitorios.....	51
4.7 Simulación en Microtran .....	51
<b>Capítulo 5 Ferrorresonancia.....</b>	<b>54</b>
5.1 Introducción .....	54
5.2 La impredecibilidad del fenómeno.....	55
5.3 Descripción del fenómeno .....	57
5.4 Análisis gráfico .....	58
5.5 La ferrorresonancia no es una verdadera resonancia .....	63
5.6 Desarrollo del experimento .....	64
5.7 Técnicas para evitar ferrorresonancia.....	68
5.8 Simulación en Microtran.....	68
<b>Capítulo 6 Conclusiones .....</b>	<b>71</b>
Supresión de corriente .....	71
Futuros proyectos sobre corte de corriente .....	72
Ferrerresonancia .....	72
Futuros proyectos sobre ferrorresonancia.....	73
<b>Capítulo 7 Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>75</b>
<b>Anexo A Transformadas de Laplace.....</b>	<b>77</b>
A.1 Algunas transformadas específicas.....	77
A.2 Algunas propiedades de la transformada de Laplace .....	79
<b>Anexo B Situaciones en las que se Presenta Ferrorresonancia .....</b>	<b>80</b>
Conmutación monofásica de transformadores en conexión delta o estrella no aterrizada. .....	80

Conmutación monofásica de transformadores en conexión estrella aterrizada con bancos de capacitores no aterrizados.....	82
Acoplamiento mutuo de una línea desenergizada que tiene un transformador conectado .....	83
Capacitancia de contacto de un interruptor alimentando a un bus con un transformador de potencial.....	84
Fuente en delta alimentando transformadores en estrella aterrizada/ estrella aterrizada sujetos a falla de línea a tierra.....	84
Fases acopladas magnéticamente en transformadores trifásicos .....	85
<b>Anexo C Simulaciones en Microtran .....</b>	<b>88</b>
Supresión de corriente .....	88
Ferrorresonancia .....	95
<b>Anexo D Imágenes de los Circuitos Construidos y Equipo de Medición .....</b>	<b>100</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Clasificación general de problemas en calidad de energía. ....	7
<b>Tabla 4.1</b> Varios resultados obtenidos tras suprimir corriente en el circuito de la figura 4.4. ....	46
<b>Tabla 4.2</b> Datos del evento transitorio de la gráfica 4.5. ....	50
<b>Tabla 4.3</b> Varios resultados obtenidos de la simulación en Microtran. ....	52
<b>Tabla 5.1</b> Resultados obtenidos. ....	66
<b>Tabla C.1</b> Pruebas de corto circuito y circuito abierto al transformador utilizado en corte de corriente. ....	88
<b>Tabla C.2</b> Configuración de los interruptores para los distintos valores de corriente cortada. ....	92
<b>Tabla C.3</b> Pruebas de corto circuito y circuito abierto al transformador utilizado en ferrorresonancia. ....	95

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Transitorio impulsivo ocasionado por una descarga atmosférica. ....	8
<b>Figura 2.2</b> Transitorio oscilatorio de frecuencia media ocasionado por la energización espalda con espalda de bancos de capacitores. ....	9
<b>Figura 2.3</b> Voltajes trifásicos experimentando una interrupción tras una falla y el recierre del interruptor. ....	11
<b>Figura 2.4</b> Abatimiento de voltaje tras una falla de línea a neutro. a) Voltaje efectivo registrado durante el evento. b) Forma de onda registrada. ....	12
<b>Figura 2.5</b> Swell ocasionado por la salida de operación de un motor. ....	12
<b>Figura 2.6</b> Grafica de tendencia del desbalance de un alimentador residencial. ....	13
<b>Figura 2.7</b> Corriente de fase demandada por un drive de CA (p. ej., alimentando a un motor) y espectro armónico de la misma. ....	14
<b>Figura 2.8</b> Forma de onda de voltaje entre líneas que alimenta un rectificador de seis pulsos (seis muescas por ciclo). ....	15
<b>Figura 2.9</b> Voltaje cresta contra corriente cresta en un supresor de sobrevoltajes transitorios. ....	17
<b>Figura 2.10</b> Tres tecnologías distintas de apartarrayos y su efecto contra una onda $8 \times 20 \mu\text{s}$ ....	18
<b>Figura 2.11</b> Filtro serie sintonizado y su respuesta a la frecuencia. ....	19
<b>Figura 2.12</b> Filtro activo para cancelar corrientes armónicas. ....	19
<b>Figura 2.13</b> Transformador de aislamiento. ....	20
<b>Figura 2.14</b> Transformador de aislamiento con blindaje electrostático (blindaje Faraday)...	20
<b>Figura 2.15</b> Característica de operación de un transformador ferorrresonante. ....	21
<b>Figura 2.16</b> UPS en configuración de stand- by. ....	21
<b>Figura 2.17</b> UPS en configuración híbrida. ....	22
<b>Figura 3.1</b> Sistema eléctrico que consiste de un transformador alimentando a un motor. ....	25

<b>Figura 3.2</b> Modelo para el análisis de estado estable del circuito de la figura 3.1. ....	25
<b>Figura 3.3</b> Modelo para el análisis transitorio del circuito de la figura 3.1.....	25
<b>Figura 3.4</b> Un voltaje de CD se aplica a un circuito RC.....	26
<b>Figura 3.5</b> Voltaje y corriente durante la energización de un circuito RC con CD.....	27
<b>Figura 3.6</b> Voltaje y corriente durante la energización de un circuito RL con CD. ....	28
<b>Figura 3.7</b> Un voltaje de CD se aplica a un circuito RL. ....	29
<b>Figura 3.8</b> Voltaje de CD aplicado a un Circuito LC. ....	30
<b>Figura 3.9</b> Voltaje del capacitor en un circuito LC para tres valores distintos de voltaje inicial. El voltaje de la fuente es 100 V. ....	32
<b>Figura 3.10</b> Voltaje senoidal se aplica a un circuito RL. ....	32
<b>Figura 3.11</b> Corriente asimétrica de la ecuación 3.17. ....	34
<b>Figura 3.12</b> El interruptor abre el corto circuito de la figura 3.9.....	34
<b>Figura 3.13</b> Se resumen las dos perturbaciones anteriores, energización de un circuito RL (corto circuito) y el voltaje de recuperación tras la apertura de este circuito [8, p. 181]. ....	36
<b>Figura 4.1</b> Supresión de Corriente. Se muestra la corriente de excitación de un transformador y el instante en que la corriente es cortada.....	39
<b>Figura 4.2</b> Transformador en vacío. a) Se muestra el interruptor y el transformador. b) Circuito equivalente del transformador. ....	40
<b>Figura 4.3</b> Energía liberada en el transformador cuando la corriente es cortada. ....	42
<b>Figura 4.4</b> Circuito construido para experimentar con supresión de corriente. ....	45
<b>Figura 4.5</b> Captura de corriente cortada (112 mA).....	47
<b>Figura 4.6</b> Captura de voltaje en el primario (1160 V). ....	47
<b>Figura 4.7</b> Captura de voltaje en el secundario (96 V).....	48
<b>Figura 4.8</b> Acercamiento al sobrevoltaje de la gráfica 4.2.....	48
<b>Figura 4.9</b> Se muestran los puntos donde se conecta el Fluke 434 para registrarlos eventos. El interruptor de la figura es el mismo interruptor de mercurio del experimento anterior.....	49

<b>Figura 4.10</b> Sobrevoltajes provocados por corte de corriente en un transformador con relación 1:1 .....	50
<b>Figura 4.11</b> Corriente en el varistor ante un sobrevoltaje.....	51
<b>Figura 4.12</b> Zonas en las que se puede simular adecuadamente corte de corriente en Microtran. ....	52
<b>Figura 4.13</b> Corriente cortada (0.112 A) en Microtran para el transformador de estudio.....	53
<b>Figura 4.14</b> Sobrevoltaje (para la corriente cortada de la gráfica 4.5) en Microtran.....	53
<b>Figura 5.1</b> Aplicación de un voltaje senoidal a una inductancia de núcleo de hierro. ....	56
<b>Figura 5.2</b> Voltaje y flujo magnético en la energización de una inductancia de núcleo de hierro. ....	56
<b>Figura 5.3</b> Circuito ferorrresonante. ....	57
<b>Figura 5.4</b> Voltajes en un circuito LC. a) la suma de los voltajes en los elementos es el voltaje de la fuente. b) diagrama de fasores de los voltajes.....	58
<b>Figura 5.5</b> La ecuación 5.3 es para el voltaje de la inductancia. Es una representación indirecta de la curva de magnetización de un transformador. ....	59
<b>Figura 5.6</b> La ecuación 5.6 es para el voltaje de la inductancia también. Es la suma del voltaje de la fuente y el voltaje en el capacitor. ....	59
<b>Figura 5.7</b> Las ecuaciones 5.3 y 5.6 son graficadas simultáneamente y otorgan las soluciones para los puntos de operación posibles del circuito.....	60
<b>Figura 5.8</b> Tres puntos de operación vistos desde el voltaje de la fuente.....	61
<b>Figura 5.9</b> Al incrementar la capacitancia de la línea se obtienen nuevas soluciones. ....	62
<b>Figura 5.10</b> La capacitancia se incrementa mientras el voltaje de la fuente es constante. ..	63
<b>Figura 5.11</b> Condiciones de operación en un circuito LC lineal. ....	63
<b>Figura 5.12</b> Solución gráfica a un voltaje de 96 V. a) Ecuaciones 5.3 y 5.6. b) Ecuación 5.4. ....	65
<b>Figura 5.13</b> Sobrevoltaje en el transformador bajo ferorrresonancia.....	67
<b>Figura 5.14</b> Ejemplo de sobrevoltaje en ferorrresonancia caótica.....	67
<b>Figura 5.15</b> Voltaje en el transformador obtenido de la simulación en Microtran.....	69
<b>Figura 5.16</b> Corriente de línea obtenida de la simulación en Microtran. ....	70

<b>Figura B.1</b> a) Transformador en delta, una fase energizada. b) Circuito equivalente. ....	81
<b>Figura B.2</b> a) Transformador en delta, dos fases energizadas. b) Circuito equivalente. ....	81
<b>Figura B.3</b> a) Transformador en estrella no aterrizada, una fase energizada b) Circuito equivalente. ....	82
<b>Figura B.4</b> a) Devanados en estrella aterrizada, con capacitores no aterrizados, una fase energizada. b) Circuito equivalente. ....	82
<b>Figura B.5</b> a) Devanados en estrella aterrizada, con capacitores no aterrizados, dos fases energizadas. b) Circuito equivalente. ....	83
<b>Figura B.6</b> Acoplamiento mutuo con una línea desenergizada. ....	84
<b>Figura B.7</b> Interruptor con <i>grading capacitor</i> alimentando a un transformador de potencial. ....	84
<b>Figura B.8</b> Fuente en Delta alimentando una falla de línea con transformadores en estrella aterrizada. ....	85
<b>Figura B.9</b> a) Transformador de 4 núcleos/ 5 piernas. b) Circuito equivalente: se excita la fase A y carga B y C con XC. ....	87
<b>Figura B.10</b> a) Diseño de un núcleo/ 4 piernas, para aplicaciones delta/ estrella aterrizada. b) Diseño de un núcleo/ 4 piernas, para aplicaciones estrella aterrizada/ estrella aterrizada. ....	87
<b>Figura C.1</b> Curva $V_{rms}$ vs. $I_{rms}$ en transformador 125 V 100 VA. ....	89
<b>Figura C.2</b> Característica de magnetización de transformador 125 V 100 VA. ....	89
<b>Figura C.3</b> Circuito propuesto utilizado para simular corte de corriente. ....	90
<b>Figura C.4</b> Resultado experimental y simulado para un nivel de supresión de corriente de - 0.064 A. ....	93
<b>Figura C.5</b> Resultado experimental y simulado para un nivel de supresión de corriente de - 0.080 A. ....	93
<b>Figura C.6</b> Resultado experimental y simulado para un nivel de supresión de corriente de 0.112 A. ....	93
<b>Figura C.7</b> Resultado fallido para un nivel de supresión de corriente de 0.056 A. ....	94
<b>Figura C.8</b> Resultado fallido para un nivel de supresión de corriente de 0.080 A. ....	94

<b>Figura C.9</b> Zonas en las que se puede simular adecuadamente corte de corriente en Microtran. ....	94
<b>Figura C.10</b> Curva $V_{rms}$ vs. $I_{rms}$ en transformador 127 V 50 VA.....	95
<b>Figura C.11</b> Característica de magnetización en transformador 127 V 50 VA.....	96
<b>Figura C.12</b> Circuito equivalente para simulación de ferorresonancia. ....	96
<b>Figura C.13</b> Energización del transformador y brinco a ferorresonancia.....	98
<b>Figura C.14</b> Voltaje sostenido en el transformador durante ferorresonancia.....	99
<b>Figura C.15</b> Corriente de línea durante ferorresonancia .....	99

# CAPÍTULO

# 1

## Introducción

En los sistemas eléctricos se conoce como calidad de energía [1], a la rama de la Ingeniería Eléctrica que estudia las condiciones a cumplir por el suministro de energía eléctrica que el usuario recibe. Así, esta energía debe cumplir las funciones para las que se adquirió, y el equipo debe operar dentro de sus condiciones de diseño, para obtener su rendimiento y vida útil nominal. Una deficiencia en la calidad de energía es, por tanto, cualquier variación importante en tensión (magnitud, frecuencia o forma de onda) ocasionada por una perturbación y por tiempo suficiente, que conduce al daño temporal, permanente o mal funcionamiento del equipo eléctrico.

La realidad ingenieril de un gran sistema de potencia es que los disturbios no pueden ser evitados. Estas perturbaciones en la calidad de energía pueden ocurrir durante la operación normal del sistema eléctrico, como conmutar un dispositivo de corrección de factor de potencia, o durante eventos anormales como liberar un corto circuito de un alimentador [2]. Los disturbios se clasifican por rangos de voltaje y tiempo normalmente, siendo los transitorios los que presentan los niveles de voltaje más altos en periodos de tiempo más cortos (en un marco de microsegundos o menos).

Un transitorio eléctrico [3] es la manifestación externa de un cambio súbito en las condiciones del circuito. La fracción de tiempo que los sistemas emplean en la condición transitoria es insignificante comparada con el tiempo empleado en el estado estable. Aún así, estos periodos son muy importantes, ya que los componentes del circuito son sujetos a esfuerzos muy grandes por las excesivas corrientes y voltajes que resultan del fenómeno transitorio. Por esta razón, una apreciación clara de los eventos que toman lugar en estos periodos es esencial para el entendimiento completo del comportamiento de los sistemas eléctricos.

El objetivo de la presente tesis fue realizar el estudio analítico y diseño de experimentos para medir, caracterizar y simular disturbios transitorios anormales y sus consecuencias en la calidad de energía. Los transitorios anormales bajo estudio son: supresión o corte de corriente y ferrorresonancia.

El equipo utilizado para realizar este trabajo fueron voltímetros y amperímetros de valor RMS verdadero de la marca Fluke, y un analizador de calidad de energía monofásico (Fluke 43B) para la obtención de parámetros; osciloscopios (THS720P) de la marca Tektronix y un analizador de calidad de energía Fluke 434 fueron empleados para el registro de eventos transitorios.

En el capítulo 2 se introduce a los conceptos y definiciones en el terreno de la calidad de energía eléctrica: la terminología, los disturbios que se pueden presentar en un sistema eléctrico y los principales equipos acondicionadores para evitar las consecuencias de una calidad de energía deficiente.

En el capítulo 3 se establecen los fundamentos detrás de los transitorios eléctricos: las características de los circuitos durante un evento transitorio, las decisiones que se tienen que tomar en el desarrollo de su modelo matemático y la interpretación de los resultados.

En el capítulo 4 se presenta el disturbio conocido como supresión de corriente. Ciertos interruptores son los causantes de este problema. Se construyó un circuito para estudiar el fenómeno y realizar mediciones experimentales.

En el capítulo 5 se estudia el fenómeno de ferorrresonancia. Es una condición sostenida que genera sobrevoltajes sobrecalentamiento en los transformadores. Se desarrolla una explicación consistente para entender el fenómeno y se fundamenta con mediciones experimentales en un circuito desarrollado especialmente para provocar y observar el disturbio.

En el capítulo 6 se encuentran las conclusiones de este proyecto de tesis. Las conclusiones de cada fenómeno estudiado vienen acompañadas de propuestas para futuros proyectos.

El capítulo 7 contiene las referencias bibliográficas que sirvieron de apoyo a la realización de este proyecto de tesis.

En el anexo A se encuentra una tabla básica de transformadas de Laplace y una tabla con sus propiedades más elementales.

En el anexo B se describen distintas configuraciones de sistemas de potencia que son candidatas a desarrollar ferorrresonancia. No se encuentran todas las configuraciones posibles, pero es un buen panorama para entender la susceptibilidad de la configuración de los sistemas de potencia ante esta perturbación.

En el anexo C se muestran los códigos y resultados de las simulaciones realizadas en Microtran para los disturbios del capítulo 4 y del capítulo 5. Se explican las decisiones y simplificaciones tomadas para llevar a cabo las simulaciones.

En el anexo D se muestran imágenes reales de los circuitos construidos para la realización de la tesis y del equipo de medición utilizado.

## Calidad de energía: Conceptos y definiciones.

### 2.1 Introducción

La necesidad de proveer potencia con frecuencia y voltaje estable ha sido reconocida desde la concepción de la industria de suministro eléctrico. Algunos de los problemas iniciales fueron el parpadeo (flicker) debido a fluctuaciones en el voltaje o el sobrecalentamiento de motores por distorsión en la forma de onda del voltaje (armónicas). Recientemente, perturbaciones transitorias de voltaje asociadas con descargas atmosféricas y conmutaciones en los sistemas de potencia son una preocupación aún mayor para fabricantes y usuarios de equipo electrónico. Las cuestiones de aterrizamiento y cómo lidiar con protecciones contra descargas, ruido, y seguridad simultáneamente, son complicadas por filosofías encontradas por gente de diferentes áreas de especialización que perciben el problema y las soluciones potenciales de maneras distintas.

Los problemas de calidad de energía han ido proliferando hoy en día en la misma proporción que han aumentado las cargas electrónicas y el equipo de tecnologías de información en sistemas eléctricos industriales y comerciales. Estas situaciones no son fácilmente resueltas ya que involucran una gran cantidad de causas y una variedad considerable de efectos específicos en el equipo afectado. Una solución común a incompatibilidades en el suministro es instalar equipos acondicionadores para proteger el equipo sensible.

La tendencia general de los usuarios es atribuir la mayoría de los problemas en el equipo a la fuente de alimentación. Sin embargo, algunas otras fuentes de disturbios, son localizadas dentro del edificio y atribuibles a la operación de algún equipo por el usuario final. Finalmente, hay fuentes de perturbaciones, como descargas electrostáticas a los gabinetes de los equipos o cables, interferencia electromagnética, diferencias de potencial a tierra u errores por parte del operador [2].

La compañía suministradora de electricidad solo puede controlar la calidad del voltaje, no tiene control de las corrientes que una carga particular pueda demandar. De ahí que, los

estándares en calidad de energía están dispuestos a mantener los niveles de tensión dentro de ciertos límites. Desde luego, siempre existe una relación estrecha entre voltaje y corriente en cualquier sistema de potencia. Aún cuando los alternadores proveen un voltaje prácticamente senoidal, la corriente que circula a través de la impedancia del sistema puede ocasionar una serie de disturbios al voltaje [4]. Por ejemplo:

- La corriente que resulta de un corto circuito ocasiona que el voltaje presente abatimientos ("sag") o desaparezca completamente (interrupción), según sea el caso.
- Las corrientes de descargas atmosféricas que pasan por el sistema de potencia causan voltajes muy grandes que pueden dañar el aislamiento de los equipos y propiciar a otros fenómenos, como corto circuito.
- Las corrientes distorsionadas de cargas no lineales también distorsionan el voltaje cuando pasan por la impedancia del sistema, de tal manera que otros usuarios reciben el voltaje distorsionado.

## 2.2 Terminología

Las siguientes definiciones se encuentran en [1].

**Perturbación o disturbio:** Cualquier variación en las condiciones nominales de operación de la alimentación (a nivel potencia o nivel de señal), ya sea de carácter permanente (en estado estable), eventual o transitorio.

**Evento:** Perturbación relacionada con momento de ocurrencia y duración, de carácter no permanente.

**Equipo de uso final:** dispositivo alimentado con corriente eléctrica que la transforma en otro tipo de energía de aplicación directa.

Un equipo de uso final puede ser carga sensible, crítica o ambas. El equipo o carga sensible es el dispositivo que presenta alteraciones en su operación cuando recibe alimentación eléctrica ligeramente distinta del régimen nominal. El equipo crítico es el dispositivo que al dejar de funcionar, de manera temporal o permanente, ocasiona grandes perjuicios económicos. Por ejemplo, en los centros de datos todo el equipo informático es equipo sensible y crítico [5]. Dentro de la operación incorrecta del equipo, es necesario identificar los niveles presentes:

**Falla o mal funcionamiento:** Operación que parece ser normal ya que el equipo continúa operando. Sin embargo, su capacidad de entregar trabajo no es la de diseño. El efecto desaparece una vez que la calidad de energía se alcanza otra vez.

**Salida de servicio:** El equipo interrumpe la tarea que estaba realizando, empezándola de nuevo, retornando a condiciones iniciales, esperando la orden por el usuario para reinicio o bloqueándose en alguna etapa. La operación se restablece una vez que el usuario arranca manualmente y ya se ha alcanzado el nivel de calidad de energía adecuado. En general, no produce daños al equipo, pero si puede existir pérdida de información o datos.

**Daño incipiente:** Cualquier fenómeno que represente un consumo de vida útil a mayor velocidad que la nominal. Se pone de manifiesto solo por reducción en vida útil y se detecta mucho después de la causa que lo produjo, por lo que se complica relacionar la causa con el daño. Cuando el daño es notable, el equipo necesita de mantenimiento o reemplazo.

**Deterioro manifiesto:** Es un efecto de detección inmediata, ya que se interrumpe su funcionamiento debido a que la protección lo desconecta o en caso contrario hay daño superior con consecuencias notables (olor, humo, llamas, ruido, etc.). Igual que el caso anterior, el equipo requiere reparación, mantenimiento, o bien reemplazo.

### 2.3 Clasificación general de problemas de calidad de energía

Es conveniente conocer la amplia variedad de problemas relacionados con la calidad de la energía. Si bien, los problemas se pueden categorizar en grandes rubros, existen un gran número de ellos.

Ya se mencionó que la calidad de la energía coincide, por lo menos desde los ojos del suministrador, en establecer los límites o rango (frecuencia, valor máximo, distorsión, etc.) en que el voltaje se debe suministrar. La clasificación se hace por duración típica y rangos de magnitud de voltaje. En la tabla 2.1 se resume la gran variedad de perturbaciones en un sistema de potencia.

Tabla 2.1 Clasificación general de problemas en calidad de energía [4].

Categoría	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de voltaje típica
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanosegundo	elevación - 5 ns	<50 ns	
1.1.2 Microsegundo	elevación - 1 $\mu$ s	50 ns- 1 ms	
1.1.3 Milisegundo	elevación - 0.1 ms	>1 ms	
1.2 Oscilatorio			
1.2.1 Baja frecuencia	<5 kHz	0.3- 50 ms	0- 4 p.u.
1.2.2 Media frecuencia	5- 500 kHz	20 $\mu$ s	0- 8 p.u.
1.2.3 Alta frecuencia	0.5- 5 MHz	5 $\mu$ s	0- 4 p.u.
2.0 Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Interrupción		0.5- 30 ciclos	<0.1 p.u.
2.1.2 Abatimiento (Sag)		0.5- 30 ciclos	0.1- 0.9 p.u.
2.1.3 Swell		0.5- 30 ciclos	1.1- 1.8 p.u.
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		30 ciclos- 3 s	<0.1 p.u.
2.2.2 Abatimiento (Sag)		30 ciclos- 3 s	0.1- 0.9 p.u.
2.2.3 Swell		30 ciclos- 3 s	1.1- 1.4 p.u.
2.3 Temporales			
2.3.1 Interrupción		3 s- 1 min	<0.1 p.u.
2.3.2 Abatimiento (Sag)		3 s- 1 min	0.1- 0.9 p.u.
2.3.3 Swell		3 s- 1 min	1.1- 1.2 p.u.
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 p.u.
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8- 0.9 p.u.
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1- 1.2 p.u.
4.0 Desbalance de voltaje		estado estable	0.5- 2%
5.0 Distorsión de forma de onda			
5.1 Componente de CD		estado estable	0- 0.1%
5.2 Armónicas	armónica 0- 100	estado estable	0- 20%
5.3 Interarmónicas	0- 6 kHz	estado estable	0- 2%
5.4 Muecas		estado estable	
5.5 Ruido		estado estable	0- 1%
6.0 Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	intermitente	0.1- 7%
7.0 Variaciones en la frecuencia		< 10 s	

## 2.4 Definiciones [4]

### 2.4.1 Transitorios

El término transitorios ha sido usado desde hace tiempo en el análisis de variaciones en sistemas de potencia para referirse a un evento indeseable y momentáneo, por naturaleza.

Los transitorios se pueden clasificar en dos categorías: impulsivos y oscilatorios. Estos términos se refieren a la naturaleza de la forma de onda que adquiere un transitorio de corriente o voltaje dado.

### 2.4.1.1 Transitorios impulsivos

Un transitorio impulsivo es un cambio súbito, que no es de la frecuencia del sistema, en las condiciones de estado estable de voltaje, corriente o ambas y es unidireccional en polaridad (ya sea positivo o negativo).

Los transitorios impulsivos son normalmente caracterizados por sus tiempos de elevación y descenso. Los transitorios impulsivos pueden excitar la frecuencia natural del sistema y producir transitorios oscilatorios.

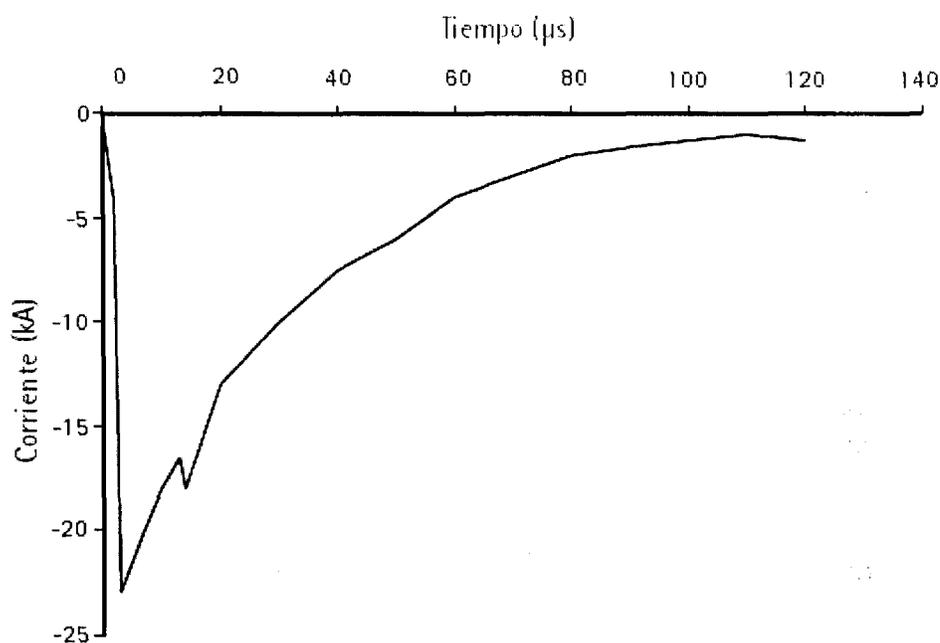


Figura 2.1 Transitorio impulsivo ocasionado por una descarga atmosférica.

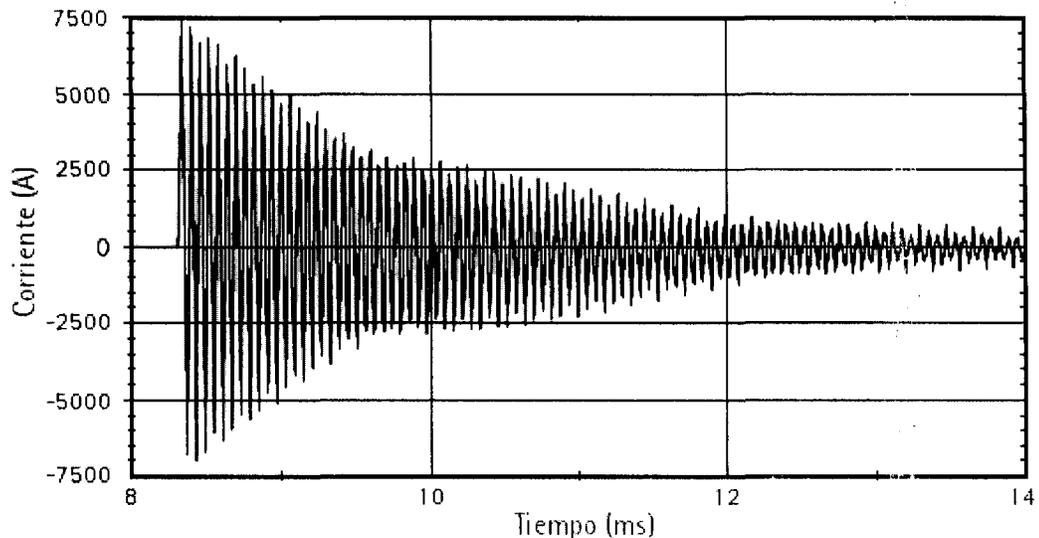
### 2.4.1.2 Transitorios oscilatorios

Un transitorio oscilatorio es un cambio súbito, que no es de la frecuencia del sistema, en las condiciones de estado estable de voltaje, corriente o ambas e incluye valores de polaridad positiva y negativa. Es descrito por su duración, magnitud y frecuencia. Los rangos de frecuencia que aparecen en la tabla 2.1 son elegidos para que coincidan con ciertos tipos de transitorios existentes en un sistema de potencia.

Los transitorios oscilatorios con una componente fundamental de frecuencia superior a 500 kHz y duración típica de microsegundos (o varios ciclos de la frecuencia del sistema)

son considerados transitorios de alta frecuencia. Un transitorio con una componente fundamental de frecuencia entre 5 y 500 kHz con duración de decenas de microsegundos (o varios ciclos de la frecuencia del sistema), es conocido como un transitorio de media frecuencia. Un transitorio con una componente fundamental de frecuencia de menos de 5 kHz, y duración de 0.3 a 50 ms, es considerado un transitorio de baja frecuencia.

Se pueden encontrar transitorios oscilatorios de frecuencias menores a 300 Hz a nivel distribución. Estos son generalmente asociados con ferorresonancia y energización de transformadores.



**Figura 2.2** Transitorio oscilatorio de frecuencia media ocasionado por la energización espalda con espalda de bancos de capacitores.

## 2.4.2 Variaciones de voltaje de larga duración

Estas variaciones envuelven desviaciones en valor efectivo (rms) a la frecuencia del sistema por tiempo mayor a un minuto.

Las variaciones pueden ser tanto sobrevoltajes o bajo voltajes, y no son generalmente resultado de fallas en el sistema, sino por variaciones en la carga en el sistema u algunas operaciones de conmutación. Estas variaciones son típicamente desplegadas en gráficas de voltaje rms contra tiempo.

### 2.4.2.1 Sobrevoltaje

Un sobrevoltaje es un incremento en el valor rms del voltaje mayor al 110 por ciento a la frecuencia del sistema por una duración mayor que un minuto. Los sobrevoltajes son el resultado de conmutación de cargas (como desconectar una carga grande o energizar un

banco de capacitores). Son ocasionados porque el sistema es demasiado débil para cierta regulación de voltaje o los controles de voltaje son inadecuados. Una selección incorrecta de las derivaciones de los transformadores puede resultar también en sobrevoltajes en el sistema.

#### **2.4.2.2 Bajo voltaje**

Es un decremento en el valor rms del voltaje a menos del 90 por ciento a la frecuencia del sistema por una duración mayor a un minuto.

Son el resultado de eventos opuestos a los que originan sobrevoltajes. Una carga que se conecta o un banco de capacitores que se desconecta pueden ocasionar el fenómeno hasta que el equipo de regulación de voltaje regrese este parámetro al nivel apropiado. Los circuitos sobrecargados pueden generar este problema también.

#### **2.4.2.3 Interrupción sostenida**

Cuando el voltaje del suministro ha sido cero por un periodo de tiempo de más de un minuto, se conoce como interrupción sostenida. Estas interrupciones son por lo general permanentes y necesitan de la intervención humana para restaurar el sistema.

#### **2.4.3 Variaciones de voltaje de corta duración**

Esta categoría engloba abatimientos (sags), swells e interrupciones cortas. Cada tipo de variación puede ser designada como instantánea, momentánea o temporal, dependiendo de la duración.

Estas variaciones son causadas por condiciones de falla, la energización de cargas muy grandes que requieren corrientes de arranque grandes. Dependiendo de la localización de la falla y de las condiciones del sistema, se pueden presentar cualquiera de los fenómenos mencionados.

##### **2.4.3.1 Interrupción (Instantánea, Momentánea, Temporal)**

Una interrupción ocurre cuando el voltaje de suministro o la corriente de la carga disminuyen a menos de 0.1 p.u., por un periodo de tiempo que no excede un minuto.

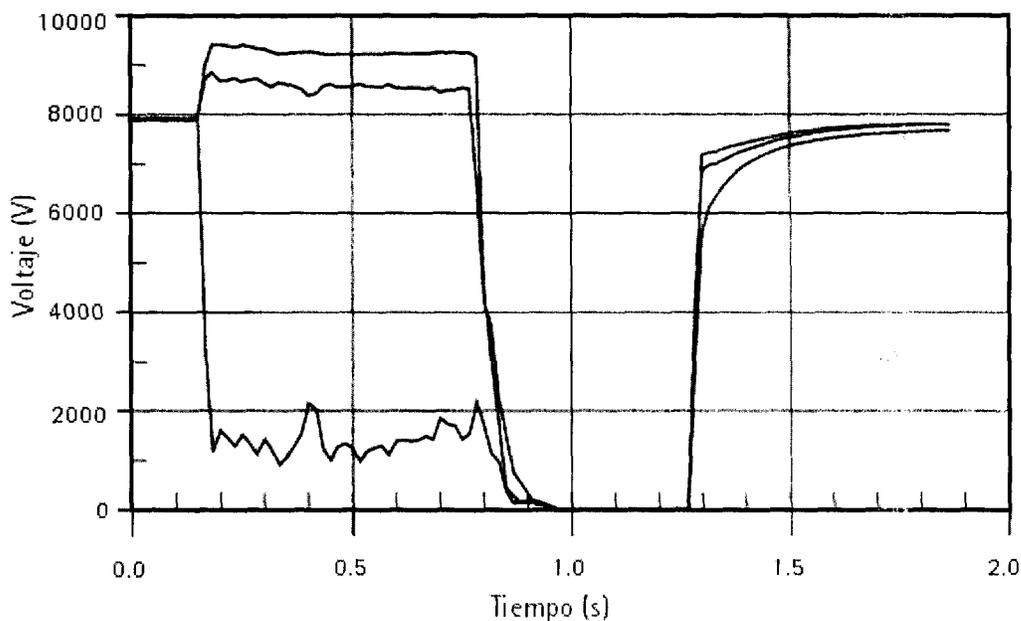


Figura 2.3 Voltajes trifásicos experimentando una interrupción tras una falla y el recierre del interruptor.

