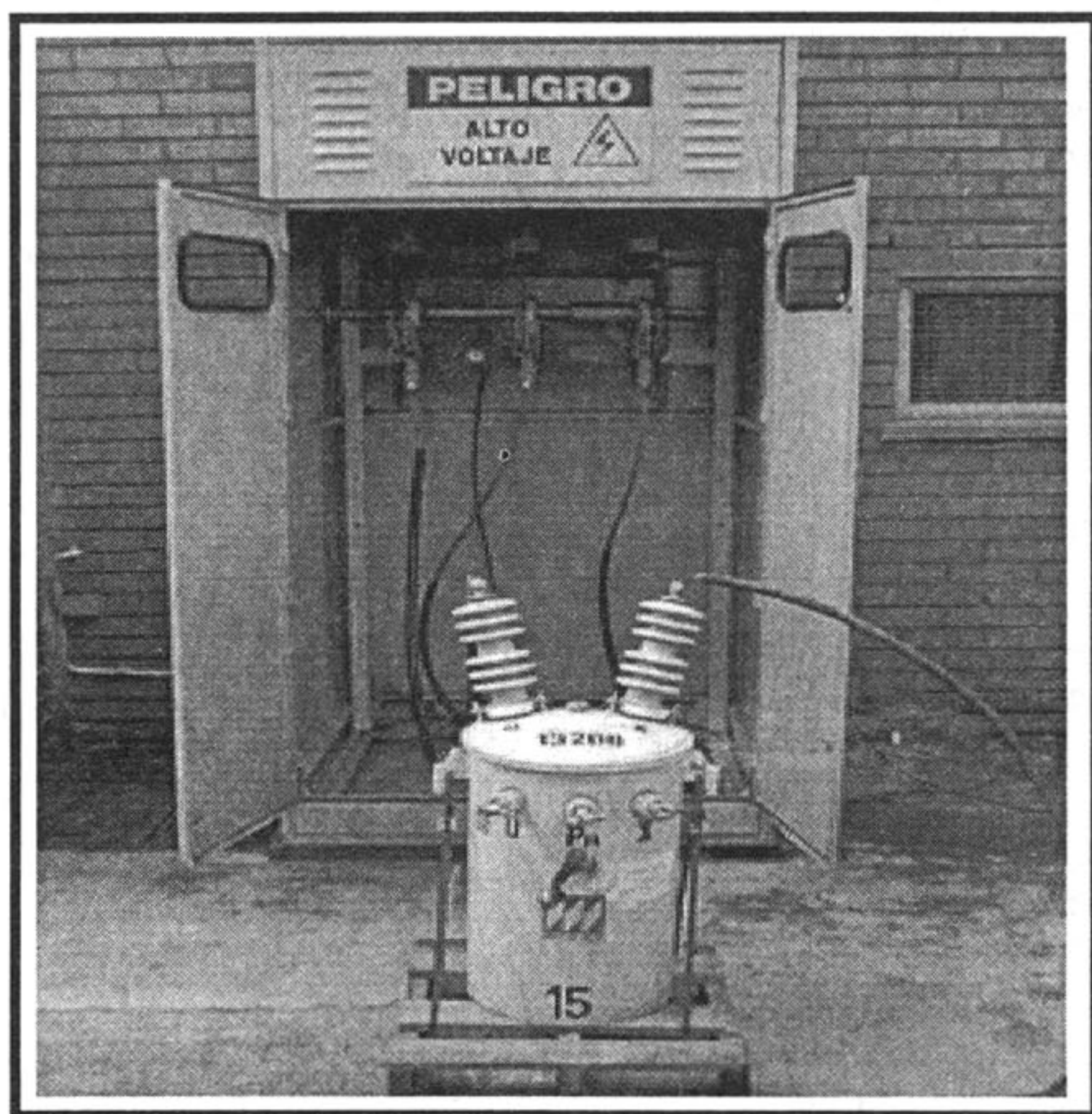


Análisis de la Ferro-Resonancia en Transformadores de Distribución Conectados con Cable Monopolar Apantallado



☐ **Guillermo Aponte Mayor, M.Sc**
Profesor Titular
Universidad del Valle.
Colombia.

☐ **Ferley Castro Aranda, M.Sc**
Profesor Asistente
Universidad del Valle.
Colombia.

☐ **Aicardo Vargas Carvajal, Ing.**
Asistente de Investigación y
Docencia, Universidad del
Valle Colombia.

☐ **Jairo Suárez, Ing.**
Jefe de Ingeniería
Magnetron S.A.
Colombia.

