



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Análisis de ferorresonancia en transformadores de distribución
alimentados con cable monopolar apantallado

Marco Fabio Gudiel Sandoval
Asesorado por Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, octubre de 2004.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA EN TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN ALIMENTADOS CON CABLE MONOPOLAR APANTALLADO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MARCO FABIO GUDIEL SANDOVAL

ASESORADO POR ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2004.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

Análisis de ferorrresonancia en transformadores de distribución alimentados con cable monopolar apantallado

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 23 de septiembre de 2003.

Marco Fabio Gudiel Sandoval

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazmida Vaides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares
EXAMINADOR	Ing. Marvin Hernández
EXAMINADOR	Ing. Edgar Florencio Montúfar Urizar
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

ACTO QUE DEDIDO

A:

- DIOS
- MIS PADRES Raymundo Gudiel Gómez
 Rosalina Sandoval de Gudiel
- MIS HERMANOS Luis Fernando Gudiel Sandoval
 Mónica Beatriz Gudiel Sandoval
- MI FAMILIA EN GENERAL
- MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS
- MIS MAESTROS
- LA FACULTAD DE INGENIERÍA
- LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
- Y A USTED Por leer este trabajo

AGRADECIMIENTO

A:

- DIOS Por darme la vida, por iluminarme, y poder así alcanzar esta meta.
- MIS PADRES Por creer en mí y apoyarme en todo momento
- MIS HERMANOS Por brindarme su apoyo
- MIS MAESTROS Por brindarme sus conocimientos
- Mis amigos y compañeros de estudio
- Todas aquellas personas que en una u otra forma me brindaron su ayuda.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1 PARÁMETROS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEO.....	1
1.1 Parámetro de los transformadores	3
1.1.1 El transformador como elemento no lineal.....	3
1.1.2 Reactancias del transformador y circuito equivalente.....	9
1.1.3 Circuito equivalente del transformador en vacío.....	12
1.1.4 Determinación de la reactancia de magnetización.....	13
1.1.4.1. Pruebas en vacío de transformadores.....	14
1.1.4.2. Curva de magnetización para obtener reactancia de magnetización.....	15
1.2 Parámetros de los cables subterráneos.....	16
1.2.1 Características y constitución de los cables monopoles	16
1.2.1.1. El conductor.....	17
1.2.1.2. Pantallas semiconductoras.....	17
1.2.1.3. Aislamiento primario.....	18
1.2.1.4. Pantalla metálica.....	18
1.2.2 Campo eléctrico de los cables subterráneos monopoles.....	18
1.2.3 Reactancias del cable y circuito equivalente.....	19

1.2.4	Determinación de la capacitancia del cable.....	21
1.3	Representación del sistema subterráneo como un sistema cable-transformador.....	23
1.3.1	Diagrama unifilar.....	24
1.3.2	Circuito de representación cable-transformador	25
2	FERRORRESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	27
2.1	Ferorresonancia.....	27
2.1.1	El circuito RLC-serie lineal	27
2.1.2	El circuito LC-serie no lineal.....	31
2.2	Modelos de ferorresonancia en sistemas de distribución.....	37
2.2.1	Modelos de ferorresonancia en sistemas monofásicos....	38
2.2.2	Modelos de ferorresonancia en sistemas trifásicos.....	39
2.3	Efectos de la ferorresonancia.....	42
2.3.1	Fallas y daños en los pararrayos	42
2.3.2	Distorsión de las formas de onda de los voltajes y las corrientes.....	44
2.3.3	Sobrecalentamiento en el núcleo de los transformadores.....	46
2.3.4	Calentamiento en partes metálicas de los transformadores.....	47
2.3.5	Ruido audible.....	48
2.3.6	Pérdidas en los conductores de potencia.....	48
2.3.7	Aumento en los esfuerzos eléctricos en las terminaciones de los cables de potencia.....	49

3	MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA FERRORESONANCIA.....	51
3.1	Análisis de ferrorresonancia en circuitos monofásicos.....	51
3.1.1	Ejemplo de cálculo.....	54
3.1.2	Solución.....	54
3.2	Análisis de ferrorresonancia en circuitos trifásicos.....	58
3.2.1	Caso I. Una línea abierta, transformadores en conexión delta.....	58
3.2.2	Caso II. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión delta.....	63
3.2.3	Caso III. Una línea abierta, transformadores en conexión estrella.....	65
3.2.4	Caso IV. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.....	68
3.3	Análisis cualitativo del transitorio de la ferrorresonancia	71
4	MITIGACIÓN DE LA FERRORESONANCIA.....	81
4.1	Parámetros de alteración.....	81
4.1.1	Reactancia de magnetización de los transformadores.....	82
4.1.2	Reactancia capacitiva de los cables de alimentación.....	82
4.1.3	Resistencia.....	82
4.2	Cálculo de la longitud crítica de los cables de alimentación.....	83
4.3	Conexiones que evitan la aparición de la ferrorresonancia	85
4.3.1	Conexiones que utilicen estrella aterrizada en el circuito primario.....	86
4.3.1.1.	Desventajas de la conexión estrella aterrizada – delta abierta.....	88

4.3.1.2.	Conexión temporal a tierra del punto estrella.....	89
4.4	Conexión estrella abierta aterrizada – delta abierta.....	90
4.5	Recomendaciones para la realización de maniobras de switcheo.....	91
4.5.1	Aplicación de dispositivos de seccionamiento tripolar.....	91
4.5.2	Seccionamiento monopolar lo más cercano al banco de transformadores.....	93
4.6	Carga resistiva en el secundario de los transformadores.....	94
4.7	Transformadores de aterrizaje.....	97
5	CASO DE ESTUDIO. ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE LA FERRORESONANCIA EN EL SISTEMA SUBTERRÁNEO DE INTECAP, STA. LUCÍA COTZUMALGUAPA.....	99
5.1	Sistema subterráneo del centro de Capacitación –INTECAP-.....	99
5.1.1	Componentes principales del sistema subterráneo.....	99
5.2	Descripción del suceso.....	102
5.2.1	Descripción de los daños ocasionados.....	102
5.3	Análisis de la ferorrresonancia en el sistema subterráneo	106
5.3.1	Cálculo de la capacitancia total de los cables.....	106
5.3.2	Modelo de ferorrresonancia del caso de estudio.....	107
5.3.3	Modelación matemática de la ferorrresonancia para el caso de estudio.....	108
5.3.4	Explicación de los daños ocasionados.....	110
5.4	Recomendaciones para evitar la aparición de la ferorrresonancia.....	112

CONCLUSIONES.....	115
RECOMENDACIONES.....	117
BIBLIOGRAFÍA.....	119
APÉNDICES.....	121
ANEXOS.....	131

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sistema de distribución subterráneo.....	1
2.	Toma de alimentación de una línea aérea en media tensión para un sistema de distribución subterráneo.....	2
3.	Característica de magnetización de algunos materiales.....	4
4.	Curva B-H y lazo de histéresis.....	5
5.	Curva de magnetización $\Phi - I$ de los transformadores.....	6
6.	Obtención de la forma de onda de la corriente de excitación en un transformador, a partir de la onda de flujo magnético y la curva de magnetización.....	8
7.	Flujos que interactúan en el transformador.....	10
8.	Circuito equivalente del transformador real.....	11
9.	Circuito equivalente del transformador real, con reactancias en el lado del primario.....	12
10.	Circuito equivalente del transformador en vacío.....	13
11.	Esquema para realizar las pruebas en vacío y determinar X_m	14
12.	Utilización de la curva de magnetización, para determinar el valor de la reactancia de magnetización.....	15
13.	Vista transversal de un conductor para voltaje en media tensión.....	17
14.	Campo eléctrico en un conductor de potencia.....	19
15.	Circuito equivalente propuesto para representar la línea de alimentación.....	20

16.	Circuito equivalente a una fase de la línea de alimentación subterránea.....	21
17.	Diagrama unifilar del sistema de distribución subterráneo típico.....	24
18.	Circuito de representación general del sistema de distribución subterráneo con transformadores en conexión estrella/delta.....	25
19.	Circuito RLC-serie.....	28
20.	Solución gráfica de un circuito LC lineal.....	30
21.	Corriente de un circuito serie RLC en función de X_L	31
22.	Circuito LC serie no lineal.....	32
23.	Método gráfico para analizar el circuito LC no lineal.....	33
24.	Efecto del aumento de capacitancia en el circuito.....	34
25.	Diagramas fasoriales para los puntos de operación de la componente fundamental del circuito LC serie no lineal.....	35
26.	Efecto de aumentar la magnitud de voltaje de la fuente.....	36
27.	Caso monofásico. Una línea abierta, transformador monofásico conectado a dos fases.....	38
28.	Caso I. Una línea abierta, transformadores en conexión delta.....	40
29.	Caso II. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión delta.....	40
30.	Caso II. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión delta.....	41
31.	Caso IV. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.....	41
32.	Curva típica de capacidad de operación en sobrevoltajes para pararrayos de distribución.....	43
33.	Forma de onda de la corriente del sistema, en el momento de ocurrir ferrorresonancia.....	44
34.	Forma de onda del voltaje del transformador, en el momento de ocurrir ferrorresonancia.....	45
35.	Forma de onda del voltaje en la capacitancia, en el momento de ocurrir ferrorresonancia.....	45
36.	Corrientes parásitas en el núcleo de los transformadores.....	46

37.	Campos eléctricos en los cables de potencia.....	49
38.	Reorientación de las líneas de campo eléctrico en las terminaciones del cable de potencia.....	50
39.	Circuito equivalente del sistema de distribución monofásico en situación de línea abierta.....	52
40.	Curva de magnetización.....	54
41.	Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a la relación X_{c1}/X_m para el ejemplo.....	57
42.	Circuito simplificado de trayectorias LC para el caso I.....	59
43.	Uso de superposición para calcular V_{CN} , a partir de las componentes de voltajes de las fuentes.....	60
44.	Circuito simplificado para el caso I, utilizando sólo las componentes fundamentales de las fuentes de alimentación.....	61
45.	Circuito simplificado para resolver el caso II.....	63
46.	Circuito de las trayectorias LC para el caso III.....	65
47.	Circuito equivalente simplificado para el análisis del caso III.....	66
48.	Circuito equivalente del sistema de distribución, que muestra dos trayectorias LC hacia tierra.....	69
49.	Circuito equivalente simplificado para el caso IV.....	69
50.	Circuito básico para estudiar el transitorio de ferorresonancia.....	72
51.	Respuesta transitoria del circuito LC serie no lineal.....	76
52.	Respuesta de estado estable en ferorresonancia.....	78
53.	Circuito RLC-no lineal.....	83
54.	Una línea abierta, transformadores en conexión estrella aterrizada.....	86
55.	Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella aterrizada.....	87
56.	Conexión temporal a tierra del punto estrella del banco de transformadores.....	89
57.	Una línea abierta, transformadores en conexión estrella abierta aterrizada	90

58.	Representación del sistema de distribución, con la utilización de interruptores tripolares.....	92
59.	Utilización de seccionadores en las terminales del banco de transformadores.....	93
60.	Instalación del equipo de protección y/o switcheo, con base en la longitud crítica del cable de potencia.....	94
61.	Sistema de distribución monofásico en condición de línea abierta, con carga resistiva en el secundario del transformador.....	95
62.	Circuito equivalente de impedancias del sistema de distribución, visto desde el lado primario.....	96
63.	Transformador de aterrizaje en zig-zag.....	97
64.	Utilización de transformadores de aterrizaje, para eliminar la ferorresonancia.....	98
65.	Diagrama unifilar del sistema de distribución subterráneo del Centro de Capacitación -INTECAP- de Santa Lucía Cotzumalguapa.....	101
66.	Daños ocasionados en el transformador No. 4.....	103
67.	Daños ocasionados en los pararrayos del transformador No. 4.....	104
68.	Pararrayo No. 2.....	105
69.	Pararrayo No. 3.....	105
70.	Caso de estudio. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.....	108
71.	Circuito simplificado para el caso de estudio.....	109
72.	Daños ocurridos en los pararrayos y fusible principal.....	111
73.	Recomendaciones para evitar la ferorresonancia en el sistema subterráneo del Centro de Capacitación –INTECAP-.....	113
74.	Curva de magnetización B-H típica para núcleos de transformadores de distribución.....	121
75.	Curva de magnetización V-I típica para devanados de 7.6 KV en transformadores de distribución.....	122

76.	Curva de magnetización V-I típica para devanados de 13.2 KV en transformadores de distribución.....	123
77.	Representación general de un conductor cilíndrico.....	125
78.	Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso.....	127
79.	Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 2.....	128
80.	Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 3.....	129
81.	Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 4.....	130

TABLAS

I.	Resultados para el ejemplo.....	56
II.	Cálculo de capacitancias.....	125

GLOSARIO

Cable monopolar apantallado	Es un cable de potencia utilizado para tensiones mayores a un kilovoltio, con apantallamiento eléctrico y que posee un solo conductor principal.
Curva de magnetización	Es una curva que describe el comportamiento de magnetización de los materiales ferromagnéticos.
Ferromagnética	Es un caso especial de la resonancia serie, cuando ésta envuelve a capacitancias en serie con inductancias saturables
Inductancias saturables	Son inductancias que poseen características de magnetización de los materiales ferromagnéticos.
Línea abierta	Es el término que indica situaciones del sistema de distribución, en donde una línea de alimentación no tiene continuidad de servicio debido a una desconexión.
Magnetostricción	Es el cambio en la longitud de los materiales ferromagnéticos, cuando están sujetos a un campo magnético.

Resonancia serie Es el fenómeno que se produce en un circuito serie, cuando la reactancia inductiva y capacitiva poseen igual magnitud y la impedancia del circuito es igual a la resistencia equivalente del mismo.

Saturación Región de operación de los materiales ferromagnéticos, en donde a pequeños aumentos de la densidad de flujo magnético producen aumentos considerables en la intensidad de campo magnético.

RESUMEN

Capítulo I: se estudia el sistema de distribución como un sistema cable-transformador, tomando al transformador como un elemento no lineal del sistema, con características determinadas en la curva de magnetización del mismo y al cable de potencia como una capacitancia en paralelo en función de la longitud.

Capítulo II: se plantean principios para comprender la ferorrresonancia, con base en el circuito LC lineal y no lineal, asimismo, las configuraciones del sistema de distribución en las que aparece ferorrresonancia y ésta como causante de sobrevoltajes, calentamiento, ruido y producción de armónicas, fallas en los pararrayos y aumento en los esfuerzos eléctricos en las terminaciones de los cables.

Capítulo III: se analiza matemáticamente la ferorrresonancia en el sistema de distribución por medio del análisis de circuitos con inductancias saturables, y llegar con ello a obtener procedimientos prácticos para modelar el comportamiento del voltaje de línea abierta, en función de la relación X_{c1}/X_m . También se da un análisis cualitativo del transitorio de la ferorrresonancia.

Capítulo IV: se describen varias formas de mitigar o eliminar la ferorrresonancia en el sistema de distribución, partiendo de condiciones que éste debe tener para que se presente el fenómeno, teniendo muy en cuenta la longitud de los cables de alimentación, conexión de los transformadores y maniobras de switcheo.

Capítulo V: se muestra un caso específico en el cual la ferorresonancia ocasionó efectos claramente observables. Asimismo se analizan las condiciones que ocasionaron el aparecimiento del mismo, y se dan las recomendaciones de eliminación del fenómeno.

OBJETIVOS

General

Determinar las condiciones en las cuales se presenta la ferorrresonancia, en transformadores de distribución, cuando son alimentados por cable monopolar apantallado.

Específicos

1. Identificar los parámetros eléctricos y físicos, que inciden en la aparición de la ferorrresonancia en transformadores de distribución conectados con cable monopolar apantallado.
2. Analizar el fenómeno de la ferorrresonancia, como causante de sobrevoltajes en transformadores de distribución conectados con cable monopolar apantallado.
3. Establecer las formas de modelación matemática del fenómeno en un sistema cable-transformador.
4. Obtener condiciones reales de operación de transformadores bajo ferro-resonancia y validar el análisis matemático
5. Determinar las medidas que se deben tomar, para evitar sobrevoltajes por ferorrresonancia en transformadores de distribución conectados con cable monopolar apantallado.

INTRODUCCIÓN

Actualmente es muy común en las áreas más congestionadas de las ciudades, como centros comerciales, hospitales, industrias, colegios, etc., encontrar sistemas de distribución subterránea en media tensión, que se caracterizan principalmente por una acometida con cables de potencia para uso subterráneo, que alimentan comúnmente a un banco de transformadores de distribución.

Bajo ciertas condiciones especiales, la configuración del sistema de distribución, la manera en que esté operando, así como las características de los equipos instalados, pueden ser causa considerable de sobrevoltajes e irregularidad en la continuidad del servicio.

Esto resulta como producto de la resonancia producida por la capacitancia distribuida asociada a los cables de alimentación y la inductancia de los transformadores. Esta resonancia tiene su particularidad de interactuar con inductancias con núcleos ferromagnéticos, saturables y no lineales, debido a las características de magnetización de los transformadores, por lo que el término que describe mejor al fenómeno es ferorresonancia.

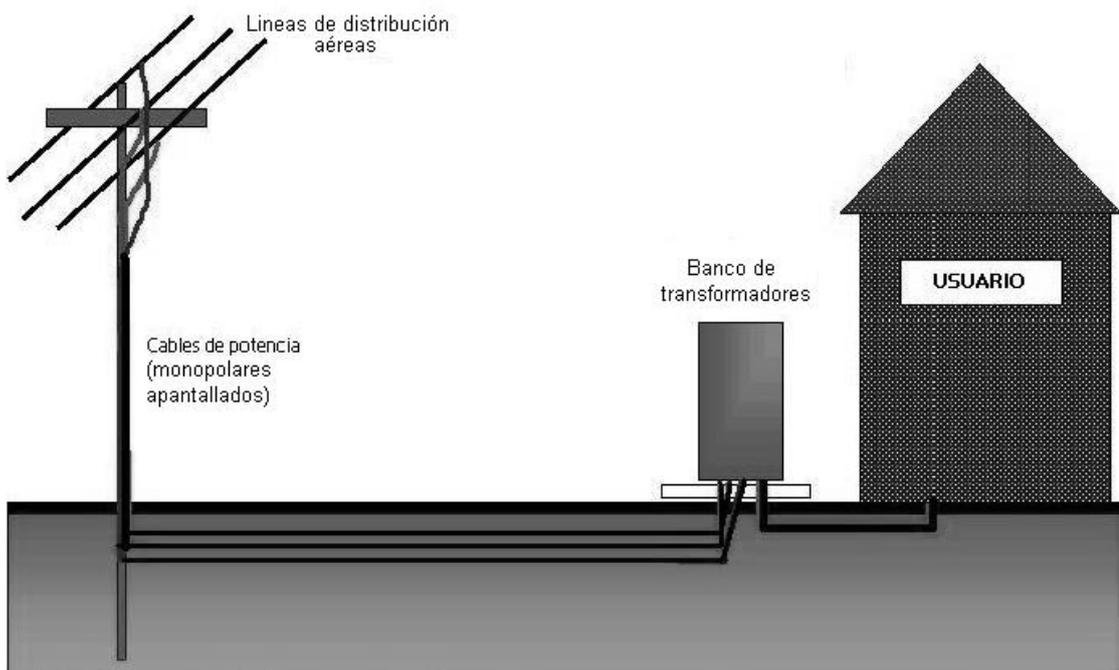
En el presente estudio, se analizará en detalle el fenómeno de la ferorresonancia en transformadores de distribución, cuando éstos son alimentados con cables monopoles apantallados, sus efectos, las condiciones del sistema necesarias para que se presente el fenómeno, análisis matemáticos de modelación y los distintos métodos de mitigación del mismo.

1 PARÁMETROS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEO

Actualmente son muy utilizados los sistemas de distribución subterráneos, especialmente en las áreas más congestionadas de las ciudades, como en centros comerciales, hospitales, colegios, universidades, etc., en zonas extendidas con altas densidades de carga (15 a 20 MVA/km²) y crecimiento. Se usan por estética y confiabilidad.

Estos sistemas están básicamente formados por una estructura radial, en donde la alimentación sale comúnmente desde una red de distribución aérea, por medio de cables troncales, de donde se deriva la alimentación para uno o más bancos de transformadores, como se muestra en la figura 1.

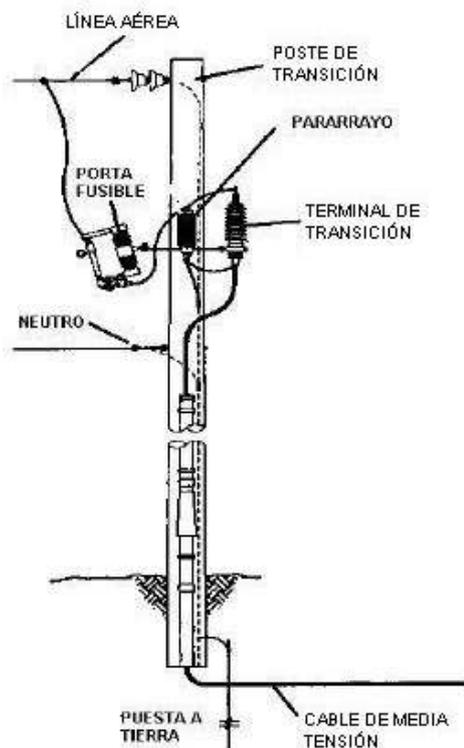
Figura 1. Sistema de distribución subterráneo



Los cables de alimentación del sistema deben poseer un aislamiento que soporte el voltaje de servicio y una pantalla metálica, la cual debe de ir solidamente aterrizada. La selección del cable deber ser uniforme, es decir, la misma para los troncales y los ramales.

Los bancos de transformadores pueden estar conformados por unidades monofásicas en conexiones trifásicas o unidades puramente trifásicas. Los transformadores de distribución típicamente utilizados en Guatemala son sumergidos en aceite, diseñados específicamente para dar servicio a cargas residenciales, cargas comerciales ligeras, alumbrado industrial y diversas aplicaciones de potencia.

Figura 2. Toma de alimentación de una línea aérea en media tensión para un sistema de distribución subterráneo.



El sistema de distribución está protegido comúnmente por fusibles colocados en el poste de donde se toma la alimentación, como se puede ver en la figura 2. El portafusible en estos casos funciona como seccionador, y es utilizado para las maniobras de energización y desenergización del sistema de distribución. Asimismo están protegidos por pararrayos, que se colocan cercanos a las terminales de los transformadores

Para analizar el comportamiento del sistema de distribución, respecto a sus voltajes y corrientes, es conveniente y necesario utilizar un circuito equivalente del mismo que lo represente como un sistema cable-transformador, conformado por los parámetros, tanto del cable como del transformador.

1.1 Parámetro de los transformadores

1.1.1 El Transformador como elemento no lineal

Los transformadores utilizan materiales ferromagnéticos, los cuales se caracterizan por tener grandes valores de permeabilidad magnética. Así cuando estos materiales forman parte de un circuito magnético, las líneas de flujo magnético tienden a concentrarse dentro del material ferromagnético. Estos materiales, además, presentan la característica en donde la intensidad del campo magnético **H** y la densidad de flujo magnética **B** no es una relación lineal, por lo que:

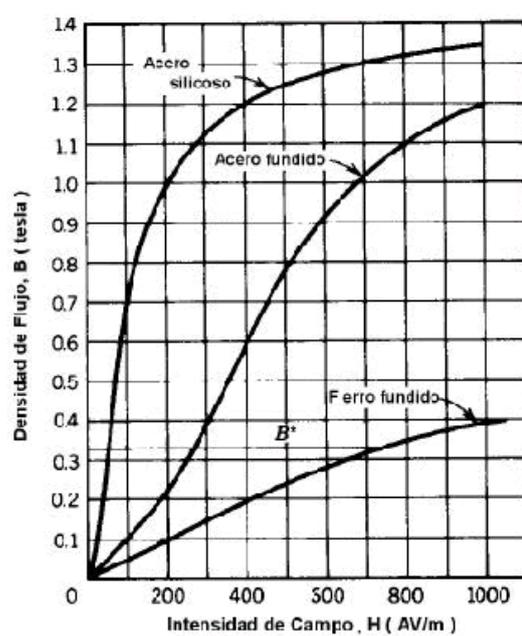
$$B \neq \mu \cdot H$$

Siendo μ la permeabilidad magnética.

Los materiales ferromagnéticos comprenden regiones (dominios magnéticos) y, dentro de estas regiones, los momentos bipolares magnéticos se ordenan en una dirección común. Sin embargo, en una muestra no magnetizada de materiales ferromagnéticos, las orientaciones de los dominios son aleatorias, de modo que la muestra no presenta un momento bipolar magnético neto.

Si el material se encuentra en un principio no magnetizado y si la corriente que se suministra a la bobina comienza de cero a cierto valor máximo, los dominios magnéticos tienden a alinearse con la dirección del campo aplicado.

Figura 3. Característica de magnetización de algunos materiales



Fuente: Rodríguez José. **Sistemas Electromecánicos**. pp. 4

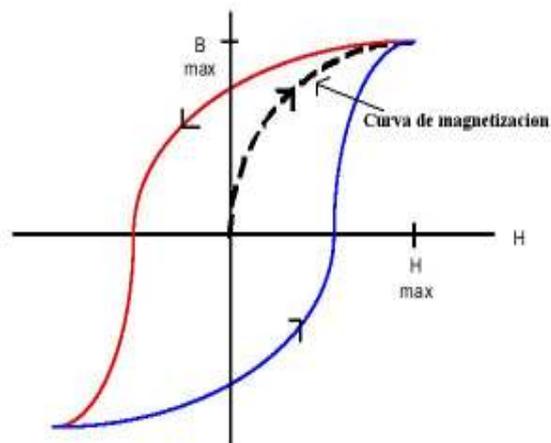
Las curvas de la figura 3 se conocen como “curvas de magnetización”. Al aumentar el campo magnético desde cero, la pendiente de la curva es relativamente abrupta.

Conforme el campo magnético sigue creciendo dentro del material ferromagnético (o sea mientras la corriente va aumentando), se dificulta cada vez más la alineación de los dominios magnéticos restantes con el campo magnético aplicado y la curva de magnetización inicial se alisa.

La pendiente de la curva disminuye en forma abrupta y se dice que el material ferromagnético se encuentra en saturación. Una vez que esto sucede, aumentos posteriores de la intensidad del campo magnéticos producen cambios relativamente pequeños en la densidad de flujo magnético.

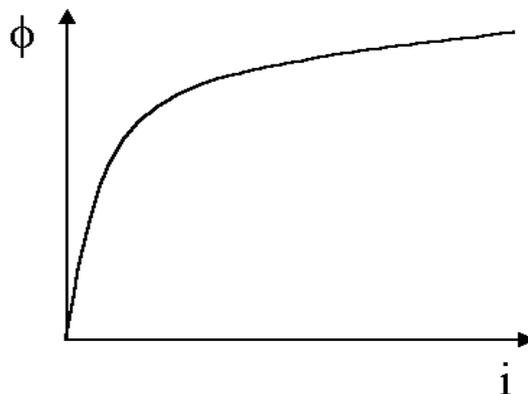
Una vez que se ha alcanzado el máximo campo magnético (H_{max}), si se disminuye la corriente, tanto H como B comienzan a disminuir desde sus valores máximos. Pero en vez de recorrer de nuevo la curva de magnetización inicial, la variación de B , respecto a H forma una nueva curva. En donde los momentos de los dipolos magnéticos no tendrán ya su orientación al azar, y retendrán una componente neta de magnetización a lo largo de la dirección del campo aplicado. Este efecto es el responsable del fenómeno conocido como histéresis magnética (ver figura 4).

Figura 4. Curva B-H y lazo de histéresis



En vista de que la densidad de flujo es proporcional al flujo magnético y la corriente es proporcional a la intensidad de campo magnético, la curva de magnetización puede transformarse fácilmente en una curva característica Φ - i , como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Curva de magnetización $\Phi - I$ de los transformadores



En donde la pendiente de la curva de magnetización es igual a la inductancia de magnetización del transformador.

$$L = \frac{\Phi}{i} \quad (1.1)$$

Es importante mencionar que es común encontrar curvas de magnetización "V versus I", que proporcionan las mismas características de la anterior, ya que la corriente es proporcional a **H** y el voltaje es proporcional a **B**, como se muestra a continuación.

Las ondas de voltaje y de flujo se aproximan mucho a funciones senoidales en el tiempo, así pues se supone una variación senoidal del flujo en el núcleo, de la siguiente forma:

$$\Phi(t) = \Phi_{MAX} \text{sen}(wt) = A_C B_{MAX} \text{sen}(wt) \quad (1.2)$$

en el cual Φ_{MAX} = amplitud del flujo en el núcleo del transformador

B_{max} = amplitud de la densidad de flujo

w = frecuencia angular = $2\pi f$

f = frecuencia en Hz

De acuerdo con la ley de Faraday, el voltaje inducido en el devanado de N vueltas es:

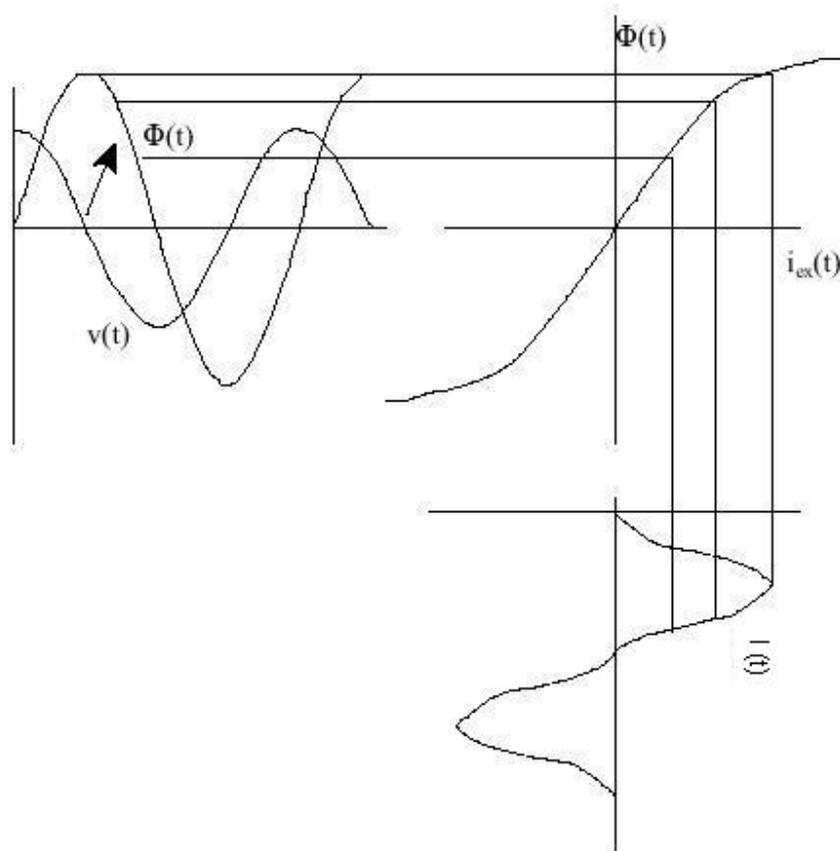
$$e(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = wN\Phi_{MAX} \cos(wt) = E_{max} \cos(wt) \quad (1.3)$$

En el funcionamiento de estado estable en ca, por lo general interesan más los valores rms o efectivos de voltajes y corrientes. El valor rms de una onda senoidal es $1/\sqrt{2}$ veces su valor máximo. Así, el valor rms del voltaje inducido es:

$$E_{rms} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot A_C \cdot B_{max} \quad (1.4)$$

Se necesita corriente en el devanado de excitación para producir campo magnético en el núcleo. A esta corriente se le llama **corriente de excitación**. Las propiedades magnéticas no lineales del núcleo hacen que la onda de la corriente de excitación difiera de la forma de onda senoidal del flujo. Se puede determinar gráficamente una curva de la corriente en función del tiempo, a partir de las características magnéticas (ver figura 6).

Figura 6. Obtención de la forma de onda de la corriente de excitación en un transformador, a partir de la onda de flujo magnético y la curva de magnetización



Se puede notar que cuando el transformador trabaja en la parte no lineal de la curva de magnetización, la corriente difiere más de una onda senoidal. Además cabe recordar que se está utilizando la curva de magnetización para la obtención de la corriente y en la realidad el núcleo tiene un lazo de histéresis, por lo que el análisis es una aproximación.

El efecto de considerar la histéresis haría que la corriente se adelantase un poco al flujo y que su forma no fuese perfectamente simétrica, lo que propiciaría que el núcleo tuviese un valor de flujo residual.

1.1.2 Reactancias del transformador y circuito equivalente

Como la técnica del circuito equivalente es un excelente ejemplo del proceso lógico implicado en la traslación de conceptos físicos a una teoría cuantitativa, es la que se representará aquí.