### 2.4.3.2 Abatimiento de voltaje (sag, dip)

Un abatimiento de voltaje (*sag*) es un descenso del voltaje o la corriente entre 0.1 y 0.9 p.u. en valor efectivo y a la frecuencia del sistema, por duraciones desde medio ciclo hasta 1 minuto.

### 2.4.3.3 Swell

Un swell está definido como un incremento de entre 1.1 y 1.8 p.u. en valor rms del voltaje o la corriente a la frecuencia del sistema, de medio ciclo a un minuto.

### 2.4.4 Desbalance de voltaje

Se define normalmente como la máxima desviación del promedio de voltajes o corrientes trifásicas, dividido entre el promedio, expresado en porcentaje. Algunos estándares lo definen como la razón entre la secuencia negativa o cero y la secuencia positiva.

La principal fuente de desbalances en voltaje son cargas monofásicas en circuitos trifásicos. El desbalance también puede ser resultado de un fusible fundido en una fase de un banco de capacitores trifásicos.

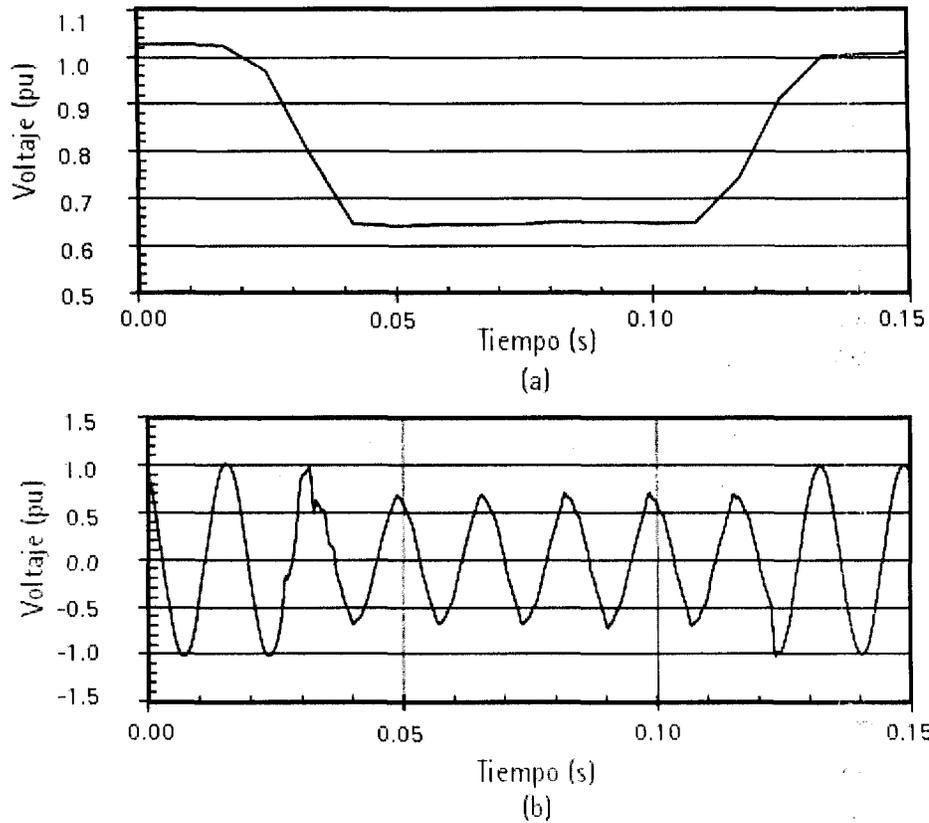


Figura 2.4 Abatimiento de voltaje tras una falla de línea a neutro. a) Voltaje efectivo registrado durante el evento. b) Forma de onda registrada.

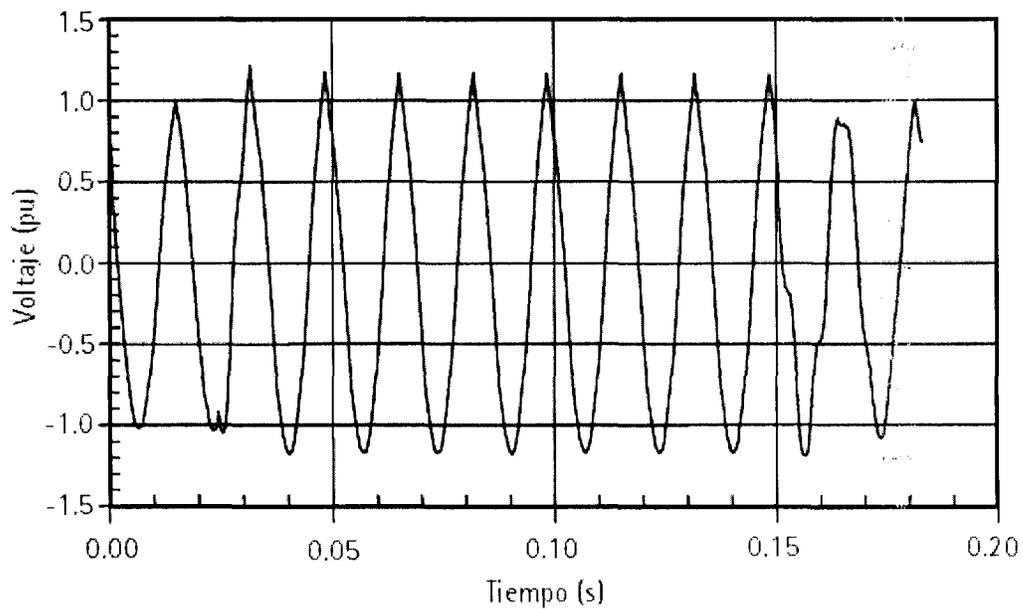


Figura 2.5 Swell ocasionado por la salida de operación de un motor.

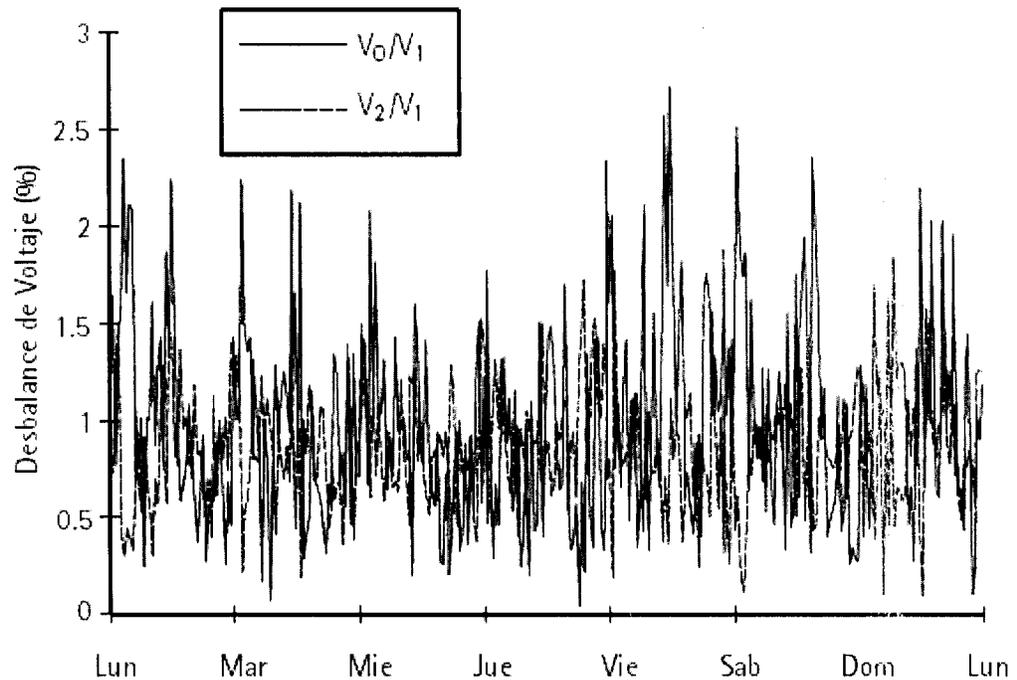


Figura 2.6 Gráfica de tendencia del desbalance de un alimentador residencial.

#### 2.4.5 Distorsión en la forma de onda

Se define como una desviación en estado estable de una onda senoidal pura de la frecuencia del sistema caracterizado por el contenido espectral de la desviación.

##### 2.4.5.1 Componente de CD

La presencia de un voltaje o corriente de CD en el sistema es llamado componente de CD. Esto puede ocurrir como resultado de asimetría en convertidores de estado sólido. La existencia de CD, por ejemplo, puede saturar el núcleo de un transformador y provocar calentamiento adicional y pérdida de vida.

##### 2.4.5.2 Armónicas

Son voltajes y corrientes senoidales que tienen frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental del sistema (frecuencia de diseño, 50 Hz o 60 Hz). Las formas de onda distorsionadas o con contenido armónico pueden ser descompuestas en una suma de la componente fundamental y las armónicas. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de dispositivos y cargas en el sistema de potencia.

### 2.4.5.3 Interarmónicas

Los voltajes y frecuencias que tienen componentes de frecuencia que no son múltiplos de la frecuencia de diseño del sistema se conocen como interarmónicas.

Las interarmónicas se pueden encontrar en redes de cualquier nivel de voltaje. Las fuentes principales de distorsión interarmónica son los convertidores de frecuencia estáticos, los cicloconvertidores, los hornos de inducción y los dispositivos de arco. Son generalmente el resultado de la conversión de frecuencia y no son constantes; varían con la carga. Pueden generar también resonancias en el sistema de potencia cuando la frecuencia interarmónica resuena con la frecuencia natural de un circuito dado.

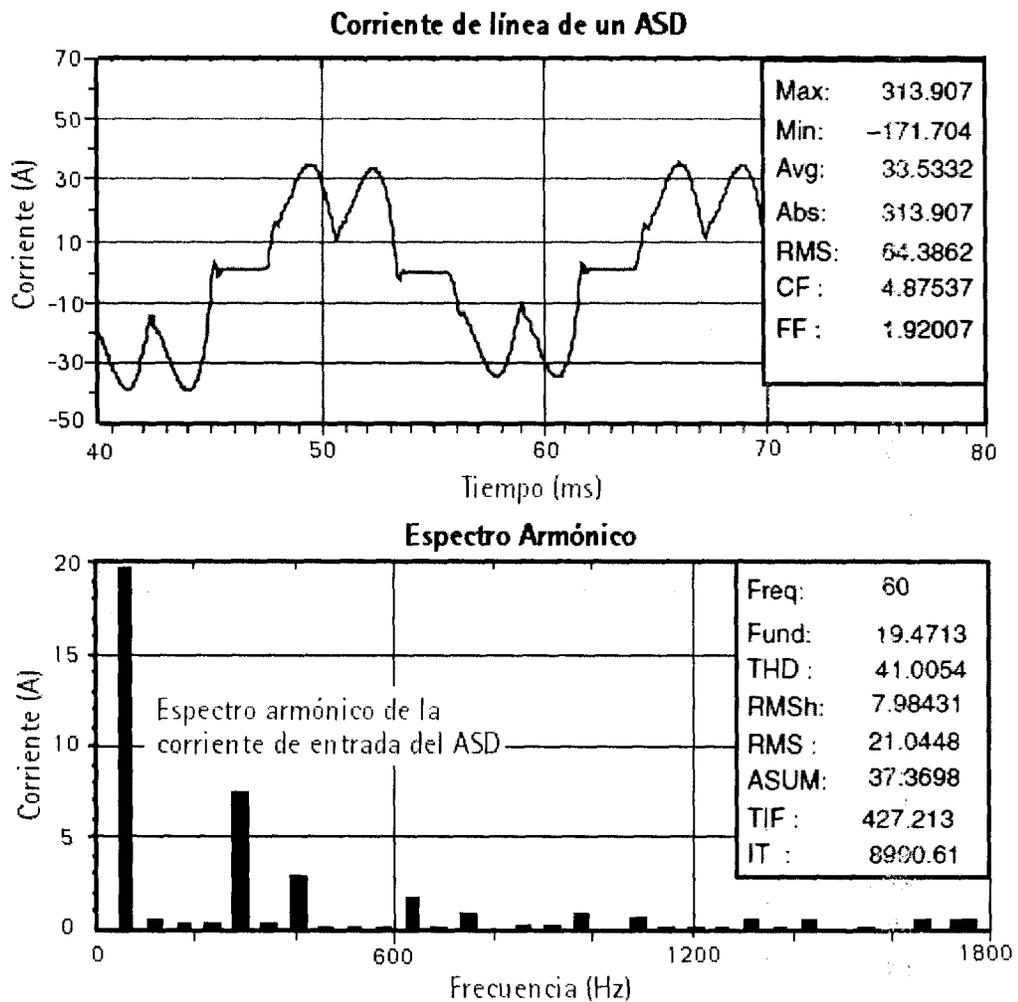
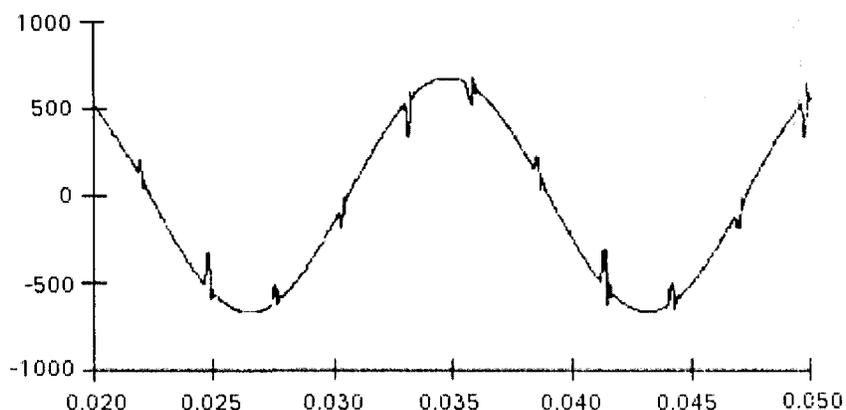


Figura 2.7 Corriente de fase demandada por un drive de CA (p. ej., alimentando a un motor) y espectro armónico de la misma.

### 2.4.5.4 Muestras (Notching)

Las muescas son un disturbio periódico en el voltaje causado por la operación normal de convertidores de estado sólido cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Durante este periodo, existe un corto circuito momentáneo entre las dos fases, llevando el voltaje a cero tan cerca como lo permite la impedancia del sistema.

Como las muescas ocurren continuamente, puede ser caracterizado por el espectro armónico del voltaje afectado. Aún así, es tratado como un caso especial.



**Figura 2.8** Forma de onda de voltaje entre líneas que alimenta un rectificador de seis pulsos (seis muescas por ciclo).

### 2.4.5.5 Ruido

El ruido es definido como señales eléctricas indeseadas con contenido espectral menor a 200 kHz montado en el voltaje o corriente de conductores de fase, o en conductores neutros o bien, líneas de señal.

Los problemas de ruido son exacerbados por puestas a tierra inadecuadas que fallan en conducir el ruido lejos del sistema de potencia. Perturba al equipo electrónico como PLCs o microcomputadoras. El problema puede ser mitigado usando filtros, transformadores de aislamiento o acondicionadores de línea.

El ruido puede ser de modo común, cuando se presenta de neutro a tierra y se presenta en todas los voltajes de línea a tierra (los voltajes de línea a neutro son senoidal pura); y de modo diferencial, cuando se presenta de línea a neutro en alguna fase en particular [6].

### 2.4.6 Fluctuaciones en el voltaje

Son variaciones sistemáticas en la envolvente del voltaje o una serie de cambios aleatorios en el voltaje, la magnitud de estos cambios no excede el rango de 0.9 a 1.1 p.u.

Algunas cargas pueden presentar fluctuaciones continuas, rápidas en la corriente que demandan y causar variaciones en el voltaje que se conocen como parpadeo ó "*flicker*". El término flicker se deriva del impacto de la fluctuación del voltaje en lámparas y otros dispositivos emisores de luz, los cuales son percibidos por el ojo humano como parpadeo.

### 2.4.7 Variaciones en la frecuencia del suministro

Estas variaciones son definidas como una desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor de diseño (50 Hz, 60Hz).

La frecuencia está directamente relacionada a la velocidad de rotación de los generadores que abastecen el sistema. Existen pequeñas variaciones en la frecuencia cuando el balance dinámico de las cargas y la generación eléctrica cambian. Las variaciones en la frecuencia fuera de los límites aceptados para la operación en estado estable pueden ser causadas por fallas en los sistemas de transmisión, un bloque de cargas grandes desconectado o la salida de servicio de un gran número de generadores.

## 2.5 Equipos acondicionadores [5]

Las soluciones a los problemas en el suministro de energía eléctrica se pueden encontrar instalando equipos que se conocen como acondicionadores de calidad de energía.

Es conveniente tener una instalación eléctrica de calidad [6], sin sistemas aislados (no puestos a tierra) ó sistemas con múltiples uniones neutro a tierra. Se recomienda que la unión de neutro a tierra sea cercana al equipo crítico y sensible y todo el equipo acondicionador este adecuadamente instalado. Todas las instalaciones deben contar con puesta a tierra de equipos. Las deficiencias en estas recomendaciones son, a menudo, causa de problemas recurrentes en calidad de energía para los usuarios finales.

### 2.5.1 Supresores de sobrevoltajes transitorios (TVSS)

Reducen o eliminan los impulsos o "*surge transients*". Los más comunes utilizan varistores de óxido metálico (MOV) y solo eliminan impulsos cuando se excede cierto valor instantáneo en el voltaje. Los más sofisticados son los supresores activos que son capaces

de limitar impulsos sin importar en qué punto de la onda sinusoidal ocurren ("*sine wave tracking*").

Los supresores se pueden clasificar de acuerdo a la conexión con la carga que protegen. La conexión puede ser en paralelo o en serie con la carga, siendo la conexión en paralelo la más común. El tamaño de los supresores paralelo no depende del tamaño de la carga, sino de su cercanía a la acometida y de la corriente que pueden tolerar. El supresor de sobrevoltajes transitorios conectado en paralelo y el apartarrayos tienen el mismo principio de operación; cuando el voltaje en terminales de éstos aumenta, la resistencia del elemento de protección disminuye, dejando pasar más corriente.

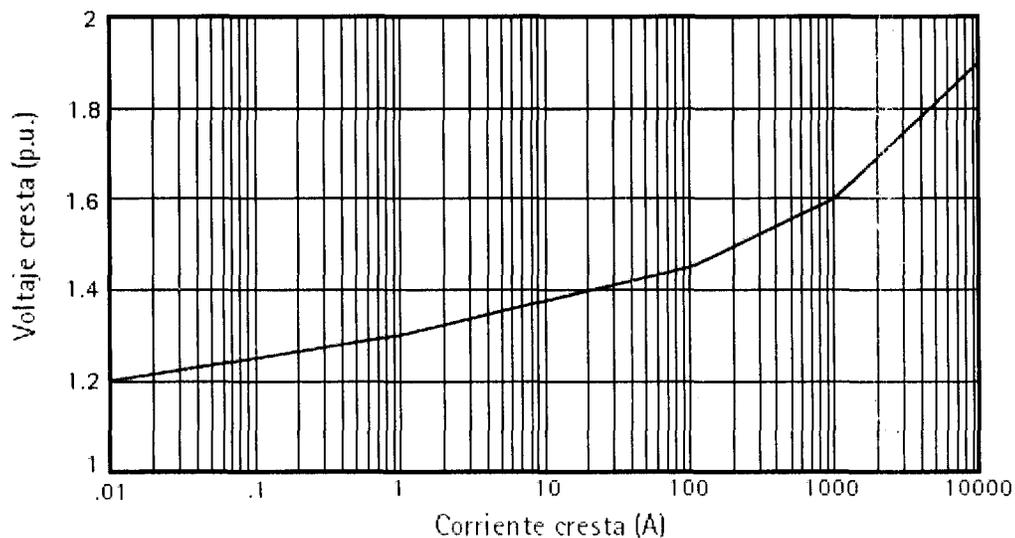


Figura 2.9 Voltaje cresta contra corriente cresta en un supresor de sobrevoltajes transitorios [4].

### 2.5.2 Apartarrayos

Los apartarrayos protegen el aislamiento de transformadores, máquinas giratorias y en general de todo equipo eléctrico. Difieren de los supresores en el nivel al que comienzan a conducir. Por ejemplo, es común que un supresor inicie la conducción con un voltaje del orden de dos veces el valor cresta del voltaje, un apartarrayos debe iniciar la conducción antes del nivel básico de impulso y este puede ser varias veces el valor de cresta.

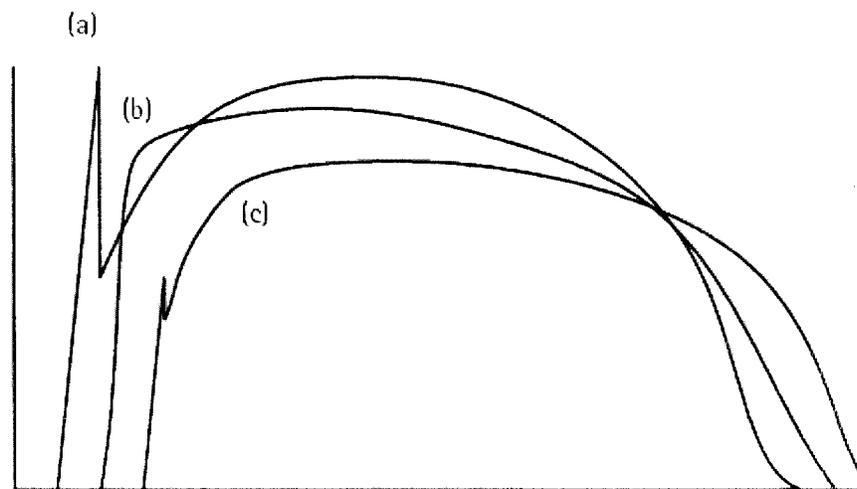
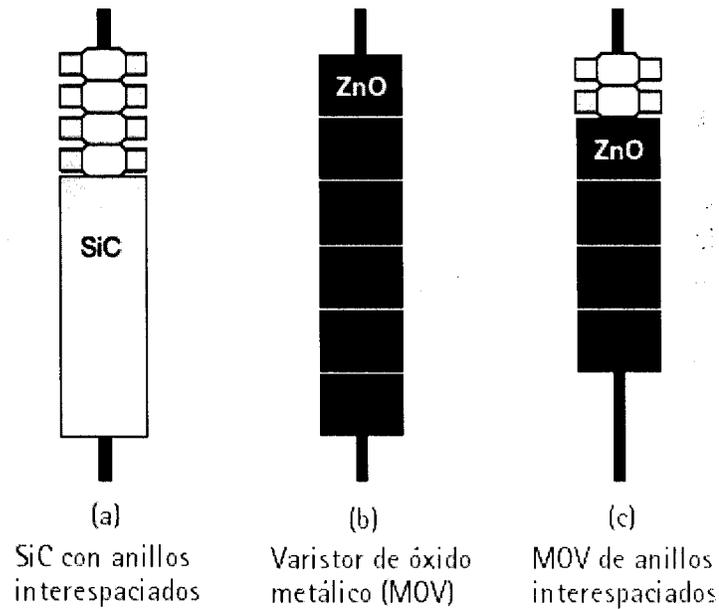


Figura 2.10 Tres tecnologías distintas de apartarrayos y su efecto contra una onda  $8 \times 20 \mu\text{s}$  [4].

### 2.5.3 Filtros de radio frecuencia

Reducen el ruido (de modo común y de modo diferencial), la atenuación del ruido y el ancho de banda dependen del diseño del filtro.

### 2.5.4 Filtros de armónicas

Reducen la distorsión en la corriente de entrada de cargas no lineales, la distorsión puede causar el calentamiento de los conductores y de los transformadores. Los filtros están formados por reactores serie y trampas para evitar que las armónicas sean alimentadas a la fuente.

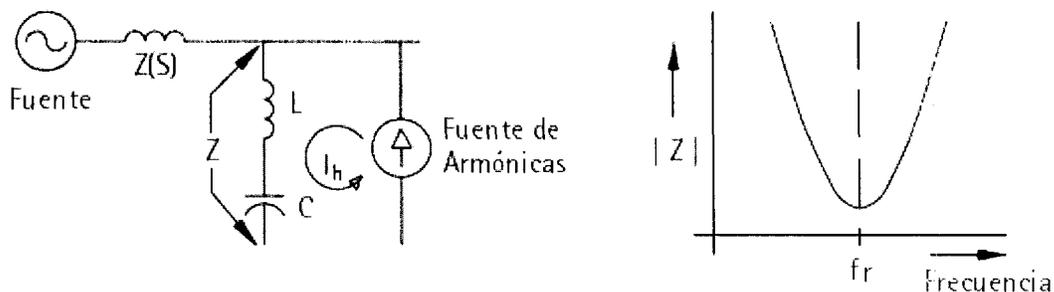


Figura 2.11 Filtro serie sintonizado y su respuesta a la frecuencia.

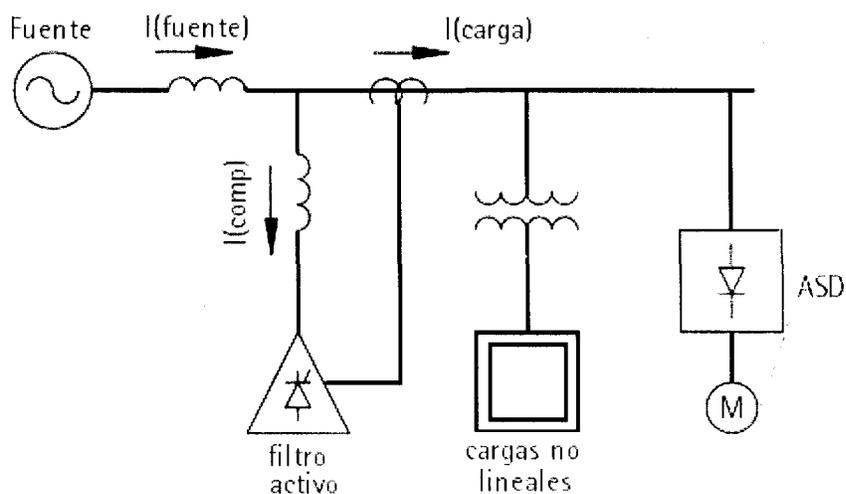


Figura 2.12 Filtro activo para cancelar corrientes armónicas.

### 2.5.5 Transformadores de aislamiento

Atenúan los disturbios de modo común (neutro a tierra y fase a tierra). Proporcionan un punto de tierra local. Con derivaciones (taps) permite la compensación de las caídas de voltaje de estado estable en el circuito de alimentación.

No sirven para restaurar el sistema de sags y swells que se puedan presentar, pero si el problema de calidad de energía es de ruido de modo común, ayudan a eliminar el acoplamiento de ruido. Los transformadores de aislamiento que cuentan con blindaje electrostático (eliminando la intercapacitancia entre devanados), lo minimizan aún más.

El blindaje electrostático evita también que el ruido de modo común se convierta en ruido de modo diferencial (entre línea y neutro) [4].

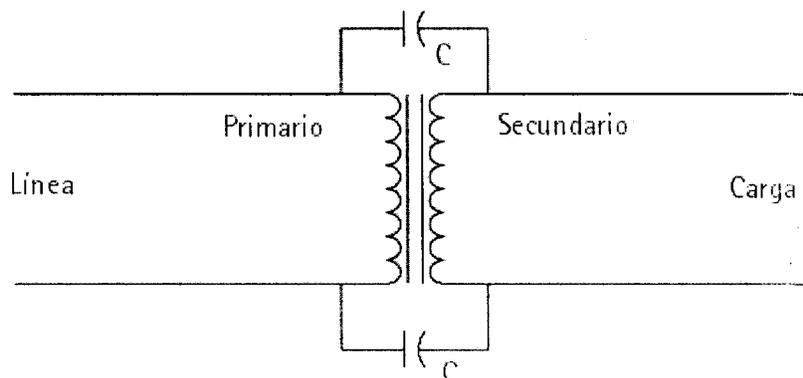


Figura 2.13 Transformador de aislamiento.

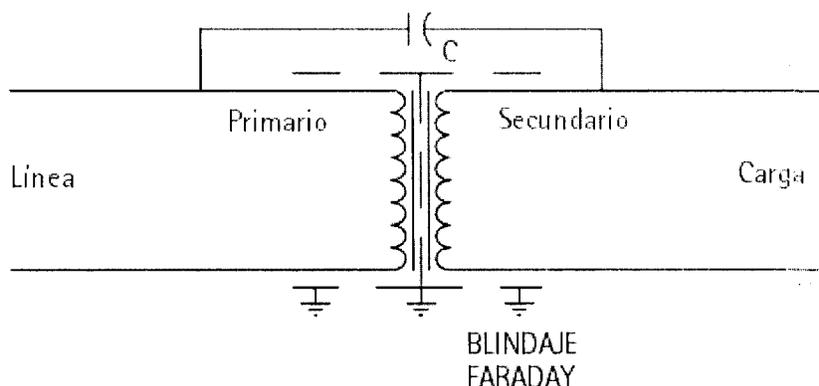


Figura 2.14 Transformador de aislamiento con blindaje electrostático (blindaje Faraday).

### 2.5.6 Transformadores ferorrresonantes

Este regulador mantiene un voltaje casi constante a la salida con excursiones de 20 a 40 % en el voltaje de entrada. Son muy confiables pues no tienen partes móviles ni componentes electrónicos activos. Filtran muy bien los ruidos y los picos de voltaje. Proporcionan un punto de tierra local para disminuir el voltaje de neutro a tierra. Tienen un tiempo de respuesta desde medio ciclo y no está limitada en tiempo. Esto es, si el voltaje de entrada cambia repentinamente, en menos de 9 ms el voltaje de salida se regula. En la figura 2.15 se muestra la característica de operación de un transformador ferorrresonante típico. A plena carga, el transformador puede recibir a la entrada hasta una disminución de un 30% del valor efectivo del voltaje y aún así mantiene la salida constante; a una cuarta parte de la capacidad, el transformador puede recibir un abatimiento de hasta el 70% del voltaje.

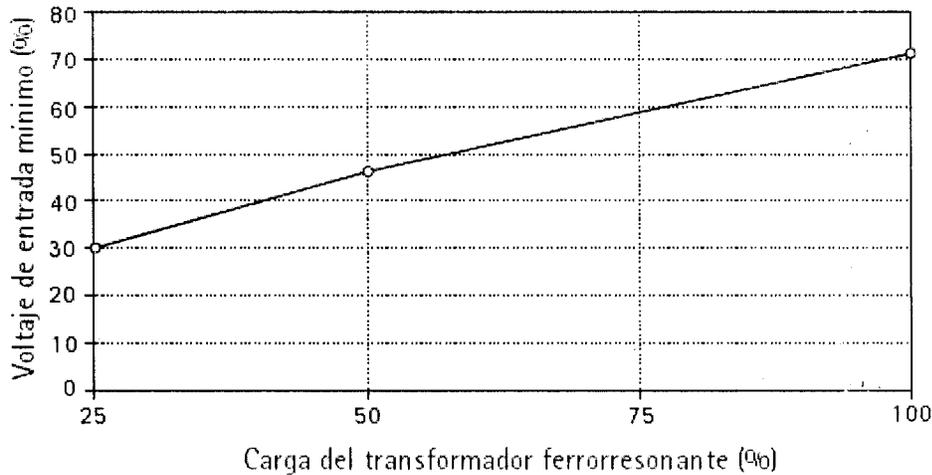


Figura 2.15 Característica de operación de un transformador ferorrresonante.

### 2.5.7 Fuentes ininterrumpibles de energía (UPS)

Dependen de su configuración, pero típicamente son capaces de operar manteniendo la tensión de salida constante tanto frente a abatimientos de tensión como a interrupciones por un tiempo directamente relacionado con la capacidad de almacenamiento de energía de sus baterías. Basan su funcionamiento en tres etapas, la primera es de rectificación, cargando un banco de baterías, en la segunda etapa y posteriormente esta potencia se pasa a través de un inversor, alimentando la carga en CA y por lo tanto brindando aislamiento de los disturbios de la línea.

Pueden trabajar en configuración stand-by, donde permanecen desconectadas de la carga en régimen normal, efectuando la transferencia a las baterías en caso de disturbios presentes en la alimentación. Una UPS híbrida tiene un transformador ferorrresonante a la salida que provee de respaldo momentáneo en la transferencia del UPS [1].

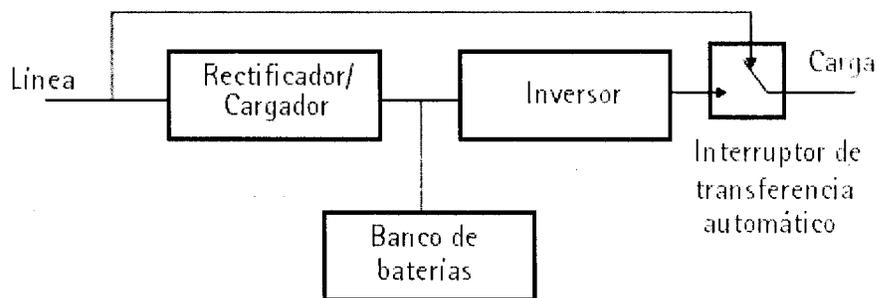


Figura 2.16 UPS en configuración de stand-by.

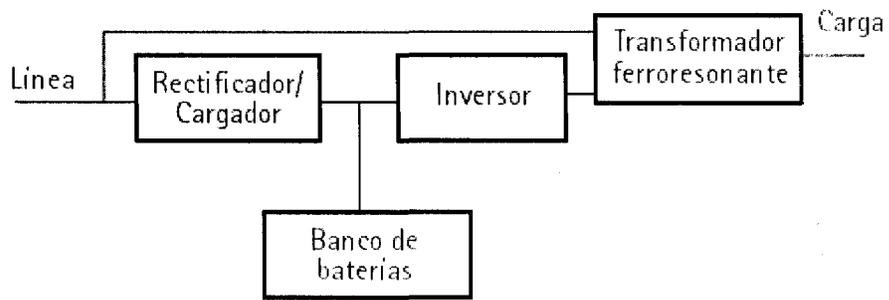


Figura 2.17 UPS en configuración híbrida.