Grupo de Investigación en Alta
Tensión GRALTA
<http://gralta.edu.co>

RESUMEN

En este artículo se analiza la posibilidad de ocurrencia de la ferro-resonancia en transformadores de distribución conectados con cable monopolar. Es resultado de un proyecto que se llevó a cabo en la Universidad del Valle con la participación de COLCIENCIAS y MAGNETRÓN S.A, en el cual se planteó obtener un mayor conocimiento del fenómeno de la Ferro-resonancia y determinar las longitudes críticas para los transformadores de distribución de uso en Colombia.

PALABRAS CLAVES

Ferro-resonancia, Sobrevoltajes, EMTP.

ABSTRACT

This article analyzes the possibility of ferro-resonance occurrence in distribution transformers connected with cable. This article shows the results from a project that was carried out in the Universidad del Valle with the participation of COLCIENCIAS and MAGNETRON S.A. The purpose is to obtain a complete knowledge about the Ferro-resonance phenomenon and to determine the critical lengths for the distribution transformers used in Colombia.

* La Revista recibió este artículo en Diciembre de 2.001

KEYWORDS

Ferro-resonance, Overvoltages, EMTP.

1. INTRODUCCIÓN

La probabilidad de que un sistema eléctrico tenga averías en sus equipos o irregularidad en la prestación del servicio por causa de sobrevoltajes está determinada considerablemente por la configuración del sistema y la manera en que esté operando así como por las características de los equipos instalados en él. Actualmente en los sistemas de distribución, los transformadores conectados con cables monopoles apantallados han encontrado gran aplicación y es así como se pueden encontrar en las áreas más congestionadas de las ciudades, en unidades residenciales, hospitales, centros comerciales, colegios etc. Estas aplicaciones están caracterizadas normalmente por un transformador trifásico o monofásico alimentado por medio de cable subterráneo, desde un circuito de distribución primario. Bajo ciertas condiciones especiales, la configuración (cable - transformador) puede presentar sobrevoltaje como producto de la resonancia entre la capacitancia asociada al cable de conexión y la inductancia del transformador.

2. DEFINICIÓN DE LA FERRO-RESONANCIA

La ferro-resonancia es un caso especial de resonancia serie que ocurre en circuitos como el mostrado en la figura 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 FERRO-RESONANCIA.