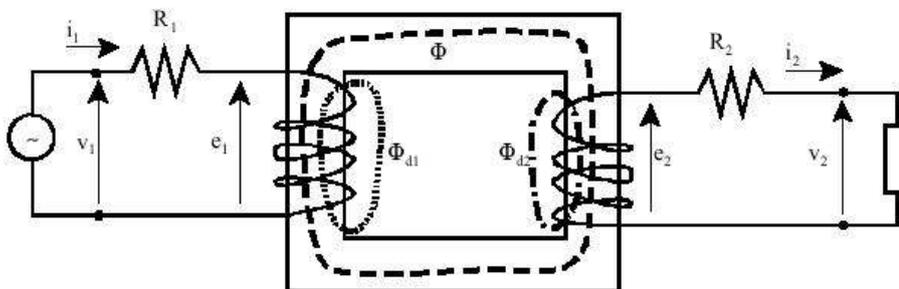
El flujo total que enlaza al devanado primario se puede dividir en dos componentes: el flujo mutuo resultante, confinado esencialmente al núcleo de hierro y producido por el efecto combinado de las corrientes en el primario y secundario, y el flujo de dispersión del primario, que sólo enlaza al primario.

Estas componentes se identifican en el transformador elemental, donde por simplicidad, se indican los devanados primario y secundario en columnas opuestas del núcleo. En un transformador real con devanados traslapados son más complicados los detalles de la distribución del flujo, pero las particularidades esenciales permanecen iguales.

Como la trayectoria de dispersión queda principalmente en el aire, el flujo de dispersión y el voltaje inducido por él varían en forma lineal con la corriente en el primario I_1 . El efecto sobre el circuito primario es el mismo que el de los encadenamientos de flujo, en cualquier parte del circuito que conduzca el primario del transformador, y se pueden simular asignando al primario una *inductancia de dispersión* (igual a los encadenamientos de flujo de dispersión con el primario por unidad de corriente del primario) o una *reactancia de dispersión* (igual a $2\pi f$ veces la inductancia de dispersión). Además, habrá una caída de voltaje en la resistencia R efectiva del primario.

Al voltaje terminal V_1 impreso se oponen entonces tres voltajes fasoriales: la caída $I_1 R_1$ en la resistencia del primario, la caída $I_1 X_{L1}$ debida al flujo de dispersión en primario, y la fuerza contraelectromotriz E_1 inducida en el primario por el flujo mutuo resultante. Todos estos voltajes se incluyen en el circuito.

Figura 7. Flujos que interactúan en el transformador



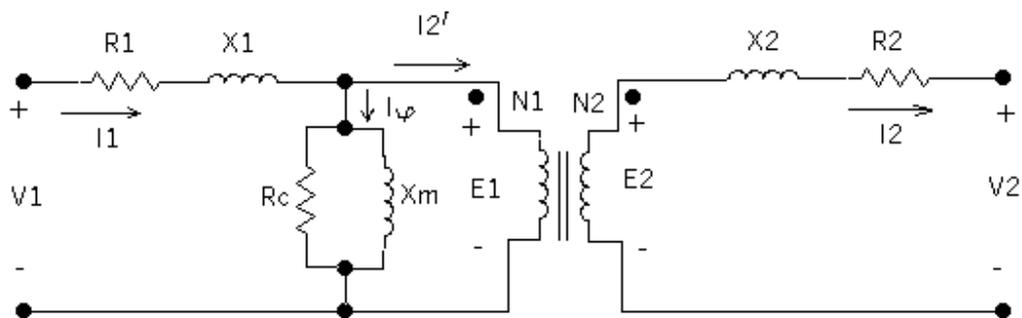
El flujo mutuo resultante enlaza, tanto al devanado primario como al secundario y lo crean sus fuerzas magnetomotrices combinadas. Es conveniente tratar a estas fuerzas magnetomotrices, considerando que la corriente del primario debe cumplir con dos requisitos del circuito magnético: no sólo debe contrarrestar el efecto desmagnetizante de la corriente secundaria, sino que también debe producir una fuerza magnetomotriz suficiente para crear el flujo mutuo resultante.

De acuerdo con este cuadro físico, es conveniente descomponer a la corriente del primario en dos componentes: una de carga y una de *excitación*. La componente de carga I'_2 se define como la corriente componente en el primario que contrarrestaría exactamente la fuerza magnetomotriz de la corriente del secundario I_2 . Por lo tanto, para corrientes en contraposición son:

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (1.5)$$

Ésta iguala a la corriente del secundario referida del primario, como en un transformador ideal. La componente de excitación se define como la corriente adicional en el primario necesaria para producir el flujo mutuo resultante, y es una corriente no senoidal.

Figura 8. Circuito equivalente del transformador real



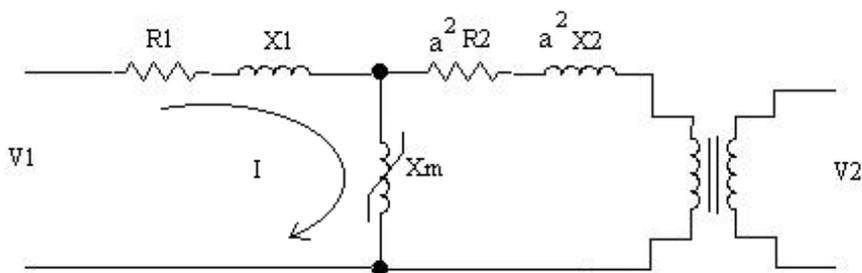
Se puede tratar a la corriente de excitación como una corriente senoidal equivalente I_{ϕ} ; se puede descomponer en una componente de pérdidas del núcleo I_c en fase con la fuerza contraelectromotriz E_1 y una componente de magnetización I_m , retrasada 90° , respecto a E_1 . En el circuito equivalente (ver figura 8), se toma en cuenta la corriente senoidal equivalente mediante una rama en paralelo conectada a través de E_1 , que comprende una resistencia de pérdidas R_c en paralelo con una inductancia sin pérdidas X_m . La potencia provocada por la resistencia R_c tiene en cuenta las pérdidas de núcleo debidas al flujo mutuo. En cambio la reactancia de magnetización X_m varía con la saturación del hierro.

Esta componente de magnetización es la que nos interesa en gran medida para el análisis de la ferorresonancia.

1.1.3 Circuito equivalente del transformador en vacío

El circuito de la figura 9 muestra el circuito equivalente de transformador real, en el cual todas las reactancias están trasladadas al primario.

Figura 9. Circuito equivalente del transformador real con reactancias en el lado del primario



En donde R_1 y R_2 son las pérdidas debido a la resistencia de los devanados del transformador (pérdidas en el cobre); X_1 y X_2 son la representación de las reactancias de los devanados del primario y secundario respectivamente. El factor a^2 es la relación de transformación al cuadrado, que afecta únicamente a los parámetros del devanado secundario debido a que este caso se está analizando el transformador en el lado del primario y despreciando las pérdidas en el núcleo.

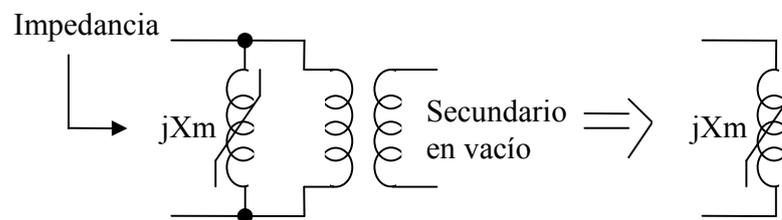
La reactancia en paralelo X_m es la reactancia de excitación o magnetización del transformador, que tiene un comportamiento no lineal de la corriente respecto al voltaje. Este tipo de reactancias no lineales son llamadas inductancias saturables, y las representaremos como se muestra en la figura 9.

Al estar en vacío el transformador, la corriente circulará únicamente por los parámetros del devanado primario, específicamente por la reactancia de magnetización. En este caso, se puede despreciar la resistencia R_2 y reactancia X_2 , ya que no circulará corriente por ellos.

Además, la resistencia R_1 y reactancia X_1 son de valores muy pequeños, comparados con la reactancia de magnetización X_m , por lo que el efecto que éstas producen con respecto a la reactancia de magnetización es despreciable.

Entonces se puede representar al transformador en vacío como una reactancia inductiva saturable en paralelo a la representación del transformador ideal, y para análisis de circuitos solamente la reactancia.

Figura 10. Circuito equivalente del transformador en vacío



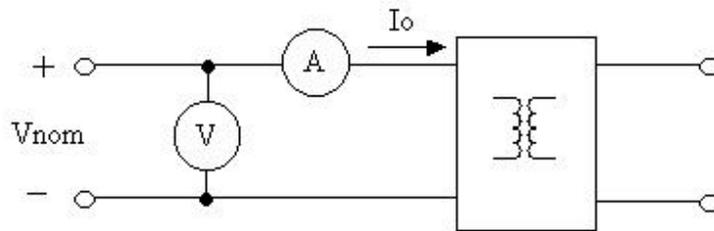
1.1.4 Determinación de la reactancia de magnetización

La reactancia de magnetización se puede encontrar en formas muy variadas; a continuación se explicarán dos formas básicas.

1.1.4.1. Pruebas en vacío de transformadores

Con el secundario en vacío (es decir, sin carga conectada), se alimenta el primario con la tensión nominal de placa, utilizando un amperímetro y un voltímetro de la siguiente forma:

Figura 11. Esquema para realizar las pruebas en vacío y determinar X_m



Por medio de este método, se obtienen básicamente dos valores importantes, que son el voltaje aplicado en rms y la corriente en vacío I_o en rms, que es aproximadamente la corriente de magnetización, si se toman despreciables las pérdidas del transformador.

Entonces, el valor de la reactancia de magnetización es la siguiente:

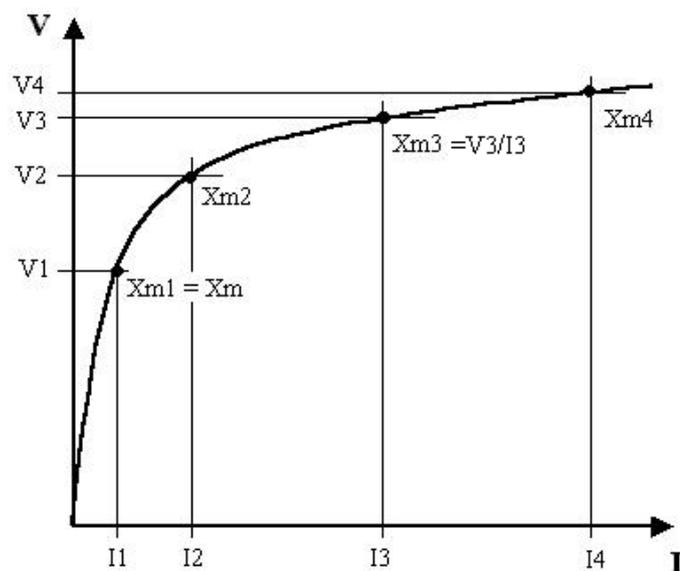
$$X_m = \frac{V_{NOM}}{I_o} \quad (1.6)$$

X_m se definirá como la reactancia de magnetización nominal del transformador.

1.1.4.2. Curva de magnetización para obtener reactancia de magnetización

La curva de magnetización típica del o los transformadores en valores de “V versus I”, indica cómo varía el voltaje en el transformador en función de la corriente del mismo, y se puede fácilmente definir a la reactancia de magnetización como la pendiente de la curva de magnetización, igual a V/I .

Figura 12. Utilización de la curva de magnetización, para determinar el valor de la reactancia de magnetización



Ahora pues, si se observa la gráfica 12, se puede observar que hay una región lineal, en donde la corriente aumenta linealmente respecto al voltaje, en donde la pendiente de la curva casi no varía, por lo que la reactancia de magnetización en este caso es casi constante y es igual a la reactancia de nominal de magnetización X_m .

La otra región en donde la corriente aumenta rápidamente con pocas variaciones de voltaje, al sobrepasar un cierto valor de voltaje en donde termina la característica lineal de la curva, que es la región de saturación.

Así pues, al tener la curva de magnetización característica de los transformadores, se pueden determinar gráficamente las reactancias de magnetización, en función de voltajes y corrientes del transformador.

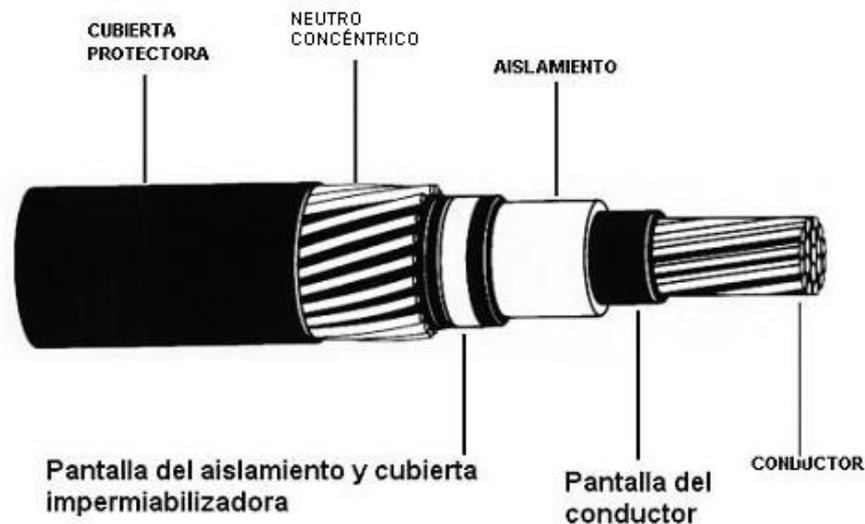
1.2 Parámetros de los cables subterráneos

Generalmente, para instalaciones de distribución subterráneas, se utilizan los cables de potencia con apantallamiento eléctrico, porque ofrecen una mayor seguridad a las personas, a los bienes e instalaciones y una buena continuidad de servicio. Se pueden encontrar gran variedad de éstos, pero para este caso de estudio, se enfocará la atención en el cable monopolar apantallado.

1.2.1 Características y constitución de los cables monopolares

En la figura 13, se muestra la constitución típica de un cable de potencia (monopolar apantallado), en el que se indican sus componentes principales.

Figura 13. Vista transversal de un conductor para voltaje en media tensión



1.2.1.1. El conductor

El conductor es el encargado de llevar la alimentación al elemento de consumo o en nuestro caso a los transformadores. El material de los conductores regularmente es de cobre electrolítico recocido o aluminio para uso eléctrico.

1.2.1.2. Pantallas semiconductoras

Proporcionan una superficie equipotencial que funciona como transición entre un material puramente conductor a otro puramente aislante.

La semiconductor interna se coloca inmediatamente sobre el conductor; tiene por objeto uniformar el gradiente eléctrico en la superficie del conductor, y elimina las distorsiones del campo eléctrico debidas a las protuberancias constituidas por los hilos de la capa exterior.

El uso de materiales semiconductores se debe a que en esta forma se reduce la intensidad de las cargas eléctricas, que pueden producir ionización, respecto a la que se tendrá si se utilizasen cubiertas puramente metálicas.

1.2.1.3. Aislamiento primario

Esta etapa proporciona el aislamiento entre el potencial del conductor y la pantalla de conductores que está referenciado a tierra. Los aislamientos permitidos para tensiones mayores de 600 V son sintéticos termoestables XLPE (*Cross linked Polyethylene*) ó EPR (*Ethylene Propylene Rubber*).

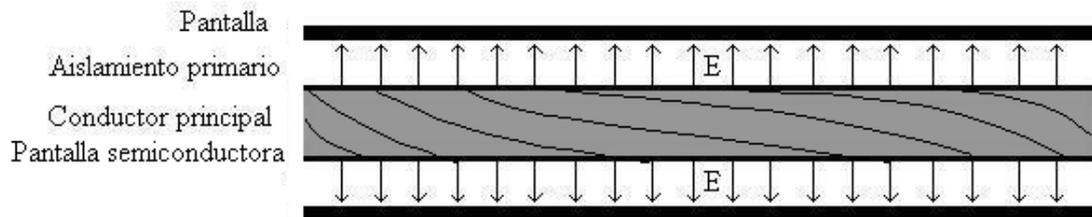
1.2.1.4. Pantalla metálica

Está constituida por conductores de cobre o aluminio enrollados sobre la pantalla semiconductor externa; tiene por objeto principal crear una superficie equipotencial para obtener un campo eléctrico radial en el dieléctrico. Asimismo sirve para blindar el cable contra potenciales inducidos por campos eléctricos externos y como protección personal, mediante su conexión efectiva a tierra.

1.2.2 Campo eléctrico de los cables subterráneos monopoles

El campo eléctrico en un conductor monopolar apantallado posee líneas de flujo eléctrico que en un instante tienen su origen en las cargas positivas del conductor principal y terminan en las cargas negativas de la pantalla. Este campo eléctrico es de forma radial y uniforme, tal como se puede ver en la figura 14.

Figura 14. Campo eléctrico en un conductor de potencia



Es importante hacer notar la pequeña distancia de separación que existe entre las dos etapas de conductores (conductor principal y apantallamiento), por lo que es necesario que este aislamiento no sufra ningún tipo de daño o manipulación, que causen su deterioro y provocar un corto circuito. Además, esta pequeña distancia hace que se den esfuerzos eléctricos muy grandes en las terminaciones de los cables.

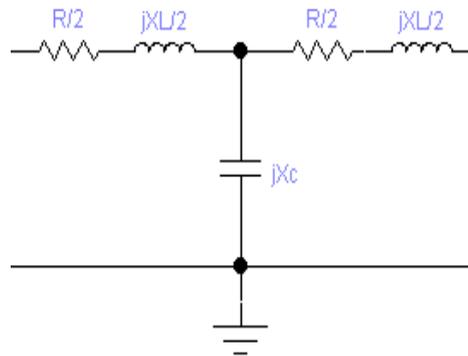
1.2.3 Reactancias del cable y circuito equivalente

El cable monopolar apantallado, utilizado en sistemas subterráneos de distribución, posee tres parámetros que afectan su capacidad, para cumplir su función en el sistema: resistencia, inductancia y capacitancia.

La resistencia y la inductancia están uniformemente distribuidas a lo largo del cable y constituyen la impedancia serie. La capacitancia que se presenta entre el conductor principal y la pantalla, constituye la admitancia en paralelo y también es distribuida.

Aunque estos parámetros están distribuidos, el circuito equivalente se hace con parámetros concentrados por medio de circuitos equivalentes que describan el comportamiento de este. Para esto, se tomará como referencia el circuito T, que se muestran en la figura 15.

Figura 15. Circuito equivalente propuesto para representar la línea de alimentación

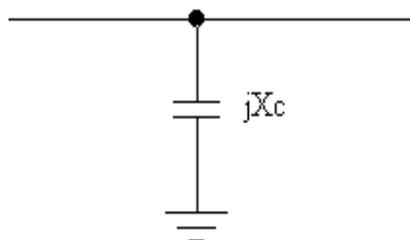


En donde R es la resistencia serie total del conductor; jXL es la reactancia inductiva total debida a la inductancia del conductor; jXc es la reactancia paralelo total debida a la capacitancia que existe entre el conductor y el la pantalla metálica del cable. La conexión a tierra, en este caso indica que la pantalla del cable está conectada a tierra.

Para sistemas de distribución subterráneos, se encuentra que las longitudes de los cables tienden a ser relativamente pequeñas comparadas con la distribución aérea, por lo que la resistencia y reactancia inductiva serie de este tipo de sistemas es poco significativa. Pero al contrario, la capacitancia paralelo es apreciable aún a longitudes no muy grandes debido a la configuración del cable y esta se vuelve más significativa, aun con poco aumento en la longitud.

Basado en lo anterior, se puede representar entonces a un conductor que transporta una fase de la línea de alimentación subterránea, como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Circuito equivalente a una fase de la línea de alimentación subterránea.



En donde, únicamente se encuentra un parámetro, que es el relacionado con la capacitancia del cable, ya que es el único parámetro significativo.

1.2.4 Determinación de la Capacitancia del Cable

Hay una capacitancia inherente entre dos conductores, si ellos están separados por un medio dieléctrico. En el caso de los conductores de alimentación subterráneos, los dos medios de comunicación conductivos son los conductores de la fase y la tierra eficaz de los cables de alimentación. El medio del dieléctrico es el aislamiento primario de los cables de potencia.

Esta capacitancia es la proporción de la carga en los conductores comparados al voltaje entre los conductores. Esta relación puede expresarse por la ecuación:

$$C = Q/V \quad (1.7)$$

Dónde C es la capacitancia en faradios,

Q es la carga en culombios, y

V es el voltaje entre los conductores.

Se relaciona el voltaje entre los dos conductores al campo eléctrico en el medio del dieléctrico por

$$V = \int E \cdot dl \quad (1.8)$$

Donde **E** es la intensidad del campo eléctrica y **dl** la distancia incremental, que está entre los conductores.

E y **dl** son los vectores y se multiplican en la misma dirección (el producto del punto). La intensidad del campo eléctrico es la variable dependiente en la relación física entre los conductores. Por ejemplo, la intensidad del campo eléctrico es diferente para dos conductores cobrados, que se colocan como los platos paralelos separados, que con conductores cobrados colocados en una orientación coaxial.

La intensidad del campo eléctrico, en cualquier punto en el espacio, es dependiente de la magnitud del carga que produce el campo, la distancia de la carga al punto de observación, y la permitividad del medio en que el campo se propaga.

La ecuación específica para la capacitancia de un conductor cilíndrico a una referencia plana a tierra que lo rodea es:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (1.9)$$

donde **C** es la capacitancia del cable en F/m
ε es la permitividad del aislamiento,

a es el radio del conductor, y

b es la distancia del centro del conductor al apantallamiento del cable.

La capacitancia que se presenta entre el conductor principal y la pantalla se define como su carga por unidad de diferencia de potencial entre ellos y es función de la longitud, debido a que la capacitancia del cable se comporta como capacitancias distribuidas en paralelo.

Utilizando la fórmula anterior, se puede determinar en forma teórica la capacitancia de los cables de alimentación en función de la longitud de éstos, por lo que para determinar la capacitancia total de cada cable, se debe multiplicar el valor que se obtenga por la longitud total del cable.

Este método es muy útil, ya que es muy difícil encontrar datos de capacitancias, en los catálogos y manuales de los cables de potencia que proporcionan los fabricantes.

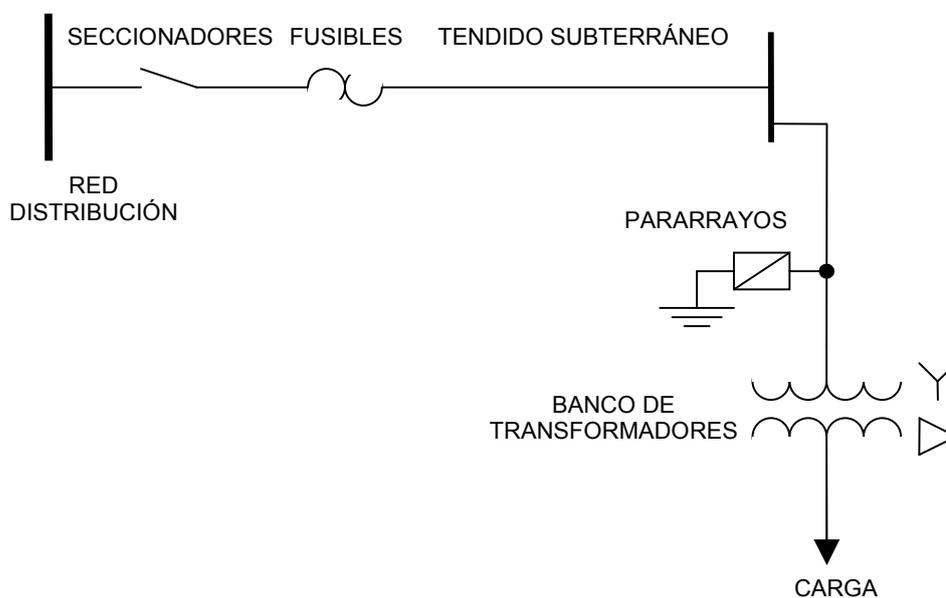
1.3 Representación del sistema subterráneo como un sistema cable-transformador

Para representar al sistema de distribución, por medio de sus parámetros eléctricos, es necesario conocer cómo están dispuestos los componentes del mismo. Para esto hay que basarse en dos formas de representar al sistema de distribución: diagrama unifilar y circuito de representación general.

1.3.1 Diagrama unifilar

El diagrama unifilar básico, para una acometida subterránea en media tensión, se muestra en la figura 17, donde se describe en forma general al sistema de distribución.

Figura 17. Diagrama unifilar del sistema de distribución subterráneo típico

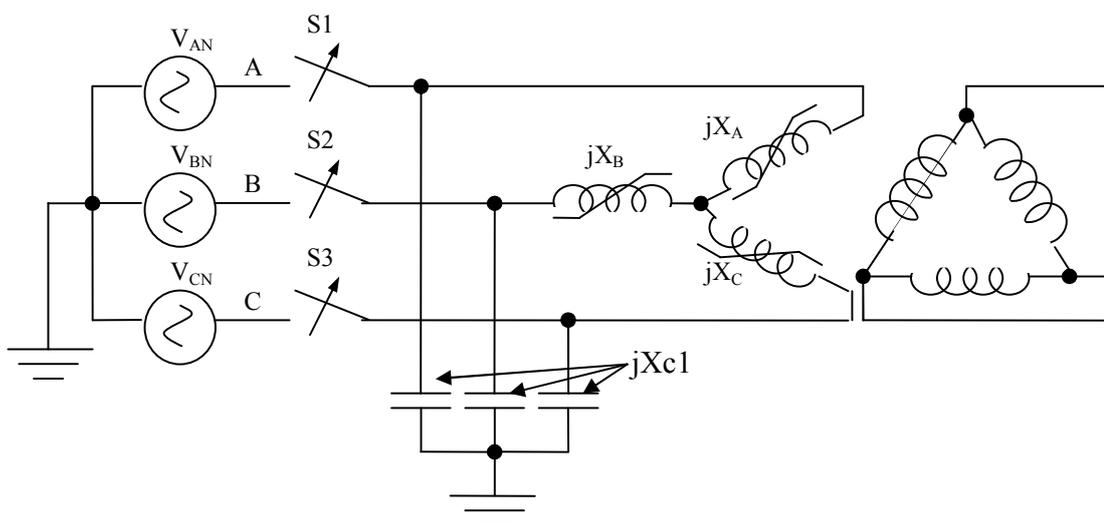


En el presente diagrama unifilar, se muestran los componentes básicos de los sistemas subterráneos en media tensión que alimentan a un banco de transformadores, desde una red de distribución aérea típica en Guatemala. Básicamente representa una acometida subterránea en media tensión, que alimenta un banco de transformadores y que puede estar formado por tres unidades monofásicas o una unidad trifásica.

1.3.2 Circuito de representación cable-transformador

Básicamente el circuito de representación general que se utilizará en este estudio es una representación básica del sistema de distribución, en donde se basará en las modelaciones anteriores de los parámetros, tanto del cable como del transformador, tal como lo muestra la figura 18.

Figura 18. Circuito de representación general del sistema de distribución subterráneo con transformadores en conexión estrella/delta



La fuente equivalente representa la red de distribución alimentada al barraje infinito del Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.). Esta fuente la asumiremos en adelante como una fuente de alimentación trifásica en conexión estrella y con neutro sólidamente aterrizado, con voltaje constante, frecuencia nominal de 60 Hz e impedancia interna despreciable.

Se denotará en este momento que V_{AN} , V_{BN} y V_{CN} , son los voltajes de la fuente de alimentación trifásica referenciados a tierra, y las fases A, B y C correspondientes a los mismos.

Los interruptores S1, S2 y S3 representan a los cortacircuitos y fusibles, así como otros elementos de protección y switcheo monopolares, correspondientes a las fases A, B y C, que son dispositivos que en un momento dado pueden abrir el circuito de más de alguna fase, que dependen de la situación actual del sistema (fallas, maniobras, etc) y por simplificación se utilizarán de esta forma.

Las reactancias saturables X_A , X_B y X_C , representan las reactancias de magnetización de los transformadores; sus subíndices indican que estos tienen conectada una terminal a las fases A, B y C, respectivamente. En el caso de representar a transformadores en conexión triángulo, estas reactancias cambiarán su nomenclatura a X_{AB} , X_{AC} y X_{BC} , indicando que los transformadores están conectados a las fases indicadas.

La reactancia capacitiva de las líneas de alimentación se denominará como X_{c1} (para no confundir con X_c de los transformadores), asumiendo que los cables de alimentación tienen las mismas características y, por tanto, son reactancias iguales.

Los secundarios de los transformadores se obviarán en los análisis subsiguientes, ya que se asumirá que los transformadores están en vacío y por lo mismo se despreciará todo efecto del secundario, incluyendo su conexión.

2 FERRORRESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Bajo ciertas condiciones especiales, la configuración (cable-transformador) del sistema de distribución subterráneo puede presentar sobrevoltajes, como producto de la resonancia entre la reactancia capacitiva asociada a los cables de alimentación y las reactancias inductivas de los transformadores.

Esta resonancia tiene su particularidad de interactuar con inductancias ferromagnéticas saturables (inductancias de magnetización de los transformadores), por lo que el término que describe mejor al fenómeno es ferrorresonancia.

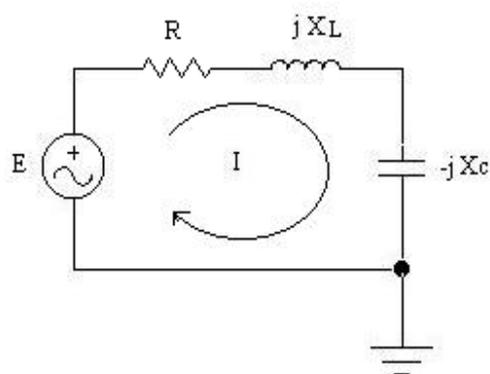
2.1 Ferrorresonancia

La ferrorresonancia es un caso especial de la resonancia serie, cuando esta envuelve a capacitancias en serie con inductancias saturables como bobinas con núcleos ferromagnéticos.

2.1.1 El circuito RLC-serie lineal

Para entender la ferrorresonancia es necesario iniciar con un repaso del análisis básico de un circuito simple RLC en serie. La figura 19 muestra un circuito RLC serie típico con una fuente de voltaje con frecuencia arbitraria, que podría ser de 60 Hz.

Figura 19. Circuito RLC-serie



Utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff para este circuito, se obtiene la siguiente ecuación:

$E = RI + jX_L I - jX_C I$	(2.1)
----------------------------	-------

Asumiendo que el voltaje de la fuente de alimentación $E = E \angle 0^\circ = E + j0$ y suponiendo la resistencia $R \ll X_L$ y X_C , se puede obtener la solución de la corriente fácilmente,

$I = \frac{E}{j(X_L - X_C)} = -j I$	(2.2)
-------------------------------------	-------

Como la corriente tiene una magnitud I y un ángulo de -90° , es fácil transformar nuestra ecuación de Kirchhoff, en función de magnitudes de voltaje y corriente sin afectar la misma, de la siguiente forma:

$E = X_L I - X_C I$	(2.3)
---------------------	-------

En donde el término $X_L I$ es el valor de la magnitud del voltaje en el inductor (V_L), y $X_C I$ es el valor de la magnitud del voltaje del capacitor (V_C).

Una posibilidad para visualizar la solución para este tipo de circuitos, consiste en graficar las características de los voltajes en cada elemento del circuito en un sistema de coordenadas y encontrar la solución, interceptando estas características.

Para esto, primero se representa en forma gráfica la relación entre el voltaje y la corriente eficaces de la inductancia,

$V_L = X_L I$	(2.4)
---------------	-------

Como el circuito en este caso es lineal, X_L es una constante, la ecuación del voltaje en el inductor corresponde a una línea recta que pasa por el origen con pendiente ωL .

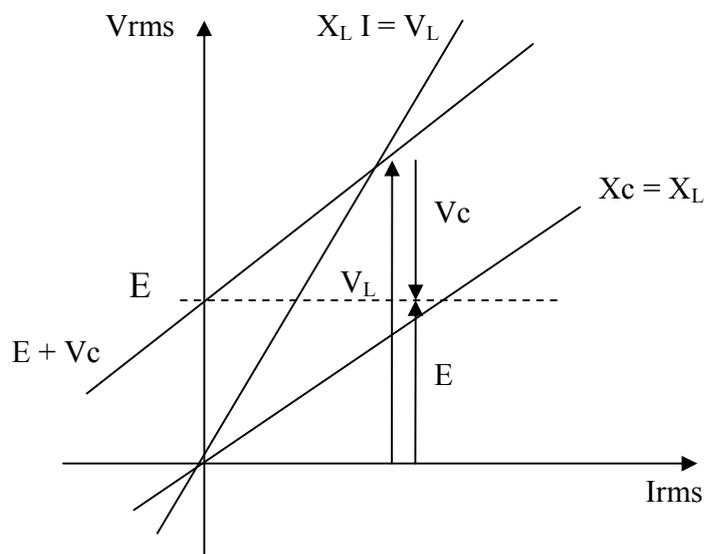
De igual forma, se representa el voltaje de la inductancia en función de $I X_C$ y E , de la ecuación 2.3, obtenida de la ley de voltajes de kirchhoff y despejando este voltaje,

$V_L = E + X_C I = E - V_C$	(2.5)
-----------------------------	-------

Puesto que la capacitancia es constante, la ecuación anterior corresponde a la ecuación de una línea recta que cruza al eje vertical en un valor E y con pendiente $1/\omega C$.