## Transitorios Eléctricos [7]

## 3.1 Introducción

Los transitorios eléctricos son perturbaciones de una duración muy corta (de menos de un ciclo por lo general), y el circuito eléctrico es rápidamente restaurado al estado estable u operación original, suponiendo que el transitorio no lo haya dañado. Para que un transitorio exista, debe de existir una causa. Algunas de las más comunes se enlistan a continuación:

- Descargas atmosféricas
- Conmutación de cargas (entradas y salidas de operación)
- Interrupción de corrientes de falla
- Conmutación de líneas de transmisión o distribución.
- Conmutación de bancos de capacitores

Los transitorios son algunas de las anomalías en un sistema eléctrico más difíciles de detectar y tratar. Su ocurrencia puede ser aparentemente aleatoria, y pueden variar en gravedad dependiendo de las condiciones particulares en las que se encontraba el sistema en el tiempo de ocurrencia. Su efecto en dispositivos y equipos varía dependiendo de los equipos mismos y su localización en el circuito.

Los dispositivos de medición convencionales no son capaces de detectar o medir eventos transitorios debido a su limitada respuesta a la frecuencia o tasa de muestreo. Por ejemplo, si un transitorio ocurre por 2 ms y es caracterizado por una frecuencia de 20 kHz, el equipo de medición debe tener una respuesta a la frecuencia o tasa de muestreo de al menos 10 veces 20 kHz (200 kHz), de manera que describa decentemente las características del transitorio. Para transitorios más rápidos, se necesita una tasa de muestreo mayor necesariamente.

La importancia del entendimiento de los fenómenos transitorios no es debido al equipo electromagnético convencional, como transformadores y motores, que bien pueden ver comprometidos sus niveles de aislamiento ante un evento transitorio. Los problemas

aparecen por la sensibilidad de los dispositivos microelectrónicos y circuitos que forman los elementos de control de los sistemas eléctricos.

Los microprocesadores (PICs, etc.), controladores electrónicos (como PLCs), módems de comunicación por mencionar algunos son el nervio central de cualquier instalación comercial o industrial de hoy en día. Los equipos electrónicos son cada vez más sofisticados y al mismo tiempo su susceptibilidad a transitorios eléctricos aumenta. Debido a que el desempeño de cualquier máquina o proceso es tan confiable como lo es su eslabón más débil, el proceso puede resultar vulnerable debido a la susceptibilidad del componente menos costoso y aparentemente insignificante. Las pérdidas por paro de operaciones van desde los miles de dólares hasta los millones.

### **3.2 Modelación para el análisis transitorio**

En estado estable, la operación de un sistema de potencia está caracterizada por la frecuencia fundamental o algunas frecuencias armónicas. Los tres elementos pasivos R (resistencia), L (inductancia) y C (capacitancia) determinan como responderá el sistema en estado estable bajo un voltaje aplicado.

El modelo del sistema para un análisis transitorio es considerablemente distinto. Los elementos pasivos anteriormente mencionados siguen dictando el comportamiento del circuito, pero su efecto en el transitorio puede cambiar afectando la duración e impacto del mismo. En un sistema eléctrico, la inductancia y la capacitancia son los elementos almacenadores de energía que contribuyen a la naturaleza de los transitorios. La resistencia solo es un elemento disipador de energía que contribuye al amortiguamiento del fenómeno transitorio, es decir, promueve la transición al estado estable.

Una vez que el modelo del sistema para el análisis transitorio se ha creado, algunos elementos pueden ser sistemáticamente eliminados dependiendo de la magnitud, duración y aportación del elemento específico al problema dado. Lo primero que se tiene que determinar es el modelo de parámetros concentrados total para el análisis, y después eliminar los elementos que no son relevantes para el disturbio estudiado. Después, se desarrolla el modelo matemático del circuito (las ecuaciones diferenciales que gobiernan el circuito), y se obtiene la solución.

En la figura 3.1 se muestra un sistema eléctrico que consiste de un suministro que alimenta a un transformador a través de un interruptor y el secundario del transformador a un motor (carga resistiva- inductiva). La figura 3.2 es el modelo para análisis de estado estable y la figura 3.3 es el modelo para el análisis transitorio del mismo circuito. En el modelo transitorio, la capacitancia en las terminales del interruptor, la de las líneas que alimentan las cargas, la de los devanados del motor y la de la fuente, así como la rama de magnetización del transformador pueden ser muy significativas y no deben ser eliminadas del modelo sin previa consideración.

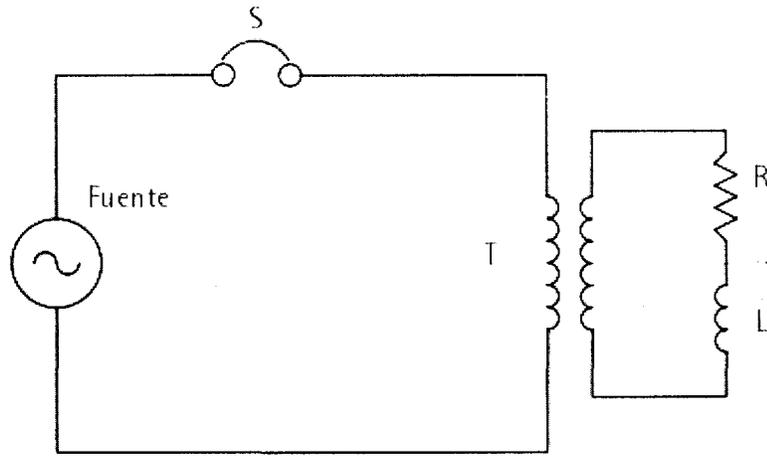


Figura 3.1 Sistema eléctrico que consiste de un transformador alimentando a un motor.

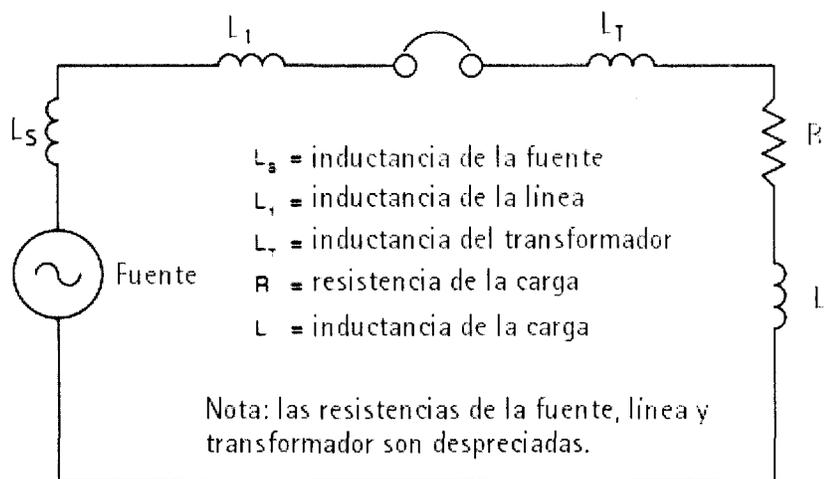


Figura 3.2 Modelo para el análisis de estado estable del circuito de la figura 3.1.

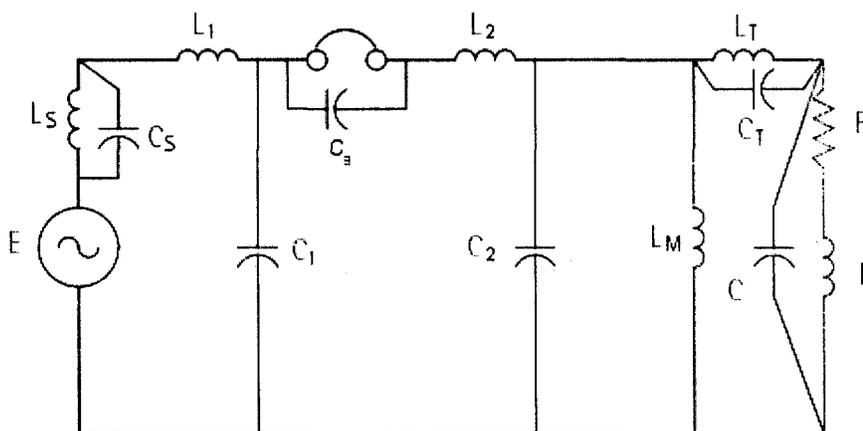


Figura 3.3 Modelo para el análisis transitorio del circuito de la figura 3.1.

### 3.3 Ejemplos de modelos para análisis transitorio y su respuesta

En esta sección se incluyen cinco modelos con su respuesta transitoria para proveer los elementos básicos de la modelación de los circuitos.

#### 3.3.1 Energizando un capacitor con CD

En la figura 3.4 se muestra el circuito RC en cuestión. El modelo no requiere mayor modificación: una resistencia, un interruptor ideal, la batería y el capacitor. El modelo matemático si necesita mucho cuidado ya que se requiere la solución completa de la ecuación diferencial que gobierna el circuito (respuesta natural y respuesta forzada). En este caso la respuesta que nos interesa es la respuesta natural del circuito que es el transitorio.

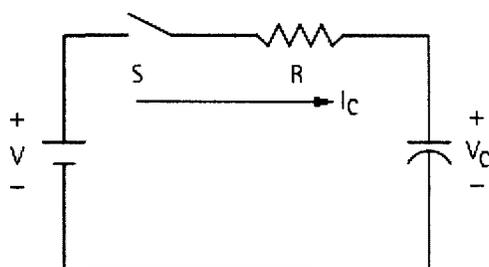


Figura 3.4 Un voltaje de CD se aplica a un circuito RC.

Ya que se cuenta con el modelo de parámetros para el análisis transitorio, eliminando los elementos que no son relevantes (en este caso no se considera la inductancia parásita de la línea, ni la resistencia de la fuente y del interruptor; o bien, ya están absorbidas en la resistencia total. Tampoco se tomó en consideración la capacitancia en las terminales del interruptor ya que se analiza el caso del cierre del interruptor), se tiene que obtener el modelo matemático. Utilizando convención pasiva se obtiene la ecuación diferencial que gobierna el circuito con la ley de voltajes de Kirchhoff.

$$V - I_C(t) \cdot R - \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C(\lambda) d\lambda = 0 \quad (3.1)$$

Esta ecuación diferencial en el tiempo se puede resolver de una manera más sencilla mediante la transformada de Laplace. En el anexo A se encuentra una tabla de transformadas de Laplace y sus propiedades más comunes.

En la expresión para el voltaje en el capacitor es preciso mencionar que se encuentra implícito su voltaje inicial.

A la ecuación 3.1 se le aplica la transformación al dominio de Laplace y resulta en

$$\frac{V}{s} - I_C(s) \cdot R - \frac{V_{C0}}{s} - \frac{1}{Cs} I_C(s) = 0$$

Despejando y reagrupando para encontrar la ecuación de la corriente, obtenemos la siguiente ecuación todavía en el dominio de Laplace,

$$I_C(s) = \left( \frac{V - V_{C0}}{R} \right) \cdot \left( \frac{1}{s + 1/RC} \right) = 0 \quad (3.2)$$

La respuesta en el tiempo se obtiene haciendo la transformada inversa

$$I_C(t) = \left( \frac{V - V_{C0}}{R} \right) \cdot e^{-\frac{1}{RC}t} u(t) \quad (3.3)$$

Con la expresión de la corriente en el tiempo se puede encontrar la ecuación del voltaje de cualquier elemento en el circuito, como el del capacitor

$$\begin{aligned} V_C(t) &= V_{C0} + \frac{1}{C} \int_0^t \frac{V - V_{C0}}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC}\lambda} d\lambda \\ &= \left[ V - (V - V_{C0})e^{-\frac{1}{RC}t} \right] u(t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

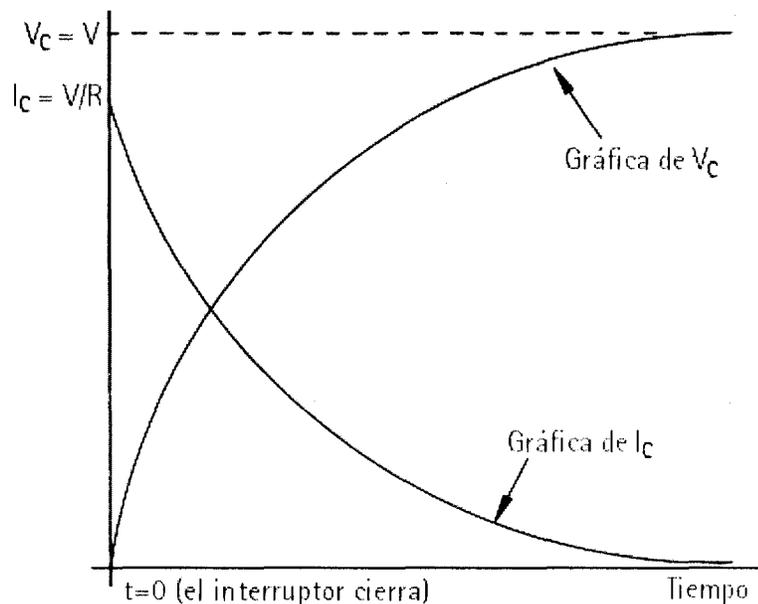


Figura 3.5 Voltaje y corriente durante la energización de un circuito RC con CD.

La figura 3.5 muestra el voltaje y la corriente en el capacitor, en el caso que el voltaje inicial en el capacitor es cero.

### 3.3.2 Energizando una inductancia con CD

La figura 3.6 muestra un circuito RL. El modelo de parámetros, al igual que en el caso anterior, no requiere alteración. El modelo matemático se puede obtener siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó para la energización del capacitor.

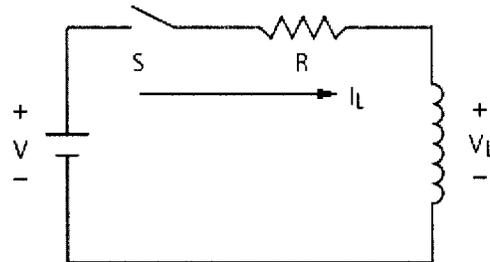


Figura 3.6 Un voltaje de CD se aplica a un circuito RL.

La ecuación diferencial se obtiene obedeciendo la ley de Kirchhoff de voltajes

$$V - I_l(t) \cdot R - L \frac{di_l}{dt} = 0 \quad (3.5)$$

La ecuación anterior es trasladada al dominio de Laplace y resulta en

$$\frac{V}{s} - I_l(s) \cdot R - Ls \cdot I_l(s) - L \cdot I_{l0} = 0$$

Desde este momento se pueden tomar ciertas decisiones ya que el circuito únicamente es alimentado por la batería. La corriente inicial en la inductancia debe ser cero, pero por el momento este sumando se mantendrá para tener la respuesta completa,

$$I_l(s) = \left[ \frac{V}{L} \right] \cdot \frac{1}{s(s + R/L)} + \frac{I_{l0}}{(s + R/L)} = 0 \quad (3.6)$$

La respuesta en el tiempo es

$$I_l(t) = \left\{ \frac{V}{R} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right] + LI_{l0} \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right\} u(t) \quad (3.7)$$

El voltaje en la inductancia se encuentra con la corriente en el tiempo

$$V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = \left[ V \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + I_{L0} \cdot R \right] u(t) \quad (3.8)$$

La figura 3.7 muestra el voltaje y la corriente en el inductor, en el caso que la corriente inicial en la inductancia es cero.

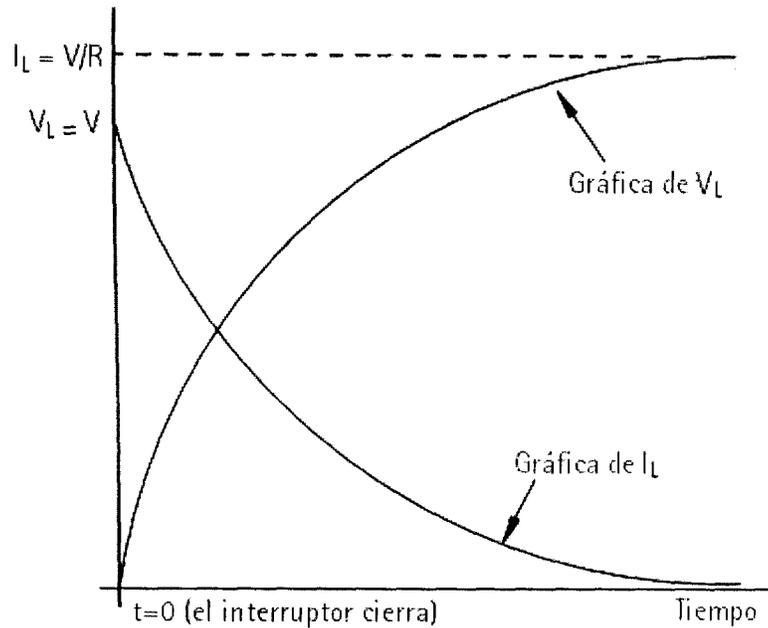


Figura 3.7 Voltaje y corriente durante la energización de un circuito RL con CD.

En las dos gráficas que se obtuvieron se observan las características inherentes de los componentes inductivos y capacitivos. En una capacitancia, el voltaje no puede cambiar instantáneamente pero la corriente empieza a circular enseguida. Una vez que el circuito llega al estado estable el capacitor se carga por completo al voltaje de la fuente y la corriente cae a cero. En una inductancia, la corriente no puede cambiar instantáneamente. Es decir, cuando el circuito se energiza la corriente se va a cero, el voltaje se establece en sus terminales, y después de 5 a 6 constantes de tiempo el voltaje cae a cero y la corriente crece hasta la corriente de operación normal. El circuito llega al estado estable.

El significado de la constante de tiempo en ambos circuitos analizados es importante mencionarlo. La constante de tiempo refleja la rapidez con la que el circuito se puede recuperar cuando es sujeto a la aplicación transitoria de voltaje o corriente. En el circuito RC mientras más grande sea la constante de tiempo, la razón de cambio de los incrementos de voltaje será menor. En el circuito inductivo, la constante de tiempo indica que tan rápido la corriente crece en la inductancia cuando se cierra el interruptor y que tan lento cae la corriente cuando el interruptor abre. La constante de tiempo es un parámetro muy importante en el análisis de perturbaciones en líneas de transmisión.

### 3.3.3 La combinación L-C energizada con CD

La combinación L-C, ya sea en paralelo o serie, es un circuito oscilatorio. En la ausencia de una resistencia oscilará indefinidamente. Como todos los circuitos eléctricos tienen una resistencia asociada, las oscilaciones eventualmente se acabarán. La frecuencia de las oscilaciones se conoce como frecuencia natural, que en el caso de un circuito L-C es

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

En los circuitos previamente analizados, solo había un lugar para almacenamiento de energía, la inductancia o la capacitancia. En un circuito con ambos componentes, aparecen transitorios de doble energía y la respuesta involucra dos términos exponenciales. Dependiendo del circuito, los exponentes pueden ser reales, imaginarios, o complejos conjugados. En los casos donde son imaginarios o complejos, se combinan para dar un seno o coseno que se manifiesta físicamente como una oscilación.

Haciendo un análisis muy sencillo de la figura 3.8, se puede llegar a la solución, de igual manera que en las ocasiones anteriores.

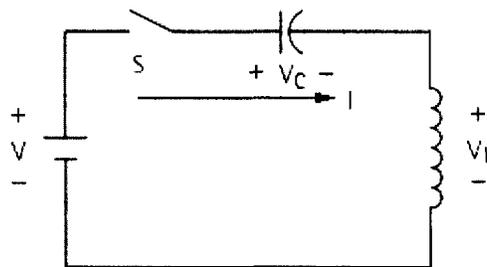


Figura 3.8 Voltaje de CD aplicado a un Circuito LC.

La ley de Kirchhoff otorga la ecuación diferencial del circuito.

$$V - \left( \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 I(\lambda) d\lambda + \frac{1}{C} \int_0^t I(\lambda) d\lambda \right) - L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (3.10)$$

En el dominio de Laplace y reacomodando la ecuación podemos encontrar la corriente que circula en la rama.

$$I(s) = \frac{V - V_{c0}}{L} \frac{1}{s^2 + (1/LC)} + I_0 \frac{s}{s^2 + (1/LC)} \quad (3.11)$$

Analizando la figura 3.8, se observa que no existe una corriente inicial, pero el voltaje inicial en el capacitor puede tener cualquier valor. Suponiendo que la capacitancia está inicialmente descargada, y  $1/LC = \omega_0^2$ ; entonces

$$I(t) = V \left( \frac{1}{\sqrt{L/C}} \right) \text{sen} \omega_0 t \quad (3.12)$$

Esta ecuación establece que la corriente oscila de manera sinusoidal a la frecuencia natural del circuito, que es función de L y de C únicamente. Otro punto importante es que la razón voltaje- corriente está dada por  $\sqrt{L/C}$ , que tiene dimensiones de impedancia. A este término se le conoce como impedancia característica y se escribe como

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (3.13)$$

Es una característica muy importante de cualquier circuito L-C.

El voltaje en el capacitor esta dado por la siguiente ecuación:

$$V_C = V_{C0} + \frac{1}{C} \int_0^t I(\lambda) d\lambda = V - [V - V_{C0}] \text{cos} \omega_0 t \quad (3.14)$$

La figura 3.9 muestra los voltajes en el capacitor para tres valores distintos de voltaje inicial. Cuando el voltaje inicial vale cero, se observa que la curva tiene la forma (1 - coseno) y puede alcanzar el doble del voltaje de la fuente. Para una carga negativa en el capacitor, el voltaje pico puede exceder el doble, ya que la carga eléctrica no puede cambiar instantáneamente al cerrar el interruptor. Asimismo, cuando la impedancia característica del circuito tiene un valor bajo, por ejemplo, en el caso de conmutar un banco de capacitores (C grande) con una fuente robusta (L pequeña), el pico de la corriente de energización puede alcanzar un valor muy grande.

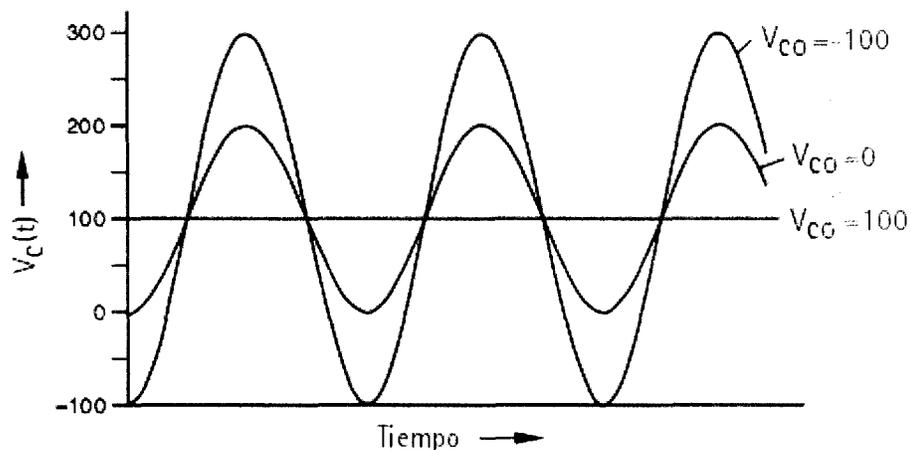


Figura 3.9 Voltaje del capacitor en un circuito LC para tres valores distintos de voltaje inicial. El voltaje de la fuente es 100 V.

### 3.3.4 El circuito RL con excitación senoidal [8]

Un voltaje senoidal se aplica a una combinación serie de inductancia y resistencia (figura 3.10). Este circuito es en realidad, el más simple equivalente de un interruptor de alto voltaje que pone una línea de transmisión o un cable subterráneo en corto circuito. La fuente de voltaje representa la fuerza electromotriz de los generadores sincrónicos conectados. La inductancia  $L$  representa la inductancia sincrónica de los generadores mismos, las inductancias de dispersión de los transformadores, las líneas de transmisión y cables. Todas las pérdidas están comprendidas en la resistencia  $R$ .

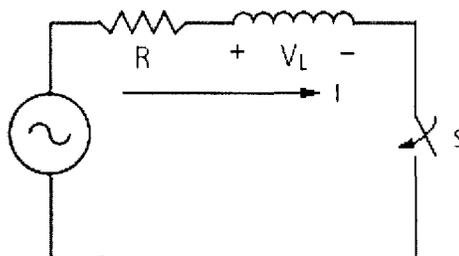


Figura 3.10 Voltaje senoidal se aplica a un circuito RL.

El ángulo de la impedancia es un valor importante cuando se trabaja con CA,

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (3.15)$$

Una vez más, la ley de Kirchhoff de voltaje es un buen punto de partida.

$$V_m \text{sen}(\omega t + \theta) = R \cdot I(t) - L \frac{dI}{dt} \quad (3.16)$$

Se puede observar claramente que el instante de cierre del interruptor tiene una importancia fundamental en el circuito, ya que este instante decide el ángulo de fase  $\varphi$  (entre 0 y 360°).

Transformando ambos lados de la ecuación al dominio de Laplace,

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \left\{ V_m (\text{sen} \omega t \cdot \cos \theta + \cos \omega t \cdot \text{sen} \theta) = R \cdot I(t) - L \frac{dI}{dt} \right\} \\ V_m \left( \frac{\omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \text{sen} \theta}{s^2 + \omega^2} \right) = R I(s) + L s I(s) - L I_0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Una vez que se conoce el ángulo de fase,  $\text{sen} \theta$  y  $\cos \theta$  son constantes. También, no existe una corriente inicial en el circuito, por lo que despejando para la corriente se encuentra la solución en el dominio de Laplace.

$$I(s) = \frac{V_m}{L} \frac{1}{s + (R/L)} \left( \left( \frac{\omega \cos \theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \text{sen} \theta}{s^2 + \omega^2} \right) \right) \quad (3.18)$$

Reacomodando y utilizando fracciones parciales se facilita encontrar la solución en el tiempo de la corriente.

$$I(s) = \left( \frac{A}{(s+\alpha)(s^2 + \omega^2)} + \frac{Bs}{(s+\alpha)(s^2 + \omega^2)} \right) \quad (3.19)$$

donde,

$$A = \frac{V_m}{L} \omega \cos \theta, \quad B = \frac{V_m}{L} \text{sen} \theta, \quad \alpha = R/L$$

Finalmente la corriente en el tiempo está dada por

$$I(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} [\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \text{sen}(\theta - \varphi) e^{-\alpha t}] \quad (3.20)$$

El primer término de la solución es el valor de estado estable. La amplitud es  $V_m/|Z|$  y está afectada por un retraso con respecto al voltaje debido al ángulo de la impedancia. El segundo término es el transitorio. En el caso específico que el interruptor cerrara cuando el ángulo de fase y el ángulo de impedancia son iguales el transitorio se elimina ( $\text{sen}(\theta - \varphi) = 0$ ) y la forma de onda de la corriente es simétrica. Por otro lado si  $(\theta - \varphi) = \pm \pi/2$ , el

término transitorio, que no es mas que un componente de CD, obtiene su máximo valor del doble de valor de cresta de la respuesta de estado estable.

En la figura 3.11 se muestra la corriente de la ecuación 3.20. Cuando la corriente posee un componente de CD se conoce como corriente asimétrica, donde el coeficiente de asimetría es el argumento  $(\theta - \varphi)$ .

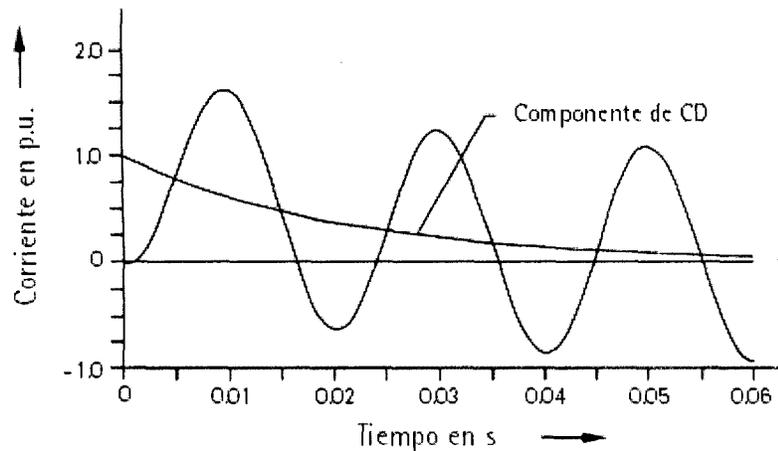


Figura 3.11 Corriente asimétrica de la ecuación 3.3.4.6.

### 3.3.5 El voltaje de recuperación transitoria al interrumpir una falla [3]

En el punto anterior se introdujo la aparición de una falla monofásica, pero ¿qué pasa al remover esa falla?; en la figura 3.12 se muestra el diagrama a estudiar. En este diagrama a diferencia de la figura 3.9 aparece la capacitancia de línea a tierra en las terminales del interruptor. Esto implica que el interruptor sufrirá del voltaje que aparezca en las terminales de la capacitancia.

Es necesario conocer este voltaje, que recibe el nombre de voltaje de recuperación transitoria. Para propósitos de este análisis se dejará fuera el efecto resistivo.

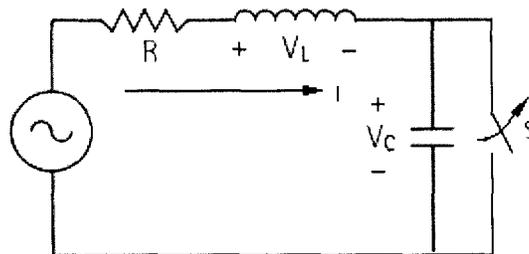


Figura 3.12 El interruptor abre el corto circuito de la figura 3.9.

La  $L$  en el circuito es toda la inductancia que limita la corriente de corto circuito hasta este punto del circuito, y  $C$  es la capacitancia natural del circuito adyacente a las terminales del interruptor. Esta capacitancia siempre existe. Comprende la capacitancia a tierra de aisladores, transformadores de corriente, de transformadores adyacentes y la capacitancia misma de las terminales del interruptor ya que una de las terminales esta aterrizada en el corto circuito.

Cuando un interruptor convencional libera la falla, en sí, no interrumpe la corriente, ya que se establece un arco a través de las terminales. En alguno de los instantes en que la corriente pasa por cero (en los primeros ciclos), es cuando efectivamente se interrumpe la falla.

El marco de tiempo para el análisis matemático es a partir de la interrupción de la corriente, por lo que despreciando el efecto resistivo, es cuando el voltaje es máximo. Por lo tanto,

$$V_m \cos \omega t = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t I_C(\lambda) d\lambda \quad (3.21)$$

Algunas decisiones para continuar con el análisis son que la corriente inicial debido a la inductancia es cero (se desprecia el voltaje de arco) y el voltaje inicial en el capacitor tiene que ser cero. Esto simplifica mucho la transformada de Laplace.

$$V_m \left[ \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right] = Ls \cdot I(s) + \frac{1}{Cs} \cdot I(s)$$

$$I(s) = \frac{V_m}{L} \left[ \frac{s^2}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + 1/LC)} \right] \quad (3.22)$$

Observando la ecuación, se anticipa que la respuesta será en la frecuencia natural (ecuación 3.9), al igual que cuando se analizó la energización de la combinación LC con CD. El voltaje en el dominio de Laplace es,

$$V_C(s) = \frac{1}{Cs} \cdot I(s) = \frac{V_m}{LC} \left[ \frac{s}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_0^2)} \right] \quad (3.23)$$

En el tiempo, la solución es la siguiente,

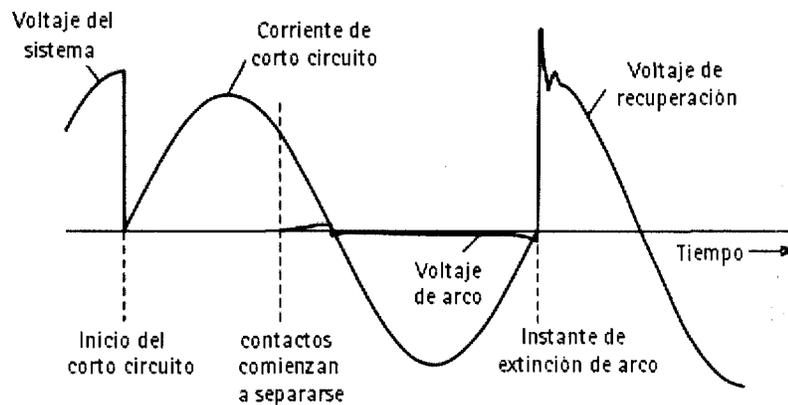
$$V_C(t) = V_m \left[ \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \right] (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) u(t) \quad (3.24)$$

Como la frecuencia natural por lo general es mucho más grande que la frecuencia del sistema  $\omega_0 \gg \omega$ , el término que multiplica al valor pico del voltaje es unitario prácticamente.

La velocidad en la componente de frecuencia natural representa un cambio nulo en la componente de frecuencia del sistema. La ecuación 3.24 se simplifica de la siguiente manera:

$$V_C(t) = V_m(1 - \cos \omega_0 t) u(t) \quad (3.25)$$

Esta es una ecuación oscilatoria y nunca se amortigua, lo cual no es real. Lo importante de la ecuación recién deducida es que se pueden calcular los primeros picos de voltaje que son los importantes, ya que después el sistema se amortigua. De esta ecuación se ve que el voltaje cresta puede llegar hasta el doble del valor pico del voltaje del sistema.



**Figura 3.13** Se resumen las dos perturbaciones anteriores, energización de un circuito RL (corto circuito) y el voltaje de recuperación tras la apertura de este circuito [8, p. 181].

### 3.4 Transitorios anormales

En la introducción del capítulo se mencionaron algunas de las causas más comunes que originan transitorios eléctricos. Después, se han analizado las respuestas naturales de algunos circuitos para entender la naturaleza de los transitorios, pero ¿qué es lo que se considera como un transitorio normal y uno anormal?, la realidad es que es un tanto arbitrario, porque no existe una definición como tal. Por ejemplo, se analizó como la corriente en un circuito monofásico puede alcanzar el doble de su magnitud pico dependiendo del instante de tiempo en que el circuito es energizado. También, cuando ese mismo circuito abre, es posible que aparezca un voltaje de recuperación transitoria del doble de amplitud del voltaje del sistema. Aunado a esto, estos transitorios ocurren con relativa frecuencia. Es natural nombrar estos transitorios como normales. Sin embargo, existen otras circunstancias en las que los voltajes y corrientes exceden por mucho estos valores y de acuerdo a [3], estos transitorios se denominan anormales.

En los circuitos estudiados en el capítulo, se calculaban dentro del análisis matemático las soluciones, incluyendo las condiciones iniciales de corriente y de voltaje según aplicaba. Después, por la misma naturaleza del circuito o del fenómeno analizado, las condiciones

iniciales no existían. Cuando cualquiera de estos términos puede existir en el circuito y es finito, la posibilidad existe de que un transitorio anormal se presente. Todos involucran el almacenamiento de energía en algún componente del circuito y su interacción con otro componente. Por lo general, independientemente del fenómeno en cuestión las condiciones para que se dé un transitorio anormal suelen ser menores que para uno normal.