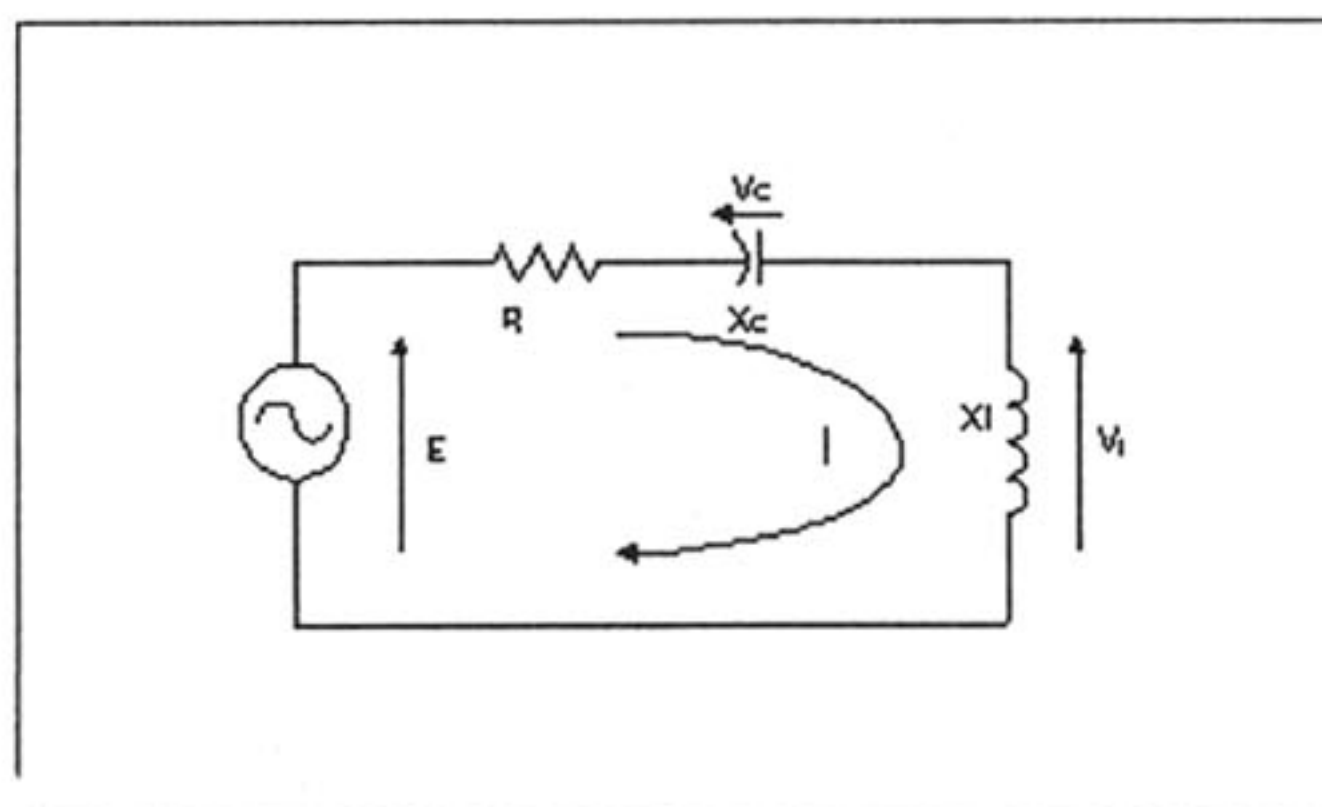


Figura 1. Circuito Resonante Serie.

3. FERRO-RESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

En un sistema eléctrico de distribución, la ferro-resonancia 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; 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 monopoles o por la operación de protecciones como fusibles.

Las figuras 2 y 3 ilustran posibles circuitos LC serie que se presentan ante la interrupción de una o dos fases con una fuente trifásica sólidamente aterrizada que alimenta un transformador conectado entre fases.

