

UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

**AISLAMIENTO EN SISTEMAS DE MEDIA TENSIÓN ANTE FENÓMENOS POR  
FERRORESONANCIA**

**Tutor:**

Ing. Francisco J. Naveira C.

**Autores:**

González P. Orlando J.

Hernández G. Laura N.

Valencia, Diciembre del 2008

**AISLAMIENTO EN SISTEMAS DE MEDIA TENSIÓN ANTE FENÓMENOS POR  
FERRORESONANCIA**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA.

**Tutor:**

Ing. Francisco J. Naveira C.

**Autores:**

González P. Orlando J.

Hernández G. Laura N.

Valencia, Diciembre del 2008

## **CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

Los abajo firmantes, miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado, **AISLAMIENTO EN SISTEMAS DE MEDIA TENSIÓN ANTE FENÓMENOS POR FERRORESONANCIA** realizado por los bachilleres: **Orlando José González Parra**, Cédula de Identidad: **12.774.911**, y **Laura Naileth Hernández Guidice**, Cédula de Identidad: **12.754.235**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Francisco J. Naveira C.  
TUTOR

Prof. César Ruíz  
JURADO

Prof. Leopoldo Romero  
JURADO

Valencia, Diciembre del 2008

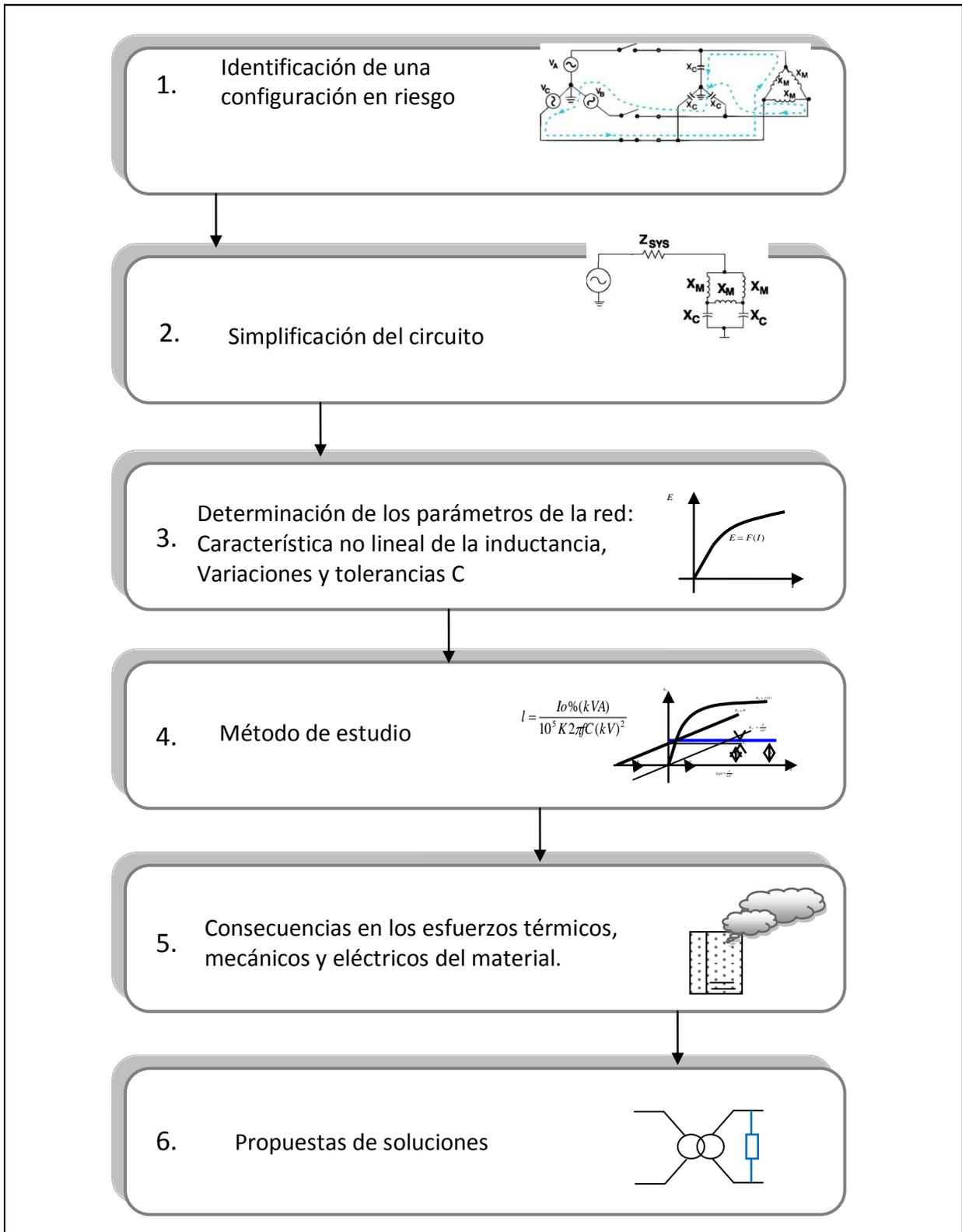
## RESUMEN

La ferresonancia es un fenómeno difícil de identificar en los sistemas de distribución, debido a su comportamiento complejo, intespectivo, y la variedad de parámetros involucrados en su origen y desarrollo. Por esta razón la primera etapa de la investigación consistió en la recopilación de información técnica especializada en el tema a fin de profundizar el conocimiento de su naturaleza, apoyado principalmente en fuentes bibliográficas y documentales.

De esta manera se pudo obtener una visión general de la problemática, tratando de responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué es la ferresonancia?
- ¿Cuáles son las características de la ferresonancia?
- ¿Cómo se origina la ferresonancia en los Sistema de Media Tensión?
- ¿Cómo saber si un sistema está presentando problemas por ferresonancia?
- ¿Cuáles son los efectos de la ferresonancia en los Sistemas de Distribución en Media Tensión?
- ¿Cómo se puede evitar o mitigar la ferresonancia?

El procesamiento de los datos dio lugar al desarrollo de una metodología, para el análisis de un sistema de distribución con una configuración propensa a presentar fenómenos por ferresonancia, con la finalidad de estudiar las variables involucradas en el origen de dicho fenómeno. Existen muchos métodos de estudio para el análisis de la ferresonancia, sin embargo en el presente trabajo se hizo énfasis en la aplicación de un método gráfico, ya que el tratamiento del problema por modelos matemáticos, es bastante engoroso, y poco práctico. De esta manera se pudo inquirir los riesgos a los que se pueden ver sometidos los sistemas de distribución, cuando son susceptibles a la existencia de ferresonancia, lo cual permitió establecer las posibles medidas que pudieran implementarse, para evitar o atenuar las consecuencias que pudiera acarrear la aparición de este fenómeno.



**FIGURA 3.2. Esquema simplificado del análisis del problema.**

## **EI PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En un sistema eléctrico a media tensión, la ferresonancia se presenta cuando se conforma un circuito LC serie, en el cual al menos un elemento tiene característica no lineal.

Actualmente, los sistemas de media tensión, están caracterizados normalmente por un transformador trifásico alimentado en su forma más sencilla por medio de un cable aislado. Bajo ciertas condiciones especiales, la configuración (cable-transformador) puede presentar sobrevoltaje como producto de la resonancia entre la capacitancia asociada al cable y la inductancia del transformador.

La probabilidad de que en un sistema eléctrico de media tensión se presenten irregularidades en la prestación del servicio, por causa de sobrevoltajes producidos por ferresonancia, está determinada considerablemente por la configuración del sistema y la manera en que se esté operando la carga así como las características de los equipos asociados (Protecciones).

Ahora bien cuando se presenta éste fenómeno, este se manifiesta generalmente por el deterioro de los aislantes, que en un tiempo más o menos breve puede poner fuera de servicio los equipos en donde se halla manifestado la sobretensión, dejando sin energía eléctrica a la zona afectada hasta que los equipos sean reemplazados.

En la mayoría de los casos la configuración del sistema no se puede cambiar, y tampoco se puede modificar el comportamiento de la carga, por lo que se hace necesario aislar eficazmente la sobretensión, con el fin de proteger los equipos instalados en el sistema y así garantizar la continuidad del servicio eléctrico.

## **1.2 OBJETIVOS.**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL.**

Determinar el aislamiento en Sistemas de Media Tensión ante fenómenos por Ferroresonancia

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Identificar las variables, elementos y/o equipos que dan origen a sobretensiones por Ferroresonancia.
- Analizar los efectos de la Ferroresonancia en los Sistemas de Media Tensión, para verificar su influencia sobre el aislamiento.
- Identificar las diferentes conexiones de los transformadores utilizadas en los Sistemas de Media Tensión, para verificar su relación con la Ferroresonancia.
- Analizar las características del cable como elemento capacitivo, como elemento amortiguador y como elemento aislante, para verificar su influencia en los fenómenos por Ferroresonancia.
- Identificar la influencia de la variación de la carga, en el origen de la Ferroresonancia.
- Identificar los equipos que permitan mitigar las sobretensiones por Ferroresonancia, para la correcta protección del aislamiento en los Sistemas de Media Tensión.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El crecimiento de las ciudades, la carencia de espacio físico para la colocación de redes de distribución aéreas y la búsqueda de la disminución del impacto visual que estas causan (Contaminación visual), juegan un papel fundamental en el diseño de los sistemas de distribución.

Hoy en día, en los sistemas de distribución los transformadores conectados con cables monopoles apantallados han encontrado una gran aplicación y es así como se pueden encontrar en las áreas más congestionadas de las ciudades, en unidades residenciales, hospitales, centros comerciales, colegios y otros. Estas aplicaciones están caracterizadas normalmente por un transformador trifásico o monofásico alimentado por un cable subterráneo desde un circuito de distribución primario.

El uso de redes de distribución subterráneas, las cuales son más susceptibles a la ocurrencia de fenómenos por Ferroresonancia, puede traducirse en sobretensiones capaces de destruir el aislamiento de los equipos, haciéndose necesario la sustitución de estos, generando inconvenientes, pérdidas de tiempo y de dinero.

### **1.4 DELIMITACIONES**

El propósito que persigue nuestro estudio es identificar y analizar la relación existente entre los diferentes componentes de los Sistemas de Media Tensión en redes subterráneas y la ferresonancia, así como también los factores y variables que intervienen en dicho fenómeno. Del mismo modo se pretende identificar aquellos elementos que permitan mitigar los efectos que la ferresonancia pudiera ocasionar.

Es práctica común por parte de las compañías suplidoras de electricidad en nuestro país, el uso de la conexión delta-estrella aterrado lo cual se debe tomar en cuenta en el análisis y desarrollo de la investigación.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

### **2.1 ANTECEDENTES.**

En los últimos 80 años se han conducido numerosas investigaciones que involucran a la ferresonancia en transformadores. La primera vez que la palabra ferresonancia fue vista en la literatura fue en el año 1920, aunque las primeras publicaciones acerca de la ferresonancia aparecieron en 1907. No obstante el interés en particular se generó en los años 30, cuando se demostró que el uso de los capacitores en serie empleados para la regulación del voltaje originaba ferresonancia en los sistemas de distribución, acarreando como consecuencia daños por sobrevoltajes.

En la elaboración de un estudio es indispensable consultar investigaciones previas que de una u otra forma estén relacionadas con el tema a desarrollar, a fin de obtener una base que sirva como fundamento y permita alcanzar nuevos logros en el tema de interés. Dentro de los trabajos de investigación que presentan analogías con presente planteamiento, podemos citar:

- **Corzo C. Néstor. y Fernández Gondulfo**, “*Ferresonancia en Redes Eléctricas*”, Universidad de Carabobo, Valencia, 1980. En este trabajo se hace una descripción del fenómeno de ferresonancia y la posibilidad de su ocurrencia en los sistemas de potencia, se discute la exactitud y eficacia de los modelos lineales para el fenómeno, se hace un análisis de las subarmónicas que se originan en circuitos con transformadores con núcleo de

hierro, y a su vez se pone de manifiesto las situaciones que pueden acarrear la aparición de la ferresonancia.

- **López L. Rubén y Dávila S. Simón**, *“Análisis de Sobretensiones generadas por Maniobra de Transformadores de Potencia”*. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Abril 1991. En este trabajo se plantea la ferresonancia como una anomalía que se puede presentar de forma imprevista en circunstancias especiales como consecuencia de la realización de maniobras en el sistema cuando se cumplen ciertas condiciones.
- **Aguilar S. Jesús y Beda E. Walter**, *“Anomalías que se presentan en las Redes de Distribución de Media Tensión al colocar Condensadores”*. Universidad de Carabobo, Valencia, Septiembre 1994. En este trabajo se describe el funcionamiento, diseño selección, control, usos y fenómenos asociados con la operación de bancos de capacitores haciendo referencia en esta última parte a cómo la introducción de condensadores a un sistema de media tensión puede resultar propicio para el origen de un circuito ferresonante.

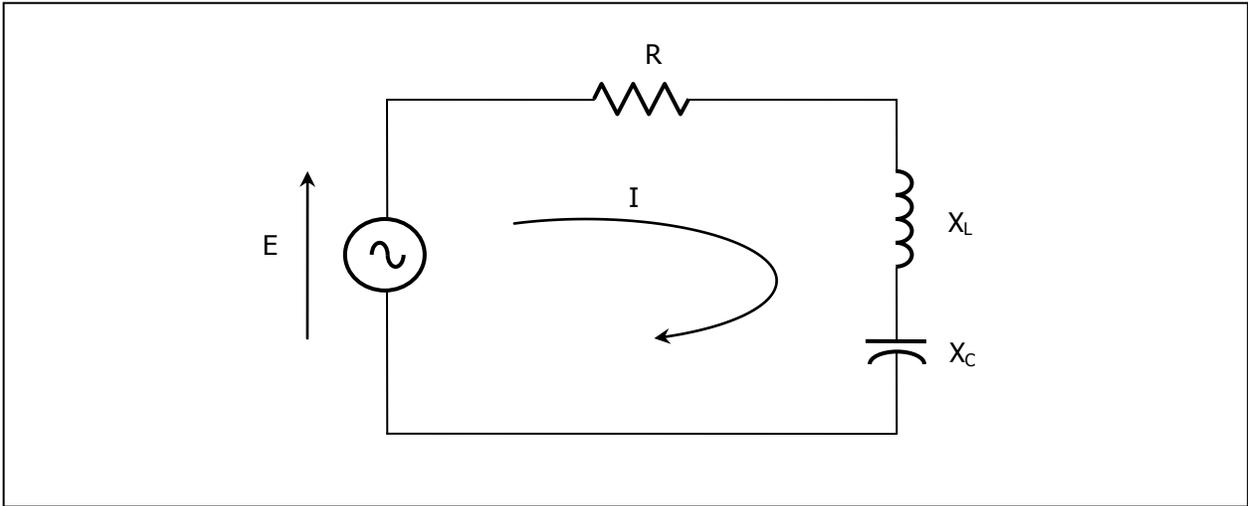
## 2.2 BASES TEORICAS Y DEFINICION DE TERMINOS BASICOS

### 2.2.1 RESONANCIA

Con el propósito de comprender la ferresonancia, la cual es un fenómeno no lineal, es necesario distinguirla de la resonancia lineal.

En la resonancia lineal los valores de impedancia representada por los componentes del circuito son frecuentemente predecibles. Cuando se opera dentro de sus rangos de diseño, una capacitancia siempre presentará un valor de reactancia capacitiva de:

$$X_c = \frac{1}{wC} \quad (2.1)$$



**Figura 2.1. Circuito Resonante Serie.**

Y una inductancia siempre tendrá un valor de reactancia inductiva dada por:

$$X_L = \omega L \quad (2.2)$$

Donde:  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia del voltaje y la corriente, que son ondas senoidales y  $f$  la frecuencia en Hz.

La relación entre el voltaje en una impedancia y la corriente a través de ella, viene dada por la Ley de Ohm:

$$V = IZ \quad (2.3)$$

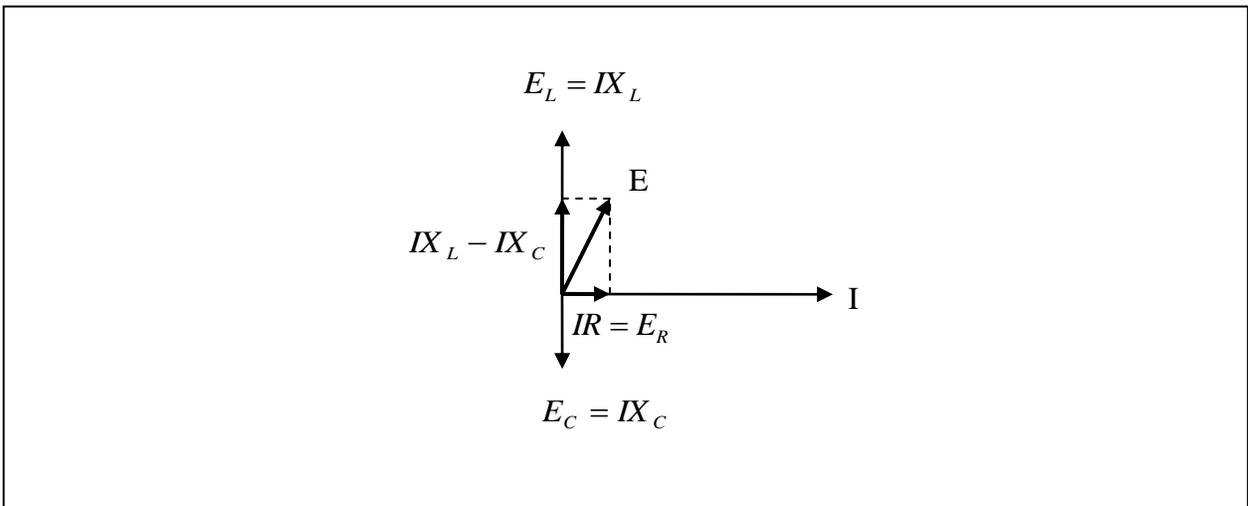
Como se puede observar en las ecuaciones, la reactancia inductiva es proporcional a la frecuencia, se incrementa a medida que aumenta la frecuencia, mientras que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia, disminuye con los aumentos de frecuencia.

Por lo tanto los circuitos convencionales (RLC) serie: resistencia, inductancia y capacitancia tal como el que muestra la figura 2.1 llegan a ser resonantes cuando la reactancia inductiva  $X_L$  se hace igual a la reactancia capacitiva  $X_C$  y la caída de tensión a través de L y C son iguales y directamente opuestas. Para esta condición la corriente I es limitada solamente por la resistencia del circuito y puede llegar a ser muy grande, si esta resistencia es pequeña.

La corriente en el circuito de la figura 2.1 al aplicar una tensión E es:

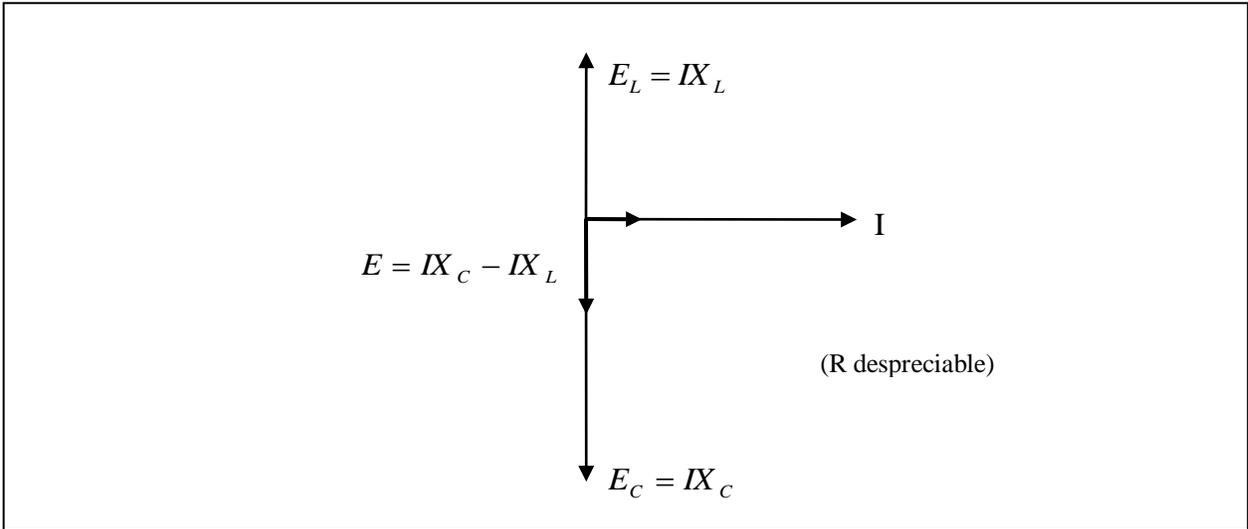
$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad \text{Amp.} \quad (2.4)$$

Suponiendo despreciables los parámetros disipativos del sistema (parte resistiva de la bobina), fundamentalmente debido a las pérdidas en el devanado y parte resistiva del condensador, debido a las pérdidas dieléctricas, y siendo  $E_L$  y  $E_C$  las caídas de tensión en la inductancia y condensador respectivamente, de acuerdo al elemento predominante se pueden presentar dos condiciones:



**Figura 2.2. Diagrama vectorial para el circuito R-L-C de la figura 2.1 cuando  $X_L > X_C$ , la corriente  $I$  en atraso al voltaje  $E$ .**

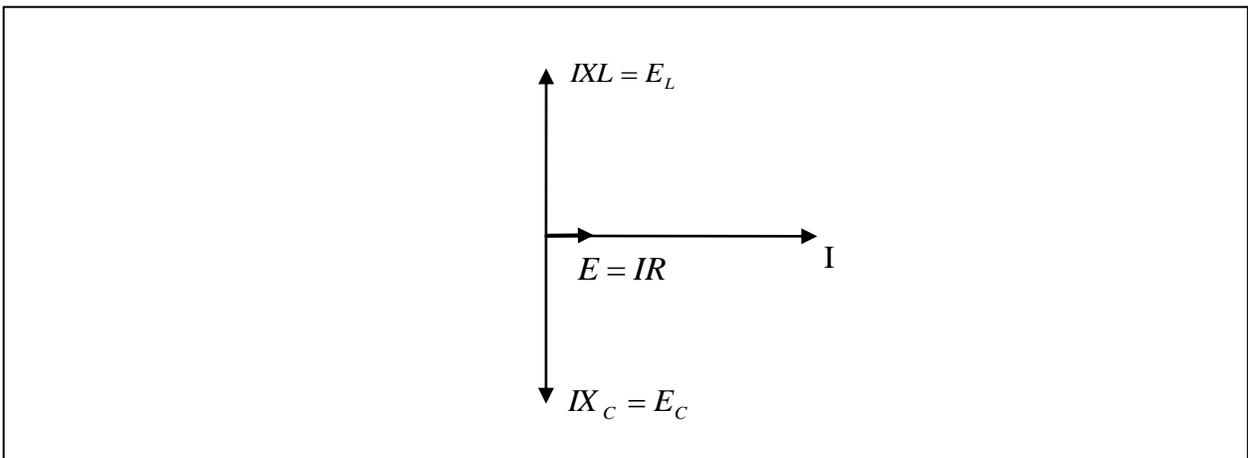
La figura 2.2 muestra el diagrama vectorial para el circuito de la figura 2.1, en el cual  $X_L > X_C$ . Debido a que la corriente  $I$  es la misma a través del circuito, se ha elegido a este vector representativo como referencia. La resistencia  $R$  es pequeña comparada con las reactancias reactiva y capacitiva. La caída del voltaje de la resistencia  $E_R = IR$  voltios está en fase con la corriente  $I$ . La caída reactiva  $E_L = IX_L$  voltios está en adelanto de  $90^\circ$  a la corriente y la caída capacitiva  $E_C = IX_C$  voltios está en atraso de  $90^\circ$  a la corriente. Dado que  $X_L > X_C$ ,  $E_L$  es mayor que  $E_C$  y la diferencia  $IX_L - IX_C$  se suma al vector  $IR$  para dar el voltaje de línea  $E$ ; La corriente  $I$  queda en atraso al voltaje  $E$  por el ángulo  $\theta$ . Se nota que  $E_L$  y  $E_C$  son opuestos y tienden a sobreponerse. También las magnitudes de  $E_L$  y  $E_C$  son mayores que la del voltaje de línea  $E$  aplicado.



**Figura 2.3. Diagrama vectorial para el circuito R-L-C de la figura 2.1 cuando  $X_L < X_C$  la corriente  $I$  adelanta al voltaje  $E$ , (el efecto de la resistencia es despreciado).**

Si se reduce el valor de la capacitancia  $C$  de modo que  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  sea mayor que  $X_L$  (o  $L$  decrece una cantidad suficiente) como se muestra en la figura 2.3, el voltaje de línea  $E$  pasa al cuarto cuadrante y la corriente  $I$  ahora adelanta al voltaje en  $90^\circ$  si la resistencia es despreciable. Como se mostrará más adelante esta misma inversión del voltaje ocurre en circuitos eléctricos de potencia bajo condiciones de ferresonancia resultando a menudo en el desarrollo de voltajes muy altos.

Si en la ecuación (2.4),  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , ó  $X_L = X_C$  ( $X_L - X_C = 0$ ) la corriente es:  
 $I = \frac{E}{R}$  Amperes y estará en fase con el voltaje de la línea  $E$  como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4. Diagrama vectorial para el circuito R-L-C de la figura 2.1 cuando está en resonancia  $X_L = X_C$ . La corriente  $I$  está en fase con el voltaje  $E$ .**

Los dos voltajes reactivos  $IX_L = E_L$  e  $IX_C = E_C$  se sobreponen exactamente y bajo las condiciones asumidas sus magnitudes son mucho mayores que el voltaje de línea “ $E$ ”. La magnitud de la corriente queda enteramente determinada por la resistencia  $R$ , y está en fase con el voltaje  $E$ . Para un valor fijo de la resistencia, la corriente es un máximo (ecuación 2.4) y el circuito está en resonancia. Si la resistencia  $R$  se disminuye, la corriente  $I$  y por lo tanto los voltajes  $E_L$  y  $E_C$  aumentan en relación, y si la resistencia  $R$  se hace cero, la corriente y el voltaje teóricamente se hacen infinito. No obstante la resistencia siempre debe tener un valor finito pero puede ser un valor tan pequeño que la corriente puede alcanzar tales valores que se desarrollen voltajes extremadamente altos a través de los conductores, inductancia y los condensadores. En efecto ocurre a menudo que el alto voltaje perfora los condensadores y la alta corriente causa fuerte ruido en la inductancia debido a la vibración del laminado del núcleo.

Referido a la condición de resonancia donde  $X_L = X_C$  o lo que es lo mismo  $\omega L = 1/\omega C$  donde  $\omega = 2\pi f_0$  y despejando la frecuencia de resonancia ( $f_0$ ):

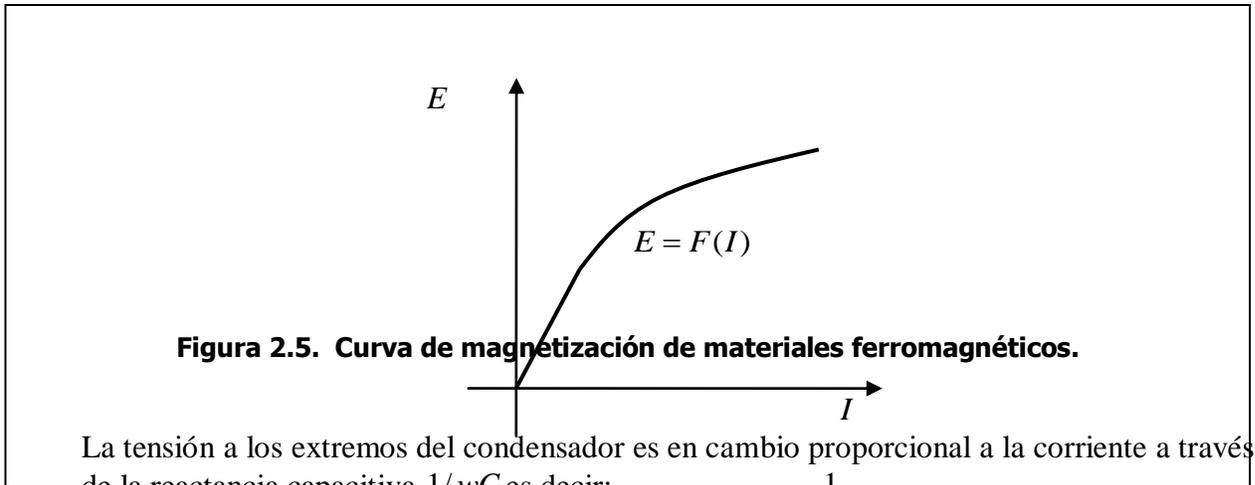
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Hz} \quad (2.5)$$

### 2.2.2 FERRORESONANCIA

La ferresonancia es un caso especial de la resonancia en serie, que ocurre en circuitos como el mostrado en la figura 2.1 en el cual la resistencia es despreciable y cuando las magnitudes de la reactancia capacitiva e inductiva se acercan en su valor, por tener signos opuestos, la impedancia total vista por la fuente se reduce, provocando corrientes elevadas que pueden ocasionar la desconexión del circuito o causar voltajes elevados tanto en  $X_C$  como en  $X_L$ . La característica del inductor determina la diferencia entre resonancia simple y ferresonancia.

La ferresonancia tiene similitud con la condición de resonancia, que ocurre en los circuitos R-L-C en serie antes indicada, donde estos tres parámetros se asumen constantes de modo que el circuito es lineal. Sin embargo, en un circuito ferresonante debido a la existencia del núcleo magnético del reactor presenta diferencias notables como:

- a) La corriente de magnetización no es senoidal, aunque la tensión aplicada  $E$  lo sea. El módulo de la tensión a los extremos de  $L$  no es proporcional a la corriente que circula por el sistema; ya que  $L$  no es un parámetro constante. La característica  $E_L = F(I)$  es lo que se denomina curva de magnetización del circuito magnético de la inductancia y su forma se indica en la figura 2.5.



**Figura 2.5. Curva de magnetización de materiales ferromagnéticos.**

La tensión a los extremos del condensador es en cambio proporcional a la corriente a través de la reactancia capacitiva  $1/wC$  es decir:

$$E_c = \frac{1}{wC} I$$

- b) La inductancia del núcleo es una función de la corriente es decir, es dependiente del valor de la corriente de magnetización, debida a la saturación del núcleo.

Otras diferencias fundamentales entre un circuito ferroresonante y un circuito resonante lineal son, para una  $\omega$  dada:

- La posibilidad de ferroresonancia dentro de una gran gama de parámetros de C.
- La frecuencia de las ondas de voltaje y corriente pueden ser diferentes a las de la fuente de voltaje senoidal.
- La existencia de varios regímenes permanentes estables para una configuración y valores de parámetros dados.

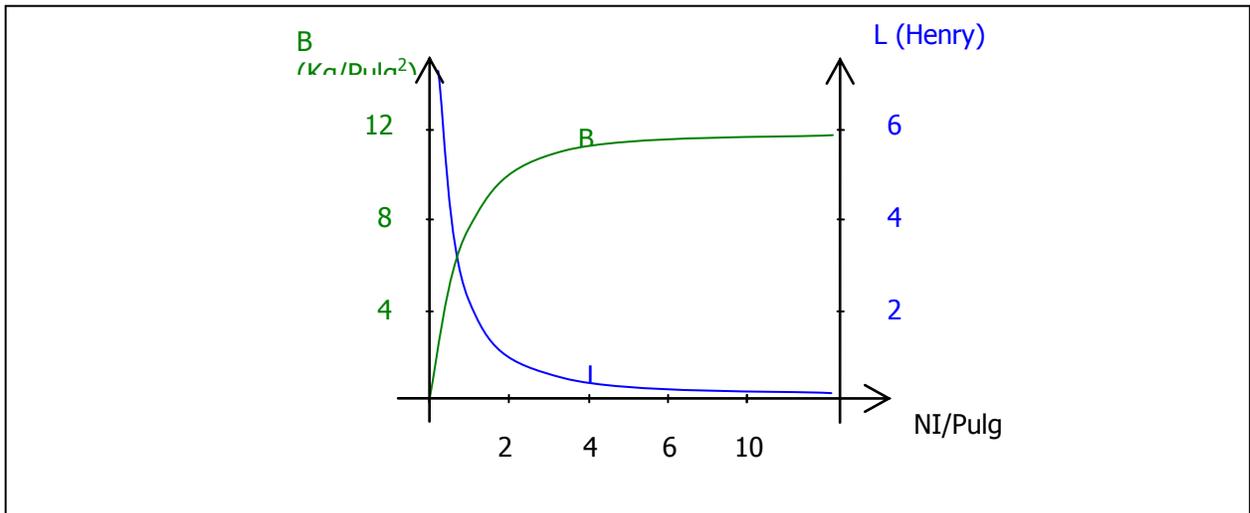
La ferroresonancia se produce principalmente en transformadores cuando están en vacío o con muy poca carga, o bien operando cerca del codo de la curva de magnetización; es decir, la corriente por lo general no sería senoidal además de representar un alto contenido de armónicos impares.

La caída de tensión en una inductancia  $E_L$  está dada por:

$$e_L = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \tag{2.6}$$

$$L(i) = N \frac{d\phi}{di} \tag{2.7}$$

La inductancia para cada valor de la corriente queda definida por la relación anterior y se puede obtener a partir de la curva de magnetización, como se indica en la figura 2.6, en la que podemos ver que la inductancia varía desde un valor muy grande correspondiente a corrientes pequeñas, a un valor pequeño, para corrientes elevadas (núcleo saturado).



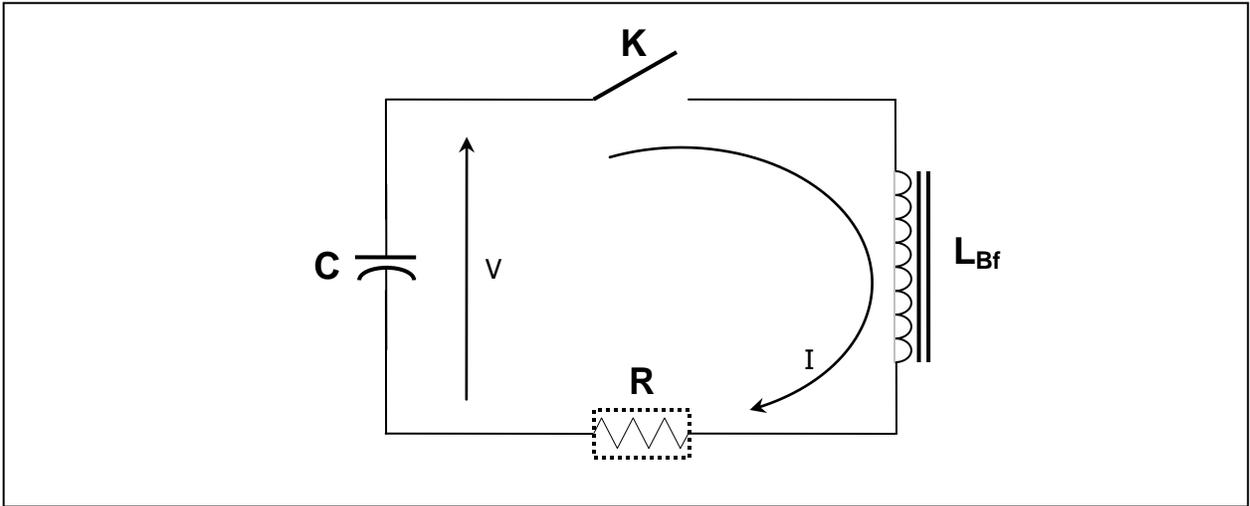
**Figura 2.6 Característica típica de la magnetización e inductancia de un transformador de Potencia de 2000 kVA – 13 kV – 60 Hz.**

Debido a esta variación de la inductancia con el valor de la corriente, en la Ferroresonancia no queda claramente definido que haya o no una frecuencia de resonancia específica;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

El régimen alcanzado depende de las condiciones iniciales (cargas eléctricas de los condensadores, flujo remanente del material que forma el circuito magnético de los transformadores, el instante de conexión, entre otros).

El estudio de las oscilaciones libres del circuito de la figura 2.7a permite ilustrar este comportamiento particular.

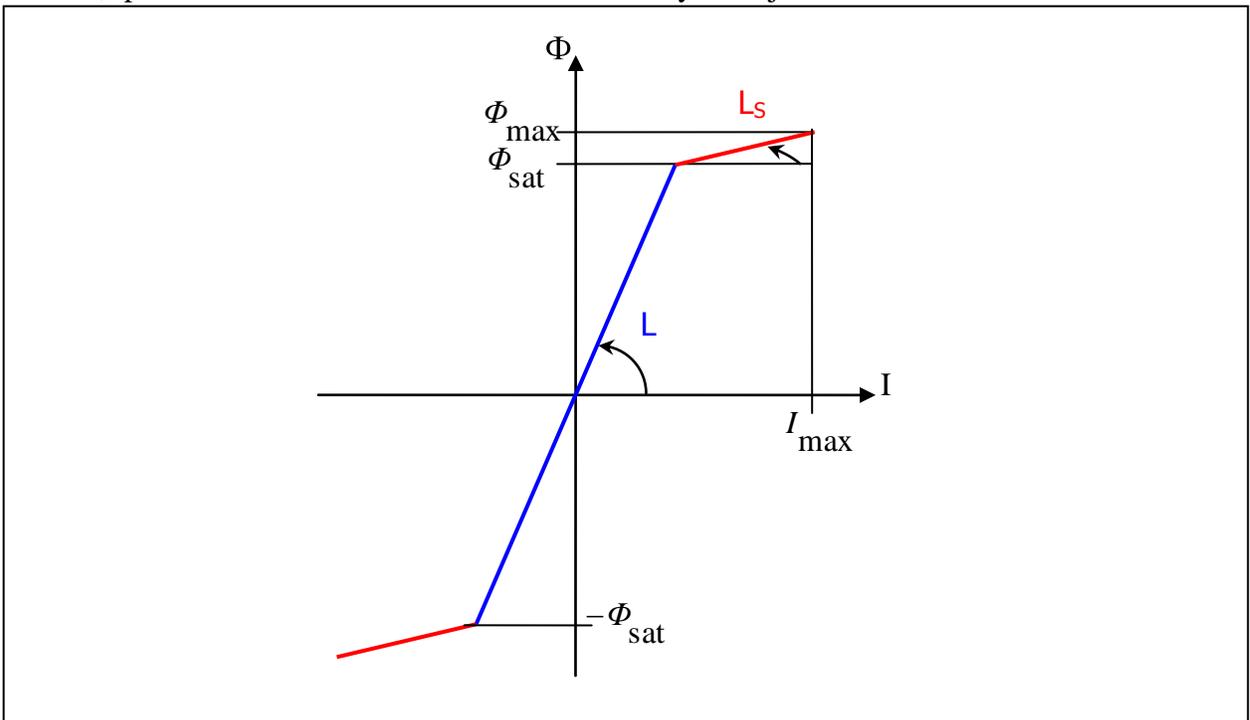


**Figura 2.7a Oscilaciones libres de un circuito ferresonante serie. Esquema de principio.**

Las pérdidas se consideran despreciables y la característica  $\phi(i)$  simplificada de la bobina con núcleo de hierro ( $L_{Bf}$ ) es la representada en la figura 2.7b, donde la curva de magnetización se aproxima por medio de dos rectas, y se pueden definir dos inductancias:

$L$ : para puntos de operación bajo el codo de la curva de magnetización y de alto valor, normalmente asociado a un estado de no-saturación.

$L_S$ : para niveles de alta saturación en el núcleo y de bajo valor



**Figura 2.7b. Oscilaciones libres de un circuito ferresonante serie. Característica  $\phi(i)$  simplificada.**

A pesar de estas hipótesis simplificadas, las formas de onda correspondientes representadas en la figura 2.7c son características de un régimen de ferresonancia periódica.