En los siguientes capítulos, se estudian a fondo dos transitorios anormales con significado práctico. No son situaciones de todos los días en un sistema eléctrico, pero de consecuencias destructivas, por lo que basta que se presenten en una ocasión para dañar equipo (daño incipiente o deterioro manifiesto).

## Supresión de Corriente

### 4.1 Introducción [8]

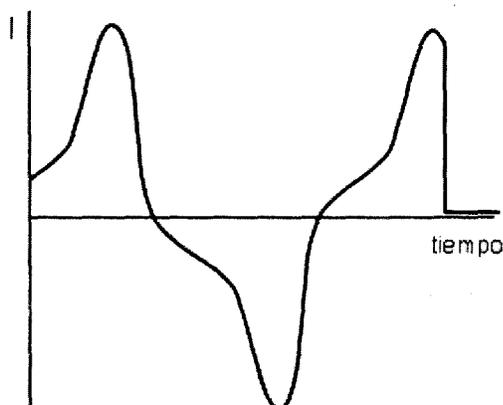
Los interruptores automáticos de alto voltaje son indispensables en un sistema eléctrico. La tarea principal de este dispositivo es interrumpir las corrientes de falla o aislar partes del sistema bajo falla. Además de las corrientes de corto circuito, los interruptores también deben interrumpir otra variedad de corrientes como: corrientes capacitivas, corrientes inductivas pequeñas y corrientes de carga.

Durante el proceso de interrupción de corriente existe una fuerte interacción en el proceso físico entre los contactos del interruptor y el circuito conectado en sus terminales. El arco eléctrico juega el papel principal en el proceso de interrupción. Cuando la corriente circula por el interruptor y los contactos de éste empiezan a abrir, la energía magnética que está almacenada en la inductancia equivalente del sistema de potencia (inductancia de líneas conectadas, cables subterráneos, barras, reactancia sincrónica de generadores y reactancia de dispersión de transformadores) fuerza el flujo de corriente y provoca un arco eléctrico.

La interrupción de corriente en un interruptor ocurre normalmente en corriente igual a cero en un marco de tiempo de microsegundos. En este proceso de interrupción muchos procesos toman lugar en este marco de tiempo. El voltaje de arco, después de mantener un valor constante durante el intervalo de alta corriente, se incrementa a un valor pico, el pico de extinción, y luego disminuye a cero con una relación  $dv/dt$  muy pronunciada. La corriente se acerca a su valor de cruce por cero con una relación  $di/dt$  más o menos constante pero puede ser ligeramente distorsionada bajo la influencia del voltaje de arco. El arco es resistivo y por lo tanto el voltaje de arco y la corriente llegan al cruce por cero en el mismo instante.

La interrupción súbita de corrientes inductivas pequeñas puede llevar a situaciones que se conoce en la literatura como supresión de corriente. Es observada en ocasiones cuando la corriente de excitación de un transformador es conmutada, o cuando un reactor shunt es

desconectado. Esta situación tiene una interacción arco- red conectada distinta que genera oscilaciones de alta frecuencia en el canal del arco, de tal manera que fuerza el cruce por cero en un instante distinto que el cruce por cero de la frecuencia del suministro. Esto se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1** Supresión de Corriente. Se muestra la corriente de excitación de un transformador y el instante en que la corriente es cortada.

Los interruptores de vacío y de gas (p. ej. hexafluoruro de azufre,  $SF_6$ ) provocan este fenómeno pero no son los únicos. El simple interruptor de mercurio lo provoca, y en circuitos inductivos, donde se involucra una balastra de lámpara por ejemplo, el sobrevoltaje puede ser considerable. El pensamiento común es que los semiconductores son parte de equipo sensible víctima de sobrevoltajes en lugar de ser los originadores del disturbio. Esto no es cierto todo el tiempo. Algunos diodos de silicio pueden crear sobrevoltajes a través de supresión de corriente lo suficientemente grandes como para destruirse [3].

## 4.2 Descripción del fenómeno

La supresión de corriente se refiere al fenómeno de disminución repentina de corriente a cero en el interruptor, en un instante distinto que el cruce natural por cero de la corriente. Este fenómeno puede dar lugar a un voltaje anormal como consecuencia de la liberación de energía magnética atrapada asociada con la corriente. Ocurre normalmente cuando transformadores sin carga salen de servicio, o se desconectan motores o reactores [8].

La inductancia  $L$  de la carga es dominante, lo que significa que la corriente atrasa al voltaje. La capacitancia  $C$  de la carga normalmente es muy baja: unos pocos nanofarads para un transformador de distribución y unos cuantos picofarads para un reactor de núcleo de aire.

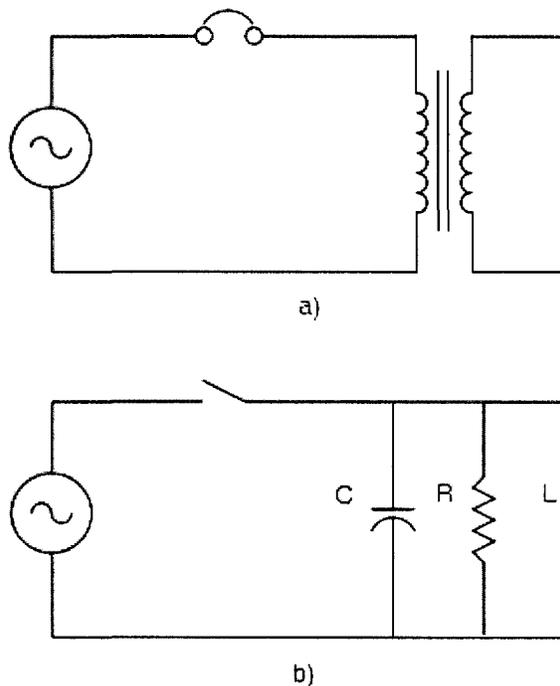
Cuando el interruptor corta esta corriente, el voltaje de recuperación transitoria tiene un valor pico extremadamente alto y estos sobrevoltajes pueden causar reignición o, en la ocurrencia de múltiples reigniciones, incluso combustión súbita en el interruptor [3].

El proceso de supresión de corriente en un interruptor de vacío es como sigue: cuando la corriente de arco se va a cero, lo hace en pasos discretos desde unos cuantos amperes hasta 10, dependiendo del material de contacto. En el último paso de corriente a cero, se puede propiciar la supresión de la corriente [8].

Si se hace un análisis rápido según [3] para supresión de corriente en un transformador (figura 4.2) y suponiendo que en el instante que la corriente es cortada su valor instantáneo es  $I_0$ , ésta está fluyendo en el devanado del transformador y es asociada con una cierta cantidad de energía magnética  $E$ , donde la mayoría reside en el núcleo.

$$E = \frac{1}{2} L_m I_0^2 \quad (4.1)$$

Esta energía puede ser considerable, aún cuando se está hablando de una corriente que es menor al 5% de la corriente nominal de un transformador, ya que la inductancia de magnetización  $L_m$  es muy alta. La corriente no puede dejar de circular en un circuito tan inductivo, pero no cuenta con una trayectoria completa a través del interruptor. De esta manera, se desvía hacia la capacitancia del sistema, designada como  $C$ . Esta consiste primeramente de la capacitancia del devanado del transformador junto con cualquier otra capacitancia en las conexiones entre el switch y el transformador.



**Figura 4.2** Transformador en vacío. a) Se muestra el interruptor y el transformador. b) Circuito equivalente del transformador.

Cuando la corriente se desvía hacia la capacitancia, la energía del campo magnético del transformador se transfiere hacia el campo eléctrico de la capacitancia. Si la capacitancia se conoce, es posible calcular el voltaje al que se cargará.

$$\frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}LI_0^2$$

Despejando,

$$V = I_0 \sqrt{\frac{L_m}{C}} \quad (4.2)$$

Esta ecuación establece que el voltaje pico alcanzado a través del capacitor, y por lo tanto que aparece en el devanado, está dado por el producto de la corriente instantánea que es cortada y la impedancia característica del transformador. El peor caso es cuando la corriente pico máxima es cortada, que dependiendo del nivel de saturación puede llegar hasta 2 veces la corriente efectiva. Es muy importante observar con detenimiento la ecuación 4.2, ya que el voltaje es independiente por completo del voltaje del sistema.

En la figura 4.3 se observa el proceso de energización y desenergización de un transformador; el núcleo es llevado a través de un ciclo de histéresis a la frecuencia del sistema. Se inyecta energía al núcleo en los intervalos  $QX$  y  $ZP$ . La energía proporcional al área del ciclo de histéresis es gastada en pérdidas de histéresis cada ciclo. Cuando la corriente está en su pico máximo, que es el punto  $X$ , la energía proporcional a la denotada por el área  $QXY$  es almacenada en el hierro (área gris). Mientras la corriente se acerca a cero hacia el punto  $Z$ , la energía proporcional al área sombreada  $XYZ$  es recuperada; la restante es gastada. Si la corriente es cortada en su punto más alto y es forzada a dispersarse por la capacitancia, esta sigue un camino un poco más alto que  $XZ$  porque las excursiones de corriente y voltaje son más rápidas que la frecuencia del sistema, por lo que el área sombreada es menor.

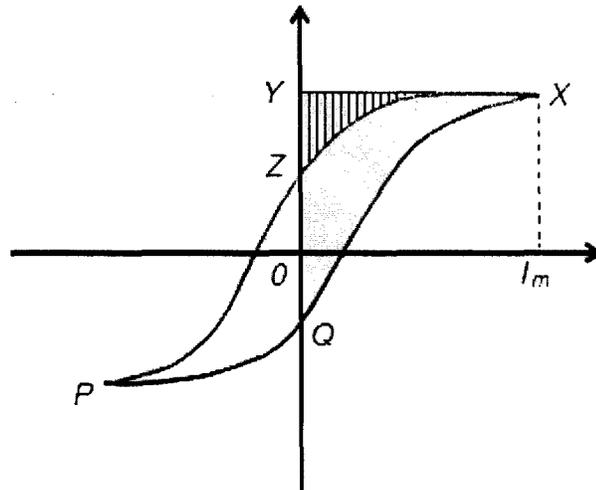


Figura 4.3 Energía liberada en el transformador cuando la corriente es cortada.

Haciendo un ejemplo rápido, se considera un transformador de 1,000 kVA, 13.8 kV, tipo subestación de una planta industrial. La corriente nominal es  $I_{nom} = 1000 / (\sqrt{3} \cdot 13.8) = 41.8$  A. La corriente de excitación típica es de 1.5 A; la inductancia de magnetización es

$$L_m = \frac{V}{\omega I_m} = \frac{13,800}{\sqrt{3} \cdot 377 \cdot 1.5} = 14 \text{ H}$$

La capacitancia efectiva varía dependiendo del tipo de devanado, pero suponiendo una capacitancia de 5,000 pF (entre 1,000 y 7,000 pF), la impedancia característica es igual a

$$Z_0 = \left( \frac{14}{5 \times 10^{-9}} \right)^{1/2} = 52,915 \Omega$$

Con estos valores si una corriente de 2.5 A es cortada, el sobrevoltaje teórico es de 132 kV.

En la práctica, como se demostrará experimentalmente más adelante, el voltaje puede ser tan alto como el calculado con la fórmula anterior, que es casi 7 veces el voltaje cresta nominal, debido a las pérdidas de histéresis y eddy, pero, existe un límite porque solo una fracción de la energía atrapada en el núcleo al momento del corte de corriente es liberada. En aceros de granos orientados modernos, la cantidad de energía que se libera es menos del 30% de la energía almacenada (región XYZ) cuando ocurre el corte, por lo que en el peor de los casos, el voltaje no excederá el 55% de lo calculado anteriormente para ese transformador. Los transformadores a nivel de distribución son los más vulnerables, especialmente los transformadores secos con niveles básicos de aislamiento reducidos.

De esta manera, se puede reescribir la ecuación 4.2 para que represente sólo la fracción de energía,  $k$ , que se libera.

$$V = k \cdot I_0 \sqrt{\frac{L_m}{C}} \quad (4.3)$$

Los reactores de núcleo de aire, o reactores con un entrehierro significativo no se comportan de esta manera. Prácticamente toda su energía es recuperable. Los reactores de este tipo son usados en ocasiones en paralelo para aterrizar líneas y cables de transmisión para compensar la capacitancia de la línea o cable. En tales aplicaciones, el equipo es protegido normalmente por un apartarrayos, que puede operar para limitar cualquier sobrevoltaje en caso de ocurrencia de supresión de corriente, cuando el reactor se desconecta [3].

### 4.3 Análisis matemático

De la figura 4.2 b, se observa que la ley de Kirchhoff de corriente ahora proveerá la ecuación para encontrar la solución del circuito. Inmediatamente cuando se efectúa la supresión de corriente, no existe una trayectoria a través del interruptor, por lo que

$$I_C + I_R + I_L = 0 \quad (4.4)$$

Expresando la función en el tiempo:

$$C \frac{dv}{dt} + \frac{V}{R} + \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 v(\lambda) d\lambda + \frac{1}{L} \int_0^t v(\lambda) d\lambda = 0 \quad (4.5)$$

Pasando la ecuación al dominio de Laplace:

$$CsV(s) - CV_0 + \frac{V(s)}{R} + \frac{I_0}{s} + \frac{1}{Ls}V(s) = 0 \quad (4.6)$$

Agrupando, reacomodando términos, y con un poco de álgebra obtenemos la solución del voltaje en el dominio de Laplace.

$$V(s) = V_0 \left[ \frac{s}{s^2 + s/RC + 1/LC} \right] - I_0 \sqrt{L/C} \left[ \frac{\sqrt{1/LC}}{s^2 + s/RC + 1/LC} \right] = 0 \quad (4.7)$$

Esta es una ecuación de segundo orden, donde afortunadamente existen las soluciones características en cualquier libro de sistemas de control, una vez que se conoce el coeficiente de amortiguamiento del sistema. Otras características a notar es que el factor

que acompaña a la corriente inicial es la impedancia característica que ya se había señalado en el capítulo 3 como un factor importante en circuitos LC; también aparece nuevamente la frecuencia natural del sistema.

Reescribiendo la ecuación en términos de frecuencia natural, impedancia operacional y coeficiente de amortiguamiento obtenemos la siguiente ecuación

$$V(s) = V_0 \left[ \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \right] - I_0 Z_0 \left[ \frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \right] = 0 \quad (4.8)$$

donde

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad \omega_n = \sqrt{1/LC} \quad \zeta = \frac{1}{2R} Z_0$$

Una vez que se conoce el valor de  $\zeta$  se conoce como será la respuesta del voltaje (<1 bajo amortiguado; =1 críticamente amortiguado, >1 sobre amortiguado). Cada situación tiene su respuesta en el tiempo y se presenta en el anexo A.

No obstante, ya que el fenómeno involucra el núcleo del transformador, y una capacitancia muy pequeña, la impedancia característica tiene que ser muy grande por lo que el fenómeno de supresión tiene que ser sobreamortiguado por naturaleza. La resistencia del núcleo, que representa las pérdidas de núcleo precisamente, es grande, pero no tan grande como para propiciar oscilaciones.

La respuesta en el tiempo tomando esta premisa, es, por tanto

$$V(t) = V_0 \left[ \frac{1}{2\psi} \left( (\zeta + \psi)e^{-(\zeta+\psi)\omega_n t} - (\zeta - \psi)e^{-(\zeta-\psi)\omega_n t} \right) \right] - I_0 Z_0 \left[ \frac{1}{2\psi} \left( e^{-(\zeta-\psi)\omega_n t} - e^{-(\zeta+\psi)\omega_n t} \right) \right] = 0 \quad (4.9)$$

donde,

$$\psi = \sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Aunado al hecho que la respuesta en el tiempo resulta compleja a simple vista, la problemática está en que la inductancia es no lineal; la resistencia del núcleo es un parámetro que depende de la frecuencia y la densidad de flujo; por último la capacitancia, que está distribuida en los devanados del transformador, es un valor que no se obtiene fácilmente.

#### 4.4 Desarrollo del experimento

Se construyó un circuito eléctrico para llevar a cabo pruebas con el fenómeno de supresión de corriente con la ayuda de un osciloscopio. También se utilizó otro transformador (con relación 1:1) para poder utilizar un analizador de calidad de energía especial para transitorios. Se analizó el efecto de conectar un varistor en terminales del transformador, con el fin de observar su funcionamiento.

La figura 4.4 muestra el diagrama esquemático del circuito construido (derivado de la figura 4.2). Consta de un transformador de 100 VA, 125/10 V, un interruptor de mercurio (que es el elemento clave para generar la perturbación), y una bobina de 50 vueltas para magnificar la corriente de excitación. Cuenta con terminales para poder monitorear el voltaje de la fuente y el primario del transformador.

Los interruptores de mercurio se utilizan para abrir o cerrar un circuito por contacto directo del mercurio con el contacto eléctrico. Se activa ya sea por gravedad o algún mecanismo, magnético por ejemplo. Proporciona una resistencia de contacto mínima y gran estabilidad. Se utilizan en controles de bombas, solenoides, relevadores, alarmas, etc. Se han utilizado ampliamente en termostatos y controles de nivel de líquidos. El interruptor de mercurio utilizado en el experimento fue prestado por planta física del ITESM y es parte de un sensor de presión.

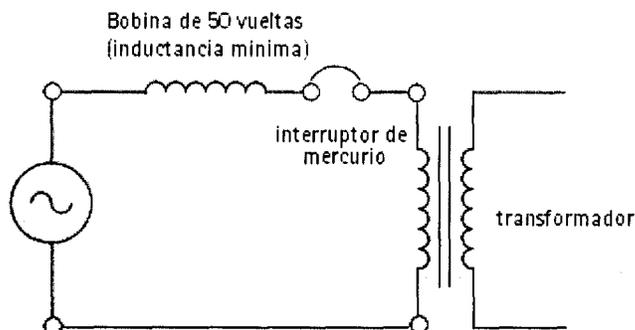


Figura 4.4 Circuito construido para experimentar con supresión de corriente.

En el anexo D se muestran fotos de los circuitos implementados.

#### 4.5 Equipo de medición utilizado

El equipo de medición utilizado para observar el disturbio en el circuito construido fue un osciloscopio de la familia Tektronix, modelo THS720P. En el transformador con relación de vueltas unitaria se utilizó un analizador de calidad de energía trifásico marca Fluke, modelo 434.

El THS720P es un osciloscopio portátil con un ancho de banda de 100 MHz y un muestreo de 500 MS/s (500 millones de muestras por segundo), que a fin de cuentas se traduce a 2500 puntos muestreados en la pantalla del osciloscopio, independientemente del barrido horizontal.

El Fluke 434 es un analizador de calidad de energía trifásico que tiene la capacidad de registrar una gran cantidad de problemas en calidad de energía (sags, swells, flicker, desbalance, etc.), entre ellos eventos transitorios. La capacidad de este dispositivo para capturar transitorios es de disturbios de hasta 5  $\mu$ s y 6 kV.

#### 4.6 Resultados del experimento

Se observará que los transitorios generados por supresión de corriente, que son de media frecuencia, llegan a magnitudes en el rango de la tabla 2.1. En términos generales es mejor el osciloscopio para registrar los eventos transitorios, pero el Fluke 434 es mejor para capturarlos, ya que no se le escapa ninguno que sobrepase sus niveles de disparo. Lograr capturas tras la configuración del nivel de disparo en el THS720P puede ser tan noble como en el caso del 434, si se utiliza el disparo externo del osciloscopio. En este caso se utilizó el voltaje en el interruptor como fuente de disparo externa.

En la siguiente tabla se resumen algunos resultados obtenidos para el circuito de la figura 4.4. Aparece la corriente cortada en A, y el sobrevoltaje en V y en p.u., para el primario y secundario del transformador.

**Tabla 4.1** Varios resultados obtenidos tras suprimir corriente en el circuito de la figura 4.4.

$I_{cortada}$ (50X)	$I_{cortada}$	$V_{pri}$	$V_{sec}$	$p_{upri}$	$p_{usec}$
-3.2	-0.064	720	74.8	3.7	4.6
-2.8	-0.056	568	40	2.9	2.4
-4	-0.080	880	75.2	4.5	4.6
4	0.080	-624	-59.2	3.2	3.6
5.6	0.112	-1160	-96	5.9	5.9

El caso más grave ocurrió al cortar el valor de corriente mayor como era de esperarse según la ecuación 4.3, aunque se establece claramente en la ecuación 4.9 que el valor de voltaje al momento del corte es importante también. Las formas de onda de corriente cortada (50X de magnificación), voltaje en el primario y voltaje en el secundario se muestran a continuación.

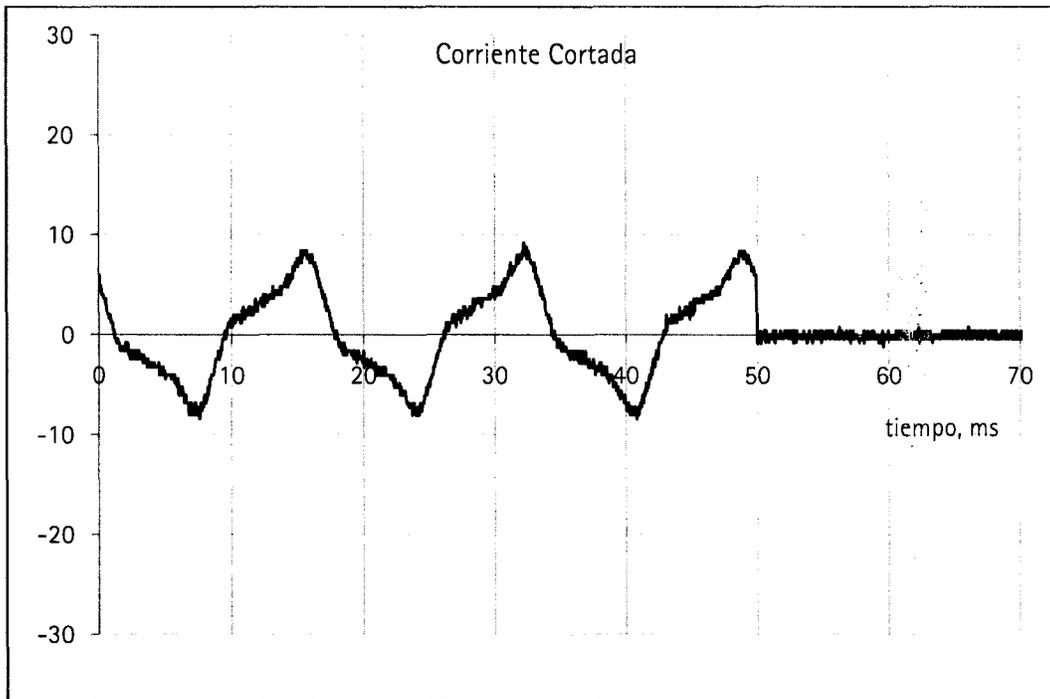


Figura 4.5 Captura de corriente cortada (112 mA)

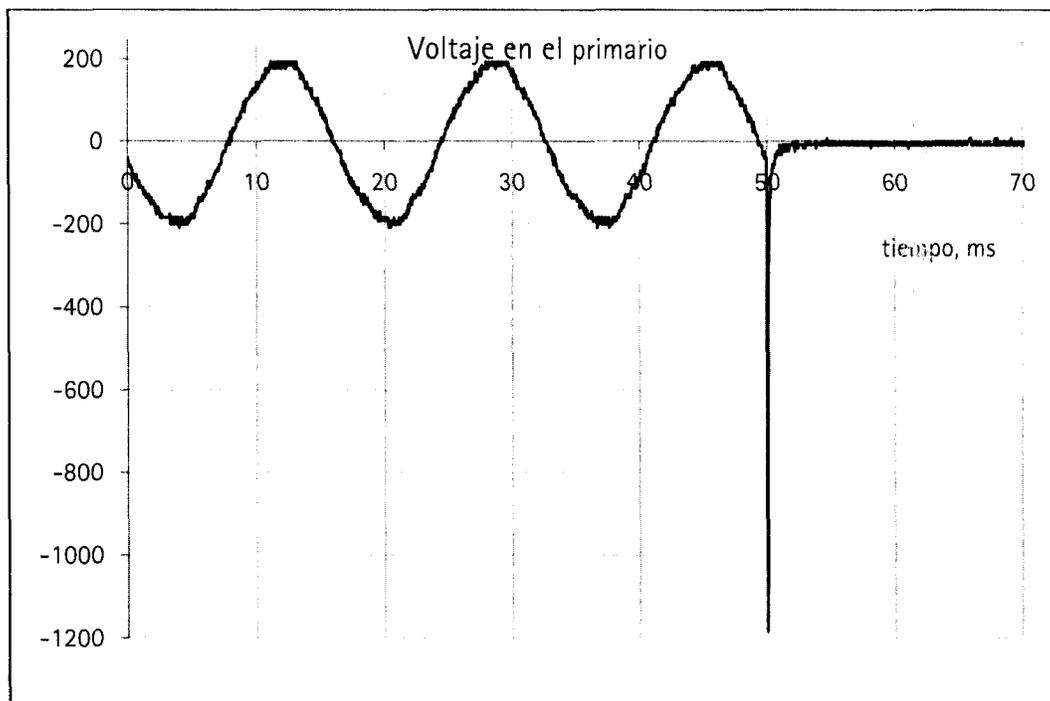


Figura 4.6 Captura de voltaje en el primario (1160 V).

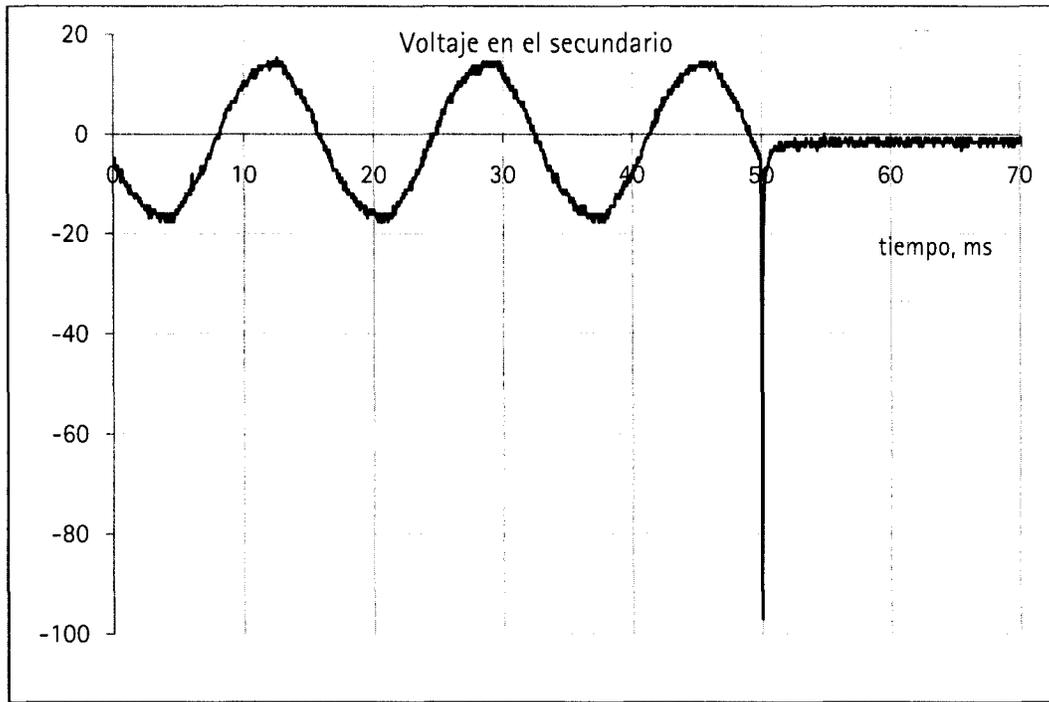


Figura 4.7 Captura de voltaje en el secundario (96 V).

Todas las formas de onda de la tabla 4.1 se encuentran en el anexo C, donde se muestran los distintos resultados experimentales obtenidos, junto a las simulaciones. Al hacer un acercamiento al sobrevoltaje se detecta la limitación de las capturas.

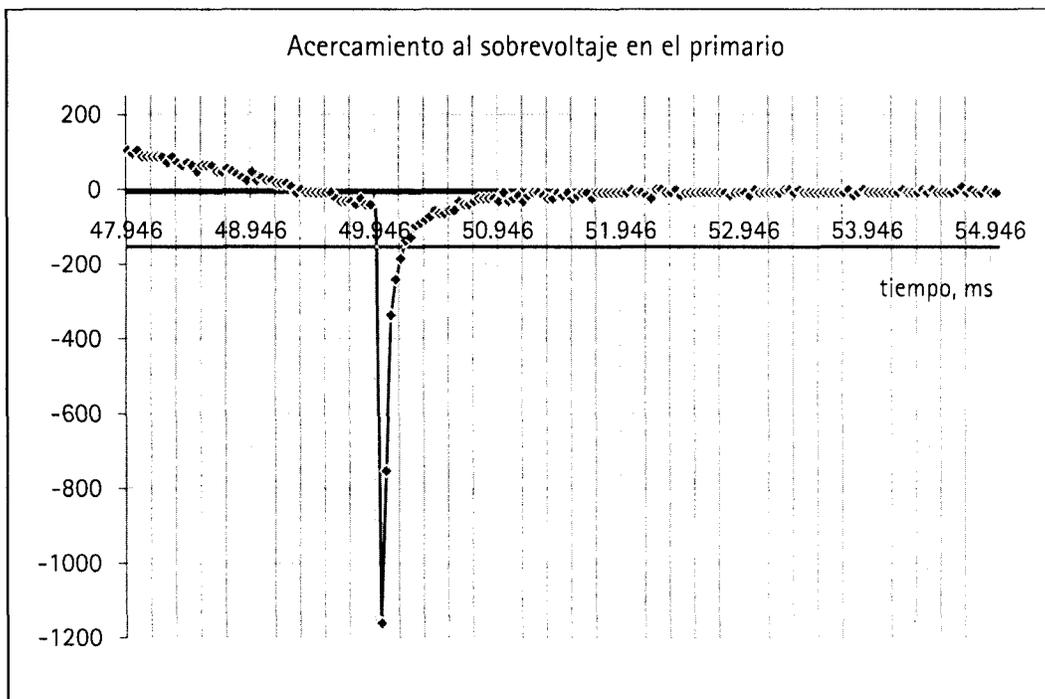


Figura 4.8 Acercamiento al sobrevoltaje de la gráfica 4.6.

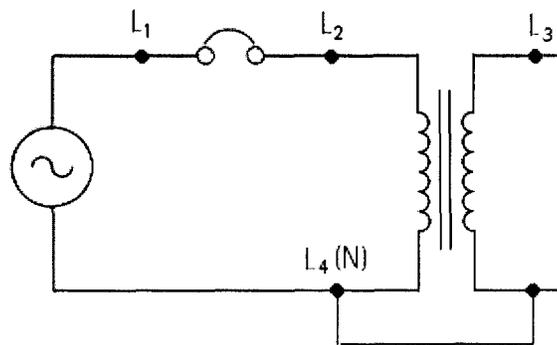
En esta gráfica se muestra como, entre el valor justo antes del corte de corriente y el pico del sobrevoltaje no existen puntos intermedios. De esta manera existe una limitación en las capturas obtenidas con el osciloscopio.

El transitorio dura alrededor de medio milisegundo, pero la frecuencia con la que llega a su valor pico es mayor que con la que desciende a cero. Esta situación complica el escenario para la simulación del disturbio.

#### 4.6.1 El disturbio aparece en el secundario

La gráfica 4.7 es muy clara, el corte de corriente se llevó a cabo en el primario y genera un sobrevoltaje que también aparece en el secundario. Esto es de una relevancia muy grande.

Con otro transformador (relación 1:1) se hizo un arreglo para poder utilizar un dispositivo especial para la captura de transitorios, el Fluke 434. El inconveniente es que es trifásico y el transformador utilizado es monofásico. Se hizo el arreglo de la figura 4.9.



**Figura 4.9** Se muestran los puntos donde se conecta el Fluke 434 para registrarlos eventos. El interruptor de la figura es el mismo interruptor de mercurio del experimento anterior.

La línea 1 ve el voltaje de la fuente, la línea 2 el voltaje en el primario, la 3 en el secundario. De esta manera, un canal no registra evento, pero las otras 2 si registran tanto en el primario como en el secundario, y al ser un transformador con relación unitaria los sobrevoltajes son idénticos (gráfica 4.10).

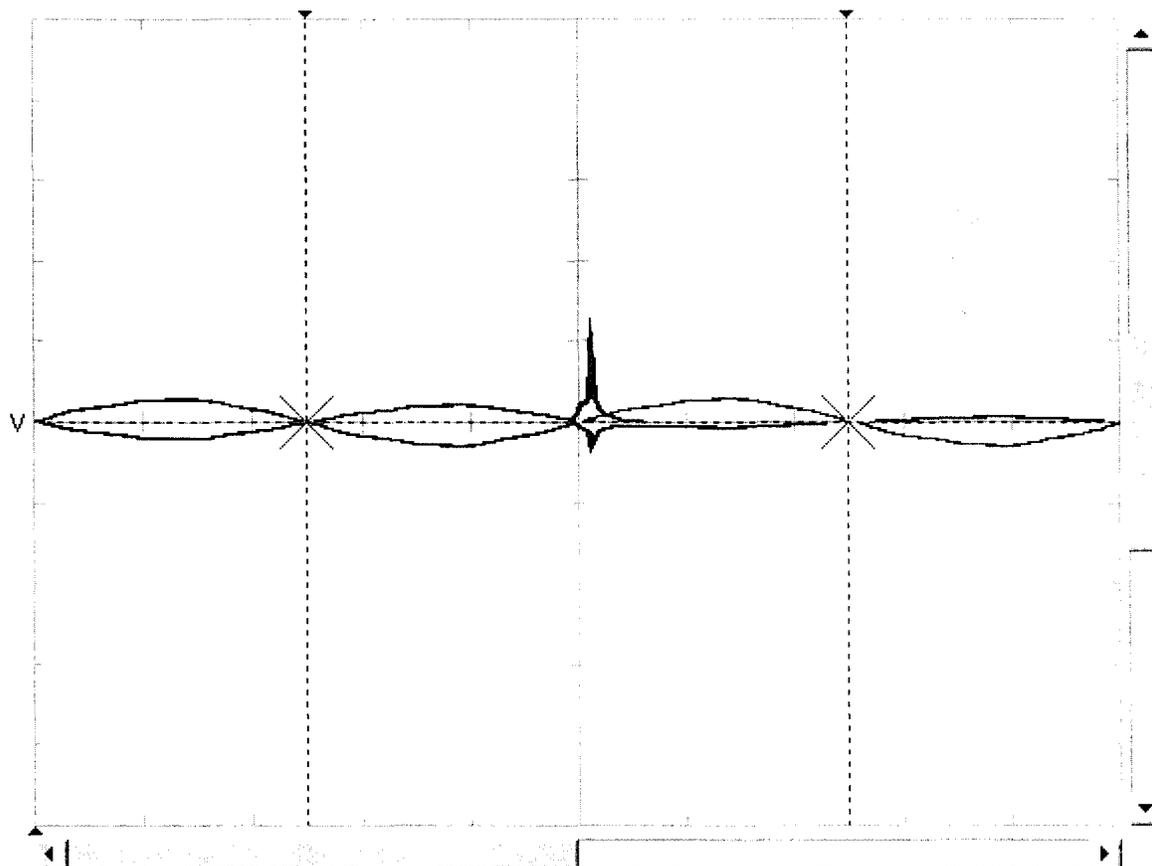


Figura 4.10 Sobrevoltajes provocados por corte de corriente en un transformador con relación 1:1.