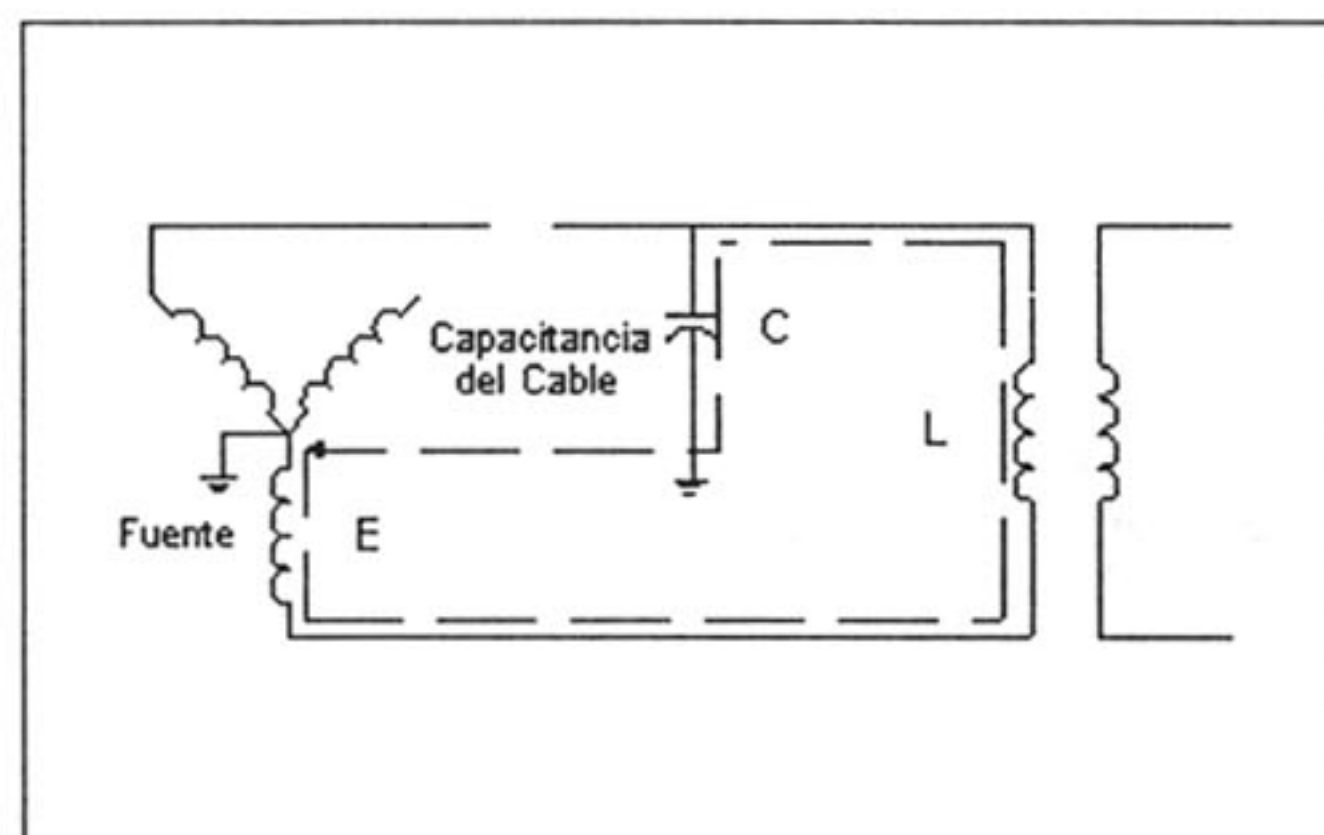


Figura 2. Transformador Monofásico con una Línea Energizada

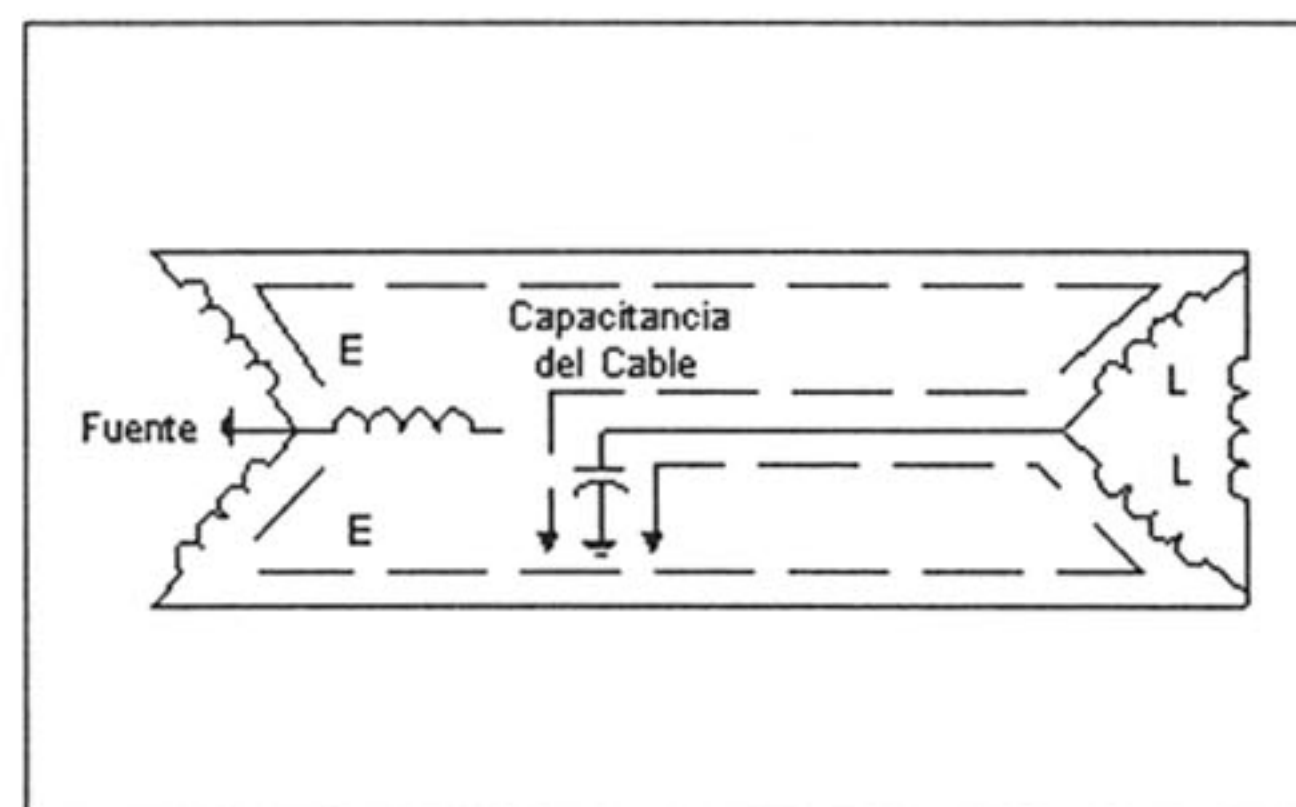


Figura 3. Transformador trifásico con Dos Fases Energizadas

Cuando la ferro-resonancia se presenta en un sistema de distribución puede causar las siguientes anomalías, fácilmente medibles y observables:

- Altos voltajes fase - fase o fase a tierra, con picos que pueden superar en muchas veces el voltaje de condiciones normales.
- Excesivo ruido audible en el transformador debido principalmente a magnetostricción.
- Formas de onda de voltaje y corriente extremadamente irregulares y dentadas.

En general, la ferro-resonancia es más factible si el devanado primario del transformador no está aterrizado y la fuente del sistema esta sólidamente aterrizada.

4. ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA FERRO-RESONANCIA

La operación de un transformador bajo condiciones de ferro-resonancia puede ser explicada gráficamente. Si el transformador se encuentra en vacío y se asume que la resistencia del circuito de la figura 1 es igual a cero, se obtiene el comportamiento estacionario de la tensión.

$$E = V_i + V_c \quad (1)$$

$$V_i = E - V_c \quad (2)$$

como

$$V_c = (-I/\omega C) \quad (3)$$

Entonces

$$V_i = E + (I/\omega C) \quad (4)$$

Como también, la relación entre el voltaje y la corriente del transformador está dada por la curva de magnetización entonces el punto de operación queda definido como la intersección de ésta con la curva que representa el efecto combinado de la fuente y la capacitancia, o sea el término del lado derecho de la ecuación 4, la cual corresponde a una recta con pendiente $1/\omega C$ (figura 4).