Al principio, la tensión en bornes de la capacidad se supone igual a  $V_0$ .

En el instante  $t_0$ , el interruptor K (figura 2.7a) se cierra y se establece una corriente que oscila a la pulsación

$$\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$$

Las expresiones del flujo dentro de la bobina y de la tensión V en bornes del condensador son entonces:

$$\phi = (V_0/\omega_1) \text{Sen}(\omega_1 t) , \quad v = V_0 \text{Cos}(\omega_1 t)$$

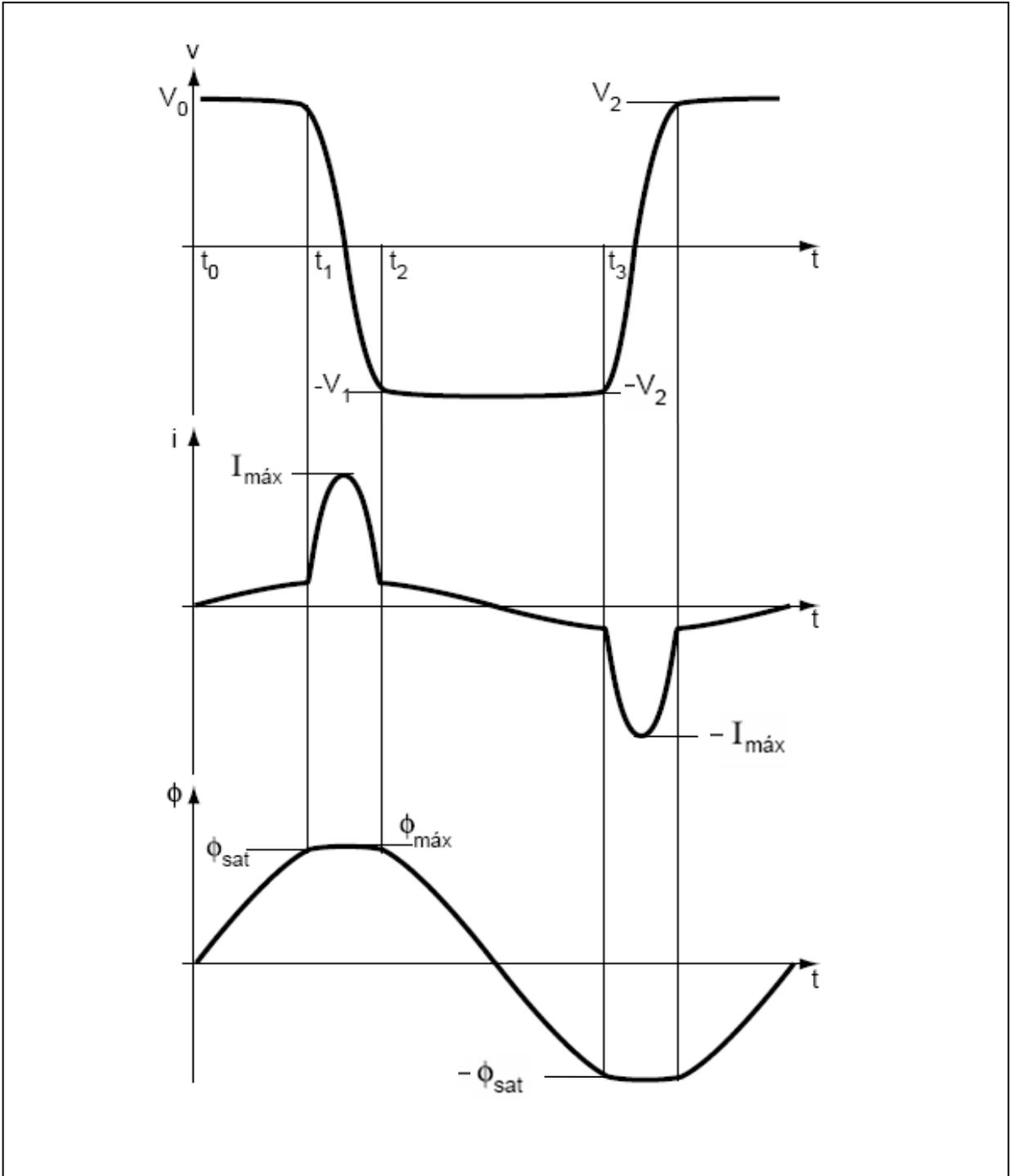


Figura 2.7c. Oscilaciones libres de un circuito ferresonante serie. Tensión  $v$ , corriente  $i$  y flujo  $\phi$  en función del tiempo.

Si  $V_0/w_1 > \phi_{sat}$ , al final del tiempo  $t_1$  el flujo  $\phi$  alcanza el flujo de saturación  $\phi_{sat}$ , la tensión  $v$  alcanza  $V_1$  y la inductancia de la bobina saturada pasa a ser  $L_S$ . Como  $L_S$  es mucho menor que  $L$ , el condensador se descarga bruscamente a través de la bobina bajo la forma de una oscilación de pulsación  $w_2 = 1/\sqrt{L_S C}$ . La corriente y el flujo pasan por un máximo cuando la energía electromagnética almacenada por la bobina es igual a la energía electrostática  $1/2CV_1^2$  devuelta por el condensador.

En el instante  $t_2$ , el flujo vuelve a ser el de saturación  $\phi_{sat}$ , la inductancia toma de nuevo el valor  $L$  y como las pérdidas se han considerado despreciables, la tensión  $v$ , que es inversa, es igual a  $-V_1$ .

En el instante  $t_3$ , el flujo alcanza  $-\phi_{sat}$  y la tensión  $v$  es igual a  $-V_2$ . Como en la práctica  $w_1$  es muy pequeña, se puede considerar  $V_2 \approx V_1 \approx V_0$ .

Por consiguiente, el periodo  $T$  de oscilación queda comprendido entre  $2\pi\sqrt{LC}$  en el caso de no saturación, y  $2\pi\sqrt{L_S C} + 2(t_3 - t_2)$  en el caso de saturación (siendo  $t_3 - t_2 \approx 2\phi_{sat}/V_0$ ).

La frecuencia  $f$  correspondiente ( $f = 1/T$ ) es pues tal que:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C}}$$

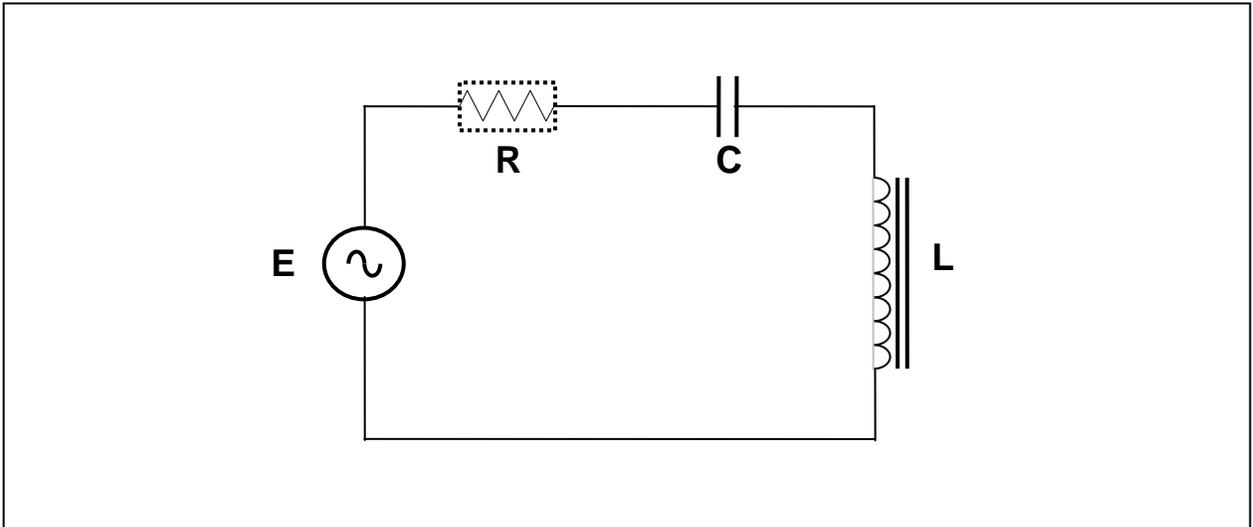
Esta frecuencia inicial depende del flujo de saturación  $\phi_{sat}$ , es decir de la no linealidad y de la condición inicial  $V_0$ .

En la práctica, debido a las pérdidas por efecto Joule, ( $R_i^2$ ) en la resistencia  $R$  (sobre todo en cada inversión de tensión) la amplitud de la tensión decrece ( $V_2 < V_1 < V_0$ ). Como la variación de flujo  $\Delta\phi$  durante el periodo ( $t_3 - t_2$ ) de no saturación es tal que  $\Delta\phi = 2\phi_{sat} = \int_2^{t_3} v dt$ , la disminución de  $v$  conduce a una disminución de la frecuencia. Si las pérdidas de energía (pérdidas por efecto Joule, pérdidas en el hierro...) se compensan mediante una fuente de tensión, la frecuencia, al disminuir, se puede sincronizar con la frecuencia de la fuente (en el caso en que la frecuencia inicial sea superior a la frecuencia de la red), o bien a una frecuencia submúltiplo de la de la fuente (en el caso en que la frecuencia inicial sea menor que la de la red).

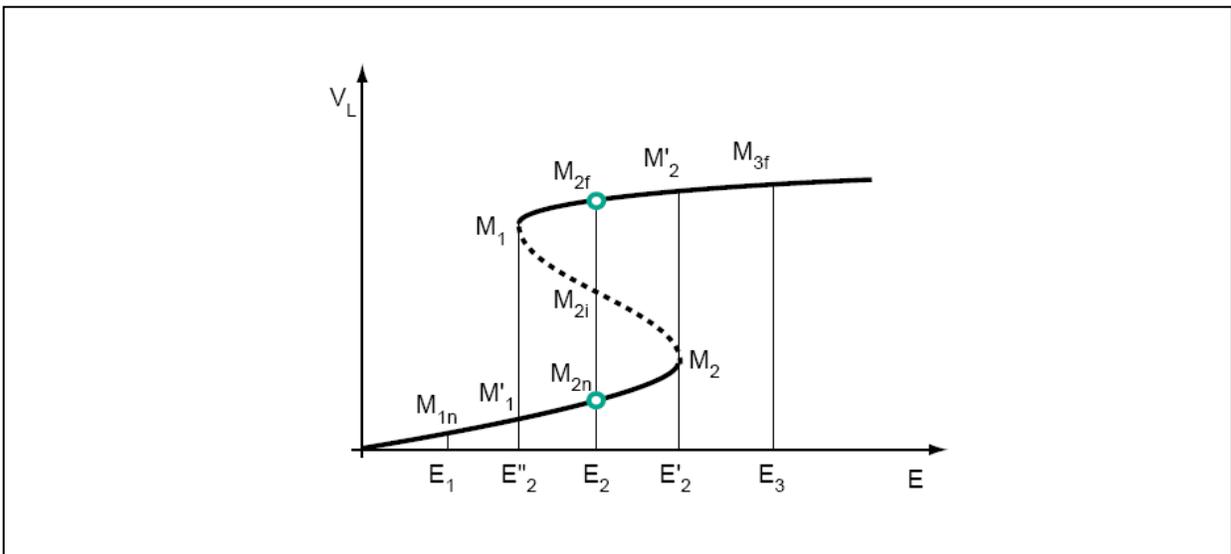
Esto demuestra que contrariamente a la resonancia lineal, para una inductancia dada, el fenómeno de la resonancia puede aparecer no sólo para un valor determinado de  $C$  sino para una gran gama de valores de  $C$ .

Gracias a los métodos adaptados de modelización y aproximación matemática que se mencionan más adelante en este capítulo, el estudio del circuito de la figura 2.8a permite trazar

las curvas representadas en las figuras 2.8b y 2.8c. Estas curvas ilustran las características de la ferresonancia:



**Figura 2.8a. Ilustración de las características de la ferresonancia. Circuito de base de ferresonancia serie.**

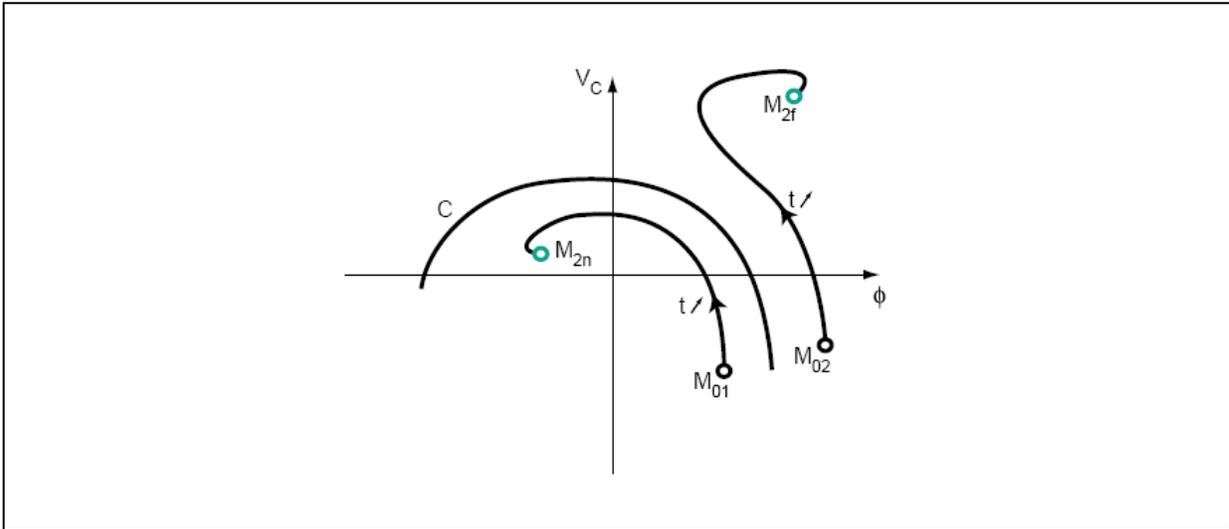


**Figura 2.8b. Ilustración de las características de la ferresonancia. Sensibilidad a los parámetros de la red y fenómeno de salto.**

- **Sensibilidad a los valores de los parámetros de la red, fenómeno de salto.** La curva de la figura 2.8b describe la tensión de cresta  $V_L$  en bornes de la inductancia no lineal en función de la amplitud de cresta  $E$  de la fuente de tensión senoidal. Al aumentar

progresivamente la amplitud de cresta  $E$  a partir de cero, la curva de la figura 2.8b ilustra la posibilidad de tres comportamientos distintos según el valor de  $E$  así como el fenómeno de salto:

- ✓ Para  $E = E_1$  la solución ( $M_{1n}$ ) es única y corresponde al régimen normal (obtenida en la hipótesis lineal)
- ✓ Para  $E = E_2$  existen tres soluciones ( $M_{2n}$ ,  $M_{2i}$ ,  $M_{2f}$ ), dos de las cuales son estables ( $M_{2n}$  y  $M_{2f}$ ). Una de ellas,  $M_{2n}$ , corresponde al régimen normal y la otra,  $M_{2f}$  al régimen ferroresonante, la parte de la curva a trazo discontinuo (no puede ser obtenida en la realidad) corresponde a regímenes inestables
- ✓ Para  $E = E_2'$ , la tensión  $V_L$  pasa brutalmente del punto  $M_2$  al punto  $M_2'$  (fenómeno de salto). El punto  $M_2$  se llama punto límite
- ✓ Para  $E = E_3$ , sólo el régimen ferroresonante ( $M_{3f}$ ) es posible
- ✓ Mientras el valor de  $E$  decrece a partir de  $E_3$ , la solución pasa muy bruscamente del punto  $M_1$  (segundo punto límite) al punto  $M_1'$ . El fenómeno de salto característico de la ferroresonancia también se puede obtener a partir de otro parámetro de la red (la resistencia  $R$  o la capacidad  $C$ , por ejemplo). Una pequeña variación de un parámetro de la red o del régimen transitorio puede provocar un salto brusco entre dos regímenes estables muy distintos



**Figura 2.8c. Ilustración de las características de la ferroresonancia. Sensibilidad a las condiciones iniciales.**

- **Sensibilidad a las condiciones iniciales.** La obtención de  $M_{2n}$  o de  $M_{2f}$  depende de las condiciones iniciales. La figura 2.8c ilustra las trayectorias del régimen transitorio de los pares  $(\phi, V_c)$  en función del tiempo para distintas condiciones iniciales ( $M_{01}$  y  $M_{02}$ ). La curva C determina una frontera. Si las condiciones iniciales (flujo remanente, tensión en bornes del condensador) se encuentran a un lado de la frontera, la solución converge hacia  $M_{2n}$ . Si las condiciones iniciales se encuentran al otro lado, la solución converge hacia  $M_{2f}$ . Como el punto  $M_{2i}$  pertenece a la frontera, cerca de este punto el régimen permanente obtenido es muy sensible a las condiciones iniciales.

### 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RÉGIMENES FERRORESONANTES

La experiencia con las formas de onda presentes en las redes, los experimentos sobre modelos reducidos de redes así como las simulaciones numéricas (digitales) permiten clasificar los regímenes permanentes de resonancia en cuatro tipos distintos.

- Régimen fundamental
- Régimen subarmónico
- Régimen casi-periódico
- Régimen caótico.

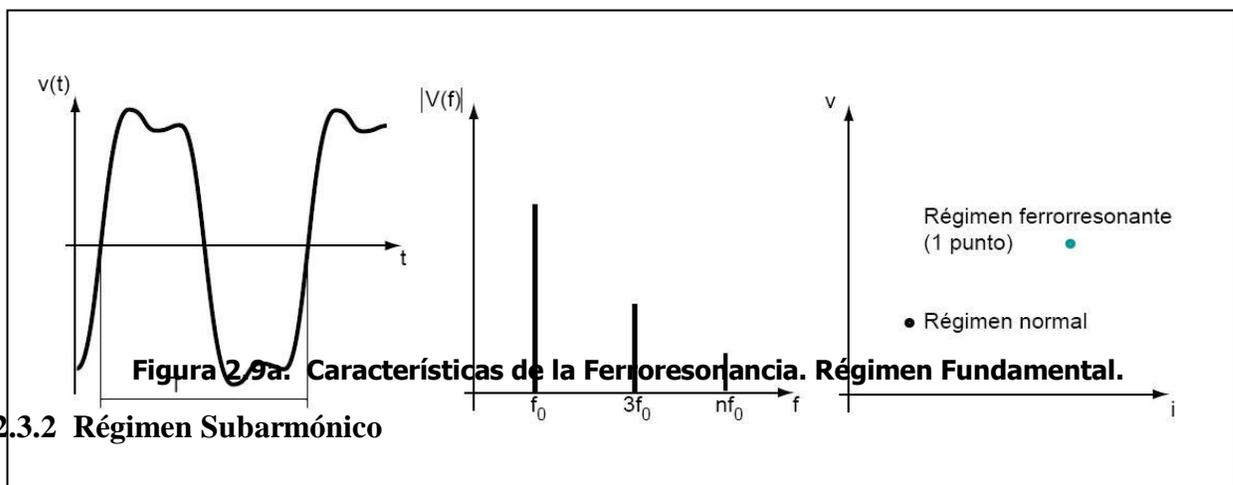
Los diferentes regímenes ferroresonantes o el tipo de ferroresonancia se puede detectar por medio de un espectro de señales de corrientes y tensiones, o bien por una imagen estroboscópica obtenida al medir la corriente  $i$  y la tensión  $v$  en un lugar dado de la red, y trazando en el plano  $v$ ,  $i$  los valores instantáneos correspondientes a instantes separados por un periodo de red.

Las características de cada tipo de ferroresonancia pasan a detallarse a continuación:

### 2.3.1 Régimen Fundamental

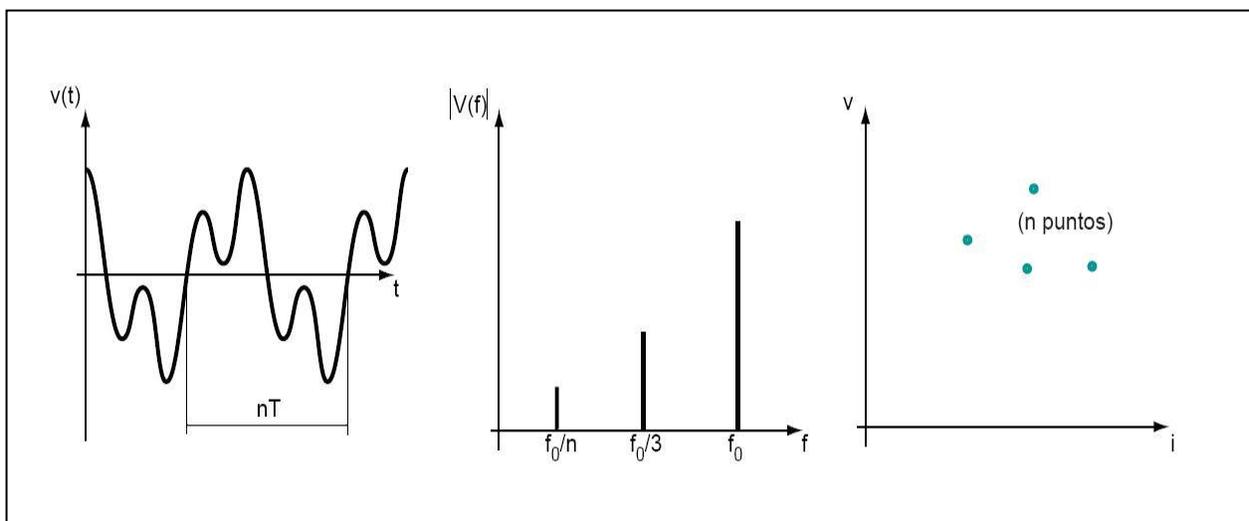
Las tensiones y corrientes son periódicas con periodo  $T$  igual al de la red y pudiendo contener más o menos armónicos.

El espectro de las señales es un espectro discontinuo formado por una fundamental  $f_0$  de la red y sus armónicos ( $2f_0$ ,  $3f_0$ ...). La imagen estroboscópica se reduce a un punto alejado del que representa el régimen normal.



### 2.3.2 Régimen Subarmónico

Las señales son periódicas con periodo  $nT$  múltiplo del de la red. Este régimen se llama subarmónico  $n$  o armónico  $1/n$ . El espectro presenta una fundamental igual a  $f_0/n$  (donde  $f_0$  es la frecuencia de la red y  $n$  un número entero) y sus armónicos (la frecuencia fundamental de la red  $f_0$  forma parte pues del espectro). En su trazo estroboscópico hace aparecer “ $n$ ” puntos.

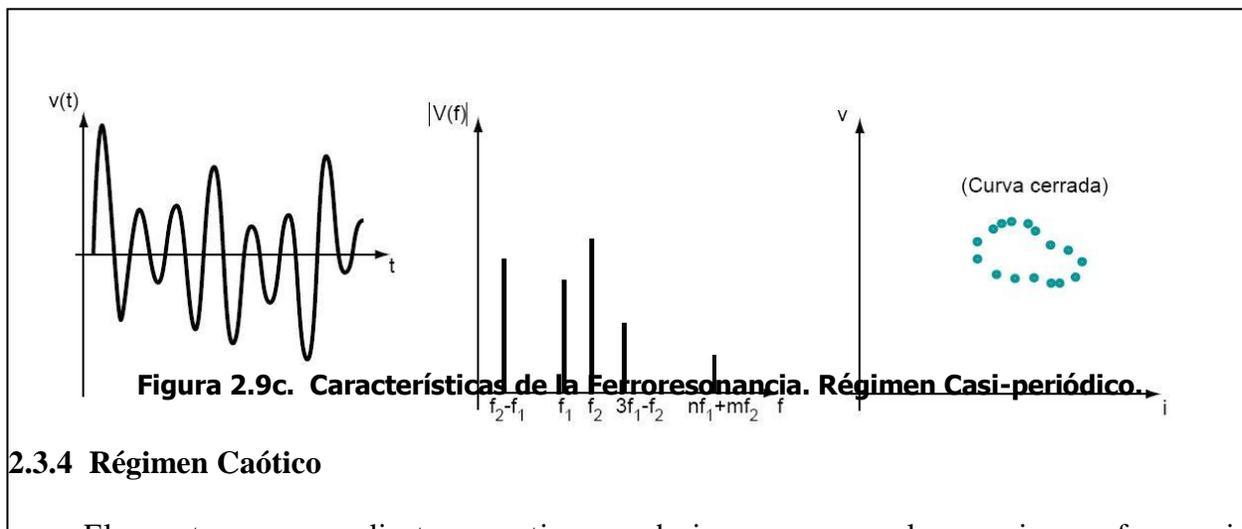


**Figura 2.9b. Características de la Ferroresonancia. Régimen Subarmónico.**  
**2.3.3 Régimen Casi-periódico**

Este régimen, también llamado pseudoperiódico, no es periódico.

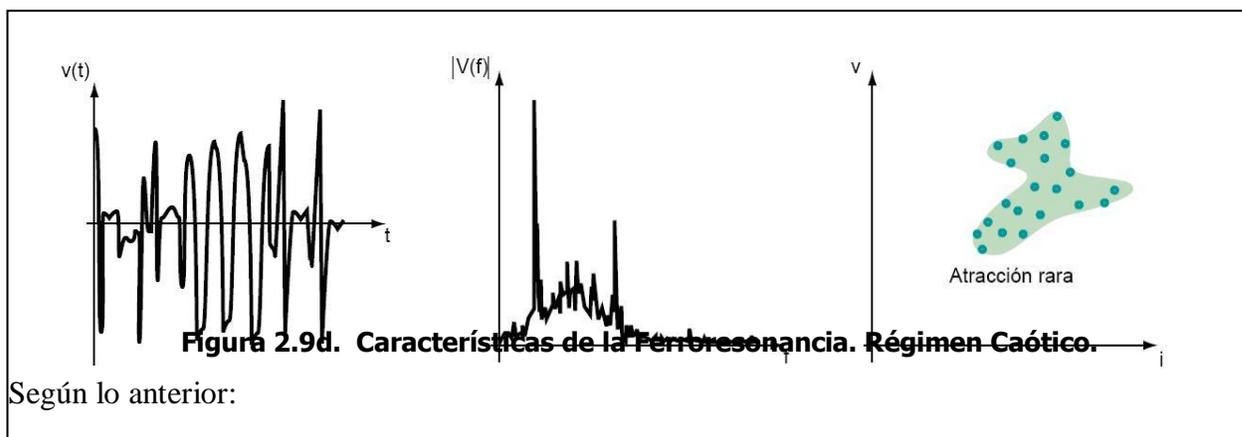
El espectro es un espectro de rayas donde las frecuencias se expresan bajo la forma:  $nf_1 + mf_2$  (donde  $n$  y  $m$  son números enteros y  $f_1/f_2$  son números reales irracionales).

La imagen estroboscópica muestra una curva cerrada.



**2.3.4 Régimen Caótico**

El espectro correspondiente es continuo, es decir, que no se anula para ninguna frecuencia. Su imagen estroboscópica está constituida por puntos distintos todos ellos que ocupan una superficie dentro del plano  $v, i$  denominada «atracción extraña».



Según lo anterior:

- El fenómeno de la ferresonancia es un fenómeno complejo caracterizado por: o una multiplicidad de regímenes permanentes para un circuito dado, o una gran sensibilidad de la aparición de estos regímenes a los valores de los parámetros de la red, o una gran sensibilidad de la aparición de estos regímenes a las condiciones iniciales.
- Una pequeña variación de alguno de los parámetros de la red o del régimen transitorio puede provocar un salto brusco entre dos regímenes estables muy distintos y desencadenar uno de los cuatro tipos de regímenes permanentes de ferresonancia; los regímenes que se encuentran más a menudo son el régimen fundamental y el régimen subarmónico.
- Las tasas de armónicos anormales, las sobretensiones o las sobreintensidades transitorias o permanentes que provoca la ferresonancia son a menudo las causas del deterioro de los materiales eléctricos.
- La ferresonancia estacionaria se sustenta por la energía suministrada por la tensión de la red.

## **2.4 MODELIZACIÓN Y APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DE LA FERRESONANCIA**

Los medios de estudio de los problemas electromagnéticos transitorios y de la ferresonancia son:

- **La simulación analógica:** Basada en una representación en modelo reducido de los elementos de la red, presenta la ventaja de obtener resultados en tiempo real pero con el inconveniente de la dificultad de representar un caso real con precisión.
- **La simulación numérica temporal en transitorio:** La resolución del sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de la red necesita la utilización de medios informáticos. En el caso de la ferresonancia, los regímenes transitorios suelen ser largos, y por tanto, los tiempos de simulación importantes y los estudios costosos. Puesto que el

fenómeno de la ferresonancia es muy sensible a los valores de los parámetros y a las condiciones iniciales que normalmente son poco conocidas en la práctica; hay que hacer un estudio para cada posible combinación. Pero esto es poco realista.

Los métodos anteriormente citados no se adaptan bien a la búsqueda de una visión global del comportamiento de la red. Para aminorar los inconvenientes de estos métodos las matemáticas han desarrollado los siguientes métodos:

#### **2.4.1 Métodos de cálculo directo del régimen permanente**

Las matemáticas han desarrollado métodos frecuenciales o temporales que permiten calcular las soluciones en régimen permanente sin pasar por el cálculo del régimen transitorio, generalmente muy largo en el caso de la ferresonancia.

Los métodos siguientes permiten estudiar la ferresonancia periódica (fundamental subarmónica). El principal método frecuencial es el método Galerkin. Los principales métodos temporales son el método del punto fijo de la aplicación de Poincaré y el método de las perturbaciones.

##### **2.4.1a Métodos de Galerkin**

Este método consiste en buscar una solución aproximada del sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que describen el comportamiento de una red. La solución se descompone en una serie de Fourier limitada al rango  $k$  para resolver las soluciones periódicas. La incógnita se sustituye por su expresión. Lo que lleva a un sistema de  $2k + 1$  ecuaciones y  $2k + 1$  incógnitas (los coeficientes del desarrollo de la serie de Fourier).

##### **2.4.1b Método del punto fijo de la aplicación de Poincaré**

Siendo una solución periódica de periodo  $nT$ , el método consiste en buscar de forma iterativa una solución invariante para una simulación numérica del sistema sobre el periodo  $nT$ .

##### **2.4.1c Método de las perturbaciones**

El método consiste en simplificar un sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del circuito anulando ciertos parámetros tales como la pérdida y la amplitud de la fuente de tensión. Después de haber resuelto la ecuación así obtenida, los términos anulados se introducen mediante un desarrollo limitado alrededor de la solución anteriormente obtenida. Este método es especialmente interesante cuando se asocia al método de continuación.

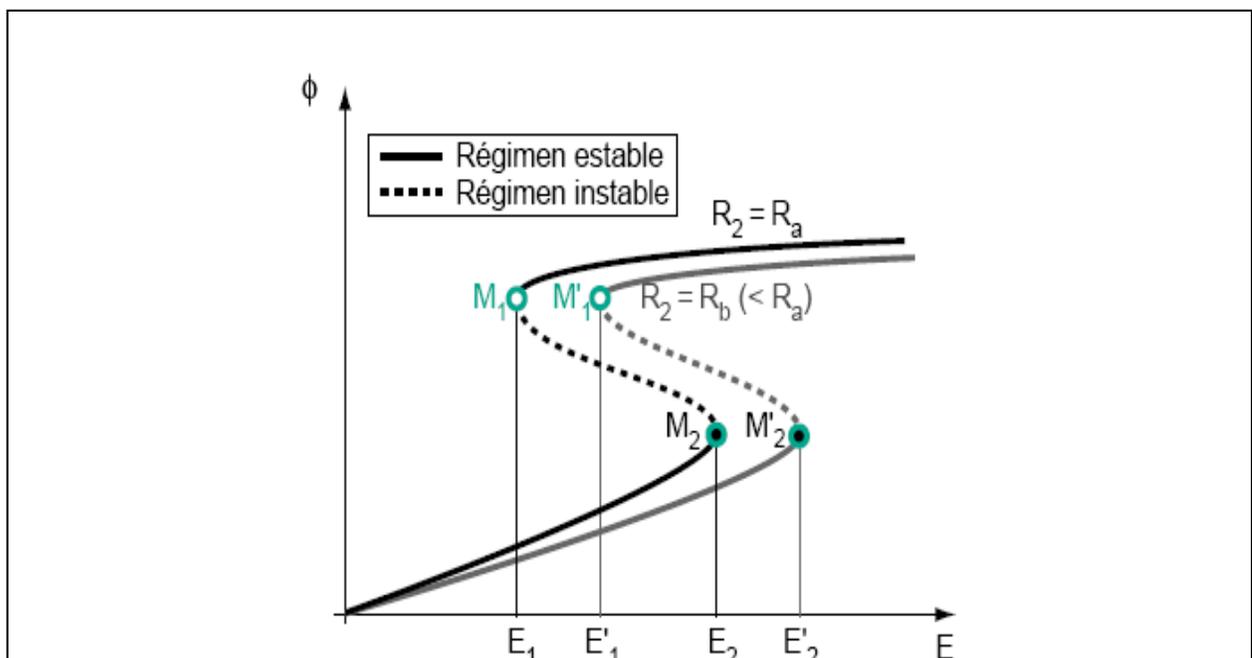
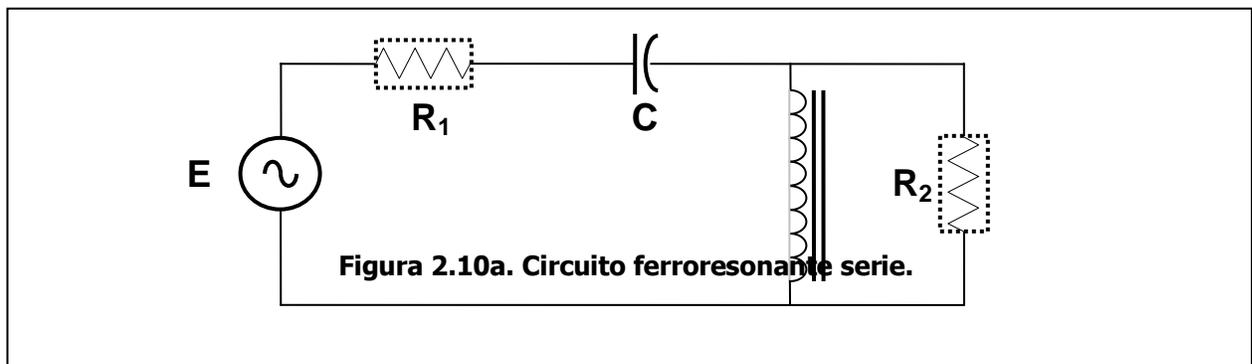
##### **2.4.1d Método de continuación**

El cuadro matemático adaptado al estudio global del comportamiento de los sistemas dinámicos es la teoría de las bifurcaciones donde la herramienta principal es el método de continuación. Utilizado conjuntamente con los métodos de cálculo directo del régimen permanente, permite determinar las zonas de riesgo.

Este método numérico basado en el procedimiento iterativo permite el estudio de la influencia de un parámetro (por ejemplo la amplitud de la fuente de tensión) sobre las soluciones (por ejemplo el flujo en un transformador) de las ecuaciones que describen el sistema. Los puntos de la curva de las soluciones, se obtienen por aproximación a partir de una solución conocida.

Conociendo una solución  $x_0$  correspondiente al valor  $E_0$  del parámetro escogido, la solución vecina  $x_1$  se obtiene inicializando la resolución del sistema para la solución  $x_0$  y el valor vecino  $E_1$  del parámetro. La curva así obtenida por aproximación, se llama diagrama de bifurcación.

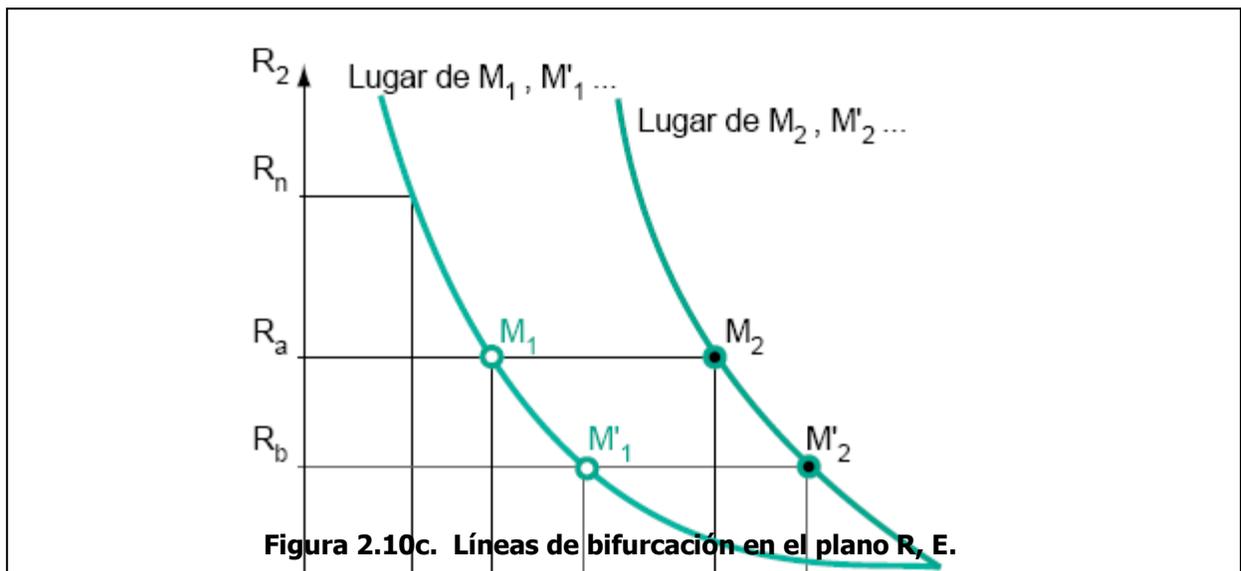
**Diagramas de bifurcación:** Para el circuito ferrosesonante serie de la figura 2.10a, los ejemplos de diagramas de bifurcación según la amplitud  $E$  de la fuente de tensión para dos valores ( $R_a$  y  $R_b$ ) de la resistencia paralela  $R_2$  se trazan en la figura 2.10b. Para un valor de  $R_2$  dado, estas curvas ponen en evidencia dos puntos particulares ( $M_1$  y  $M_2$  para  $R_2 = R_a$ ) llamados puntos límite para los cuales hay cambio de estabilidad.



**Figura 2.10b. Diagrama de bifurcación según E.**

**Líneas De Bifurcación:** Para cada uno de los puntos  $M_1$  y  $M_2$  es posible determinar el valor de  $E$  correspondiente llamado valor crítico ( $E_1$  para el punto  $M_1$  y  $E_2$  para el punto  $M_2$ ). El trazo, dentro del plano de dos parámetros, por ejemplo  $E$  y  $R_2$ , de los pares  $(E_1, R_2)$  y  $(E_2, R_2)$  correspondientes a los puntos singulares para los diferentes valores de  $R_2$ , permite obtener las curvas (figura 2.10c) que representan la frontera entre dos regímenes de funcionamiento distintos, el normal y el ferresonante.