La intersección de estas dos rectas, de la capacitancia y de la inductancia, se puede ver en la figura 20, correspondiente a la solución gráfica para el circuito LC.

Figura 20. Solución gráfica de un circuito LC lineal

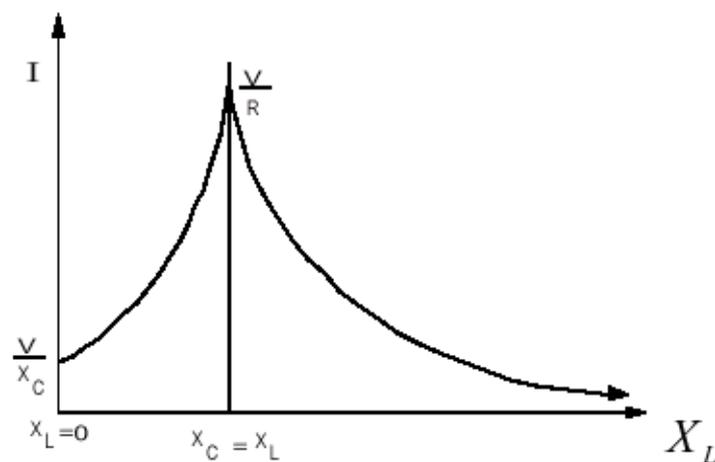


Ahora se variará X_L y se mantendrá X_C en un valor constante, para observar el comportamiento de la corriente al variar la reactancia inductiva.

Cuando $X_L = 0$, la corriente que circula en el circuito es $I \approx E / X_C$; ahora si X_L es de un valor muy grande, la corriente es casi nula. En medio de estos extremos, se puede considerar el caso $X_L = X_C$, en donde la corriente que circulará por el circuito quedará limitada únicamente por la resistencia R , entonces se tiene una corriente $I = E / R$. Esta corriente puede llegar a ser de un valor muy elevado, y provocará sobrevoltajes en las reactancias X_L y X_C .

La figura 21 ilustra la magnitud de la corriente, en función de la magnitud de la reactancia inductiva X_L . La posibilidad de que X_C sea exactamente del mismo valor que X_L es muy remota para este caso, debido a que tanto X_C como X_L tienen un valor constante o lineal. Sin embargo, si el valor de X_L varía como en un transformador con núcleo de hierro (ferromagnético), la posibilidad de que $X_C = X_L$, se incrementa considerablemente.

Figura 21. Corriente de un circuito serie RLC en función de X_L

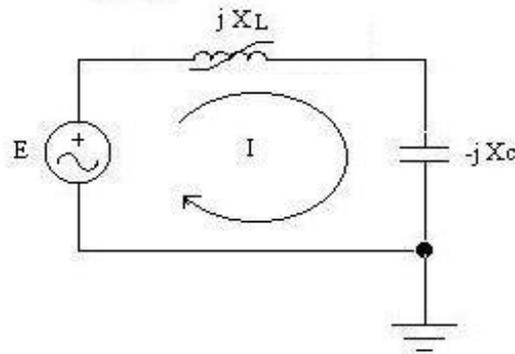


El voltaje que aparece en las reactancias X_L y X_C depende de la corriente que circula por ellos, $V_C = I \times jX_C$ y $V_L = I \times jX_L$ por lo que se puede observar que si se tiene una corriente muy elevada, se pueden obtener sobrevoltajes en las reactancias.

2.1.2 El circuito LC-serie no lineal

Así pues, ya que se analizó un circuito serie lineal por medio del método gráfico, se puede entonces cambiar la situación del circuito a uno no lineal, en donde se tomará la reactancia capacitiva como lineal y la reactancia inductiva como saturable o no lineal. (X_L en este caso es no lineal)

Figura 22. Circuito LC serie no lineal



En el circuito de la figura 22, se puede observar que la reactancia inductiva tiene una leve variación en su simbología, la cual indica que es saturable, la que se utilizará para representar inductancias saturables.

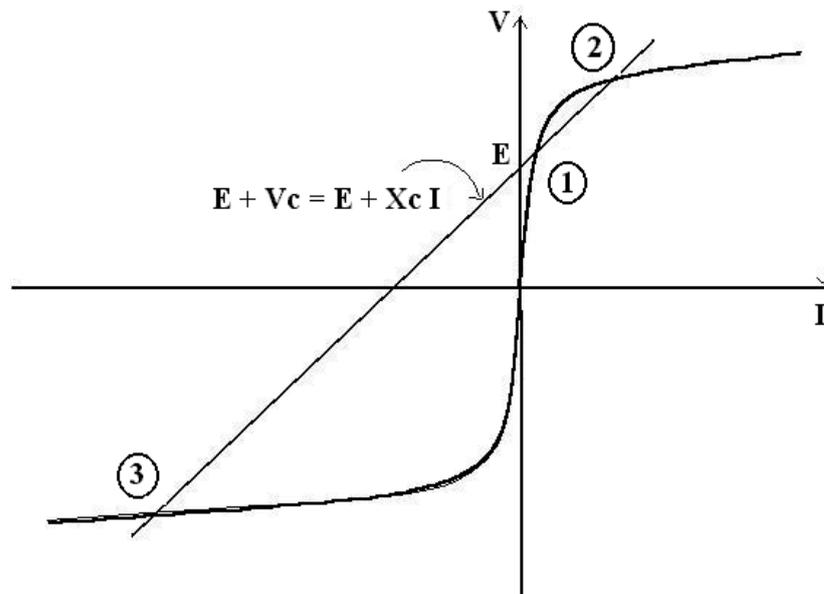
Ahora bien, de acuerdo con la relación existente en el circuito entre las magnitudes de los voltajes para el caso inductivo y asumiendo una resistencia R despreciable, se tiene la ecuación:

$V_L = E - V_C$	(2.6)
-----------------	-------

El punto de operación queda definido como la intersección de la curva de voltaje del transformador, con la curva que representa el efecto combinado de la fuente y la capacitancia, esto es, el término del lado derecho de la ecuación, el cual corresponde a la ecuación de una recta con pendiente $1/wC$.

Ahora bien, si se visualiza gráficamente un circuito serie LC no lineal, en donde las características voltaje – corriente del inductor, se pueden describir en la curva de magnetización, y se obtendrá entonces la siguiente situación:

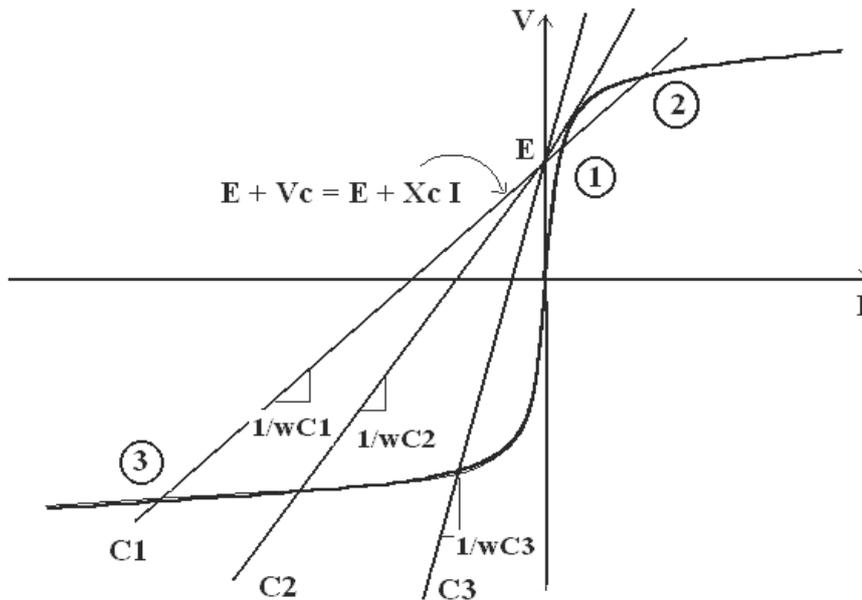
Figura 23. Método gráfico para analizar el circuito LC no lineal.



En la figura 23, se pueden ubicar claramente 3 puntos, en donde la recta del voltaje en la capacitancia intercepta a la curva de voltaje del inductor, que se pueden definir como puntos de operación del sistema.

Incrementado la reactancia capacitiva hasta un valor suficiente como la correspondiente a la capacitancia C_2 (ver figura 24), que se definirá como capacitancia crítica, los puntos de operación 1 y 2 se pueden eliminar, dejando sólo la solución en el punto de operación 3. Si esto sucede, entonces el circuito se vuelve predominantemente capacitivo y la corriente se encontrará adelantada, respecto al voltaje.

Figura 24. Efecto del aumento de capacitancia en el circuito



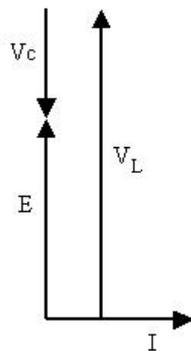
Un breve análisis cualitativo de estos puntos de operación permite visualizar en qué puntos de operación se podrá lograr una condición de estado estable, es decir, en qué puntos de operación se puede encontrar trabajando al circuito.

Para el punto de operación (1): Si hay un incremento en la corriente, entonces V_L aumenta más rápido que $E + V_c$; este incremento de voltaje no puede ser proporcionado por la fuente, de manera que la corriente I tiene que disminuir regresando al punto (1). Un descenso de corriente provoca que $E + V_c$ exceda a V_L , lo cual obliga a la corriente a aumentar regresando al valor original; por lo tanto, este punto es un punto de operación ESTABLE. El diagrama fasorial que representa esta condición de operación es el de la figura 25 (a), el cual cumple con la ecuación 2.10.

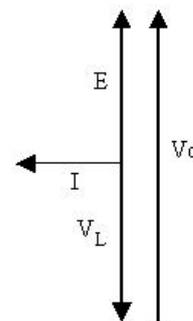
Para el punto de operación (2): si en este punto de operación se incrementa la corriente, entonces $E + V_C > V_L$ y el exceso de voltaje obligará a la corriente a aumentar, sin que pueda regresar al punto de operación. En cambio, si I disminuye, la fuente no podrá entregar la corriente demandada, por lo que el punto (2) es un punto de operación INESTABLE.

Para el punto de operación (3): en este punto, la corriente se ha invertido de dirección y por tanto los voltajes de los elementos también se han desfasado 180° , como en el diagrama fasorial de la figura 25 (b). En este caso, un incremento de corriente será en la dirección contraria y hará que $E + V_C < V_L$; el exceso de voltaje no podrá ser sostenido por la fuente, lo que hace que la corriente regrese a su punto original. Si I disminuye, $E + V_C$ aumentan más rápido que V_L , y el exceso de voltaje hará que la corriente aumente y haga que el punto de operación sea ESTABLE.

Figura 25. Diagramas fasoriales, para los puntos de operación de la componente fundamental del circuito LC serie no lineal.



(a) Caso inductivo (puntos 1 y 2)



(b) Caso capacitivo (punto 3)

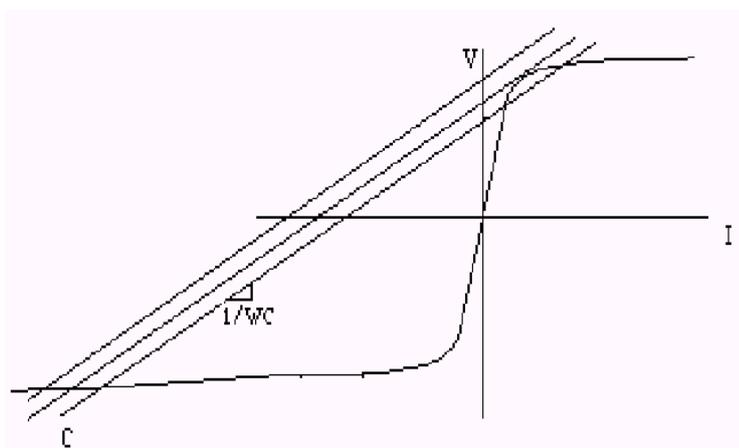
Se puede definir en este momento el caso de la ferorresonancia del circuito en el punto de operación número 3, por las siguientes características:

- Se tiene la mayor corriente en el circuito.
- El inductor está conducido hacia la saturación.
- Los voltajes en los parámetros del circuito son mucho mayores que el voltaje de la fuente de alimentación.

Por supuesto que existirán dos puntos de operación estables, cuando la capacitancia es mayor que la capacitancia crítica C_2 y sólo existirá el punto (3) de ferorresonancia, cuando la capacitancia es menor que el valor crítico.

Si en lugar de variar la capacitancia, se hubiese modificado el valor de la magnitud de la fuente de voltaje, entonces la pendiente de la recta $E + V_C$ no cambiaría, pero el punto de cruce con el eje vertical variaría, de acuerdo con la fuente, como se aprecia en la figura 26. De esta forma se pueden también tener tres puntos de operación o uno solo, lo cual depende de la magnitud de voltaje de la fuente.

Figura 26. Efecto de aumentar la magnitud de voltaje de la fuente.



Razones económicas referentes al aprovechamiento del material ferromagnético han suscitado que los transformadores se diseñen para trabajar alrededor del punto de saturación, el cual se encuentra en la rodilla de la curva de voltaje contra corriente, e indica que cualquier exceso de voltaje es capaz de saturar al transformador, y provocar aumentos en los niveles de corriente y deformaciones en las ondas de corriente y voltaje.

2.2 Modelos de ferrorresonancia en sistemas de distribución

Teóricamente, la ferrorresonancia puede ocurrir durante condiciones de línea abierta, si la conexión de los transformadores implica que no estén aterrizados en el lado de media tensión, como conexiones en delta, estrella flotante y transformadores monofásicos conectados a dos fases, con lo cual se formarán trayectorias LC entre las capacitancias de las líneas abiertas y las reactancias inductivas saturables de los transformadores.

La terminología de línea abierta; es un término que se utilizará en adelante para indicar situaciones del sistema de distribución, en donde una línea de alimentación no tiene continuidad de servicio, debido a una desconexión.

Algunas causas de condiciones de línea abierta que pueden resultar en ferrorresonancia son:

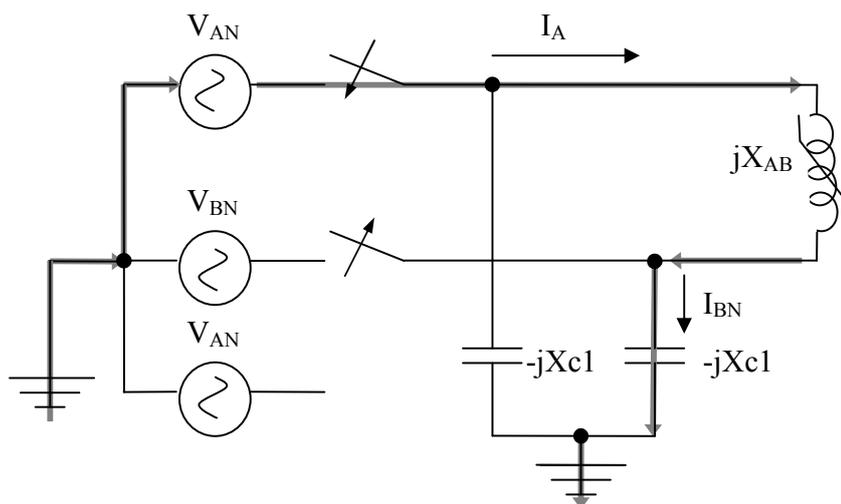
1. La operación de aparatos de protección de sobrecorriente monopolares, como fusibles o reconectadores monofásicos.
2. Maniobras normales con aparatos monopolares, como cortacircuitos usados para energizar o des-energizar los bancos de transformadores.

Que ocurra o no con estas conexiones “no puestas a tierra” de los arrollamientos primarios, esto depende en gran medida de la capacitancia entre el conductor abierto y del transformador, el voltaje del sistema y la magnitud de la carga conectada en los terminales del secundario del transformador o la magnitud de la impedancia en el circuito primario entre el conductor abierto y el transformador.

2.2.1 Modelos de ferorrresonancia en sistemas monofásicos

Cuando se tiene un transformador conectado a dos líneas de alimentación y una de ellas está en condición de línea abierta, se forma una trayectoria LC-serie no lineal. La corriente de esta trayectoria circula a tierra a través de la reactancia del transformador y la capacitancia equivalente del alimentador de la línea abierta, como lo muestra la figura 27.

Figura 27. Caso monofásico. Una línea abierta, transformador monofásico conectado a dos fases



Es conveniente notar que la capacitancia del cable de la fase que está en servicio en ningún momento afecta la corriente, que circula por el transformador y la capacitancia de línea abierta; es por eso que no se incluirá en los análisis siguientes.

2.2.2 Modelos de ferorrresonancia en sistema trifásicos

En sistemas trifásicos, es más factible que se presente una conexión donde pueda ocurrir el fenómeno de ferorrresonancia. El problema sobreviene cuando se desconectan uno o dos de los conductores que alimentan a un banco de transformadores trifásicos no aterrizados, y existe efecto capacitivo de los alimentadores con un valor adecuado para producir el fenómeno. El banco de transformadores puede constar de tres transformadores monofásicos o un solo transformador, con cualquier conexión en que no se aterrice el primario.

Para localizar visualmente las trayectorias “LC-serie” no lineales típicas en los sistemas de distribución trifásicos, se tomarán como base cuatro casos básicos, los cuales se muestran en las figuras 28, 29, 30 y 31, en donde se señalan los caminos de la corriente, a través de estas trayectorias.

Figura 28. Caso I. Una línea abierta, transformadores en conexión delta.

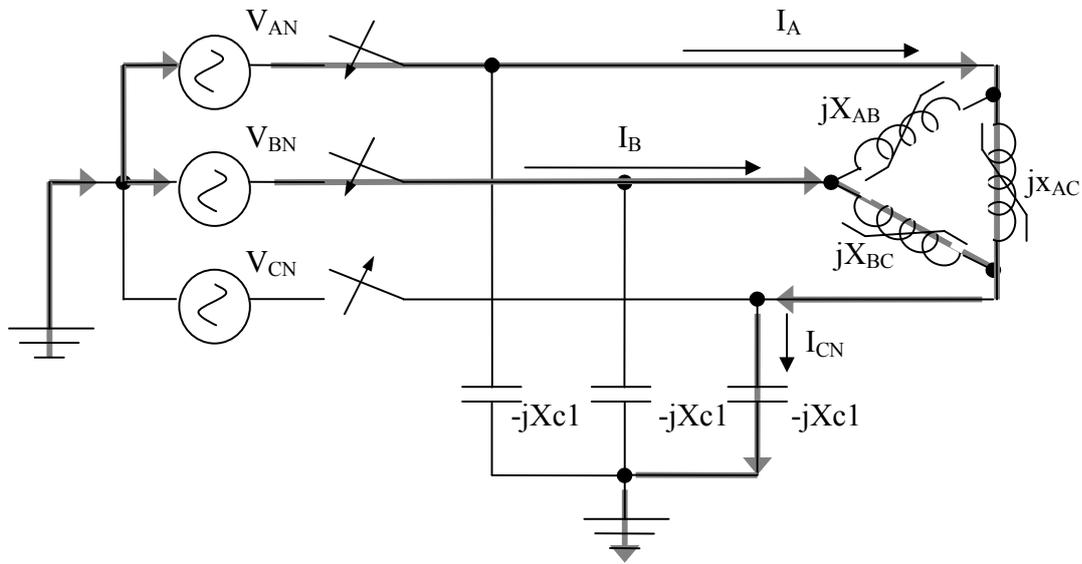


Figura 29. Caso II. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión delta

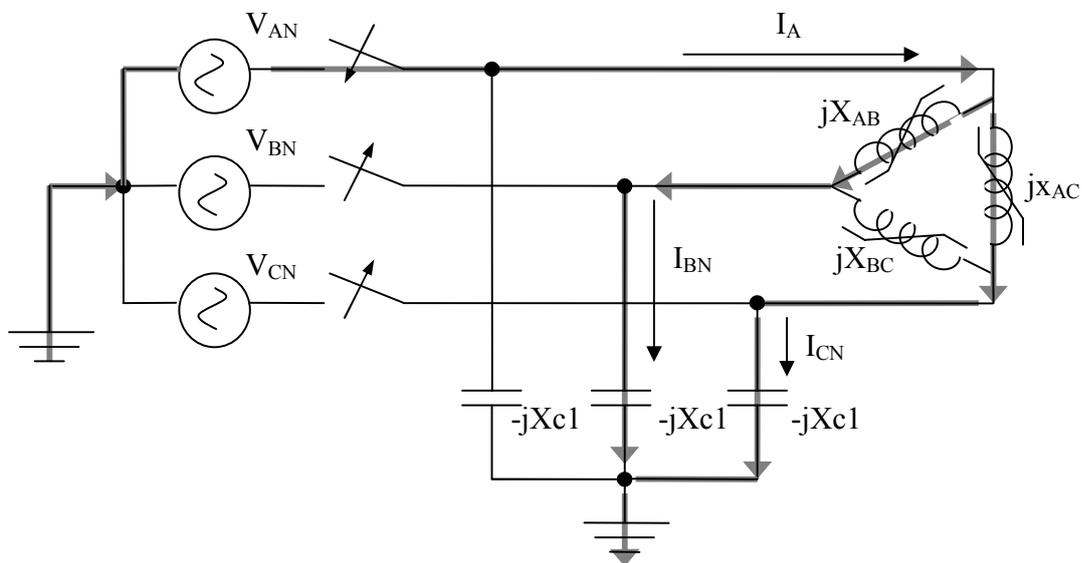


Figura 30. Caso III. Una línea abierta, transformadores en conexión estrella

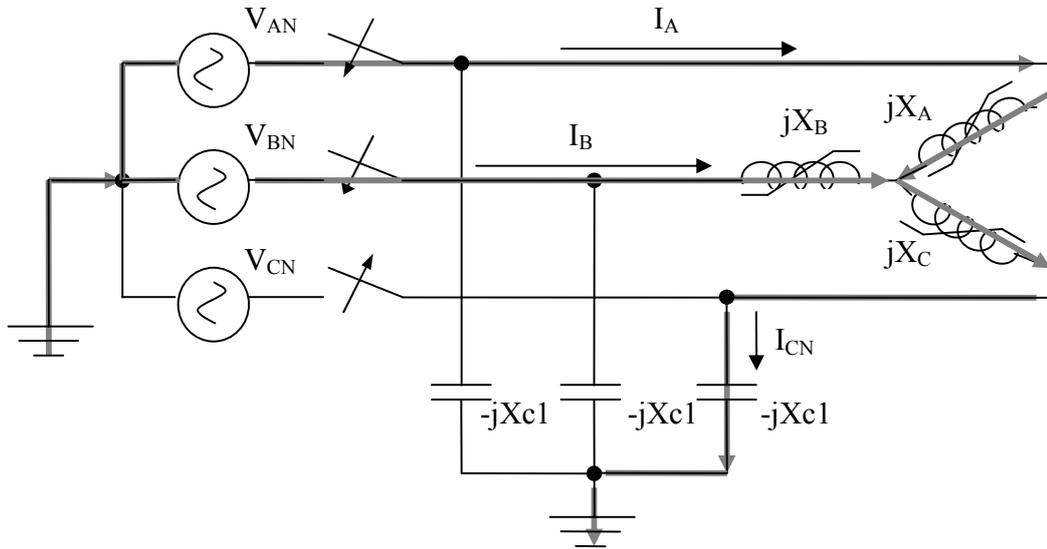
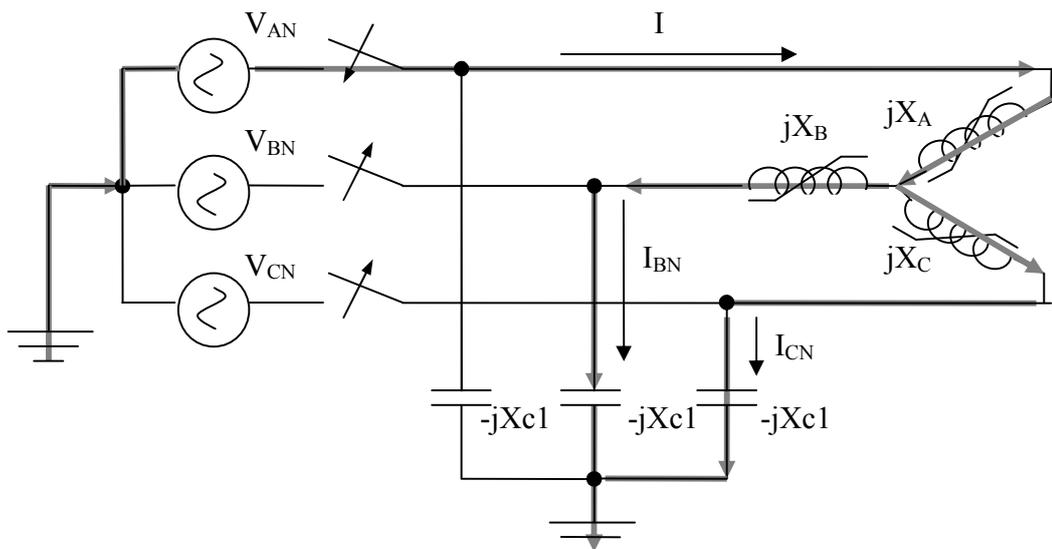


Figura 31. Caso IV. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.



En las figuras anteriores, no se ha incluido el secundario de los transformadores por dos causas principales:

- Existe mayor posibilidad de que un transformador opere en ferrorresonancia, cuando la carga es muy pequeña o nula, y es más crítico el caso de operación en vacío. En el presente estudio, se analiza el caso más crítico.
- Cuando un banco de transformadores opera en vacío, la conexión de secundario no tiene efecto en el cálculo de voltajes y corrientes del primario.

2.3 Efectos de la ferrorresonancia

Desde que los transformadores entran en Ferrorresonancia, éstos experimentan sobrevoltajes, que son consecuencia de la interacción de reactancias inductivas y capacitivas, que conducen a los mismos hacia la saturación.

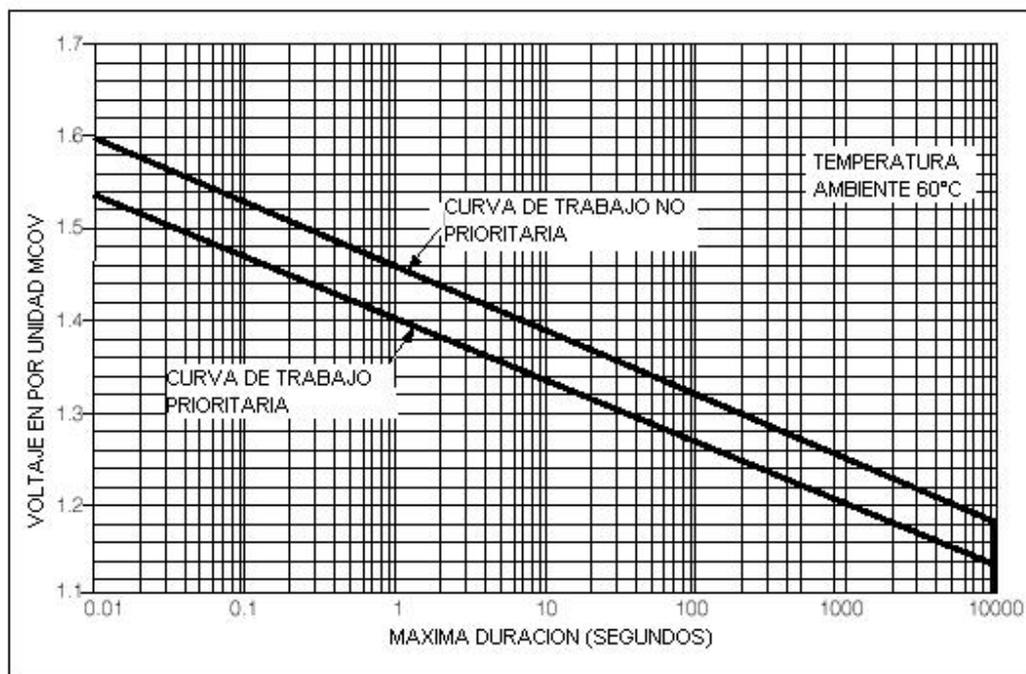
2.3.1 Fallas y daños en los pararrayos

Debido que las líneas de alimentación tienen un efecto capacitivo, los sobrevoltajes aquí son más significativos y pueden ser mayores a 2.5 veces el voltaje nominal de línea a tierra, y se mantienen por tiempos indefinidos.

Los pararrayos, conectados a estas líneas, intentan eliminar los sobrevoltajes por medio de la conducción de altas corrientes de la línea a tierra. Estas corrientes se traducen en grandes cantidades de energía disipadas por los pararrayos, que afectan directamente a los mismos hasta dañarlos y evitan que realicen su función de descargar los sobrevoltajes.

En la figura 32, se muestra el comportamiento de operación de los pararrayos de distribución, cuando son sometidos a sobrevoltajes.

Figura 32. Curva típica de Capacidad de operación en sobrevoltajes para pararrayos de distribución



Fuente: www.hubbellpowersystems.com

Como se puede observar, cuanto mayor sea la diferencia entre el sobrevoltaje y el MCOV del pararrayos, éstos operarán menor tiempo antes de vencerse y dañarse, por esto mismo, en el momento de ocurrir la ferorresonancia, los pararrayos son los primeros en ser afectados.

2.3.2 Distorsión de la forma de onda de los voltajes y las corrientes

El sistema de distribución en el momento de operar en ferorrresonancia, hace que los transformadores trabajen en la región de saturación, lo cual hace que la forma de onda de la corriente del sistema y los parámetros del mismo se distorsionen, de tal manera como se muestran en la figuras 33, 34 y 35.

Figura 33. Forma de onda de la corriente del sistema, en el momento de ocurrir Ferrorresonancia.

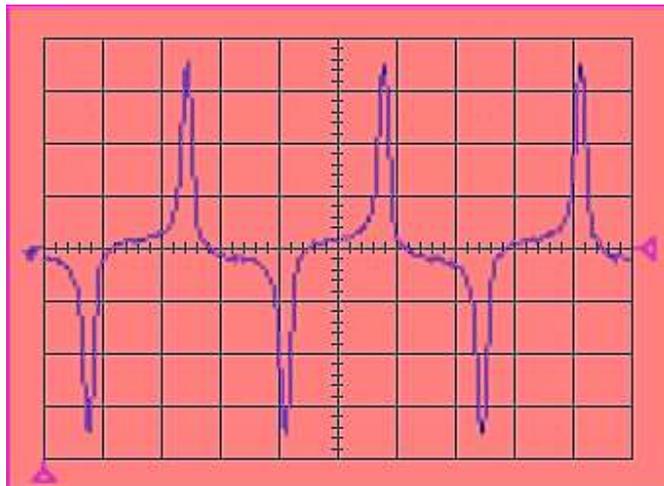


Figura 34. Forma de onda del voltaje del transformador, en el momento de ocurrir ferorrresonancia.

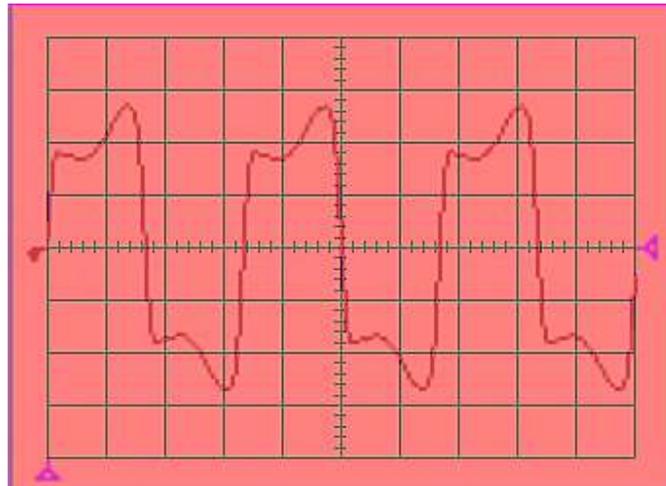
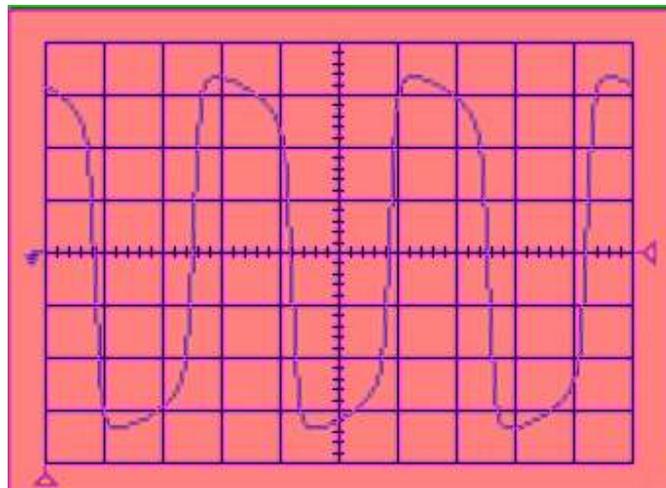


Figura 35. Forma de onda del voltaje en la capacitancia, en el momento de ocurrir ferorrresonancia.