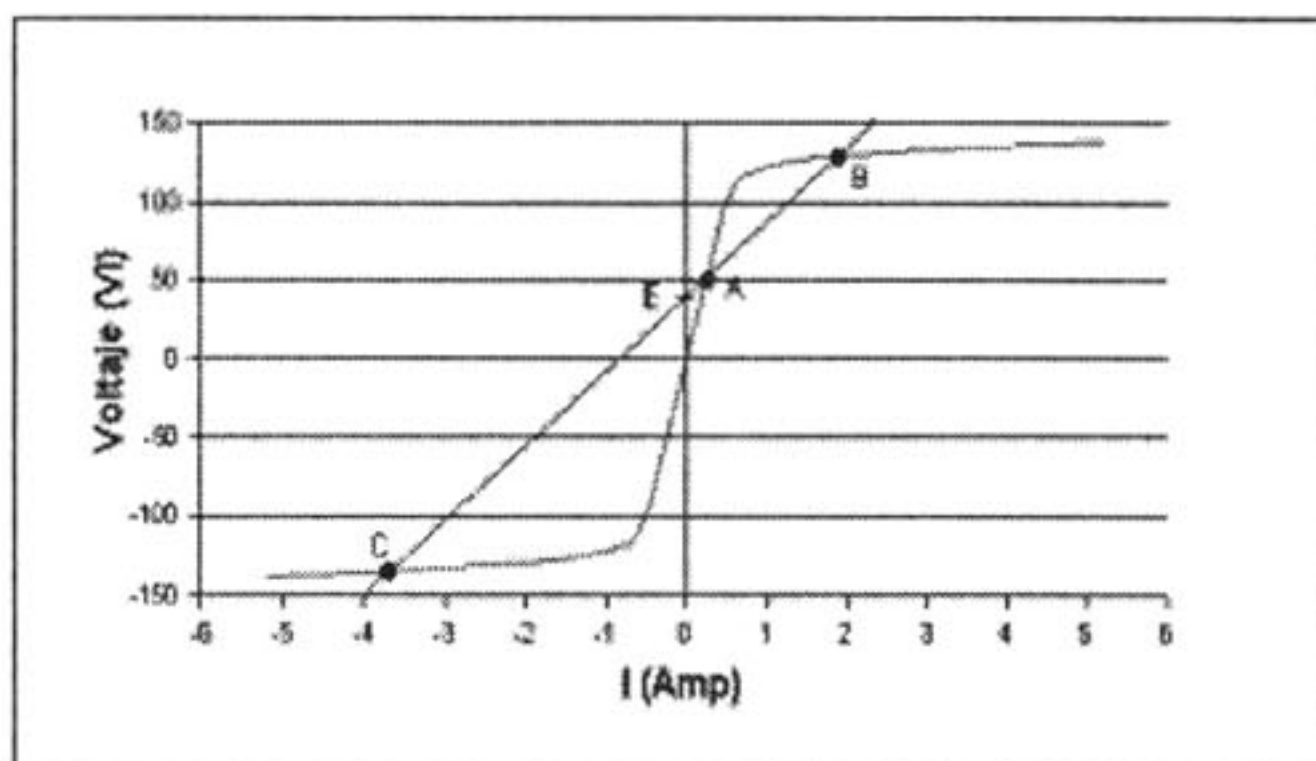


Figura 4. Puntos de Operación.

En la figura 4 se observan tres puntos de intersección que satisfacen la ecuación (4) y son definidos como los puntos de operación. Los puntos **A** y **C** son puntos estables de operación, mientras que el punto **B** es inestable.

Si se incrementa la capacitancia hasta un valor suficiente que se define como capacitancia crítica, los puntos de operación **A** y **B** se pueden eliminar dejando sólo la solución en el punto de operación **C**. Si esto sucede entonces el circuito se encuentra operando solamente en ferro-resonancia y la corriente se encontrará adelantada al voltaje, por lo que el circuito será predominantemente capacitivo (figura 5).