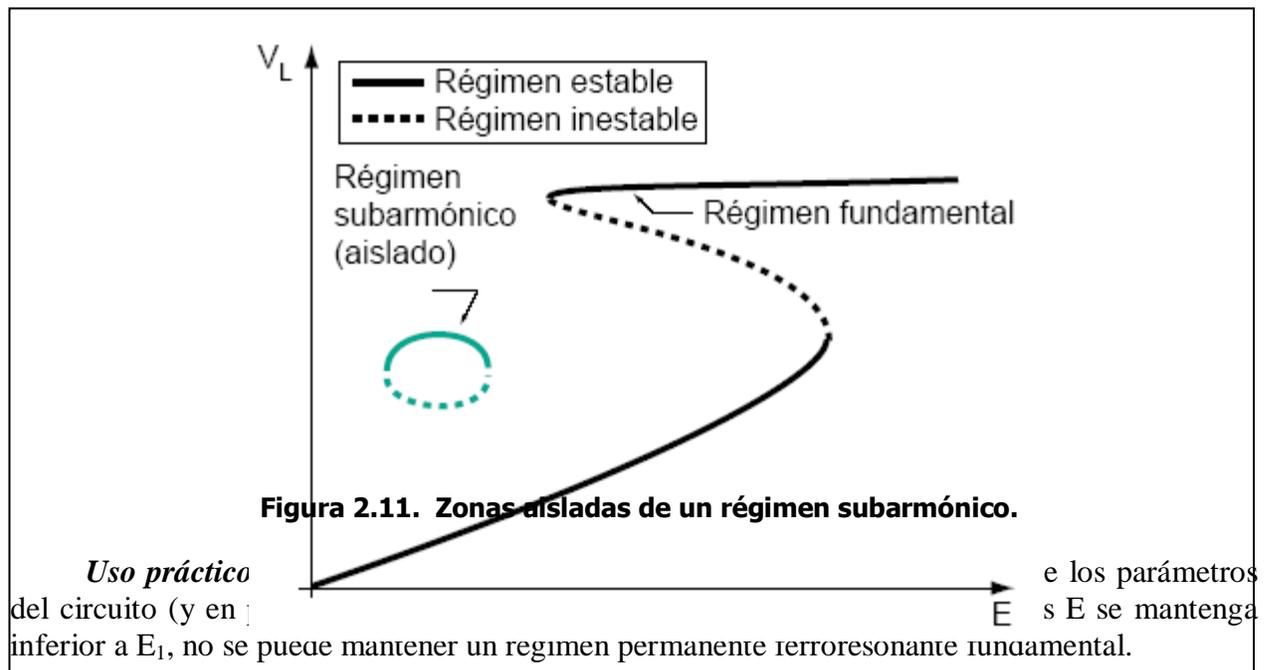
Las curvas así obtenidas se llaman curvas de bifurcación. También es posible trazar líneas de bifurcación en el plano de diferentes pares de parámetros tales como por ejemplo  $(R_2, C)$  o  $(R_1, E)$ .



**Zonas aisladas o separadas (isolat):** Los diagramas de bifurcación de la figura 2.10b corresponden al caso de la ferresonancia fundamental. Estas curvas pasan en efecto por la solución evidente  $(0,0)$ . A partir de este punto, el usuario puede iniciar el método de continuación.

En cambio, la continuación de los (isolats), que son las curvas cerradas, es más delicada. Es necesario conocer una solución aparente a esta curva aislada para iniciar el método de continuación. La utilización del método de las perturbaciones permite obtener esta solución. Las

curvas obtenidas corresponden a una frecuencia diferente de la de la fuente de tensión, como por ejemplo el (isolat) subarmónico representado en la figura 2.11. Para una tensión  $E$  comprendida entre las extremidades de la zona aislada, la mínima perturbación puede hacer pasar al sistema de la curva verde a la curva negra y viceversa.



**Uso práctico de las líneas de bifurcación:** Si bajo todas las condiciones de explotación de la red, la amplitud  $E$  de la fuente de tensión es inferior a  $E_n$ , la figura 2.10c muestra que el valor de una resistencia  $R_2$  inferior a  $R_n$  garantiza la ausencia de ferroresonancia fundamental. Dada la imprecisión en los valores de los parámetros de la red, el truco consiste en tomar un margen de seguridad con relación a dos dominios de riesgo.

Hay que precisar que todos los regímenes situados en las zonas de riesgo cuyas fronteras están constituidas por las líneas de bifurcación no se alcanzan necesariamente en la práctica, porque hace falta que ciertas condiciones iniciales especiales sean verdaderas. Las simulaciones numéricas temporales permiten determinar si estas condiciones iniciales son posibles en la práctica.

## 2.5 ANALISIS DE LA FERRORESONANCIA EMPLEANDO UN METODO GRAFICO

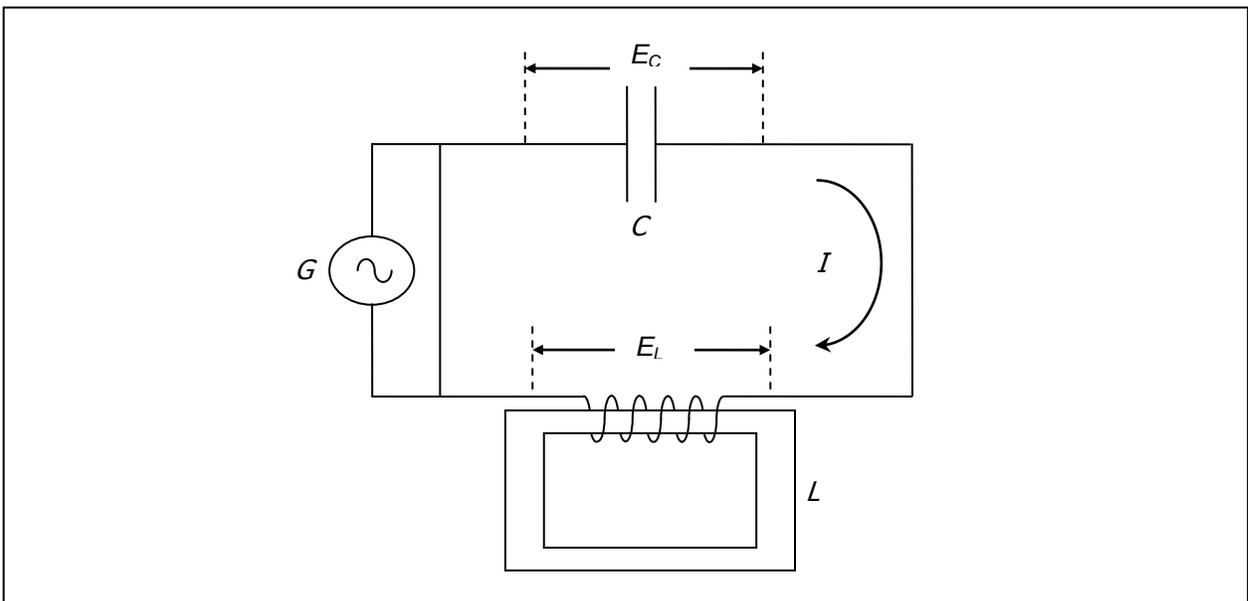
Con un cambio de las condiciones del circuito, el voltaje (con relación a la corriente) puede cambiar de adelanto a atraso y viceversa, como se mostró en el circuito de las figuras 2.2 y 2.3.

El cálculo matemático de las corrientes, voltajes y otras cantidades eléctricas en los circuitos ferresonantes, como se ha hecho en los circuitos lineales, no son satisfactorios a causa de la forma no senoidal de las ondas, también porque la inductancia varía ampliamente con el valor de la corriente (figura 2.6) resultando mucho más conveniente, y para un mejor entendimiento de la operación de circuitos, el uso del método gráfico.

La figura 2.12 muestra un capacitor  $C$  y un reactor de núcleo de acero  $L$ , conectados en serie con un generador  $G$  que suministra un voltaje senoidal  $E$ . La resistencia del circuito en lo concerniente a la ferresonancia se puede despreciar.

El voltaje a través del reactor es  $E_L$  con  $E_L = I\omega L = IX_L$  y el voltaje a través del capacitor  $E_C$  donde  $E_C = I/\omega C = IX_C$ , en el cual  $L$  es la inductancia en Henries,  $C$  la capacidad en Faradios, y  $\omega = 2\pi f$  donde  $f$  es la frecuencia en Hertz.

Si cualquier voltaje o corriente no fuera senoidal, se considerará solamente su componente fundamental. En sistemas eléctricos el voltaje  $E$  corresponderá al voltaje del sistema, el reactor  $L$  al primario de un transformador o a un reactor shunt y el capacitor  $C$  a la capacitancia, usualmente a tierra de los conductores aéreos y los cables subterráneos.



**Figura 2.12. Circuito ferresonante con un generador de onda senoidal, un condensador y un núcleo inductor en serie.**

Si se desprecia la resistencia, el voltaje del sistema debe resultar de los voltajes  $E_C$  y  $E_L$ .

$$E = E_L + E_C \quad \text{Voltios} \quad (2.8)$$

El voltaje a través de la inductancia  $E_L$  es proporcional a la frecuencia y puede ser representado por:

$$E_L = \omega f(I) \quad \text{Voltios} \quad (2.9)$$

Donde  $f(I)$  es una función de la corriente la cual es característica de la ferroiductancia y depende solamente del número de vueltas y las dimensiones del núcleo de acero.

La tensión en los extremos del condensador es:

$$E_C = -\frac{I}{\omega C} = -\frac{I}{2\pi f C} \quad \text{Voltios} \quad (2.10)$$

Cuando el signo de  $E_C$  se hace negativo correspondiendo a la condición  $E_L > E_C$  como se muestra en la figura 2.2, se tiene:

$$E = E_L - E_C \quad \text{ó} \quad E_L = E + E_C \quad (2.11)$$

Es decir:

$$E = \omega f(I) - \frac{I}{\omega C} \quad (2.12)$$

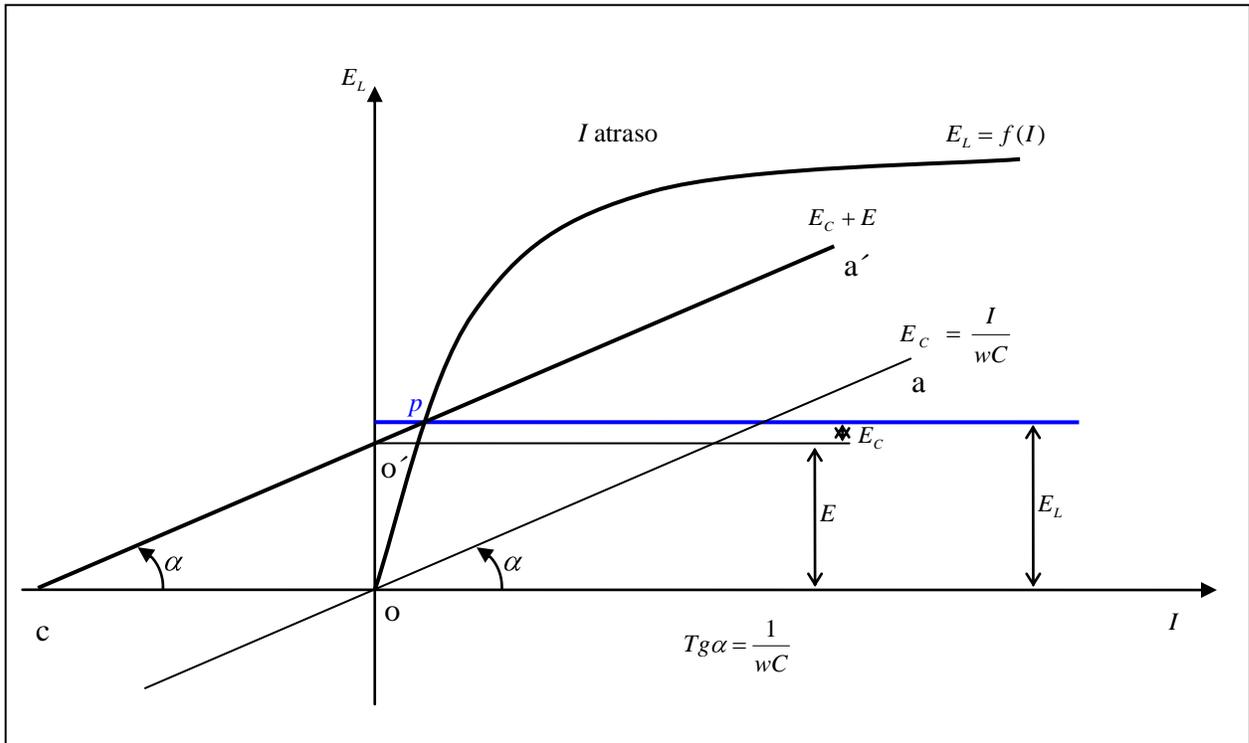
Para hallar el punto de funcionamiento del sistema (voltaje a los extremos de la inductancia y corriente que circula) hay que resolver la ecuación anterior ordenada de la siguiente forma:

$$f(I) = \frac{E}{\omega} + \frac{I}{\omega^2 C} \quad (2.13)$$

La solución de esta ecuación, por un método gráfico es el punto de intersección del sistema:

$$E_L = \omega f(I) \quad \cap \quad E_L = E + \frac{I}{\omega C}$$

La ecuación anterior se obtiene gráficamente como se muestra en la figura 2.13



**Figura 2.13. Interpretación gráfica del circuito ferresonante con un solo punto de operación.**

En la figura 2.13 la tensión de alimentación está representada por una recta horizontal a distancia  $E$  del eje de abscisas.

La tensión en los extremos del condensador está representada por la recta (oa) de pendiente  $1/wC$  y que forma el ángulo  $\alpha$  con el eje  $I$ , donde:  $Tg(\alpha) = 1/wC$

La suma de la tensión de alimentación y la tensión a los extremos del condensador es la recta (o'a') de la misma pendiente  $1/wC$  la cual intercepta al eje de las ordenadas a una distancia  $E$  del origen, y al eje  $I$  en el punto (c). La distancia (oc) sobre el eje  $I$  es la corriente de carga del capacitor con el voltaje  $E$  del sistema.

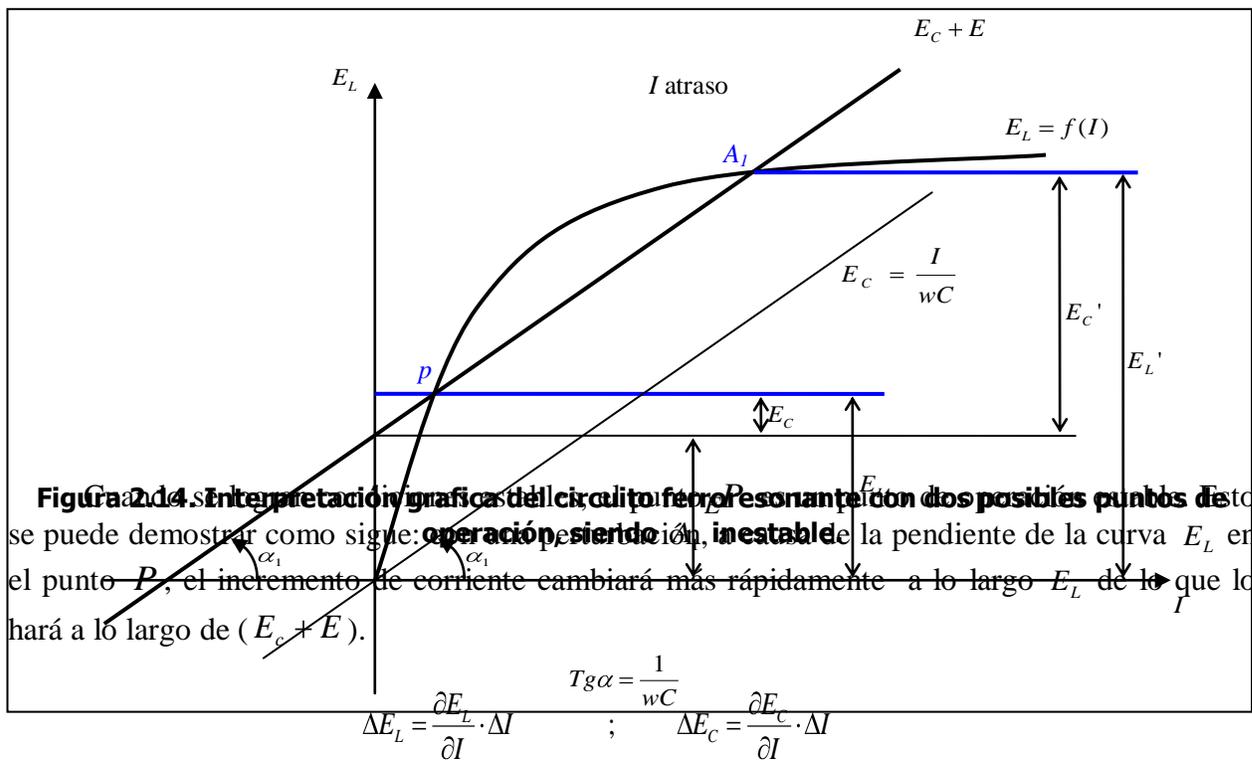
$$oc = oo' Ctg(\alpha) = E Ctg(\alpha) = \frac{E}{Tg(\alpha)} = EwC \quad \text{Amp.} \quad (2.14)$$

Para cualquier valor de corriente dado, el voltaje  $E_L$  del reactor debe caer sobre la característica del trazado  $E_L$  y el voltaje del capacitor debe caer sobre la característica ( $E_c + E$ ). Así el punto de operación debe estar en la intersección P de ambas curvas características.

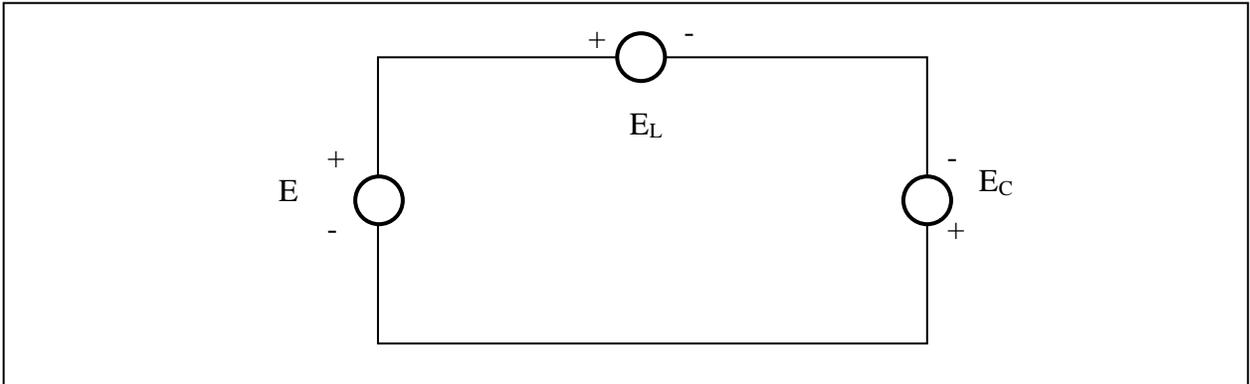
### 2.5.1 Ferresonancia por variación de la capacitancia (C).

Si mantenemos todos los parámetros del sistema constantes, a excepción de la capacidad que se hace variar se obtiene que:

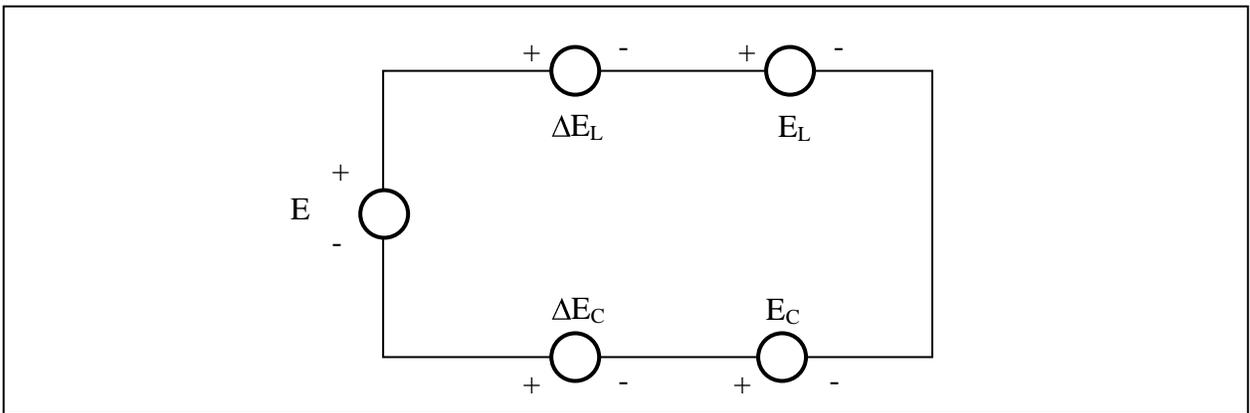
Si se reduce la capacidad  $C$ , el ángulo  $\alpha$  aumenta a  $\alpha_1$ , (la pendiente de la recta aumenta) como se muestra en la figura 2.14, en la cual se aprecian las características de  $E_C$  y  $(E_c + E)$  y los correspondientes puntos de intersección  $P$  y  $A_1$  que se obtienen sobre la curva  $E_L$  haciendo posible dos puntos de operación.



En el punto  $P$   $\frac{\partial E_C}{\partial I} < \frac{\partial E_L}{\partial I}$  por lo que:  $\Delta E_L - \Delta E_C > 0$



**Figura 2.15. Circuito correspondiente a la ecuación  $E_L = E + E_C$**



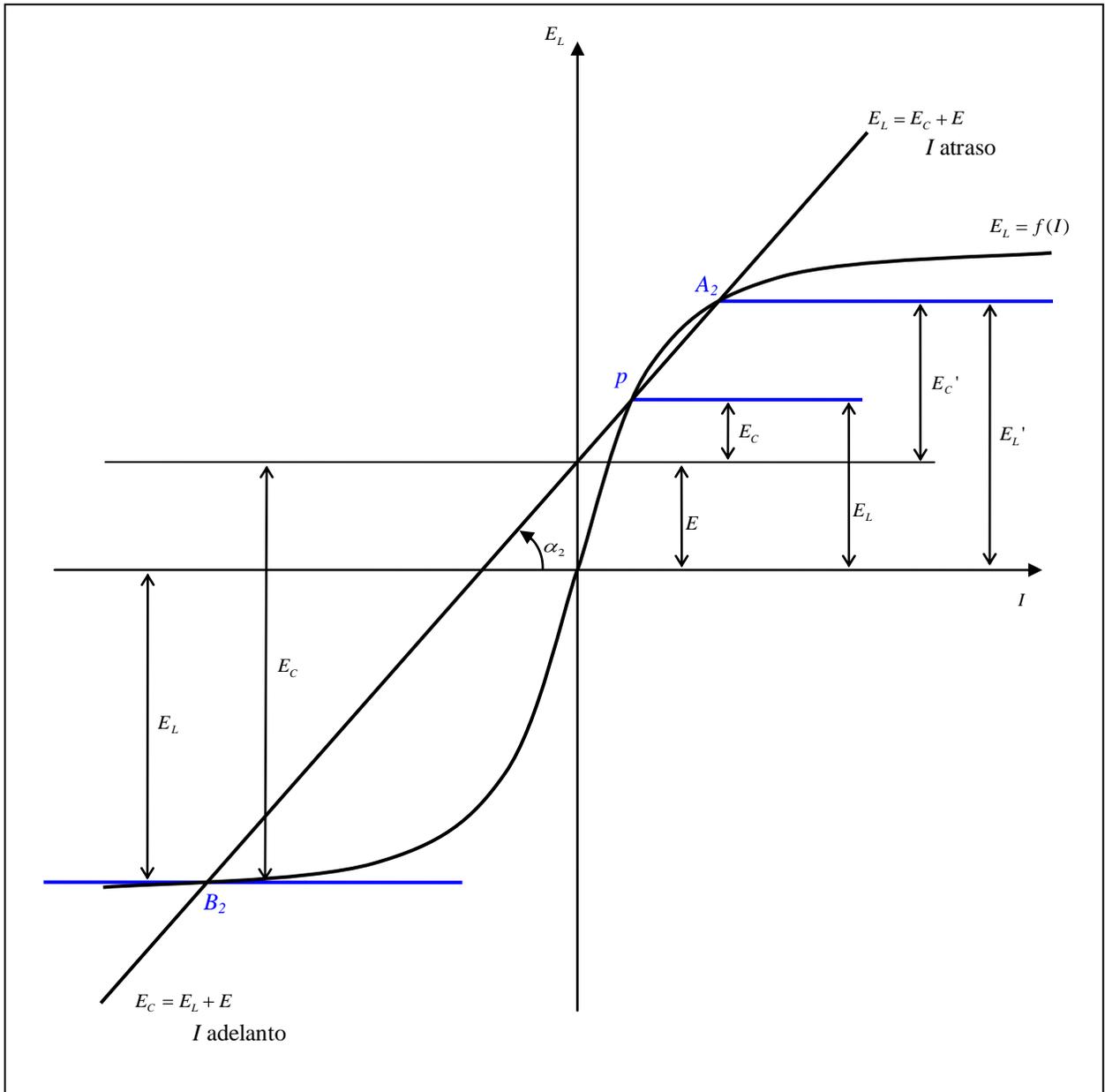
**Figura 2.16. Circuito correspondiente a la ecuación  $E_L = E + E_C$  al ocurrir una perturbación.**  
 De acuerdo con la ecuación:  $E_L = E + E_C$ , el signo de  $E_L$  está en oposición al de  $E$ , de modo que se opone al cambio;  $E_C$  es del mismo signo de  $E$  y así actúa en la dirección del cambio. Sin embargo, siendo el incremento de voltaje en desarrollo a lo largo de  $E_L$  mayor que aquel a lo largo de  $(E_C + E)$  se opone al cambio y la operación vuelve al punto  $P$ .

Sabiendo que  $\Delta E_L - \Delta E_C > 0$ , vemos en la figura 2.16 que el efecto neto de la perturbación se opone a la tensión  $E$ , lo que se traduce en una disminución de la corriente y el punto se desplaza a su posición primitiva  $P$ . Por lo tanto,  $P$  es un punto de operación estable.

Por otra parte, la segunda intersección el punto  $A_1$  es un punto de operación inestable. La pendiente de la curva característica  $(E_C + E)$  en este punto es mayor que aquella de la curva  $E_L$ . Un repentino incremento de la corriente produce un gran aumento de  $E_C$  que actúa en la misma dirección de  $E$  ( $E_L = E_C + E$ ). Por lo tanto habrá un repentino aumento de voltaje en el punto  $A_1$ , produciendo simultáneamente un aumento instantáneo de corriente en el inductor. El

inductor desarrollará entonces una fuerza electromotriz (f.e.m.) en contra ( $-L \frac{dI}{dt}$ ) en oposición a este aumento de corriente. Esta f.e.m. es mayor que la f.e.m. desarrollada por el capacitor ( $e = \frac{q}{c}$ ) a causa del alto valor  $\frac{dI}{dt}$ . Entonces se desarrolla una condición de oscilación continua, el punto de operación es forzado a desplazarse a lo largo de ambas curvas características hasta alcanzar el punto estable  $P$ .

Se debe notar que bajo las condiciones precedentes la operación es en el primer cuadrante, la corriente  $I$  está en atraso, el voltaje del reactor es siempre mayor al voltaje del capacitor  $E_L > E > E_C$  lo que también es cierto en diagrama vectorial de la figura 2.2. Si se continúa reduciendo la capacitancia, la característica  $E_C$  pasa a formar un ángulo  $\alpha_2$  con el eje de la corriente (figura 2.17), por su parte  $(E_c + E)$  hace dos intersecciones con la curva  $E_L$  en el primer cuadrante en los puntos  $P$  y  $A_2$ , pero también al prolongarse intercepta a la curva  $E_L$  en su parte negativa en el tercer cuadrante en el punto  $B_2$ . Como se demostró anteriormente la operación en el punto  $P$  es estable y en el punto  $A_2$  es inestable.



**Figura 2.17. Interpretación grafica del circuito ferroresonante en el primer y tercer**

cuadrante en dos puntos estables  $A_2$  y  $B_2$ . (2.15)

Y la operación es estable con cualquier modificación de la corriente, el voltaje capacitivo actúa en oposición al voltaje aplicado  $E$  cambiando más rápidamente que el voltaje inductivo  $E_L$  que actúa en dirección del voltaje aplicado, y por ello la operación será estable. Cuando se opera en el punto  $B_1$  y en cualquiera de los puntos en el tercer cuadrante la corriente adelanta al voltaje como se indica en la figura 2.3.

En este estado, la corriente en el circuito ha cambiado de dirección desde una corriente de magnetización en atraso a una corriente de carga en adelanto, la cual se incrementará grandemente para intersecciones mas alejadas en el lado izquierdo.

Reduciendo aun más la capacitancia figura 2.18, se llega a la condición en que  $(E_C + E)$  es tangente a la curva  $E_L$  en el punto  $P$ , forma el ángulo  $\alpha_3$  con el eje  $I$  e intercepta la parte negativa de la curva  $E_L$  en  $B_3$ . Esta posición de la curva  $(E_C + E)$  es crítica en cuanto corresponde al menor valor de capacitancia con la cual el sistema opera en el primer cuadrante y así con la corriente en atraso. Como ya se demostró la operación en los dos puntos  $P$  y  $B_3$  es estable.

Con una mayor reducción de la capacitancia la característica  $(E_C + E)$  forma un ángulo  $\alpha_4$  con el eje  $I$  y pierde contacto con la curva  $E_L$  en el primer cuadrante y la operación en este cuadrante con corriente en atraso ya no es posible. La operación ocurre entonces en la intersección  $B_4$  con la porción negativa de la curva  $E_L$  en el tercer cuadrante como se indica en la figura 2.18.

Debe notarse que el ángulo que tiene la curva  $(E_C + E)$  en la figura 2.14, pasa de  $\alpha_1$ , a un valor de  $\alpha_3$  en la figura 2.18, ambos voltajes  $E_L$  y  $E_C$  han aumentado radicalmente y han alcanzado o cercanamente alcanzado su máximo valor posible.

Si se observa los valores de  $E, E_L, E_C$  correspondientes a  $B_4$  se debe notar que estos han disminuido en comparación con sus valores correspondientes al punto  $B_3$ , los voltajes  $E_L, E_C$  ahora empiezan a decrecer rápidamente con pequeñas reducciones de la capacitancia.

Con capacidades aun más pequeñas el punto se traslada hacia arriba en el lado negativo de la característica, el voltaje en la inductancia y en la capacidad se hacen pequeños, Finalmente con capacidad muy pequeña, el voltaje inductivo desaparece y el voltaje del condensador coincide con el voltaje aplicado.

En las figuras 2.14, 2.17 y 2.18 se muestra como los cambios en la capacitancia pueden cambiar las magnitudes y la fase de los voltajes que aparecen en el inductor y el capacitor. Por ejemplo en las figuras 2.14 y 2.17, el voltaje  $E_L$  es ligeramente mayor que el voltaje  $E$  y el voltaje  $E_C$  es una pequeña fracción de este. En la figura 2.17 ambos voltajes han aumentado moderadamente en el primer cuadrante,  $E_C$  permanece siendo una fracción de  $E$ , pero en el

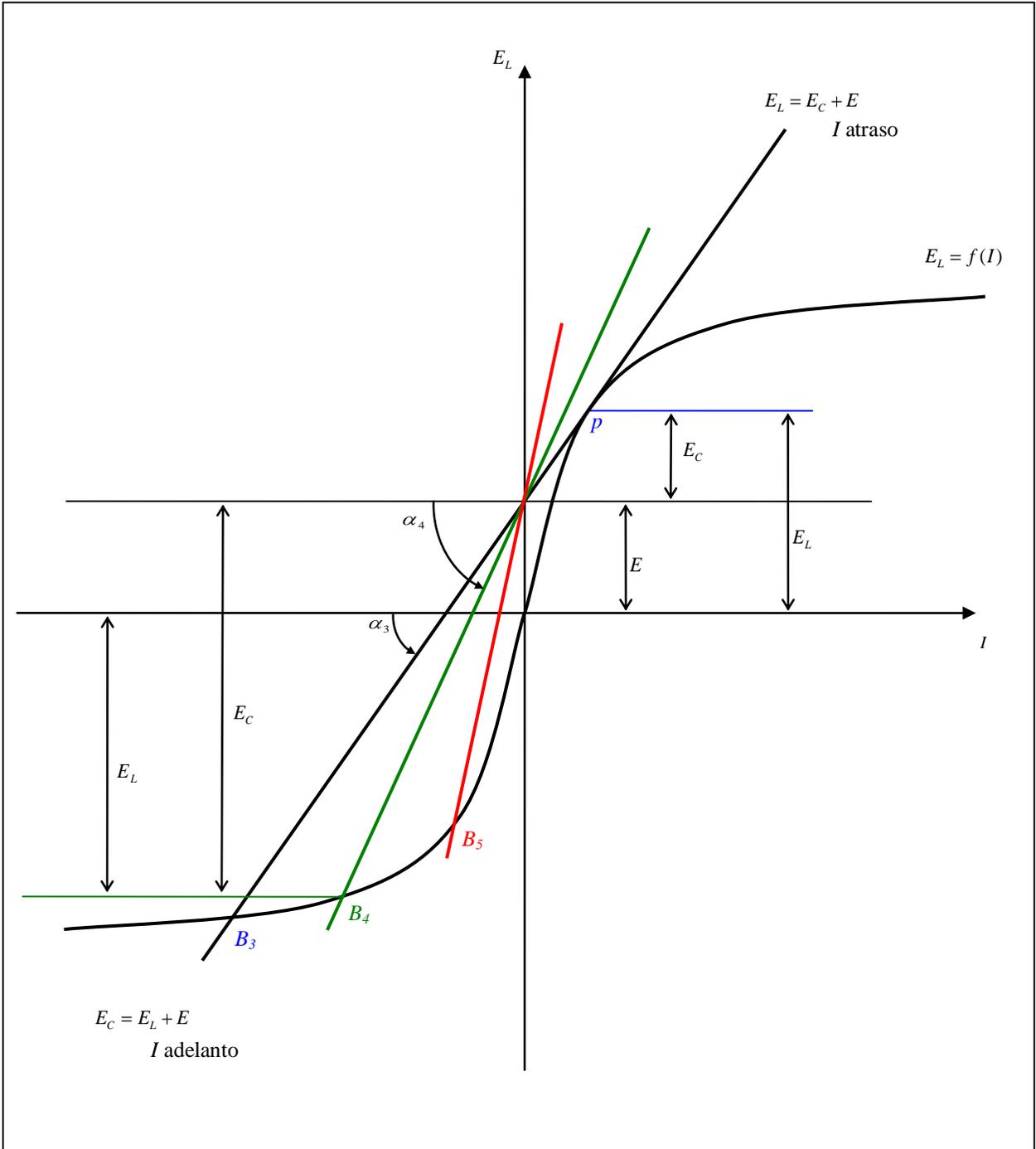
tercer cuadrante  $E_L$  es mucho mayor que su valor en el primer cuadrante y  $E_C$  muchas veces su valor correspondiente y es mayor que  $E_L$ .

También las figuras 2.17 y 2.18 muestran que los valores desarrollados en el reactor y por el capacitor pueden ser 2 o 3 veces mayor al valor del voltaje aplicado  $E$ , lo que cuenta para los sobrecalentamientos y voltajes anormales observados en sistemas de transmisión y distribución.

Bajo las condiciones mostradas en las figuras 2.17 y 2.18, hay dos posibles estados de operación, uno en el punto P en el primer cuadrante con corriente en atraso y el otro en los puntos B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>, o B<sub>5</sub> en el tercer cuadrante con corriente en adelanto.

La pregunta que se hace naturalmente presente es ¿que determina el punto de operación? El punto de operación queda determinado por el desfase o la rotación del voltaje en el instante en que se conecta el circuito.

Esta consideración, por lo menos en parte, es válida para la ocurrencia de voltajes anormalmente altos que se presentan inmediatamente seguidos al cierre del interruptor, lo cual, puede comprender la operación en el tercer cuadrante. Las transiciones desde voltajes relativamente bajos presentes en el primer cuadrante también pueden ser causadas por cambios en la capacitancia del sistema debido a la desconexión de circuitos o líneas.



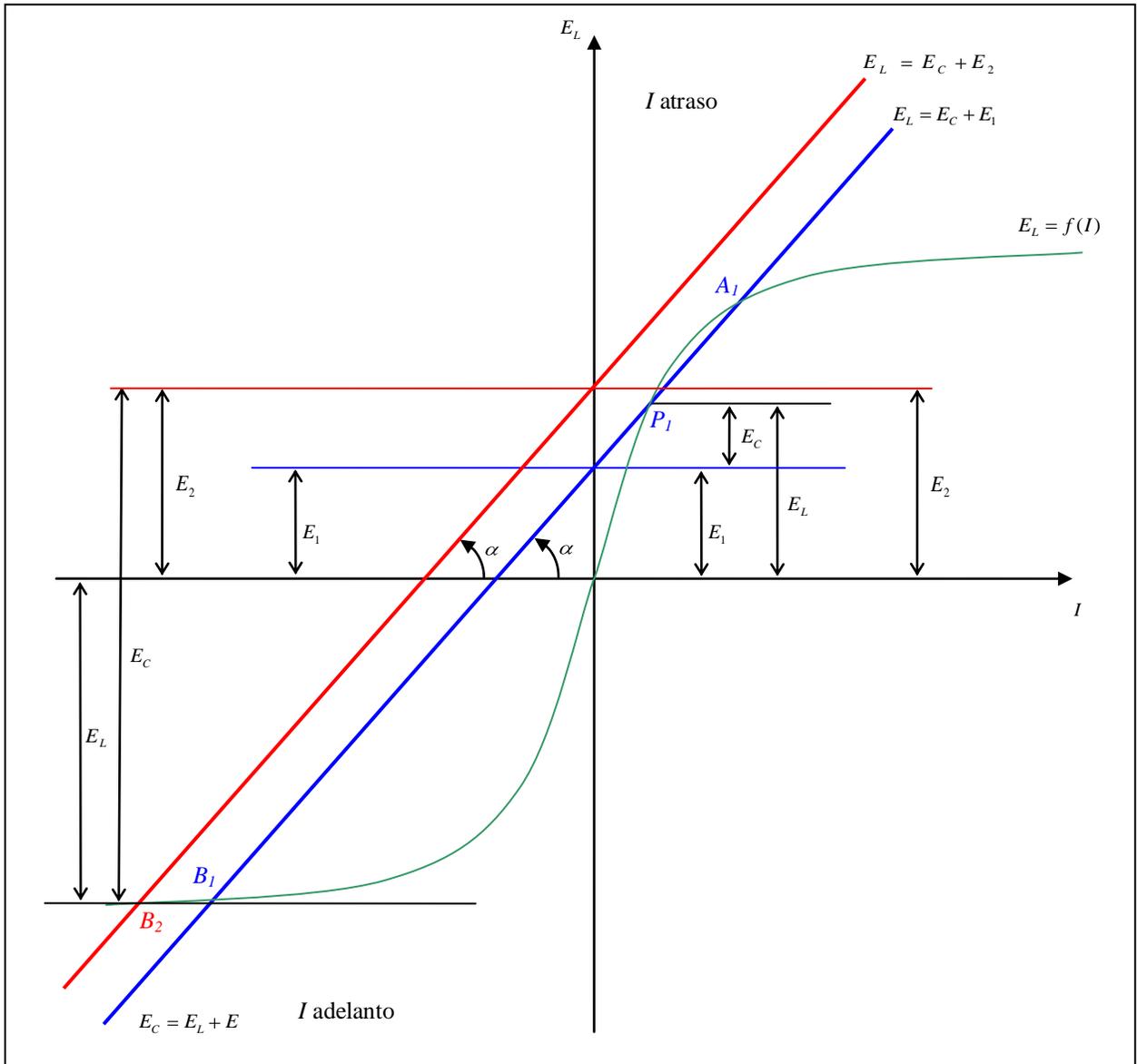
**Figura 2.18 Interpretación gráfica del circuito ferroresonante en el primer y tercer cuadrante en dos puntos estables  $P$  y  $B_1$ .**

**2.5.2 Ferroresonancia por variación de la tensión aplicada**

La figura 2.19 muestra un sistema operando al voltaje  $E_1$  con la curva característica de magnetización  $E_L$  y la curva característica de capacitancia  $(E_1 + E_C)$  formando un ángulo  $\alpha$  con el eje  $I$  e interceptando la parte positiva de la curva  $E_L$  en los puntos  $A_1$  y  $P_1$  e interceptando la parte negativa de la curva  $E_L$  en  $B_1$ . La operación en  $A_1$  es inestable; asumiendo que la operación es en el punto  $P_1$  el cual es estable y se encuentra ubicado en el primer cuadrante con la corriente en atraso. Si se aumenta el voltaje del sistema a  $E_2$  voltios, la curva  $(E_1 + E_C)$  se aumenta proporcionalmente a  $(E_2 + E_C)$  manteniendo el ángulo  $\alpha$  con el eje  $I$ .