Tabla 4.2 Datos del evento transitorio de la gráfica 4.5.

Datablock	
Name = Voltage A/L1	Voltage B/L2
Date = 22/05/2003	22/05/2003
Time = 04:26:09 a.m.	04:26:09 a.m.
Y Scale = 3.0703 kV/Div	3.0703 kV/Div
Y At 50% = 0.0 V	0.0 V
X Scale = 8.33 ms/Div	8.33 ms/Div
X At 0% = 0.00 ms	0.00 ms
X Size = 298 (300)	298 (300)
Maximum = 791.9 V	185.5 V
Minimum = -185.5 V	-185.7 V
Name = Voltage C/L1	Voltage N
Date = 22/05/2003	22/05/2003
Time = 04:26:09 a.m.	04:26:09 a.m.
Y Scale = 3.0703 kV/Div	3.0703 kV/Div
Y At 50% = 0.0 V	0.0 V
X Scale = 8.33 ms/Div	8.33 ms/Div
X At 0% = 0.00 ms	0.00 ms
X Size = 298 (300)	298 (300)
Maximum = 793.8 V	138.4 V
Minimum = -185.1 V	-227.4 V

#### 4.6.2 Probando un supresor de sobrevoltajes transitorios

Una vez que se corroboró que el sobrevoltaje aparece en el secundario, se instaló un varistor para observar su efecto limitador ante la aparición de un sobrevoltaje. El varistor utilizado es de 31 V por lo que se instaló en el secundario del primer transformador (125/10 V).

Los resultados fueron los esperados. En el secundario, el sobrevoltaje independientemente del valor de corriente cortada, no supera los 2 p.u. aproximadamente. El primario recibe este efecto benéfico también. Una vez que el voltaje llega al nivel de operación del varistor este se pone en conducción bajando su resistencia bruscamente. Más allá de confirmar la operación del varistor, es importante mencionar que la energía liberada en la supresión de corriente puede ser tal (la gráfica 4.7 muestra un sobrevoltaje de 93 V en este transformador) que sobrepase el límite de energía que puede manejar el supresor de sobrevoltajes transitorios. Si se da esta situación, se pone en peligro inminente cualquier carga que esté protegiendo, como la electrónica de control.

La siguiente gráfica es una captura de la corriente en el instante de conducción del varistor ante un sobrevoltaje.

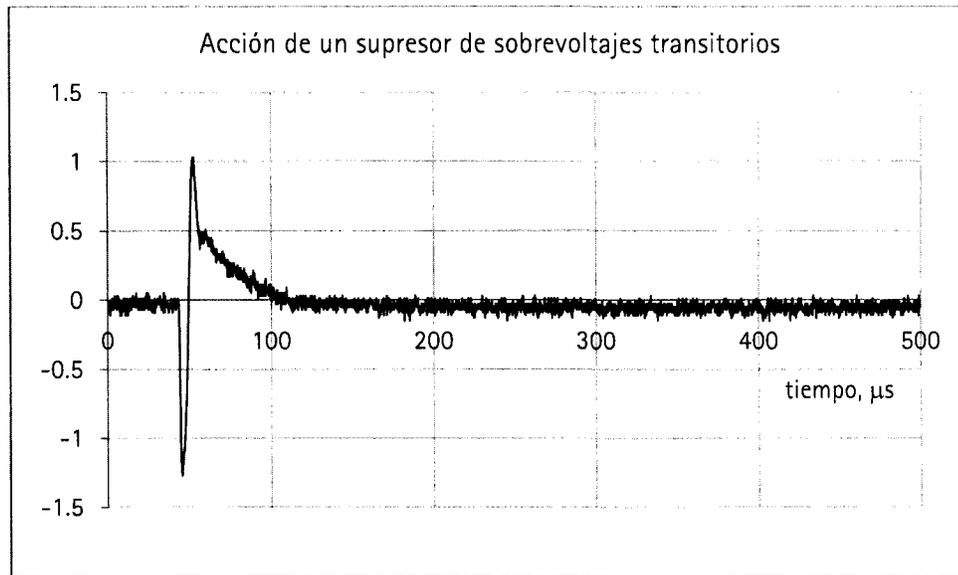


Figura 4.11 Corriente en el varistor ante un sobrevoltaje.

#### 4.7 Simulación en Microtran

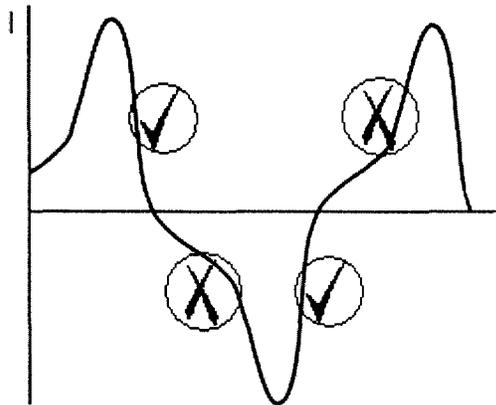
Se logró simular en Microtran, software basado en el EMTP el circuito bajo estudio. El primer paso para lograr la simulación fue la obtención de los parámetros del transformador para caracterizar su comportamiento. Se obtuvo la curva  $V$  vs.  $I$  en valores rms, para poder

obtener la curva  $\lambda$  vs.  $I_{pico}$  según [9]. También se efectuaron las pruebas de circuito abierto y corto circuito. El resumen de las pruebas, los resultados de las corridas, el código utilizado y las decisiones tomadas para las simulaciones se encuentran en el anexo C. A continuación se mostrará únicamente la tabla 4.3 que es análoga de la 4.1 pero con los resultados de las simulaciones.

**Tabla 4.3** Varios resultados obtenidos de la simulación en Microtran.

lcortada	V pri	pu pri	% error
0.112	-1102	6.1	5.0
-0.080	892	5.0	-1.4
-0.064	769	4.3	-6.8

Cabe mencionar que la razón por la que no aparecen los cinco valores de la tabla 4.1 fue porque los dos valores restantes no tienen una respuesta adecuada en la simulación. La característica común de los instantes que sí pueden ser simulados es que son instantes de corriente que van desde un máximo (negativo o positivo) a cero; la característica de los que no pueden ser simulados es que van de cero hacia un máximo (negativo o positivo). Esto se explica en la siguiente figura.



**Figura 4.12** Zonas en las que se puede simular adecuadamente corte de corriente en Microtran.

El modelo funciona bastante bien para las zonas mostradas en la figura 4.12 y por una razón desconocida no lo hace en las zonas tachadas. El detalle no es que el transitorio no sea similar en magnitud, sino que prácticamente no existe. La razón parece atribuible al software Microtran.

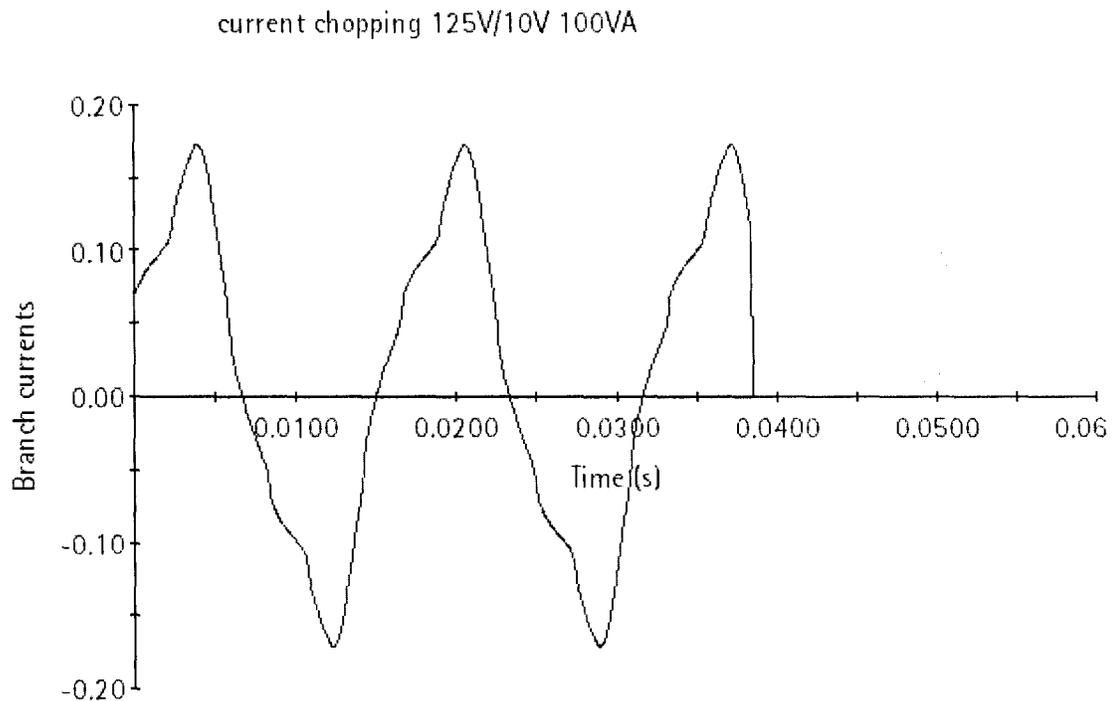


Figura 4.13 Corriente cortada (0.112 A) en Microtran para el transformador de estudio.

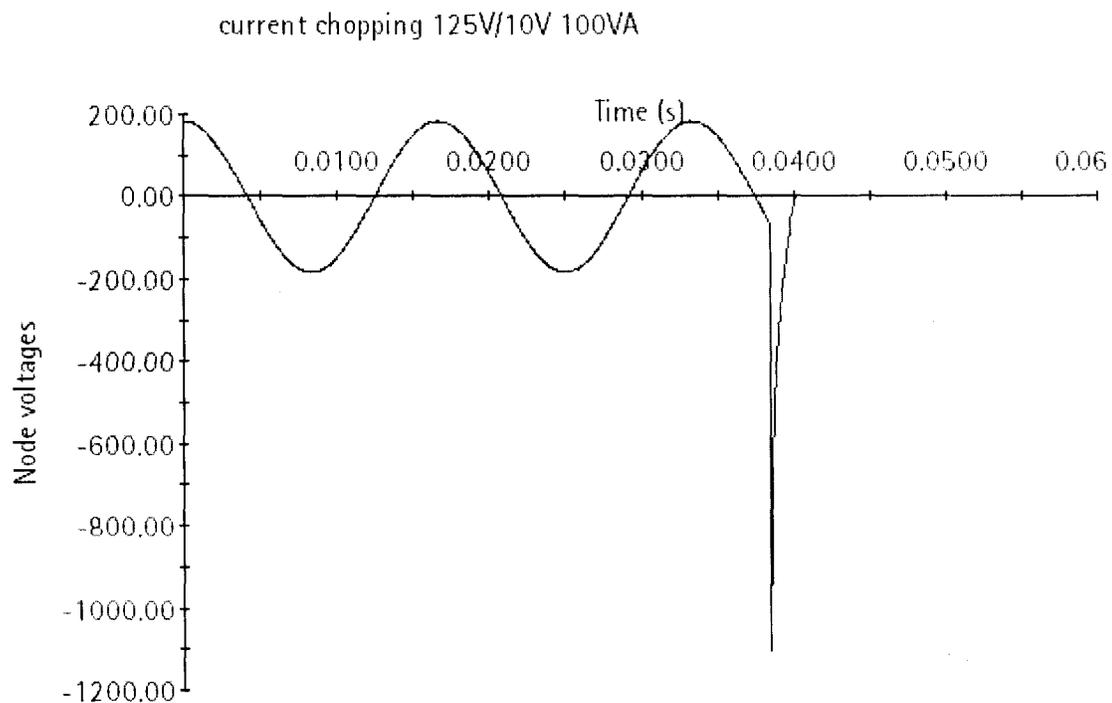


Figura 4.14 Sobrevoltaje (para la corriente cortada de la gráfica 4.5) en Microtran.

## Ferroresonancia

## 5.1 Introducción

Este disturbio puede ocurrir bajo ciertas condiciones en cualquier sistema que contiene elementos inductivos y capacitivos tales como los asociados respectivamente a cables y transformadores. El fenómeno se conoce como ferroresonancia, porque la inductancia que está involucrada normalmente es de núcleo de hierro, y por lo general es un transformador. El problema surge cuando alguna perturbación externa en el sistema de potencia causa que el transformador entre en saturación cambiando bruscamente su inductancia (recordar que la inductancia de un transformador es función de la corriente).

Esta condición de resonancia, que no es la definición de resonancia de usanza común, genera voltajes excesivos y corrientes en el sistema que pueden dañar a los transformadores mismos y más equipo involucrado. Debe ser evitada por obvias razones, pero ocurren generalmente de manera inadvertida. Aunque existe equipo de protección que puede operar bajo condiciones de ferroresonancia, este fenómeno no es normalmente denominado como falla en el sentido más común de la palabra, sino como una condición que debe ser evitada mediante un diseño cuidadoso del sistema.

En cuanto se involucra un transformador, su inductancia puede estar tanto en la región de saturación ( $X_{L,SAT}$ ), en la región de no saturación ( $X_{L,NO,SAT}$ ) o algún valor entre estos dos, lo que establece múltiples posibilidades para el estado del sistema. La no linealidad del material ferromagnético del núcleo es una propiedad que existe y no se puede eliminar [10].

Esta situación puede llevar a calentamiento excesivo en el transformador, debido a que la corriente de cresta es grande y el flujo en el núcleo alto. Altas temperaturas dentro del transformador pueden debilitar el aislamiento y causar fallas debido a esfuerzos eléctricos. En sistemas de alto voltaje, la ferroresonancia puede generar voltajes altos en los primeros ciclos, y provocar problemas en la coordinación del aislamiento [11].

Antes de entrar a la teoría de ferroresonancia, es conveniente ser capaz de identificar ciertas configuraciones típicas que tienen un riesgo de presentar el disturbio. El circuito

ferrorresonante involucra una capacitancia, el núcleo de un transformador y un sistema de potencia con una carga muy pequeña. Básicamente se busca la conexión en serie del capacitor con la inductancia saturable con una mínima carga de elementos resistivos. En el anexo B se presentan diversas situaciones en las que se puede presentar esta perturbación; el listado no es exhaustivo pero otorga un buen panorama, siendo obtenido de [10].

## 5.2 La impredecibilidad del fenómeno

Aunque la ferrorresonancia involucra una capacitancia y una inductancia, no existe una frecuencia de resonancia definida y más de una respuesta es posible para el mismo conjunto de parámetros y cambios graduales o transitorios pueden ocasionar que la respuesta "brinque" de un estado a otro [11].

El fenómeno se inicia normalmente con una operación de conmutación. Puede ser energizando o desenergizando algo. El punto crítico es la densidad de flujo cuando ocurre la conmutación, y si el transitorio resultante provoca la entrada a saturación del material magnético o no. Como un ejemplo de lo que puede pasar cuando entran y salen de operación transformadores y reactores con núcleos de hierro, se analizará la figura 5.1, donde se aplica un voltaje senoidal  $V_m \text{sen}(\omega t + \alpha)$  a una inductancia [12].

Haciendo un análisis rápido,

$$V = N \frac{d\varphi}{dt} \quad (5.1)$$

Despejando para el flujo se obtiene,

$$\varphi = N \int_{-\infty}^t V_m \text{sen}(\omega t + \alpha) dt$$

$$\varphi = -\frac{NV_m}{\omega} [\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha] + \varphi_0 \quad (5.2)$$

El peor caso es cuando  $\alpha = 0$ , que es la amplitud máxima de flujo, y tiene un valor en p.u. de  $(2 + \varphi_0)$ .

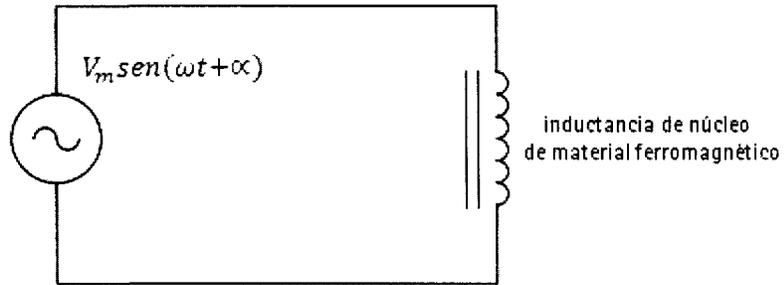


Figura 5.1 Aplicación de un voltaje senoidal a una inductancia de núcleo de hierro.

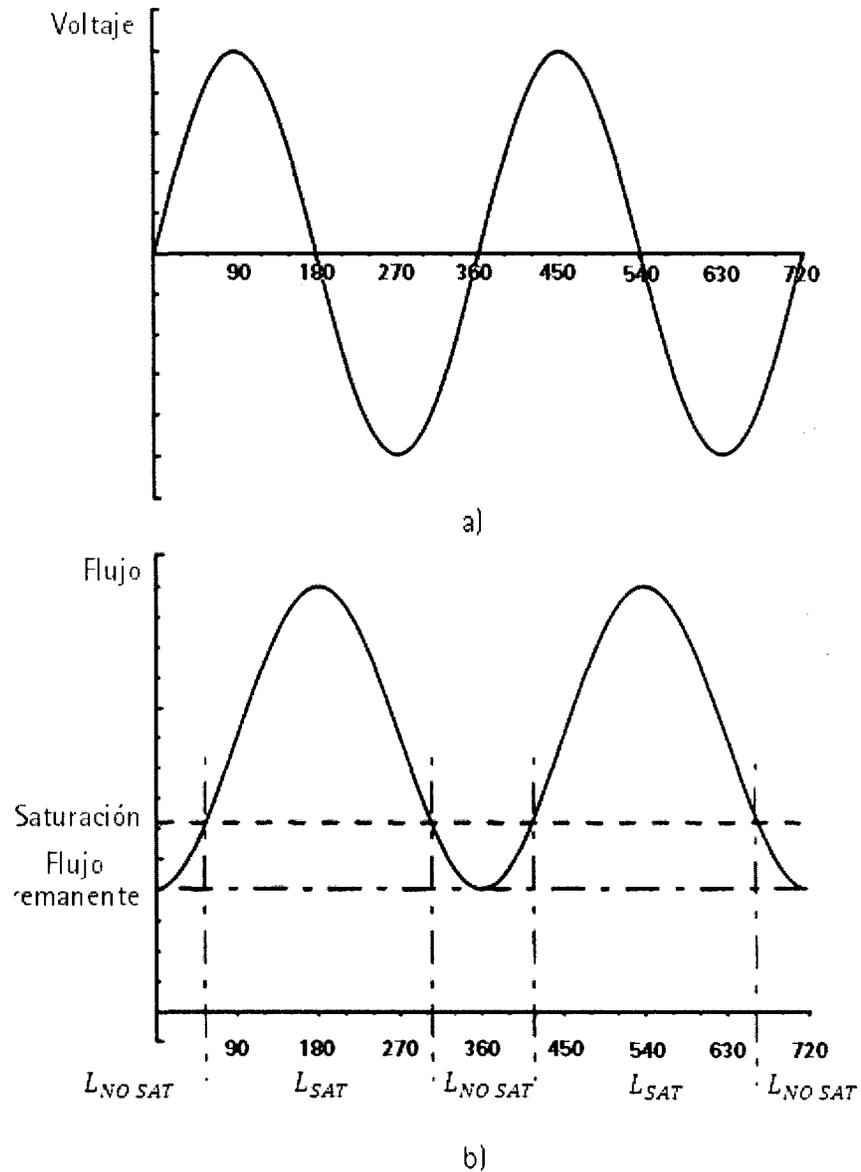


Figura 5.2 Voltaje y flujo magnético en la energización de una inductancia de núcleo de hierro.

En la figura 5.2 se muestra la gráfica del voltaje y del flujo mostrando el peor escenario. Esto garantiza saturación como en el caso de la corriente de energización.

Existen, por lo tanto, diversas variables involucradas en el proceso: el nivel de saturación, el flujo residual, el instante en que se energiza el circuito ( $\alpha$ ), la inductancia de magnetización en la zona lineal (alta) y el valor de la inductancia en la zona de saturación (muy baja). A estas variables se le debe de agregar que para que se dé la ferorresonancia se necesita una capacitancia y una reconfiguración del sistema, esto suma 7 variables que juegan un papel importante para que se genere el problema [12].

### 5.3 Descripción del fenómeno

Si se agrega a la figura 5.2 un capacitor en serie, y se cambia el reactor por un transformador, obtenemos el diagrama que nos servirá para analizar propiamente el fenómeno. El circuito es similar al analizado en el capítulo 3 (circuito LC), sólo que en este caso la inductancia (transformador) es altamente no lineal.

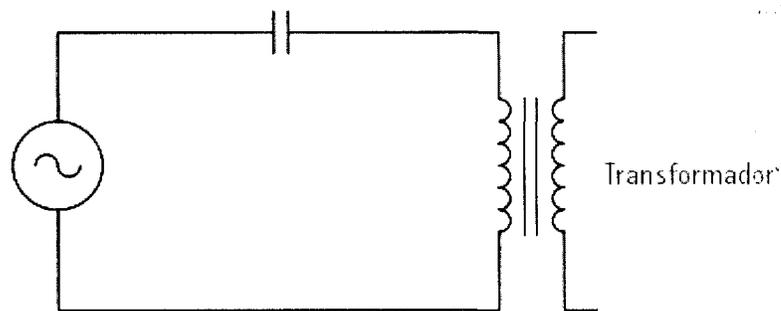
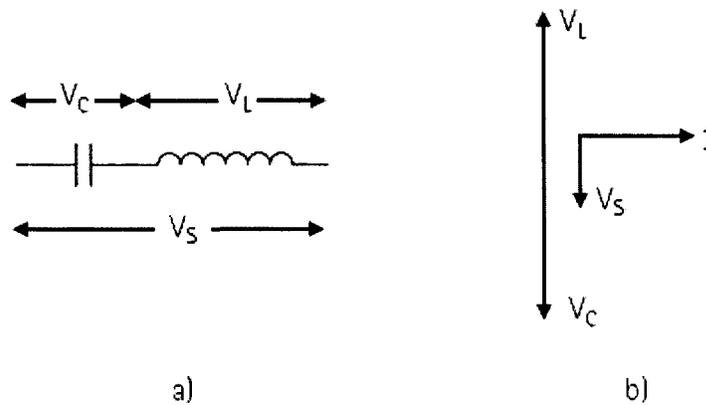


Figura 5.3 Circuito ferorresonante.

Observando el circuito LC serie, se hace evidente la situación de estudio. Los voltajes que aparecen en el circuito  $V_L$  y  $V_C$  se suman para obtener el voltaje de la fuente,  $V_S$  (figura 5.4a). Debido a que el voltaje en el inductor adelanta la corriente de fase  $90^\circ$ , y el voltaje en el capacitor atrasa a la corriente en los mismos  $90^\circ$ , se tiene el diagrama de fasores de la figura 5.4b.



**Figura 5.4** Voltajes en un circuito LC. a) la suma de los voltajes en los elementos es el voltaje de la fuente. b) diagrama de fasores de los voltajes.

Se puede intuir que los voltajes  $V_L$  y  $V_C$  pueden exceder por mucho el voltaje  $V_S$ , y al ser una condición de operación sostenida, es más apropiado llamarlos sobrevoltajes dinámicos, en lugar de transitorios. Sin embargo, es común que condiciones transitorias sean las que generen este problema [3].

### 5.4 Análisis gráfico

Como la inductancia es saturable, el voltaje a través de este elemento depende de la frecuencia y es función de la corriente.

$$V_L = \omega f(I) \quad (5.3)$$

El voltaje en el capacitor esta dado por

$$V_C = -\frac{I}{\omega C} \quad (5.4)$$

El signo demuestra el desfase de  $180^\circ$  entre los voltajes de la inductancia y capacitancia ( $90^\circ$  y  $-90^\circ$  respectivamente).

Sumando los dos voltajes resulta

$$V_S = V_L + V_C = \omega f(I) - \frac{I}{\omega C} \quad (5.5)$$

O reescribiendo para la inductancia, se obtiene otra ecuación para  $V_L$ .

$$V_L = V_S - V_C = V_S + \frac{I}{\omega C} \quad (5.6)$$

La gráfica 5.5 y 5.6 muestra las dos ecuaciones graficadas respectivamente.

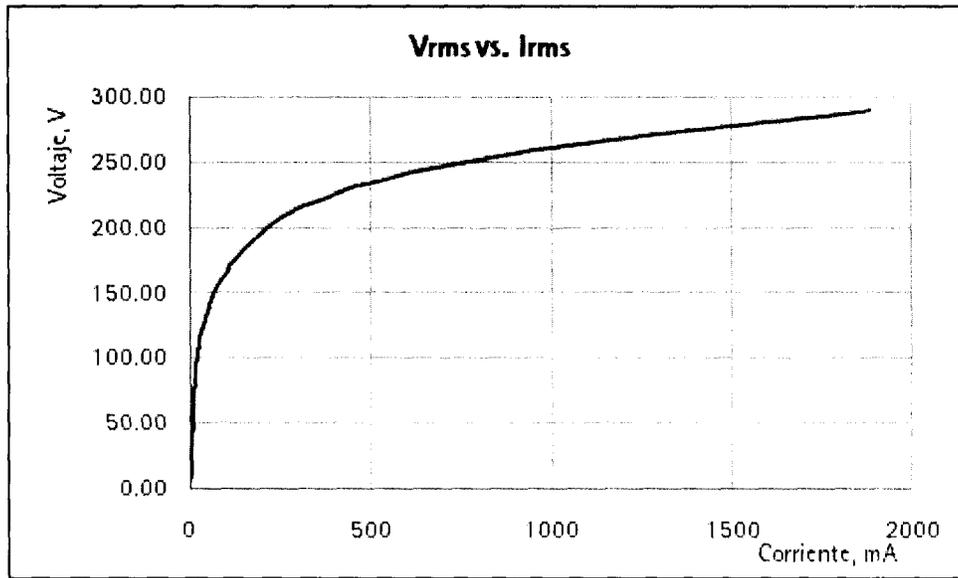


Figura 5.5 La ecuación 5.3 es para el voltaje de la inductancia. Es una representación indirecta de la curva de magnetización de un transformador.

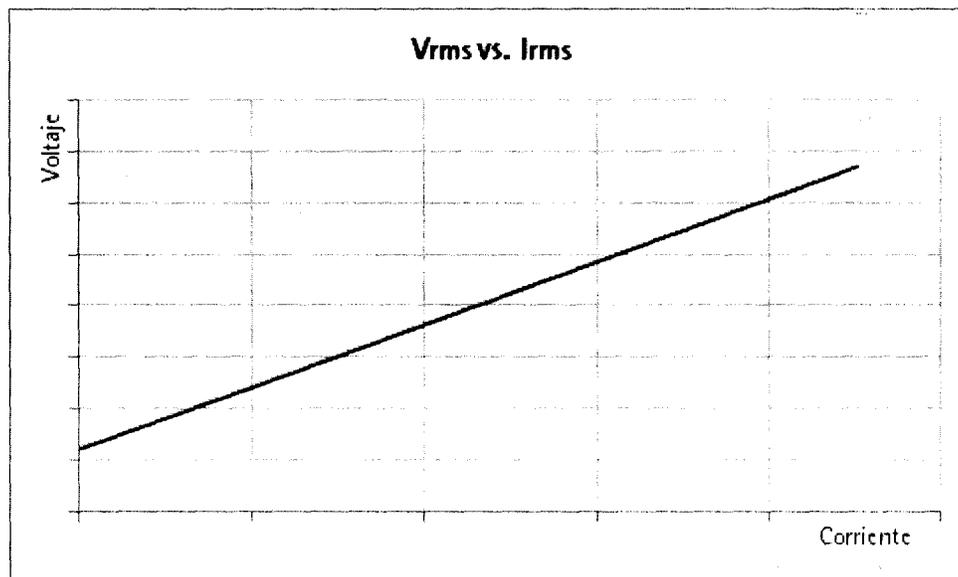


Figura 5.6 La ecuación 5.6 es para el voltaje de la inductancia también. Es la suma del voltaje de la fuente y el voltaje en el capacitor.

Hay que recordar que ambas gráficas son del voltaje del transformador. Observando las dos gráficas simultáneamente se obtiene la solución (puntos de intersección) [3].

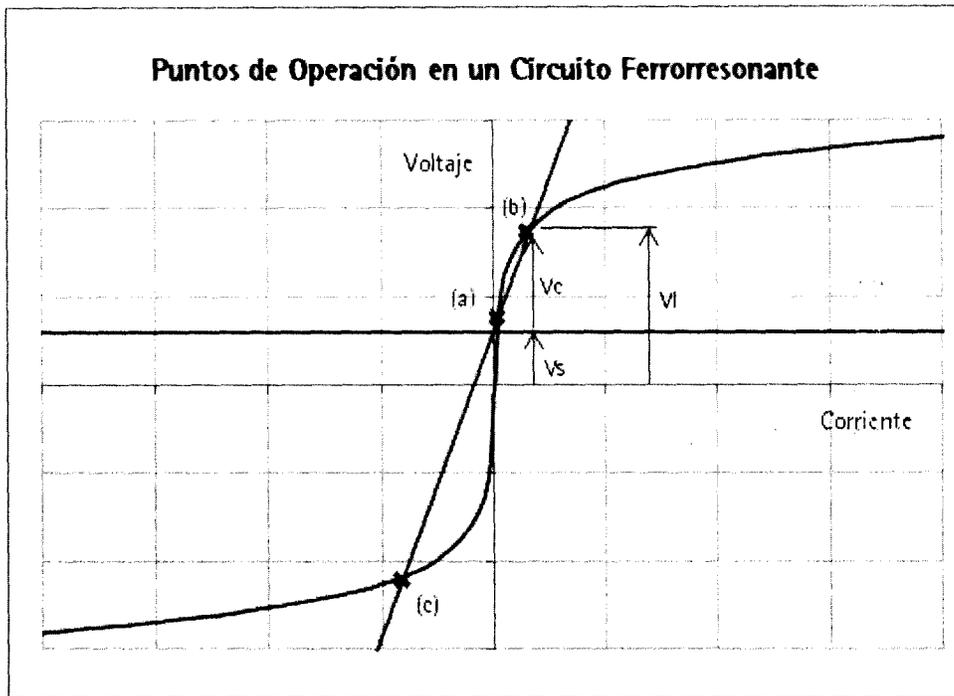


Figura 5.7 Las ecuaciones 5.3 y 5.6 son graficadas simultáneamente y otorgan las soluciones para los puntos de operación posibles del circuito.

Dependiendo del voltaje de suministro y de la capacitancia serie, existen tres modos de operación ferrorresonantes posibles. Todos los modos de operación producen formas de onda periódicas en el secundario del transformador. En general, cambios graduales en el voltaje o la capacitancia generan transiciones entre modos. Si se genera el proceso inverso de las condiciones que causaron la transición, esta no se revierte debido a la no linealidad mencionada. Los transitorios también pueden ser responsables del brinco de un estado a otro, como ya se ha mencionado [11].

Antes de analizar cada respuesta es conveniente ver estos modos de operación desde otro enfoque. El voltaje de la fuente es un valor fijo en estado estable,  $V_s$ , pero también la ecuación 5.3.2 se tiene que respetar, por lo que si se grafican simultáneamente se deben de encontrar las soluciones para el punto de operación. La ecuación 5.4 se gráfica de la forma  $V_s = |V_L - V_c|$  tomando en cuenta el desfase entre voltajes. Esto se muestra en la figura 5.8.

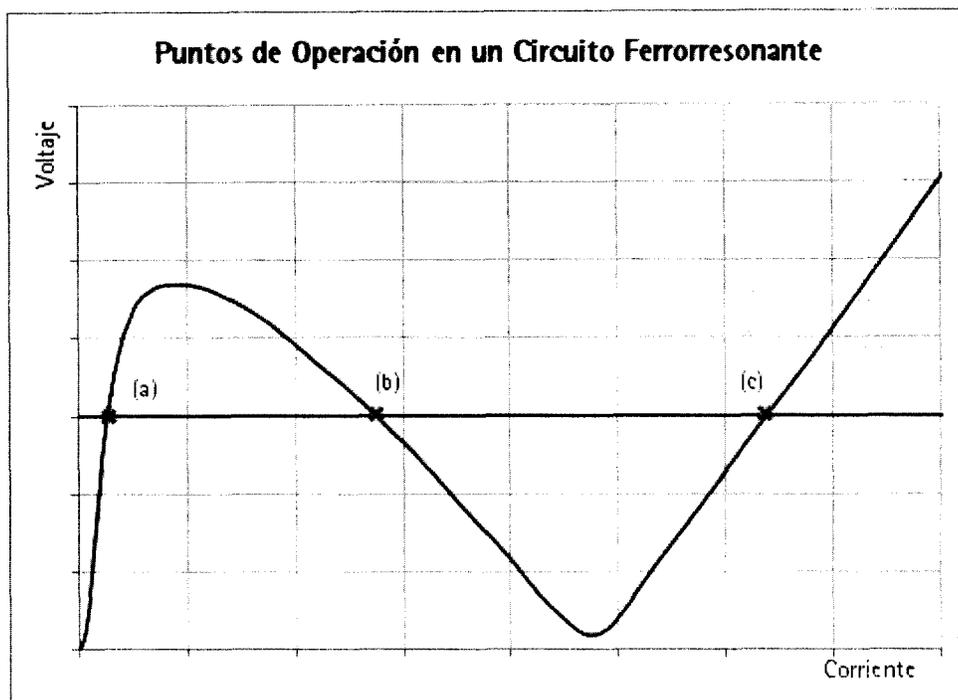


Figura 5.8 Tres puntos de operación vistos desde el voltaje de la fuente.

La línea horizontal es el voltaje de la fuente y la otra curva es la ecuación 5.4 a la que se puede hacer referencia como la curva de la carga. Esta perspectiva de visualizar la ferromonancia fue gracias a la experiencia del Ing. Javier Rodríguez Bailey, profesor del departamento de Ingeniería Eléctrica del ITESM.

Si se analiza la figura 5.7 y la figura 5.8 se puede tener un buen entendimiento de los sobrevoltajes que se pueden generar cuando se presenta esta perturbación. Los puntos de intersección entre curvas (a), (b) y (c) se deben de estudiar con cuidado y la gráfica 5.5 es mejor para la interpretación de cada uno de ellos.