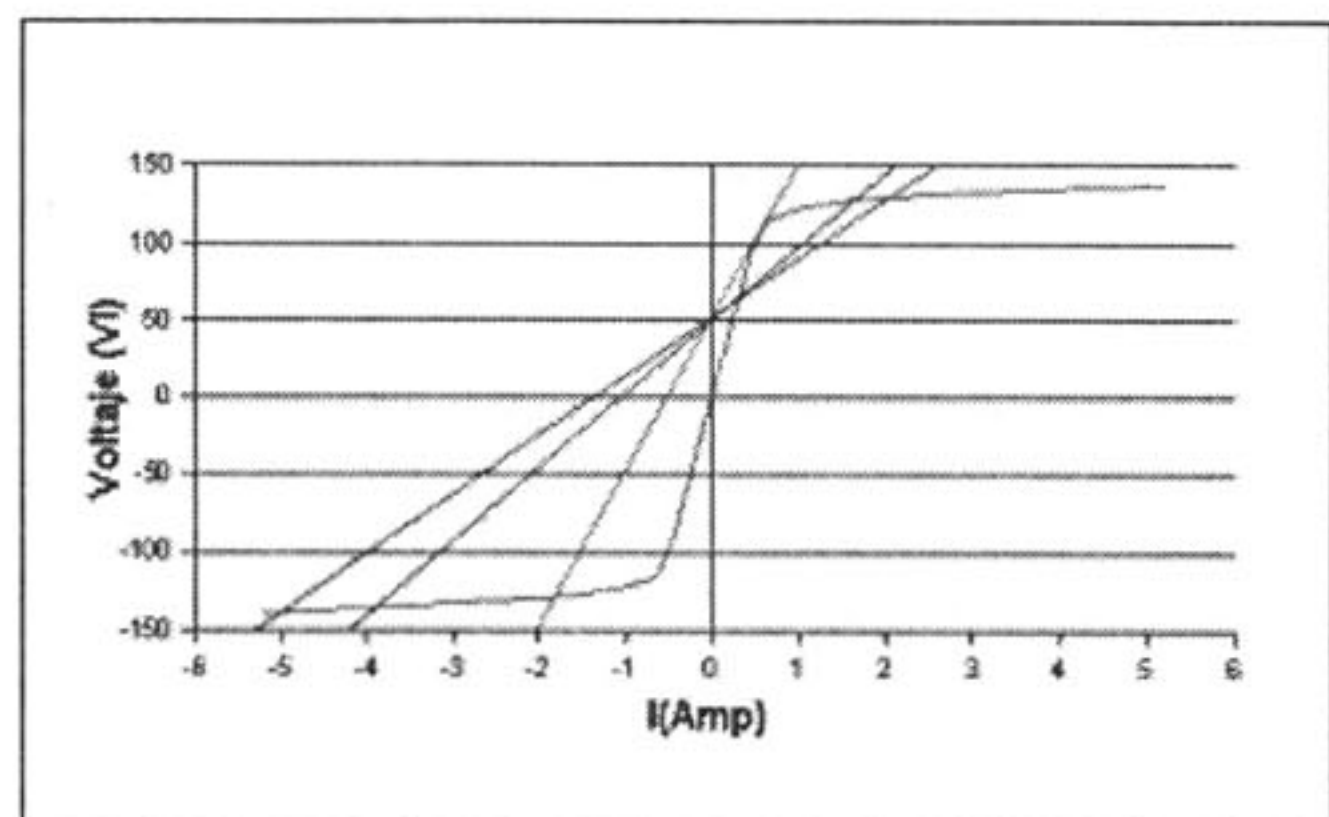


Figura 5. Solución del Circuito Variando la Capacitancia

Representación del Transformador

Para evaluar analíticamente los voltajes y corrientes, considerando sólo las componentes fundamentales de las variables eléctricas, se aproximó la curva de voltaje contra corriente del transformador con la ecuación de **Frolich**[3]:

$$V_i = (A * I) / (B + I) \quad (5)$$

Donde A y B son constantes que se determinan a partir de la curva de magnetización tomando dos puntos de la misma.

5. MODELAMIENTO UTILIZANDO EMTP-ATP

Elementos bajo estudio

Representación de la Fuente: La representación de la fuente no es crítica; normalmente es suficiente usar la impedancia Thévenin de estado estacionario y el voltaje de circuito abierto. Para el presente caso se usó una fuente de voltaje ideal (tipo 14) ya que no se cuenta con los datos exactos del equivalente.

Representación de la Capacitancia: Para la representación de la capacitancia se puede hacer uso de la rutina CABLE CONSTANTS o por medio de una capacitancia concentrada.

Representación del Transformador: Una de las partes más críticas en el estudio de la ferro-resonancia es el modelo del transformador, ya que éste contiene elementos no lineales y su correcta representación depende principalmente de su característica de saturación. EMTP ATP dispone de una rutina de soporte para la representación del transformador como lo es BCTRAN que permite la representación de transformadores monofásicos y trifásicos y las pérdidas de excitación pueden ser tomadas en cuenta. Para la representación de la saturación se usó la subrutina SATURA la cual permite convertir los valores r.m.s de V-I de la característica de magnetización a valores de $f - I$.