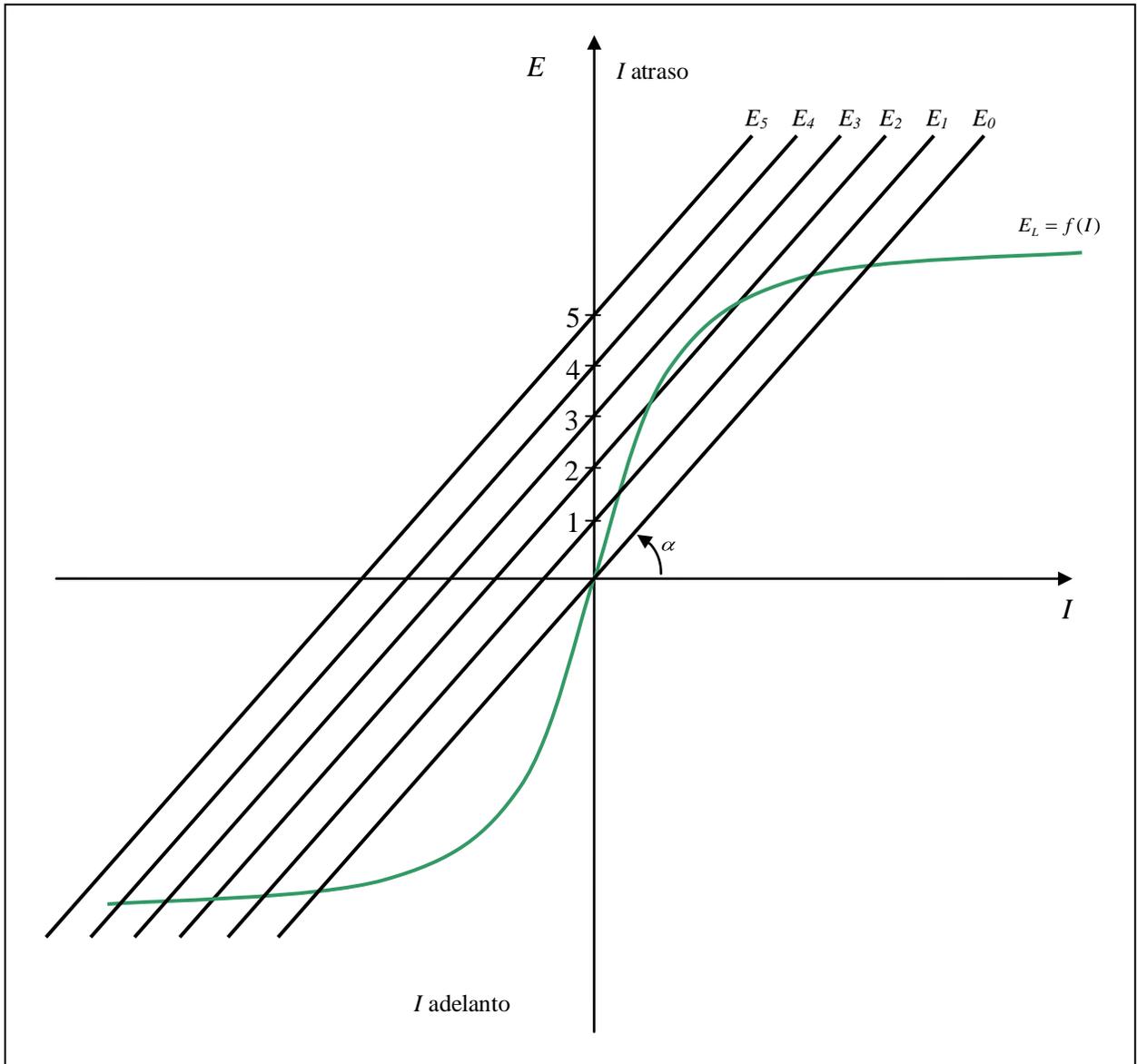
La característica  $E_L$  permanecerá sin cambio ya que el valor del flujo magnético permanecerá invariable para cada valor de corriente, y por ende  $E_L$ . La curva  $(E_2 + E_C)$  no intercepta a la curva  $E_L$  en el primer cuadrante, pero intercepta su parte negativa en el punto  $B_2$  en el tercer cuadrante. Así, la operación a valores relativamente bajos de  $E_L$  y  $E_C$  con corrientes en atraso repentinamente se cambia a operación a valores muchos más altos de  $E_L$  y  $E_C$  con corrientes en adelante. Esta condición puede ocurrir realmente en la práctica, y como se ha demostrado que desde una operación inicial a un punto tal como  $P_1$ , una reducción de capacitancia puede aumentar el voltaje del sistema  $E$ . Esto tiene el efecto acumulativo en crear una perturbación debido al cambio de un voltaje relativamente bajo con corriente en atraso a un voltaje alto con corriente en adelante.

Si ocurriese que el sistema se operaba en el punto  $B_1$  del tercer cuadrante, el aumento del voltaje habría creado poco disturbio debido a que hay pequeña diferencia en los voltajes entre los puntos  $B_1$  y  $B_2$  de la figura 2.19



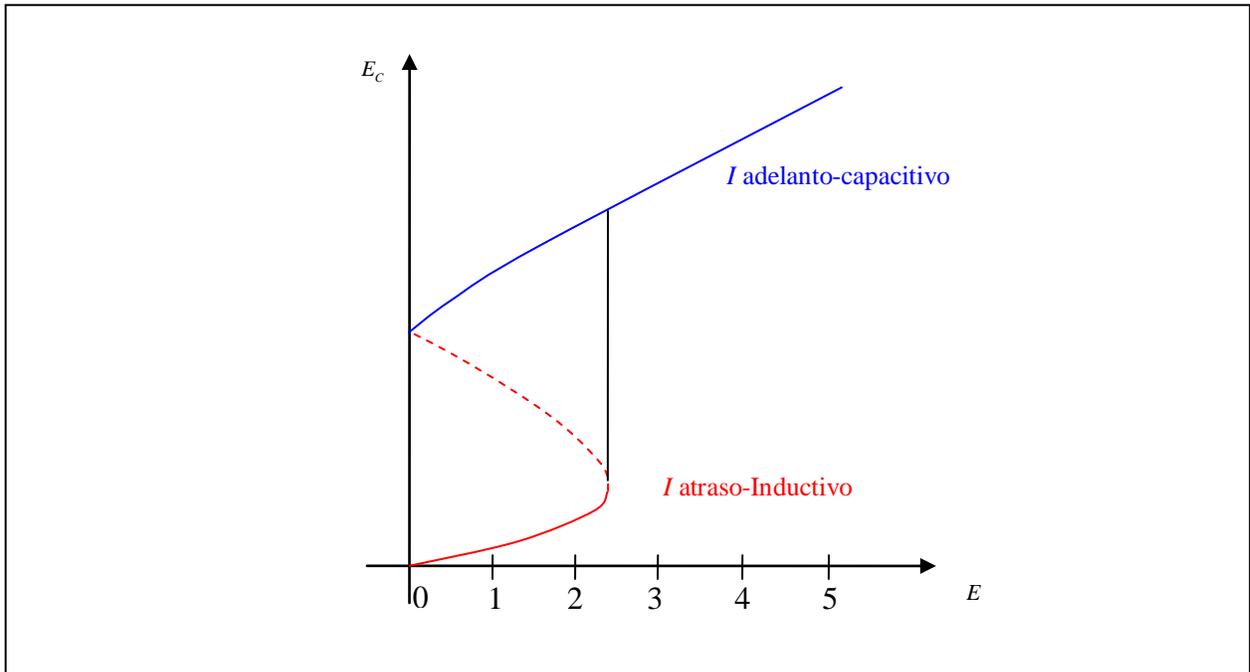
**Figura 2.19. Efecto del aumento del voltaje aplicado, o del sistema, de  $E_1$  a  $E_2$  voltios.**

Por variación del voltaje, el estado de oscilación sobre la característica magnética puede ser desplazado, mientras que en circuitos no saturados la corriente y el voltaje simplemente cambian proporcionalmente. En la figura 2.20 algunas líneas del condensador son dibujadas para varios valores de  $E$  de acuerdo a la ecuación (2.13).



**Figura 2.20. Variación del voltaje aplicado o del sistema.**

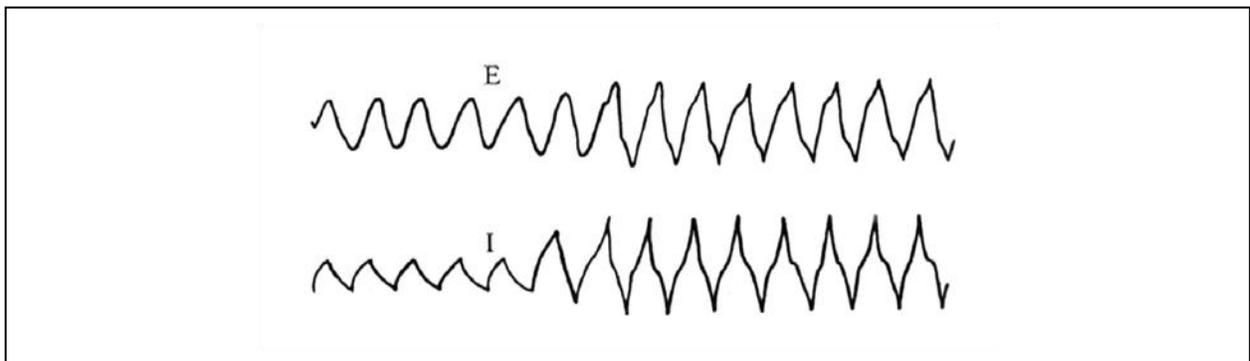
En la figura 2.21 se muestra el voltaje a través de la capacitancia contra el voltaje de entrada. Esta curva es derivada de la figura 2.20. Con un cierto incremento de voltaje entre  $E_2$  y  $E_3$ , el comportamiento del circuito cambia súbitamente de un estado inductivo a uno capacitivo, un salto que no es reversible si el voltaje está decreciendo.



**Figura 2.21. Voltaje a través de la capacitancia contra el voltaje de entrada**

En la figura 2.22 se muestra un oscilograma del proceso de cambio, aquí se observa que la corriente (I) aumenta considerablemente con un leve aumento de (E).

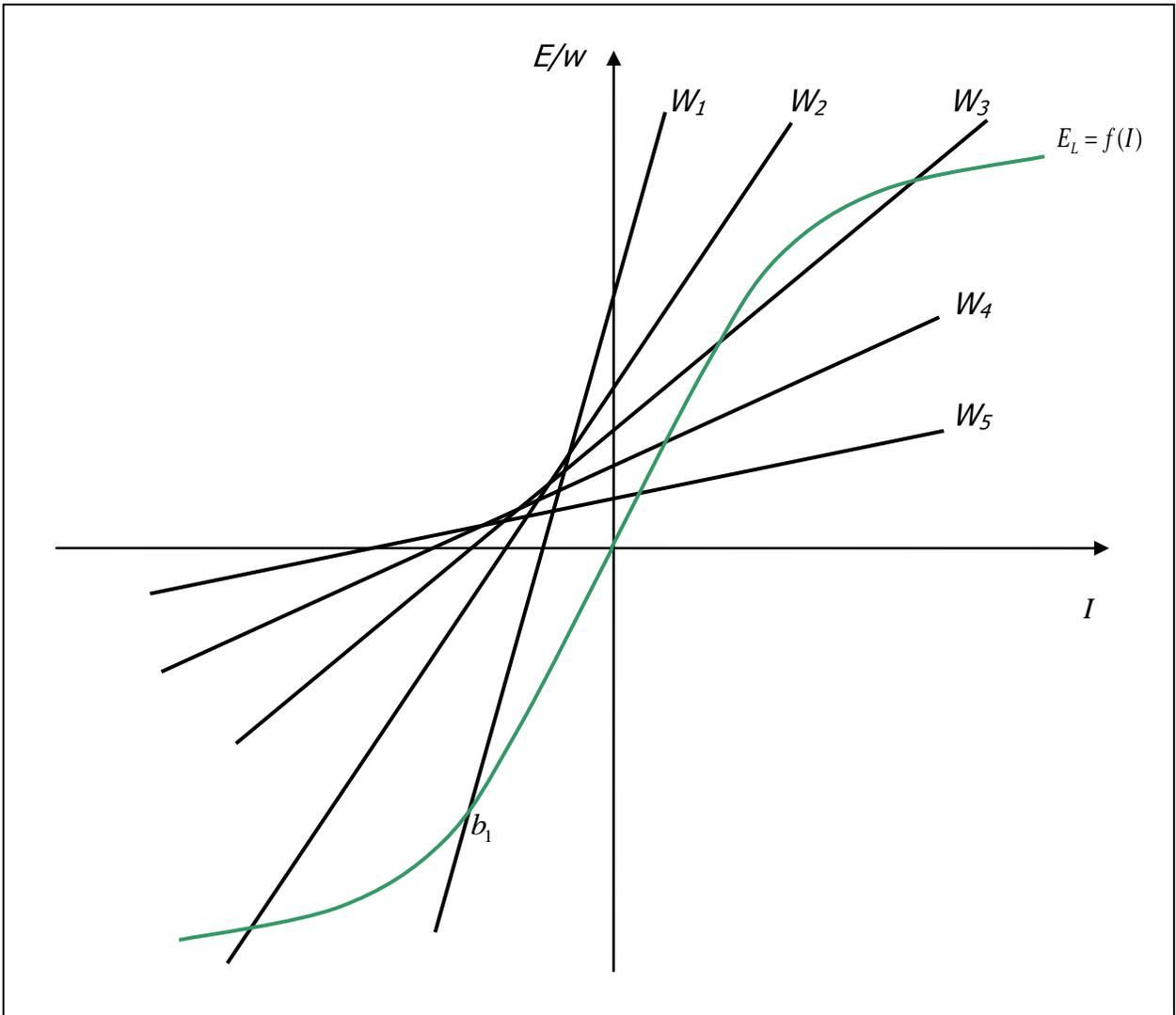
Al mismo tiempo se logran apreciar las distorsiones típicas de las formas de ondas de las curvas de tensión y corriente, particularmente cuando se está trabajando en el rango capacitivo.



**Figura 2.22 Oscilograma del proceso de cambio en la capacitancia.**

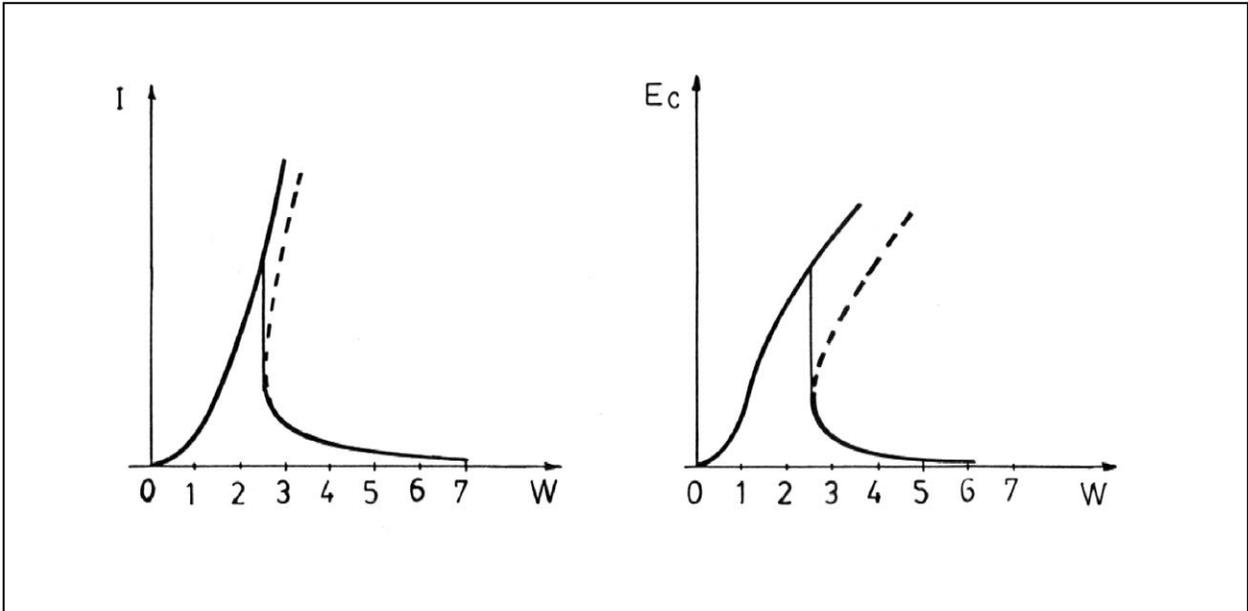
### 2.5.3. Ferroresonancia por variación de la frecuencia

En la figura 2.23 se puede observar que la característica magnética  $f(I)$  permanece igual para todas las frecuencias, pero la pendiente y posición de la línea del condensador cambia con la frecuencia, esto se puede comprobar por medio de la ecuación (2.13).



**Figura 2.23. Variación de la frecuencia**

Para una frecuencia de valor bajo ( $W_1$ ), la línea del condensador es muy inclinada e intercepta a la característica magnética en el lado negativo  $b_1$ , con la corriente en adelanto. Al incrementar la frecuencia la línea del condensador primero toca y luego intercepta la región positiva de la característica tal que con una frecuencia elevada, por ejemplo ( $W_3$ ), aparecen dos nuevos estados posibles. Ambos operan con corrientes de magnetización en atraso, y con un incremento aun mayor, como por ejemplo ( $W_5$ ), el punto estable se mueve hacia abajo en la característica. Como se puede deducir de la figura 2.23, la dependencia del voltaje y la corriente del condensador con la frecuencia la cual, se muestra en las figuras 2.24 y 2.25.



**Figura 2.24 Dependencia de la corriente del condensador con la frecuencia.**

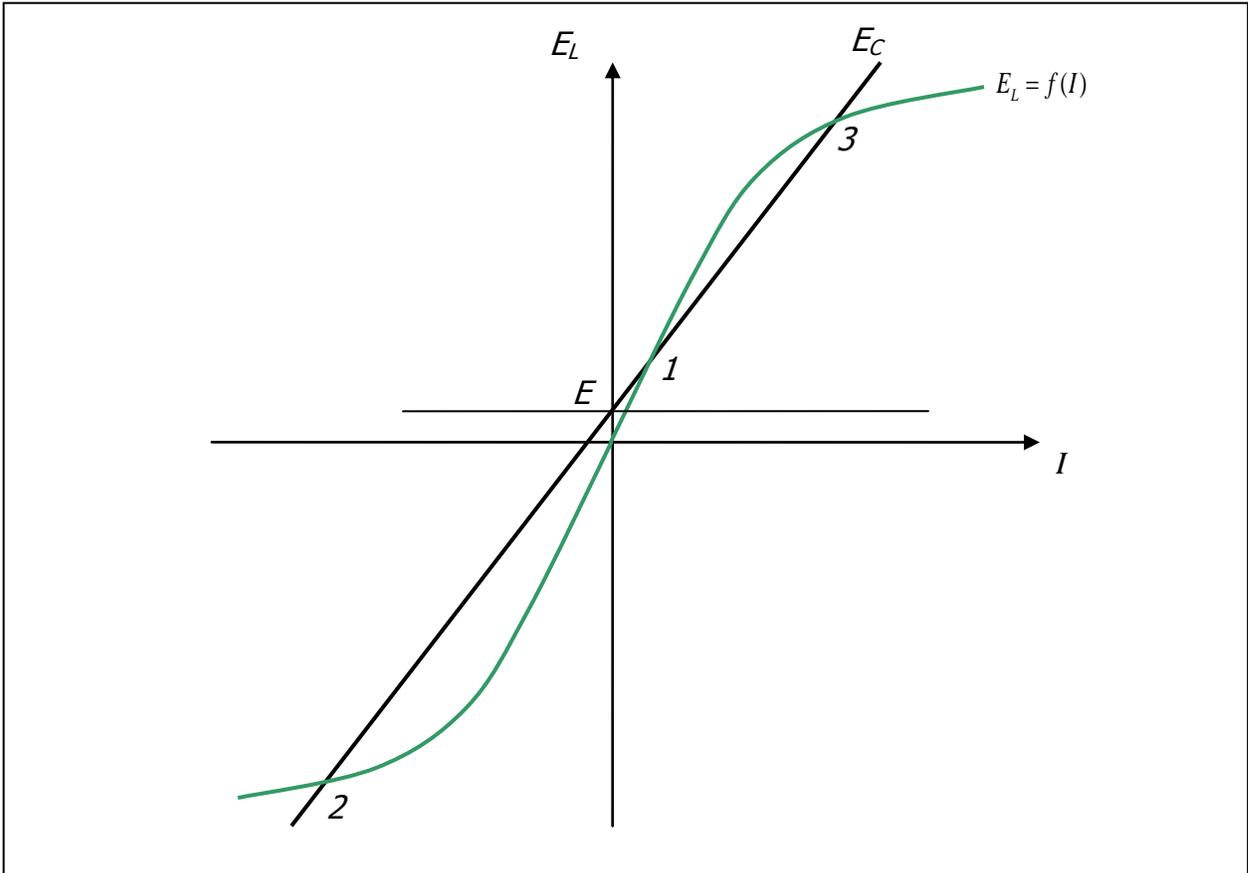
**Figura 2.25 Dependencia del voltaje del condensador con la frecuencia**

Las ramas de las curvas que corresponden a las intersecciones inestables son las líneas segmentadas, los picos de resonancia son mayores por efecto de la saturación. Como resultado el comportamiento físico es completamente cambiado, y los altos picos en la resonancia nunca se alcanzarán en la realidad.

#### 2.5.4 Influencia de la resistencia y la reactancia

Puede parecer que el punto estable (2) en la figura 2.26 se mueva a valores extremadamente altos de voltaje y corriente de carga si la influencia de la capacitancia sobrepasa a la inductancia. Sin embargo, realmente el incremento de la corriente es limitado por el efecto de la resistencia óhmica del circuito, el cual suplementa la suma de los voltajes inductivos y capacitivos por un voltaje resistivo que está en cuadratura de fase. En las relaciones de voltaje expresadas anteriormente se depreció la resistencia óhmica del circuito. En realidad el equilibrio de las tensiones está dado por:

$$E = E_L + E_C + E_R \quad (2.16)$$



De esta manera el valor absoluto de la tensión  $E$  del circuito es:  
**Figura 2.26 Influencia de la resistencia y la reactancia.**

$$E = \sqrt{E_L^2 + E_C^2} + RI^2 \quad (2.17)$$

El voltaje a través de la bobina con núcleo de hierro saturable es,

$$E_L = f(I) = \sqrt{E^2 - RI^2} + \frac{I}{wC} \quad (2.18)$$

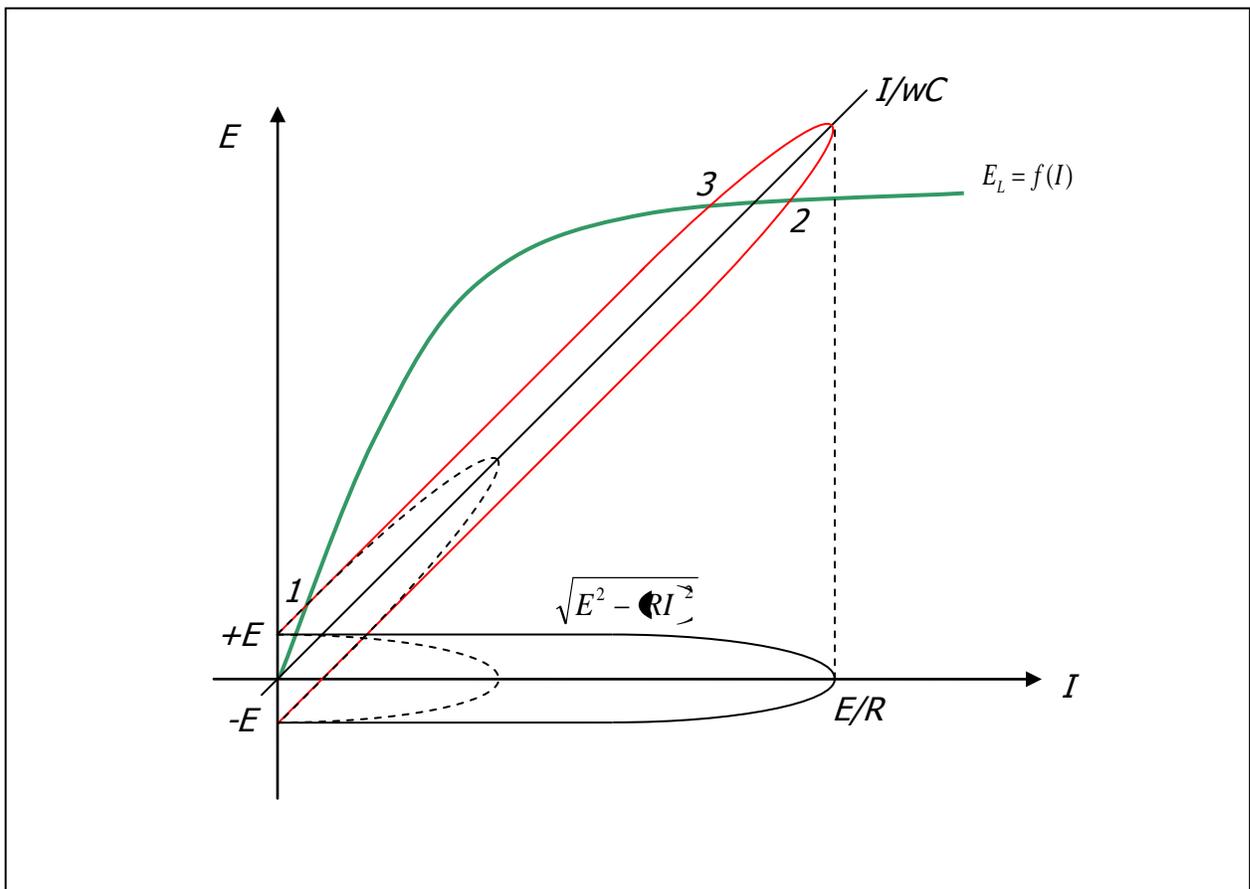
El lado derecho de esta última relación representa la familia de elipses, con los semiejes  $E$  y  $E/R$ , respectivamente. La suma de las ordenadas de estas elipses con la recta inclinada  $E_C = I/wC$ , suministra la curva deseada. Los puntos de corte de esta curva con la característica  $E = f(i)$  suministran los posibles estados (estables e inestables) del circuito resonante en cuestión. En la figura 2.27 se ha ilustrado una de estas construcciones, con dos puntos estables (1 y 2) y uno inestable (3).

Para pequeñas corrientes la influencia de la resistencia es leve, siendo la raíz cuadrada aproximadamente igual a  $(E)$ , para corrientes elevadas alcanza a  $E/R$ , el voltaje es

completamente absorbido, reduciendo la raíz cuadrada a cero. Esto produce el máximo valor de la corriente.

Añadiendo a esta elipse en la figura 2.27 la línea condensador, último término de la ecuación (2.18), se obtiene una elipse oblicua como una representación del lado derecho total de la ecuación (2.18).

La intersección de esta elipse con la característica ( $E_L$ ) produce tres estados posibles de oscilación en el circuito. Ya que se ha tomado la raíz cuadrada en la ecuación (2.18) con signo positivo, sin tomar en consideración el ángulo de fase, las tres intersecciones aparecen en el primer cuadrante, aunque el punto (2) pertenezca al lado negativo de la característica. Aquí los puntos (1) y (2) indican estados estables de oscilación y el punto (3) inestable.



**Figura 2.27 Construcción gráfica de la relación  $E_L = f(I) = \sqrt{E^2 - RI^2} + \frac{I}{wC}$**

Vemos aquí que una resistencia relativamente pequeña tiene muy poca influencia en el punto de intersección (1), permitiendo pequeños voltajes y corrientes en el circuito. Sin embargo,

en el punto (2), es permitido que circulen corrientes elevadas, la resistencia previene un excesivo incremento de corriente y voltaje en el caso de que capacidades elevadas sean aplicadas. Por otro lado, una resistencia relativamente va a acortar la elipse tan lejos que la intersección (2) desaparece completamente.

Ahora, sólo un estado simple de oscilación puede desarrollarse, con pequeñas corrientes y voltajes, y un regreso a valores elevados no es posible. De aquí que la inserción de una resistencia es el medio seguro para la estabilización de circuitos ferresonantes con tendencia a retorno.

Todas estas consideraciones en circuitos oscilatorios que tienen hierro saturable nunca se desarrollará verdadera resonancia entre capacidad e inductancia, sin embargo, puede suceder un cambio en el estado de oscilación por un salto de un punto de la característica a otro distante de él.

Por lo tanto, allí no existe una frecuencia definida la cual puede ser extremadamente peligrosa para el circuito. Esto es causado por el hecho de que un circuito oscilatorio con saturación magnética no tiene una frecuencia natural definida. Además, tal frecuencia, si es definida en cualquier forma, sería una variable dependiente de la intensidad de la corriente y la magnitud de la magnetización.

## 2.6 ANALISIS DE LA FERRORESONANCIA EMPLEANDO UN METODO LINEAL (LONGITUD CRÍTICA DEL CABLE)

A través de los años se han escrito numerosos artículos técnicos en los que se ha usado un enfoque lineal para analizar el circuito ferresonante. En estos artículos se tiende a la búsqueda de un  $X_c$  mínimo que pueda presentarse para una  $X_m$  no saturada dada que limitará al voltaje en las bobinas del primario del transformador ( $V_{xm}$ ) y  $V_c$  a algún máximo específico. Mientras que la  $X_m$  del transformador permanezca en la región lineal ( $X_m$  no saturada) y los elementos resistivos del sistema sean pequeños, el voltaje  $V_{xm}$  y  $V_c$  se calculan simplemente usando la teoría de circuitos lineales.

En la mayoría de estos enfoques el rango mínimo para  $X_c/X_m$  se elige según ciertos lineamientos los cuales dependen del sistema y la configuración del transformador.

$$X_m = \frac{10^5}{I_0\%} \frac{kV^2}{kVA} \quad (2.19)$$

$$X_{co} = \frac{1}{2\pi fCl} \quad (2.20)$$

Donde:  $C$  es la capacitancia en Faradios/metros

$f$  la frecuencia en Hertz

$l$  la longitud en metros

$I_0\%$  la corriente de magnetización en porcentaje

De las ecuaciones anteriores se obtiene:

(2.21)

Con  $X_{co}/X_m = K$  y despejando  $l$ :

$$l = \frac{I_0 \%(kVA)}{10^5 K 2\pi f C (kV)^2} \quad (2.22)$$

Por ejemplo recopilando las sugerencias de Ralph Hopkinson en varios de sus trabajos se tiene que para transformadores de potencia, la longitud permisible se obtendrá para K igual a 30 en el caso de conexión estrella-delta o delta-delta, e igual a 40 para el caso de la conexión delta-estrella. Estos valores, son resultados de estudios en un analizador de red Transient Network Analyzer TNA, correspondientes a sobretensiones no mayores de 1.25 veces la tensión nominal de fase a neutro.

**Tabla 2.1. Valores mínimos de Xc/Xm (K) dependiendo del sistema y la configuración del transformador.**

Conexión Primario/Secundario	transformador. Xc/Xm mínimo (K)
Delta / Estrella aterrada	40 para bancos de 3 transformadores monofásicos
	30 para transformadores con núcleo de 5 columnas
Delta / Delta	30
Estrella / Delta	30
Estrella Aterrada / Estrella Aterrada	0 para banco de 3 transformadores monofásicos
	1 para transformadores con núcleo de 5 columnas

Fuente: "Ferroresonant Overvoltage Control Based on TNA Test on Three Phase Delta-Wye Transformers Banks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems". Hopkinson Ralph. Octubre 1967.

Sin embargo, la capacitancia crítica del cable está directamente relacionada a los transformadores de distribución, los niveles de pérdidas en vacío de los transformadores que se fabrican hoy en día son una fracción de lo que eran en los transformadores producidos hace 11-15 años atrás, por lo que la longitudes críticas de los cables para los transformadores modernos, son mucho más cortas que las sugeridas en ese entonces para evitar valores de sobretensiones riesgosos, y para la creación de condiciones propicias para la ferroresonancia [20].

Investigaciones recientes como las realizadas por un grupo de Ingenieros de la Universidad del Valle en Colombia [3], basadas en el modelamiento del sistema ferresonante en ATP Alternative Transient Program en conjunto con pruebas de laboratorio para validar el modelo empleado en la herramienta computacional, y utilizando información real proveniente de pruebas de laboratorio (ensayos de vacío y corto circuito) como datos de entrada para la simulación computacional, han encontrado que para que se garantice que el voltaje en la(s) fase(s) desenergizada(s) no supere el 125% del voltaje nominal (y así no se produzca daño del aislamiento y la falla y/o operación de los descargadores de sobretensión), que la relación  $K$  para transformadores monofásicos debe ser 2.5 y para transformadores trifásicos, 2.

Estos valores de  $K$  difieren notoriamente de los presentados en la tabla 2.1 lo cual es debido a las simplificaciones y consideraciones que se deben hacer al realizar estudios en TNA. Además:

- Las longitudes críticas fueron encontradas para transformadores de potencia y no de distribución.
- Las pruebas se realizaron utilizando TNA Transients Network Analyzer, y no sobre muestras reales.
- No existió acoplamiento magnético entre fases adyacentes.
- Se despreciaron las pérdidas del núcleo.
- Se consideró una característica de saturación aproximada para los transformadores bajo prueba.

## **2.7 LOS CABLES DE MEDIA TENSIÓN Y SU RELACIÓN CON LA FERRORESONANCIA**

Con la introducción de cables en las redes de distribución, la ferresonancia empezó a ser un problema en los sistemas de distribución subterránea debido en primera instancia a la alta capacitancia de los cables.

Como el cable va asociado a un transformador, las capacitancias fase-tierra y fase-fase del circuito (cable) mas la capacitancia interna del transformador son los parámetros que tienen mayor influencia en el establecimiento de la ferresonancia sostenida en condiciones monofásicas.

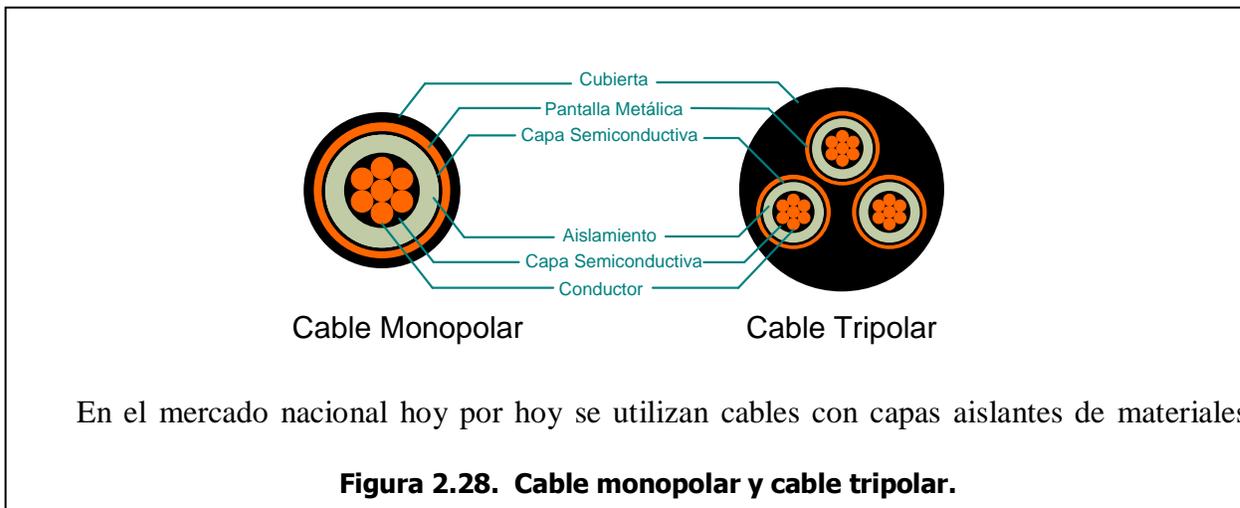
Es por esto, que los elementos usados en la conformación del circuito entre el transformador y los dispositivos monopoles determinan la capacitancia en el circuito ferresonante. El circuito trifásico entre el transformador y los dispositivos monopoles usualmente consiste de una línea aérea (conductor desnudo) o una línea subterránea (cable

aislado). La capacitancia a tierra en un cable puede ser 50 o más veces la de la línea aérea, este factor incrementa enormemente la probabilidad de que pueda ocurrir ferresonancia.

Por ser el cable un elemento importante dentro del fenómeno ferresonante trataremos de conocer un poco más sobre este.

Los cables para media tensión pueden ser unipolares o multipolares, los primeros están constituidos por un conductor aislado que es casi siempre de sección circular (cable unipolar), llevando alrededor los correspondientes aislamientos y recubrimientos protectores que sean necesarios con el fin de evitar corrosión o daños mecánicos.

Los cables multipolares se conforman por dos (02) o más conductores independientes y aislados entre sí, todo el conjunto se complementa con una cubierta aislante, pantalla electrostática, recubrimiento contra corrosión y efectos químicos, y más externamente armaduras metálicas destinadas a resistir los esfuerzos mecánicos que pudieran presentarse.



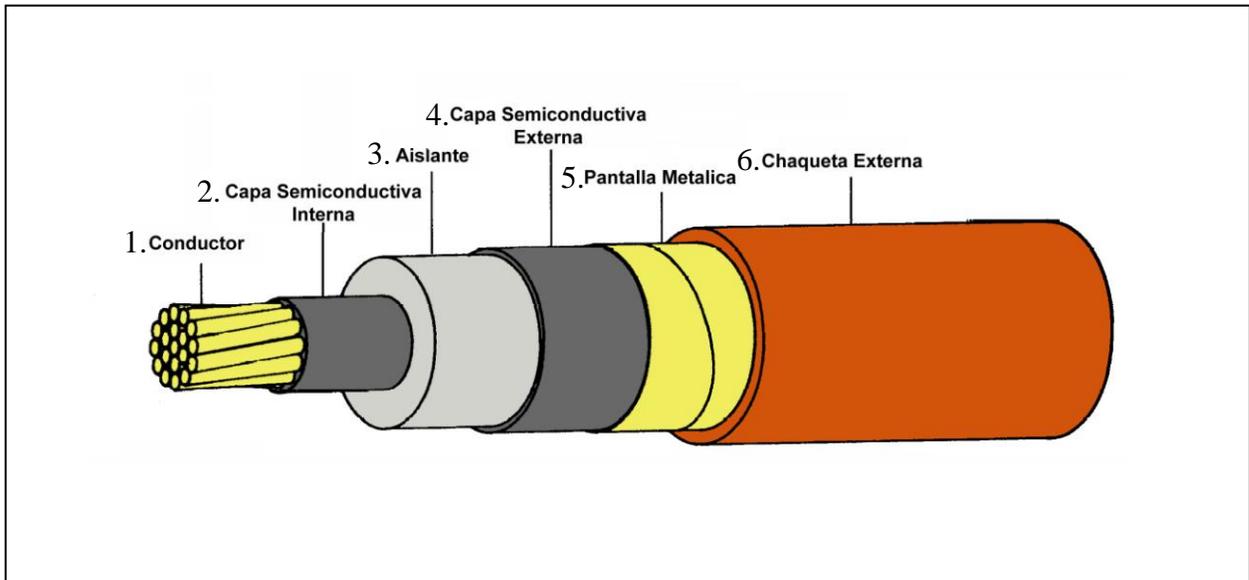
como el XPR y el XLPE, estos materiales han contribuido a reducir los costos de los cables y su instalación, además de ayudar a simplificar los empalmes y copas terminales.