Estas distorsiones en la corriente y en los voltajes llevan consigo un gran contenido de armónicos, principalmente impares, que afectan directamente los equipos y el funcionamiento del sistema de distribución.

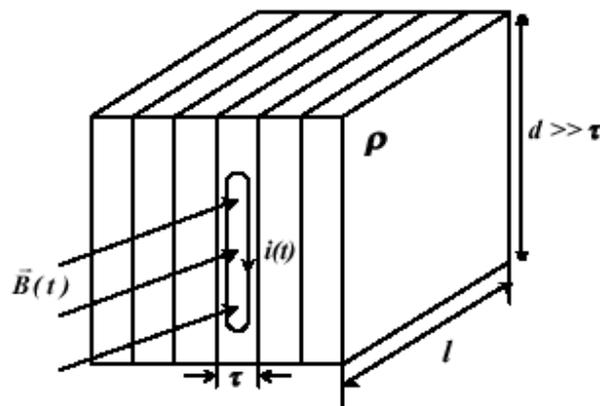
2.3.3 Sobre-calentamiento en el núcleo de los transformadores

Al concentrarse en los transformadores, los sobrevoltajes provocan aumentos directos en el flujo magnético, los cuales hacen que los momentos magnéticos en el núcleo de los transformadores se alineen en su totalidad, y ya no contribuyan al crecimiento de la densidad de flujo magnético (B).

Como consecuencia de esto, la permeabilidad del núcleo disminuye y la intensidad del campo magnético (H) aumenta muy rápidamente a pequeños aumentos en la densidad de flujo (B), lo que deriva en aumentos considerables en la corriente de excitación.

Las altas densidades del flujo magnético (Φ) en el núcleo de los transformadores dan lugar a campos eléctricos inducidos (según la ley de Faraday $E = -d\Phi/dt$), que ocasionan una gran cantidad de corrientes parásitas, que circulan en el núcleo y se oponen al cambio de la densidad de flujo (B), como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Corrientes parásitas en el núcleo de los transformadores



Asimismo la distorsión en la forma de onda del voltaje aplicado al transformador (debido a la Ferrorresonancia), hace que estos campos eléctricos inducidos sean de mayor magnitud como consecuencia de aumentos en la frecuencia ($d\Phi/dt$ aumenta).

Esto provoca altas pérdidas en el núcleo de los transformadores por calentamiento óhmico I^2R , con temperaturas en vacío, que pueden llegar a ser de magnitudes mayores a las provocadas por sobrecarga.

2.3.4 Calentamiento en partes metálicas de los transformadores

Otro síntoma reportado, por la alta densidad de flujo magnético, es que éste se desvía a partes metálicas del transformador, en donde el flujo no se espera, lo cual provoca calentamiento en estas partes del transformador.

Desde que el núcleo es mantenido en saturación, el flujo magnético encontrará un camino en la pared del tanque y en partes metálicas.

Un posible efecto lateral es la carbonización o burbujeo de la pintura en la cima del tanque, que no necesariamente indica que la unidad se dañe, pero en este caso, el daño puede ocurrir si la ferrorresonancia persiste suficientemente, para provocar sobrecalentamiento de algunas de las conexiones interiores del transformador, por lo que puede dañar a su vez la estructura de aislamiento más allá de la reparación.

2.3.5 Ruido audible

Debido a la alta densidad de flujo existente en el núcleo provocado por los altos voltajes, éste hará un ruido audible debido a la magnetostricción del acero y al actual movimiento de las laminaciones del núcleo. Este sonido, provocado por el transformador, es distintamente diferente y más ruidosamente que el zumbido normal del mismo.

La magnetostricción en condiciones muy simples significa el cambio en la longitud de los materiales ferromagnéticos, cuando están sujetos a un campo magnético. El efecto resulta del alineamiento de los dominios magnéticos, bajo la influencia de un campo externo, lo que provoca en las laminaciones del núcleo una extensión y reducción de estas durante un ciclo lleno de magnetización.

Esta extensión y reducción no es uniforme, por consiguiente la extensión y la reducción varía para cada lámina. Estas extensiones sólo son dimensionalmente pequeñas y, por consiguiente, normalmente no puede verse a simple vista. Son, sin embargo, suficientes para causar una vibración y como resultado el ruido.

El grado de flujo determinará la cantidad de magnetostricción (los cambios de longitud del material ferromagnético) y del nivel del ruido.

2.3.6 Pérdidas en los conductores de potencia

En los conductores de potencia, las corrientes armónicas producen pérdidas en las líneas de alimentación y experimentan un calentamiento superior al habitual por efecto Joule, debido a que el efecto piel se agrava al aumentar la frecuencia.

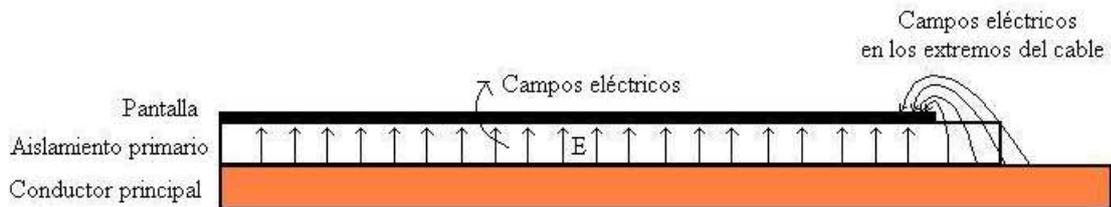
La solución es aumentar la sección de los conductores, sin embargo, el sobredimensionamiento de los conductores de fase aumenta el costo de éstos, y muchas veces no es factible.

2.3.7 Aumento en los esfuerzos eléctricos en las terminaciones de los cables de potencia

El problema principal, que se presenta en los cables de potencia, es que la distancia de fuga se ve altamente reducida en el extremo del cable; esto se hace evidente por la distancia tan pequeña que queda entre el conductor principal y la pantalla de blindaje.

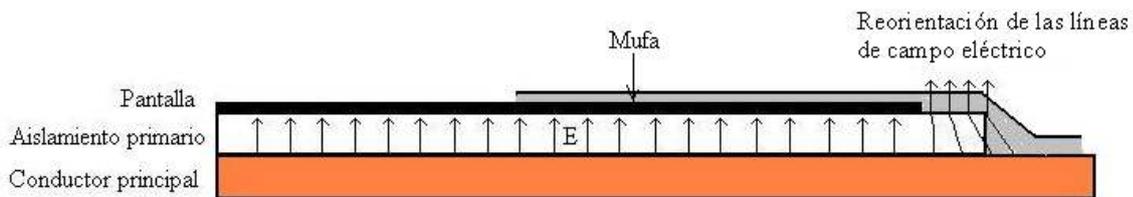
Debido a la simetría radial del cable, los campos eléctricos son uniformes, desde el centro hasta la pantalla de blindaje (referida a tierra); al terminarse esta pantalla, el medio que queda es el aire que tiene una constante dieléctrica menor que la de la pantalla, por lo tanto, la dirección del campo eléctrico en la frontera se distorsiona y busca la ruta más cercana hacia la pantalla. Esto provoca que las líneas equipotenciales se modifiquen y los gradientes de potencial se vuelvan peligrosos, y afectan en esa forma las distancias de fuga a riesgo de producirse un corto circuito (ver figura 37).

Figura 37. Campos eléctricos en los cables de potencia



La solución a este problema, es hacer una terminación (mufa) al extremo del cable con un material, hecho con una constante dieléctrica similar al aislamiento primario, con lo cual se logra que el campo eléctrico se mantenga relativamente constante en la frontera y disminuyan los gradientes de potencial (ver figura 38).

Figura 38. Reorientación de las líneas de campo eléctrico en las terminaciones del cable de potencia.



En el momento de ocurrir el fenómeno de ferro-resonancia, el cable es uno de los más afectados, debido a que el circuito LC serie es predominantemente capacitivo, lo cual provoca un aumento significativo del campo eléctrico en el cable de potencia. Este aumento en el potencial hace que los esfuerzos, antes mencionados en los extremos del cable, sean mucho mayores y puedan provocar desgaste en el aislamiento hasta debilitarlo.

3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA FERRORESONANCIA

Por simplificación del análisis, se despreciará todo tipo de pérdidas, tanto en el núcleo, como en los devanados, y de igual forma los efectos de las armónicas que están relacionadas directamente con las distorsiones en las forma de onda. La principal desventaja que existe para el análisis de la ferorrresonancia es la existencia de la no linealidad entre el voltaje y la corriente, asimismo la distorsión de las forma de onda de éstas variables, lo cual complica grandemente el análisis.

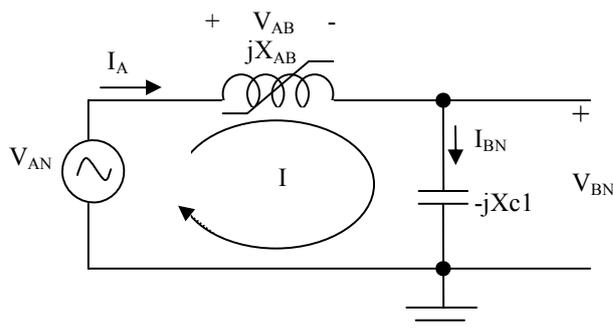
Los resultados que se obtendrán no concordarán exactamente con la realidad, sin embargo, se tendrá una buena aproximación del comportamiento que presentan los voltajes y corrientes en un sistema no lineal.

3.1 Ferorrresonancia en circuitos monofásicos

Cuando se tiene un transformador conectado a dos líneas de alimentación y una de ellas está desconectada a la fuente de alimentación (ver figura 27), se forma una trayectoria LC a tierra, a través de la reactancia del transformador y la capacitancia equivalente del alimentador de la línea abierta.

Para evaluar y generalizar el comportamiento de la ferorrresonancia en el sistema de distribución es necesario recurrir a un circuito simplificado del mismo, en el cual se especifiquen concretamente las trayectorias LC, y se desprecia, por lo tanto, los parámetros que no se encuentren en estas trayectorias. En la figura 27, se muestra el circuito equivalente correspondiente a la figura 39.

Figura 39. Circuito equivalente del sistema de distribución monofásico en situación de línea abierta



Utilizando la ley de voltaje de Kirchhoff, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{AN} = V_{AB} + V_{BN} = V_{AB} - X_C I \quad (3.1)$$

Debido a la no linealidad existente entre el voltaje y la corriente en el transformador, la reactancia X_{AB} no puede ser conocida fácilmente. Este inconveniente hace que el análisis convencional, utilizado para los circuitos, no pueda ser utilizado en este caso.

En el presente estudio, se propone un procedimiento gráfico para encontrar el comportamiento del voltaje de línea abierta en función de la relación X_{C1}/X_m , en el cual se toman únicamente las componentes fundamentales del voltaje y la corriente. El parámetro X_m se tomará en adelante como la reactancia de magnetización en vacío, que presentan los transformadores en condiciones nominales.

El procedimiento para encontrar el comportamiento del voltaje de línea abierta V_{BN} , en función de la relación X_{C1}/X_m , es el siguiente:

1. A partir de la curva de magnetización del transformador, se asume un valor de voltaje en la reactancia X_{AB} . Este valor, dentro de los valores de la curva, se asumirá positivo cuando la corriente concuerde, según la convención del circuito de la figura 39.
2. Encontrar la corriente correspondiente a la reactancia X_{AB} , con base en la curva de magnetización del transformador, la cual será la corriente del sistema.
3. De la ecuación obtenida de la ley de voltaje de Kirchhoff, se puede encontrar el voltaje V_{BN} en la capacitancia, de la siguiente forma:

$$V_{BN} = V_{AN} - V_{AB} \quad (3.2)$$

4. Se encuentra el valor de X_{C1} , dividiendo el valor de V_{CN} encontrado, entre la corriente del sistema encontrada en el paso 1, basados en la ecuación (3.1).

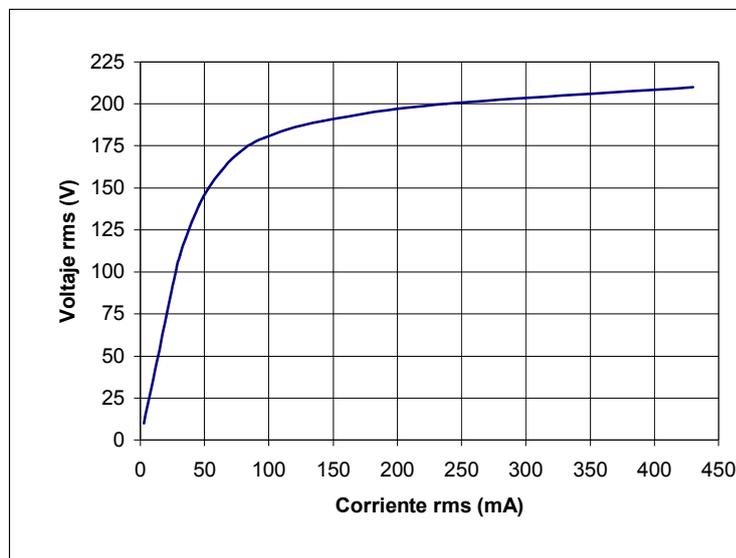
$$X_{C1} = -V_{BN} / I \quad (3.3)$$

5. Se determina la relación X_{C1}/X_m , dividiendo el valor obtenido de X_{C1} entre el valor de la reactancia de magnetización nominal X_m del transformador del sistema.
6. Para efectos de mejor visualización de los resultados, se dividirá el voltaje en la línea abierta entre el voltaje nominal de línea a tierra (V_{AN}), para obtener así un valor por unidad.
7. Se grafica el punto encontrado ($X_{C1}/X_m, V_{BN}$ pu) en un plano cartesiano y se repite este procedimiento cuantas veces sea conveniente.

3.1.1 Ejemplo de cálculo

Un transformador monofásico, con valores nominales 120/12V, está alimentado a un voltaje de línea-línea de 120V por medio de cables de alta capacitancia, como se muestra en la figura 27. La curva de magnetización del transformador es la que se muestra en la figura 40.

Figura 40. Curva de magnetización



Determinar gráficamente el comportamiento del voltaje de línea abierta, en función de la relación X_{c1}/X_m , asumiendo que la fase B está abierta.

3.1.2 Solución

Antes de iniciar el procedimiento antes descrito, es necesario determinar la reactancia nominal de magnetización X_m , con base en la curva de magnetización del transformador.

$$X_m = V_{\text{NOM}} / I_0 = 120 / 0.033 = 3,530 \Omega$$

El voltaje, al cual está alimentado el circuito, debido a la situación de línea abierta, es:

$$V_{\text{AN}} = 120 / \sqrt{3} \approx 70 \text{ V}$$

Paso 1. Suponer que el voltaje $V_{\text{XA}} = -210 \text{ V}$.

Paso 2. Con base en la curva de magnetización del transformador, corresponde una corriente igual a -0.430 A , la cual será la corriente del sistema para este punto.

Paso 3. Para encontrar V_{BN} , nos apoyamos en la ecuación (3.2), de la siguiente forma:

$$V_{\text{BN}} = 70 - (-210) = 280 \text{ V}$$

Paso 4. Apoyándonos en la ecuación (3.3), se encuentra el valor de la reactancia X_{c1} .

$$X_{c1} = -280 / (-0.430) = 651 \Omega$$

Paso 5. Determinar la relación X_{c1}/X_m .

$$X_{c1}/X_m = 651 / 3,530 = 0.18$$

Paso 6. Utilizando $70 \text{ V} = V_{\text{AN}}$ como voltaje base, se puede transformar el voltaje de línea abierta en valores por unidad.

$$V_{BN} \text{ (pu)} = 280/70 = 4.0$$

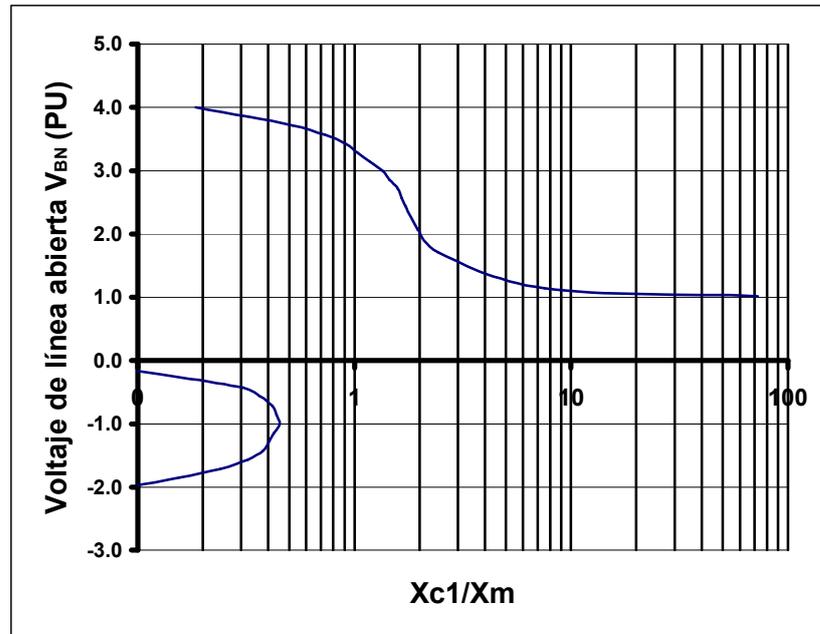
Paso 7. Para dar continuación a este paso, se elaboró la tabla I, en donde se muestran los resultados de haber realizado este procedimiento varias veces.

Tabla I. Resultados para el ejemplo

Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6
V_{AB} (V)	I (A)	V_{BN} (V)	X_{c1} (Ω)	X_{c1}/X_m	V_{BN}/V_{AN}
-210	-0.430	280	651	0.18	4.0
-190	-0.142	260	1831	0.52	3.7
-170	-0.075	240	3200	0.91	3.4
-150	-0.053	220	4151	1.18	3.1
-130	-0.039	200	5128	1.45	2.9
-100	-0.028	170	6071	1.72	2.4
-75	-0.021	145	6905	1.96	2.1
-50	-0.014	120	8571	2.43	1.7
-10	-0.003	80	26667	7.55	1.1
-1	0.000	71	255600	72.41	1.0
1	0.000	69	-248400	N. E.	N. E.
10	0.003	60	-21600	N. E.	N. E.
50	0.014	20	-1440	N. E.	N. E.
75	0.021	-5	240	0.07	-0.1
100	0.028	-30	1080	0.31	-0.4
130	0.039	-60	1538	0.44	-0.9
150	0.053	-80	1509	0.43	-1.1
170	0.075	-100	1333	0.38	-1.4
190	0.142	-120	845	0.24	-1.7
210	0.430	-140	326	0.09	-2.0

Antes de proceder a graficar los puntos obtenidos, es conveniente observar que para ciertos valores asumidos de voltaje, en la reactancia del transformador, se obtienen valores negativos de X_{c1} , lo que indica que son puntos en la gráfica que no pueden existir (N.E.).

Figura 41. Comportamiento del voltaje de línea abierta respecto a la relación X_{c1}/X_m para el ejemplo.



En la gráfica de la figura 41, se muestra el comportamiento del voltaje de línea abierta (V_{BN}), en función de la relación X_{c1}/X_m , en donde se puede observar que para ciertas relaciones de X_{c1}/X_m existen tres valores de V_{BN} , que corresponden a los tres puntos de operación que existen en los circuitos LC serie no lineales. A partir de la gráfica puede, entonces, obtenerse el valor crítico de capacitancia para tener tres puntos de operación o solamente uno.

De la gráfica:

$$X_{c1(\text{CRITICA})} = 0.45 X_m = (0.45)(3,530) = 1,588.5 \Omega$$

Cuya capacitancia correspondiente es:

$$C_{1(\text{CRITICA})} = C_{1(\text{MINIMA})} = 1/[(2)(\pi)(f)(X_{c1(\text{CRITICA})})]$$

$$C_{1(\text{CRITICA})} = 1/[(2)(\pi)(60)(1,588.5)] = 1.67 \mu\text{F}$$

También se observa que conforme la relación X_{c1}/X_m disminuye, lo que corresponde a aumentos de C_1 , el voltaje de línea abierta aumenta en magnitud en la parte positiva, correspondiente al punto de operación en Ferrorresonancia. Este aumento de capacitancia está asociado con incrementos en la longitud de los cables de alimentación, por lo que desde ahora se concluye que el efecto es más destructivo, cuanto más larga sea la longitud de estos cables.

3.2 Análisis de ferrorresonancia en circuitos trifásicos

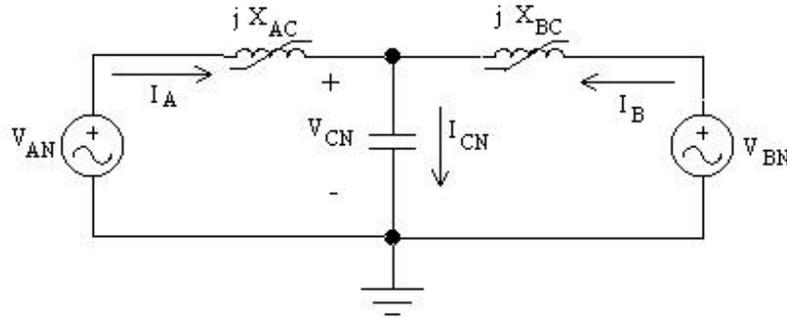
En seguida, se desarrollan métodos que proporcionan una solución aproximada para el cálculo de los voltajes de línea a tierra, que aparecen en las líneas de alimentación, cuando están en condición de línea abierta, en función de la relación X_{c1}/X_m .

El análisis se realiza considerando los modelos presentados en el capítulo 2 y suponiendo que los tres transformadores tienen características de magnetización iguales, que el voltaje de la fuente es constante e igual al nominal, utilizando solamente las componentes fundamentales de los voltajes y las corrientes.

3.2.1 Caso I. Una línea abierta, transformadores en conexión Delta.

En la figura 42, se muestra el circuito simplificado para este caso, tomando como referencia la figura 28, y despreciando todos aquellos parámetros que no se incluya en trayectorias LC.

Figura 42. Circuito simplificado de trayectorias LC para el caso I.



Los voltajes, aplicados a las terminales del banco de transformadores, son los voltajes normales de línea a tierra de la fuente, los cuales tienen igual magnitud y están desfasados 120° entre sí, esto es:

$$\mathbf{V}_{AN} = V_{AN} \angle -120^\circ = V_{AN} [-1/2 - j\sqrt{3}/2],$$

y

$$\mathbf{V}_{BN} = V_{BN} \angle 120^\circ = V_{BN} [-1/2 + j\sqrt{3}/2]$$

además

$$V_{AN} = V_{BN}$$

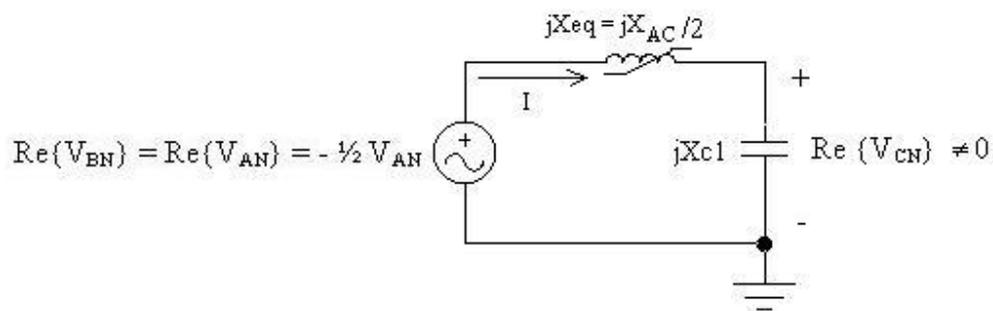
El voltaje V_{CN} , en la terminal de la línea abierta, depende de la corriente I_{CN} que fluye hacia tierra a través de la capacitancia X_{c1} . Esta corriente puede ser analizada, a partir de las componentes de los voltajes aplicados al circuito.

La parte real de los voltajes aplicados es:

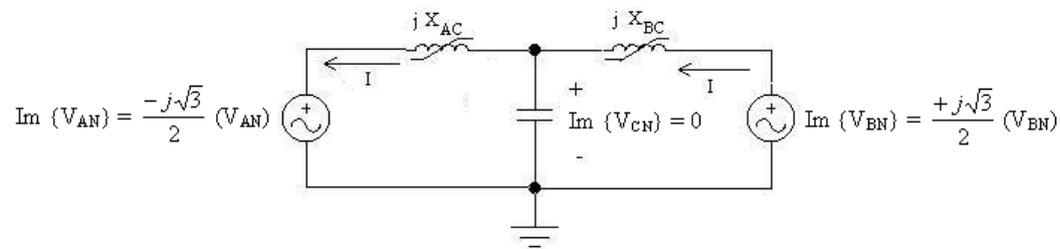
$$\text{Re} \{ \mathbf{V}_{AN} \} = \text{Re} \{ \mathbf{V}_{BN} \} = -1/2 V_{AN}$$

Debido a que las fuentes "reales" son iguales y las reactancias X_{AC} y X_{BC} también son iguales, se encuentra un circuito más simplificado para la parte real del circuito de la figura 43 (a).

Figura 43. Uso de superposición para calcular V_{CN} , a partir de las componentes de voltajes de las fuentes.



(a) Circuito equivalente para la parte real de los voltajes de las fuentes



(b) Circuito para la parte imaginaria de los voltajes de las fuentes.

La parte imaginaria de los voltajes aplicados es:

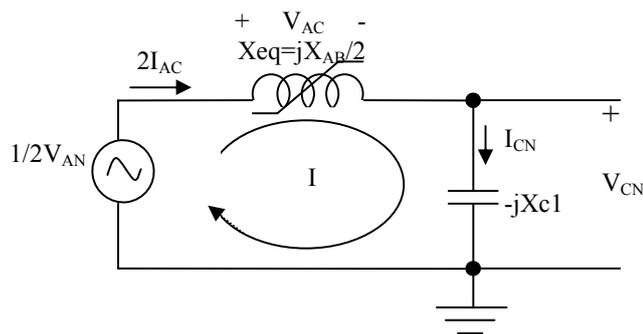
$$Im\{V_{AN}\} = -j\sqrt{3/2} V_{AN}$$

$$Im\{V_{BN}\} = +j\sqrt{3/2} V_{BN}$$

En este caso, las componentes imaginarias de los voltajes de las fuentes son de signo contrario y la simplificación anterior no se puede realizar, sin embargo, dado que las magnitudes son iguales, la componente imaginaria del voltaje V_{AN} produce corriente de la tierra hacia la fuente por ser de valor negativo, mientras que la componente imaginaria del voltaje V_{BN} produce igual corriente, pero de la fuente hacia tierra, por ser de valor positivo, y por la simetría del circuito, la corriente neta que pasa por la capacitancia, la cual se debe a las componentes imaginarias de los voltajes, es cero; esto se aprecia con claridad en la figura 43 (b).

Por lo anterior, se puede concluir que la única corriente que fluye hacia tierra a través de la reactancia X_{c1} es debida a la parte real de los voltajes V_{AN} y V_{BN} , y será la única que pueda producir voltaje a través de esta reactancia capacitiva de la línea abierta, y por análisis se utilizará el circuito simplificado de la figura 44.

Figura 44. Circuito simplificado para el caso I, con la utilización de las componentes fundamentales de las fuentes de alimentación



El procedimiento para encontrar el comportamiento del voltaje de línea abierta V_{CN} , en función de la relación X_{c1}/X_m , es el siguiente:

1. Asumir un valor de voltaje en la reactancia X_{eq} , dentro de los valores de la curva de magnetización del transformador, que será igual al voltaje en las reactancias X_{AC} y X_{BC} . Este valor se asumirá positivo, cuando la corriente concuerde, según la convención del circuito de la figura 44.
2. Encontrar la corriente I_{AC} correspondiente a la reactancia X_{AC} , con base en la curva de magnetización del transformador. Debido a que X_{eq} resulta del paralelo de las X_{AC} y X_{BC} , la corriente total del sistema será $2I_{AC}$.
3. Utilizando la ley de voltaje de Kirchhoff, se puede encontrar el voltaje V_{CN} , de la siguiente forma:

$$V_{CN} = \frac{1}{2} V_{AN} - V_{AC} \quad (3.4)$$

4. Para efectos de mejor visualización de los resultados, se dividirá el voltaje en la línea abierta entre el voltaje nominal de línea a tierra (V_{AN}), y se obtendrá así un valor por unidad.
5. Se encuentra el valor de la magnitud X_{c1} , dividiendo el valor de V_{CN} encontrado, entre la corriente del sistema encontrada en el paso 2 y además se multiplica por (-1).

$$X_{c1} = -V_{CN} / I \quad (3.5)$$

6. Se determina la relación X_{c1}/X_m , dividiendo el valor obtenido de X_{c1} entre el valor de la reactancia de magnetización nominal X_m de los transformadores del sistema.
7. Se grafica el punto encontrado (X_{c1}/X_m , $V_{CN}(pu)$) en un plano cartesiano y se repite este procedimiento cuantas veces sea conveniente.

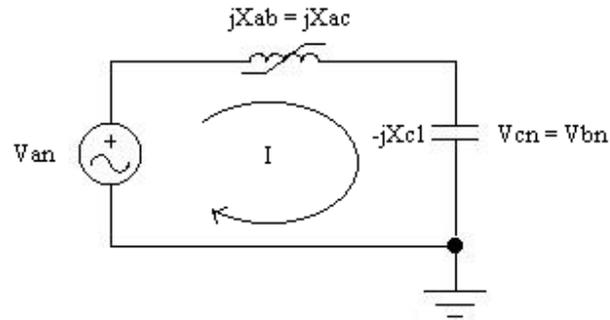
3.2.2 Caso II. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión delta

Cuando se tiene una conexión delta y se mantiene sólo una línea conectada a la fuente de alimentación trifásica, existen dos trayectorias a tierra, a través de las capacitancias equivalentes de las líneas desconectadas, tal como se ilustra en la figura 29.

Si los efectos capacitivos a tierra de las líneas abiertas son iguales y si las reactancias de los transformadores X_{AB} y X_{AC} son idénticos, entonces las corrientes que fluyen de la línea en servicio hacia tierra por las capacitancias de las líneas abiertas, deben ser exactamente iguales, por lo que el potencial en las líneas abiertas tiene que ser el mismo, ya que corrientes iguales producen caídas iguales en capacitancias iguales. Esto hace que la diferencia de potencial en el transformador X_{BC} sea cero, y da lugar a que no circule corriente por este transformador, y se puede quitar del circuito y simplificar así el análisis.

Las dos trayectorias "LC-serie", por donde se han creado las trayectorias, son equivalentes y están conectados al mismo voltaje, de manera que se pueden analizar por separado obteniendo resultados similares en cada uno de ellos, como se muestra en el circuito de la figura 45.

Figura 45. Circuito simplificado para resolver el caso II.



Siendo un solo circuito "LC-serie", se puede analizar por el método gráfico que se ha detallado con anterioridad para sistemas monofásicos, y así obtener el siguiente procedimiento para encontrar el comportamiento del voltaje de línea abierta $V_{BN} = V_{CN}$ en función de la relación X_{c1}/X_m .

1. A partir de la curva de magnetización del transformador, se asume un valor de voltaje en la reactancia X_{AB} . Este valor se asumirá positivo, cuando la corriente concuerde, según la convención del circuito de la figura 45.
2. Encontrar la corriente correspondiente a la reactancia $X_{AB} = X_{AC}$, con base en la curva de magnetización del transformador, la cual será la corriente del sistema.
3. De la ley de voltajes Kirchoof para el circuito simplificado de la figura 45, se puede encontrar el voltaje V_{CN} en la capacitancia, de la siguiente forma:

$$V_{CN} = V_{AN} - V_{AC} \quad (3.6)$$

4. Para efectos de mejor visualización de los resultados, se dividirá el voltaje en la línea abierta entre el voltaje nominal de línea a tierra (V_{AN}), para obtener así un valor por unidad.
5. Encontrar el valor de X_{C1} , dividiendo el valor de V_{CN} encontrado, entre la corriente del sistema encontrada en el paso 2.

$$X_{C1} = -V_{BN} / I = -V_{CN} / I \quad (3.7)$$

6. Determinar la relación X_{C1}/X_m , dividiendo el valor obtenido de X_{C1} entre el valor de la reactancia de magnetización nominal X_m del transformador del sistema.
7. Se ha obtenido un punto de la gráfica correspondiente al valor supuesto de los voltajes V_{BN} y V_{CN} . Para calcular más valores, se repete este procedimiento.