El punto (a) y el punto (c) son estables y el punto (b) es inestable. Si se opera en el punto (a) y, ocurre un cambio en la carga (combinación serie de inductancia y capacitancia) que provoque que el punto se desplace hacia abajo de la curva de carga (figura 5.8) implica que la carga sea más chica que el voltaje de la fuente, lo que provoca que la fuente incremente la corriente hasta encontrar la solución y revierte al punto (a); por el contrario, si el cambio en la carga ocasiona que el punto se mueva hacia arriba de la curva de carga implica que la carga sea más grande que la fuente y provoque que la corriente disminuya revirtiendo al punto (a) otra vez. Por el contrario, si se opera en el punto (b), cuando ocurre algún cambio en la carga si hay diferencia. Si el cambio provoca un desplazamiento hacia arriba en la curva, la carga es más grande que la fuente y la corriente disminuye hasta encontrar la solución, que sería el punto (a); si el cambio en la carga es tal que el punto se desplace hacia abajo, la fuente es más grande que la carga y la corriente aumenta, otra vez, hasta que encuentre la solución, que en este caso sería el punto (c). El punto (c) es el grave, es a lo que le llaman ferromonancia en sí, es un voltaje por encima del nivel de

operación normal y se comporta de igual manera que el punto (a) de manera que una vez que se cae en este modo de operación, el sobrevoltaje es estable. Cualquier cambio en la carga revierte la operación a este punto.

De la ecuación 5.4, es muy notorio que la pendiente de la línea inclinada (que se muestra en la figura 5.3) es

$$\tan \gamma = \frac{1}{\omega C}$$

indicando que si se reduce  $\omega$  ó  $C$ , la pendiente se incrementará y los puntos de intersección progresarán en la curva. En una situación real, la frecuencia no es un parámetro variable, de manera que la única variable en realidad es la capacitancia de la línea, que dependerá de las condiciones del circuito en el momento que ocurra la ferorrresonancia [3]. Esto se muestra en la figura 5.9.

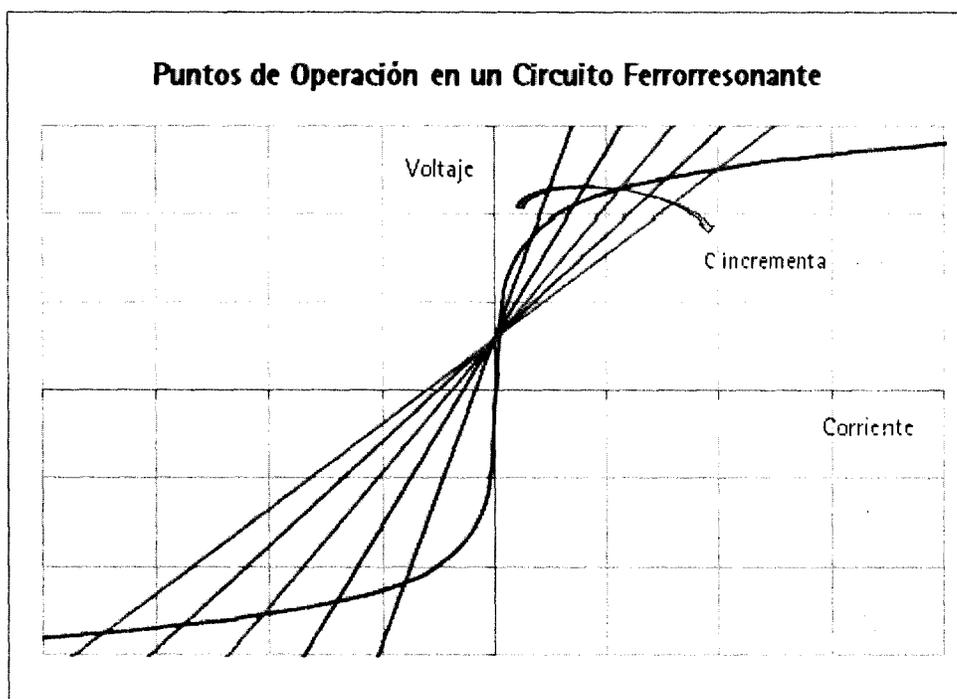


Figura 5.9 Al incrementar la capacitancia de la línea se obtienen nuevas soluciones.

En el enfoque del Ingeniero Rodríguez Bailey también se puede ver el efecto de incrementar la capacitancia de la línea (figura 5.10).

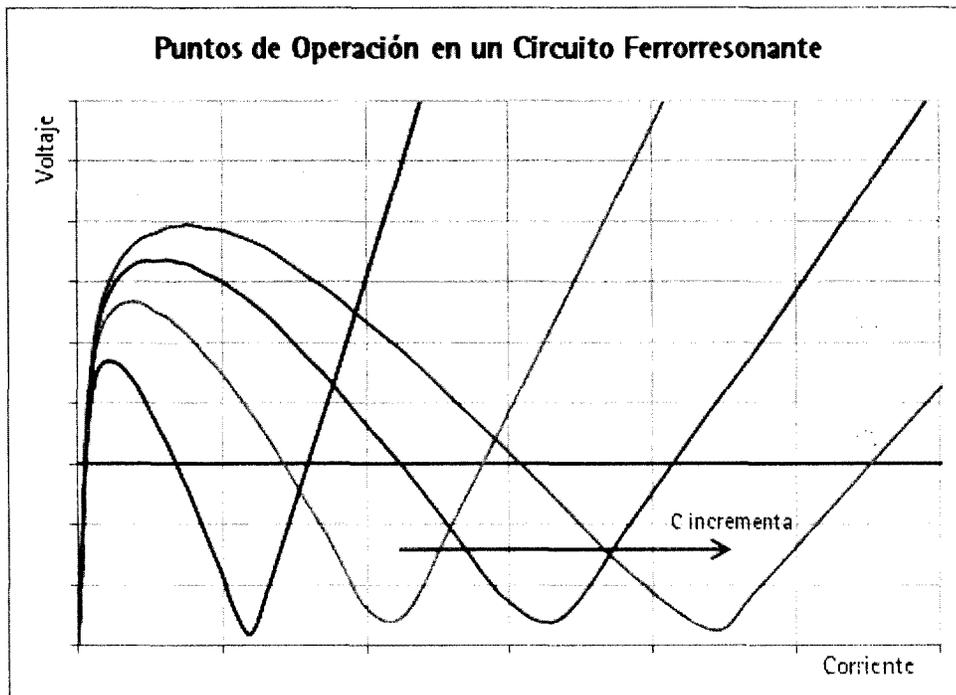


Figura 5.10 La capacitancia se incrementa mientras el voltaje de la fuente es constante.

### 5.5 La ferromonancia no es una verdadera resonancia

Si en la figura 5.3 se cambia el transformador por una inductancia lineal, la característica de operación cambia con respecto a la figura 5.7. El voltaje en el inductor es una línea recta al igual que el voltaje en el capacitor. Por lo tanto, para un valor de capacitancia e inductancia dado, existe una sola solución o punto de operación.

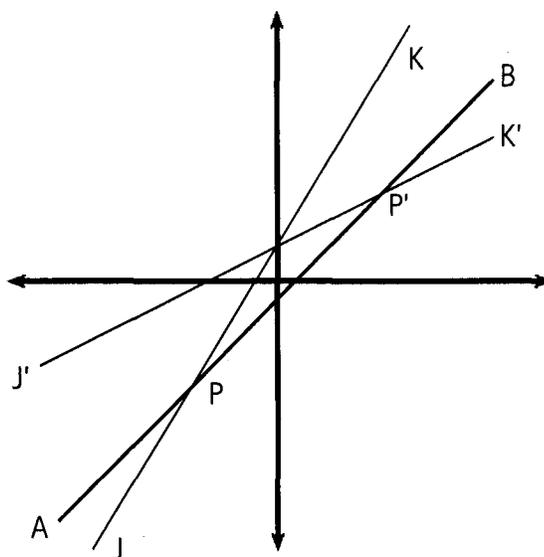


Figura 5.11 Condiciones de operación en un circuito LC lineal.

En la figura 5.11, se revisan dos valores de capacitancia para una misma inductancia. Se grafica de nuevo la ecuación 5.3 y 5.6. La característica de la inductancia es la línea AB que pasa por el origen, la característica de una capacitancia es JK y la característica de la otra capacitancia es J'K' (ambas curvas pasan por un punto común, que es el voltaje de la fuente). La pendiente de la línea JK es  $1/\omega C_1$  y es mayor que la pendiente de la inductancia, que es  $\omega L$ . La pendiente de la línea J'K',  $1/\omega C_2$ , es menor que  $\omega L$ . Por lo tanto para un valor de  $V_s$  dado existe un solo voltaje de operación, los puntos P y P'. En el caso que  $1/\omega C = \omega L$ , las dos rectas tienen la misma pendiente y los voltajes son infinitos. Esta es la definición general de resonancia [3][4].

En el caso de un transformador ya se vió que la inductancia no es lineal, por lo que nunca se presentará el caso cuando  $1/\omega C = \omega L$ . Sin embargo, los voltajes si pueden ser muy elevados y al ser sostenidos, los riesgos para el equipo involucrado son muy grandes.

## 5.6 Desarrollo del experimento

Se construyó un circuito para poder reproducir el fenómeno en un ambiente controlado. Es un arreglo de capacitores de CA (3  $\mu\text{F}$ ) conectado en serie a un transformador (127 V/ 36 V, 50 VA), como en la figura 5.3. La fuente difiere en que se utiliza un autotransformador para alimentar el circuito LC. En el anexo D se muestran fotografías del circuito construido.

Para poder seleccionar el capacitor a emplear se obtuvo la curva  $V_{rms}$  vs.  $I_{rms}$  del transformador, que de hecho es la que se muestra en la figura 5.5. Con esta curva resulta sencillo seleccionar un capacitor que funcione para el experimento (con la metodología gráfica explicada). Se utiliza la ecuación 5.6 y se grafican simultáneamente. Dado un valor de voltaje de la fuente, se varía el valor de la capacitancia hasta que el resultado da una intersección en la curva del transformador.

Como ya se explicó, los voltajes pueden ser muy elevados en la capacitancia y en la inductancia. Debido a esto, la capacitancia de 3  $\mu\text{F}$  se logró con un arreglo serie- paralelo de 4 capacitores de 250 V (2 de 4  $\mu\text{F}$  y 2 de 2  $\mu\text{F}$ ), para tener un capacitor equivalente de 3  $\mu\text{F}$  y 500 V.

Recalcando, las condiciones para que se de ferorresonancia son muchas y dependen de cierta aleatoriedad en las propiedades del transformador o reactor y del circuito, aunado a los cambios que en este ocurran. Debido a esto, se utilizó un autotransformador para poder variar el voltaje de alimentación y encontrar la frontera donde existen dos puntos de operación solamente. Una vez en este punto, cualquier variación en la carga o en la fuente lleva a operar al circuito al punto de operación conocido como ferorresonancia. Esta frontera de la que se habla se puede encontrar gráficamente con la curva  $V_{rms}$  vs.  $I_{rms}$  del transformador y el valor de la capacitancia que ya se ha seleccionado. La única variable que queda es el voltaje de la fuente. La figura 5.12 muestra la solución gráfica.

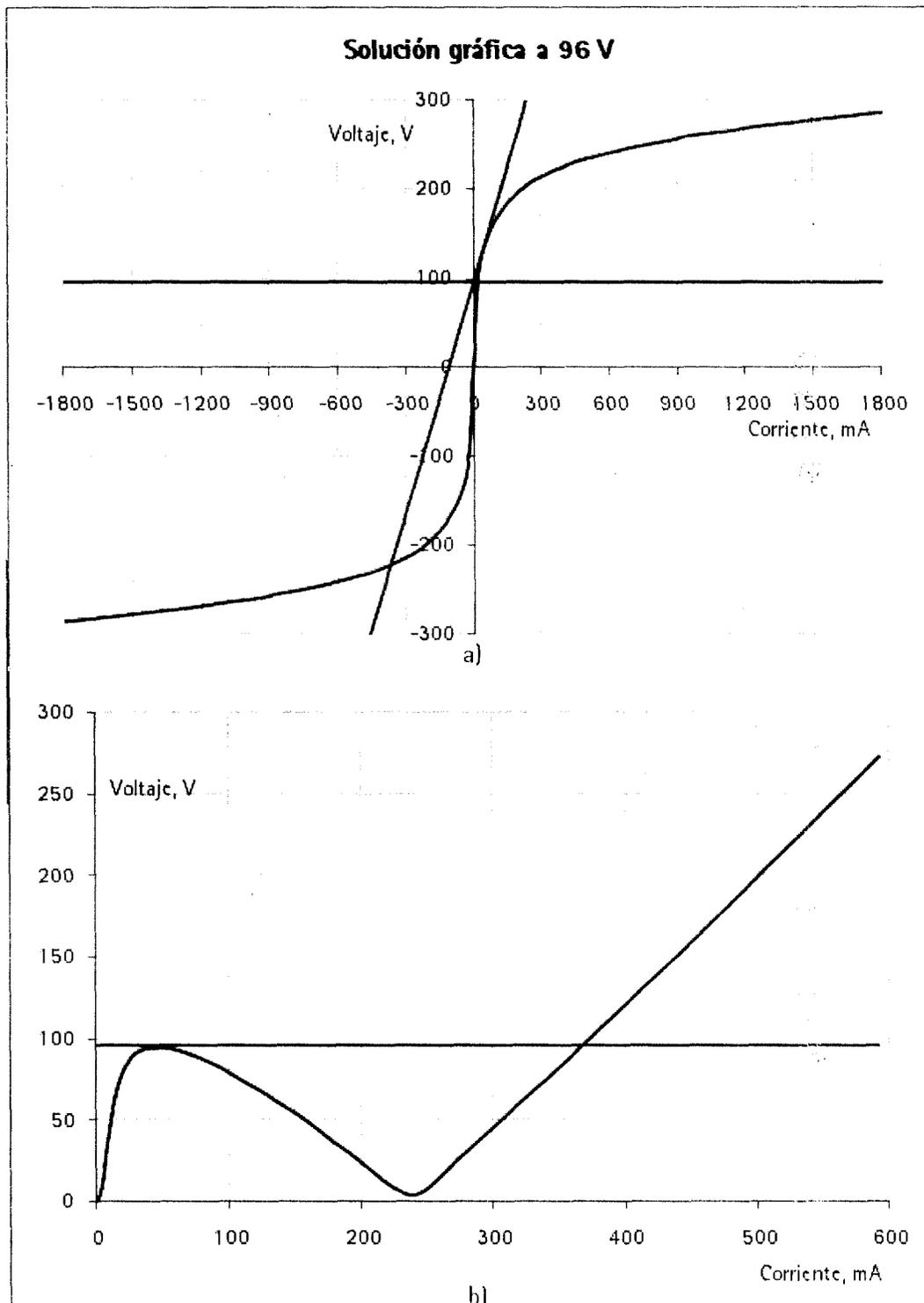


Figura 5.12 Solución gráfica a un voltaje de 96 V. a) Ecuaciones 5.3 y 5.6. b) Ecuación 5.4.

Se encontró gráficamente que se necesita un voltaje de 96 V para poner el circuito en el punto donde existen solamente dos puntos de operación. Cualquier cambio en la carga origina que brinque al sobrevoltaje mostrado en la figura 5.12a, alrededor de 220 V, con una corriente mostrada en 5.12b de alrededor de 370 mA.

Llevar a cabo las mediciones experimentales es sencillo. La tabla 5.1 muestra los resultados del experimento.

Tabla 5.1 Resultados obtenidos

Resultados Experimentales (Ferroresonancia)			
Vfuente	Vcap	Vinductancia	Ilinea (mA)
99.8	313.7	222.2	452
una vez en ferroresonancia			
120.9	337.3	225.5	492
89.5	301.5	220.3	431
75.2	284.8	218.2	403
57.5	264.0	219.9	368
34.4	231.0	209.7	315
23.7	5.6	28.0	9

En el circuito construido se necesitó de un voltaje de alrededor de 100 V para propiciar el sobrevoltaje. Se probaron dos escenarios: una vez en la condición de ferroresonancia, se subió el voltaje de alimentación a 120 V, el voltaje en la inductancia subió solo 3 V y en el capacitor hubo un aumento de casi 20 V, es decir, el aumento en el voltaje de alimentación es absorbido por el capacitor. La figura 5.12b corrobora esta situación. El otro escenario bajo prueba fue bajar el voltaje en intervalos para probar que una vez que se está en ferroresonancia, revertir las condiciones que originaron el disturbio no lo elimina. La sobretensión se mantuvo hasta que el voltaje de la fuente descendió a una quinta parte.

El sobrevoltaje en la inductancia es de 222.2 V con 452 mA. La solución gráfica da prácticamente el mismo voltaje (alrededor de 220V) con una corriente alrededor de 370 mA.

La diferencia con la solución gráfica es muy poca y una de las razones por las que debe existir esta diferencia es porque en el análisis gráfico y las ecuaciones establecidas no se toma en cuenta el efecto resistivo de dispersión del transformador y las líneas o cables en un sistema de potencia.

La figura 5.13 muestra el sobrevoltaje en la inductancia capturado con el THS720P

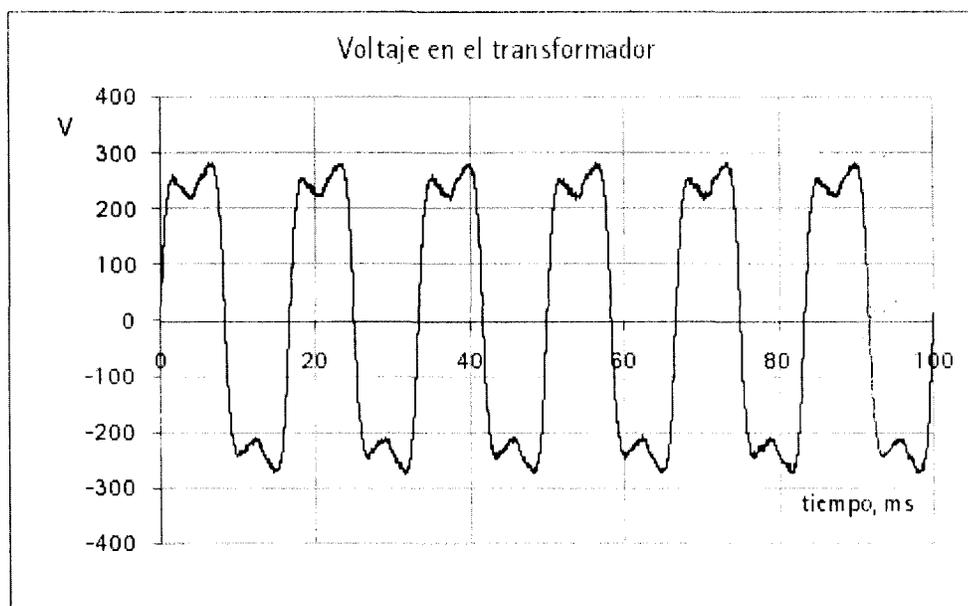


Figura 5.13 Sobrevoltaje en el transformador bajo ferrorresonancia.

Esta forma de onda es típica de ferrorresonancia, y es similar a las que se reportan en [10][11]. Sin embargo, este no es el peor caso, ya que debido a los múltiples factores involucrados en ferrorresonancia existen formas de onda más asimétricas y desordenadas; se le refiere como ferrorresonancia caótica y es mencionada en [1][4][10].

Un ejemplo de esta forma de onda se muestra a continuación.

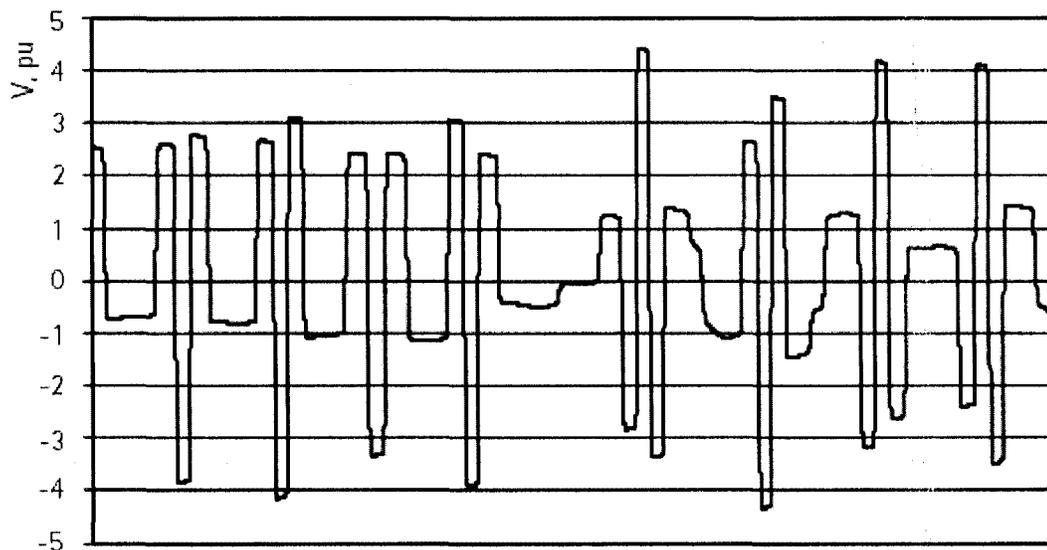


Figura 5.14 Ejemplo de sobrevoltaje en ferrorresonancia caótica.

## 5.7 Técnicas para evitar ferorrresonancia [13].

La ferorrresonancia se caracteriza por:

- Ruido del transformador y sobrecalentamiento debido a la saturación.
- Arqueo de apartarrayos y de interruptores en líneas abiertas.
- Daños al aislamiento.

Como la ferorrresonancia se establece en circuitos en vacío o con muy baja carga, y debido a que se originan por lo general en cambios de configuración de circuitos al abrirse interruptores o cerrarse, las recomendaciones, contra la perturbación son:

- Utilizar interruptores trifásicos de un solo tiro.
- Evitar cargas pequeñas, por ejemplo, usar carga resistiva en el secundario del transformador.
- Adoptar una configuración de desconectado que aisle el cable primero y luego el transformador. Reconectar en sentido inverso.

Una práctica general es aumentar el voltaje del apartarrayos para evitar daños por sobrecarga térmica, por ejemplo, de 12 kV a 15 kV o 18 kV en sistemas de 11 kV. Los problemas por esta práctica son:

- Reduce el nivel de protección de la red contra descargas atmosféricas.
- Permite que el alto voltaje ferorrresonante dañe otro equipo.

## 5.8 Simulación en Microtran.

De igual manera que en el capítulo anterior se logró simular en Microtran el fenómeno de ferorrresonancia caracterizado con las pruebas de laboratorio. La simulación resulta más sencilla que en el caso de corte de corriente puesto que es una condición sostenida (de estado estable), y no hay que liarse con los tiempos.

El código y decisiones que se tomaron, así como las pruebas realizadas al transformador para la simulación se encuentran en el anexo C seguido de la simulación de supresión de corriente.

Se hicieron pruebas de corto circuito y de vacío al transformador para obtener los parámetros de su circuito equivalente. Como se experimentó con un transformador en vacío bastan los parámetros del primario para la simulación.

Se eligió el mismo voltaje que se aplicó al transformador por medio del autotransformador para provocar ferorrresonancia. En la simulación se tiene que designar el voltaje en valor cresta por lo que se eligieron 140 V con  $0^\circ$  de desfaseamiento para función coseno. La figura 5.15 muestra el sobrevoltaje resultado de la simulación.

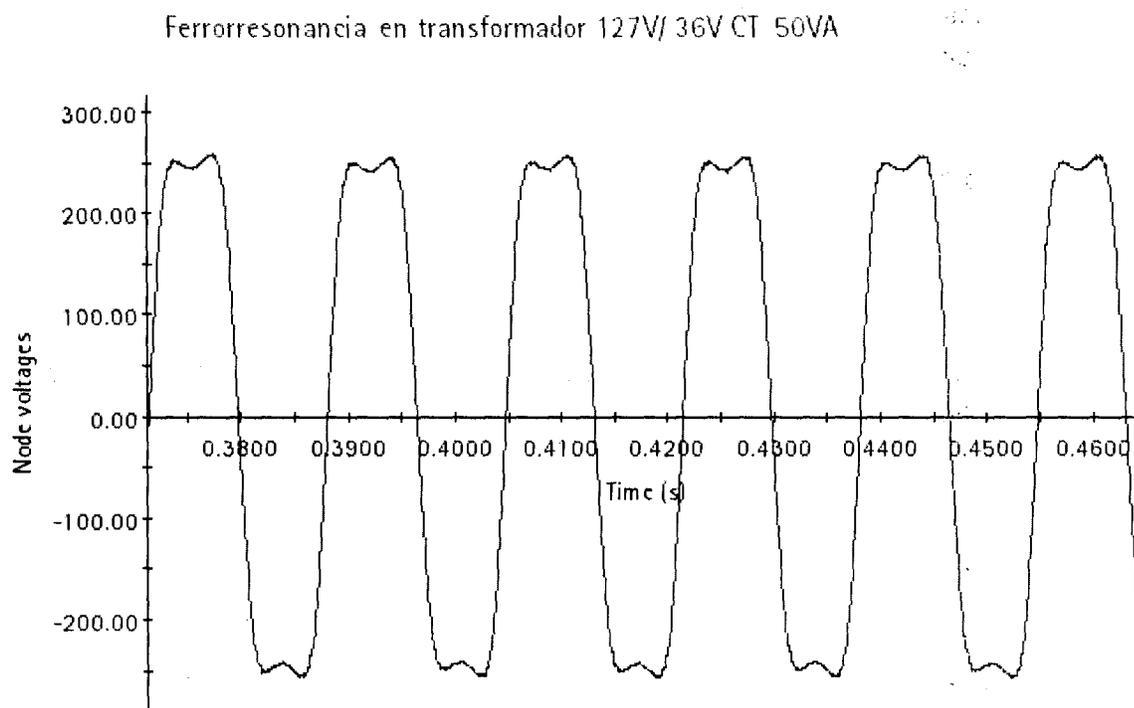


Figura 5.15 Voltaje en el transformador obtenido de la simulación en Microtran.

El resultado obtenido es bastante bueno y se asemeja en gran medida al obtenido en laboratorio. El sobrevoltaje de la simulación anda alrededor de los 240 V y en la práctica 220 V. El porcentaje de error es de un 9%.

La simulación nos permite observar la corriente también, la cual se muestra en la figura 5.16. En este caso la corriente presenta un valor cresta de 0.94 A y en la práctica resultó un valor un poco mayor. El error es mínimo también.

El siguiente paso fue conocer cuál era el valor de voltaje (con  $0^\circ$ ) en la simulación, que provocaba ferorrresonancia. Partiendo del valor de 140 V se fue disminuyendo el voltaje y se encontró que 121 V es el voltaje a partir del cual se tiene ferorrresonancia en la simulación. Esto equivale a 86 V en valor efectivo.

## Ferroresonancia en transformador 127V/ 36V CT 50VA

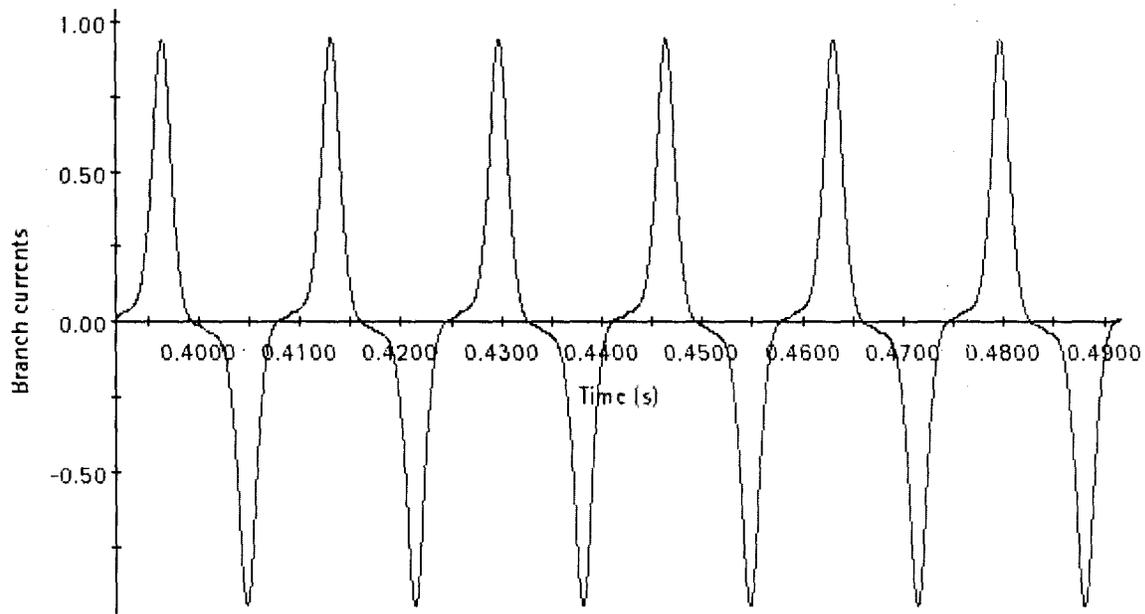


Figura 5.16 Corriente de línea obtenida de la simulación en Microtran.

Cambiar el ángulo de desfase en el voltaje provoca que voltajes de menor magnitud provoquen el disturbio. Incrementar el voltaje de la fuente y el valor del capacitor a ciertos valores provoca que la simulación no encuentre resultados en la curva de magnetización y aborte reportando error.

En el anexo C se encuentra el código de Microtran utilizado para la simulación.

## CAPÍTULO

## 6

## Conclusiones

## Supresión de corriente

En el capítulo 4 se estudió el fenómeno conocido como supresión o corte de corriente ("*current chopping*" en inglés), un disturbio que se atribuye totalmente al interruptor, entre los que se encuentran algunos interruptores de potencia (vacío, gas  $SF_6$ ), y el interruptor de mercurio utilizado en los experimentos. Consiste en interrumpir la corriente en un circuito en un instante distinto de algún cruce natural de la frecuencia del sistema.

El problema se presenta principalmente al cortar o suprimir corrientes inductivas pequeñas, como el desconectar un transformador en vacío. Radica básicamente en que la energía del transformador al momento del corte se libera en los elementos adyacentes (capacitancia distribuida y resistencia del núcleo).

Se capturaron varios eventos de corte de corriente con el osciloscopio THS720P y el Fluke 434. No se tuvo la fortuna de capturar ningún evento con corriente máxima cortada, pero, más allá de las probabilidades de interrumpir el circuito justo en máximo positivo o negativo, la realidad es que el interruptor no corta cualquier valor de corriente, tiene un máximo que puede manejar. Esto se encontró tras querer ocasionar supresión de corriente en un transformador con una corriente de excitación pico del orden de amperes; el interruptor era incapaz de realizarlo y la corriente continuaba su recorrido hasta cruce natural por cero.

El disturbio ocurre en el primario y en el secundario independientemente en qué lado se haya realizado el corte de corriente. Esto es de particular importancia, ya que se pueden superar los niveles de energía que los supresores de sobrevoltajes transitorios pueden manejar y poner en riesgo equipo electrónico que se esté protegiendo.

Al establecer el modelo matemático para caracterizar el fenómeno, se obtiene la ecuación del sobrevoltaje en el tiempo, estableciendo que la perturbación tiene que ser sobreamortiguada dada la naturaleza de la inductancia, capacitancia y resistencia involucradas. Aún con una ecuación que permite describir el sobrevoltaje, no es una tarea fácil conocer el valor de la inductancia, capacitancia y resistencia. La inductancia es no

lineal (función de la corriente), la capacitancia es un valor no caracterizado fácilmente y la resistencia es función de la frecuencia y la densidad de flujo.

Una simulación hace un trabajo más noble en este sentido que el análisis matemático. Con las capturas obtenidas, aún y cuando no se cuenta con la suficiente resolución, se preparó un modelo que responde adecuadamente, con unos porcentajes de error muy pequeños. El elemento de mayor impacto en la simulación es la resistencia del núcleo, pues es quien decide el amortiguamiento del sistema. La capacitancia al ser muy pequeña (del orden de picofarads), tiene un efecto no tan trascendente en el sobrevoltaje. Prácticamente su nivel de involucramiento es en la impedancia característica, y como se trabaja con niveles tan pequeños de capacitancia,  $Z_0$  es muy grande. Esto apoya el criterio de decidir que el fenómeno es sobrearmortiguado por naturaleza.

### **Futuros proyectos sobre corte de corriente**

Los alcances del proyecto de tesis en cuanto a corte de corriente son: establecer la teoría de corte de corriente, construir un circuito para poder repetir supresión de corriente en un ambiente controlado y determinar un circuito equivalente confiable para simular el fenómeno.

Se recomiendan los siguientes proyectos:

- Armar un circuito trifásico con un banco de transformadores y provocar corte de corriente en uno para estudiar supresión virtual de corriente que se explica en [8].
- Armar un banco trifásico de transformadores y provocar corte de corriente simultáneamente en las tres fases (con tres interruptores de mercurio).
- Desarrollar un modelo práctico de la resistencia del núcleo dependiente de la frecuencia para poder simular supresión de corriente y otros transitorios de baja y media frecuencia en Microtran.

### **Ferrorresonancia**

En el capítulo 5 se estableció la teoría necesaria para entender el fenómeno conocido como ferrorresonancia. Es un disturbio que se establece típicamente en una red entre el voltaje de alimentación, una capacitancia (capacitancia de la línea, banco de capacitores para corrección de factor de potencia) y un transformador. Se llama de esta manera debido a que la inductancia involucrada es una ferro inductancia, es decir, es de núcleo de material ferromagnético.

A causa de la no linealidad del transformador, representada por la saturación de este material, la resonancia entre el transformador y la capacitancia no es la definición general de impedancias iguales, donde el punto de operación se encuentra en un voltaje infinito. En ferrorresonancia, existen tres puntos de operación y uno de ellos, al que se le refiere como ferrorresonancia es un voltaje que puede ser muy elevado. Es una situación de estado

estable que normalmente es desatada por transitorios. Las condiciones para que se presente el fenómeno son muchas, lo que disminuye las posibilidades de ocurrencia.

La modelación matemática presentada es muy sencilla elaborada, ya que fue elaborada sin tomar en cuenta ninguna resistencia. Esta modelación permite construir un acercamiento visual al problema mediante una modelación gráfica que es muy noble y clara para explicar el disturbio.

Se realizaron pruebas de laboratorio con un circuito serie formado por una capacitancia y un transformador. La capacitancia fue seleccionada con ayuda de la curva  $V$  vs.  $I$  del transformador determinada experimentalmente. Se tiene que tener especial cuidado en la selección del capacitor, ya que los sobrevoltajes son muy elevados; el voltaje de diseño tiene que ser adecuado, y el capacitor tiene que ser de alterna, de lo contrario se puede destruir. Con la ayuda de un autotransformador se provocó el brinco al sobrevoltaje.

El sobrevoltaje, en el circuito de estudio es de 1.8 pu, pero con un contenido armónico importante, ya que la forma de onda se asemeja a una onda cuadrada. Este ya es un sobrevoltaje considerable. Los factores más influyentes en el sobrevoltaje son la saturación y el valor de la capacitancia. Existe un tipo de ferorresonancia caótica que presenta voltajes que pueden ser hasta 5 pu.