### 2.7.1 COMPONENTES DE UN CABLE (para tensiones de 5kv hasta 36kv)

Los principales componentes que conforman estos cables son:

1. El Conductor
2. Una Capa de material semiconductor sobre el conductor.
3. El Aislamiento.
4. Una Capa de material semiconductor sobre el aislamiento.
5. La Pantalla metálica.

## 6. La Chaqueta externa.



**Figura 2.29. Componentes básicos de un cable para media tensión.**

### 2.7.1.1 El Conductor:

El conductor es un alambre o combinación de alambres altamente conductivos no aislados entre sí, es el elemento metálico, generalmente cobre o aluminio, y cumple la función de transportar la energía eléctrica.

### 2.7.1.2 Capa o pantalla semiconductora sobre el conductor

Los cables que se utilizan en circuitos de 2kV, o más deberán tener una pantalla semiconductiva inmediatamente sobre el conductor seguida por el aislante, con el fin de obtener una superficie equipotencial uniforme, a la cual, las líneas de fuerza del campo eléctrico sean perpendiculares, eliminando las distorsiones del campo eléctrico debidas a las protuberancias constituidas por los hilos, además de evitar la formación de hosquedades o burbujas de aire que, al estar sometidos a una diferencia de potencial provocaría la ionización del aire, con el consiguiente deterioro del aislante. El material semiconductor es extruido sobre el conductor con un espesor mínimo de 0.38 mm, su temperatura de operación debe ser mayor o igual que la del aislamiento, mientras su superficie externa debe ser cilíndrica y firmemente ligada o vulcanizada al aislante.

Para que su función sea efectiva, debe permanecer adherida, en íntimo contacto con el aislamiento bajo cualquier condición de operación.

### 2.7.1.3 El Aislamiento:

El aislamiento está compuesto de material no conductor o dieléctrico, aplicado sobre la capa semiconductor, con el fin de limitar el campo eléctrico desde su valor máximo, en su capa más interna, hasta su valor mínimo, en su capa más externa. La función del aislamiento es confinar la corriente eléctrica en el conductor, contener el campo eléctrico dentro de su masa y dar la rigidez dieléctrica necesaria para la operación normal del cable. Donde la rigidez dieléctrica se define como “la capacidad del aislamiento para soportar la tensión nominal del cable sin que este (aislante) se deteriore”. Es por esto que el aislante define la temperatura de operación de los cables de energía.

Los parámetros eléctricos que más frecuentemente determinan la selección de un material aislante son:

- Resistencia de aislamiento.
- Factor de potencia.
- Constante dieléctrica.
- Factor de disipación.
- Rigidez dieléctrica.
- Resistencia a las descargas parciales.

Estos parámetros deben mantenerse estables en el tiempo porque determinan el tiempo de vida útil del cable, por lo tanto se requiere:

- Buena resistencia al ozono.
- Buena resistencia al envejecimiento e las diferentes condiciones ambientales, tales como presencia de humedad, luz, calor y sustancias químicas.
- Buena resistencia a temperaturas elevadas.
- Buena impermeabilidad al agua.

Las propiedades generales que debe tener un buen aislamiento responde a sus características físicas, ya sean estas mecánicas, eléctricas, químicas o térmicas. Entre las primeras tenemos la tensión de ruptura, elongación, expansión y contracción, absorción dureza, peso y otras. De las segundas, la resistencia del aislante, la rigidez dieléctrica, constante dieléctrica, factor de pérdidas dieléctricas, resistencia a la ionización y al impulso eléctrico. De las características químicas, cabe destacar la resistencia a ácidos o alcalis, aceite, ozono y su estabilidad química siendo también de gran importancia su combustibilidad. Por último tenemos

las características térmicas como la resistencia, calor específico, punto de fusión y de congelación.

Eléctricamente, el material del aislamiento debe tener suficiente rigidez dieléctrica para proporcionar una barrera fiable entre el voltaje del conductor y el voltaje de la pantalla metálica. El aislante no debe permitir por ninguna razón, pérdidas de energía eléctrica y sus propiedades de aislamiento no deberían deteriorarse dentro del rango de temperatura de operación indicado por el fabricante.

Los materiales que se usan como aislantes son materiales con propiedades dieléctricas. La permitividad relativa o constante dieléctrica, de los materiales aislantes, es muy importante al momento de escoger un aislante, ya que a mayor permitividad peor es el aislante y viceversa.

### **Aislamientos Termoestables:**

Desde que se empezaron a fabricar los primeros cables la búsqueda de materiales (aislantes) ha evolucionado constantemente. Actualmente se puede decir, que los aislamientos más utilizados son los Termoestables

Estos aislamientos están constituidos por materiales que se caracterizan porque, mediante un proceso de vulcanización, se hace desaparecer su plasticidad y se aumenta su elasticidad y la consistencia mecánica.

Estos compuestos se utilizan como dieléctrico y su característica principal es que al someterlos a la acción del calor no pueden ser moldeados nuevamente, y no recuperan sus propiedades originales al enfriarse, lo cual quiere decir que no son reutilizables. En la actualidad los aislamientos termoestables más usados y recomendados por la ICEA (Insulated Cable Engineers Association), son:

- Polietileno reticulado (XLPE).
- Etileno propileno (EPR).

### **Polietileno Reticulado (XLPE)**

Es un material termoestable (una vez reticulado no se ablanda con el calor) presenta mejores características eléctricas y térmicas que el PVC por lo que se lo utiliza en la construcción de cables de baja, media y alta tensión.

Con el agregado de aditivos especiales se consigue una buena resistencia a la propagación del incendio. La ausencia de halógenos en su composición hace que los gases, producto de su eventual combustión no sean tóxicos o corrosivos.

Su termoestabilidad hace que puedan funcionar en forma permanente con temperaturas de 90° C en los conductores y 250° C durante 5 segundos en caso de cortocircuito.

Además presenta un mejoramiento de las características mecánicas, buen alargamiento, excelente resistencia al impacto y a la compresión, bajo coeficiente de fricción superficial, es químicamente inerte en la mayoría de los ambientes y tiene buena resistencia al ozono y a las descargas parciales, más aún cuando el proceso de vulcanización se efectúa en ambiente seco, como es el caso del Drylene, en lugar de vapor para evitar la presencia de humedad durante el proceso de fabricación, siendo la humedad el origen de la mayoría de las fallas que limitan el tiempo de vida útil del cable.

Gracias a sus excelentes características, es el único aislante sintético especificado para tensiones de 69 kV y mayores. Además el polietileno reticulado seco (Dry Cure) es exigido por la mayoría de los consumidores de cables de Estados Unidos para tensiones de 15 kV y mayores.

### **Etileno Propileno (EPR)**

Es un material termoestable de características similares al XLPE, pero flexible en lugar de rígido y con mayor resistencia a las arborescencias eléctricas en presencia de humedad. Su temperatura de funcionamiento es también de 90 ° y 250 ° durante 5s para el caso de cortocircuito. Se utiliza en cables de potencia de bajas y medianas tensiones. Está especificado por la norma AEIC como aislamiento hasta tensiones de 35 kV.

Actualmente se fabrican cables con este tipo de aislamiento para tensiones de hasta 60.000 voltios. El EPR está especialmente diseñado para ser utilizado en cables cuyos requisitos importantes sean alta resistencia al ozono, al calor, a las bajas temperaturas, a la humedad y al efecto corona. Además es resistente a ácidos, alcálisis y detergentes, presenta muy buenas propiedades eléctricas. Tiene poca resistencia a los aceites y a la abrasión.

Las características más importantes que poseen estos compuestos son las siguientes:

- Resistencia al ozono e intemperie.
- Resistencia al calor y bajas temperaturas.
- Resistencia a ácidos, alcálisis y detergentes.
- No resiste a los aceites.
- Excelentes propiedades eléctricas.
- Temperatura de operación continua entre 55 °C a 90 °C.

#### **2.7.1.4 Capa o pantalla semiconductor sobre el Aislamiento**

La pantalla semiconductor, está formada por un material semiconductor compatible con el material del aislamiento ubicada en contacto inmediato con éste. Su principal función es crear una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos en dirección de la máxima resistencia del aislamiento.

Los cables de energía, bajo un potencial aplicado quedan sometidos a esfuerzos eléctricos radiales, tangenciales y longitudinales. Los esfuerzos radiales siempre están presentes en el aislamiento del cable energizado, el aislamiento cumplirá su función de forma eficiente si los esfuerzos eléctricos se distribuyen uniformemente. En adición a esta función, está la de asegurar el contacto íntimo con el aislamiento, aún en el caso de movimiento de la pantalla metálica.

La pantalla semiconductor sobre el aislamiento, puede estar constituida por una capa de material termoplástico o termoestable semiconductor, o bien, por cinta semiconductor, y/o barniz semiconductor.

#### **2.7.1.5 Pantalla metálica.**

La pantalla está constituida por una capa conductora colocada sobre la capa de material semiconductor, esta puede estar constituida por una cinta de papel metalizado o una cinta de un metal no magnético (cobre o aluminio) de un espesor del orden de los 0.127mm, aplicada helicoidalmente sobre el aislamiento y puede estar conectada a tierra, también puede presentarse en formas de alambre de cobre o aluminio de aproximadamente un calibre N° 16 AWG al N° 12 AWG o cinta corrugada dependiendo de la necesidad del sistema. Tiene por objeto principal confinar totalmente el campo eléctrico en el interior del aislamiento evitando la formación de superficies de descargas peligrosas en la periferia del cable.

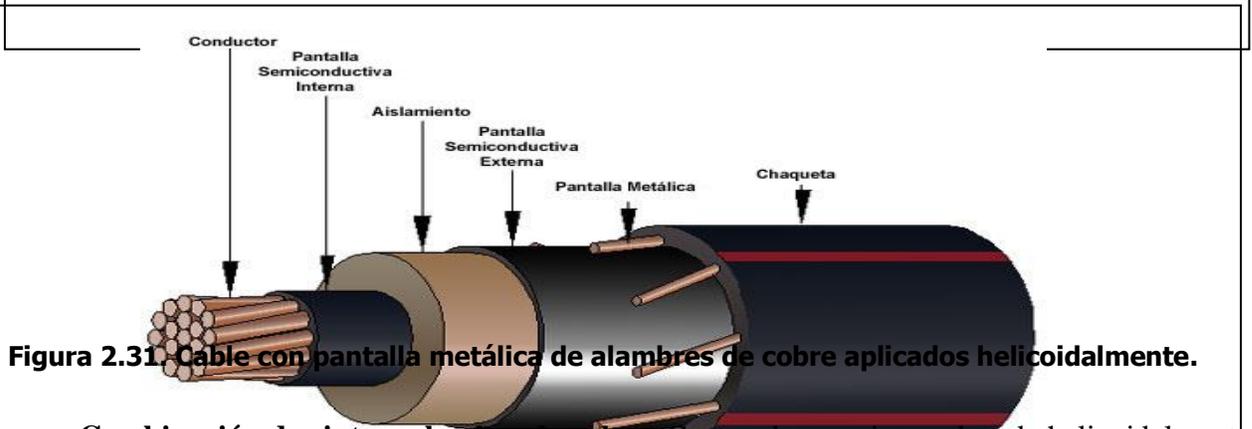
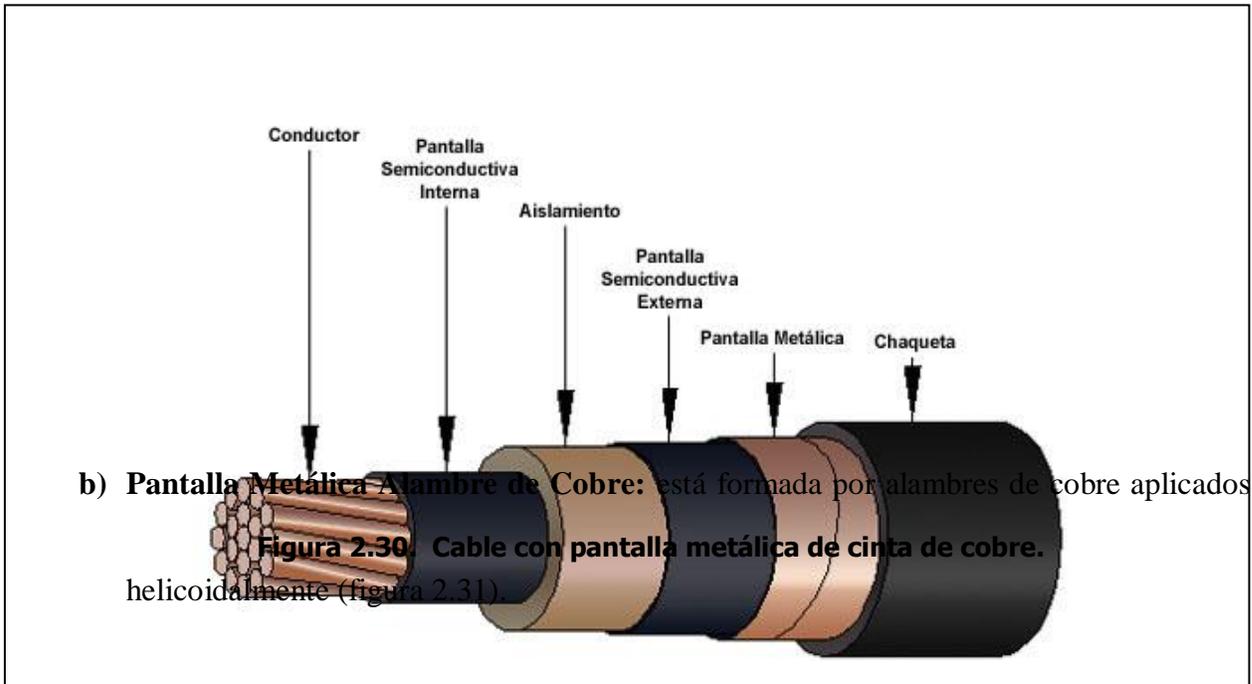
La pantalla sirve también para proteger el cable contra potenciales inducidos por campos eléctricos externos y como protección para el personal, contra riesgos de descargas accidentales. Esta ventaja es obtenida solo si la pantalla del cable es conectada a tierra.

El diseño de la pantalla debe efectuarse de acuerdo a los siguientes propósitos:

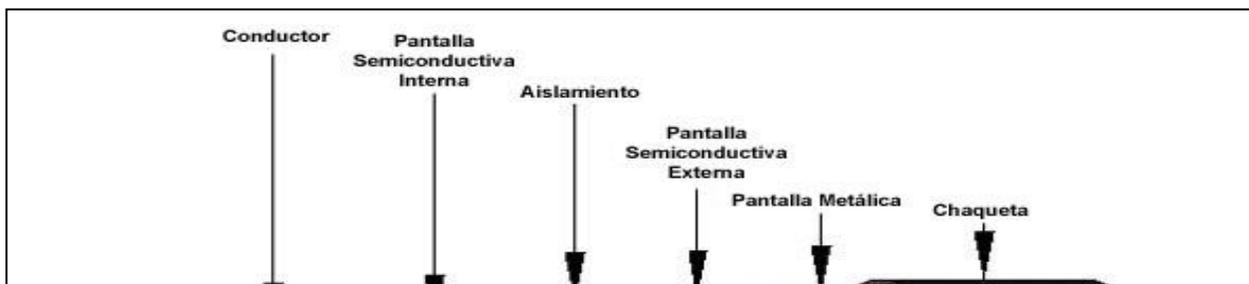
- Para propósitos electrostáticos.
- Para conducir corrientes de falla.
- Como conductor neutro.
- Para drenar las corrientes capacitivas

## Tipos de pantallas metálicas y características resaltantes

- a) **Pantalla Metálica de cinta de cobre:** formado por una cinta de cobre puesta helicoidalmente alrededor del núcleo (figura 2.30).



**Combinación de cinta y alambre de cobre:** Consta de una cinta colocada helicoidalmente sobre el núcleo y sobre la cinta se coloca determinado número de alambres helicoidales (figura 2.32).



DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Figura 2.32.	Cable de potencia con combinación de cinta y alambre de cobre.	

Cinta de cobre helicoidal	Excelente pantalla electromagnética total, sin intersticios, óptima atenuación de transferencia de ondas electromagnéticas. Buena protección mecánica particularmente contra las perforaciones. Óptima resistencia a la corrosión.	Inestabilidad de la conductibilidad debido al débil contacto con el solape, afectado durante el manejo e instalación. Radios de curvaturas grandes. Mala resistencia mecánica longitudinal. Poca resistencia a la humedad y el agua. Poca resistencia a la oxidación. Baja capacidad de cortocircuito.
Cinta de cobre corrugada longitudinal	Excelente pantalla electromagnética total, sin intersticios. Buena atenuación de transferencia de ondas electromagnéticas. Buena protección mecánica particularmente contra las perforaciones. Buena resistencia a la corrosión. Buena flexibilidad. Buena resistencia mecánica longitudinal.	Poca resistencia a la humedad y el agua. Poca resistencia a la oxidación. Baja capacidad de cortocircuito.
Alambres de cobre helicoidales	Buena pantalla electromagnética. Óptima atenuación de transferencia. Óptima resistencia a la corrosión. Buena flexibilidad. Buena capacidad de cortocircuito.	Ninguna resistencia a la humedad y al agua. Poca resistencia a la oxidación. Poca resistencia mecánica longitudinal Mala resistencia a las perforaciones
Combinación de cinta y alambre de cobre	Reúne las ventajas de ambas pantallas	Radios de curvaturas grandes. Poca resistencia mecánica longitudinal Poca resistencia a las perforaciones.

En la tabla 2.2 se muestran las ventajas y desventajas de los distintos tipos de pantallas existentes en el mercado nacional para ser colocadas en los cables, de acuerdo a los requerimientos técnicos del sistema eléctrico donde se instalará el cable.

**Tabla 2.2. Tipos de Pantallas metálicas y características más resaltantes.**

### 2.7.1.6 CHAQUETA o Cubierta

Es la capa más externa del cable, su función primordial en sus diferentes combinaciones es la de protegerlo de los agentes externos, del medio ambiente que lo rodea, darle una protección mecánica al cable en el momento de la instalación como en la operación y protegerlo una vez instalado de golpes, roedores, termitas, etc.

La selección de la cubierta de un cable dependerá de su aplicación y de la naturaleza de los agentes externos contra los cuales se desea proteger el cable.

Las cubiertas pueden ser principalmente de los siguientes materiales:

- a). Metálicas, el material normalmente utilizado en este tipo de cubierta es el plomo y sus aleaciones, otro metal también utilizado es el aluminio.
- b). Termoplásticas, las más usuales son fabricadas en PVC, y polietileno de alta y baja densidad.
- c). Elastoméricas, aquí se utiliza por lo general el (policloropreno) y el Hypalon (Polietileno clorosulfonado).
- d). Textiles, esta cubierta está formada por hule impregnado en asfalto y recubierto con un baño final de cal y talco a fin de evitar la adhesión de las otras capas adyacentes.

Físicamente, para cables enterrados, la chaqueta incluiría un grado de dureza conveniente para resistir los rigores (como presión) de un funcionamiento en una instalación subterránea y cualidades que permitirán al cable resistir las muchas y variadas condiciones ambientales que existen en un área de la sub-superficie.

En algunos casos, debido a la abrasión, corrosión y contaminación del medio donde va a ser instalado el cable, es necesario conferirle una mayor resistencia mecánica, esto se logra mediante la aplicación de armaduras de alambres de acero galvanizado, armaduras formadas por dos cintas del mismo material intercaladas, o bien de armaduras de tipo “interlock”, las cuales son protegidas normalmente con una segunda cubierta termoplástica.

## 2.7.2 Nivel de Aislamiento

Es necesario conocer el espesor del aislamiento el cual está relacionado con el tiempo de respuesta de las protecciones del sistema donde se va a instalar el cable, tomando como base la tensión de operación, con lo cual se llega a un determinado nivel de aislamiento.

Las normas Americanas definen el nivel de aislamiento de los cables por el voltaje de fase a fase, mientras que las normas Europeas, definen el nivel de aislamiento por el voltaje de fase a fase y fase a neutro.

### 2.7.2.1 Clase 1. Nivel 100%.

En los *Sistemas Trifásicos en Estrella*, con el neutro puesto a tierra, el voltaje de fase a neutro es:

$$V_o = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (2.23)$$

En esta conexión el valor de  $V_0$  siempre será igual y no cambia, es por ello en este caso se

Tensión Nominal	Nivel de aislamiento 100% Neutro a tierra	Nivel de aislamiento 133% Neutro aislado
-----------------	--	---

habla de un

nivel de aislamiento del 100 %.

Las normas “ICEA” establecen que en este nivel de voltaje se puede usar cables con 100% de aislamiento cuando el sistema está protegido con relevadores, los cuales deben operar siempre rápidamente cuando se tiene una falla a tierra, pero en ningún caso el tiempo de despeje de la falta deberá ser mayor de un minuto.

Este nivel de aislamiento también se puede usar sistemas donde la razón entre la reactancia de secuencia cero y secuencia positiva ( $X_0/X_1$ ) no esté en el intervalo (1 a 40) y que cumpla con la condición de liberación de falla, ya que en los sistemas incluidos en el intervalo descrito pueden encontrarse valores de tensión excesivamente elevados en condiciones de falla a tierra.

### 2.7.2.2 Clase 2. Nivel 133%

En los *Sistemas Delta* o *Estrella*, con el neutro flotante (sin neutro a tierra), el voltaje de fase a neutro está incrementado en un 33%.

$$V_0 = \frac{V}{\sqrt{3}} \cdot 1,33 \quad (2.24)$$

Los cables de esta categoría pueden ser utilizados en sistemas donde, el sector que tenga la falla estará desenergizado en un tiempo que no exceda de una hora. También puede ser usado cuando se desea una protección de aislamiento superior a la dada por el nivel 100% de aislamiento, a fin de aumentar la seguridad.

### 2.7.2.3 Clase 3. Nivel 173%

Los cables pertenecientes a esta categoría, deberán aplicarse a sistemas donde el tiempo de desconexión por fallas a tierra no está definido. También se recomienda su uso en sistemas con problemas de ferresonancia, donde se pueden presentar sobre tensiones de gran magnitud.

A continuación se presenta una tabla donde se indican los diferentes espesores del aislamiento según el sistema utilizado para distintos valores de tensión entre fases.

Tensión Entre fases (KV)	Espesor del aislamiento (mm)	Tensión de prueba AC(KV)	Tensión de prueba DC (KV)	Nivel corona min. (KV)	Espesor de aislamiento (mm)	Tensión de prueba AC (KV)	Tensión de prueba DC (KV)	Nivel corona min. (KV)
5	2.29	13	35	4	2.92	13	35	5
8	2.92	18	45	6	3.56	22	45	8
15	4.45	27	70	11	5.46	33	80	15
25	6.60	38	100	19	8.76	49	125	26
35	8.76	49	125	26	10.70	60	-	-

Fuente: Catálogo de cables de media tensión ICONEL

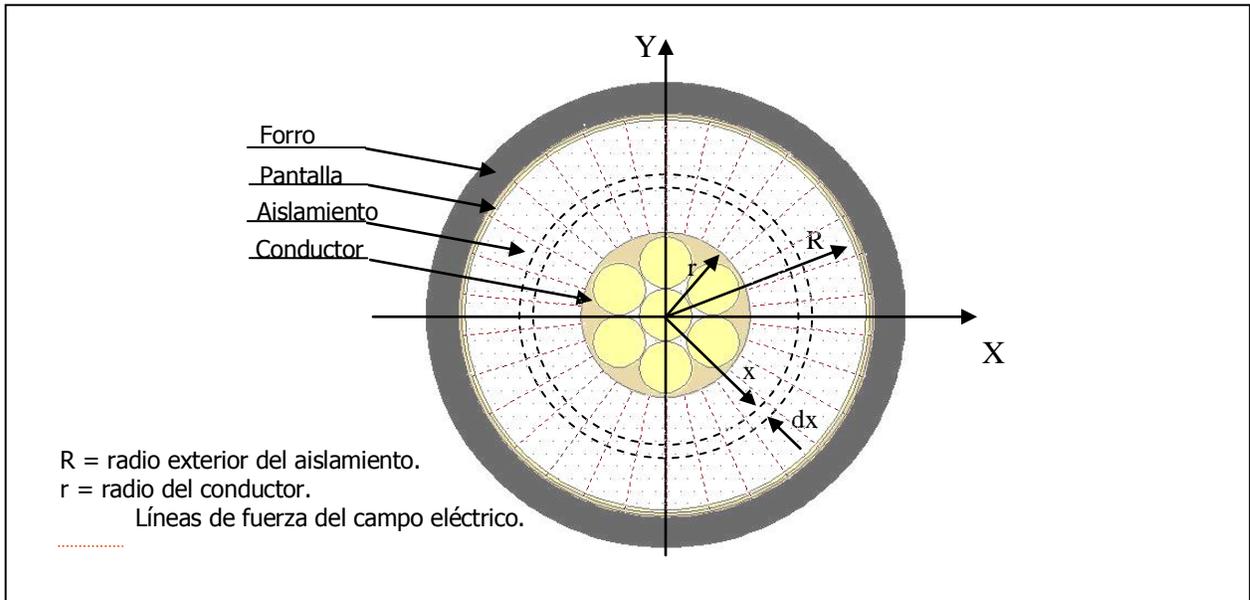
### 2.7.3 PARAMETROS Y CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE INTERES

**2.7.3.1 Rigidez dieléctrica:** Es el valor de la intensidad de campo eléctrico al que hay que someter al material aislante para que se produzca una perforación del mismo. La rigidez dieléctrica del aislamiento de un cable depende de la forma de onda de la tensión de prueba y del tiempo de aplicación de la tensión. En general la rigidez dieléctrica es más alta para impulsos de muy corta duración, tiene un valor inferior si la prueba se realiza aplicando una tensión continua y todavía más bajo si la tensión aplicada es alterna.

**2.7.3.2 Constante dieléctrica:** La constante dieléctrica de un aislamiento puede definirse como la relación entre la capacitancia de un conductor cuyo dieléctrico sea el aislamiento en cuestión y la capacitancia del mismo condensador con aire como dieléctrico.

**2.7.3.3 Capacitancia y Reactancia Capacitiva:** La capacitancia (C), es una propiedad de un circuito o elemento de un circuito eléctrico, la cual permite el almacenamiento de electricidad cuando existe una diferencia de potencial entre los conductores. Su valor se expresa como el promedio de una cantidad de electricidad a una diferencia de potencial, y usualmente es medida en picofaradios por metro (pf/m). El valor de la capacitancia siempre es positivo.

El fenómeno de la corriente alterna asociado a la capacitancia eléctrica es importante en conductores y cables. En la mayoría de los voltajes y frecuencias comerciales usadas en la distribución de la energía eléctrica, los efectos de la capacitancia son despreciables, sin embargo la capacitancia total de una longitud de cable afectará la corriente de carga y el flujo de corriente reactiva. A voltajes relativamente altos, la corriente debida a la capacitancia puede llegar a ser un valor suficiente para afectar al circuito, por ello los aislamientos se diseñan según su aplicación usando materiales con una constante dieléctrica moderadamente baja. En la figura 2.33 se muestran las líneas de fuerza del campo eléctrico que emanan radial y uniformemente del conductor y terminan en la pantalla metálica.



**Figura 2.33. Líneas de fuerza del campo eléctrico en el cable.**

La capacitancia de un cable es directamente proporcional a la constante dieléctrica de su aislamiento. En efecto, considérese un cable monofásico con pantalla metálica, como el de la figura 2.33. El cable constituye un condensador en el que el conductor, que está al potencial de la línea, constituye una de las placas, la pantalla metálica, que está conectada a tierra, la otra placa y el aislamiento del cable es el dieléctrico del condensador.

Si la carga eléctrica, distribuida uniformemente en la superficie del conductor, es  $\tilde{q}$  coulombs por metro de conductor, el flujo eléctrico que emana del conductor es:

$$\tilde{\psi} = \tilde{q} \quad \text{coulombs por metro de conductor} \quad (2.25)$$

A una distancia  $x$  del centro del conductor la densidad de flujo es:

$$\tilde{D} = \frac{\tilde{q}}{2\pi x} \quad \text{coulombs/m}^2 \quad (2.26)$$

La intensidad de campo eléctrico a esa misma distancia  $x$  está dada por la expresión:

$$\tilde{E} = \frac{\tilde{D}}{k\epsilon_0} \quad \text{newtons/coulomb} \quad (2.27)$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del espacio vacío.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \quad (2.28)$$

Y k es la constante dieléctrica del aislamiento.

Sustituyendo en la expresión (2.27) los valores de  $\tilde{D}$  y  $\varepsilon_0$  dados por las expresiones (2.26) y (2.28), se tiene:

$$\tilde{E} = 18 \times 10^9 \times \frac{\tilde{q}}{xk} \quad \text{newtons/coulomb} \quad (2.29)$$

El gradiente de potencial en cada punto del campo eléctrico es igual a la intensidad de campo eléctrico en ese punto con signo cambiado:

$$-\frac{d\tilde{v}}{dx} = \tilde{E} = 18 \times 10^9 \times \frac{\tilde{q}}{xk} \quad \text{volts/m} \quad (2.30)$$

La diferencia de potencial  $\tilde{V}_n$  entre el conductor y la pantalla, la cual está conectada a tierra, se obtiene realizando la siguiente integración:

$$\begin{aligned} - \int_{V_n}^0 d\tilde{V} &= \frac{18 \times 10^9 \times \tilde{q}}{k} \int_r^R \frac{1}{x} dx \\ \therefore \tilde{V}_n &= \frac{18 \times 10^9 \times \tilde{q}}{k} \text{Ln} \left( \frac{R}{r} \right) \quad \text{volts} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Si la carga eléctrica por metro de conductor es  $\tilde{q}$  la capacidad a tierra del cable, por metro de longitud, está dada por:

$$C = \frac{\tilde{q}}{\tilde{V}_n} \quad (2.32)$$

Sustituyendo en la expresión anterior el valor de  $\tilde{V}_n$  obtenido en (2.31):

$$C = \frac{k}{18 \text{Ln} \left( \frac{R}{r} \right)} \bullet 10^{-9} \quad \text{Faradios/m de cable} \quad (2.33)$$

Donde:

k = Permitividad relativa o constante dieléctrica del aislamiento.

R = radio del aislamiento (excluyendo pantallas, figura 2.33), (mm).

r = radio del conductor (incluyendo pantalla semiconductor, figura 2.33), (mm).

La capacitancia y reactancia capacitiva de los cables se suele dar en función del factor geométrico del cable  $G$  que se define de la siguiente manera:

$$G = Ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (2.34)$$

$$\therefore C = \frac{k10^{-9}}{18G} \quad \text{F/m} \quad (2.35)$$

La reactancia capacitiva correspondiente es:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{9 \times 10^9 G}{\pi f k} \quad \Omega \times \text{m} \quad (2.36)$$

La corriente de carga capacitiva que circulará al aplicar a un cable monofásico de capacitancia a tierra  $C$  y de longitud  $l$  una diferencia de potencial  $\tilde{V}_n$  voltios entre el conductor y tierra será (representando la capacitancia del cable como un parámetro concentrado):

$$\tilde{I}_C = j \frac{\tilde{V}_n}{X_C} \quad (2.37)$$

Valores de la Permitividad relativa para cables de media tensión con aislantes termoestables a una frecuencia de transmisión de (60Hz).

**Tabla 2.4. Valores de la Permitividad relativa.**

Tipo de Aislamiento	k
EPR	3
XLPE	2.5

Fuente: Publicación 502 (Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cable)

**2.7.3.4** Tabla 2-5. Valores de la Permisividad relativa. Datos tomados de la Publicación 502

#### **Inductan**

#### **cia y Reactancia Inductiva:**

En los cables monopares con pantalla el flujo producido por la corriente alterna que circula por el conductor corta la pantalla metálica que envuelve al conductor, induciendo en las pantallas una fuerza electromotriz.

Si las pantallas de los cables monopolares se conectan a tierra o entre sí únicamente en un punto, no existirán corrientes circulantes aunque haya fuerzas electromotrices inducidas en ellos, en tal caso podrá utilizarse la siguiente expresión para el cálculo de la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi f \times \left( 2 \times 10^{-4} L_n \left( \frac{DMG}{RMG} \right) \right) = 0.00289 f \log_{10} \left( \frac{DMG}{RMG} \right) \quad \Omega/\text{Km} \quad (2.38)$$

Donde:

$X_L$  = reactancia inductiva por kilómetro y por fase.

$f$  = frecuencia en ciclos por segundo.

$DMG$  = Distancia media geométrica entre los centros de los conductores.

$RMG$  = Radio medio geométrico de los conductores.

Si por el contrario, las pantallas de los cables monopolares están conectadas a tierra o entre sí en más de un punto, habrá corrientes circulantes en las pantallas de los cables, por lo tanto para calcular la reactancia inductiva del cable por fase deben tomarse en cuenta estas corrientes.

### Instalaciones con tres Cables Monopolares en formación Trébol:

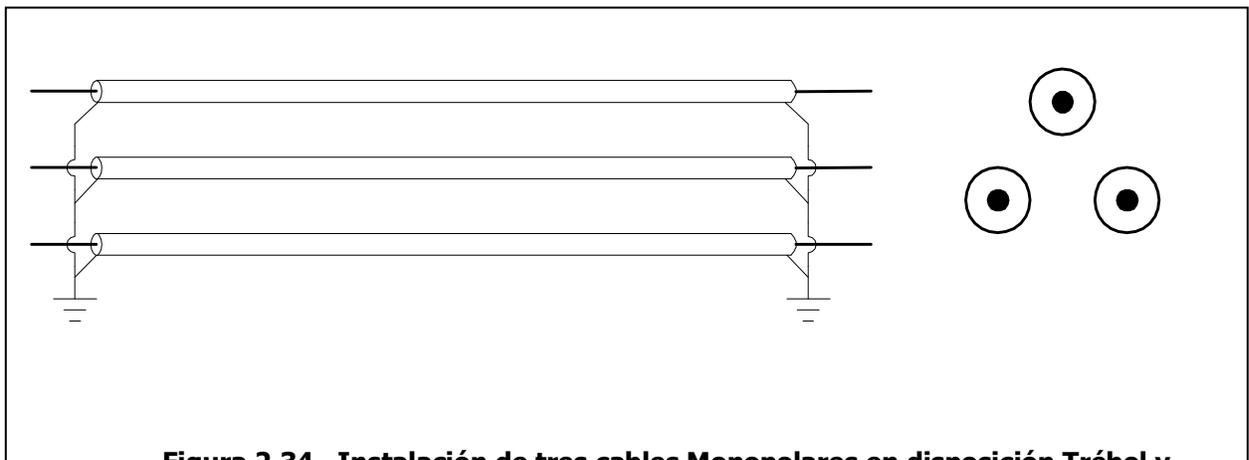
En aquellas instalaciones donde se utilizan tres conductores monopolares en formación “Trébol”, y cuyas pantallas se encuentran puestas a tierra en ambos extremos de una sección eléctrica, la inductancia mutua estará dada por la siguiente fórmula:

$$X_m = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-7} \cdot L_n \left( \frac{2 \cdot S}{d} \right) \quad \Omega \cdot m \quad (2.39)$$

Donde:

$S$  = Distancia entre los ejes de los conductores en una sección eléctrica considerada.

$d$  = Diámetro medio de la chaqueta (mm).

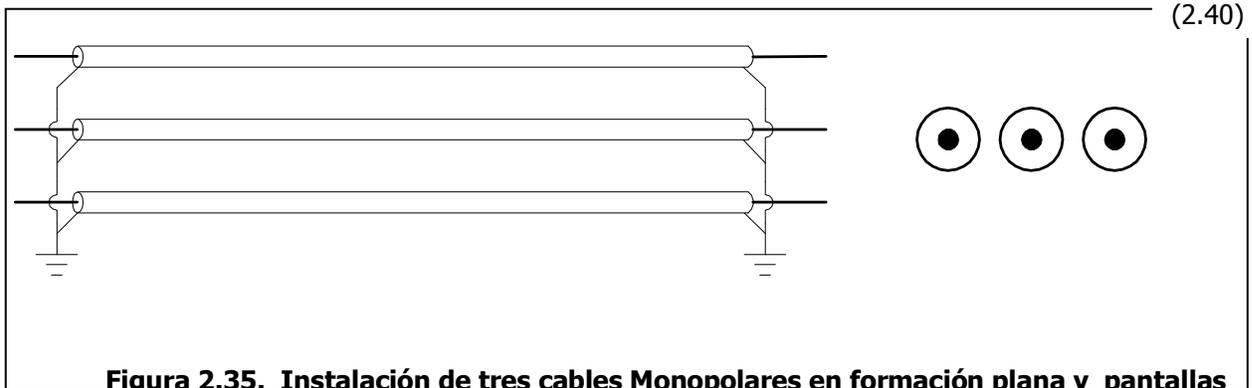


**Figura 2.34. Instalación de tres cables Monopolares en disposición Trébol y pantallas aterradas en ambos extremos.**

### Instalación de tres cables monopolares en configuración plana:

Para cables monopolares en configuración plana, con el cable del centro equidistante de los cables externos, sin transposición y con las pantallas puestas a tierra en ambos extremos de una sección eléctrica, la inductancia mutua estará dada por la siguiente fórmula:

$$X_m = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-7} \cdot \ln(2) \cdot \Omega \cdot m$$



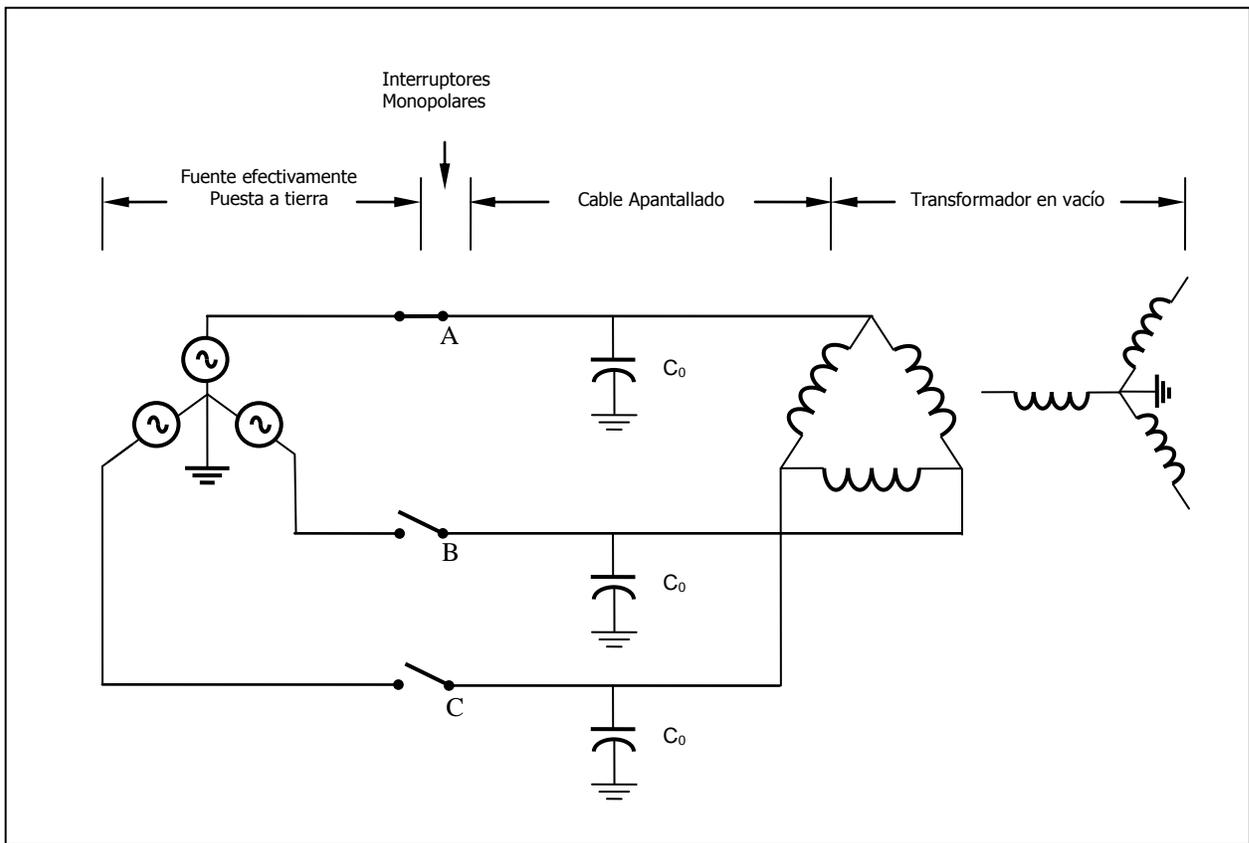
**Figura 2.35. Instalación de tres cables Monopolares en formación plana y pantallas aterradas en ambos extremos.**

## 2.8 FERRORESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

En un sistema eléctrico de distribución, la ferresonancia se presenta cuando se conforma un circuito LC serie, en el cual un elemento tiene característica no lineal. La capacitancia es debida a la presencia de bancos de condensadores, cables, líneas de interconexión y en menor grado a la capacitancia propia del transformador y otros equipos; la inductancia normalmente es aportada por un transformador con un núcleo de material ferromagnético.