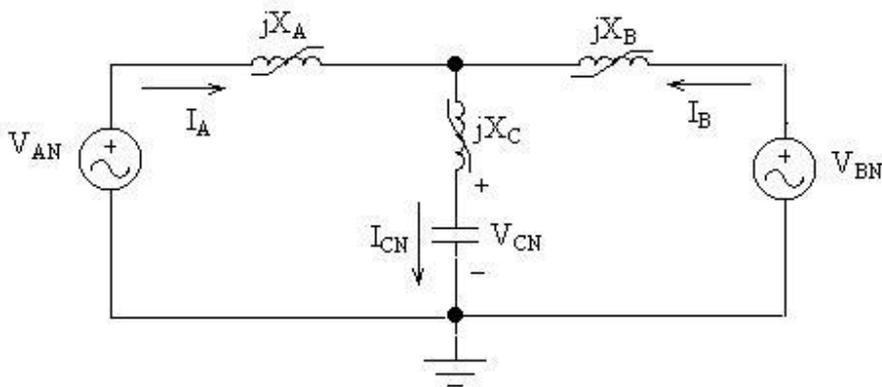
En este segundo caso, los valores de los voltajes de las líneas abiertas a tierra son mayores, que cuando sólo una fase está desconectada de la fuente, y, en ocasiones pueden llegar a ser hasta de cuatro veces el voltaje normal de línea a neutro del sistema, lo cual depende de las características del circuito.

3.2.3 Caso III. Una línea abierta, transformadores en conexión estrella.

Cuando se tiene una conexión estrella, en el lado del primario y una de las fases está desconectada a la fuente de alimentación trifásica, existe una trayectoria a tierra a través de la capacitancia, equivalente del alimentador de la línea abierta, tal como se ilustra en el modelo de la figura 30.

Representando únicamente las trayectorias LC del sistema de distribución, se obtiene el circuito de la figura 46.

Figura 46. Circuito de las trayectorias LC para el caso III.

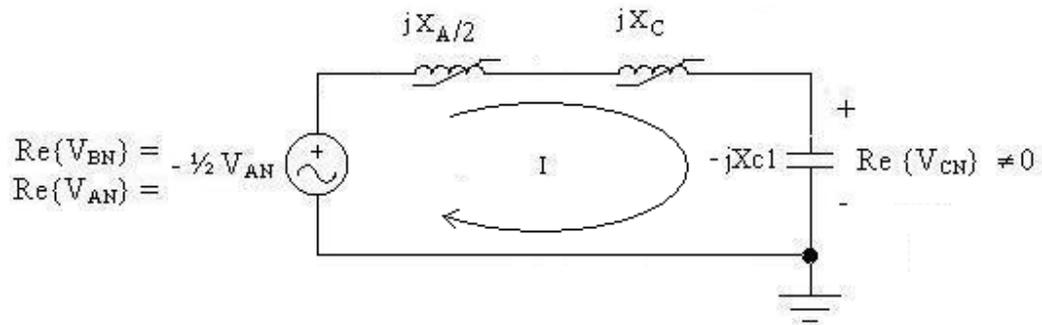


Los voltajes V_{AN} y V_{BN} , aplicados al banco de transformadores, son los voltajes nominales de línea a tierra de la fuente, tienen igual magnitud y están desfasados 120° entre sí, mientras que el voltaje V_{CN} , en la línea abierta del banco es desconocido. Este voltaje depende de la corriente I_{CN} , que fluye hacia tierra a través de la capacitancia X_{c1} .

Como se vio en el primer caso, la parte real de los voltajes de las fuentes son los únicos que provocan la corriente que fluye hacia tierra, a través de la reactancia X_{c1} , por lo que se analizará este caso conforme a este concepto.

Es claro notar que la corriente I_{CN} es igual a la corriente de la reactancia X_c , y ésta, a su vez, es el doble que la corriente en X_A o en X_B , por lo que las reactancias X_A y X_B no operan en el mismo punto de la curva de magnetización que la reactancia X_c .

Figura 47. Circuito equivalente simplificado para el análisis del caso III.



En la figura 47, se encuentra el circuito simplificado para este caso, en donde $X_A/2$ indica el paralelo de las reactancias X_A y X_B (operan de igual forma), en serie con X_C y X_{c1} .

El voltaje V_{CN} tiene, entonces, sólo la componente, que se debe a la parte real de la fuente de voltaje, y el voltaje V_{AN} es la magnitud del voltaje normal de línea a tierra y es conocida e igual al valor nominal aplicado a cada transformador dividido entre $\sqrt{3}$.

Debido a la no linealidad existente entre el voltaje y la corriente en un transformador, X_A y X_C no pueden ser conocidas fácilmente. Este inconveniente hace que el análisis utilizado para el caso delta no pueda ser utilizado; en este caso, por eso se utilizará el siguiente procedimiento para encontrar la relación voltaje de línea abierta V_{CN} en función de X_{c1}/X_m .

1. A partir de la curva de magnetización del transformador, se asumirá un valor de voltaje en la reactancia X_c . Este valor será negativo, en el caso de que el sistema sea predominantemente inductivo, y positivo cuando sea predominantemente capacitivo.

2. Encontrar la corriente correspondiente a la reactancia X_c , con base en la curva de magnetización. Esta corriente se denominará como la corriente del sistema I .
3. Utilizar $\frac{1}{2} I$ para encontrar el voltaje en la reactancia X_A , por medio de la curva de magnetización:
4. Utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff, se encontrará el voltaje de línea abierta V_{CN} , de la siguiente forma:

$$V_{CN} = V_{AN} - (V_{XC} + V_{XA}) \quad (3.11)$$

5. Para efectos de mejor visualización de los resultados, se dividirá el voltaje en la línea abierta, entre el voltaje nominal de línea a tierra (V_{AN}), y así obtener un valor por unidad.
6. Encontrar el valor de X_{c1} , dividiendo el valor de V_{CN} encontrado, entre la corriente del sistema, que se encuentra en el paso 2.

$$X_{c1} = -V_{CN} / I \quad (3.7)$$

7. Hasta aquí, ya se puede graficar un punto de la gráfica. Se repite este procedimiento cuantas veces sea conveniente.

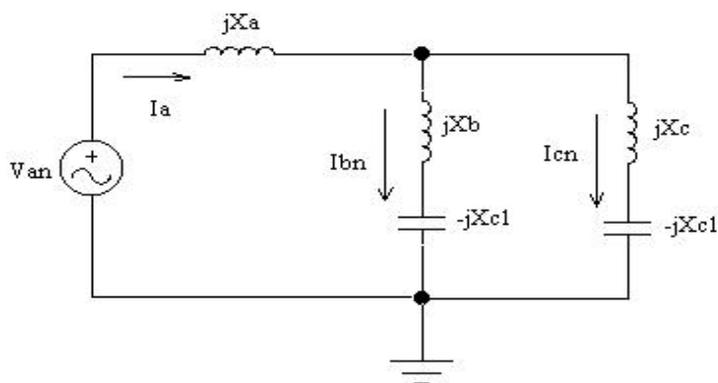
3.2.4 Caso IV. Dos líneas abiertas, con transformadores en conexión estrella.

Cuando se tiene una conexión estrella y se mantiene sólo una fase conectada a la fuente de alimentación trifásica, existen dos trayectorias a tierra, a través de las capacitancias equivalentes de las líneas abiertas, tal como se ilustra en la figura 31.

Si los efectos capacitivos a tierra de las líneas abiertas son iguales y si las reactancias de los transformadores X_A , X_B y X_C son idénticos, entonces las corrientes que fluyen de la línea en servicio hacia tierra por las trayectorias de las corrientes I_{CN} e I_{BN} deben ser exactamente iguales, por lo que el potencial en las líneas abiertas tiene que ser el mismo.

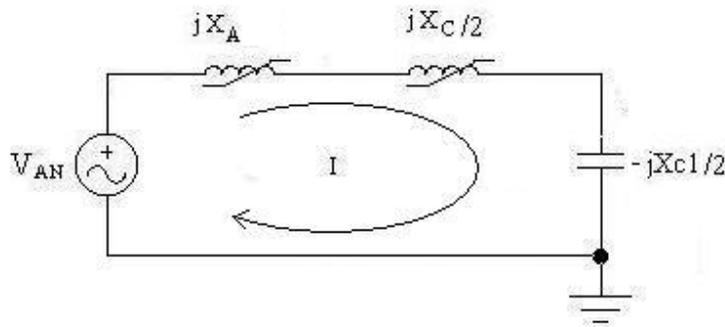
Las trayectorias "LC-serie", por donde se han creado estas trayectorias, se muestran en la figura 48.

Figura 48. Circuito equivalente del sistema de distribución que muestra dos trayectorias LC hacia tierra



Es claro notar que la corriente I_{CN} es igual a la corriente I_{BN} y ésta a su vez es el doble que la corriente en I_A , por lo que las reactancias X_A y X_B no operan en el mismo punto de la curva de magnetización que la reactancia X_A .

Figura 49. Circuito equivalente simplificado para el caso IV.



En la figura 49, se encuentra el circuito simplificado para este caso, en donde $X_C/2$ indica el paralelo de las reactancias X_B y X_C (operan de igual forma), en serie con $X_C/2$ y X_A .

Si se toma al voltaje de alimentación como referencia, $V_{AN} = V_{AN} \angle 0^\circ$ V, la corriente del sistema será entonces:

$$I = \frac{2V_{AN}}{2X_{eq} - X_C} \quad (3.27)$$

En donde $X_{eq} = X_A + \frac{1}{2} X_C$.

Debido a la no linealidad existente entre el voltaje y la corriente en un transformador, X_A y X_C no pueden ser conocidas fácilmente. Se utilizará el siguiente procedimiento para encontrar la relación voltaje de línea abierta V_{CN} , en función de X_C/X_m .

1. De la curva de magnetización del transformador, se asume un valor de voltaje en la reactancia X_c , respecto a V_{AN} . Este valor será negativo, en el caso en que el sistema sea predominantemente inductivo, y positivo cuando sea predominantemente capacitivo.
2. Encontrar la corriente correspondiente a la reactancia X_c , con base en la curva de magnetización. Esta corriente será la corriente del sistema dividido 2, y con ella se puede entonces encontrar la reactancia X_c

$$X_c = \frac{2V_{xc}}{I} \quad (3.28)$$

3. Utilizar I para encontrar el voltaje en la reactancia X_A , por medio de la curva de magnetización:

$$X_A = \frac{V_{XA}}{I} \quad (3.29)$$

4. De la ecuación de la corriente de la fórmula 3.27, despejar X_{c1} , sustituir los valores de las reactancias X_A y X_c en la reactancia X_{eq} , y encontrar el valor de X_{c1} .

$$X_{c1} = \frac{V_{AN}}{I} + 2X_{eq} \quad (3.30)$$

5. Determinar la relación X_{c1}/X_m , dividiendo el valor obtenido en el paso anterior, entre el valor de la reactancia de magnetización nominal X_m .

6. Encontrar el valor de V_{CN} , multiplicando el valor de X_{c1} encontrado en el paso 4, por la corriente del sistema encontrada en el paso 2. Luego encontrar el valor en por unidad de este dividiéndolo entre V_{AN} .

$$V_{CN} = X_{c1} \times I \quad (3.12)$$

$$V_{CN} \text{ (PU)} = V_{CN}/V_{AN} \quad (3.13)$$

7. Hasta aquí ya se puede graficar un punto de la gráfica. Se repite este procedimiento cuantas veces sea conveniente.

3.3 Análisis cualitativo del transitorio de la ferorresonancia

La no linealidad en el núcleo de los transformadores hace, bajo ciertas conexiones, que se pueda combinar la saturación magnética con efectos resonantes, lo que da lugar al fenómeno de ferorresonancia.

La primera consecuencia que origina la saturación de transformadores es la deformación de la forma de onda de la corriente de excitación, que incrementa excesivamente los valores máximos de ésta.

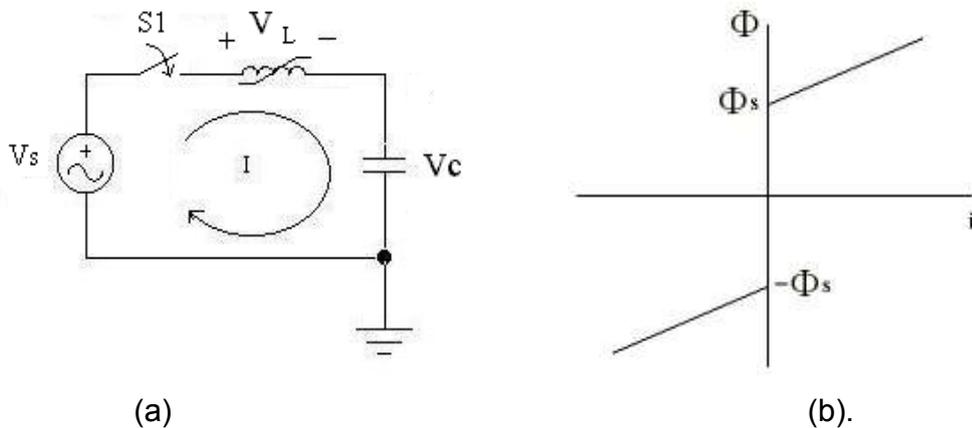
Si existe deformación en la forma de onda de corriente, entonces también las ondas de voltaje de los elementos del circuito LC-serie se alteran. Dado que la fuente de alimentación es parte de un sistema muy sólido, su voltaje permanece constante en forma, frecuencia y magnitud, independientemente de lo que ocurra en el circuito.

En esta subsección, se analizan cualitativamente las formas de las ondas de los voltajes y de la corriente en el circuito LC serie no lineal. Las simplificaciones que se efectúan a continuación facilitan el planteamiento de las ecuaciones diferenciales y la apreciación de las soluciones correspondientes.

Las aproximaciones, bajo las que se estudia el transitorio que precede al estado estable, son:

1. El circuito como el de la figura 50 (a) tiene la curva de magnetización simplificada de la figura 50 (b).

Figura 50. Circuito básico para estudiar el transitorio de ferorresonancia



2. El interruptor $S1$ se cierra en $t = 0$, y en ese instante el voltaje de la fuente V_s pasa por cero, esto es:

$$V_s = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \text{sen}(wt) = 0$$

3. El capacitor se encuentra originalmente sin carga:

$$V_C(0^-) = V_C(0^+) = 0$$

4. No existe flujo residual en el núcleo de la inductancia no lineal:

$$\Phi(0) = 0$$

5. Si el valor eficaz de la fuente de voltaje se aplicara directamente a las terminales de la inductancia, ésta operaría en la rodilla de la curva de magnetización, esto es, en $\Phi = \Phi_s$.
6. Todo efecto resistivo puede ser despreciado, si se considera que los valores de las reactancias capacitiva y de magnetización tienen una impedancia mucho mayor que la de los conductores.

Así pues, para $t \geq 0$ se debe cumplir con la Ley de Kirchhoff de voltajes:

$$V_s = V_L + V_c, \quad (3.14)$$

donde V_s , V_L y V_c son los voltajes de la fuente, la inductancia y la capacitancia en función del tiempo, respectivamente.

El término de la izquierda corresponde al voltaje de un barraje infinito y obedece a la ecuación (3.14) en todo tiempo.

El primer término del lado derecho de la ecuación de voltajes cumple con la Ley de Faraday, esto es:

$$V_L = e(t) = N \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.15)$$

Aquí $e(t)$ representa el voltaje inducido en la inductancia y N el número de espiras que tiene enrollado el núcleo. El capacitor puede asumirse lineal, es decir:

$$V_C = \frac{1}{C} \int i \cdot dt + V_C(0) \quad (3.16)$$

En la curva de magnetización de la figura 50 (b), la corriente vale cero, mientras el flujo sea menor que Φ_s , y si no circula corriente por el circuito y el capacitor se encuentra originalmente descargado, entonces el voltaje de la inductancia debe ser igual al de la fuente. Matemáticamente:

para $t \geq 0$, si $i(0)=0$ y $V_C(0)=0$, entonces:

$$V_L = V_s$$

o sea:

$$N \frac{d\phi}{dt} = \sqrt{2} V_{rms} \text{sen}(wt) \quad (3.17)$$

despejando el flujo e integrando de 0 a t:

$$\Phi = \Phi_{\max} (1 - \cos wt) \quad (3.18)$$

donde $\Phi_{\max} = \frac{V_{rms}}{4.44 \cdot f \cdot N}$

En la figura 51 (a), se observa el voltaje de la fuente V_s y el flujo en función del tiempo mientras no circula corriente por el circuito.

En $t = t_1$, el voltaje ha alcanzado su valor máximo y, por lo tanto, el flujo ha alcanzado su valor de saturación Φ_s . A partir de este instante, cualquier incremento de flujo traerá como consecuencia circulación de corriente en el circuito y el capacitor podrá empezar a cargarse; es decir, si $t \geq t_1$ entonces:

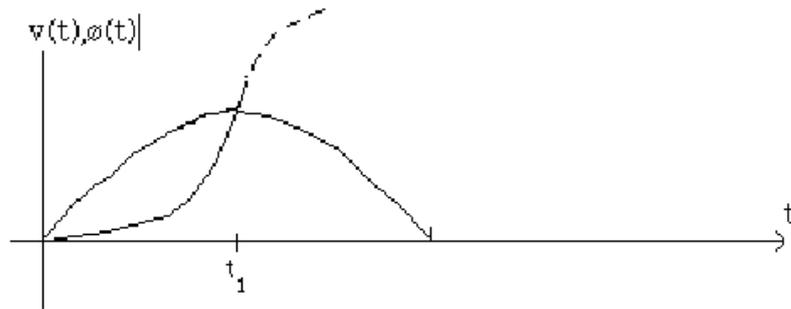
$$V_s = V_L + \frac{1}{C} \int i dt, \quad (3.19)$$

de manera que la inductancia ya no tiene aplicado el voltaje V_s directamente a sus terminales, y la forma de onda de flujo correspondiente a la ecuación (3.18) ya no es válida para $t \geq t_1$; por esta razón, la parte que no es válida se ha dibujado con líneas punteadas en la figura 51 (a).

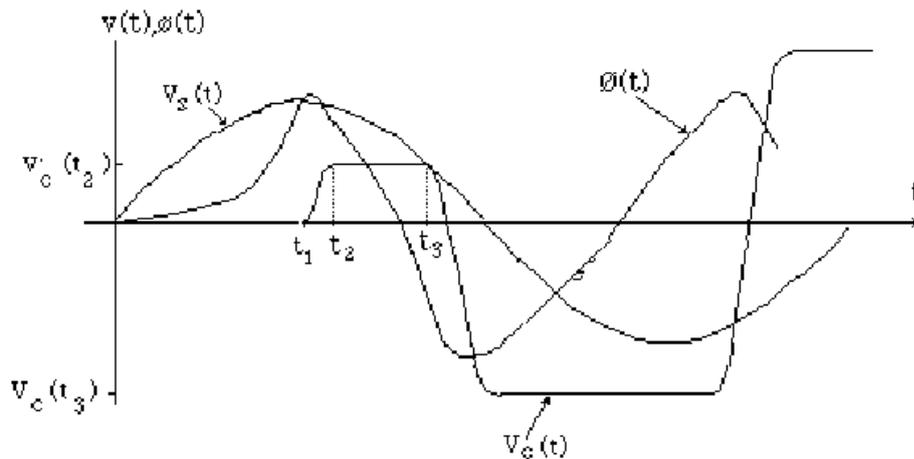
Ahora, el circuito se puede considerar lineal, ya que la pendiente de la curva de magnetización es constante. El circuito LC-serie tiene aplicado repentinamente el voltaje $V_s(t_1)$, a través de sus terminales. Si $V_s(t)$ se mantuviera constante e igual a $V_s(t_1)$, entonces el voltaje en el capacitor oscilaría a $2V_s(t_1)$, en la mitad del periodo natural de oscilación del circuito LC.

Sin embargo, dado que V_s es senoidal y decrece durante el intervalo t_1 a t_2 a un valor $V_s(t_2)$, el capacitor alcanzará un valor menor que $2V_s(t_1)$, tal como se ilustra en la figura 51 (b).

Figura 51. Respuesta transitoria del circuito LC serie no lineal



(a) Voltaje de la fuente y flujo del transformador en el primer medio ciclo



(b) Voltaje de la fuente, flujo en el transformador y voltaje en el capacitor

Durante el medio ciclo en que crece el voltaje del capacitor, también existe un medio ciclo de corriente circulante. En $t = t_2$, la corriente ha completado ese medio ciclo y se encuentra nuevamente en cero, indicando que el voltaje del capacitor no puede completar su ciclo de oscilación, sino hasta que la corriente cambie de dirección, pero la corriente no puede hacerse negativa, sino cuando el flujo haya alcanzado su valor negativo de saturación.

El flujo correspondiente al intervalo t_1 a t_2 tuvo que llegar a un valor máximo y regresar al valor de saturación Φ_s , cuando la corriente volvió a cero.

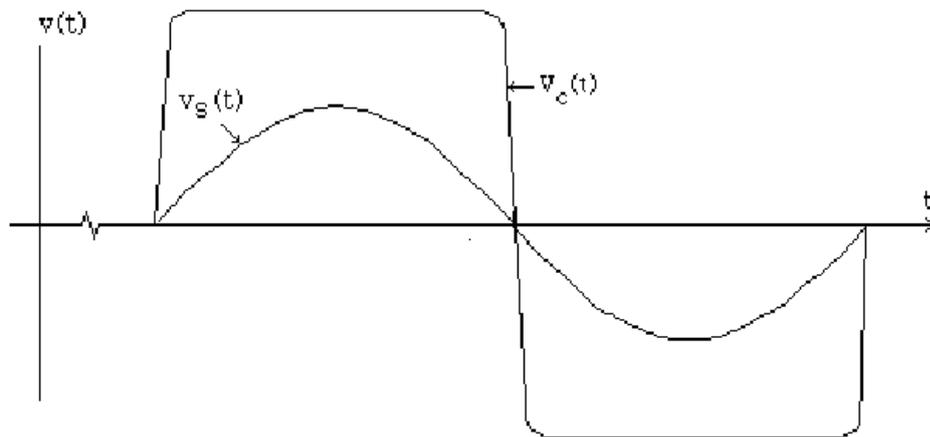
En la figura 52, se aprecia que el voltaje atrapado en el capacitor da lugar a un valor mucho mayor de voltaje en las terminales de la inductancia durante el medio ciclo negativo siguiente del voltaje aplicado. Esto hace que el flujo alcance su valor negativo de saturación en un tiempo t_3 . En este punto, el voltaje del capacitor V_C oscila en una forma similar a la del circuito LC con un voltaje $V_s(t_3)$, repentinamente aplicado a sus terminales y con un valor inicial de voltaje $V_c = V_C(t_3) = V_C(t_2)$.

La oscilación dura nuevamente medio ciclo de la frecuencia natural de oscilación del circuito y conlleva su correspondiente medio ciclo de corriente. La oscilación se detiene nuevamente, cuando la corriente trata de hacerse positiva, ya que no puede lograrlo sino hasta que el flujo alcance el valor positivo de saturación.

Nótese que el capacitor, por tener carga inicial en esta segunda oscilación, ha llegado a un valor mayor de voltaje, en magnitud, respecto al precedente medio ciclo.

El proceso continúa hasta que, eventualmente, el voltaje del capacitor se convierte en una onda cuadrada en fase con el voltaje de la fuente (figura 53); esto corresponde a la condición de estado estable de ferorresonancia.

Figura 52. Respuesta de estado estable en ferorrresonancia



El análisis de un transformador más aproximado a la realidad requiere que se reconsideren las simplificaciones; en particular, las de más interés son las concernientes al flujo residual, en momento en que se cierra el interruptor S1 y a la curva de magnetización del núcleo.

Cuando existen efectos capacitivos importantes, la corriente se encuentra adelantada 90° del voltaje. El interruptor abre cuando la corriente pasa por cero, indicando una ausencia de flujo residual, pero en este momento el voltaje en el capacitor es máximo, y la energía almacenada en él es descargada a través de la reactancia de magnetización del transformador, lo cual puede hacer que el flujo llegue a un nivel de saturación, lo cual provoca que un flujo residual en el transformador cuando se intente reenergizar.

La presencia de flujo residual tiene dos efectos en el fenómeno de ferorrresonancia: cambiará la duración del transitorio y hará que se alcance un nivel de saturación en el transformador con la corriente de energización correspondiente (corriente de "inrush").

El hecho de considerar que el voltaje se aplica en el instante en que cruza por cero, es conveniente para la simplificación del análisis, ya que produce una onda de flujo con máxima compensación; sin embargo, el momento en que se aplica el voltaje de la fuente es muy aleatorio en la práctica. Cuando se cierra el interruptor en valores de voltaje diferentes de cero, entonces el transitorio es de mayor duración.

El punto de saturación puede ser alcanzado más tarde en el primer medio ciclo de voltaje de la fuente, por lo que el voltaje del capacitor quizás llegue a un valor menor que $V_c(t_2)$, y tal vez este voltaje no logre que la inductancia alcance el punto de saturación negativo en el siguiente medio ciclo; en tal caso, el voltaje del capacitor permanecerá constante por varios ciclos, hasta que se pueda lograr el punto de saturación negativo y se logre que la corriente circule en la dirección contraria; es hasta este momento en que empezará a formarse la forma de onda cuadrada del capacitor. Por lo anterior, se deduce que la duración del transitorio varía, según el momento en que se ha aplicado el voltaje de la fuente.

Tomando en cuenta la curva de magnetización real de un transformador, se puede notar que antes de alcanzar el nivel de saturación, circulará por el circuito una pequeña corriente, que podrá empezar a cargar al capacitor. No obstante, el valor de esta corriente es tan pequeño que permite pensar que la simplificación efectuada al respecto es válida.

4. MITIGACIÓN DE LA FERRORESONANCIA

Este estudio se basará en los siguientes tres puntos focales sobre eliminación o mitigación de la ferorrresonancia.

1. Evitar que los valores de las reactancias de los transformadores y de los cables de alimentación sean de valores capaces de producir ferorrresonancia.
2. Evitar que se formen trayectorias LC-no lineales.
3. Insertar componentes resistivas al sistema de distribución, para atenuar los sobrevoltajes producidos por la ferorrresonancia.

4.1 Parámetros de alteración

Como se ha venido analizando en los capítulos anteriores, el sistema de distribución está integrado por reactancias inductivas (no lineales), reactancias capacitivas, y asimismo por resistencias proporcionales a las pérdidas del sistema y que, por su magnitud, se han tomado como despreciables.

Básicamente los parámetros que influyen directamente en la aparición de la ferorrresonancia son la reactancia de magnetización de los transformadores y la reactancia capacitiva de los cables de alimentación. La resistencia, por otro lado, es un parámetro que puede atenuar el fenómeno, mas no eliminarlo.

4.1.1 Reactancia de magnetización de los transformadores

La reactancia de magnetización de los transformadores depende en forma directa de las características constructivas de los mismos y, a partir de esto, este parámetro no puede ser modificado a efecto de eliminar la ferorrresonancia.

4.1.2 Reactancia capacitiva de los cables de alimentación

Al analizar el comportamiento del voltaje de línea abierta versus la relación X_{c1}/X_m , claramente se puede observar que el fenómeno de ferorrresonancia se torna menos significativo, al hacer que la reactancia X_{c1} sea mayor que la reactancia X_m , (según se ha venido tratando a través de nuestro análisis).

Lo anterior indica que al modificar la reactancia capacitiva a valores tales que, $X_{c1} \gg X_m$, se evita en gran medida la ferorrresonancia y los efectos consecuentes del fenómeno.

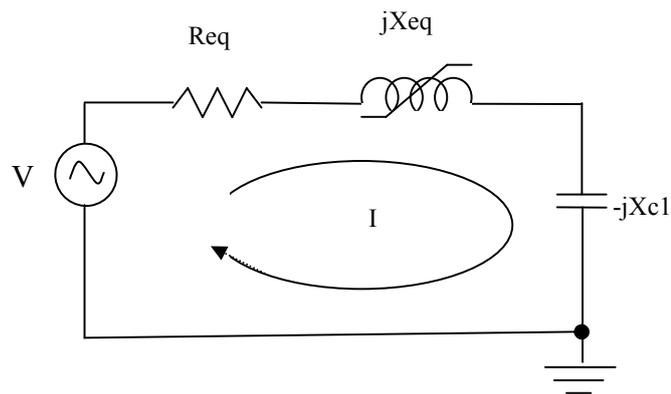
La reactancia capacitiva, debida a los cables de alimentación, es un parámetro que se puede alterar, que está íntimamente relacionado con la longitud, la sección del conductor y el voltaje para el cual están diseñados los cables de alimentación.

4.1.3 Resistencia

Cuando un circuito RLC-no lineal, como el mostrado en la figura 53, opera en ferorrresonancia, la corriente en el mismo es máxima y queda limitada únicamente por la resistencia. Esta corriente I_{MAX} puede ser limitada hasta un valor igual al voltaje de la fuente sobre la resistencia (V/R), con lo cual asegura

que los voltajes en las reactancias quedan limitados a un valor máximo, determinado por el valor de las mismas y esta corriente máxima.

Figura 53. Circuito RLC-no lineal



En los sistemas de distribución, las resistencias propias son de valores tales, que no afectan en forma significativa a la corriente del sistema y, por tanto, al fenómeno de la ferorrresonancia. La opción en este caso es introducir resistencia o resistencias al sistema con el objeto de atenuar los efectos de este fenómeno.

4.2 Cálculo de la longitud crítica de los cables de alimentación

Una de las medidas remediales, para evitar sobrevoltaje por ferorrresonancia, es la de asegurar que la reactancia capacitiva sea mucho mayor que la reactancia inductiva; esto se logra limitando la longitud de los alimentadores a un valor que pueda utilizarse en la conexión de transformadores, sin que tenga el riesgo de sobrevoltajes por este fenómeno.

Para el cálculo de dicha longitud, se requiere definir cuál debe ser la relación mínima entre la reactancia capacitiva del cable y la reactancia inductiva del transformador. Esto se hará con base a la elaboración de gráficas que describen el comportamiento del voltaje de línea abierta versus X_{c1}/X_m .

Obteniendo este dato, es fácil encontrar la longitud mínima del cable en donde el sistema puede entrar en ferorresonancia. Sabiendo, por tanto, que al aumentar esta longitud, se aumenta la capacitancia total del cable y el riesgo de que se produzca este fenómeno, en el momento de haber condiciones de línea abierta.

Se utilizará el método siguiente para determinar la longitud crítica:

1. Por medio de la gráfica X_{c1}/X_m versus voltaje de línea abierta, se determina la relación $X_{c1}/X_m = K$, donde esta empieza a tener un solo punto de operación en el sistema de distribución.
2. Determinar la reactancia de magnetización del transformador de la siguiente forma:

$$X_m = \frac{V_{nom}}{I_{NOM}(vacío)} \quad (4.1)$$

3. Determinar la razón de cambio de la capacitancia respecto a la longitud.
4. Determinar la longitud del cable de la siguiente forma:

$$l = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C1 \cdot X_c} \quad (4.2)$$

En donde: f es la frecuencia de la fundamental en Hz
 $C1$ es la capacitancia distribuida en F/m
 l es la longitud del cable en metros
 Xc es la reactancia capacitiva

5. Sustituir la relación de $k \cdot X_m = X_c$ en la relación anterior y determinar la longitud máxima del cable:

$$l = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C1 \cdot X_m \cdot K} \quad (4.3)$$

Para grandes valores de X_{c1}/X_m , el voltaje de línea abierta se aproxima al de la fuente de alimentación y el voltaje en el transformador se aproxima a cero; este es el caso donde la capacitancia del sistema es muy pequeña, y por tanto la longitud.

Para valores bajos de X_{c1}/X_m (grandes longitudes de los alimentadores), los voltajes pueden alcanzar valores muy altos, debido a que el núcleo del transformador está saturado y una condición de verdadera resonancia es alcanzada entre X_{c1} y la reactancia de magnetización del transformador.

4.3 Conexiones que evitan la aparición de la ferorrresonancia

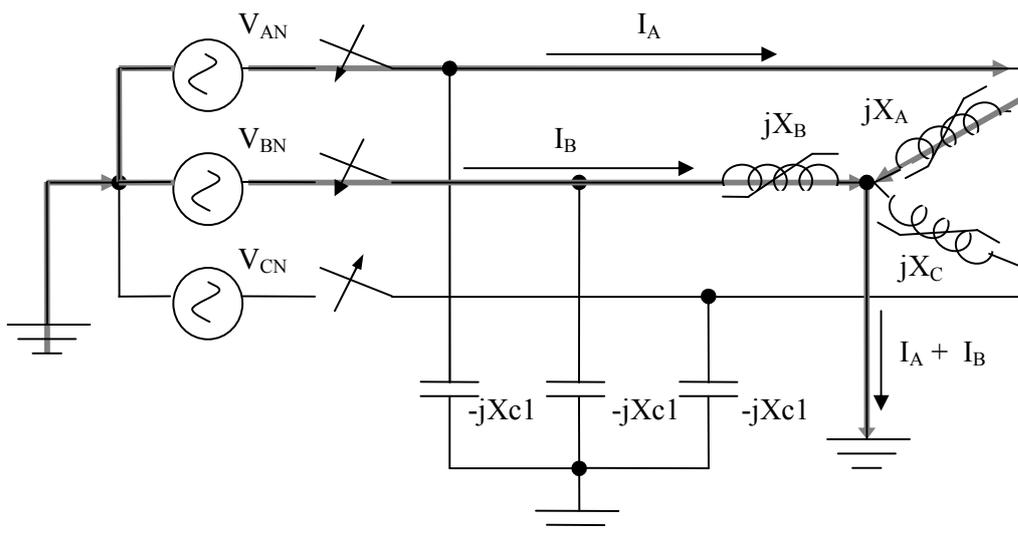
Que la ferorrresonancia ocurra durante condiciones de línea abierta depende en gran parte de las conexiones usadas en el banco de transformadores. A continuación, se detallarán aspectos importantes acerca de conexiones que disminuyen la probabilidad de ferorrresonancia.