6. CASOS DE ESTUDIO

La tabla 1 muestra los resultados de las pruebas de pérdidas de vacío y bajo carga, realizadas sobre los transformadores bajo estudio. Estos resultados fueron usados como datos de entrada para la simulación computacional.

S (kVA)	Volt (kV)	#fases	Po (W)	Io (%)	Uoc (V)	Poc (W)
10	13.20.24	1	60.38	1.97	548.48	157.13
15	13.20.24	1	68.44	1.18	325.96	155.42
25	13.20.24	1	92.23	0.85	362.75	222.47
25	13.20.24	1	104.89	0.84	358.95	224.85
75	13.20.24	3	254.11	0.51	399.88	872.84
112.5	13.20.24	3	372.10	0.54	281.28	1337.02

Tabla1. Datos de Entrada para la Simulación

Se efectuaron simulaciones utilizando EMTP-ATP y adicionalmente se realizaron pruebas de laboratorio para validar el modelo construido; La figura 6 muestra las ondas de corriente Inrush (simulada y de prueba).

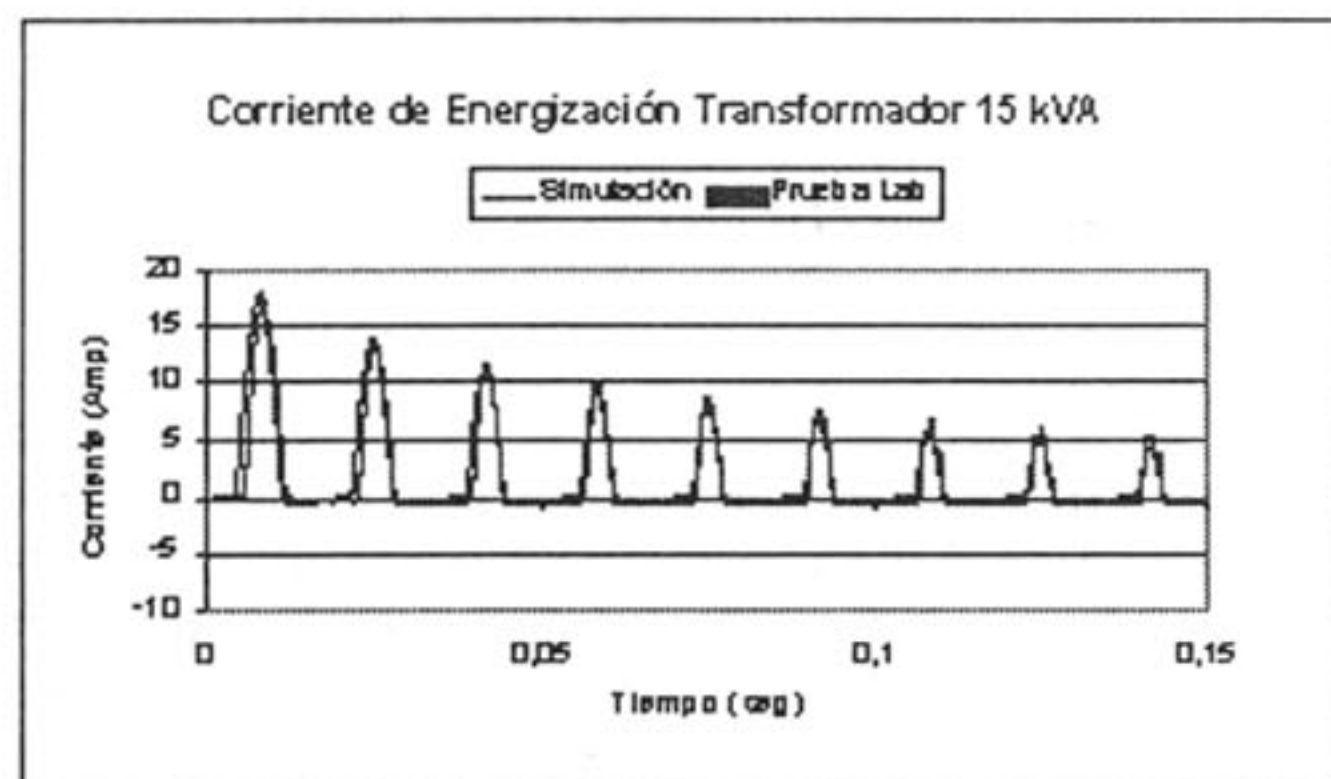


Figura 6. Onda de Corriente Inrush

7. PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio tuvieron como objetivos obtener condiciones reales de operación bajo ferro-resonancia y validar el modelo del transformador propuesto. Inicialmente se realizaron pruebas de ferro-resonancia por el lado de alta tensión del transformador en conjunto con cable monopolar calibre 2 XLPE 15 kV, empleando un interruptor para efectuar las energizaciones. Esta metodología requiere contar con un número amplio de tramos de cable de diferentes longitudes y manipular los elementos a tensión elevada. Sin embargo, se encontró en la bibliografía que tradicionalmente las pruebas se realizan por el lado de baja tensión resultando mucho más cómodo y seguro. Analizando las dos posibles maneras de efectuar las pruebas se decidió realizar las pruebas de laboratorio por el lado de baja tensión del transformador, utilizando condensadores de 660 v y construyéndose un banco para representar la capacitancia del cable, el cual permite ajustar diversos valores de capacitancia. Figura 7.