El circuito serie LC se forma cuando por la energización o desenergización de una o dos fases la reactancia capacitiva queda conectada en serie con la reactancia inductiva del transformador. Esta condición se puede alcanzar cuando se utilizan dispositivos de interrupción monopolares o por la operación de protecciones como fusibles.

En el circuito trifásico de la figura 2.36 se puede observar, una fuente trifásica efectivamente puesta a tierra, conectada con cables apantallados a través de tres interruptores monopolares. Este tipo de cable tiene una capacitancia fase-tierra  $C_0$ , pero no presenta capacitancia fase-fase. Al otro extremo del circuito, se encuentra un banco de transformadores trifásico en vacío con las bobinas del primario conectadas en  $\Delta$  (delta). Cuando se cierra el interruptor monopolar de la fase A, dos fases del transformador se energizan siguiendo la trayectoria a través de las capacitancias a tierra de los cables de las fases B y C.



**Figura 2.36. Circuito ferroresonante.**

En el instante en que el interruptor de la fase A se cierra, las capacitancias a tierra de las fases B y C conforman un pequeño circuito y los arrollados de las columnas A-B y A-C del núcleo del transformador comienzan a trazar una corriente de excitación o corriente inrush normal. Durante el primer ciclo de voltaje aplicado el hierro del núcleo del transformador puede saturarse debido al cierre o a la cercanía del voltaje cero, o debido al flujo residual en el núcleo del transformador o ambos.

La saturación origina un largo pulso de corriente a través de los arrollados del transformador y las capacitancias de las fases B y C. Luego el hierro del núcleo del transformador sale de saturación dejando almacenado un voltaje de carga importante en las capacitancias del cable.

En los ciclos siguientes el núcleo del transformador puede llegar a saturarse en dirección opuesta, debido al cambio de la polaridad de la carga almacenada en la capacitancia. Si el transformador continúa entrando y saliendo de saturación, pueden ocurrir altas y sostenidas sobretensiones fase-fase y fase-tierra, en forma cíclica o al azar.

Estas sobretensiones sostenidas pueden causar sobre excitación del transformador, falla en los descargadores de sobretensiones (pararrayos), e incluso fallas en el aislamiento del transformador o del sistema. Cuando se cierra el interruptor de la segunda fase (figura 2.36) la sobretensión puede persistir o llegar a ser mayor. Al cerrar el interruptor de la tercera fase, se restauran las condiciones para tener tres fases balanceadas y la ferroresonancia terminará.

Un sistema de distribución debe ser diseñado y operado de tal manera de que sea muy poco probable que ocurra ferroresonancia durante condiciones monofásicas.

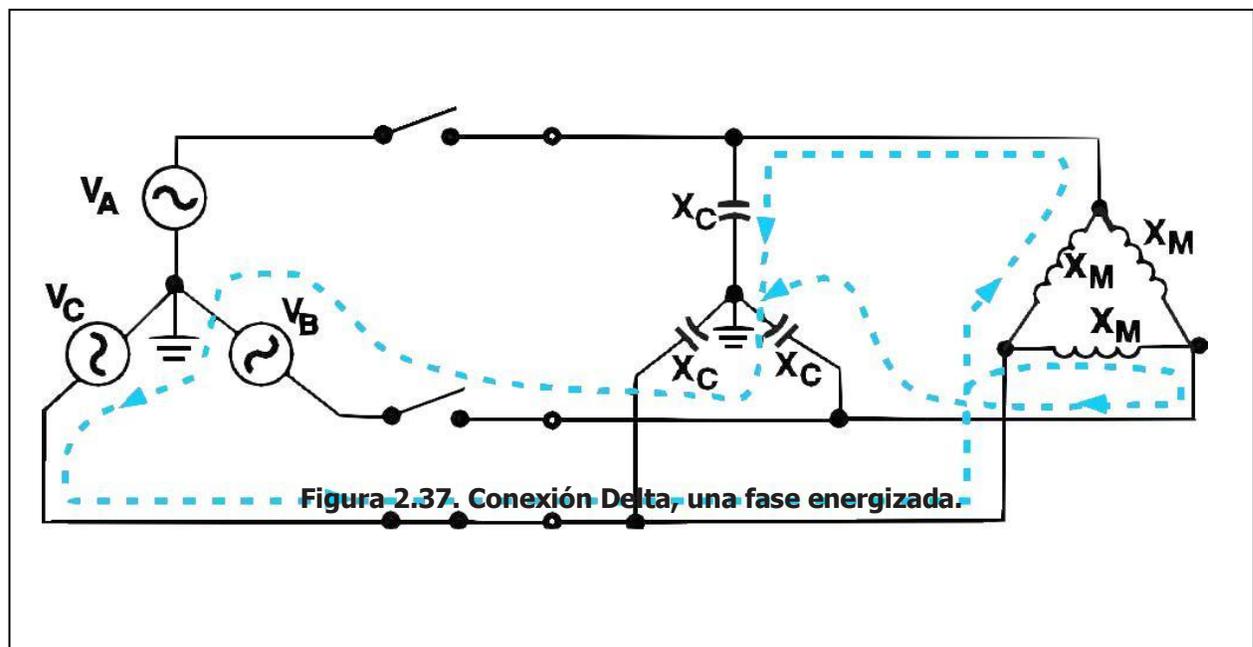
Para un sistema y método de operación dado, las conexiones y los dispositivos de interrupción deben seleccionarse de forma tal de minimizar la probabilidad de ferroresonancia y las sobretensiones que esta origina.

## 2.9 CONFIGURACIONES MÁS COMUNES EN RIESGO DE PRESENTAR FERRORESONANCIA (CIRCUITO SIMPLIFICADO)

Cuantiosos modelos de estudios han sido realizados, en los cuales, se han estudiado diversas configuraciones circuitales y sus variaciones, sin embargo, el fenómeno básico y el significado de los parámetros pueden obtenerse del análisis simplificado de circuitos lineales.

Para los casos que se presentan seguidamente, el sistema del primario de distribución se considera conectado en la subestación a transformadores con conexión en delta-estrella aterrada.

En estos circuitos la potencia del sistema define el voltaje de la fuente del circuito equivalente, pero no define el voltaje en los puntos medios del circuito donde pueden estar presentes voltajes altos originados por fallas en la apertura o cierre monofásico de las redes.



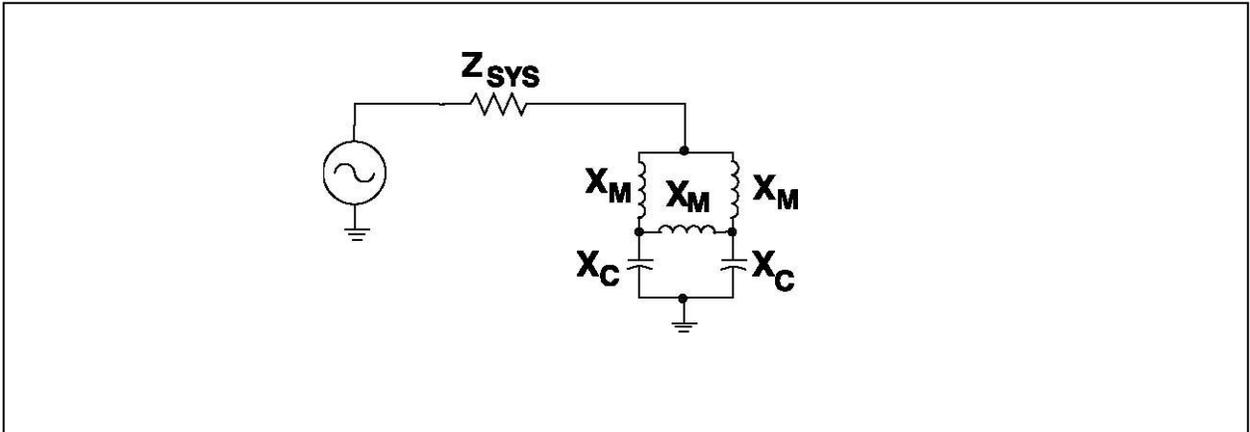


Figura 2.38. Conexión Delta, una fase energizada. Red equivalente.

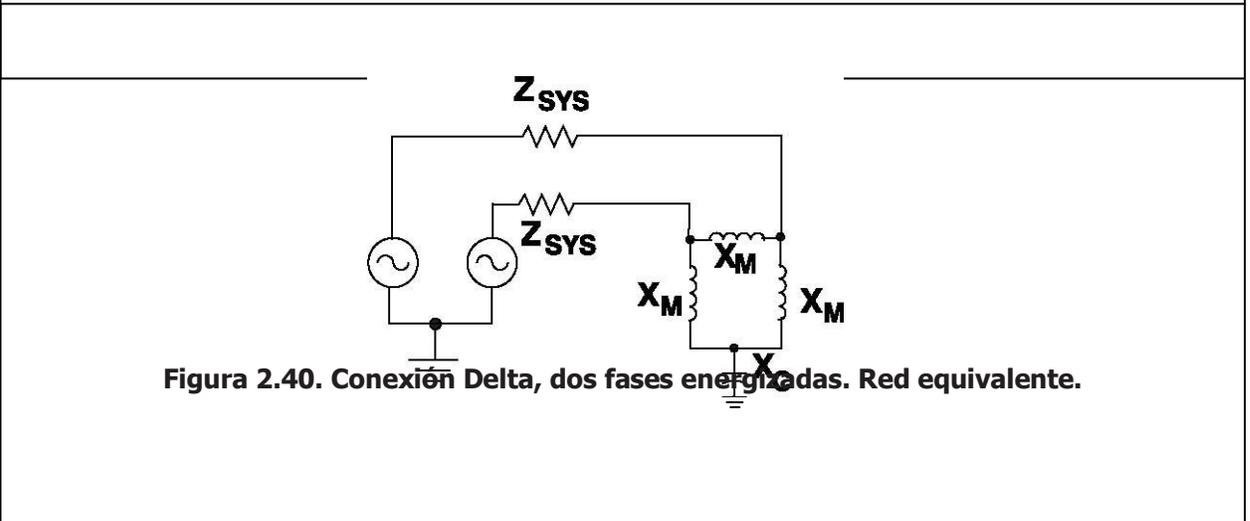
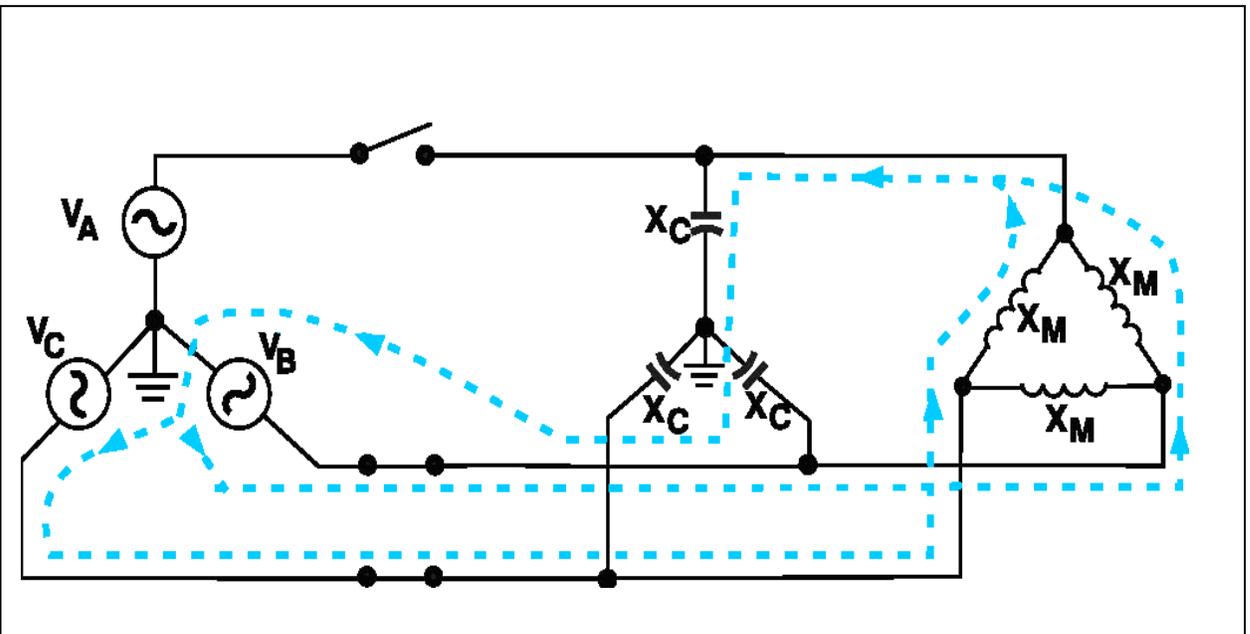
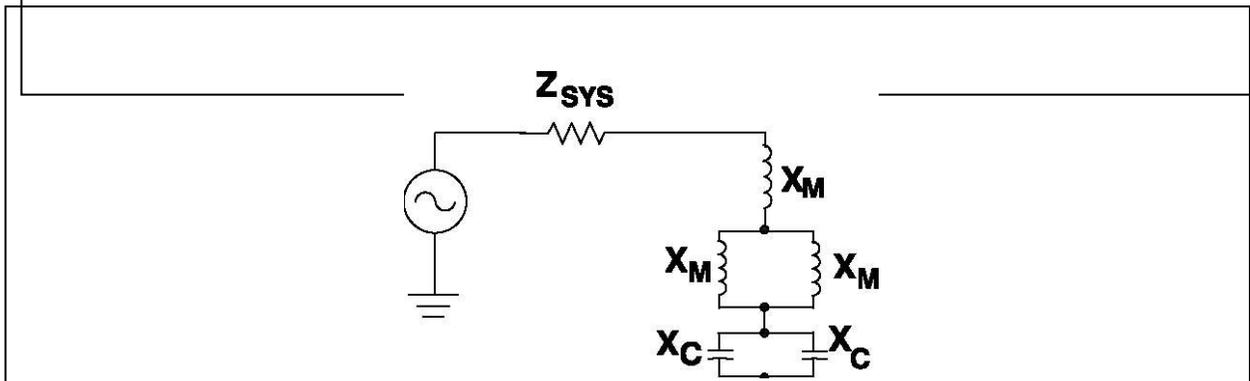
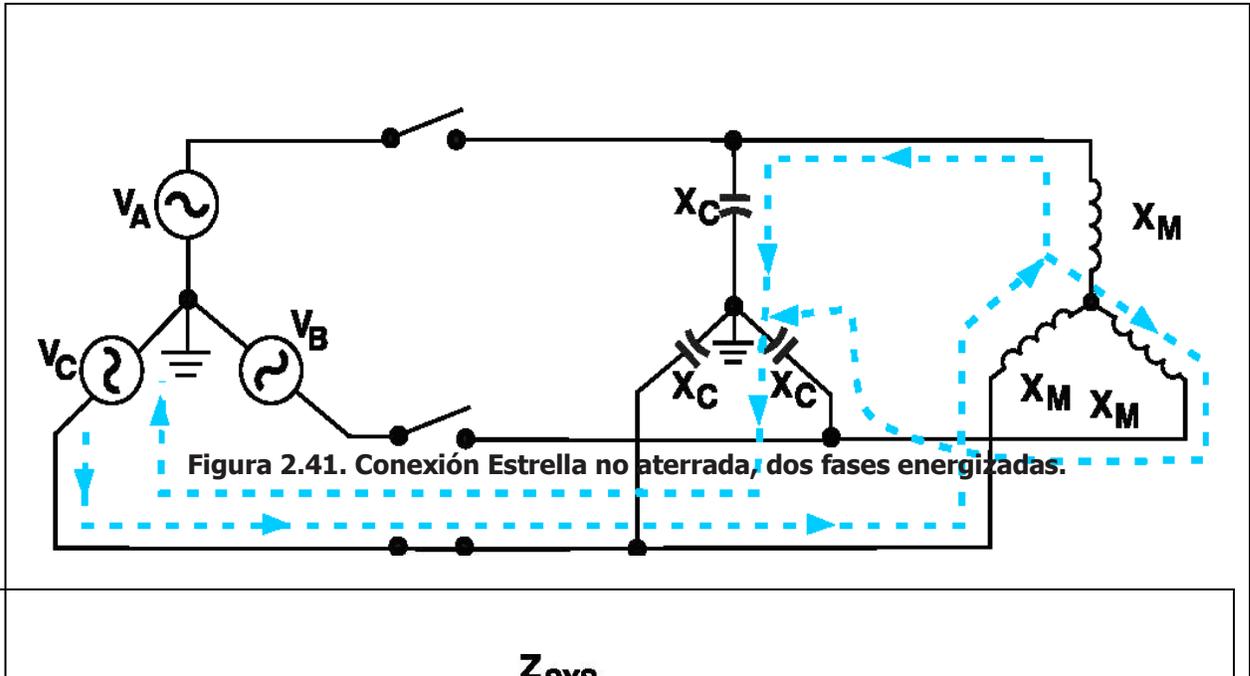


Figura 2.40. Conexión Delta, dos fases energizadas. Red equivalente.



**2.10 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES ALTAMENTE SUSCEPTIBLES A LA FERRORESONANCIA.**

Los bancos de transformadores con ciertas conexiones, son más susceptibles a experimentar ferroresonancia cuando el banco es energizado o desenergizado usando interruptores monopolares, que se encuentran distantes del transformador, o cuando un conductor o fusible en un lugar remoto se abre.

En general, la ferroresonancia es posible si las bobinas del primario del banco de transformadores no están puestas a tierra y el sistema de suministro se encuentra efectivamente puesto a tierra (tres fases 4 conductores), entonces se presentan capacitancias fase-tierra o fase-fase o ambas, entre los interruptores monopolares o fusibles y el transformador. En la figura 2.43



Para las conexiones mostradas en la figura 2.43, no ocurre ferresonancia si el voltaje en el primario es de 15 kV o menos y además se emplea en el circuito una línea aérea (conductor desnudo) cuya longitud entre en el banco de transformadores y los dispositivos monopoles no exceda las longitudes comúnmente usadas. Son relativamente pocos los casos de ferresonancia reportador bajo estas condiciones, es decir, si la longitud de las líneas es relativamente corta o la interrupción se desarrolla en el lugar donde se encuentra el transformador. De cualquier forma en sistemas aéreos de 25 kV con neutro multiaterrado y particularmente en 35 kV, la ferresonancia es más probable con las conexiones de la figura 2.43. De hecho se ha observado ferresonancia con altas sobretensiones, de 4 a 5 en p.u. al energizar los terminales de bancos de transformadores conformados por pequeños transformadores monofásicos con conexión Y- $\Delta$ . Esto es debido a la resonancia entre la capacitancia interna del transformador y la impedancia de excitación del mismo.

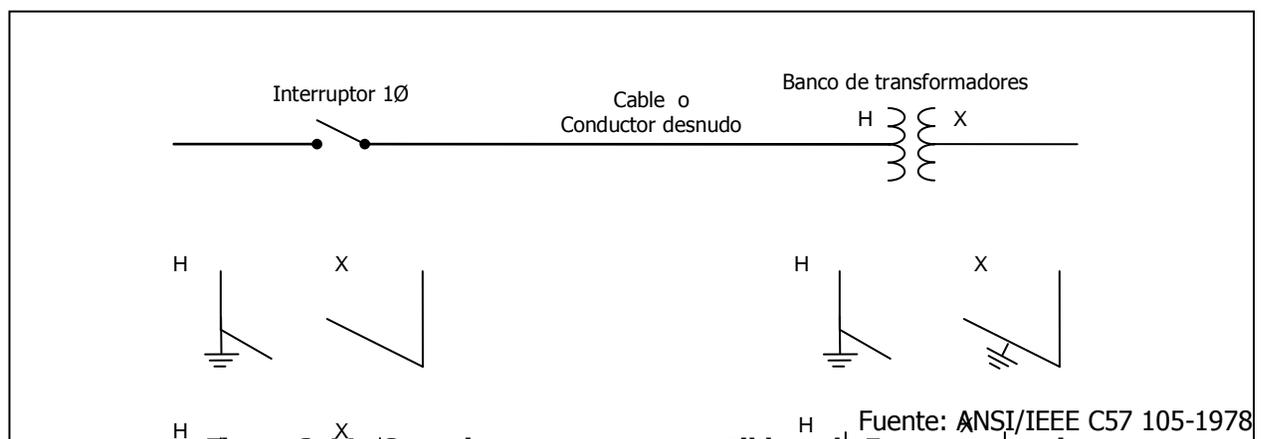
Para las conexiones mostradas en la figura 2.43, la ferresonancia también es posible si el voltaje del primario es de 12 kV o mayor (para un sistema efectivamente puesto a tierra) y además se emplea en el circuito cables monopoles apantallados o un cable tripolar apantallado. La probabilidad de ocurrencia se incrementa a medida que se incrementa el voltaje del primario, la longitud del cable aumenta, o disminuye el tamaño del transformador. La ferresonancia también puede ocurrir con voltajes en el primario por debajo de 12 kV cuando se usa cables apantallados para conectar interruptores monopoles o fusibles al transformador. De cualquier forma la experiencia de la industria muestra que la ferresonancia no es tan probable a baja tensión (4160 y 8320) como a tensiones superiores.

En varias publicaciones técnicas, se han definido las longitudes máximas del cable del circuito que une los interruptores monopoles y el transformador, las cuales se pueden usar según las diferentes dimensiones y niveles de voltaje del primario de los transformadores, al aplicar las conexiones de la figura 2.43, si se quiere prevenir la ferresonancia. Una comparación de datos tomados de estas publicaciones muestra que la longitud máxima del cable, para un transformador de ciertas dimensiones y voltaje en el primario, varía considerablemente. De cualquier forma las longitudes del cable permitidas son relativamente cortas para las conexiones de la figura 2.43, particularmente para sistemas con voltaje de 12 kV o superiores. Sin embargo, considerando la tendencia al uso de circuitos de distribución subterráneos con incremento de la distancia entre el transformador y los dispositivos monopoles, el limitar la longitud del cable para prevenir la ferresonancia con las conexiones de la figura 2.43 es irrazonable.

## **2.11 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES MENOS SUSCEPTIBLES A LA FERRESONANCIA**

En la figura 2.44 se muestran dos conexiones para transformadores, las cuales bajo ciertas condiciones del sistema, pueden evitar la ferresonancia. Las conexiones Y<sub>abierto</sub>- $\Delta$ <sub>abierto</sub> evitará la ferresonancia cuando los interruptores monopoles se encuentren cerca de la fuente, si la

capacitancia del circuito es fase a tierra. Hoy en día en la mayoría de los sistemas de distribución subterráneos, se usan cables monopolares apantallados, y esto hace que toda la capacitancia sea fase a tierra. La conexión  $Y_{abierta}-Y_{abierta}$  se hace con cualquier conexión externa de dos transformadores monofásicos, o colocando dos núcleos embobinados monofásicos ensamblados en un tanque común. En cualquier caso, los arrollados del primario no están acoplados magnéticamente, las tres fases del circuito no están acopladas capacitivamente y no ocurre la ferresonancia. No obstante, si el circuito entre los interruptores monopolares y el banco  $Y_{abierta}-\Delta_{abierta}$  tiene capacitancia fase-fase como en un conductor desnudo, puede ocurrir ferresonancia. Afortunadamente, la longitud necesaria del conductor abierto es mucho mayor de la empleada normalmente. Con fines prácticos, la conexión  $Y_{abierta}-\Delta_{abierta}$  puede considerarse libre de ferresonancia.



**Figura 2.44. Conexiones menos susceptibles a la Ferresonancia.**

Fuente: ANSI/IEEE C57 105-1978

Usualmente los sistemas subterráneos tienen cables monopolares apantallados para los cuales la capacitancia es fase-tierra en todo el circuito. Cuando éste es el caso, la ferresonancia no ocurrirá en la conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  con interruptores monopolares remotos y un banco consistente de de tres transformadores monofásicos o una unidad trifásica con triple construcción (tres núcleos embobinados monofásicos ensamblados en un mismo tanque). Si el transformador  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  se alimenta a través de un circuito con conductores desnudos donde la capacitancia fase-fase está presente, puede ocurrir ferresonancia. De cualquier modo, la longitud de la línea necesaria para permitir la ferresonancia bajo estas condiciones (por encima de 2 millas) es mayor que la que usualmente existe entre los dispositivos monopolares y los transformadores. Pero debe tenerse en cuenta que si existe un banco de capacitores  $Y_{aterrada}$  o  $\Delta$  entre los dispositivos monopolares y los transformadores puede ocurrir la ferresonancia. Para situaciones donde no existan bancos de capacitores entre los interruptores y el transformador, el banco  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  hecho a partir de tres transformadores monofásicos o una unidad trifásica con triple construcción puede considerarse libre de ferresonancia.

La mayoría de los transformadores sumergibles trifásicos y los transformadores padmounted trifásicos con conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  no emplean triple construcción, pero son construidos en un núcleo de 4 o 5 columnas. Este método se usa debido a que generalmente el

resultado es menor en costo, peso, y tamaño para los transformadores trifásicos. Estos transformadores usualmente son alimentados a través de circuitos que consisten en cables monopolares apantallados, interruptores monopolares o fusibles cercanos a la fuente.

Las pruebas en campo y la experiencia muestran que la ferresonancia puede ocurrir con transformadores con núcleo de 4 o 5 columnas con conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  cuando son alimentados con cables monopolares apantallados. La data de las pruebas muestra que pueden ocurrir voltajes de cresta de 2.35 por unidad, pero habitualmente se consideran menores. Esta data también muestra que la longitud del cable permitida cuando se usan transformadores con conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  es considerablemente más larga que la que se emplea para conexión en el primario  $Y_{no\ aterrada}$  sin incrementar la probabilidad de altos sobrevoltajes y ferresonancia. Esto en realidad se evidencia por las buenas experiencias obtenidas al usar transformadores con este tipo de construcción.

## **2.12 MEDIDAS PARA MINIMIZAR LA PROBABILIDAD DE FERRORESONANCIA**

Las medidas para minimizar la probabilidad de Ferresonancia en los sistemas de distribución se pueden clasificar según la existencia o no de aterramiento en el primario:

- Conexión primaria no aterrada
- Conexión primaria aterrada

### **2.12.1 CONEXIÓN PRIMARIA NO ATERRADA.**

Como se mencionó anteriormente la ferresonancia es bastante común con las conexiones de la figura 2.43 si el banco de transformadores es conectado a través de cables monopolares apantallados y dispositivos monopolares. No obstante la tendencia en la industria está lejos del uso de las conexiones mostradas en la figura 2.43 (para padmounted y bancos sumergibles), sin embargo si se emplean estas conexiones, se pueden tomar ciertas medidas para minimizar la probabilidad de ferresonancia.

**2.12.1a Interruptores y Seccionadores Trifásicos.** El uso de interruptores y seccionadores trifásicos apropiadamente ajustados cerca de la fuente evita la formación de circuitos monofásicos durante condiciones de maniobra o falla y consecuentemente evita la ferresonancia sostenida. De cualquier forma esta es una solución costosa que la mayoría de las empresas de servicio público rechaza desde el punto de vista económico. Una solución similar es el uso de interruptores trifásico en la locación remota y fusibles solo en la locación del transformador. Esta es una solución viable, pero tiene el inconveniente de que origina el cierre de líneas por fallas en el cable del circuito.

Afortunadamente, el arreglo de un interruptor trifásico y fusibles cerca de la fuente reduce la probabilidad de ferresonancia en las bobinas del primario que no están puestas a tierra. La ferresonancia sostenida no ocurrirá durante operaciones de maniobra debido al interruptor trifásico. Si un fusible actúa a causa de una falla en el cable, la capacitancia a tierra de la fase abierta es desviada por la impedancia en la trayectoria de la falla, por lo que no se espera ferresonancia. Pero si un fusible o un conductor en el circuito del primario, origina una apertura del circuito en ausencia de una falla shunt, y el transformador está descargado, puede ocurrir ferresonancia.

Sin embargo, cuando un fusible o conductor se abre, la carga conectada en el secundario del transformador usualmente es suficiente para impedir la ferresonancia sostenida. No obstante, si toda la carga conectada al secundario es alimentada por medio de un interruptor o interruptores que posean una bobina de disparo de bajo voltaje, la carga total del secundario puede ser desconectada durante una apertura de circuito en el primario, y puede ocurrir ferresonancia.

**2.12.1b Carga en el Secundario.** Si hay suficiente carga conectada al secundario del banco de transformadores, no ocurrirá ferresonancia sostenida durante condiciones monofásicas. El total de carga requerida depende principalmente de la capacidad nominal de kVA del transformador, voltaje del primario longitud del cable, las conexiones del transformador, y las características de la carga incluso las características de absorción de energía. Generalmente, la disminución de las dimensiones del transformador incrementa el voltaje del primario, y el incremento de la longitud del cable requiere el incremento de la carga con el propósito de prevenir la ferresonancia.

Las pruebas y los modelos de estudios realizados han mostrado que casi siempre un alto factor de potencia de carga resistiva (aquella en que la inductancia es debida al concadenamiento del flujo disperso) igual a un 10 % de la capacidad según los datos de placa del transformador evitará la ferresonancia, y en muchos casos la carga resistiva puede ser considerablemente menos del 10 % dependiendo de los parámetros antes mencionados. Sin embargo, el tener suficiente carga conectada al secundario, no se considera una práctica confiable para prevenir la ferresonancia en condiciones monofásicas según muchos operadores de sistemas, ya que la carga del secundario frecuentemente es desconectada durante las operaciones de maniobra.

**2.12.1c Interruptores en el Transformador.** El empleo de interruptores monopolares en las adyacencias del transformador generalmente no resulta en ferresonancia excepto cuando se energizan o desenergizan bancos de transformadores pequeños en sistemas de distribución de 25 y 35 kV.

**2.12.1d Resistencia a Tierra de la Conexión-Y en el primario.** Cuando el neutro del primario en un banco Y- $\Delta$ , está puesto a tierra a través de una resistencia, se puede evitar la ferresonancia. Esta solución potencial puede establecer restricciones contradictorias al seleccionar la resistencia, la cual debe ser suficientemente baja para evitar la ferresonancia, y aún ser suficientemente alta para impedir que el banco actúe como una fuente de corriente a tierra

a baja impedancia. Además, el diseño de instalación debe incluir barreras de protección adecuadas o advertencias para evitar el contacto humano con el punto neutro de las bobinas del primario. Con esta conexión no es recomendable poner solidamente a tierra la Y no obstante el hacerlo podría evitar la ferresonancia o minimizar su probabilidad de ocurrencia.

### **2.12.2 CONEXIÓN ATERRADA**

Como se discutió anteriormente hay solo dos conexiones con las cuales no ocurre la ferresonancia, procurando que toda la capacitancia del circuito del primario entre los dispositivos monofásicos y el transformador sea fase-tierra. Estas conexiones son la conexión  $Y_{abierta}-\Delta_{abierta}$  y la conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  hechas con transformadores monofásicos o una unidad trifásica de triple construcción. Si el circuito del primario, presenta capacitancia fase-fase o si la conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  se hace en un transformador de 4 o 5 columnas, puede ocurrir ferresonancia.

Para la mayoría de los sistemas, la probabilidad de ferresonancia debido a la presencia de capacitancia fase-fase en líneas con conductores desnudos es infinito decimal. No obstante, cuando se alimenta un transformador de 4 o 5 columnas con conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  a través de circuitos donde la capacitancia es fase a tierra, puede presentarse la ferresonancia. Afortunadamente, los sobrevoltajes resultantes no deberían provocar daños al transformador o a equipos colocados en el primario por el tiempo que estas se presentan durante las operaciones normales de los interruptores monopolares. A continuación algunas medidas para minimizar la probabilidad de sobrevoltajes y ferresonancia cuando las bobinas del primario están puestas a tierra.

**2.12.2a Interruptores y Seccionadores Trifásicos.** El uso de interruptores Y seccionadores trifásicos apropiadamente ajustados cerca de la fuente evitará la ferresonancia y los sobrevoltajes sostenidos, pero generalmente esta no es una solución aceptable desde el punto de vista económico. La medida preventiva descrita en el punto 2.12.1a, también puede usarse con la conexión  $Y_{abierta}-\Delta_{abierta}$  y la conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  si las condiciones hacen que se posible la ferresonancia.

**2.12.2b Carga en el Secundario.** Conecta suficiente carga en el secundario con la conexión  $Y_{abierta}-\Delta_{abierta}$  y la conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$  evitará sobrevoltajes. Con frecuencia una carga resistiva de un 10 % de la capacidad nominal del banco evitará sobrevoltaje, y en muchos casos la carga puede ser considerablemente menor del 10 % dependiendo del cable o la longitud del circuito, el voltaje del primario, las dimensiones del transformador, y las características de la carga.

**2.12.2c Interruptores en el Transformador.** Si los interruptores monopolares y los fusibles están situados en el transformador, y el neutro del primario está puesto a tierra, no ocurrirán sobrevoltajes ni ferresonancia con la conexión  $Y_{abierta}-\Delta_{abierta}$  o la conexión  $Y_{aterrada}-Y_{aterrada}$ .

## **2.13 DIAGNOSTICO Y EFECTOS DE LA FERRORESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

Las consecuencias que acarrea la ferresonancia son obvias. Puesto que la ferresonancia puede originar sobretensiones y esfuerzos electromecánicos superiores a los de diseños de los equipos, tanto estos como las personas que puedan encontrarse en su proximidad están expuestos a condiciones peligrosas.

Cuando la ferresonancia se presenta en un sistema de distribución se manifiesta por varios de los siguientes síntomas:

- Sobretensiones elevadas entre fases o entre fases y tierra, con picos que pueden superar en muchas veces el voltaje en condiciones normales.
- Corrientes elevadas.
- Excesivo ruido audible en el transformador.
- Calentamiento de los transformadores (en funcionamiento sin carga)
- Deterioro y destrucción del aislamiento de transformadores de potencia.
- Formas de onda de voltaje y corriente extremadamente irregulares y dentadas.
- Disparo intespectivo de las protecciones.
- Deterioro y destrucción del aislamiento de los conductores.
- Destrucción de condensadores, transformadores de tensión (TT), por efectos térmicos o por roturas dieléctricas. Un síntoma característico de la destrucción de los (TT) por ferresonancia es que el arrollado primario se encuentra destruido y el secundario intacto.

Además de producir sobretensiones, la ferresonancia puede producir inversión de las fases, lo cual origina serias consecuencias sobre todo donde existen motores.

También es digno de consideración el tiempo de interrupción del servicio y los costos implicados a las reparaciones a fin de restablecer el servicio a sus condiciones normales de operación.

Aunque todos los equipos sometidos a sobretensiones y esfuerzos electromecánicos, originados por la ferresonancia están expuestos al deterioro, los más vulnerables son los descargadores de sobretensiones (pararrayos) y los transformadores.

Ante la dificultad del diagnóstico (falta de datos, hay varias posibles interpretaciones de los síntomas); la primera actuación: es analizar la configuración de la red cuando se presenten los síntomas, así como los acontecimientos que los preceden (conexión de transformadores, momento concreto de desarrollo de los procesos industriales, pérdida de carga,...) y que han podido iniciar el fenómeno.

Por lo tanto es necesario determinar si se reúnen las tres condiciones necesarias, pero no suficientes, para la existencia de la ferresonancia:

- Conexión simultánea de condensadores (cables monopolares apantallados) y bobinas de inductancia no lineal (transformadores con núcleo ferromagnético).
- Existencia dentro de la red de al menos un punto cuyo potencial no es fijo (neutro aislado, fusión de un fusible, maniobra unipolar, entre otros).
- Componentes de la red poco cargados (transformadores de potencia o TT en vacío...) o fuentes de pequeña potencia de cortocircuito (alternadores).

Si no se verifica alguna de estas condiciones, la ferresonancia es muy poco probable. En caso contrario se necesitarán estudios más exhaustivos.

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLOGICO**

El presente capítulo contempla los aspectos metodológicos que se utilizaron para la elaboración de esta investigación.

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACION.**

Según los objetivos que se persiguen en la investigación, por las características del estudio permiten que éste sea ubicado dentro de una investigación exploratoria-explicativa, a lo que Carlos Sabino (1992) en su libro “El Procedimiento de la Investigación” [18], plantea lo siguiente:

*“Las investigaciones exploratorias son las que pretenden darnos una visión general, aproximada, respecto a un determinado objeto de estudio. Este tipo de investigación se realiza especialmente cuando el tema elegido ha sido poco explorado y reconocido, y cuando aún, sobre él, es difícil formular hipótesis precisas o de cierta generalidad. Suele surgir cuando aparece un nuevo fenómeno que, precisamente por su novedad, no admite todavía una descripción sistemática, o cuando los recursos de que dispone el investigador resulta insuficiente como para emprender un trabajo más profundo”.*

En cuanto a las investigaciones explicativas, Carlos Sabino (1992) la define como:

*“Aquellos trabajos donde nuestra preocupación primordial se centra en determinar los orígenes o las causa de un determinado conjunto de fenómenos. Su objetivo, por lo tanto, es conocer por qué suceden ciertos hechos, analizando las relaciones causales existentes o, al menos, las condiciones en que ellos se producen. Este es el tipo de investigación que mas profundiza nuestro conocimiento de la realidad porque nos explica la razón, el por qué de las cosas, y es por lo tanto más compleja y delicado, pues el riesgo de cometer errores aumenta aquí considerablemente”.*

En base a lo descrito anteriormente, se obtuvo una visión general de los fenómenos que se pudieran presentar en los Sistemas de Distribución debido a la ferresonancia, así como el comportamiento de las corrientes y tensiones de dicho sistema. Mediante el análisis de las condiciones que genera este fenómeno se pretendió inferir los efectos que pudieran resultar peligrosos para los diferentes equipos que se encuentren conectados al sistema eléctrico y así poder establecer las posibles acciones correctivas.