4.3.1 Conexiones que utilicen estrella aterrizada en el circuito primario

Por razones prácticas, la ferorresonancia no ocurrirá cuando se usan conexiones con estrella conectada a tierra, debido a que proporcionan una ruta directa a las corrientes, que en un momento dado pueden circular por las inductancias saturables de los transformadores y las capacitancias de línea abierta, asimismo el voltaje en las líneas abiertas habría de ser limitado al voltaje de tierra del sistema y eliminar así la posibilidad del fenómeno.

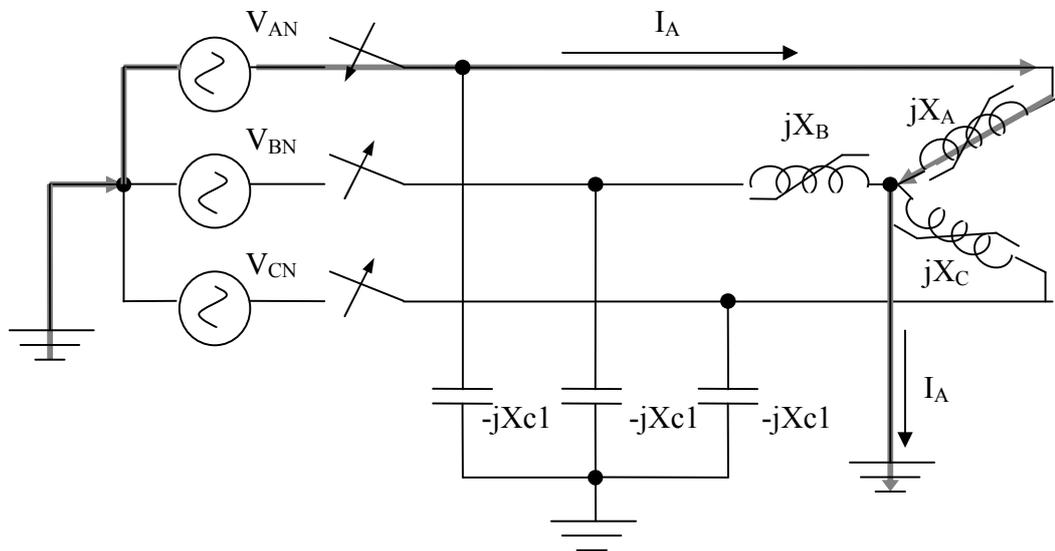
Como se puede ver en la figura 54, en el momento de ocurrir el caso de una línea abierta, la corriente que alimenta la reactancia X_A y X_B circula directamente hacia tierra y no por la capacitancia de la línea de alimentación abierta.

Figura 54. Una línea abierta, transformadores en conexión estrella aterrizada



Asimismo en la figura 55, se puede observar que la utilización de la conexión estrella aterrizada, asegura que la corriente no circule por la capacitancia de las líneas abiertas, para evitar en forma eficiente la aparición de trayectorias LC-serie no lineales.

Figura 55. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella aterrizada



Las conexiones con estrella aterrizada, en el lado del primario, son adecuadas para fuentes de 4 hilos efectivamente conectadas a tierra únicamente. Para un servicio trifásico de 3 hilos o 4 hilos conectado a tierra, especialmente para establecimientos o edificios que utilicen cargas puramente monofásicas.

4.3.1.1 Desventajas de la conexión estrella aterrizada - delta

El conectar a tierra el neutro del primario de esta conexión crearía una fuente de puesta a tierra para el sistema primario. Esto podría someter al transformador a severas sobrecargas, durante una perturbación del primario del sistema, o desbalance de carga.

El resultado de todos estos efectos es que el banco se ve forzado a conducir corrientes adicionales a su corriente normal de carga, lo cual reduce su propia capacidad respecto a la carga. La suma de las corrientes es, en muchas ocasiones, suficiente para quemar el banco.

Cuando se utilizan conexiones estrella-triángulo y el punto estrella, no se conecta al neutro del circuito, un conductor desconectado en el circuito trifilar del primario convierte el banco en un conjunto con entrada y salida monofásica. Si el banco alimenta circuitos de motores, se producirán sobrecorrientes peligrosas en cada uno de los circuitos de motores trifásicos. La corriente que pasa por dos de los conductores del circuito alimentador de motores será de igual magnitud, mientras que la del tercer conductor será igual a la suma de dichas corrientes.

Si por el contrario, se abre cualquier fase del circuito de alimentación primario, el banco queda automáticamente conectado en estrella abierta-triángulo abierto y continúa suministrando energía trifásica con una capacidad del 57% de su carga nominal.

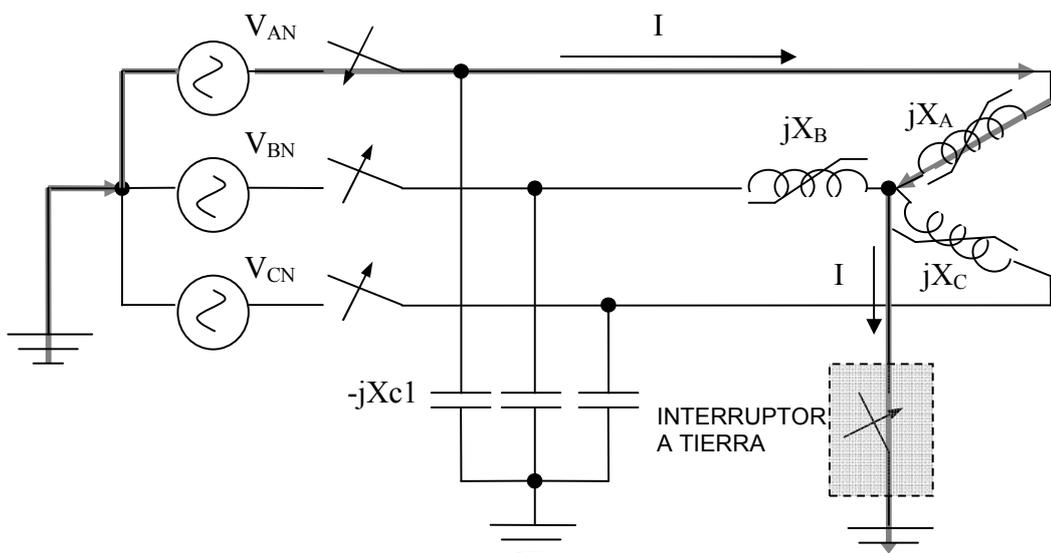
Lo anterior indica que mitigar la Ferrorresonancia aterrizando la estrella de una conexión estrella-triángulo, muchas veces no es conveniente debido a los requerimientos de seguridad del sistema.

4.3.1.2 Conexión temporal a tierra del punto estrella

Probablemente una de las mejores soluciones para prevenir la ferorrresonancia es la adición de una tierra temporal en el punto estrella del banco de transformadores durante la operación de maniobras de switcheo. Esto enlazaría el neutral a tierra, eliminando la condición de neutro flotante que causa los sobrevoltajes en las líneas abiertas.

Esto podría ser logrado con un interruptor instalado entre el punto estrella y la tierra operado normalmente abierto, como se ilustra en la figura 56. Cuando las condiciones existan, quien requiera energizar o desenergizar el banco de transformadores, podría simplemente cerrar este interruptor, antes de realizar las maniobras de switcheo correspondientes.

Figura 56. Conexión temporal a tierra del punto estrella del banco de transformadores

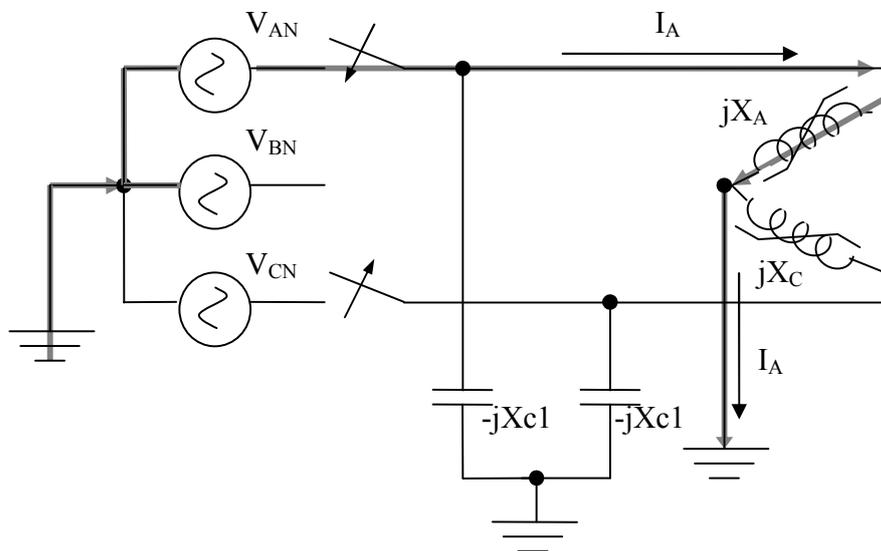


Después de que el banco es energizado y operando, la conexión a tierra podría desconectarse y eliminar los problemas previamente discutidos sobre la operación de banco de transformadores en conexión estrella aterrizada /triángulo.

4.4 Conexión estrella abierta aterrizada – delta abierta

La utilización de esta conexión elimina la posibilidad de la ferorresonancia, proporcionado una ruta directa a tierra de las corrientes que en un momento dado podrían circular por trayectorias LC-serie no lineales, como se muestra en la figura 57.

Figura 57. Una línea abierta, transformadores en conexión estrella abierta aterrizada



Asimismo, esta conexión puede ser tomada en cuenta para sustituir en cierta medida a la conexión estrella-triángulo, ya que puede suministrar energía monofásica y trifásica.

Cuando dos unidades de la misma potencia nominal en kVA se usan para alimentar únicamente una carga trifásica balanceada, la capacidad combinada de las dos unidades debe ser 115 por ciento de la carga trifásica, si la carga en cada transformador no excederá la capacidad de placa.

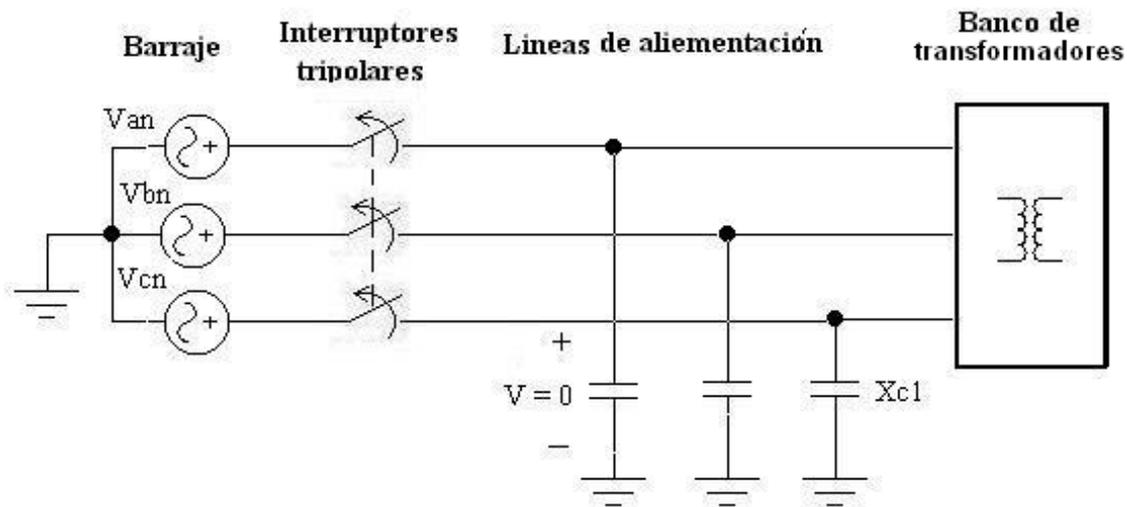
4.5 Recomendaciones para la realización de maniobras de switcheo

Esto se refiere a maniobras de switcheo a las operaciones de cierre y/o apertura de seccionadores, interruptores o dispositivos similares, que en un momento dado pueden dar o dejar sin servicio al sistema de distribución.

4.5.1 Aplicación de dispositivos de seccionamiento tripolar

La utilización de dispositivos de switcheo tripolar en el sistema de distribución para la realización de maniobras de energización o desenergización, evita de forma eficaz que se den condiciones de una o dos líneas abiertas, eliminando con ello la formación de trayectorias LC-serie no lineales, que dan lugar a la aparición de la ferorresonancia, como lo muestra la figura 58.

Figura 58. Representación del sistema de distribución, utilizando interruptores tripolares



Un punto importante es que la acción de fusibles, durante el apareamiento de fallas en las líneas de alimentación, crea condiciones de línea abierta de forma impredecible. Es recomendable por ello la utilización de seccionadores tripolares, bajo carga combinados con fusibles, de manera que la fusión de un fusible produzca la apertura del seccionador.

Esto es, que si en una de las fases se produce una falla, ésta quedará interrumpida por la acción del fusible e inmediatamente después las fases restantes se interrumpen tras la apertura del seccionador.

De esta forma, se asegura la conexión o desconexión de las líneas de alimentación a un mismo tiempo, tanto para circunstancias de maniobra, como de falla.

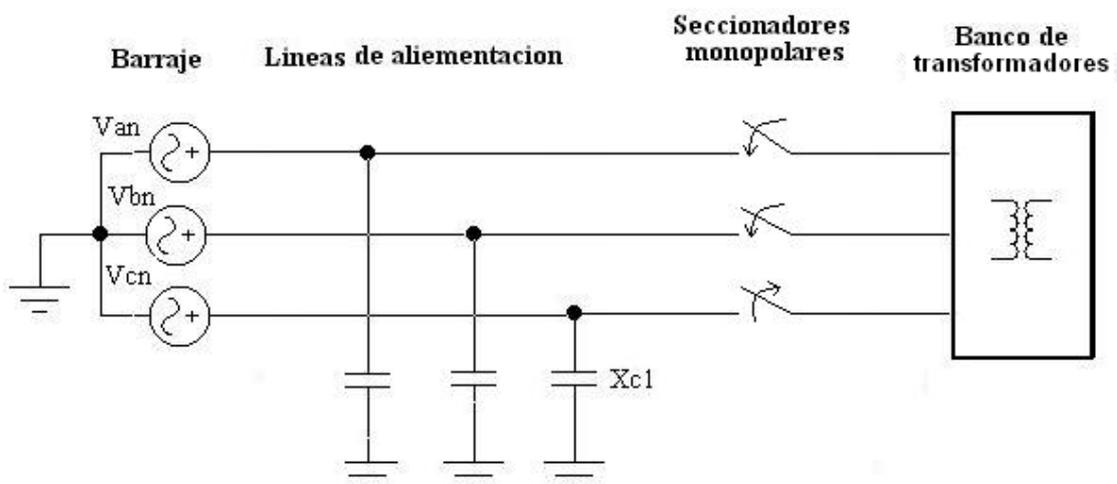
La inconveniencia de este tipo de solución sobreviene en la necesidad de tener continuidad de servicio, aun cuando ocurra una falla en una de las fases, esto por medio de utilizar los bancos de transformadores en conexión abierta.

4.5.2 Seccionamiento monopolar lo más cercano al banco de transformadores

Una buena opción es utilizar las protecciones y equipo de switcheo lo más cerca de las terminales del transformador, con la cual se evita de una forma eficaz que las capacitancias de las líneas de alimentación formen un circuito LC con las inductancias de los transformadores.

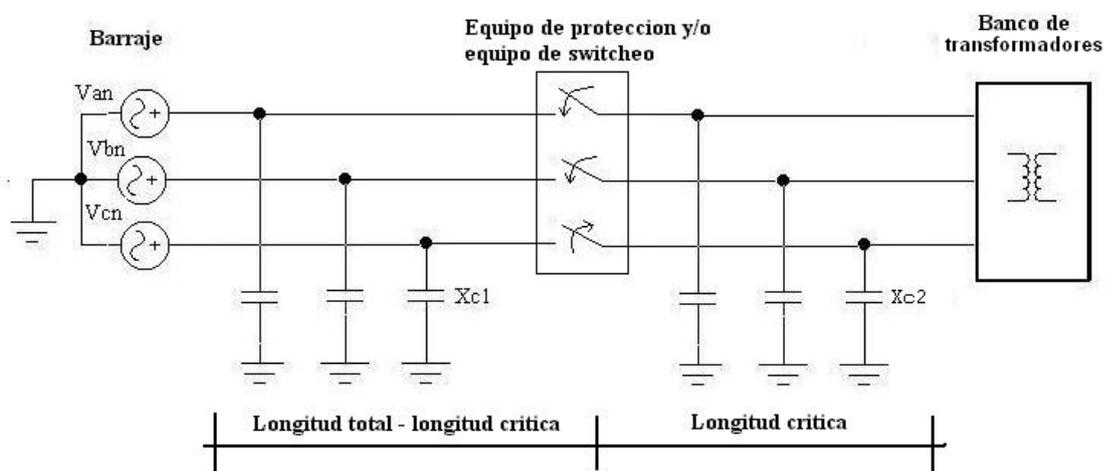
Esto se puede observar fácilmente en la siguiente figura 59, en donde se ve claramente que al ocurrir el caso de línea abierta en una fase; la capacitancia de esta fase no interactúa con las reactancias de los transformadores, ya que se aísla totalmente de esta forma.

Figura 59. Utilización de seccionamiento cercano a las terminales del banco de transformadores



Este método, además, se puede complementar con el cálculo de la longitud crítica del cable, en donde al conocer esta longitud, automáticamente se puede obtener la longitud máxima, en la cual se puede instalar nuestro equipo de protección y/o switcheo, ya que no siempre es posible instalarlos directamente en las terminales del banco de transformadores (ver figura 60).

Figura 60. Instalación del equipo de protección y/o switcheo con base en la longitud crítica del cable de potencia



4.6 Carga resistiva en el secundario de los transformadores

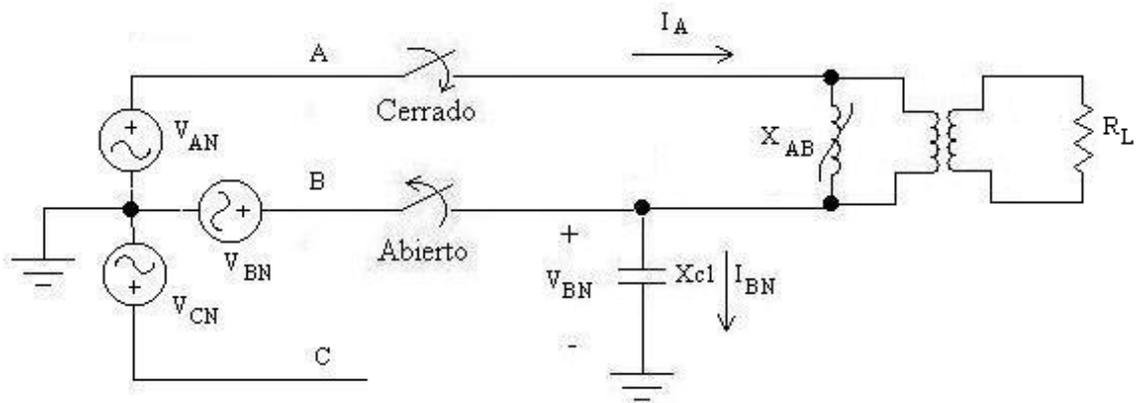
Cuando los transformadores tienen conectados un cierto porcentaje de carga resistiva, respecto a su carga nominal, esto disminuirá la probabilidad que se produzca la ferorrresonancia.

El concepto básico de mitigación de la ferorrresonancia, por medio de carga resistiva conectada en el secundario de los transformadores, consiste en reflejar esta componente resistiva, en las trayectorias LC-serie que, se forman

en lado de media tensión para condiciones de línea abierta y que en un momento dado, puedan producir el fenómeno y sus efectos consecuentes.

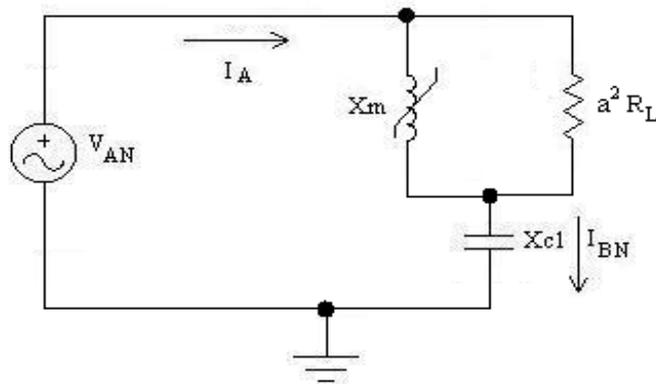
A continuación, se verá como afecta a la ferorrresonancia la inserción de carga resistiva en el secundario de los transformadores. Esto se hará con base en la representación del sistema de distribución monofásico de la figura 61, por simplicidad y para tener una mayor comprensión.

Figura 61. Sistema de distribución monofásico en condición de línea abierta, con carga resistiva en el secundario del transformador



Utilizando el análisis de circuitos eléctricos, se puede obtener un circuito de impedancias, visto desde el lado primario del sistema, el cual se muestra en la figura 61, suponiendo que la reactancia de magnetización es la única relevante del transformador, y asumiendo además que la resistencia de carga (R_L) sea mucho mayor que las reactancias de pérdidas del transformador.

Figura 62. Circuito equivalente de impedancias del sistema de distribución visto desde el lado primario



La impedancia equivalente de este circuito es:

$$Z_{EQ} = a^2 R_L // jX_m - jX_{c1} = \frac{a^2 R_L X_m^2}{a^4 R_L^2 + X_m^2} + j \frac{a^4 R_L^2 X_m}{a^4 R_L^2 + X_m^2} - jX_{c1} \quad (4.4)$$

En donde podemos observar fácilmente que la reactancia inductiva, equivalente disminuye al disminuir la resistencia de carga y con una resistencia equivalente, es claro que la corriente del sistema queda limitada directamente por la misma.

$$I_{MAX} = \frac{a^4 R_L^2 + X_m^2}{a^2 R_L X_m^2} V_{AN} \quad (4.5)$$

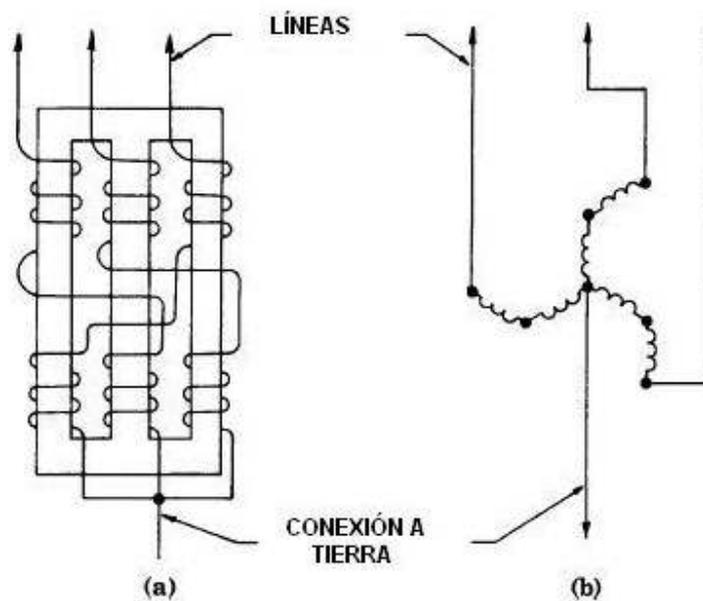
Esta corriente máxima será para el caso de haber resonancia en el sistema ($X_{c1}=X_m$), en donde la impedancia total del sistema es puramente resistiva, por lo que esta resistencia equivalente da la certeza de que la corriente del sistema no podrá superar este valor.

Entonces al aumentar la carga en los transformadores (disminuir la resistencia), hace que la ferorresonancia se dé en el sistema de distribución en menor magnitud, y reduzca en gran medida los efectos destructivos que produce.

4.7 Transformadores de aterrizaje

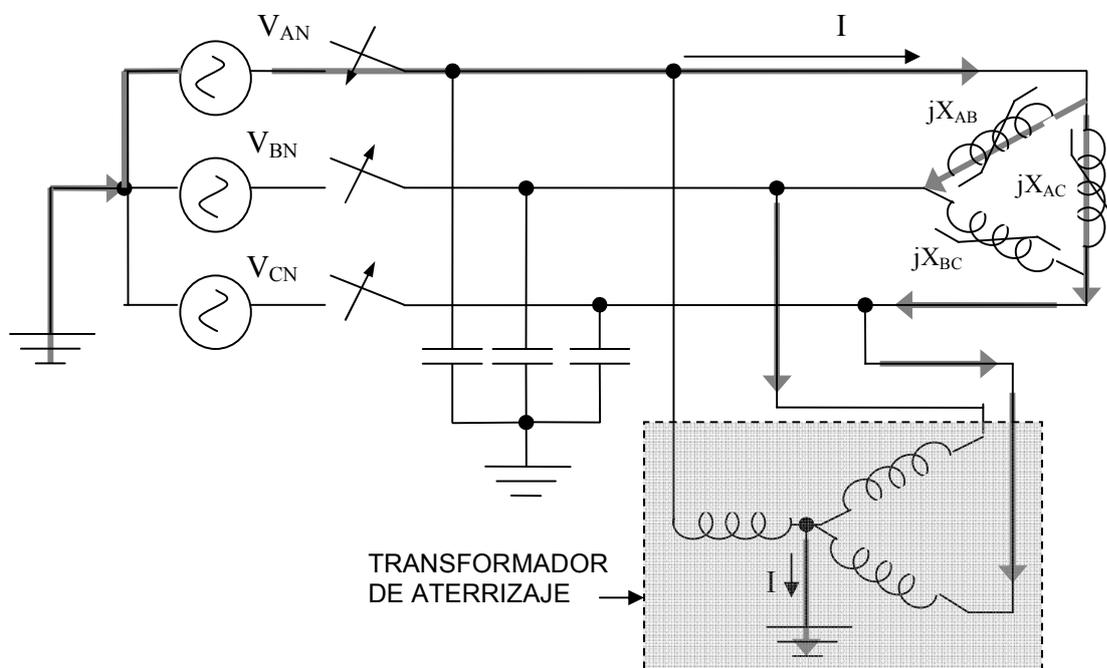
Un transformador de aterrizaje es un transformador ideado principalmente con la finalidad de proporcionar un punto neutro a efectos de puesta a tierra. Puede ser una unidad de tres devanados con el devanado secundario conectado en triángulo y el devanado primario, conectado en estrella que proporciona el neutro o también puede ser un auto-transformador trifásico de un solo devanado, con devanados en estrella interconectada, es decir, en zig-zag, como se muestra en la figura 63.

Figura 63. Transformador de aterrizaje en zig-zag



El objetivo principal de utilizar transformadores de aterrizaje, en el sistema de distribución, es proporcionar una trayectoria a tierra a todas aquellas corrientes que podrían circular, por circuitos LC-serie no lineales en el momento de ocurrir condiciones de línea abierta, tal como se muestra en la figura 64.

Figura 64. Utilización de transformadores de aterrizaje para eliminar la ferorrresonancia



La utilización de transformadores de aterrizaje, para la eliminación de la ferorrresonancia, puede ser aplicado para sistemas con bancos de transformadores, tanto en conexión triángulo, como en estrella.

5. CASO DE ESTUDIO. ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE LA FERRORRESONANCIA EN EL SISTEMA SUBTERRÁNEO DE INTECAP, STA. LUCÍA COTZUMALGUAPA.

El fenómeno de la ferorrresonancia se presentó en el sistema de alimentación subterráneo de las instalaciones del Centro de Capacitación INTECAP, localizado en el kilómetro 93 carretera CA-2, ruta Centro Americana al Poniente, Santa Lucía Cotzumalguapa.

5.1 Sistema subterráneo del Centro de Capacitación –INTECAP-

El sistema de distribución subterráneo del INTECAP, Nueva Concepción, es un sistema de distribución con estructura radial, que toma la alimentación desde la red de distribución aérea de la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. y deriva a 4 transformadores *Pad Mounted* ubicados en el lugar, los cuales a su vez alimentan las distintas áreas de la institución, como se observa en el diagrama unifilar de la figura 64.

5.1.1 Componentes principales del sistema subterráneo

La toma de alimentación para el sistema subterráneo se realiza por medio de seccionadores fusibles monopolares, los cuales se encuentran ubicados en el poste donde transita la red de distribución aérea de EEGSA. Todos los componentes utilizados son específicamente para uso subterráneo, como son los transformadores, cables, accesorios, etc.

Los transformadores del sistema de distribución son tipo *Pad Mounted*, marca Siemens, y sus características principales son:

Transformador 1:

Potencia:	150 KVA
Voltaje primario:	13.2 KV
Voltaje secundario:	208/120 V

Transformador 2:

Potencia:	500 KVA
Voltaje primario:	13.2 KV
Voltaje secundario:	208/120 V

Transformador 3:

Potencia:	300 KVA
Voltaje primario:	13.2 KV
Voltaje secundario:	480/277 V

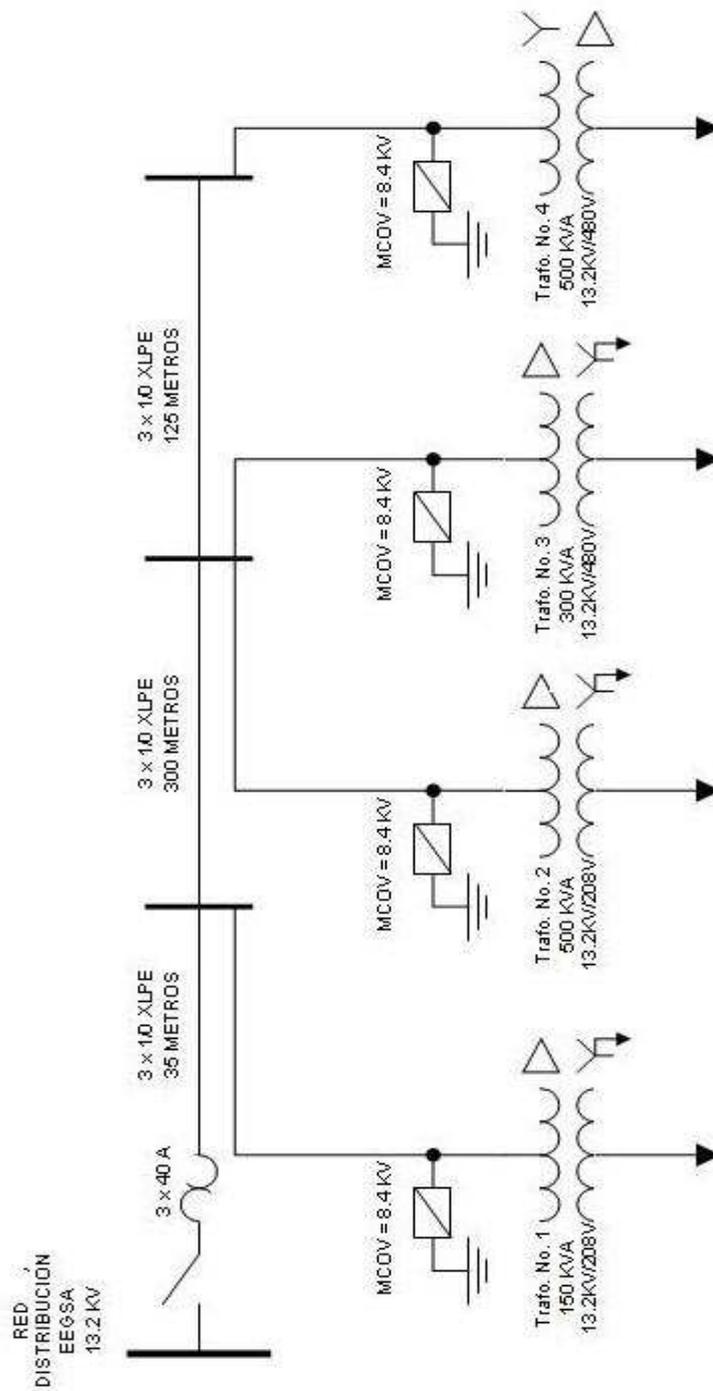
Transformador 4:

Potencia:	500 KVA
Voltaje primario:	13.2/7.62 KV
Voltaje secundario:	208/120 V

El cable utilizado para el sistema subterráneo es cable de aluminio # 1/0 tipo URD para 15 KV, con aislamiento XLPE, e impermeable al agua con protección exterior. Las características se muestran en el anexo 1.