Una vez en ferorresonancia, se decidió realizar mediciones a voltajes por encima del que provocó el disturbio y por debajo. Se observó que una vez que la respuesta brinca al sobrevoltaje, este voltaje es sostenido y gran parte de los cambios en el voltaje de la fuente la absorbe el capacitor; el voltaje en el transformador no cambia mucho.

La simulación resultó bastante sencilla con la experiencia de las simulaciones de corte de corriente del capítulo 4. La inductancia no lineal que representa la magnetización del transformador se obtiene de igual manera, con la transformación sugerida en [9], a partir de la curva  $V$  vs.  $I$ . El resto de los parámetros se obtiene con pruebas de laboratorio. Los resultados de la simulación son muy similares a los experimentos y permiten reproducir el fenómeno para distintos valores de voltaje de alimentación y capacitancia. Existe un límite por la curva de magnetización ya que se pueden escoger valores en los que ya no encuentre solución en la curva. Los resultados, aún así son sobrevoltajes similares. La limitación se debe a que la inductancia es introducida punto por punto.

### **Futuros proyectos sobre ferorresonancia**

Los alcances del proyecto de tesis en cuanto a ferorresonancia son: establecer la teoría de ferorresonancia, sugerir un modelo gráfico más sencillo para explicación del fenómeno, construcción de un circuito para provocar ferorresonancia en un ambiente controlado y simulación del disturbio.

Se recomiendan los siguientes proyectos:

- Armar un circuito trifásico de los presentados en el anexo B bajo un ambiente controlado para provocar ferorresonancia.

- Para un circuito de los presentados en el anexo B, encontrar el valor de carga que previene el disturbio, y generar una regla de dedo o metodología para prevenir ferorrresonancia con este criterio.
- Reproducir en un ambiente de laboratorio ferorrresonancia caótica.
- Desarrollar un modelo para simulación de ferorrresonancia caótica.

# CAPÍTULO

# 7

## Referencias bibliográficas

- [1] J. C. Gómez, *Calidad de Potencia para usuarios y empresas eléctricas*, 1 ed. Buenos Aires, Arg.: Edigar, 2005, pp. 17-20, 169-170.
- [2] IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment, IEEE standard 1100, 2005, pp. 1-35.
- [3] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991, pp. 1-122.
- [4] R. C. Dugan *et al.*, *Electrical Power Systems Quality*, 2 ed. Mc Graw Hill, New York, 2002, pp 5-31.
- [5] A. Llamas, "Alimentación de cargas críticas y sensibles", Centro de Estudios de Energía, ITESM campus Monterrey, sin publicar.
- [6] A. Llamas, J. de los Reyes, "Instrumentación para determinar la calidad del suministro eléctrico", Centro de Estudios de Energía, ITESM campus Monterrey, sin publicar.
- [7] C. Sankaran, "Electrical transients" en *Power Quality*, 1 ed. CRC Press LLC, 2001. pp 44-55.
- [8] L. van der Sluis, *Transients in Power Systems*, 1 ed. John Wiley & Sons, Inc., England, 2001. pp. 57-106. p. 181.
- [9] H. Dommel, *BPA EMTP Theory Book*, BPA, 1995. Sec. 1-1. Sec. 6-42.
- [10] J. Horak, "A review of Ferroresonance", presentado en la annual conference for protective relay engineers, 2004, 57<sup>th</sup>.
- [11] M. R. Iravani, et. al. "Modeling and analysis guidelines for slow transients- part III: The study of ferroresonance", *IEEE Trans. Power Deliv.* Vol. 15. Enero 2000:
- [12] E. J. Rye, "Tales of the Unexpected", *IEEE Colloq. Warn. Ferro. Dam.* Noviembre 1997.
- [13] J. B. Wareing, F. Perrot, "Ferroresonance overvoltages in distribution networks", *IEEE Colloq. Ferrores.* Noviembre 1997.

- [14] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4 ed. Prentice Hall, 2002. pp. 15- 31.
- [15] J. A. Martínez, B.A. Mork, "Transformer Modeling for Low and Mid Frequency Transients- A review", *IEEE Trans. Power Deliv.* Vol. 20, Abril 2005.
- [16] J. Avila- Rosales, F. L. Alvarado, "Non-linear Frecuency Dependent Transformer Model for Electromagnetic Transients Studies in Power Systems", *IEEE Trans. Power App. Sys.*, Vol. PAS- 101. Noviembre, 1982.

## ANEXO

## A

## Transformadas de Laplace

## A.1 Algunas transformadas específicas [14]

$f(t)$	$F(s)$
impulso unitario $\delta(t)$	1
escalón unitario $1(t)$	$\frac{1}{s}$
$t$	$\frac{1}{s^2}$
$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$
$te^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\text{cos } \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$t^n$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$t^n e^{-at}$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
$e^{-at} \text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \text{cos } \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$

$f(t)$	$F(s)$
$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
$e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t) - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{sen}(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t) \right); \zeta < 1$ $e^{-\omega_n t}(1 - \omega_n t); \zeta = 1$ $\frac{1}{2\psi} \left( (\zeta + \psi)e^{-(\zeta+\psi)\omega_n t} - (\zeta - \psi)e^{-(\zeta-\psi)\omega_n t} \right); \psi = \sqrt{\zeta^2 - 1}; \zeta > 1$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$
$\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \text{sen}(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t); \zeta < 1$ $\omega_n t e^{-\omega_n t}; \zeta = 1$ $\frac{1}{2\psi} (e^{-(\zeta-\psi)\omega_n t} - e^{-(\zeta+\psi)\omega_n t}); \psi = \sqrt{\zeta^2 - 1}; \zeta > 1$	$\frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$
$1 - e^{-\omega_n t} \left( \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t) - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{sen}(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t) \right); \zeta < 1$ $1 - e^{-\omega_n t}(1 + \omega_n t); \zeta = 1$ $1 + \frac{1}{2\psi} \left( \frac{e^{-(\zeta+\psi)\omega_n t}}{(\zeta + \psi)} - \frac{e^{-(\zeta-\psi)\omega_n t}}{(\zeta - \psi)} \right); \psi = \sqrt{\zeta^2 - 1}; \zeta > 1$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$

## A.2 Algunas propiedades de la transformada de Laplace [14]

$\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$
$\mathcal{L}[Af(t)] = AF(s)$
$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s)$
$\mathcal{L}\left[\frac{d}{dt}f(t)\right] = sF(s) - F(0)$
$\mathcal{L}\left[\frac{d^2}{dt^2}f(t)\right] = s^2F(s) - sF(0) - \dot{F}(0)$
$\mathcal{L}\left[\int f(t)dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{[\int f(t)dt]_{t=0}}{s}$
$\mathcal{L}\left[\iint f(t)dt dt\right] = \frac{F(s)}{s^2} + \frac{[\int f(t)]_{t=0}}{s^2} + \frac{[\iint f(t)dt dt]_{t=0}}{s}$

## Situaciones en las que se presenta ferrorresonancia

Los siguientes circuitos fueron obtenidos de [10]. No son todas las posibilidades que existen en las cuales se presenta la ocurrencia de ferrorresonancia, ni son todos los circuitos que se mencionan en la referencia, pero es un buen panorama. En la referencia aparecen incluso casos con máquinas rotatorias.

En las figuras se utiliza un diagrama muy simplificado de un transformador por brevedad, mostrando un transformador con el secundario abierto y su núcleo modelado únicamente por la inductancia de magnetización,  $X_m$ .

### **Conmutación monofásica de transformadores en conexión delta o estrella no aterrizada**

Un circuito que involucra un transformador trifásico no aterrizado (estrella no aterrizada, delta, o un transformador monofásico conectado de línea a línea) está sujeto a crear un circuito LC. El voltaje del sistema está obligado a ver a través de la rama de magnetización del transformador la capacitancia de línea a tierra de las otras fases.

En estos circuitos, el sistema de potencia define el voltaje en el circuito, pero no define el voltaje en los puntos intermedios del circuito. Por lo tanto, el voltaje de una fase abierta (que es el voltaje en la XC de la capacitancia) puede ser alto o el voltaje en el transformador puede serlo, lo que crea un alto voltaje a tierra que presenta un riesgo para los supresores de sobrevoltajes transitorios y cualquier otra carga conectada.

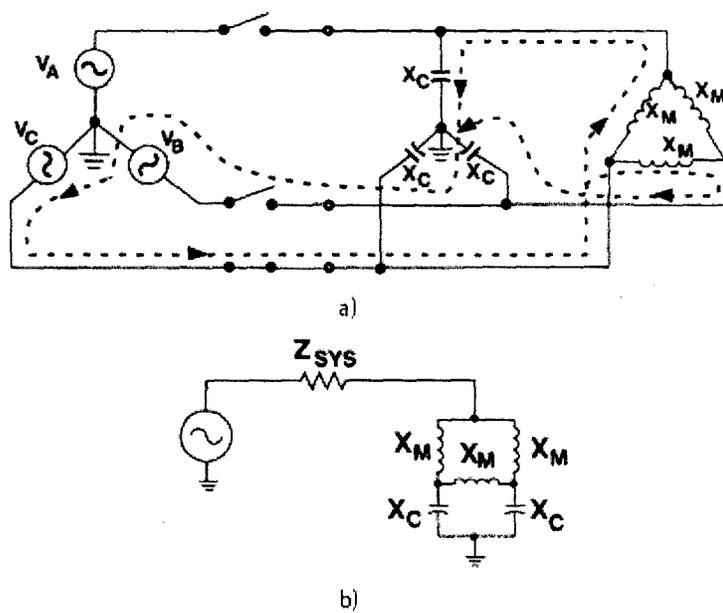


Figura B.1 a) Transformador en delta, una fase energizada. b) Circuito equivalente.

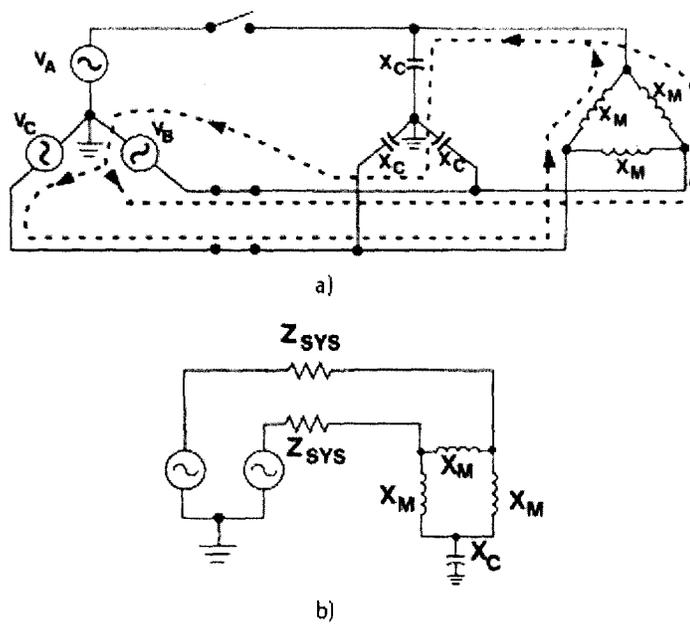


Figura B.2 a) Transformador en delta, dos fases energizadas. b) Circuito equivalente.

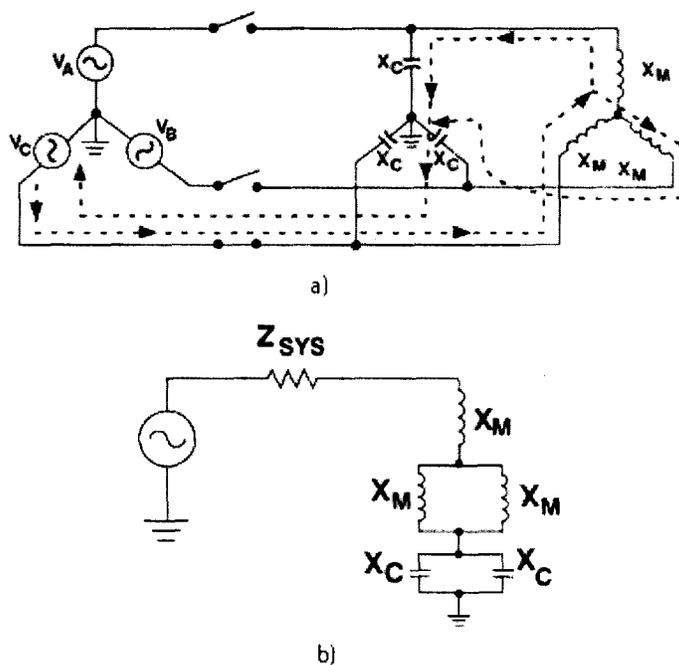


Figura B.3 a) Transformador en estrella no aterrizada, una fase energizada. b) Circuito equivalente.

### Conmutación monofásica de transformadores en conexión estrella aterrizada con bancos de capacitores no aterrizados

Esta configuración es muy similar a los ejemplos previos, excepto que el voltaje del sistema encuentra a través del banco de capacitores no aterrizado a la rama de excitación del transformador aterrizado.

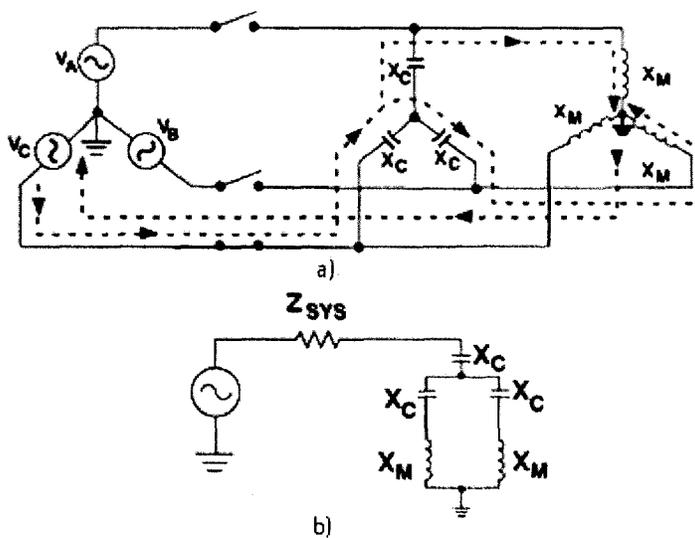


Figura B.4 a) Devanados en estrella aterrizada, con capacitores no aterrizados, una fase energizada. b) Circuito equivalente.

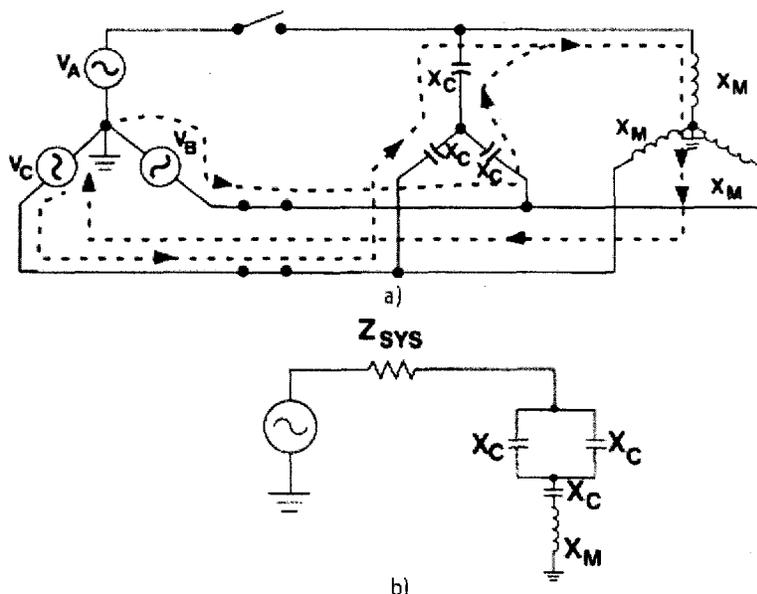


Figura B.5 a) Devanados en estrella aterrizada, con capacitores no aterrizados, dos fases energizadas. b) Circuito equivalente.

### Acoplamiento mutuo de una línea desenergizada que tiene un transformador conectado

En la experiencia de la mayoría de los ingenieros de potencia, el acoplamiento entre dos líneas es discutido solo en términos del acoplamiento de secuencia cero; la corriente de secuencia cero en una línea puede inducir un voltaje de secuencia cero en una línea adyacente. Existe un acoplamiento similar menor, entre dos líneas cuando están presentes voltajes y corrientes de secuencia positiva. El acoplamiento puede ser tanto capacitivo como inductivo. Asumiendo dos conjuntos de líneas (A, B, C y A', B', C') montados en la misma torre, puede existir el mencionado acoplamiento con el simple hecho de que la fase A y la fase A' estén más cerca que la fase A con B' y A con C' por una distancia considerable. Esto provoca que la fase abierta de A este acoplada capacitivamente más a A' que a las otras fases B' y C' y por lo tanto, que se encuentre parcialmente energizada al potencial de A'. En la mayoría de los casos el acoplamiento es tan pequeño que no se considera en los estudios de sistemas de potencia. Sin embargo, puede ser suficiente para desatar la ferorresonancia entre la capacitancia de línea a neutro y un transformador desenergizado en una sección aislada de la línea.

En la figura siguiente, la única carga en la línea desenergizada es la impedancia de magnetización del transformador, la cual puede ser debida a un transformador de potencial o un transformador de potencia. La línea energizada se acopla capacitivamente e inductivamente con la línea desenergizada. Como el transformador y la línea son dispositivos de bajas pérdidas, una vez que el circuito empieza a oscilar (posiblemente iniciado por una falla en la línea energizada que induce un voltaje de secuencia cero en la

línea paralela), se puede establecer una resonancia sostenida, limitada solo por las pérdidas de la línea y el transformador.

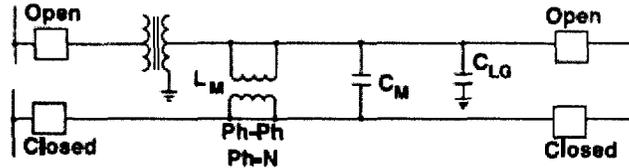


Figura B.6 Acoplamiento mutuo con una línea desenergizada.

### Capacitancia de contacto de un interruptor alimentando a un bus con un transformador de potencial

Los interruptores pueden energizar parcialmente un bus muerto a través de la capacitancia de sus terminales abiertas, especialmente los interruptores de múltiples etapas de capacitores ("*grading capacitor*"). Los interruptores de múltiples etapas de interrupción son cada vez menos comunes, pero aún son producidos y existen un gran número de ellos operando en las redes. El circuito posee todos los elementos para ser candidato a la ferorresonancia: es un circuito L-C creado entre el sistema de potencia, la capacitancia del interruptor y los transformadores de potencial. En interruptores sin *grading capacitors*, la capacitancia en los contactos abiertos es del orden de 50 pF, lo cual está en el orden de  $50 \text{ M}\Omega$  a 60 Hz, por lo tanto, una condición ferorresonante en estas condiciones requeriría de varios interruptores en paralelo antes que exista una buena corriente que alimente la ferorresonancia. Para interruptores con *grading capacitors* está en el orden de los 1,000 pF.

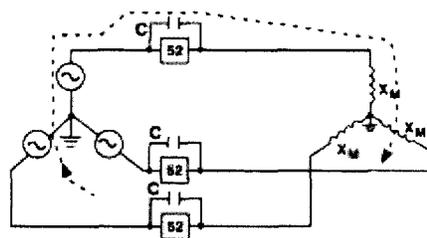


Figura B.7 Interruptor con *grading capacitor* alimentando a un transformador de potencial.

### Fuente en delta alimentando transformadores en estrella aterrizada/ estrella aterrizada sujetos a falla de línea a tierra

Este caso es distinto que los otros ejemplos. En esta aplicación, un voltaje de valor nominal a alto es aplicado a una conexión LC, de tal manera que el voltaje en los elementos L y C es

definido por la fuente, y ahora la corriente en los elementos es libre de variar con respecto a la que la fuente ve. Una forma en la que este tipo de ferorrresonancia aparece es cuando un punto de carga, alimentado por un transformador Delta/ Estrella aterrizada (el suministro en delta) obtiene generación y se convierte en un punto de generación distribuida. Dada una falla a tierra del lado del suministro, el suministrador se aísla y el esquema de generación distribuida es incapaz de alimentar la corriente de falla en esta configuración de transformador. Uno de los esquemas de protección permitido por la compañía suministradora es instalar un banco de transformadores de potencial en estrella aterrizada/ estrella aterrizada con un relevador verificando  $3V_0$  (3 veces el voltaje de secuencia cero), o un banco de TPs en estrella aterrizada/ delta abierta con elemento 59N monitoreando el voltaje de la delta abierta. Durante una falla de línea a tierra, uno de los TP observa 0 V, y los dos restantes están sujetos a 1.732 p.u. el voltaje nominal de línea a tierra. A este voltaje elevado es más fácil encontrar saturación del transformador de potencial y una resonancia. Si el TP fue configurado inadvertidamente basado en voltaje de línea a tierra, en lugar de los voltajes de línea, éste estará sujeto a saturación en cada falla a tierra, y por lo tanto el riesgo de ferorrresonancia será un orden de magnitud más alto. Una saturación similar y resonancia subsecuente se puede establecer en cualquier transformador de potencia conectado de línea a neutro en la línea.

Si el TP se satura y entra en ferorrresonancia, el voltaje del secundario estará distorsionado, el voltaje fundamental de salida será severamente reducido y con distinta fase, reduciendo el  $3V_0$  medido. Una falla en la operación del relevador se asegura.

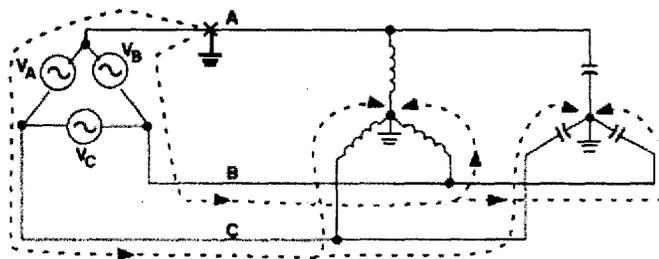


Figura B.8 Fuente en Delta alimentando una falla de línea con transformadores en estrella aterrizada..

Es práctica común en esta configuración conectar los secundarios en delta abierta y conectar una resistencia en la delta abierta. El propósito es cargar el sistema, ya que es una buena manera de evitar ferorrresonancia.

### Fases acopladas magnéticamente en transformadores trifásicos

Uno de los acercamientos para prevenir ferorrresonancia es tratar a las tres fases de un sistema trifásico como sistemas independientes para evitar acoplamiento entre fases asociado al fenómeno. Esto significa que todas las cargas son conectadas de fase a neutro, en lugar de entre líneas. En un primer vistazo pareciera que un banco en estrella aterrizada

/ estrella aterrizada logra esto, pero pudiera no ser el caso. Cuando las fases de un transformador comparten un mismo núcleo, una fase energizada puede acoplarse con las fases desconectadas y excitarlas. Si existe una capacitancia en estas fases, puede surgir una condición resonante.

Considera el diseño de transformador de 4 núcleos/ 5 piernas de la figura de abajo. Asume que solo la fase AP es excitada, que el secundario está abierto, y que BP y CP tienen algún nivel de capacitancia conectada pero sin carga. La bobina AP ve el flujo en los núcleos 1 y 2. Inicialmente, mientras no exista corriente fluyendo en BP, más o menos la mitad del flujo necesario para la corriente de excitación fluye en los núcleos 1 y 2. El flujo en el núcleo 2, sin embargo, induce alrededor de 0.5 pu de voltaje en BP. Este VB causa que fluya corriente en la capacitancia adjunta de BP. La corriente en BP decrece el flujo neto en el núcleo 2, por lo que se necesita un incremento equivalente de excitación en la fase A. Por lo tanto, un transformador de corriente de relación unitaria se ha establecido entre la fase AP y BP. Cuando la corriente en AP se incrementa, el flujo en el núcleo 1 se incrementa. Si la corriente total en AP es más de la corriente normal de excitación, el núcleo entra en saturación. Por lo tanto, más corriente de excitación fluye en AP, lo cual incrementa el flujo en BP de maneja proporcional y el voltaje VB incrementa. Ahora, hay un transformador de potencial de relación unitaria entre AP y BP.

Una transferencia de corriente similar ocurre entre la fase A y la fase C, por lo que el núcleo 4 entra en saturación también. Hasta el núcleo 3, dependiendo de las magnitudes relativas de XC en la fase B y C, pueden operar parcialmente en saturación. La saturación de los núcleos ocurre porque el transformador está diseñado para transferir corriente de primario a secundario, en un núcleo común, no de primario a primario. Una inspección de los circuitos equivalentes muestra varias combinaciones de redes L-C que pueden ser sujetas a ferrorresonancia.

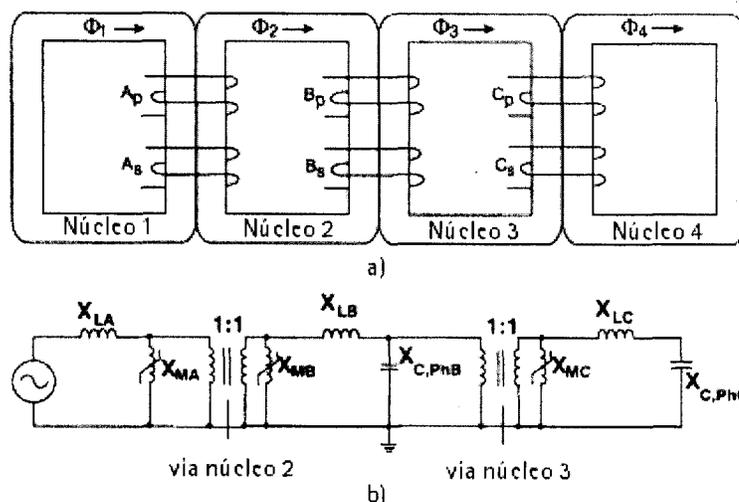


Figura B.9 a) Transformador de 4 núcleos/ 5 piernas. b) Circuito equivalente: se excita la fase A y carga B y C con XC.

Diseños de transformadores de un núcleo/3 piernas (en aplicaciones delta/estrella aterrizada) y de un núcleo/ 4 piernas (en aplicaciones estrella aterrizada/ estrella aterrizada) tienen una habilidad similar para acoplar magnéticamente fases energizadas a otras fases, aunque se necesita un análisis de balance de flujo más complejo:

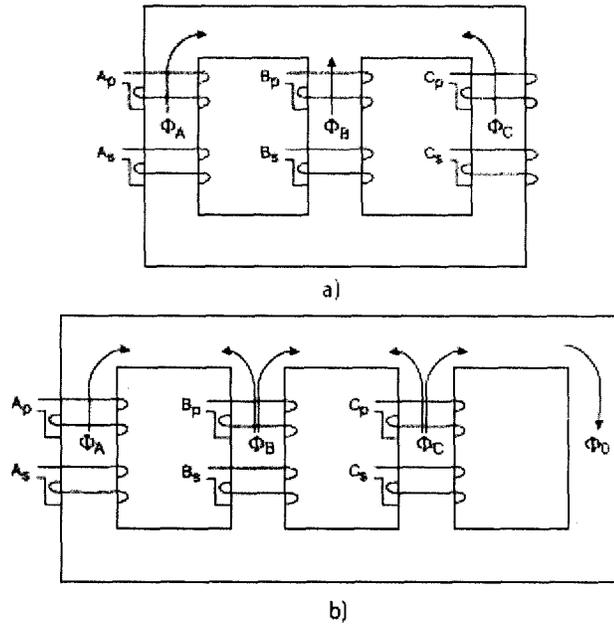


Figura B.10 a) Diseño de un núcleo/ 4 piernas, para aplicaciones delta/ estrella aterrizada. b) Diseño de un núcleo/ 4 piernas, para aplicaciones estrella aterrizada/ estrella aterrizada.

## Simulaciones en Microtran

Microtran es un software basado en el EMTP. EMTP es el acrónimo de "*Electromagnetic Transients Program*". Es un software destinado a la simulación de circuitos en estado transitorio. Provee la solución en estado estable también según el tiempo que se haya decidido para la simulación. Utiliza el método de integración trapezoidal [9].

## Supresión de corriente

Las pruebas realizadas en el transformador utilizado en supresión de corriente se resumen en la tabla C.1. Ambas pruebas fueron realizadas en el primario.

Tabla C.1 Pruebas de corto circuito y circuito abierto al transformador utilizado en corte de corriente.

Transformador 125 V/10 V 100 VA	
Prueba de vacío	Prueba de CC
127.3 V	14.7 V
3.63 A (50X)	40.33 A (50X)
268 W (50X)	0.81 A
5.36 W con P <sub>disp</sub>	592 W (50X)
5.31 W sin P <sub>disp</sub>	11.84 W
3050.67 R <sub>core</sub> ( $\Omega$ )	18.22 Z ( $\Omega$ )
0.04 I <sub>R</sub>	376.99 rad/s
3.63 I <sub>M</sub>	18.20 R <sub>disp</sub> ( $\Omega$ )
35.07 X <sub>M</sub>	0.98 X <sub>disp</sub> ( $\Omega$ )
93.03 L <sub>M</sub> (mH)	2.59 L <sub>disp</sub> (mH)

La inductancia de magnetización utilizada resultó del procedimiento mostrado en [9], para convertir la curva  $V_{rms}$  vs.  $I_{rms}$  del transformador en la característica de magnetización. Ambas curvas se muestran a continuación. La curva de voltaje contra corriente se obtuvo hasta voltajes por encima del nominal para garantizar saturación del núcleo.

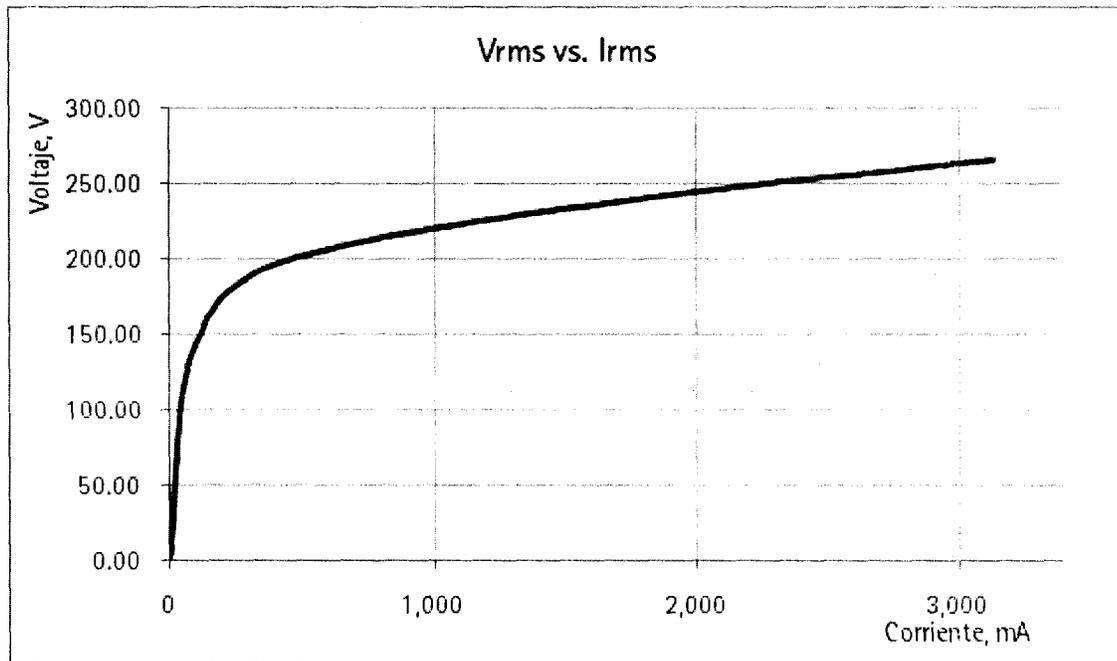


Figura C.1 Curva  $V_{rms}$  vs.  $I_{rms}$  en transformador 125 V 100 VA.

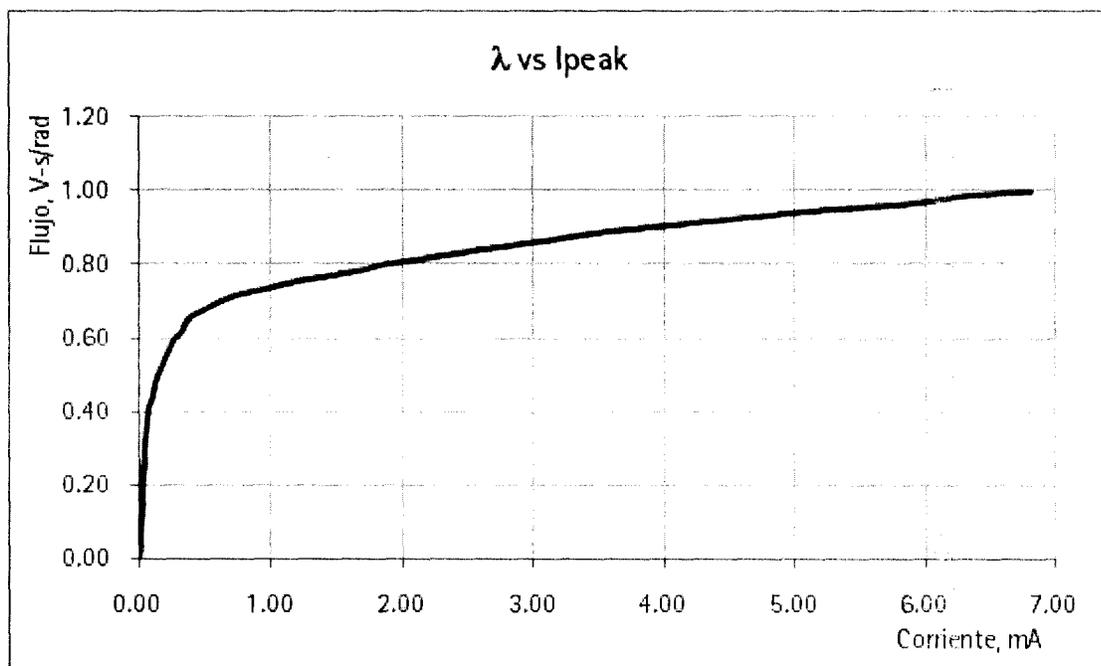


Figura C.2 Característica de magnetización de transformador 125 V 100 VA.

En Microtran se puede definir una inductancia no lineal mediante la curva de magnetización (figura C.2). Simplemente se introduce la tabulación resultante de la forma  $(I_{pico}, \lambda)$ , desde máximo negativo hasta máximo positivo simétricamente.