### **3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

Según Carlos Sabino (1992) en su publicación “El Proceso de la investigación” define:

*“El Diseño de la investigación es la herramienta con la cual se pretende proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar hechos con teorías, y su forma es la de una estrategia o plan general que determina las operaciones necesarias para hacerlo, es decir si el conocimiento es un proceso intrínsecamente teórico practico, donde las ideas e hipótesis deben ser conformadas*

*permanentemente con los hechos empírico para poder definir o negarla, se comprenderán entonces la importancia de trazar un modelo conceptual y operativo que nos permita efectuar tal cometido. Resulta claro, entonces el sentido de lo que hemos denominado momento metodológico de la investigación: en el mismo no se trata ya de definir qué vamos a investigar, sino cómo lo vamos a hacer”.*

Por otra parte Hernández Sampieri (2002) en su libro “Metodología de la Investigación” [8], explica el diseño de la investigación como:

*“El diseño señala al investigador lo que debe hacer para alcanzar los objetivos de estudio, contestar las interrogantes que se ha planteado y analizar la certeza de las hipótesis formuladas en un contexto particular.”*

En otras palabras, es la estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado. Así, se puede obtener una investigación documental, de campo o experimental. En este sentido, se explicará la forma en que se realizará la investigación.

De acuerdo a los datos a emplear en esta investigación, el diseño de la investigación es de tipo bibliográfico, ya que se permite el estudio del problema a fin de profundizar el conocimiento de su naturaleza, apoyado principalmente en fuentes bibliográficas y documentales.

La etapa inicial consistió en conocer y explorar todo el conjunto de fuentes que pudieran resultar de utilidad, recabando información de libros técnicos, artículos científicos, consulta electrónica (internet) y revistas especializadas. De todo el material recopilado se extrajo la información más resaltante referente al tema citado.

La revisión de la documentación permitió, elaborar un diagnóstico que abordara la problemática, tratando de responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué es la ferresonancia?
- ¿Cuáles son las características de la ferresonancia?
- ¿Cómo se origina la ferresonancia en los Sistema de Media Tensión?
- ¿Cómo saber si un sistema está presentando problemas por ferresonancia?
- ¿Cuáles son los efectos de la ferresonancia en los Sistemas de Distribución en Media Tensión?
- ¿Cómo se puede evitar o mitigar la ferresonancia?

### **3.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

Según Carlos Sabino (1992) define como instrumento de recolección de datos:

*“Un instrumento de recolección de datos es, en principio, cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información, dentro de cada instrumento concreto puede distinguirse dos aspectos diferentes: forma y contenido. La forma del instrumento se refiere al tipo de aproximación que establecemos como lo empírico, a las técnicas que utilizamos para esta tarea. En cuanto al contenido éste queda expresado en las especificaciones de los datos que necesitamos conseguir, se concreta, por lo tanto una serie de ítems que no son otra cosa que los mismo indicadores que permiten medir las variables, pero*

*que asumen ahora la forma de preguntas, puntos a observar, elementos a registrar, etc.”*

A continuación se indican las herramientas empleadas para la recolección de la información, considerando las particularidades y límites de cada una de éstas, atendiendo a las interrogantes y características planteadas en la investigación, que en su conjunto permitieron recopilar y obtener los datos buscados.

#### **a. Información bibliográfica.**

Se realizó un estudio exploratorio de tipo documental, donde el propósito fue hacer una revisión de las fuentes de información, tales como: revisión de textos especializados, estándares internacionales, artículos de congresos, consulta electrónica, etc., relacionada al tema de investigación que plantea sugerencias para dar solución a la problemática del presente trabajo.

Para el análisis profundo de la consulta bibliográfica, se utilizaron las técnicas de observación documental, presentación resumida, resumen analítico y análisis crítico. A partir de allí se consideró éste como punto de partida en el análisis de las fuentes de información, mediante una lectura general de los textos, se inició la búsqueda y observación de los hechos presentes en los materiales escritos consultados que eran de interés para esta investigación. A esta lectura inicial, les siguieron otras más detenidas y rigurosas de los textos, a fin de captar planteamientos esenciales y aspecto lógicos de contenido y propuesta, a fin de extraer los datos bibliográficos útiles para el estudio a realizar.

La aplicación de la técnica de presentación resumida de un texto, permitió dar cuenta, de manera fiel y en síntesis, de las ideas básicas que contenían las obras consultadas.

La técnica de resumen analítico, se incorporó para descubrir la estructura de los textos consultados, y delimitar sus contenidos básicos en función de los datos que se precisaron conocer.

La técnica del análisis crítico de un texto, contiene las dos anteriores, introduce su evaluación interna, centrada en el desarrollo lógico y la solidez de las ideas seguidas por el autor del mismo.

De manera tal, que dada la importancia de las técnicas anteriormente descritas, se emplearon muy especialmente, en todo lo relativo al desarrollo del marco teórico de la investigación.

## **b. Entrevistas.**

Carlos Sabino (1992) define la entrevista como:

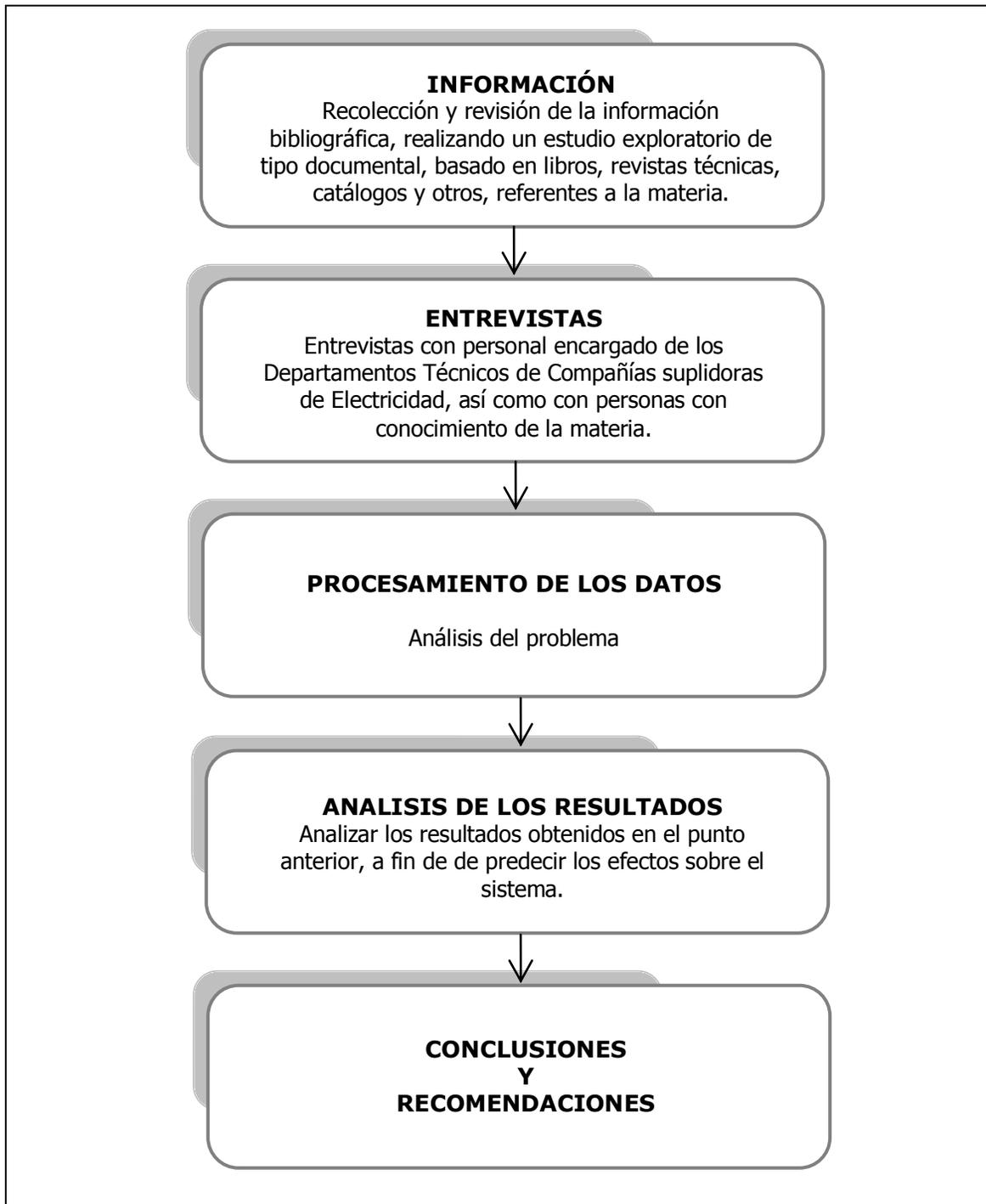
*“Una forma específica de interacción social que tiene por objeto recolectar datos para una indagación. El investigador formula preguntas a las personas capaces de aportarle datos de interés, estableciendo un diálogo peculiar, asimétrico, donde una de las partes busca recoger informaciones y la otra es la fuente de esas informaciones”.*

La entrevista se considera como un proceso de comunicación verbal recíprocas, con el fin de recoger información a partir de una finalidad previamente establecida, esta técnica, dentro de la presente investigación, asumió diversas características, al principio pensado en la exploración

de la misma, la cual fue planteada a través de preguntas abiertas, con un orden preciso y lógico; introduciendo un plan flexible previamente preparado en relación a las cuestiones de interés en el estudio, y de cumplir con los objetivos del diagnóstico. A partir de la entrevista de preguntas abiertas, y a través de diálogo abierto, espontáneo y confidencial, se produjo una interacción personal, entre los sujetos investigados y los investigadores en relación al problema estudiado que permitió la obtención de información relevante, lo que condujo a tener una visión más clara de la problemática.

Se realizaron entrevistas a personal especializado en el área, en las Empresas suministradoras de energía, tales como la Compañía Electricidad de Valencia ELEVAL y CADAPE, en la empresa Iconel, empresa filial de la transnacional Phelps and Dodge Cable, y en la empresa Elecon Electroconductores, C.A., Del mismo modo se realizaron entrevistas a varias personalidades con experiencia en el tema en las diferentes Universidades del País entre ellas: La universidad de Carabobo, La Universidad Central de Venezuela y la Universidad Simón Bolívar.

## ESQUEMA DE METODOLOGIA DE INVESTIGACION



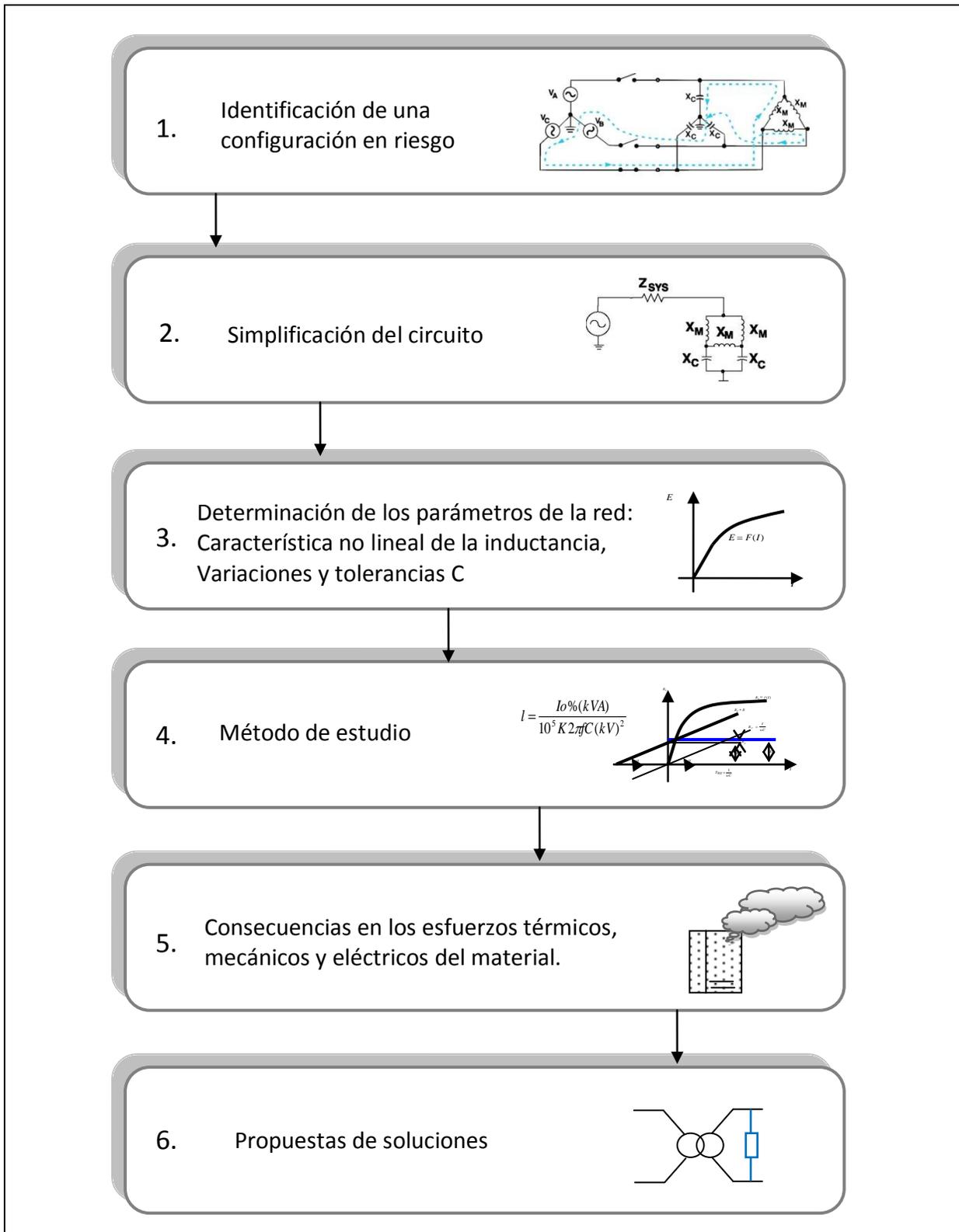
**FIGURA 3.1.** Esquema simplificado del procedimiento empleado para la investigación

### **3.4 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

El procesamiento de los datos dio lugar a el desarrollo de una metodología, para el análisis de un sistema de distribución con una configuración propensa a presentar fenómenos por ferresonancia, con la finalidad de estudiar las variables involucradas en el origen de dicho fenómeno, y así poder obtener una estimación de las sobretensiones que pudieran producirse bajo ciertas condiciones, permitiendo deducir los daños que puede ocasionar este fenómeno a los componentes de dicho sistema, y de esta manera poder tomar las medidas y recomendaciones para evitar o mitigar la ferresonancia.

### **3.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

En la presente investigación el análisis de los resultados tiene como finalidad inquirir los riesgos a los que se pueden ver sometidos los sistemas de distribución, cuando son susceptibles a la existencia de ferresonancia, y así de esta manera establecer las posibles medidas que pudieran implementarse, para evitar o atenuar las consecuencias que pudiera acarrear la aparición de este fenómeno.



**FIGURA 3.2. Esquema simplificado de procesamiento de datos.**

## **CAPITULO IV**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **4.1 INTERRUPCIÓN DE CIRCUITOS E INICIACIÓN DEL CIRCUITO FERRORESONANTE. (Análisis Lineal)**

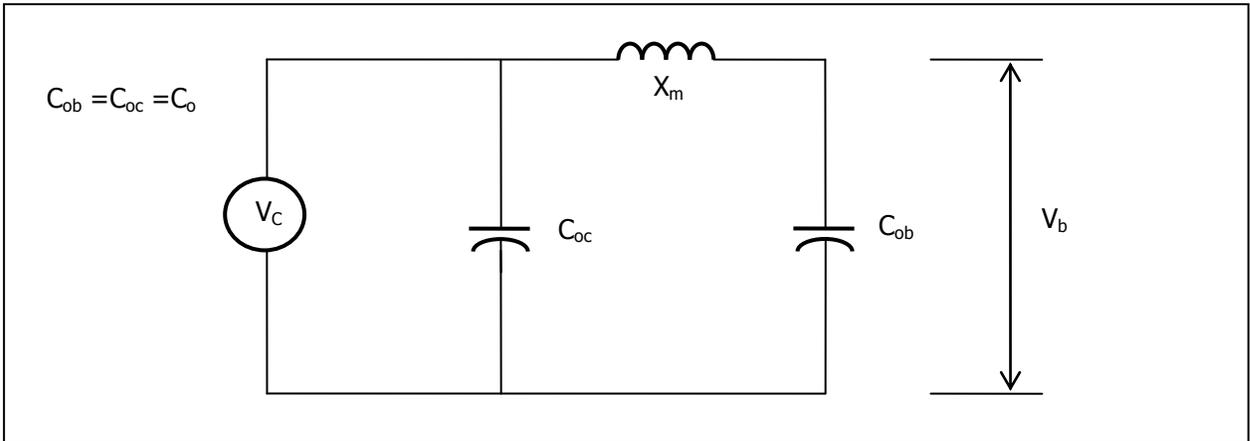
A continuación se estudiará la forma en la cual los parámetros de la red; como consecuencia de la apertura de uno o dos conductores, bien sea por rotura de puentes de línea, operación de fusibles o en el caso poco común de la caída mecánica del conductor, entre otras, se combinan para dar lugar a circuitos ferrosesonantes.

Debido a que los transformadores están involucrados en el circuito resonante, la no linealidad está presente (debido a la impedancia magnetizante del transformador), por lo cual, el estudio del problema a través de métodos matemáticos, es extremadamente tedioso y poco práctico.

Al pasar de los años se ha desarrollado cuantiosos modelos de estudios, en los cuales, se han estudiado diversas configuraciones circuitales y sus variaciones, sin embargo, el fenómeno básico y el significado de los parámetros pueden obtenerse del análisis simplificado de circuitos lineales. Para los casos que se presentan seguidamente, el sistema del primario de distribución se considera conectado en la subestación a transformadores con conexión en delta-estrella aterrada, de manera que la impedancia del sistema se desprecia.

En los casos que se presentan a continuación el sistema primario de distribución se considerará conectado a la subestación.





**Figura 4.3. Transformador monofásico. Circuito simplificado**

Las reactancias del transformador de la subestación se desprecian ya que no influyen en el circuito externo. Haciendo un divisor de tensión en el circuito de la figura 4.3, se obtiene:

$$V_b = V_c \frac{-X_{co}}{X_m - X_{co}} = V_c \frac{X_{co}/X_m}{X_{co}/X_m - 1} \Rightarrow \frac{V_b}{V_c} = \frac{X_{co}/X_m}{X_{co}/X_m - 1} \quad (4.1)$$

Como se verá más adelante, sustituyendo valores de  $X_b/X_c$ , en la ecuación (4.1) se obtiene:

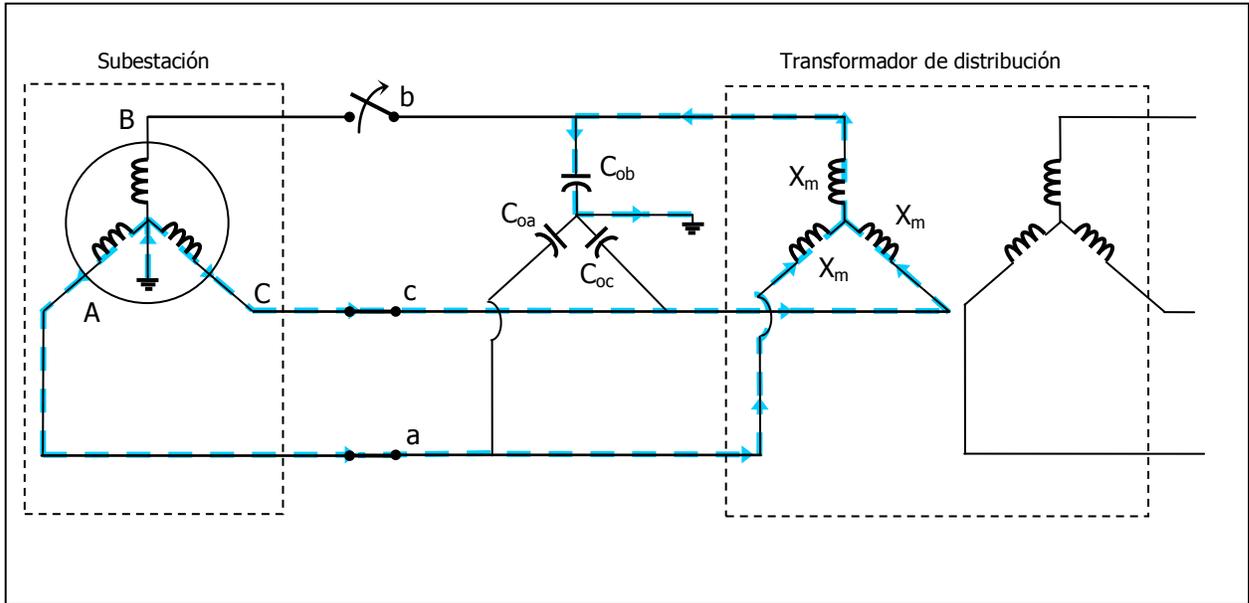
$$\frac{V_b}{V_c} = 125 \% \longrightarrow \frac{X_{co}}{X_m} = 5$$

$$\frac{V_b}{V_c} = 111 \% \longrightarrow \frac{X_{co}}{X_m} = 10$$

$$\frac{V_b}{V_c} = 103 \% \longrightarrow \frac{X_{co}}{X_m} = 30$$

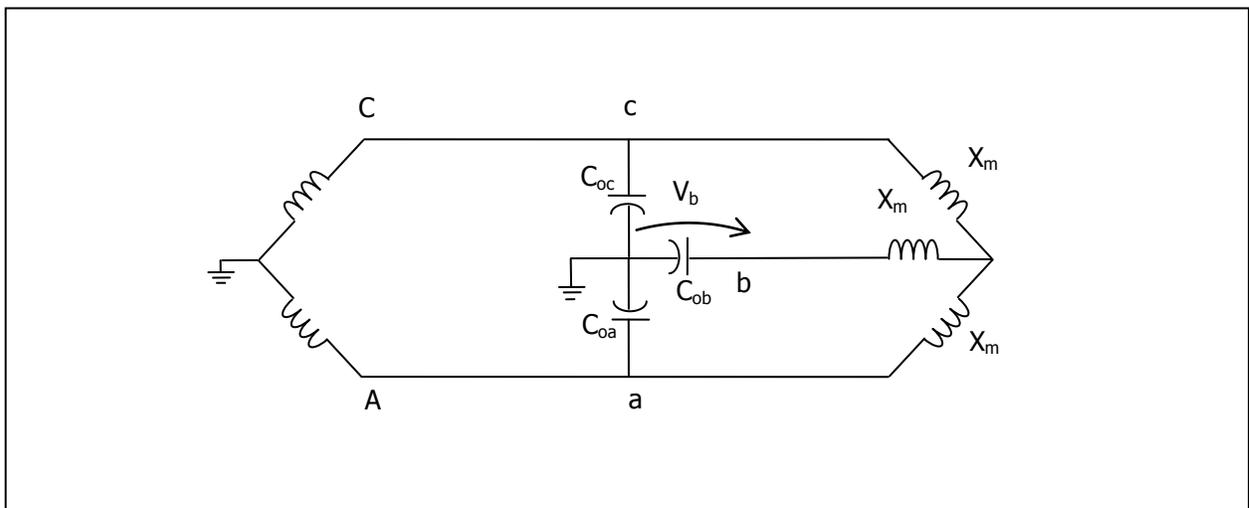
Lo que significa que para  $X_{co}/X_m$  igual a 5, 10 y 30 se producen sobretensiones de 25,11, y 3% respectivamente por encima de la tensión nominal.

### 4.1.1b Conexión Estrella-Estrella.



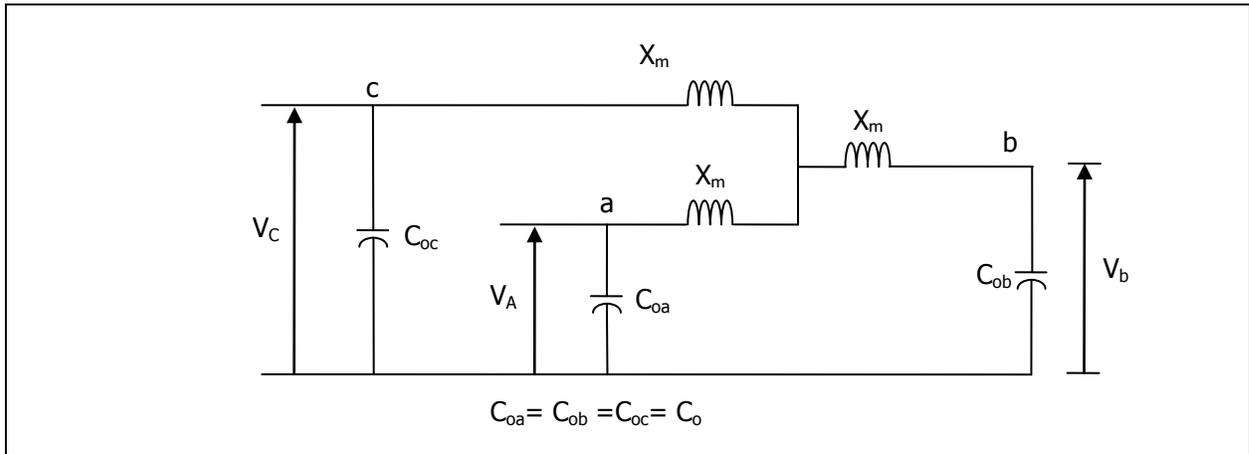
**Figura 4.4. Transformador con conexión estrella-estrella. Apertura de un conductor.**

El Circuito puede simplificarse de la siguiente manera:



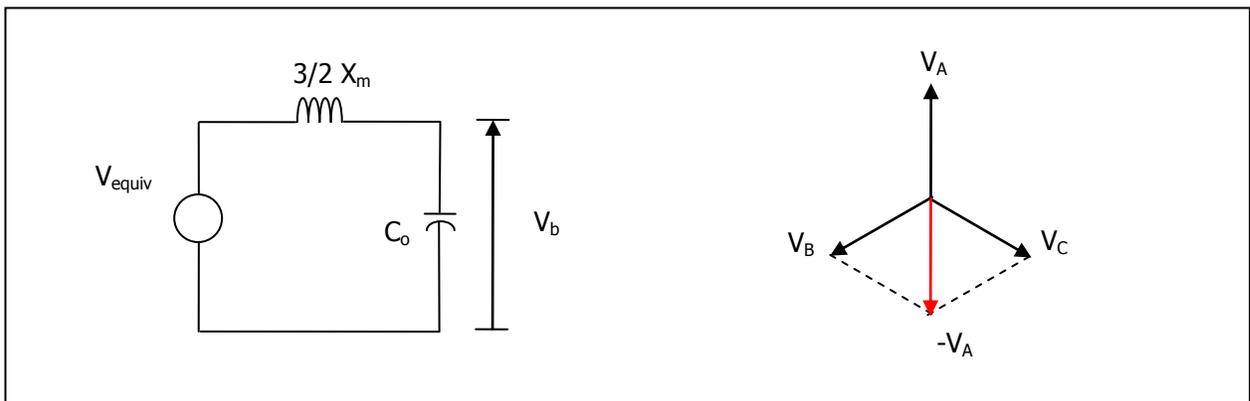
**Figura 4.5. Transformador con conexión estrella-estrella. Simplificación del circuito.**

Considerando “b” el punto de interés, y los puntos “a” y “c” son barras infinitas se obtiene el circuito siguiente:



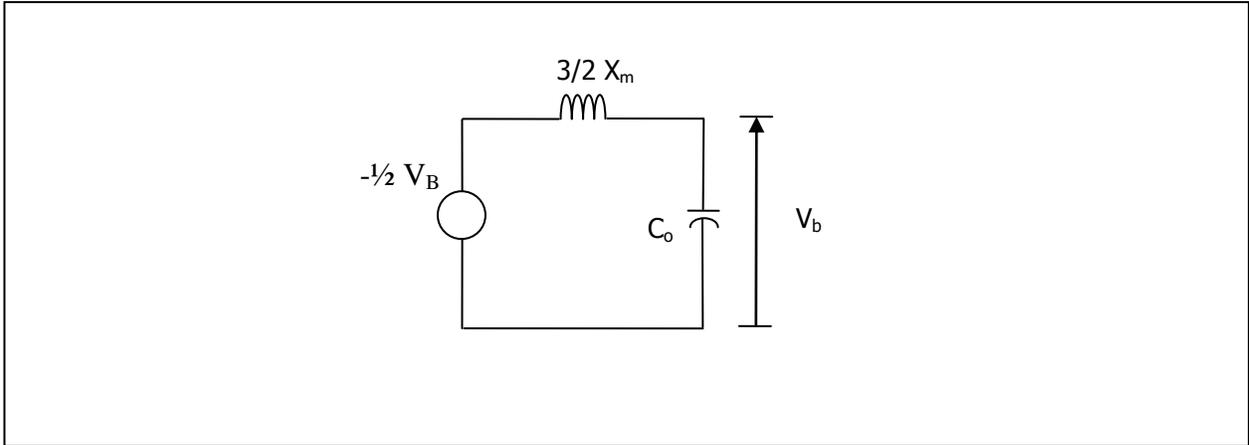
**Figura 4.6. Transformador con conexión estrella-estrella. Simplificación del circuito.**

Utilizando el circuito equivalente de Thevenin en el punto b, se obtiene:



**Figura 4.7. Transformador con conexión estrella-estrella. Circuito equivalente.**

Donde la tensión equivalente se obtiene por el método de superposición  $V_{equiv} = \frac{1}{2} (V_C + V_A)$  y del diagrama fasorial se tiene que  $(V_C + V_A) = -V_B$



**Figura 4.8. Transformador con conexión estrella-estrella. Circuito simplificado.**

Haciendo un divisor de tensión en el circuito de la figura 4.8, se obtiene:

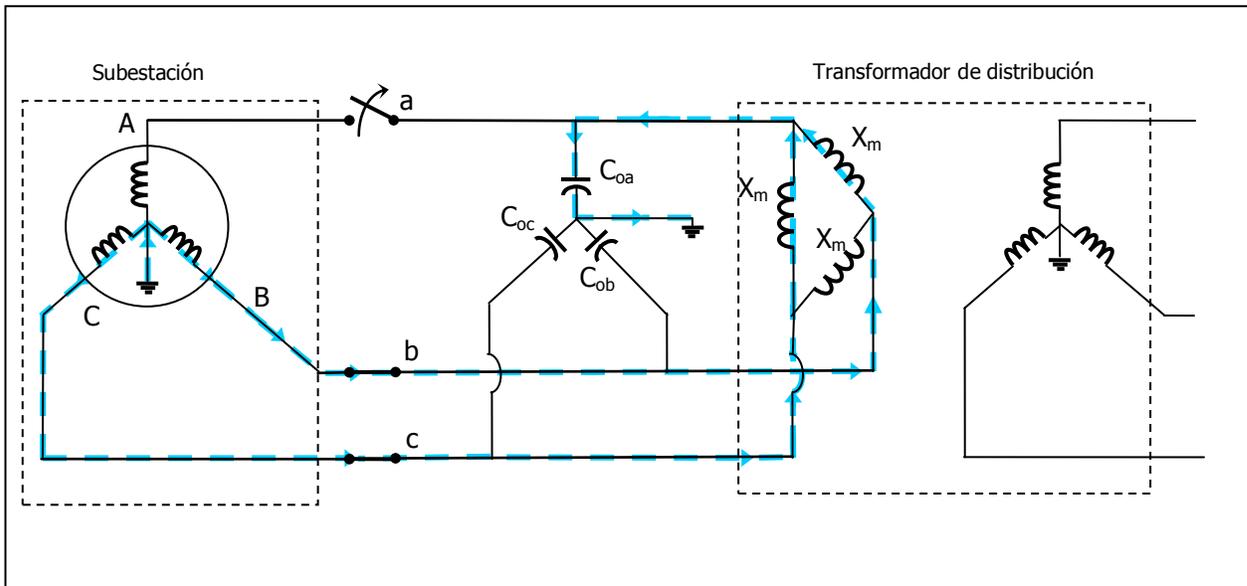
$$V_b = -\frac{1}{2} V_B \left( \frac{-X_{co}}{\frac{3}{2} X_m - X_{co}} \right) = V_B \left( \frac{X_{co} / X_m}{3 - 2 \frac{X_{co}}{X_m}} \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{V_b}{V_B} = \left( \frac{X_{co} / X_m}{3 - 2 \frac{X_{co}}{X_m}} \right)$$

Cuando  $\frac{X_{co}}{X_m} \rightarrow \frac{3}{2}$   $V_b \rightarrow \infty$

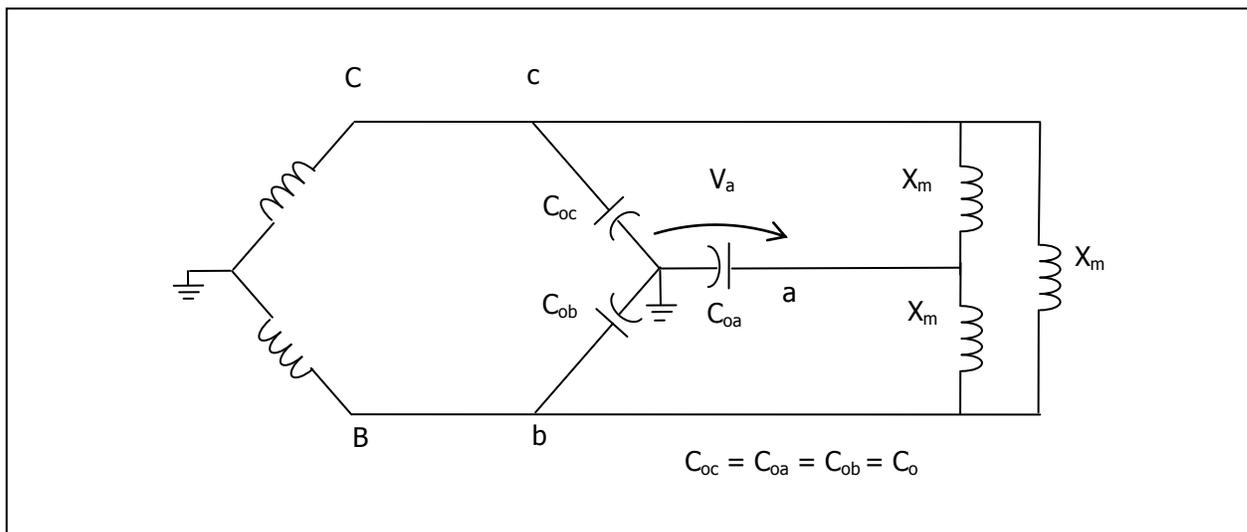
Nótese que para valores de  $\frac{X_{co}}{X_m}$  mayores a  $3/2$  se invierte la fase dando valores negativos de la tensión  $V_b$ . Como en los casos anteriores sustituyendo valores de  $V_b/V_B$  se despeja  $X_{co}/X_m$  en función de la sobretensión máxima permitida.

#### 4.1.1c Conexión Delta-Estrella.



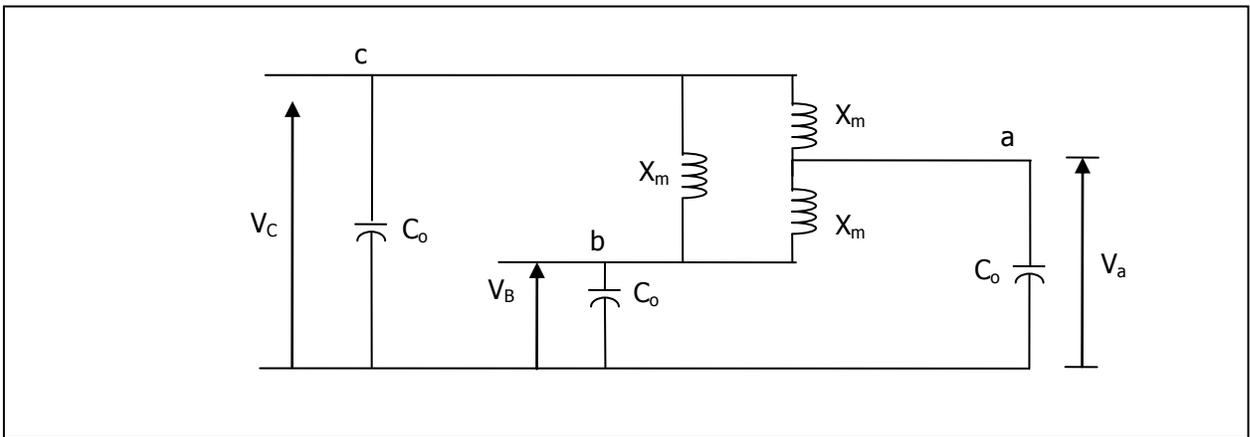
**Figura 4.9. Transformador con conexión delta-estrella, apertura de 1 conductor.**

El Circuito puede simplificarse de la siguiente manera:



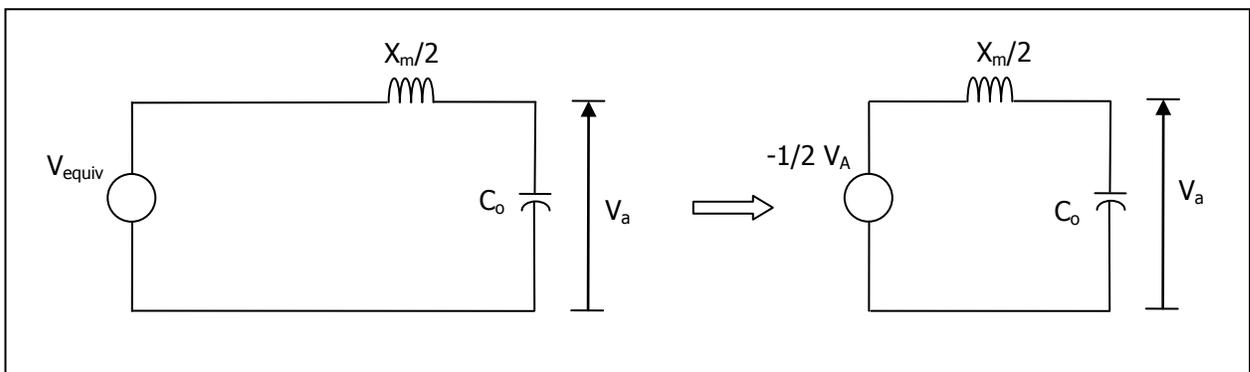
**Figura 4.10. Transformador con conexión delta-estrella. Simplificación del circuito.**

Considerando “a” el punto de interés, y los puntos “b” y “c” son barras infinitas se obtiene el siguiente circuito:



**Figura 4.11. Transformador con conexión delta-estrella. Circuito simplificado.**

Utilizando el circuito equivalente de Thevenin en el punto a:



**Figura 4.12. Transformador con conexión delta-estrella. Circuito equivalente.**

Nótese que este circuito equivalente también se puede obtener a partir de los circuitos simplificados de las configuraciones más comunes en riesgo de presentar ferresonancia, estudiadas en el capítulo II, despreciando las impedancias del sistema.