Los pararrayos que se utilizan son tipo MOV (*Metal Oxide Varistors*), para uso en instalaciones subterráneas con un MCOV igual a 8.4 KV.

Figura 65. Diagrama Unifilar del sistema de distribución subterráneo del Centro de Capacitación –INTECAP- de Santa Lucía Cotzumalguapa



5.2 Descripción del suceso

Según lo platicado con el Ing. Fernando Morales, Gerente de Enérgica¹, la red subterránea del Centro de Capacitación –INTECAP-, ubicado en el kilómetro 93 carretera a Mazatenango, ha sido presa continua de fallas por sobrevoltajes, específicamente sobre el transformador que está instalado al final de dicha red (transformador No. 4).

El Ing. Morales indicó que los incidentes más recientes, por sobrevoltajes en las instalaciones de dicho centro, ocurrieron de la siguiente forma:

- El día 15 de junio de 2004, se recibió una llamada, en la cual indicaban que el centro de capacitación se había quedado con dos fases. Este día hubo ausencia de tensión en una fase de la red aérea de distribución. Al inspeccionar las instalaciones, se encontró quemado un pararrayo del transformador que se encuentra al final de la red (transformador No. 4).
- El día 17 de julio de 2004, durante la realización de una apertura programada, con el fin de realizar un mantenimiento a la red, hubo daños en dos pararrayos del transformador, que se encuentra al final de la red (transformador No. 4). Asimismo hubo un fusible fundido, esto fue en el momento de tener desconectadas dos fases de la red aérea de distribución.

¹ Enérgica: Es la empresa dedicada a la construcción y mantenimiento de redes, en el área central del sistema de distribución de Guatemala.

Figura 66. Daños ocasionados en el transformador No. 4

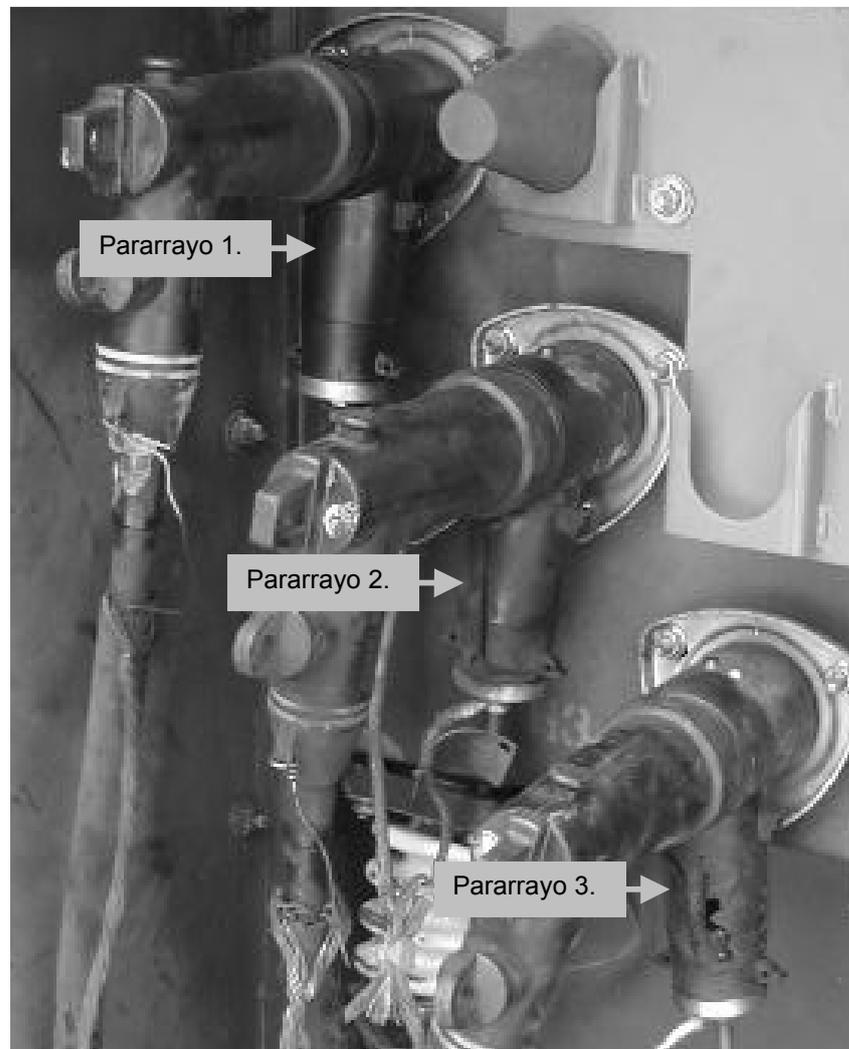


Foto. José Joaquín Vela B. Construcción de red zona Interior de Energica

En las fotografías de las figuras 66 y 67, se puede observar, en buena manera, los daños provocados por la ferorrresonancia durante las condiciones de línea abierta sucedidas por las maniobras realizadas en los seccionadores principales. Claramente se puede observar la ubicación de los pararrayos (MOV), que protegen al transformador contra sobrevoltajes, los cuales sufrieron principalmente los efectos de la ferorrresonancia.

Figura 67. Daños ocasionados en los pararrayos del transformador 4

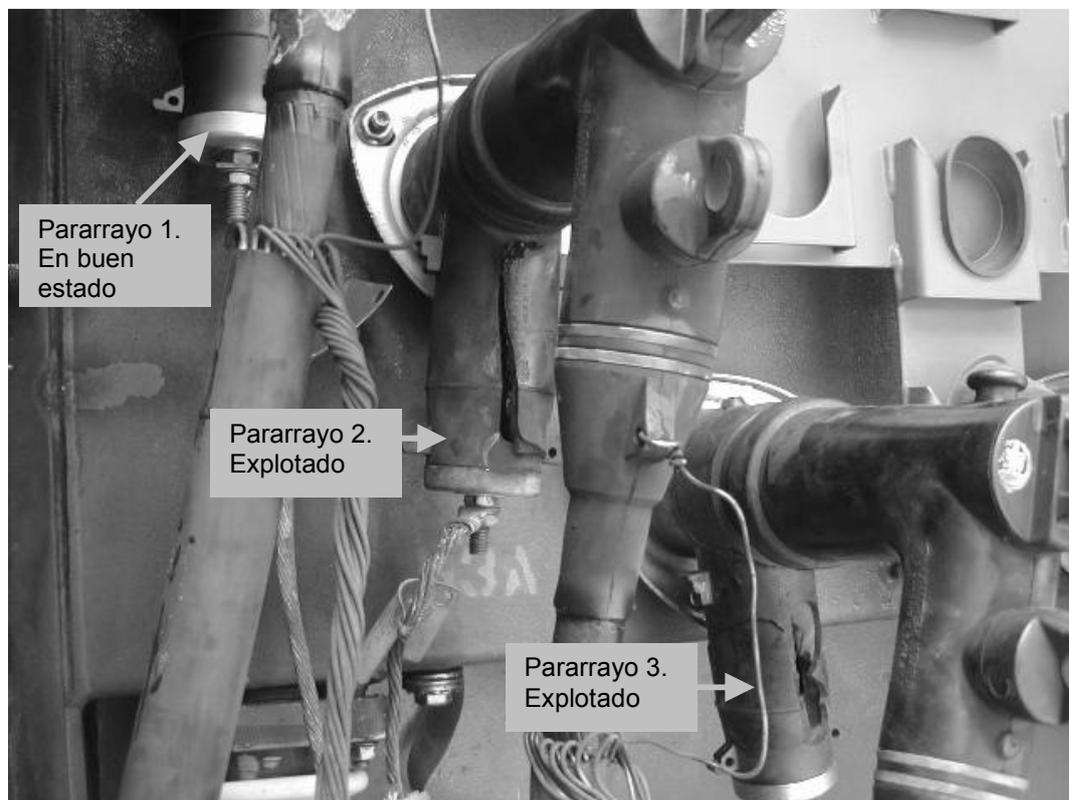


Foto. Foto. **José Joaquín Vela B. Construcción de red zona Interior de Energica**

El efecto principal sobre los pararrayos consistió en la explosión de la cámara de oxido metálico, que hace que la energía producida por los sobrevoltajes sea drenada hacia tierra. En este caso, la energía fue tal, que los pararrayos 2 y 3 sufrieron daños instantáneos.

Al analizar las fotografías 66 y 67, se observa que el pararrayo No. 1 (correspondiente a la fase de alimentación que estuvo en servicio durante las maniobras), no sufrió daño alguno durante la operación del sistema bajo ferorresonancia; en cambio los otros dos pararrayos (correspondiente a las líneas abiertas), sí sufrieron daños severos.

En las figuras 68 y 69, se observa en detalle los daños sobre los pararrayos 2 y 3.

Figura 68. Pararrayo No. 2



Foto. José Joaquín Vela B. Construcción de red zona Interior de Energica

Figura 69. Pararrayo No. 3



Foto. José Joaquín Vela B. Construcción de red zona Interior de Energica

5.3 Análisis de la ferorrresonancia en el sistema subterráneo

Observando de primera intención la configuración del sistema subterráneo del Centro de Capacitación –INTECAP- del presente caso, se puede indicar lo siguiente:

- El sistema posee un solo punto de seccionamiento (monopolar), que se encuentra entre la transición de la red aérea de la red de distribución y la red subterránea.
- Todos los bancos de transformadores instalados en el lugar utilizan conexiones no aterrizadas en los devanados primarios de los mismos, lo cual promueve la aparición de la ferorrresonancia.
- La longitud de los cables subterráneos, es tal, que la probabilidad de aparecimiento de ferorrresonancia en el sistema es muy alta, y más aún para el banco que se encuentra más alejado de la red aérea (transformador No. 4).

Así pues, para comprender de mejor manera los daños y efectos ocasionados por la ferorrresonancia en el transformador No. 4, se analizará en detalle el sistema como un sistema cable-transformador.

5.3.1 Cálculo de la capacitancia total de los cables

La capacitancia total de los cables monoplares apantallados, utilizados para el sistema subterráneo, es la suma de todas las capacitancias distribuidas de estos cables.

Esta capacitancia total se puede obtener fácilmente de la siguiente forma:

$C_1 = C_d \times L$	(5.1)
----------------------	-------

Donde C_1 es la capacitancia total (μF)

C_d es la capacitancia distribuida ($\mu\text{F}/\text{Km}$)

L es la longitud (Km)

Utilizando la tabla del Apéndice 2, la cual muestra los valores de capacitancias distribuidas para cables subterráneos con aislamiento XLPE al 100%, se encuentra que un calibre 1/0 con 19 conductores, posee una capacitancia distribuida de $0.483 \mu\text{F}/\text{Km}$.

La longitud total de los cables subterráneos, hasta el transformador No. 4, es la suma de las longitudes que se muestran en el diagrama unifilar del sistema, lo que da un valor de 460 m ó sea 0.46 Km.

La capacitancia total es:

$$C_1 = (0.483 \mu\text{F}/\text{Km}) \times (0.46 \text{ Km}) = \mathbf{0.222 \mu\text{F}}$$

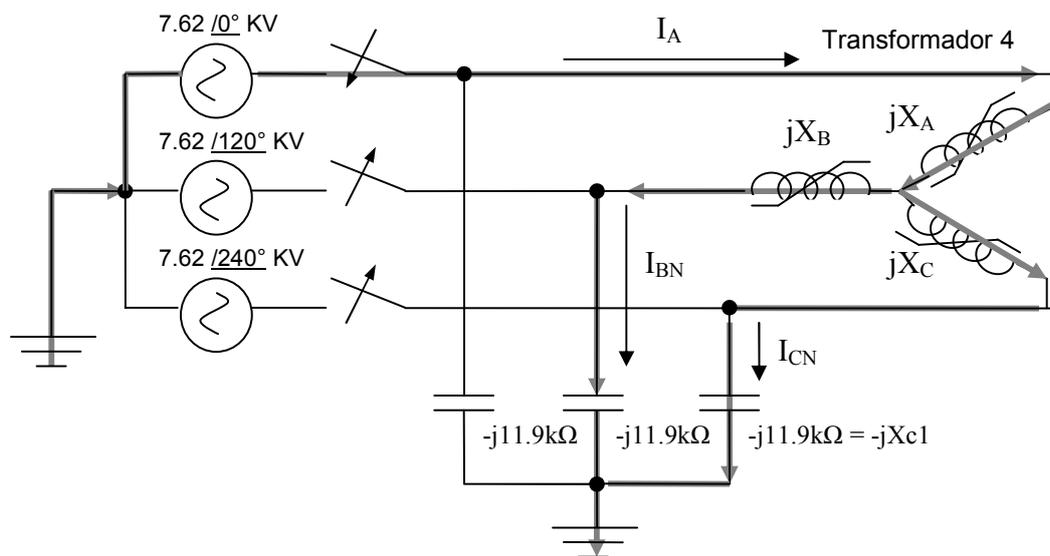
La reactancia capacitiva correspondiente a esta capacitancia es:

$$X_{c1} = 1/(377 \times 0.222 \times 10^{-6}) = \mathbf{11,938 \Omega \approx 11.9 \text{ K}\Omega}$$

5.3.2 Modelo de ferorrresonancia del caso de estudio

Analizando las condiciones dadas, por la cuales se presentó la ferorrresonancia, claramente se puede ubicar el presente caso de estudio en el No. 4, dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.

Figura 70. Caso de estudio. Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.

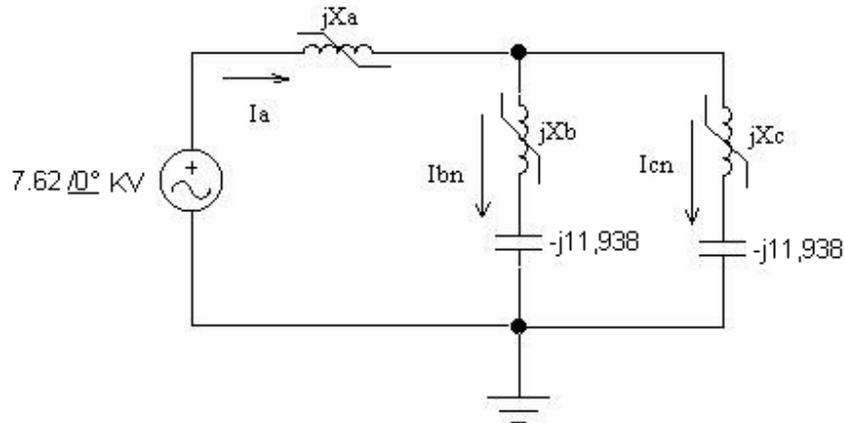


En la figura 70, se muestra la representación cable-transformador para el presente caso, en el cual se analiza únicamente el transformador 4. Los voltajes de las fuentes de alimentación corresponden a los voltajes de línea a neutro de la red de distribución de E.E.G.S.A, la cual es sólidamente referenciada a tierra. La reactancia capacitiva de los cables de alimentación es la correspondiente a la calculada anteriormente.

5.3.3 Modelación matemática de la ferorrresonancia para el caso de estudio

En la figura 71, se encuentra el circuito simplificado para el presente caso de estudio, en el cual se muestran incluidos los valores en ohmios de las reactancias capacitivas de los cables, y así mismo el valor para la fase A, que alimenta al sistema durante la condición de dos líneas abiertas. Las reactancias de los transformadores permanecen como variables

Figura 71. Circuito simplificado para el caso de estudio



Para resolver el presente circuito, nos ayudaremos utilizando la figura 81 del Apéndice 3, en la cual se muestra el comportamiento típico del voltaje de línea abierta, respecto a la relación X_{c1}/X_m , para el caso 4, para sistemas de distribución en 13.2 KV.

Con base en la curva de magnetización de la figura 75 del Apéndice 1, se puede obtener la reactancia nominal de magnetización, dividiendo el voltaje nominal de los transformadores dentro de la corriente de magnetización correspondiente.

$$X_m = 7.62 \text{ KV} / 0.015 \text{ A} = \mathbf{506.7 \text{ K}\Omega}$$

La relación X_{c1}/X_m se obtiene fácilmente, dividiendo el valor de reactancia de los cables dentro de la reactancia nominal de magnetización.

$$X_{c1}/X_m = 11.9 \text{ K}\Omega / 506.7 \text{ K}\Omega = \mathbf{0.023}$$

Al verificar en la figura 81 del Apéndice 3, el voltaje en PU correspondiente a la relación $X_{c1}/X_m = 0.023$, se obtiene lo siguiente:

- Hay dos puntos de operación de estado estable y uno inestable para este valor.
- Uno de los puntos de operación estable corresponde a la región de operación bajo ferorrresonancia.
- El valor del voltaje correspondiente a la región de operación en ferorrresonancia es aproximadamente 3.4 PU.

Para obtener el voltaje de línea abierta en KV correspondiente, simplemente se multiplica el valor en PU por la base que es 7.62 KV.

$$\text{Voltaje de línea abierta} = 3.4 \times 7.62 \text{ KV} \approx \mathbf{25.9 \text{ KV}}$$

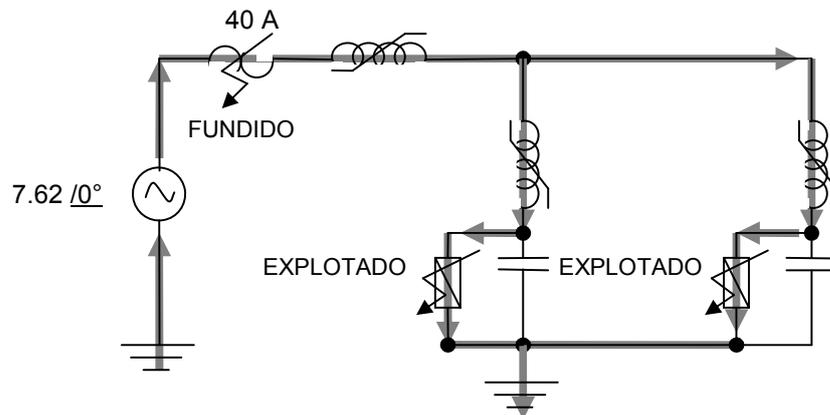
Este valor obtenido es teóricamente el valor, al cual operaron los terminales del transformador y asimismo los pararrayos correspondientes, para la condición de dos líneas abiertas. Es conveniente mencionar que este valor no es necesariamente el valor real, debido a que en el presente análisis se desprecia todo tipo de pérdidas y de igual forma los efectos de las distorsiones de las formas de onda de los voltajes y las corrientes, con lo cual se puede tener una idea de la magnitud del fenómeno.

5.3.4 Explicación de los daños ocasionados

Los resultados obtenidos, en el análisis matemático, dan referencia de lo ocurrido durante la realización de las maniobras de desenergización del sistema subterráneo.

Cuando el sistema subterráneo estaba energizado, las capacitancias distribuidas de los cables de potencia estaban a un voltaje nominal de 7.62 KV, lo cual indica que ya había una carga presente. En el momento de ocurrir la situación de dos líneas abiertas, el valor de las reactancias capacitivas de los cables y las reactancias de magnetización del transformador hicieron que el sistema operara bajo Ferrorresonancia, lo que permitió que los voltajes de línea abierta llegaran a valores cercanos a 25.9 KV.

Figura 72. Daños ocurridos en los pararrayos y fusible principal



El exceso de voltaje fue de tal magnitud, que los pararrayos tuvieron que descargar una gran cantidad de energía para eliminar este sobrevoltaje, a través de grandes corrientes a tierra, lo que hizo que la cámara de óxido metálico de los mismos explotara. Asimismo, estas corrientes de drenado provocaron que el fusible principal se fundiera, como se ilustra en la figura 72.

Al observar la curva típica de capacidad de operación en sobrevoltajes para pararrayos de distribución, de la figura 32, claramente se puede deducir que los pararrayos No. 2 y No. 3 fueron dañados instantáneamente durante la aparición de la ferrorresonancia.

5.4 Recomendaciones para evitar la aparición de la ferorrresonancia

Debido a la configuración y requerimientos del sistema, claramente tenemos el indicio de no poder afectar la conexión de los transformadores y la longitud del cableado subterráneo.

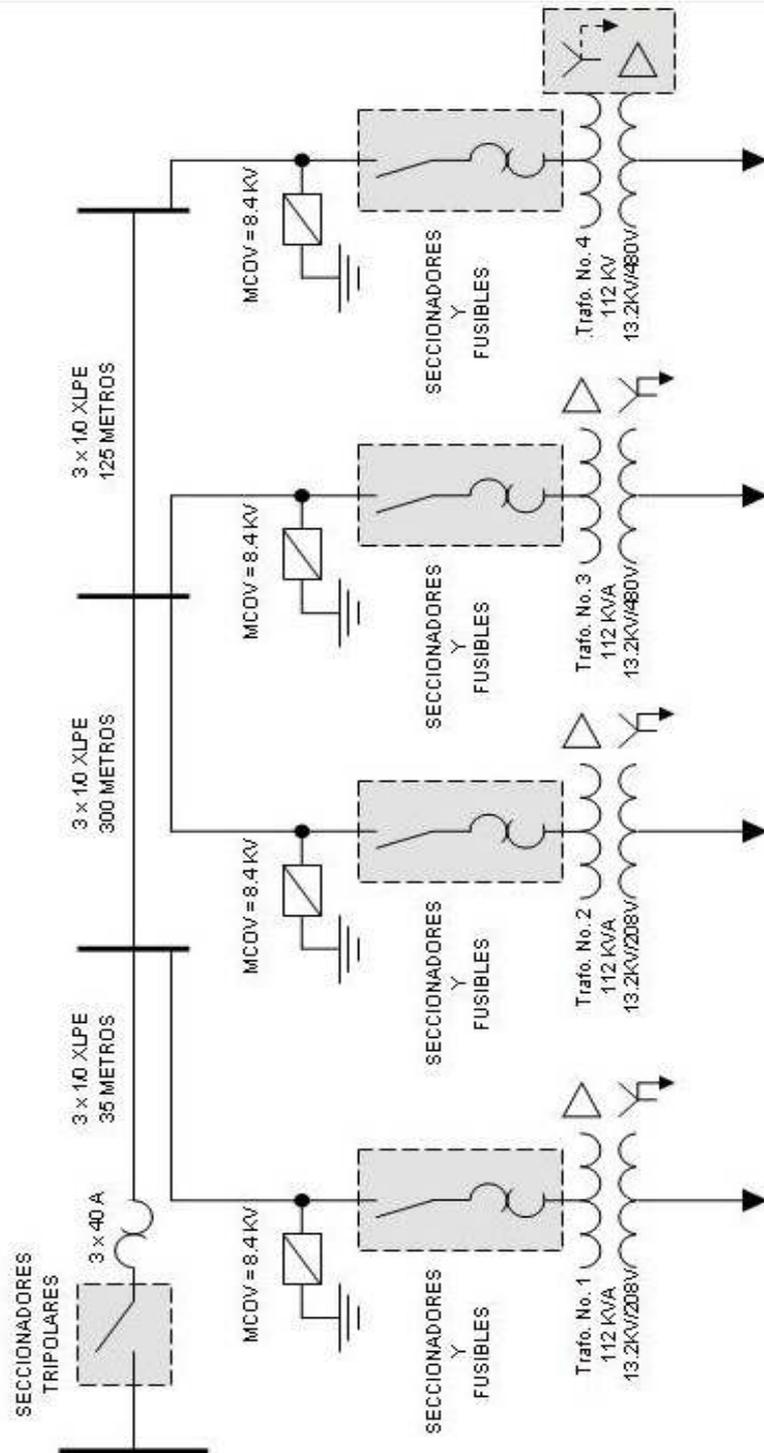
A fin de evitar que se presente la ferorrresonancia en el sistema durante la realización de maniobras de switcheo, con base en las propuestas tratadas en el capítulo IV., se hacen las siguientes recomendaciones para mitigar el fenómeno:

1. Cambiar los seccionadores principales, que sirven de transición entre la red aérea y subterránea, por un seccionador trifásico ubicada en el mismo punto.
2. Instalar equipos de seccionamiento y fusibles cercanos a los bancos de transformadores. De preferencia utilizar seccionadores trifásicos.
3. Utilizar un seccionador de puesta a tierra, para aterrizar temporalmente el punto estrella del transformador No. 4, durante la realización de maniobras. Asimismo, este transformador servirá como transformador de aterrizaje durante estas maniobras.

Estas recomendaciones aseguran, en forma práctica y factible, la posibilidad de que se formen trayectorias LC-serie no lineales durante maniobras.

En la figura 73, se muestra el diagrama unifilar del sistema subterráneo, en el cual se ilustran las recomendaciones de mitigación propuestas.

Figura 73. Recomendaciones para evitar la ferorrresonancia en el sistema subterráneo del Centro de capacitación –INTECAP-



CONCLUSIONES

1. La ferorrresonancia es un caso especial de resonancia serie, que resulta de la interacción de capacitancias e inductancias saturables. En los sistemas subterráneos, este fenómeno permite principalmente la conducción de los transformadores hacia la saturación, daños en los pararrayos, distorsión de las formas de onda de los voltajes y las corrientes, así como ruido y aumento en los esfuerzos eléctricos de los cables de potencia.
2. Un sistema tiene posibilidad de operar bajo ferorrresonancia, si éste posee las siguientes condiciones:
 - Bancos de transformadores alimentados con cables monopolares apantallados.
 - Conexiones primarias de los bancos de transformadores no aterrizadas.
 - Condiciones de una o dos líneas abiertas.
3. La obtención de gráficas que describan el comportamiento de los voltajes de línea abierta, en función de la relación X_{c1}/X_m , facilita la detección de la región, en la cual un sistema subterráneo puede operar bajo condiciones de línea abierta.

4. La ferrorresonancia se puede evitar y/o mitigar en los sistemas de distribución, si no se permite en la medida de lo posible, que se formen trayectorias LC serie entre las reactancias de los cables de alimentación y los transformadores, y si se evita o se impide que la reactancia de los cables llegue a valores críticos que produzcan el fenómeno.

5. Según lo analizado en el caso de estudio, la ferrorresonancia puede provocar que los voltajes de línea abierta lleguen a valores cercanos a 3 veces el voltaje nominal de línea a tierra. Esto hace que los pararrayos conduzcan una gran corriente de drenado a tierra, que dañe inmediatamente a los mismos.

RECOMENDACIONES

1. Se debe continuar el estudio de la ferorrresonancia, tanto en transformadores eléctricos, como en las máquinas eléctricas en general.
2. Hay que utilizar el presente estudio, como base para la implementación de pruebas de Ferrorresonancia en transformadores eléctricos, en los laboratorios de la Escuela de Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que permita en forma segura el fenómeno.
3. Es conveniente estudiar más profundamente el transitorio de la ferorrresonancia, para lo cual hay que apoyarse en programas actuales de simulación de transitorios.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB Power T&D Company Inc. **Transformer Tests. Their Purpose and Importance.** Publication B-713. U.S.A.:1994.
2. ABB Power T&D Company Inc. **Book transformer of distribution.** U.S.A.:2000.
3. ABB Power T&D Company Inc. **XLPE Cable Systems, User's guide.**
4. Acevedo, Salvador. **Análisis de Ferrorresonancia en transformadores eléctricos.** s.l. s.e. 1987.
5. Fitzgerald, A. E. y otros. **Máquinas eléctricas.** 5ª. ed. México: Editorial McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., 1999. 653 pp.
6. GeneralCable y BICC Brand. **Utility Cable. Energy cable power generation, transmission and distribution.** s.l. s.e. 2001. 99 pp.
7. General Electric. **Manual de transformadores de distribución.** U.S.A.: s.e., 1994. 96 pp.
8. Surya Santoso, Roger C. Dugan y Nedwick, Peter. **Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution System.** 2001. 6 pp.
9. Tanggawelu, Badmanathan y otros. **Ferroresonance studies in Malaysian Utility's Distribution Network.** U.S.A.: 2003. 5 pp.
10. Universidad del Valle-GRALTA-Colombia. "Ferro-resonancia en Transformadores de distribución conectados con cable monopolar apantallado" **Revista Energía y Computación.** (Colombia) (18): 7. 2002.
11. Valkenburg, Van. **Análisis de redes.** 3ª. ed. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V. 1997. 582 pp.
12. www.DSTAR.org. Fecha: 12/11/2003

13. www.mty.itesm.mx/decic/deptos/ie/profesores/sacevedo/cursos/transitorios/Material.htm. Fecha: 25/10/2003
14. www.cooperpower.com. Fecha 15/07/2004
15. www.hubellpowersystems.com. Fecha: 28/07/2004

APÉNDICE 1. CURVAS DE MAGNETIZACIÓN

Figura 74. Curva de magnetización B-H típica, para núcleos de transformadores de distribución