En sí la supresión de corriente se logra simular en Microtran debido a las propiedades de los interruptores en el software. Una de las características que se tienen que definir en el

interruptor es el margen de corriente. Cuando el margen de corriente es cero o se deja en blanco, la interrupción de corriente se efectúa en el instante natural de cruce por cero más próximo al tiempo de apertura establecido. Cuando el margen de corriente es mayor a cero la interrupción de corriente se efectúa en el instante de tiempo más próximo donde se cumpla esta condición.

El circuito propuesto para la simulación es el siguiente:

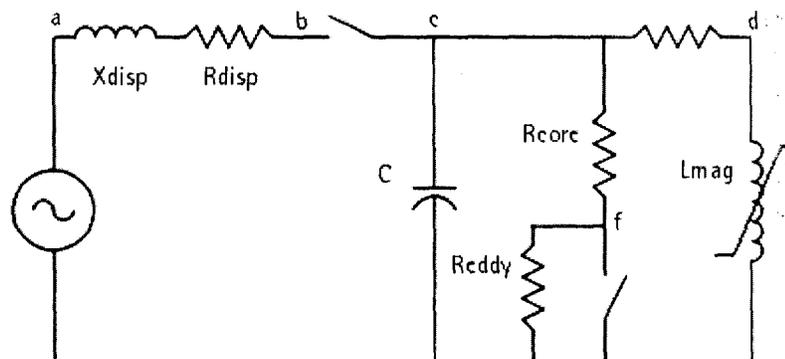


Figura C.3 Circuito propuesto utilizado para simular corte de corriente.

El desafío en el circuito fue decidir los valores para C y un ajuste para la resistencia del núcleo durante el evento transitorio. De estos dos, el que presenta mayor problema fue el ajuste de la resistencia del núcleo. Las decisiones efectuadas para la simulación son:

- La capacitancia tiene un valor muy pequeño, del orden de picofarads. Al hacer varias corridas de simulación se observa que este valor de capacitancia no afecta al sobrevoltaje en una medida importante. El valor final utilizado es de 0.5 pF.
- La resistencia del núcleo depende de la frecuencia y la densidad de flujo, y ante el evento transitorio la frecuencia aumenta. A la resistencia de ajuste se le denomina en la figura C.3 Reddy porque se ha reportado que las pérdidas de eddy son mayores que las de histéresis hasta una relación 3:1. El valor utilizado en la simulación es de 8 k $\Omega$  y fue obtenido haciendo corridas de la simulación y ajustando este valor hasta que el resultado es un voltaje similar al encontrado experimentalmente. Este valor de resistencia es válido para todos los valores de corriente que se quieran cortar para este transformador.

Entre el nodo c y d se encuentra una resistencia cuyo objetivo es crear un nuevo nodo para situar la inductancia no lineal; su valor es muy pequeño, 0.0001.

En [15] y [16] se determinan modelos dependientes de la frecuencia para modelar el núcleo. En ambos se coincide que el primer acercamiento para las pérdidas del núcleo es una resistencia lineal y que en la ocurrencia de transitorios extremadamente rápidos, la resistencia se debe despreciar. Uno de los modelos en [16] consiste en múltiples ramas de magnetización que dependiendo de la frecuencia su resistencia cambia (va aumentando) y la inductancia no lineal se mantiene la misma (sus efectos de saturación no cambian). Este acercamiento es similar al que se tomó en consideración.

La duración del evento transitorio es mayor en la simulación que en las capturas obtenidas. Esto es porque el valor de la resistencia del núcleo va cambiando conforme el transitorio se desarrolla y en esta simulación sólo se toma en cuenta un ajuste de resistencia.

El paso de la simulación fue determinado, al observar la falta de resolución del osciloscopio para registrar los eventos transitorios, igual a la resolución del osciloscopio. Esto es, un total de 2500 puntos en 6 ciclos.

El código para una de las corridas se muestra a continuación.

```

*
*
* current chopping 125V/10V 100VA Case identification card
*
* 004e-5 0100e-3 . Time card
*
* . . . . Lumped RLC branch
*      a      b      . 09.00 1.29
*      c      f      3.0e3
*      c      .      . 5e-7
*      c      d      .0001
*      f      .      8.0e3
*
* . . . . Nonlinear inductance (card 1)
* 93      d
*
* . . . . Nonlinear inductance (card 2)
*
-6.824 -0.926
-5.882 -0.895
-4.703 -0.863
-3.500 -0.823
-2.709 -0.785
-2.055 -0.753
-1.689 -0.728
-0.955 -0.681
-0.616 -0.649
-0.405 -0.614
-0.324 -0.577
-0.246 -0.542
-0.201 -0.509
-0.150 -0.472
-0.119 -0.437
-0.100 -0.405
-0.070 -0.368
-0.059 -0.337
-0.052 -0.299
-0.046 -0.269
-0.040 -0.229
-0.035 -0.195
-0.030 -0.158
-0.026 -0.126
-0.021 -0.089
-0.016 -0.055
-0.010 -0.020
-0.003 -0.002
0.003 0.002
0.010 0.020
0.016 0.055
0.021 0.089
0.026 0.126
0.030 0.158
0.035 0.195
0.040 0.229
0.046 0.269
0.052 0.299
0.059 0.337

```



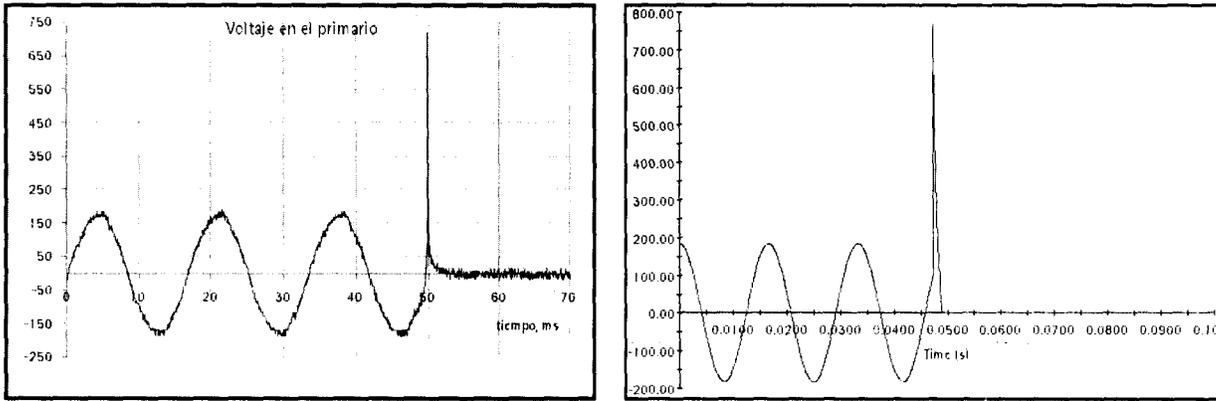


Figura C.4 Resultado experimental y simulado para un nivel de supresión de corriente de  $-0.064$  A.

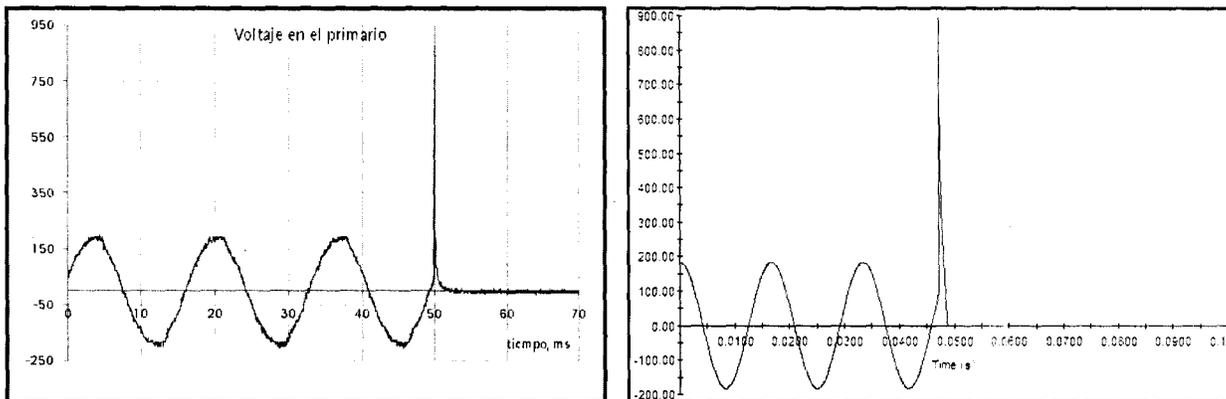


Figura C.5 Resultado experimental y simulado para un nivel de supresión de corriente de  $-0.080$  A.

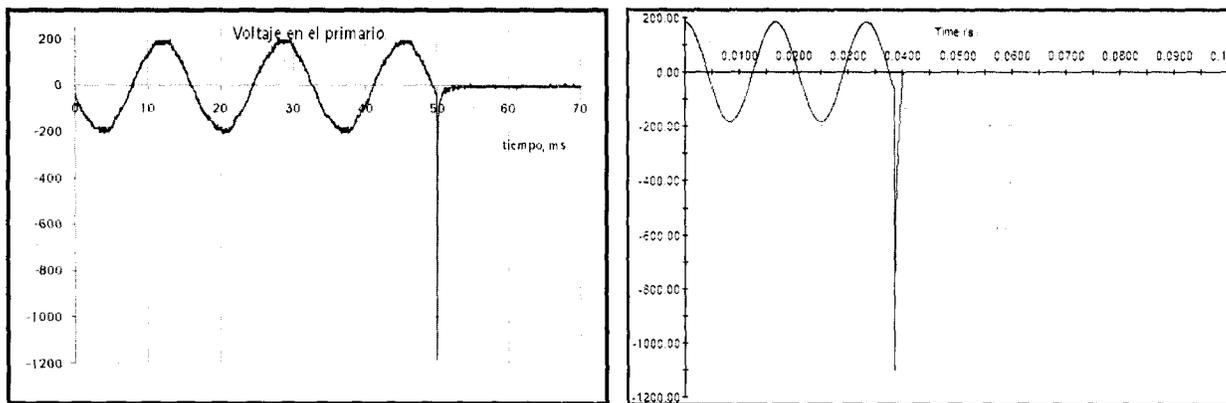


Figura C.6 Resultado experimental y simulado para un nivel de supresión de corriente de  $0.112$  A.

Los valores de la tabla C.2 que aparecen sombreados son los que no pudieron ser simulados con este modelo. En el capítulo 4 se describe esta limitación. Se muestran en las siguientes figuras, los sobrevoltajes que no pudieron ser emulados.

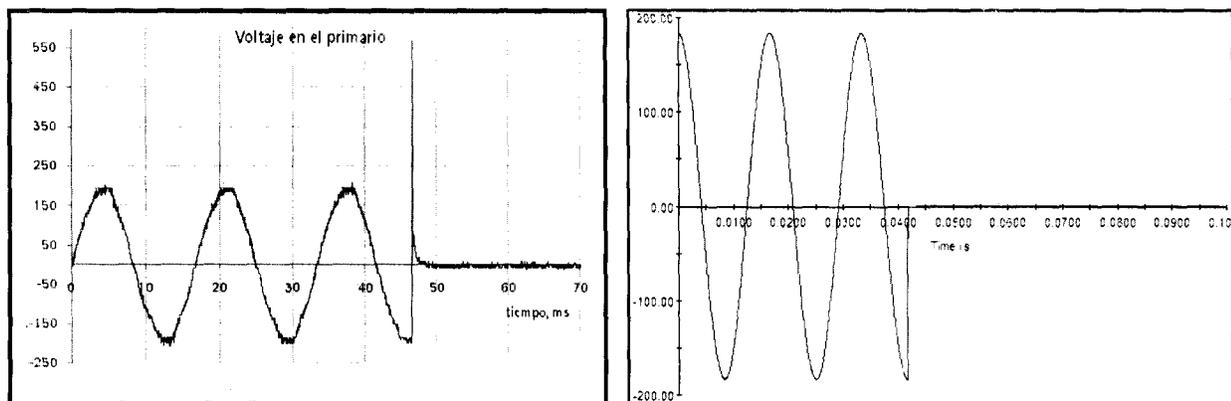


Figura C.7 Resultado fallido para un nivel de supresión de corriente de 0.056 A.

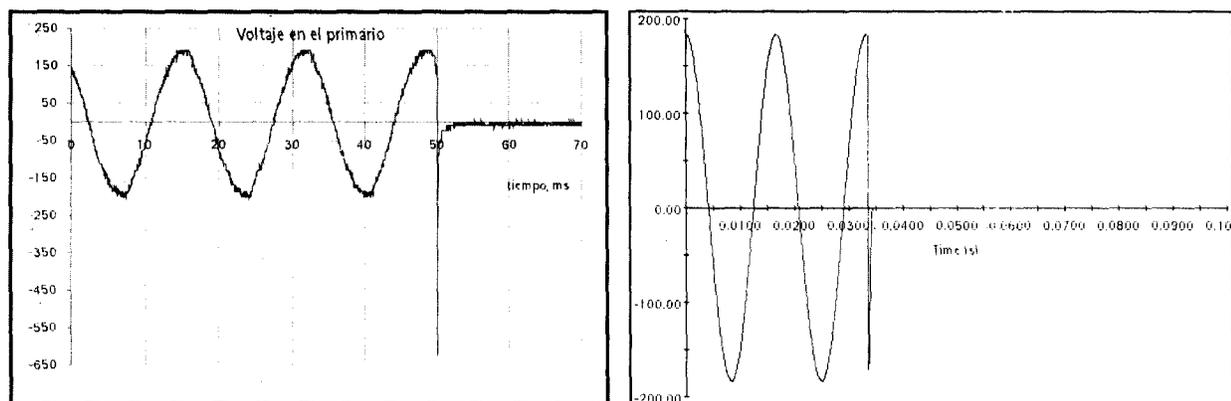


Figura C.8 Resultado fallido para un nivel de supresión de corriente de 0.080 A.

A continuación se repite la figura que aparece en el capítulo 4, como referencia, para establecer los rangos en los que se puede generar supresión de corriente. También con esta figura se puede conocer la pendiente de la corriente cortada de las figuras anteriores y de la tabla C2.

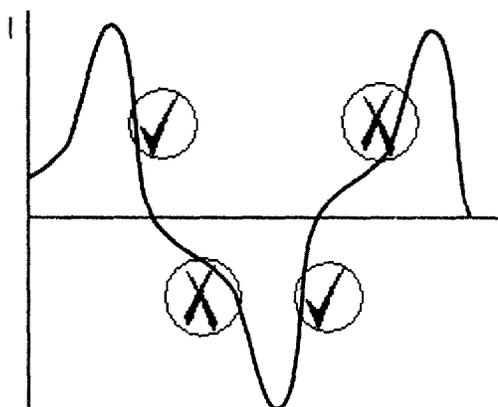


Figura C.9 Zonas en las que se puede simular adecuadamente corte de corriente en Microtran.

## Ferromresonancia

Las pruebas realizadas en el transformador utilizado en ferromresonancia se resumen en la tabla C.1. Ambas pruebas fueron realizadas en el primario.

Tabla C.3 Pruebas de corto circuito y circuito abierto al transformador utilizado en ferromresonancia.

Transformador 127 V/36 V 50 VA	
Prueba de vacío	Prueba de CC
127.8 V	14.56 V
141.4 A (4X)	1.471 A (4X)
6.4 W (4X)	0.37 A
1.600 W con $P_{disp}$	20.9 W (4X)
1.598 W sin $P_{disp}$	0.418 W
10220.4 $R_{core}$ ( $\Omega$ )	39.59 Z ( $\Omega$ )
0.01 $I_R$	376.99 rad/s
141.40 $I_M$	3.09 $R_{disp}$ ( $\Omega$ )
0.90 $X_M$	39.47 $X_{disp}$ ( $\Omega$ )
2.40 $L_M$ (mH)	104.70 $L_{disp}$ (mH)

La inductancia de magnetización utilizada se obtuvo de la misma manera que en la simulación de supresión de corriente. La curva  $V_{rms}$  vs.  $I_{rms}$  y la curva de magnetización se muestran a continuación para el transformador utilizado para reproducir ferromresonancia. La curva de voltaje contra corriente se obtuvo hasta voltajes por encima del nominal para garantizar la saturación del núcleo.

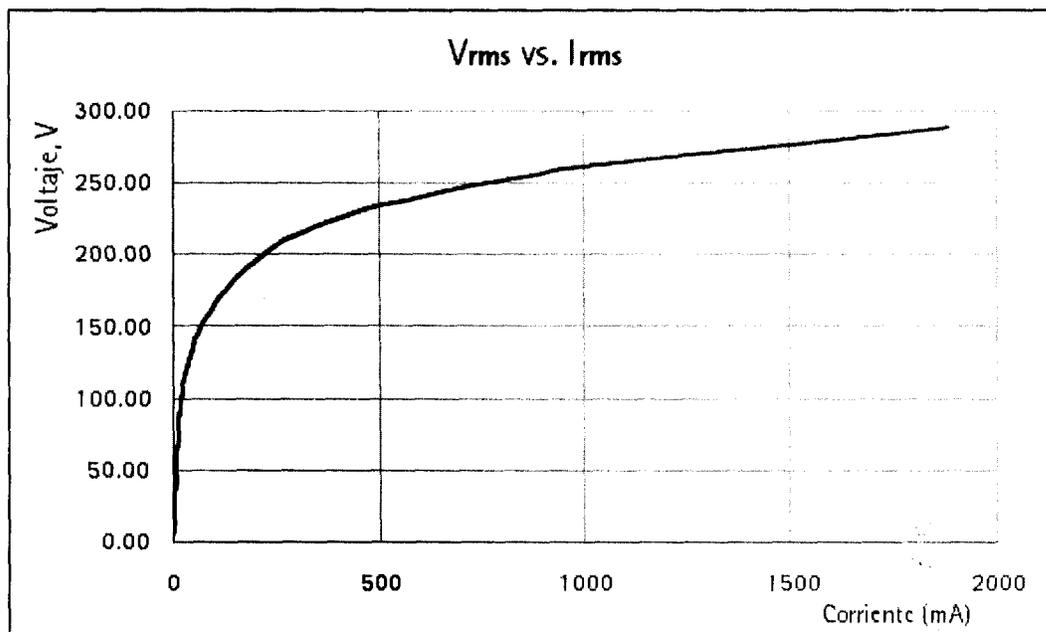


Figura C.10 Curva  $V_{rms}$  vs.  $I_{rms}$  en transformador 127 V 50 VA.

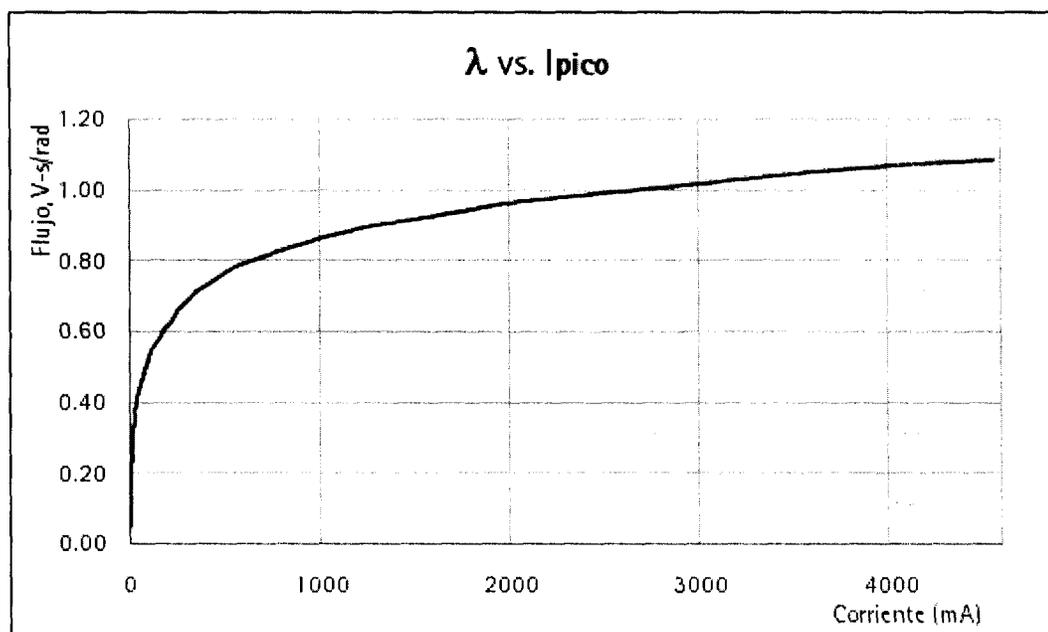


Figura C.11 Característica de magnetización en transformador 127 V 50 VA.

La simulación en Microtran de la ferorresonancia no tiene mayores complicaciones. Los factores más importantes son: la característica de magnetización y el valor de la capacitancia de la línea.

El valor del voltaje de alimentación tiene cierto límite, ya que la característica de magnetización se introdujo punto por punto, por lo que elevarlo por encima de este valor provoca que el programa termine en error. Esto hace que no se pueda manipular mucho el valor del capacitor que representa la capacitancia de la línea.

El circuito equivalente para la simulación en Microtran es más sencillo que en el caso de supresión de corriente.

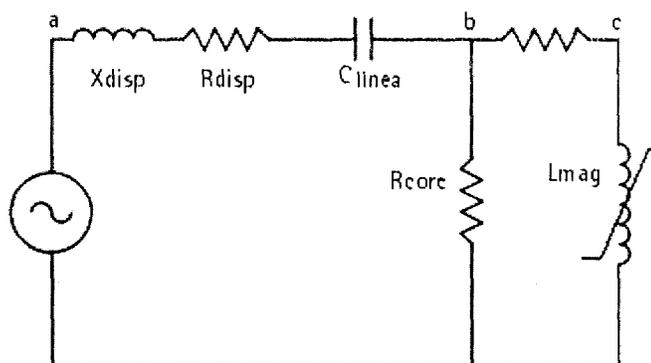


Figura C.12 Circuito equivalente para simulación de ferorresonancia.



```

0.108 0.530
0.141 0.564
0.180 0.605
0.233 0.639
0.298 0.682
0.362 0.717
0.469 0.754
0.576 0.789
0.788 0.827
1.023 0.868
1.279 0.903
1.747 0.940
2.157 0.976
3.005 1.021
3.594 1.053
4.562 1.087
9999999.
$ = = End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = =
*
$ = = = End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = =
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 a . . . . . 121.0 . . . . . 60 . . . . . 000 . . . . . -1 . . . . . 1
$ = = = End of level 3: Sources = = = = =
*
1 **** All voltages will be printed ****
$ = = = Level 5: End of data case = = = = =

```

Los resultados de la simulación se muestran a continuación (son mostrados también en el capítulo 5).

Ferromresonancia en transformador 127V/ 36V CT 50VA

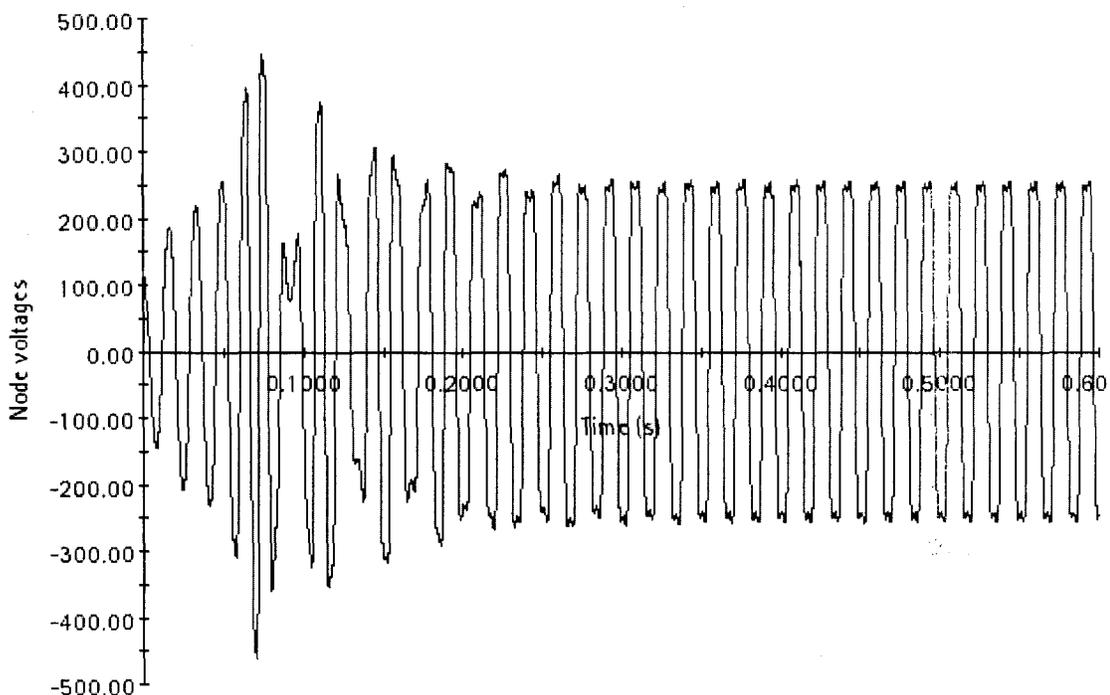


Figura C.13 Energización del transformador y brinco a ferromresonancia.

Ferroresonancia en transformador 127V/ 36V CT 50VA

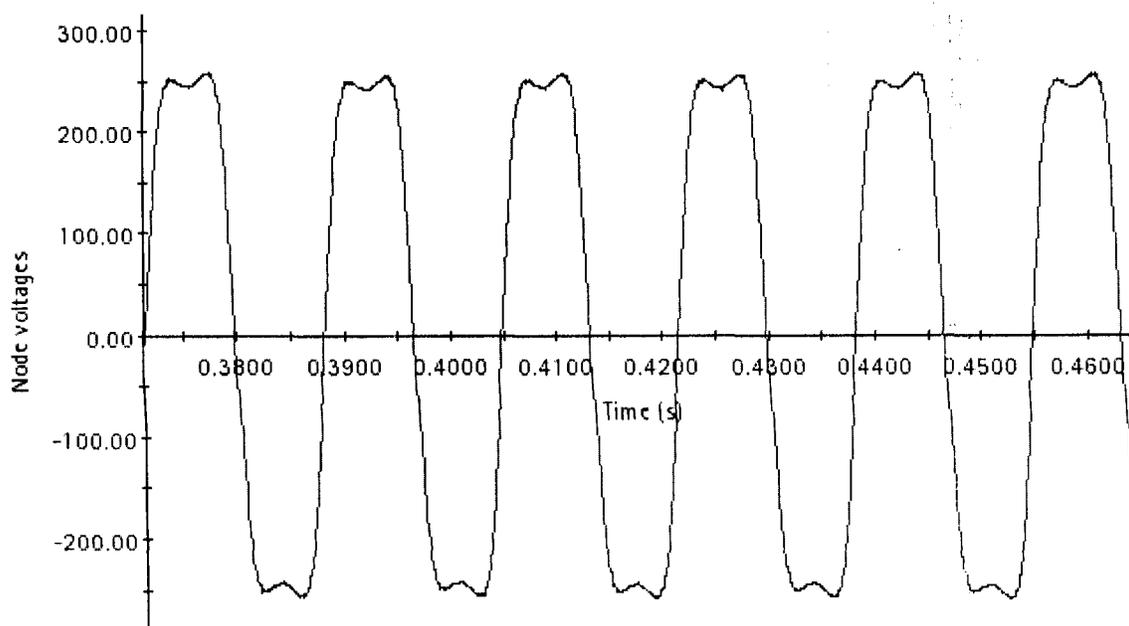


Figura C.14 Voltaje sostenido en el transformador durante ferroresonancia.

Ferroresonancia en transformador 127V/ 36V CT 50VA

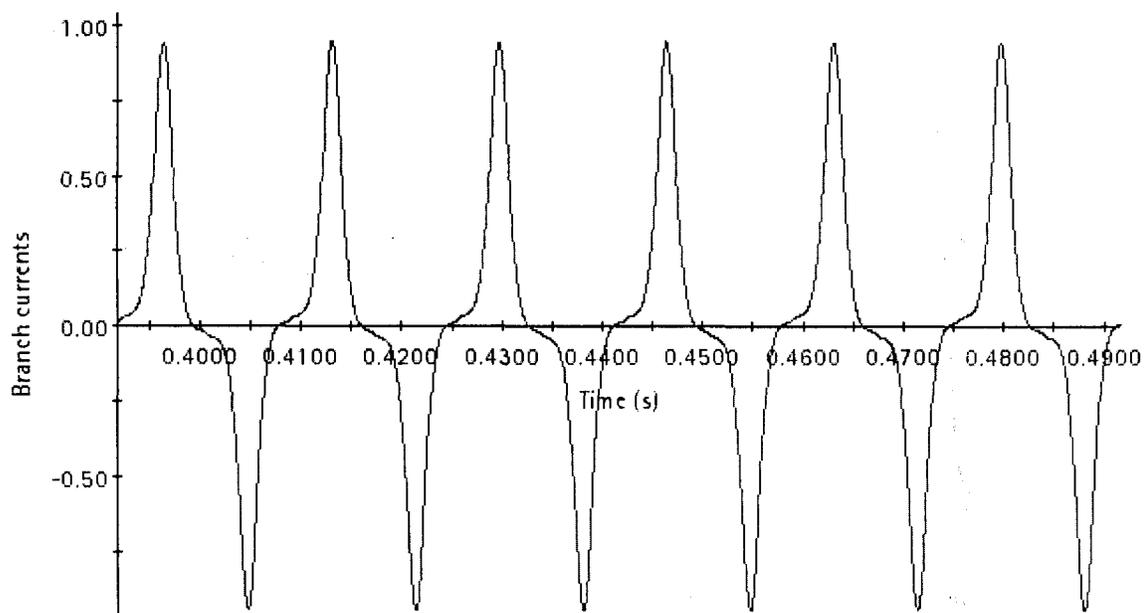


Figura C.15 Corriente de línea durante ferroresonancia

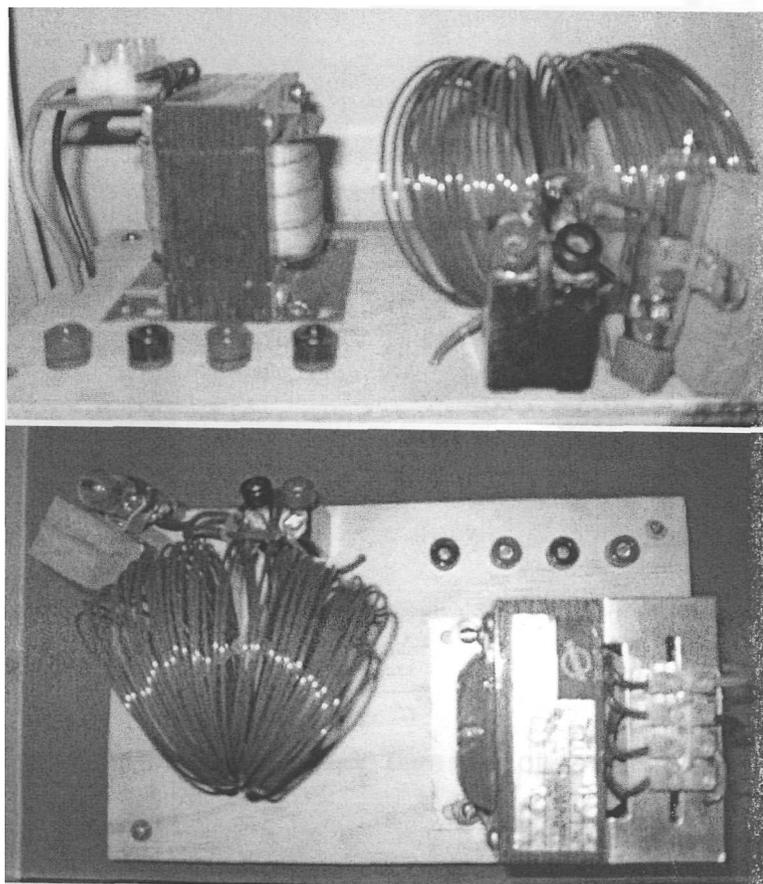
Incrementos en el voltaje de la fuente no incrementan en gran medida el sobrevoltaje en el transformador. El límite de incremento lo marca la curva de magnetización, llega un punto donde no encuentra solución. Lo mismo sucede para incrementos en el valor de la capacitancia.

## ANEXO

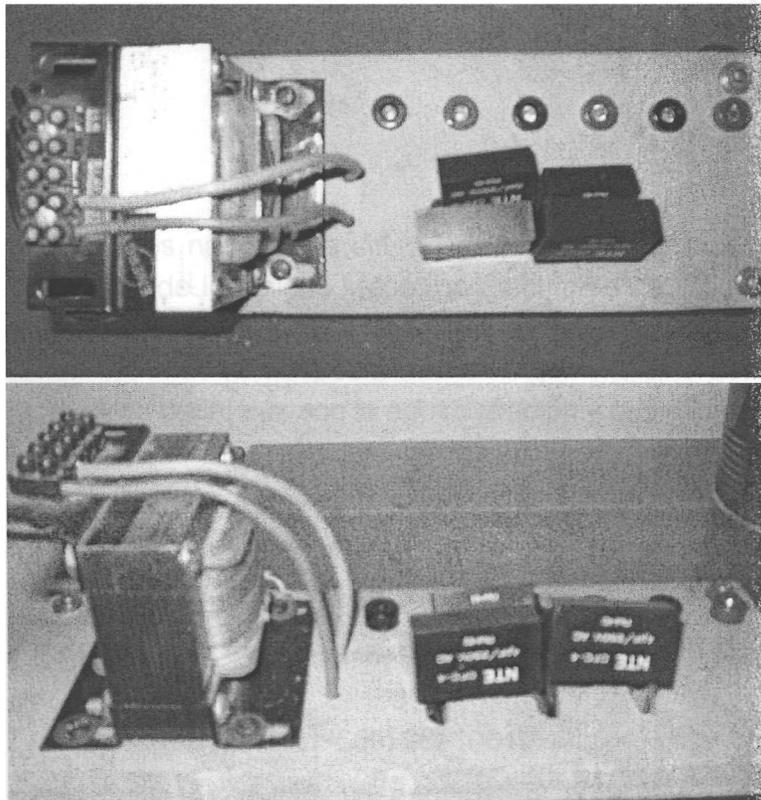
## D

Imágenes de los circuitos  
construidos y equipo de medición.

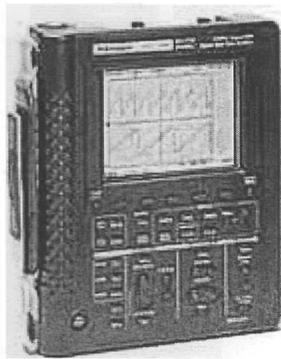
A continuación se muestran las imágenes del equipo de medición utilizado y los circuitos  
construidos para la elaboración de la tesis.



Circuito construido para reproducir corte de corriente



Circuito construido para reproducir ferrorresonancia.



THS720P



Fluke 434

Equipo de medición utilizado para la captura de transitorios

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey



**30002007187800**

<http://biblioteca.mty.itesm.mx>