Donde la tensión equivalente se obtiene por el método de superposición, y del diagrama fasorial:

$$V_{equiv} = \frac{1}{2} V_B + V_C = -\frac{1}{2} V_A$$

Haciendo un divisor de tensión en el circuito de la figura 4.12, se obtiene:

$$V_a = -\frac{1}{2} V_A \left( \frac{-X_{co}}{\frac{1}{2} X_m - X_{co}} \right) = V_A \left( \frac{X_{co} / X_m}{1 - 2 \frac{X_{co}}{X_m}} \right) \quad (4.4)$$

Cuando  $\frac{X_{co}}{X_m} \rightarrow \frac{1}{2} \quad V_a \rightarrow \infty$

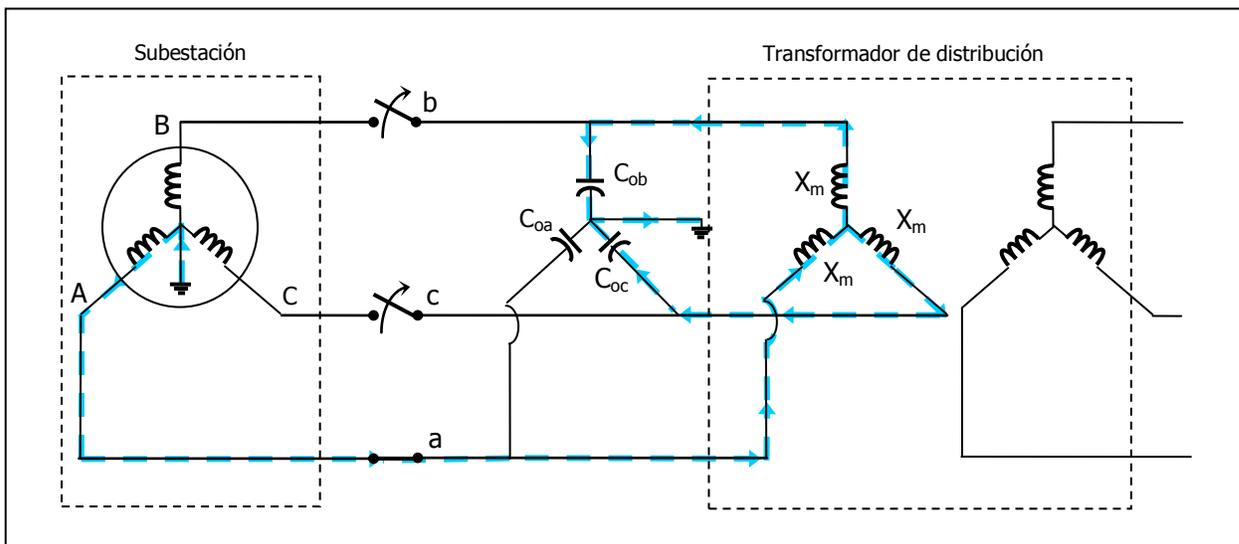
$$\frac{X_{co}}{X_m} = 5/6 = 0.8333 \quad \longrightarrow \quad \frac{V_a}{V_T} = -125 \%$$

Nótese que para valores de  $\frac{X_{co}}{X_m}$  mayores a 1/2 se invierte la fase dando valores negativos de la tensión  $V_a$

#### 4.1.2 Apertura de dos Conductores.

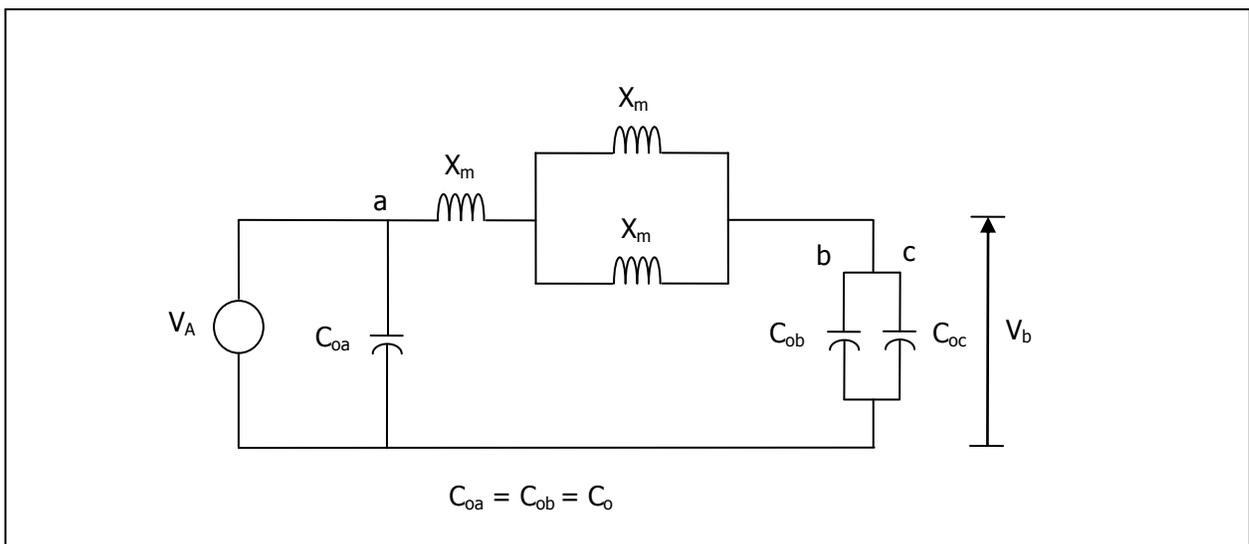
A continuación se supone que el circuito ferresonante aparece debido a la apertura de las fases B y C.

#### 4.1.2a Conexión Estrella-Estrella.



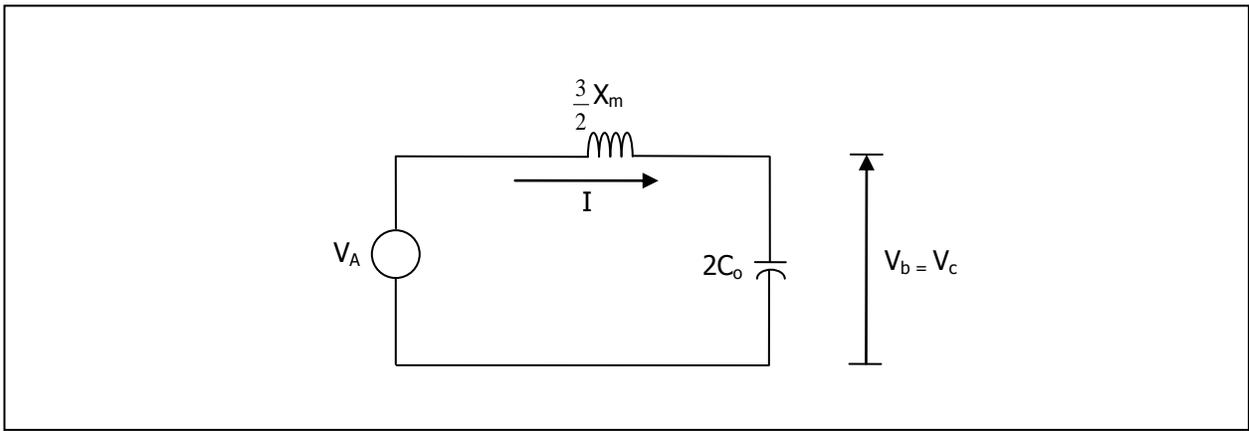
**Figura 4.13. Transformador con conexión estrella-estrella. Apertura de dos conductores.**

El circuito puede ser simplificado de la siguiente manera:



**Figura 4.14. Transformador con conexión estrella-estrella. Simplificación del circuito.**

Utilizando el circuito equivalente de Thevenin en el punto b:



**Figura 4.15. Transformador con conexión estrella-estrella. Circuito simplificado.**

Haciendo un divisor de tensión en el circuito de la figura 4.15 se obtiene:

$$V_b = V_c = V_A \left( \frac{-X_{co}/2}{\frac{3}{2}X_m - \frac{X_{co}}{2}} \right) = V_A \left( \frac{X_{co}/X_m}{X_{co}/X_m - 3} \right) \quad (4.3)$$

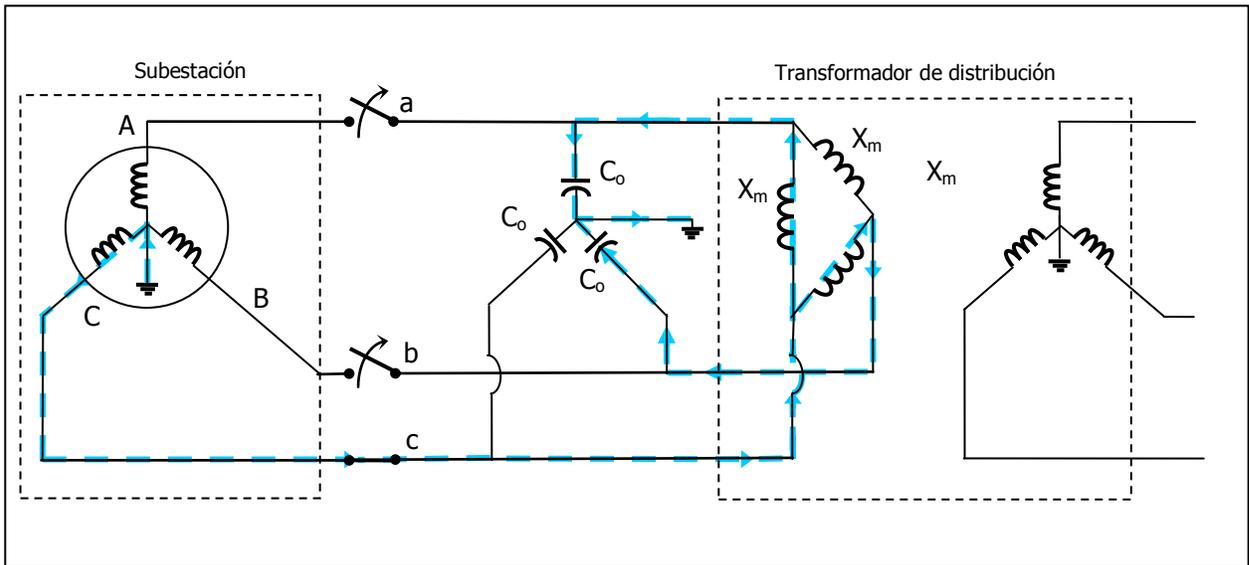
Nótese que para:

$$\begin{aligned} \frac{X_{co}}{X_m} &\rightarrow 3 & V_b &\rightarrow \infty \\ \frac{X_{co}}{X_m} = 15 &\longrightarrow & \frac{V_b}{V_A} = \frac{V_c}{V_A} &= 125 \% \end{aligned}$$

$$\frac{X_{co}}{X_m} = 30 \longrightarrow \frac{V_b}{V_A} = \frac{V_c}{V_A} = 111\%$$

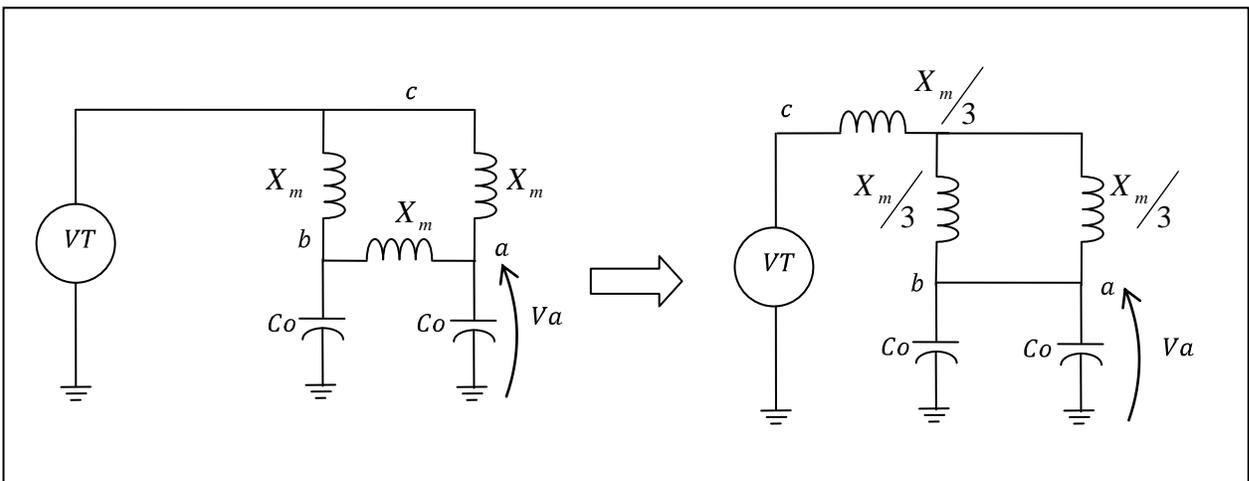
$$\frac{X_{co}}{X_m} = 40 \longrightarrow \frac{V_b}{V_A} = \frac{V_c}{V_A} = 108\%$$

**4.1.2b Conexión Delta-Estrella.**



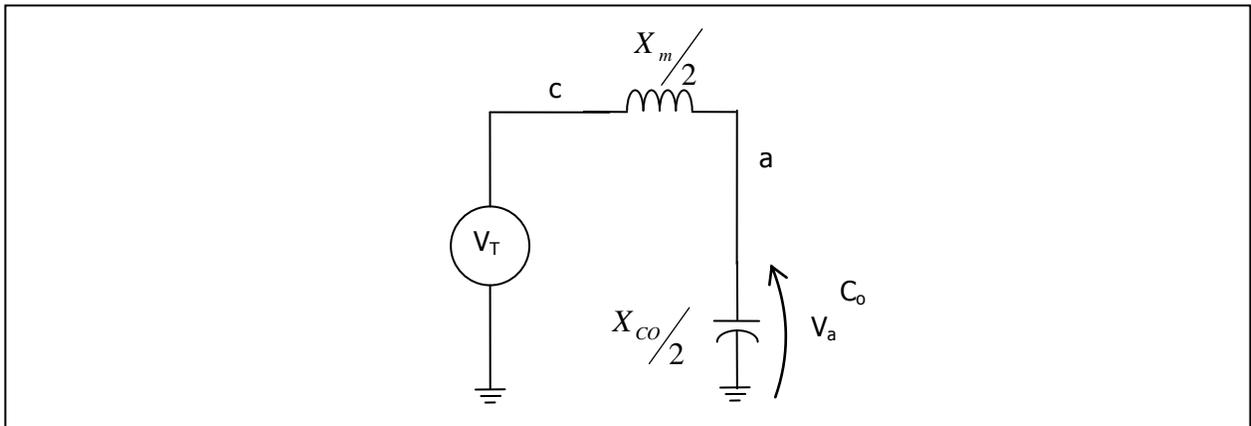
**Figura 4.16. Transformador con conexión delta-estrella, apertura de 2 conductores.**

El circuito puede simplificarse de la figura 2.38 considerando “a” el punto de interés, y el punto “c” una barra infinita, despreciando  $Z_{SYS}$ :



**Figura 4.17. Transformador con conexión delta-estrella. Simplificación del circuito.**

Utilizando el circuito equivalente de Thevenin en el punto “a” y simplificando se obtiene:



**Figura 4.18. Transformador delta-estrella. Apertura de 2 fases. Circuito simplificado.**

Haciendo un divisor de tensión en el circuito de la figura 4.18, se obtiene:

$$V_a = V_T \left( \frac{-X_{co}/2}{X_m/2 - X_{co}/2} \right) = V_T \left( \frac{X_{co}/X_m}{X_{co}/X_m - 1} \right) \quad (4.5)$$

Cuando  $\frac{X_{co}}{X_m} \rightarrow 1$   $V_a \rightarrow \infty$

$$\frac{X_{co}}{X_m} = 5 \quad \longrightarrow \quad \frac{V_b}{V_T} = \frac{V_a}{V_T} = 125 \%$$

El peligro de la ferresonancia se puede contrarrestar si se tiene presente su probabilidad de aparición, entendiendo las causas que la hacen posible, una práctica muy útil es la de saber si los parámetros involucrados en los circuitos; la capacitancia a tierra de los conductores, la reactancia magnetizante del transformador, la tensión de operación, están dentro de los límites permisibles.

Debido a que la capacitancia es un parámetro distribuido, es decir, depende de la longitud del circuito, se puede conocer las longitudes permisibles de circuitos para diferentes valores de tensión de operación y capacidades de transformadores.

Como se expuso en el capítulo II, sección 2.6, por medio de la ecuaciones 2.19, 2.20, 2.21, 2.22, allí presentadas se puede obtener un cálculo aproximado de las longitudes permisibles que dependerán del valor  $K = \frac{X_{co}}{X_m}$ . Es importante destacar que estas longitudes críticas se calculan en función del nivel de sobretensión máxima que se puede permitir en el circuito como se pudo observar anteriormente en el punto 4.1.

## **4.2 ANÁLISIS DE UN CIRCUITO SUSCEPTIBLE A FERRORESONANCIA. MÉTODO GRAFICO. (CASO PRÁCTICO).**

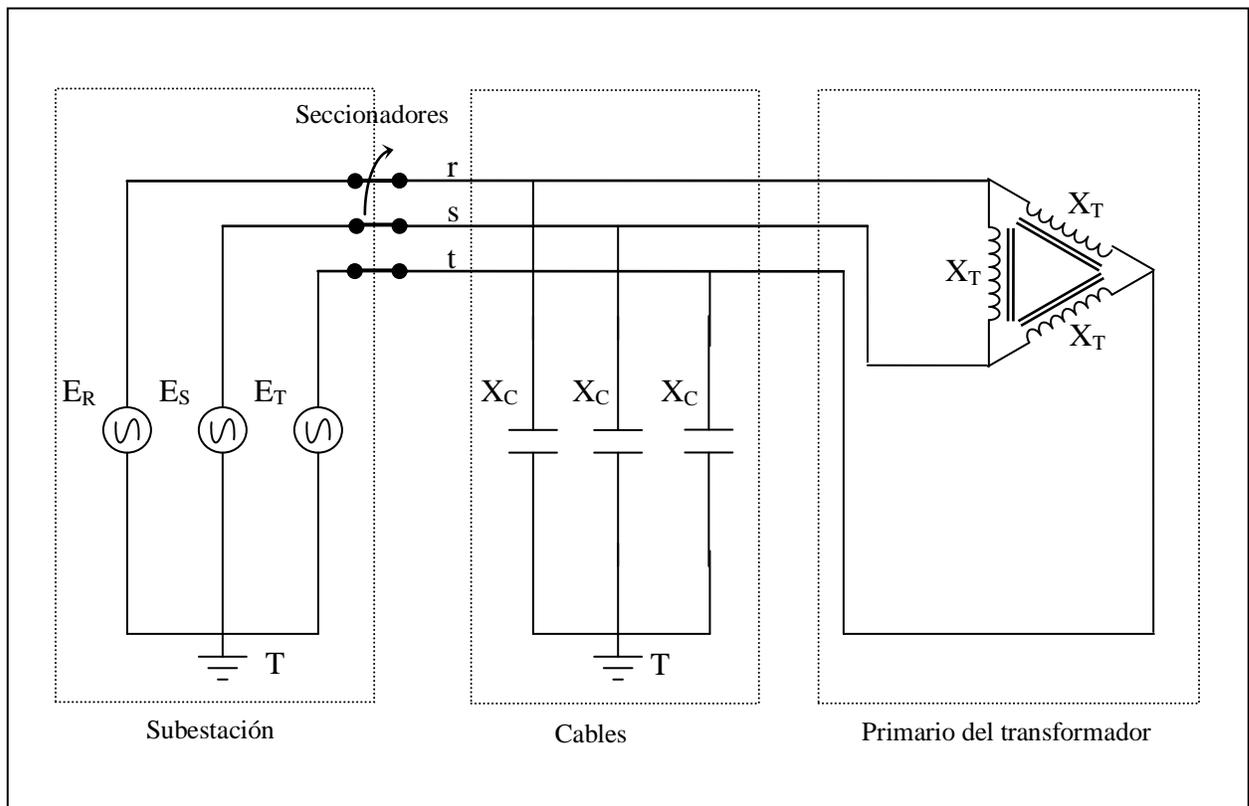
### **Caso en estudio:**

Línea trifásica subterránea 13.8 kV, con transformador en delta estrella aterrado con las siguientes características:

- ✓ Transformadores trifásico de 500 kVA, 13.800/120v,  $I_0=0,5\%$ , conectados en  $\Delta Y$ .
- ✓ Transformador sin carga apreciable durante las noches.
- ✓ Cable monopolar # 2/0 AWG por fase, aislamiento EPR 133% neutro aislado.
- ✓ Bancada tipo A.
- ✓ Longitud de la bancada 800 metros.

✓ Fusibles.

En la figura 4.19 aparece esquematizado el sistema en estudio. Con  $X_C$  se indica la reactancia capacitiva por fase respecto a tierra debida a los cables, en otros estudios se pudiera incluir la reactancia de un banco de condensadores para mejorar el factor de potencia del sistema.  $X_T$  es el valor de la reactancia inductiva de cada fase del transformador en vacío. Cabe destacar que un circuito de estas características es más susceptible a ferresonancia si se abre una fase en vez de dos.



**Figura 4.19. Red en estudio.**

Para indagar si en el sistema en cuestión se puede presentar ferresonancia, deben cumplirse las condiciones básicas:

- 1) Conexión simultanea entre condensadores ( $X_c$ ) e inductancia no lineal ( $X_m$ )
- 2) La red es de neutro aislado (transformador en  $\Delta$ ), y se abre una fase del lado de la subestación.
- 3) Transformador en Vacío.

El sistema presenta las condiciones necesarias para que entre en ferresonancia, ahora bien basado en un análisis gráfico puede determinarse si el sistema en cuestión es ferresonante o no.

Como se estudió en el capítulo II, la ecuación  $E_L = E + E_C$  corresponde a una recta con pendiente  $\frac{1}{\omega C}$  que corta el eje Y en el punto E. Como la relación entre el voltaje y la corriente del transformador está dada igualmente por la curva de magnetización, entonces el punto de operación corresponderá a su intersección con la recta anterior.

Como primer paso, el método gráfico consiste en graficar las dos curvas:

1.  $E_L = E + E_C$  representa la ecuación malla del circuito simplificado en estudio.
2.  $E_L = f(I)$  representa la curva de magnetización del transformador.

Es importante destacar que para este estudio es necesario contar con la curva de magnetización del transformador, la cual es muy difícil de obtener.

Para el cálculo de  $X_C$  se utiliza la ecuación 2.20:

$$X_{co} = \frac{1}{2\pi f C l}$$

Donde C se obtiene de la ecuación 2.35:

$$C = \frac{k10^{-9}}{18G} = 2.306 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

Con:

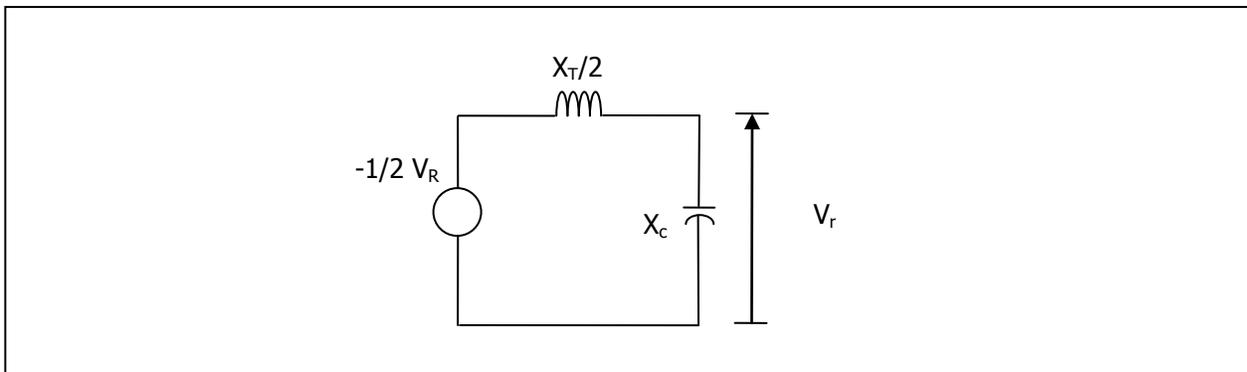
$G = 0,782510861$  Dato del fabricante del cable

$K = 2,5$  Dato del fabricante del cable

Se obtiene:  $\therefore X_c = \frac{1}{2\pi f C l} = 14386.94 \ \Omega$

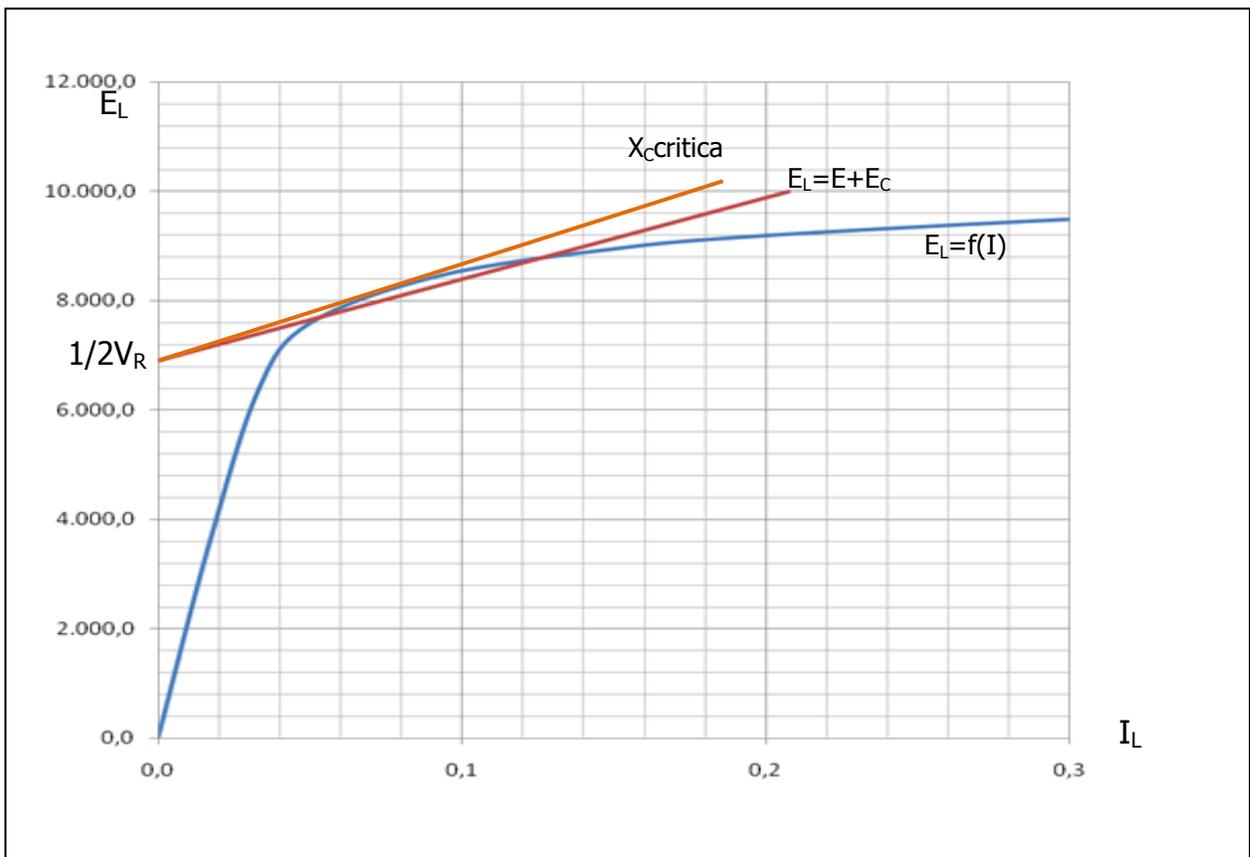
que será el valor de la pendiente de la recta  $E_L = E + E_C$

El circuito equivalente para el caso en estudio es el de la figura 4.20



**Figura 4.20. Red en estudio. Circuito Simplificado.**

Como se expuso en el capítulo II, se debe trazar una curva  $E_L = f(I)$  con ordenadas multiplicadas por  $1/2$  de las correspondientes a la curva de magnetización de cada fase del transformador, y a partir del punto  $1/2 E_R$  sobre el eje de las ordenadas se debe trazar la recta con pendiente  $X_C$ , lo que se deduce del circuito simplificado de la figura 4.20, y se puede observar en la figura 4.21.



**Figura 4.21. Representación Gráfica del circuito en estudio.**

En la figura 4.21 se puede observar la característica  $E_L = f(I)$  para el transformador en estudio, la cual se obtuvo aproximando a una curva de excitación típica para este tipo de

transformador (ver anexo B). De igual forma se puede ver la recta  $E_L=E+E_C$  de pendiente  $X_C$  que representa la reactancia capacitiva del cable, esta pendiente es menor que la pendiente  $X_{Ccritica}$  obtenida de trazar otra recta desde  $1/2V_R$  hasta un punto tangente a la curva de excitación.

Entonces tenemos que:

$$X_C \leq X_{Ccritica} \implies \text{El sistema es ferresonante.}$$

Cabe destacar que este valor de pendiente crítica no debería ser un punto de partida para diseñar nuevas redes ya que se recomienda dejar un margen de seguridad. Además suponiendo que la recta  $E_L=E+E_C$  no cortase a la curva de excitación, o lo que es lo mismo  $X_C > X_{Ccritica}$ , el sistema no sería ferresonante, pero si se podrían presentar sobretensiones y otros problemas como inversión de fases debido a que el transformador podría pasar a un punto de operación ubicado en el tercer cuadrante de la curva de excitación muy por encima del codo de saturación, debido a la apertura de una o dos fases de la red. Por lo que se recomienda realizar también un análisis lineal para limitar estas sobretensiones, como se expuso en la sección 4.1.1c de este trabajo, en la cual se obtiene de la ecuación 4.4:

$$\frac{V_a}{V_R} = \left( \frac{X_{co}/X_T}{1 - 2 \frac{X_{co}}{X_T}} \right)$$

Suponiendo una sobretensión máxima del 25% se hace:  $\frac{V_a}{V_R} = 1,25$  donde  $K = X_{co}/X_T$

$$\left( \frac{K}{1 - 2 K} \right) = \pm 1,25 \quad (4.5)$$

$$\therefore K_1 = 0,3571$$

$$\therefore K_2 = 0,8333$$

Tomando en cuenta que en la ecuación 4.5 si  $(-2 K) = 0 \Rightarrow V_a \rightarrow \infty$

Y despejando K:

$$\therefore K_3 = 0,5$$

El valor mínimo de K será el mayor  $K_2 = 0,8333 \approx 1$

Para el cálculo de la longitud crítica del cable se procede de la forma descrita en la sección 2.6, utilizando la ecuación 2.22 con un valor de K mínimo = 1 (para sobretensiones no mayores del 25% por encima de la nominal).

$$l_{\max} = \frac{I_0 \% (kVA)}{10^5 K 2\pi f C (kV)^2} = 152 m$$

Lo que implica que el circuito en estudio en el cual el cable tiene una longitud de 800m no cumple con estos criterios.

Ahora bien supongamos que la longitud del circuito en estudio es de la mitad (400m), un análisis por método gráfico evidentemente arrojaría que el mismo no presenta ferresonancia, pero como se expuso anteriormente si pudiera manifestar sobretensiones mayores al 25% por encima del voltaje nominal.

#### **4.3 EQUIPOS Y MEDIDAS QUE PERMITEN AISLAR O MITIGAR LAS SOBRETENSIONES POR FERRORESONANCIA**

Como ya se ha dicho anteriormente la posibilidad de aparición de la ferresonancia, es un factor que se debe tomar en cuenta desde el momento en que se diseña una red de distribución eléctrica, a fin de evitar las configuraciones propensas para el origen de este fenómeno. Algunas medidas que se pueden prever, son las siguientes:

- Revisar si los parámetros involucrados en los circuitos se encuentran dentro del rango permisible para evitar o aminorar la posibilidad de ferresonancia, como lo es la longitud de los cables.
- Tratar en lo posible, utilizar transformadores con conexiones menos susceptibles a ferresonancia.
- Restringir las maniobras monofásicas o la protección por fusibles cuya fusión produce un corte unipolar. Los fenómenos de ferresonancia pueden evitarse mediante la utilización de dispositivos de interrupción trifásicos. Sin embargo esta solución desde el punto de vista eléctrico es muy práctica pero debido a factores de índole económica y de disponibilidad de espacio generalmente no es una solución accesible. De ser así se recomienda colocar los fusibles, interruptores automáticos, entre otros, muy próximos al transformador, (a fin de bajar el valor de la capacidad entre el interruptor automático y el transformador por debajo de su valor crítico) sobre todo cuando se emplean transformadores de alta eficiencia, o transformadores pequeños, ya que su propia capacitancia sumada a la de los interruptores podría ser suficiente para producir ferresonancia.
- El orden según se cierra los seccionadores o cortacorrientes, al energizar o desenergizar un transformador, es muy importante ya que mediante una operación adecuada de los mismos, se puede reducir la posibilidad de ferresonancia, es decir, si se ejecuta primero el cierre de los elementos más lejanos al transformador y posteriormente los situados junto al transformador. Si se procede en orden inverso podría producirse ferresonancia. La operación de desenergización debería efectuarse abriendo en primer lugar los elementos más próximos al transformador y posteriormente los más lejanos. Si la maniobra se realiza en forma inversa podría producirse ferresonancia.

- Restringir los trabajos con tensión en el caso de un conjunto cable-transformador cuando la longitud del cable sobrepasa una cierta longitud crítica.
- Evitar conexiones de transformadores en vacío o con poca carga.

Las sobretensiones ferroresonantes han sido consideradas como una amenaza para los pararrayos instalados en los sistemas de distribución subterráneos. Estas consideraciones están basadas frecuentemente en análisis simplificados que no toman en cuenta apropiadamente las condiciones presentes en las redes bajo ferroresonancia (como la alta impedancia proporcionada por los circuitos ferroresonantes) generando conclusiones pesimistas a cerca de la supervivencia de los pararrayos ante situaciones de ferroresonancia.

Sin embargo, investigaciones recientes desarrolladas para evaluar el comportamiento de los pararrayos expuestos a estas condiciones [21], han dado a conocer que ciertos tipos de pararrayos exhiben una significativa tolerancia a la ferroresonancia por periodos de tiempos considerables. La capacidad de supervivencia de un pararrayo a una extensa exposición a la ferroresonancia dependerá tanto del circuito como de sus características térmicas propias (las cuales son una función de su resistencia térmica y de la temperatura ambiente en la cual opera). Por ejemplo los pararrayos del tipo MOV (Metal Oxide Varistor) inmerso en aceite son menos susceptibles a este problema por su capacidad de disipar el calentamiento debido a las corrientes ferroresonantes. Entonces si bien no se puede pretender evitar la ferroresonancia mediante el uso de un pararrayo, si se puede esperar que un pararrayo pueda contribuir a limitar las magnitudes de las sobretensiones por ferroresonancia a niveles permisibles, permitiendo un poco de flexibilidad a la hora de la búsqueda de soluciones, menos restrictivas en el campo de operación.

## **CAPÍTULO V**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Usualmente la ferresonancia no ocurre en la operación normal de los sistemas de distribución, como ya se ha demostrado, es producida por un circuito resonante que resulta de la interacción de una capacitancia y una inductancia. La inductancia es aportada por un transformador con núcleo de material ferromagnético y la capacitancia a tierra usualmente es debida a los cables, líneas de interconexión, bancos de condensadores, e incluso pero en menor grado a la capacitancia propia del transformador.

Para iniciar la ferresonancia se requiere de un transitorio, una perturbación que puede ser causada por la utilización de dispositivos de interrupción monopoles (apertura o cierre de un interruptor), o por la operación de protecciones como fusibles, permitiendo la energización o desenergización de una o dos fases, con lo cual la reactancia capacitiva queda conectada en serie con la reactancia inductiva del transformador formando el circuito ferresonante LC.

La ferresonancia es difícil de analizar, en parte porque no ocurre de forma predecible a un estímulo en particular. Para un circuito con una configuración y parámetros dados, se puede tener varios regímenes permanentes estables como respuesta, y cada respuesta en particular dependerá de las condiciones iniciales (flujo remanente en el circuito magnético del transformador, carga de las capacitancias en el instante de conexión, etc.), además de la posibilidad de resonancia dentro de una gran gama de valores de parámetros. Un análisis matemático del problema total se hace muy engorroso, y poco práctico, sin embargo el fenómeno básico y la relevancia de los parámetros involucrados pueden obtenerse del análisis de circuitos simplificados, e incluso a través del uso de métodos gráficos.

Debido a que la capacitancia es una función de la longitud del circuito se pueden calcular las longitudes permisibles para que se garantice que el voltaje en la(s) fase(s) desenergizada(s) no

supere el 125 %, 110% etc., del voltaje nominal (y así no se produzcan daños en el aislamiento), es decir, aplicar un margen de seguridad que evite que los valores de ciertos parámetros se encuentren en niveles peligrosos, lo cual se logra a través de la relación mínima que puede existir entre la reactancia capacitiva del cable y la reactancia inductiva del transformador, la cual se puede definir mediante el análisis simplificado de las configuraciones circuitales.

No obstante recientes investigaciones han dado a conocer que la longitud crítica del cable está directamente relacionada con las pérdidas en vacío de los transformadores, por lo tanto, debido a que los transformadores fabricados en la actualidad presentan niveles de pérdidas más bajos que los transformadores de hace 20 años atrás, las longitudes críticas del cable para los transformadores modernos son menores que las calculadas para los transformadores de aquel entonces. Esto significa que con los transformadores modernos pueden ocurrir sobretensiones por ferresonancia en circuitos con longitudes de cables asumidas como seguras para los viejos transformadores.

Las restricciones en el diseño y los métodos de operación para evitar la ferresonancia, a menudo pueden resultar imprácticos y en ocasiones extremadamente costosos. Por esta razón es necesario examinar más de cerca el grado en que los componentes del sistema pueden tolerar la ferresonancia.

Investigaciones recientes desarrolladas para evaluar el comportamiento de los pararrayos expuestos a sobretensiones por ferresonancia [21], han dado a conocer que ciertos tipos de pararrayos exhiben una significativa tolerancia a estas condiciones por periodos de tiempos considerables. Entonces si bien no se puede pretender evitar la ferresonancia mediante el uso de un pararrayo, si se puede esperar que un pararrayo pueda contribuir a limitar las magnitudes de las sobretensiones por ferresonancia a niveles permisibles, permitiendo un poco de flexibilidad a la hora de la búsqueda de soluciones, menos restrictivas en el campo de operación.

La conexión del transformador constituye un rol importante en la susceptibilidad que puede tener un circuito a presentar fenómenos por ferresonancia, y se debe tener especial atención a la hora de evidenciar configuraciones riesgosas.

En ocasiones el diagnosticar la ferresonancia resulta un poco difícil, por la falta de datos o incluso por las varias posibles interpretaciones de los síntomas que se presentan, por esta razón lo primero que debe hacer es analizar la red cuando ocurren los indicios, y los eventos que los preceden, que pudieran ser los responsables del inicio del fenómeno.

Para evidenciar la existencia de la ferresonancia se puede determinar si se cumplen las tres condiciones necesarias pero no suficientes para su ocurrencia, las cuales son la conexión simultánea de capacitancias y bobinas de inductancia no lineal, la existencia dentro de la red de al menos un punto cuyo potencial no sea fijo, y componentes de red poco cargados, si no se evidencia alguna de estas condiciones entonces la ferresonancia es poco probable, de lo contrario se necesitarán estudios más exhaustivos.

## 5.2 RECOMENDACIONES

El riesgo de la ferresonancia se puede contrarrestar si se tiene presente su posibilidad de aparición, por lo que debe ser otro factor a tomar en cuenta por las compañías distribuidoras de energía eléctrica al diseñar las redes. Entendiendo las causas que la hacen posible, conociendo los procedimientos recomendados para evitarla y utilizando los equipos adecuados se puede reducir al mínimo su severidad y oportunidad de aparición.

En este sentido se recomienda:

- Evitar, que por mal diseño y/o por las maniobras inapropiadas, se produzca una configuración propensa a la ferresonancia. Esto implica la eliminación de ciertos esquemas de aplicación, de ciertas maniobras en las redes y de ciertos tipos de aparataje.
- Así mismo, evitar que los valores de los parámetros de la red se encuentren (aunque sólo sea temporalmente) en la zona de riesgo y, si es posible, aplicar un margen de seguridad respecto a ésta u otras zonas de riesgo.
- En el caso de un transformador alimentado por una red capacitiva, la mejor solución consiste en evitar encontrarse en la configuración arriesgada donde la potencia activa sea inferior al 10% de la potencia nominal del transformador. Este riesgo es importante durante los periodos de poca carga (vacaciones, por la noche). Así mismo es importante tomar en cuenta que los transformadores fabricados actualmente son más eficientes, lo que se traduce en que las pérdidas son muy bajas, lo que hace al circuito más susceptible a la aparición de fenómenos ferresonantes.