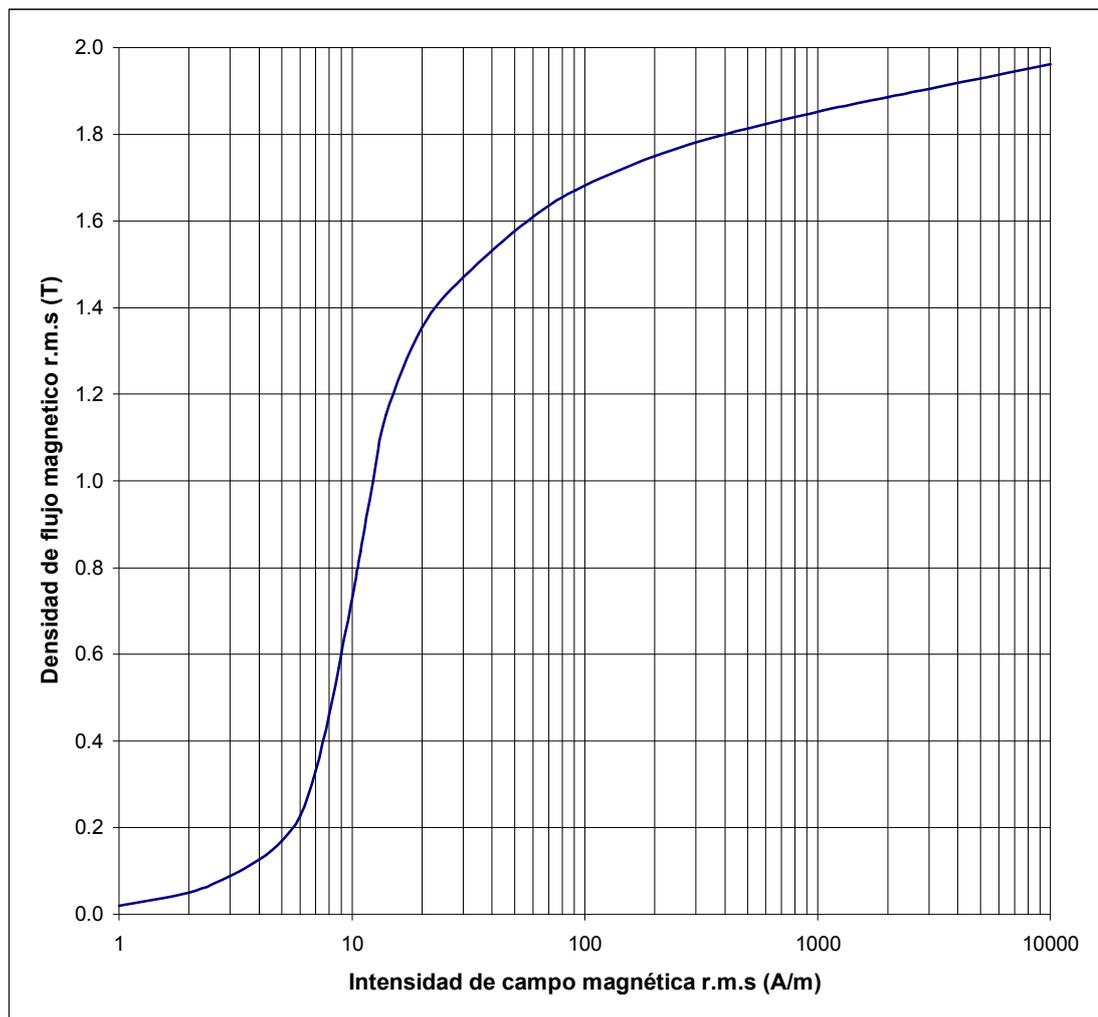
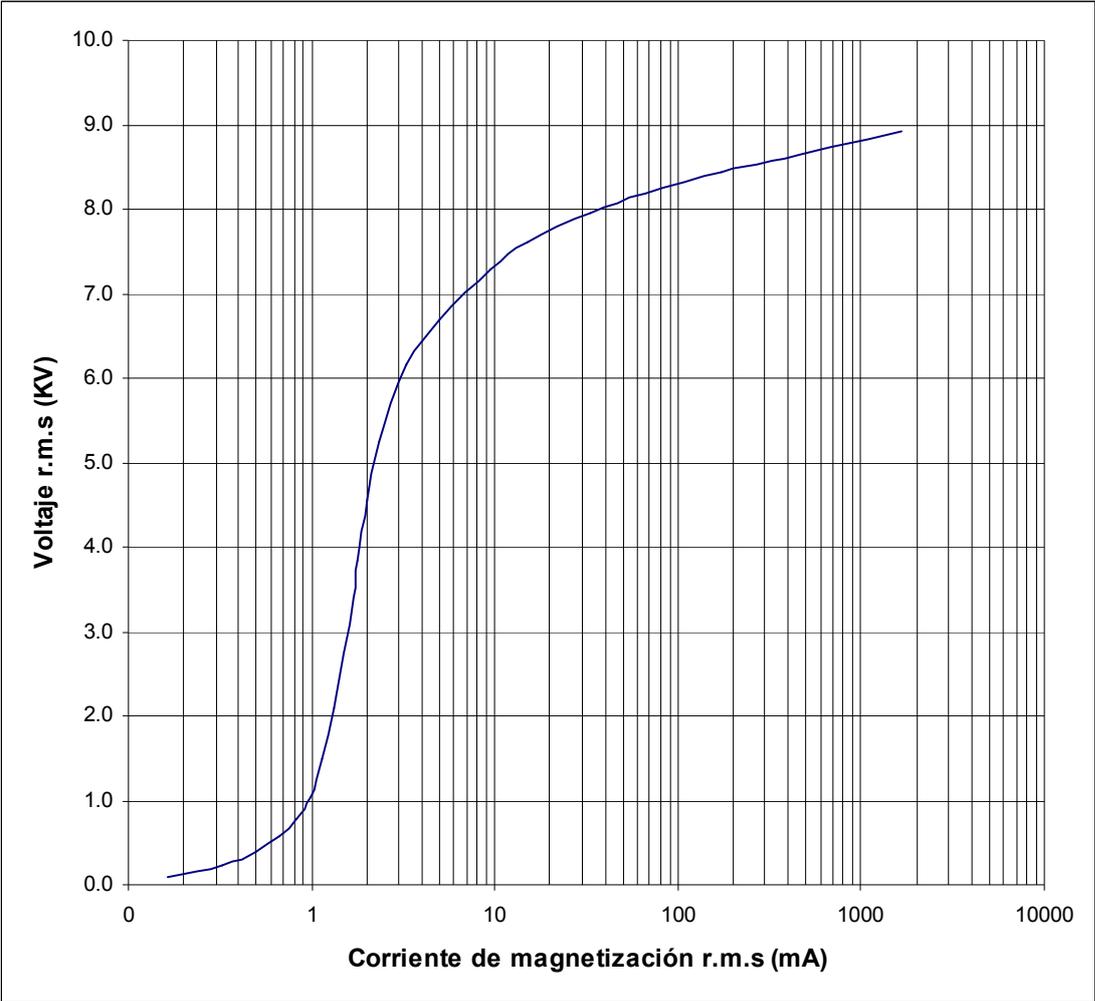
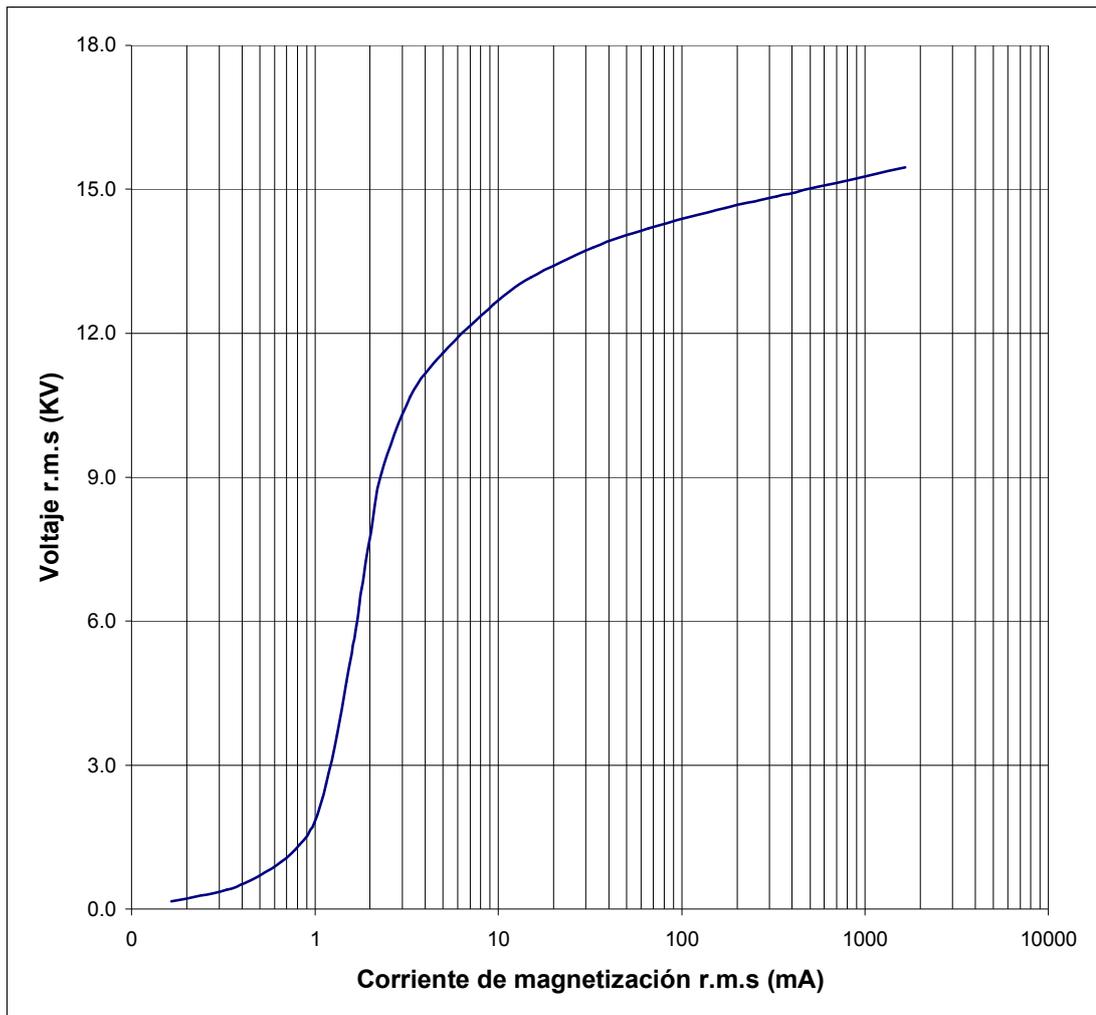


Figura 75. Curva de magnetización V-I típica para devanados de 7.6 KV, en transformadores de distribución

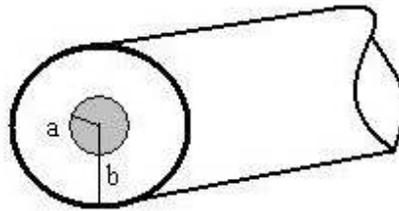


**Figura 76. Curva de magnetización V-I típica para devanados de 13.2 KV,
en transformadores de distribución**



APÉNDICE 2. CÁLCULO DE CAPACITANCIAS PARA CABLES MONOPOLARES APANTALLADOS CON AISLAMIENTO XLPE

Figura 77. Representación general de un conductor cilíndrico



$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}$$

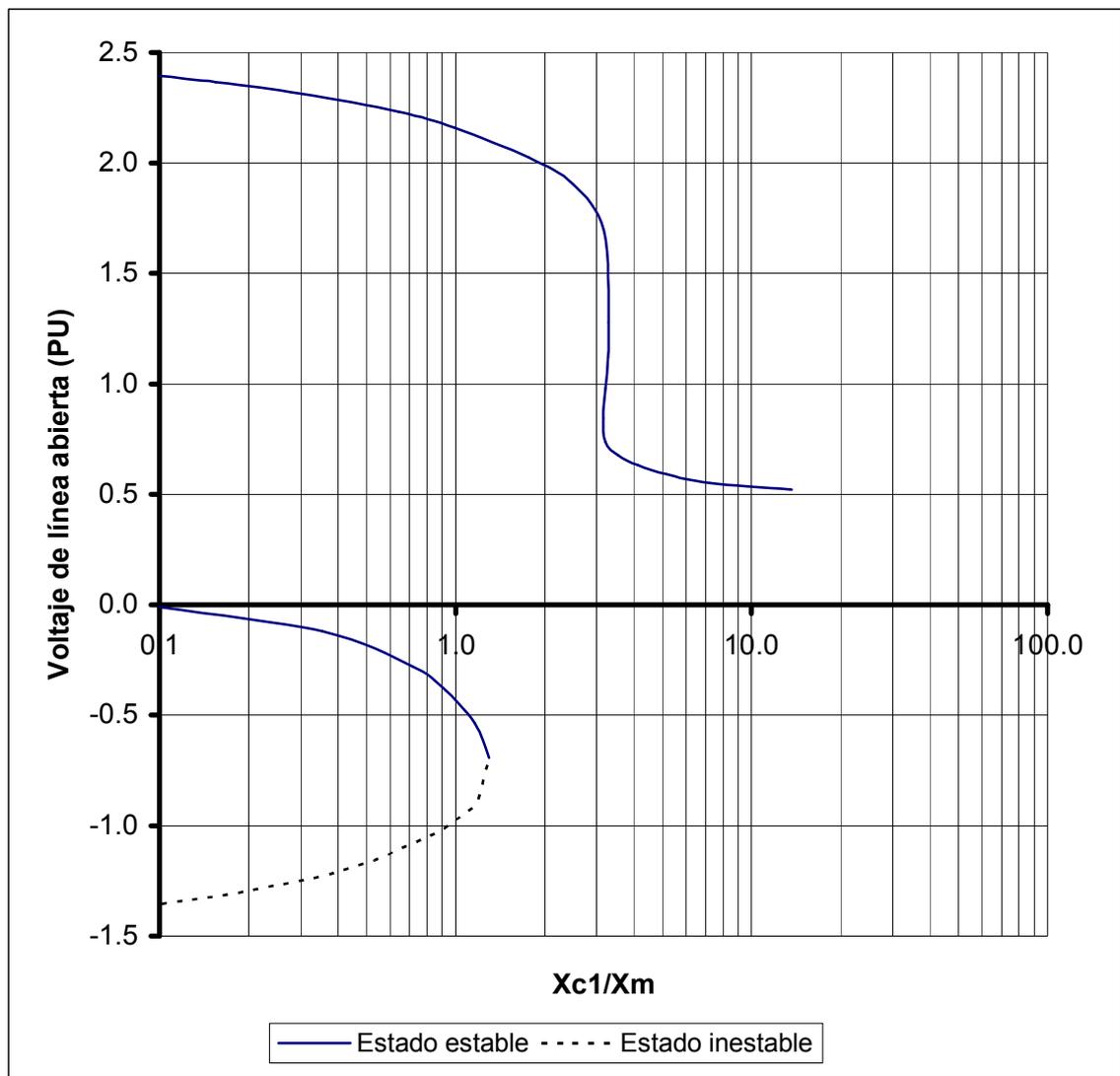
La permitividad relativa del XLPE es 2.28.

Tabla II. Cálculo de capacitancias

CABLE SUBTERRANEO DE DISTRIBUCIÓN - 15 KV - TIPO URD						
AWG ó KCMIL	No. de Conduct.	a (pulg.)	b (pulg.)	Permitividad en vacío	Permitividad relativa	Capacitancia (µF/Km)
175 mils de aislamiento nominal XLPE - 100% de nivel de aislamiento						
2	1	0.479	0.654	8.850E-12	2.28	0.407
2	7	0.504	0.679	8.850E-12	2.28	0.425
1	1	0.510	0.685	8.850E-12	2.28	0.429
1	19	0.543	0.718	8.850E-12	2.28	0.453
1/0	1	0.546	0.721	8.850E-12	2.28	0.456
1/0	19	0.583	0.758	8.850E-12	2.28	0.483
2/0	19	0.627	0.802	8.850E-12	2.28	0.515
3/0	19	0.677	0.852	8.850E-12	2.28	0.551
4/0	19	0.733	0.908	8.850E-12	2.28	0.592
250	37	0.791	0.966	8.850E-12	2.28	0.634
350	37	0.894	1.069	8.854E-12	2.28	0.709
500	37	1.022	1.197	8.854E-12	2.28	0.801
750	61	1.209	1.384	8.854E-12	2.28	0.937
1000	61	1.358	1.533	8.854E-12	2.28	1.045

APÉNDICE 3. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DE LÍNEA ABIERTA, RESPECTO A LA RELACIÓN X_{c1}/X_m

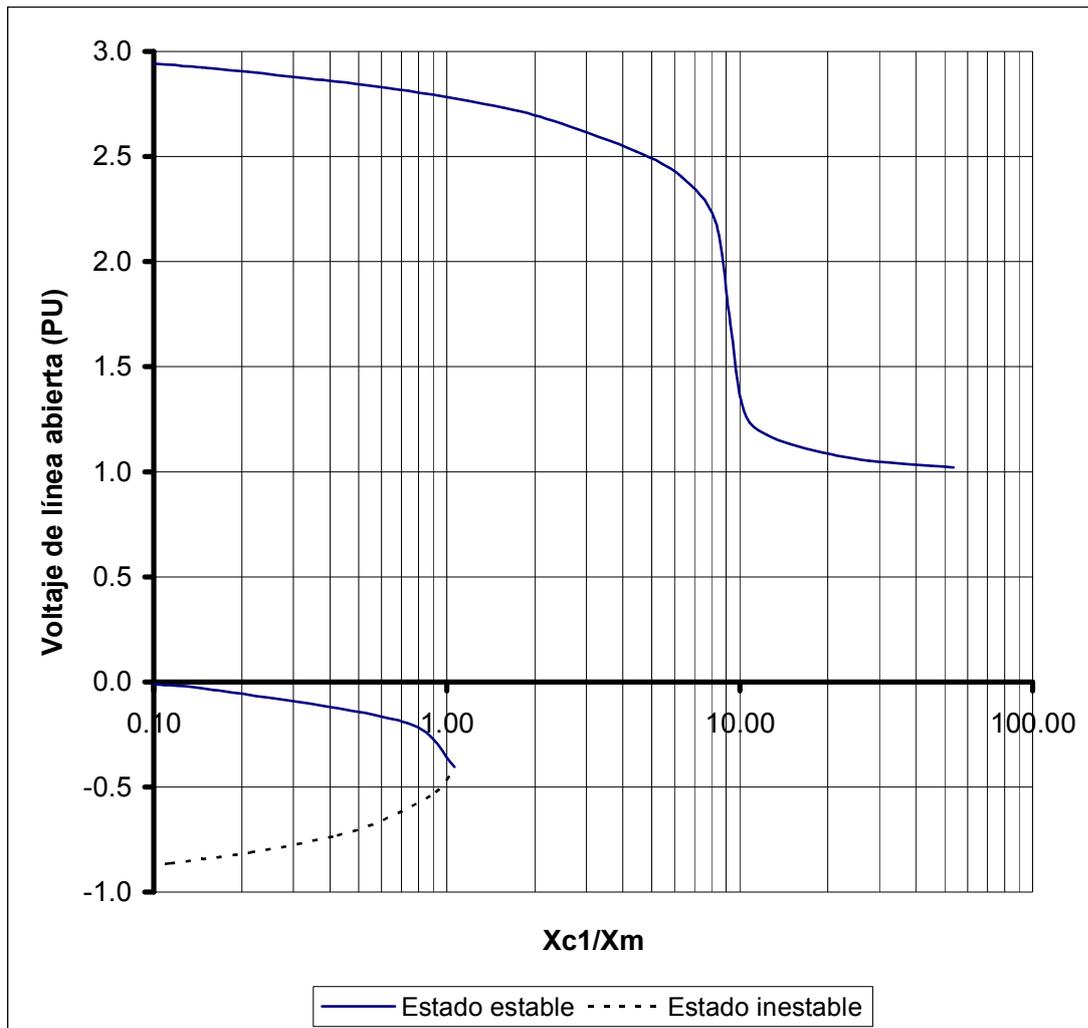
Figura 78. Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 1



$V_{BASE} = 7.62 \text{ KV}$

$X_m = 880 \text{ K}\Omega$

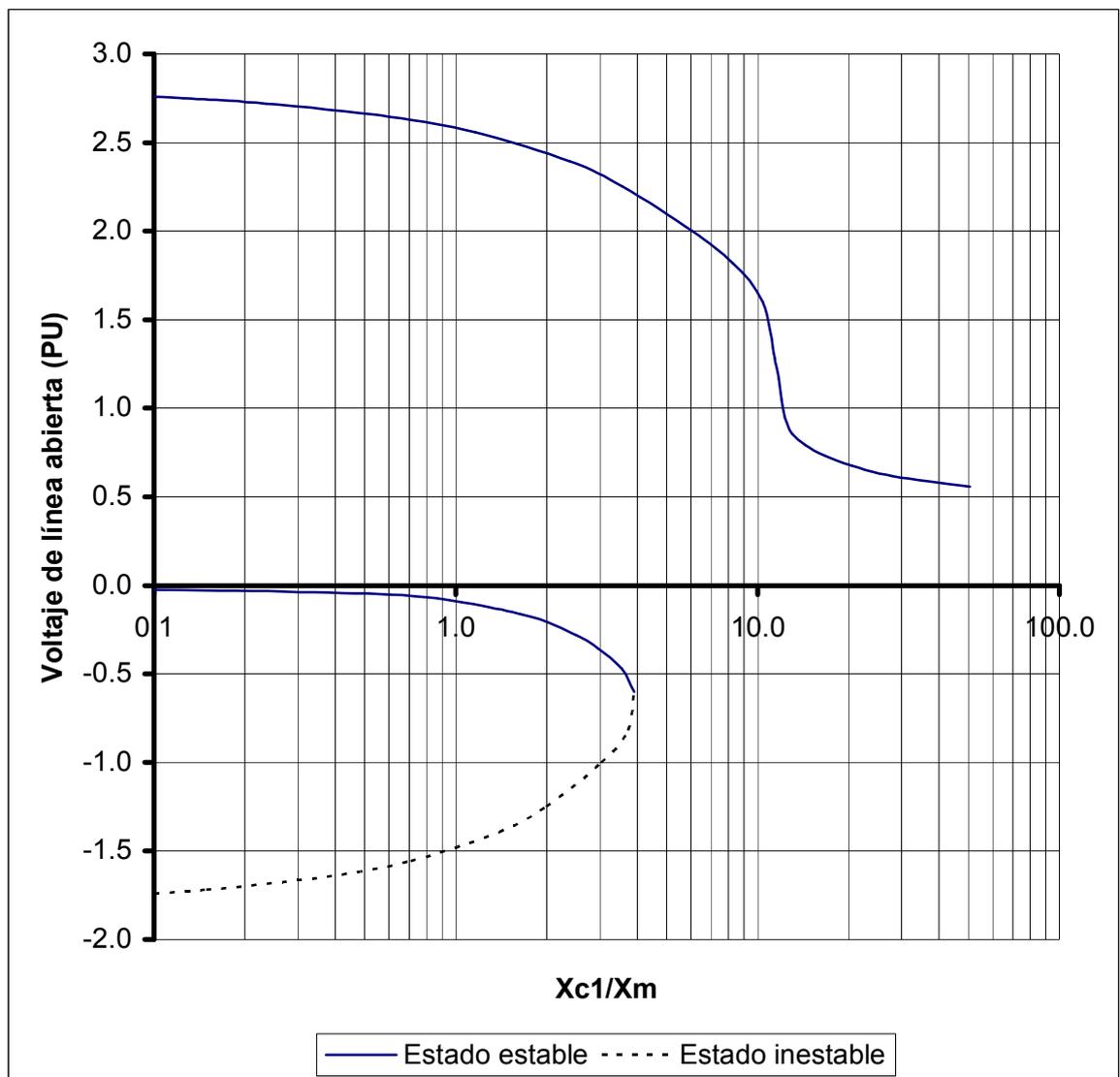
Figura 79. Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 2.



$V_{BASE} = 7.62 \text{ KV}$

$X_m = 880 \text{ K}\Omega$

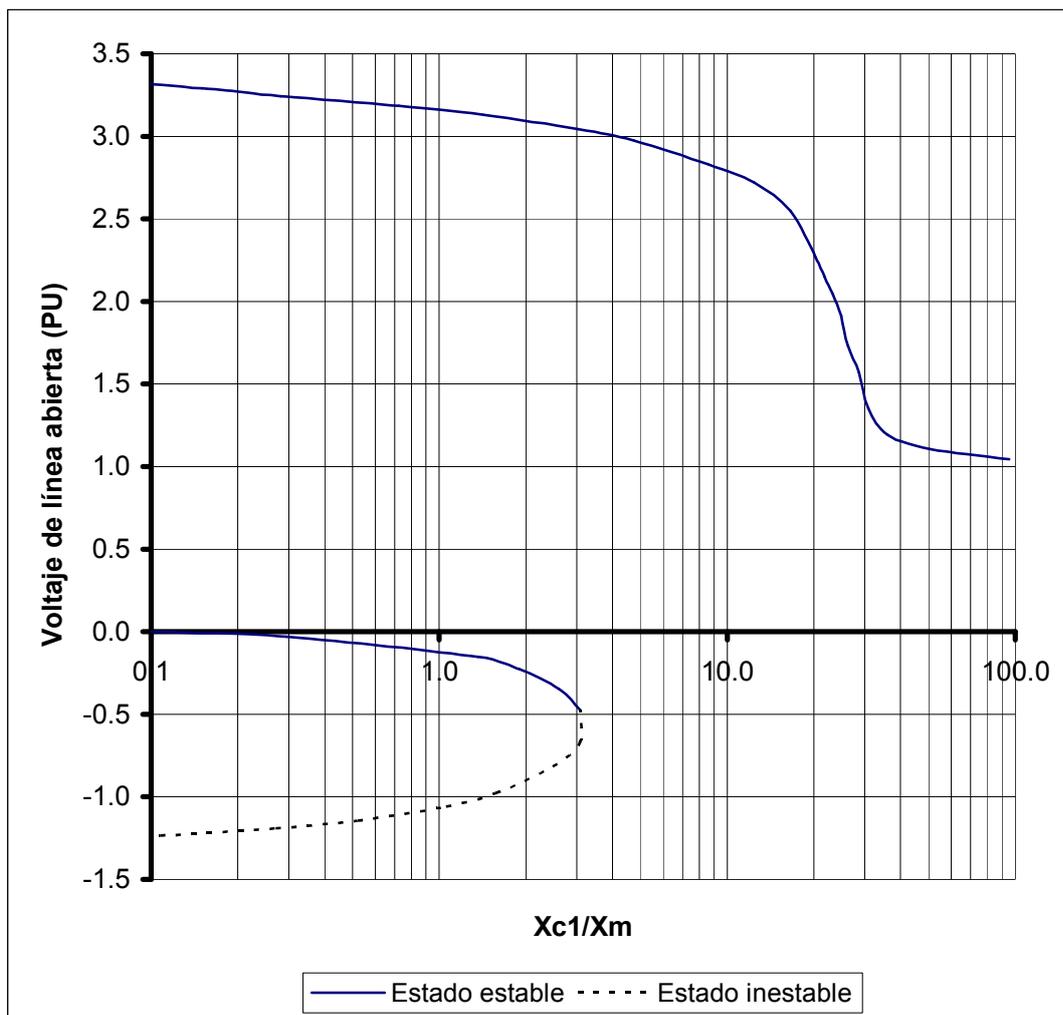
Figura 80. Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 3.



$V_{BASE} = 7.62 \text{ KV}$

$X_m = 506.7 \text{ K}\Omega$

Figura 81. Comportamiento del voltaje de línea abierta, respecto a X_{c1}/X_m para el caso 4.

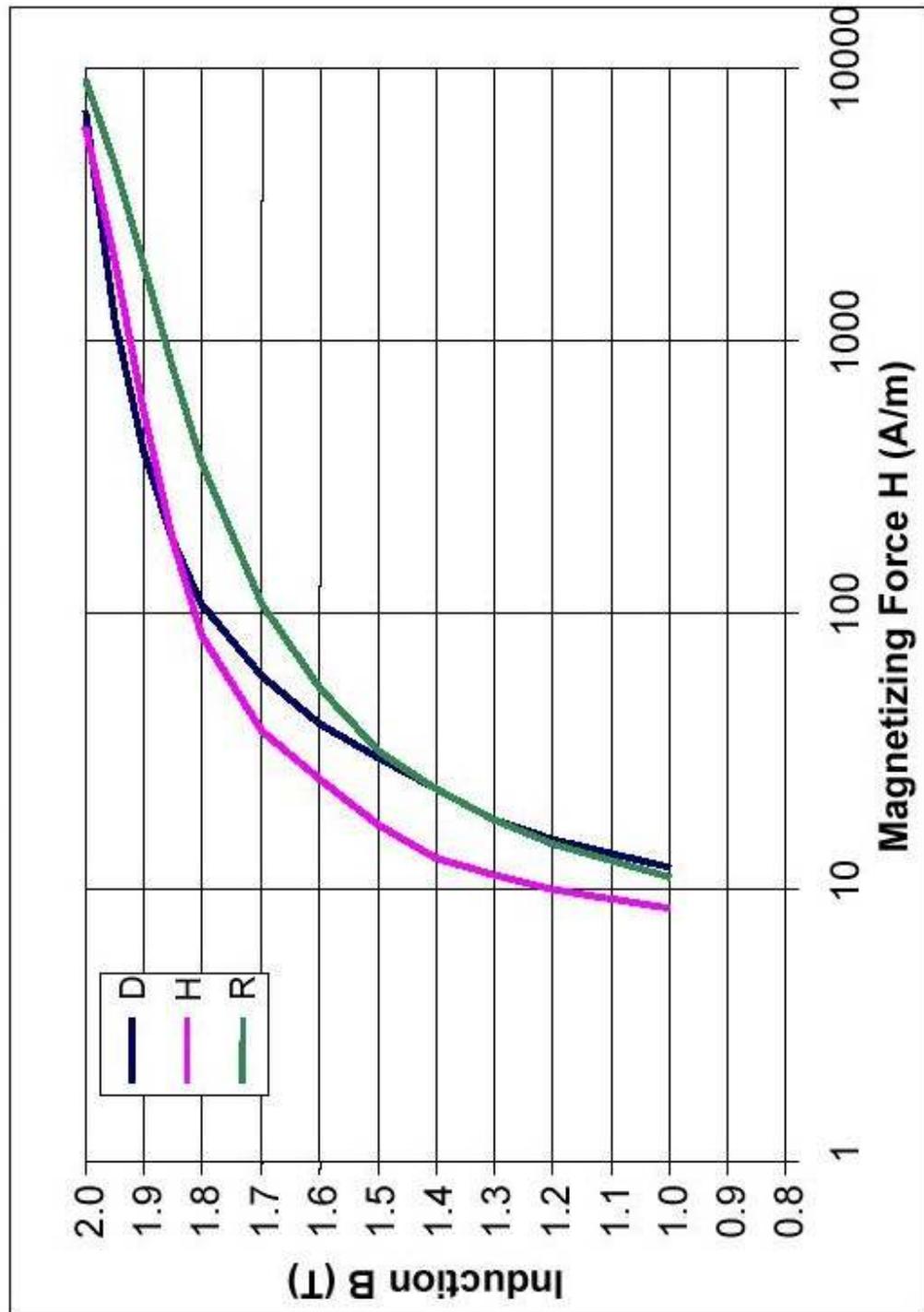


$V_{BASE} = 7.62 \text{ KV}$

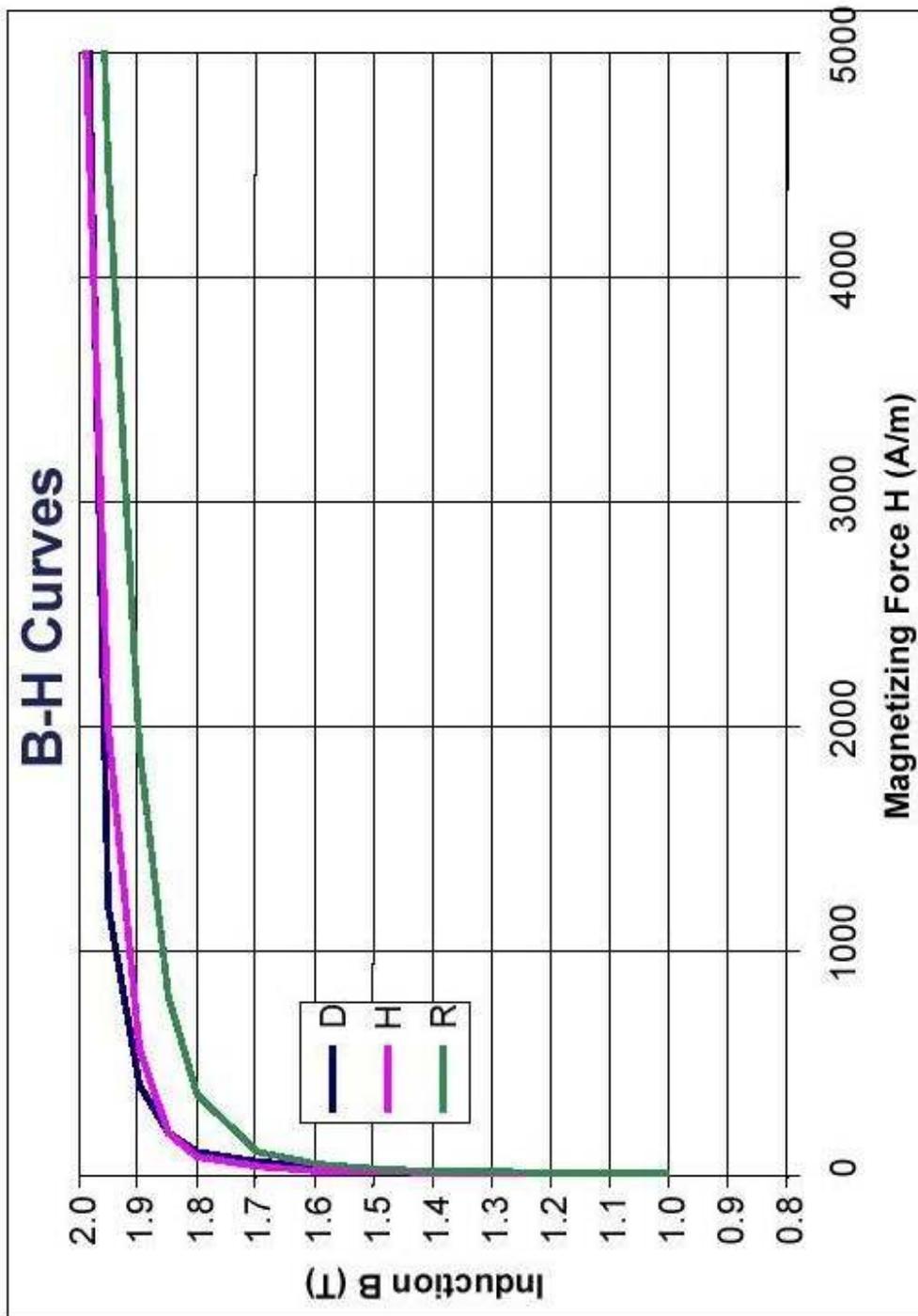
$X_m = 506.7 \text{ K}\Omega$

ANEXOS

B-H Curves



Fuente. **ABB Power T&D Company Inc.**



Fuente. **ABB Power T&D Company Inc.**



7^a. Calle Oriente Final
(Planta Empresa Eléctrica)
Antigua Sacatepequez
Guatemala, C. A.
Telfax 832-0319
Email: josvele@inteln.net.gt

Guatemala 04 de Agosto del 2004

Ingeniero
Fernando Morales
Pte.

Con relación a la información requerida, que se refiere a los problemas de la red eléctrica que se dieron en las instalaciones del Centro de Capacitación INTECAP Localizado en el kilómetro 92 Carretera a Mazatenango le informo lo siguiente.

El día 15-06-04 se recibió una llamada del ingeniero Luis Galán informando que en el centro de capacitación se habían quedado con 2 fases por lo que se envió el vehículo a las 15:00 horas detectando que se encontraba quemado el pararrayo del transformador que se encuentra al final de la red, procediendo a desconectar el transformador y así poder energizar los 3 transformadores anteriores energizando nuevamente a las 17:30 Horas.

El día 17-06-04 se envió el vehículo con un pararrayos nuevo a las 7:00 procediendo al cambio y se conectaron los cables que se habían desconectado para aislar el transformador con problema, se energizo se comprobó voltaje quedando todo normal se retiro el vehículo a las 11:00 Horas en horas de la tarde ese mismo día volvió a llamar l ingeniero Galán indicando que se había vuelto a quemar el pararrayo.

El día 18-06-04 nuevamente se envió vehículo para verificar el daño y se constató que nuevamente se había quemado el pararrayo procediendo a su cambio este trabajo se efectuó de las 14:15 a las 17:30 horas y se procedió a desconectar el transformador para energizar los tres transformadores que no tenían problema.

El día 09-07-04 se envió camión a realizar los trabajos que se refieren a colocar fusible NX y pararrayos de línea para protección del transformador, fue hasta esa fecha que se envio ya que la caseta donde se tenían que colocar los NX no estaba terminada.

Sin otro particular atentamente,


Energica
ingeniería, infraestructura y servicios.
Jose Joaquín Vela B.
Construcción de Red Zona Interior