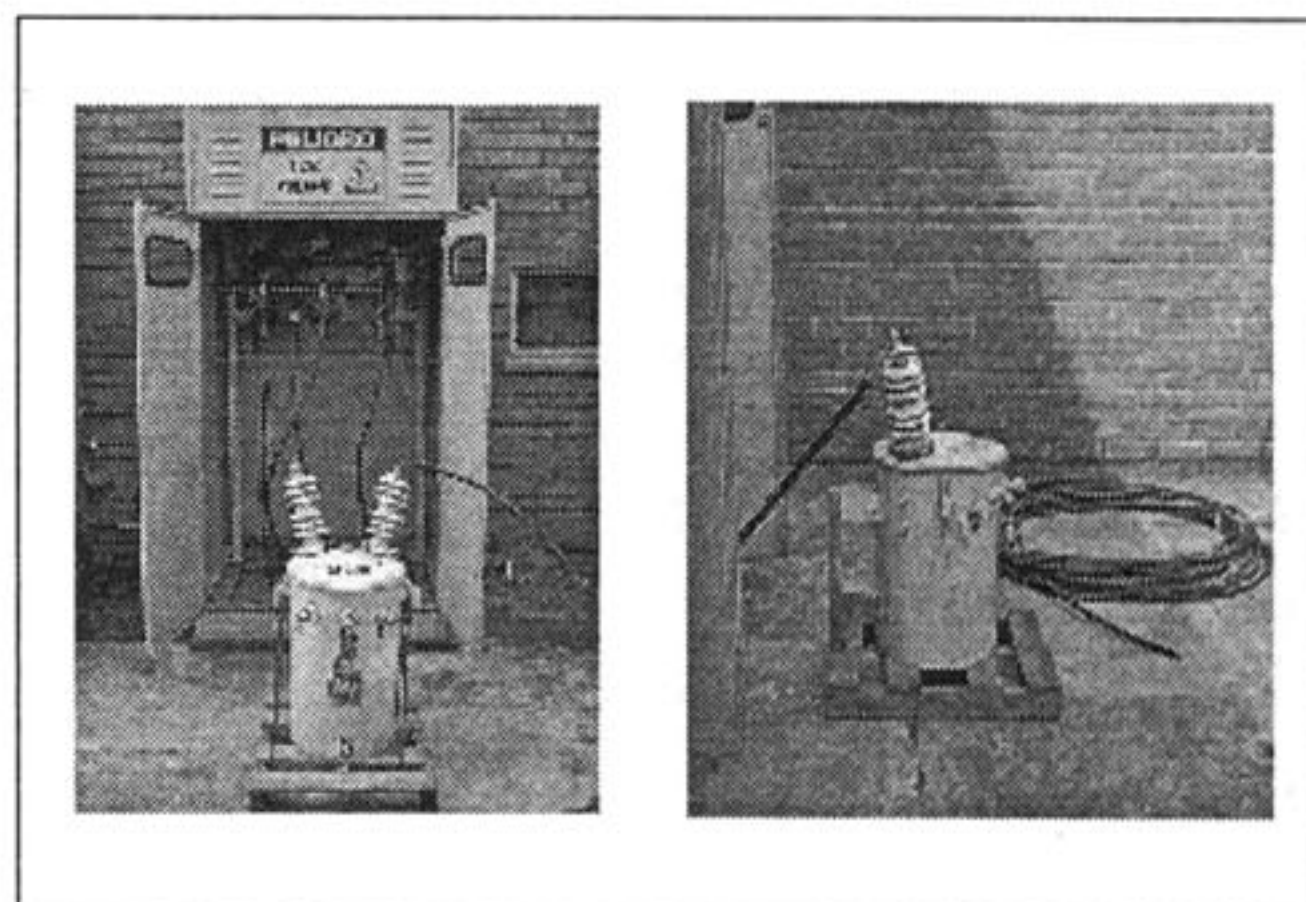


Figura 7. Montaje Inicial Ferro-resonancia

Los montajes efectuados para la realización de pruebas por el lado de baja tensión en transformadores monofásicos y trifásicos se muestran en las figuras 8 y 9.

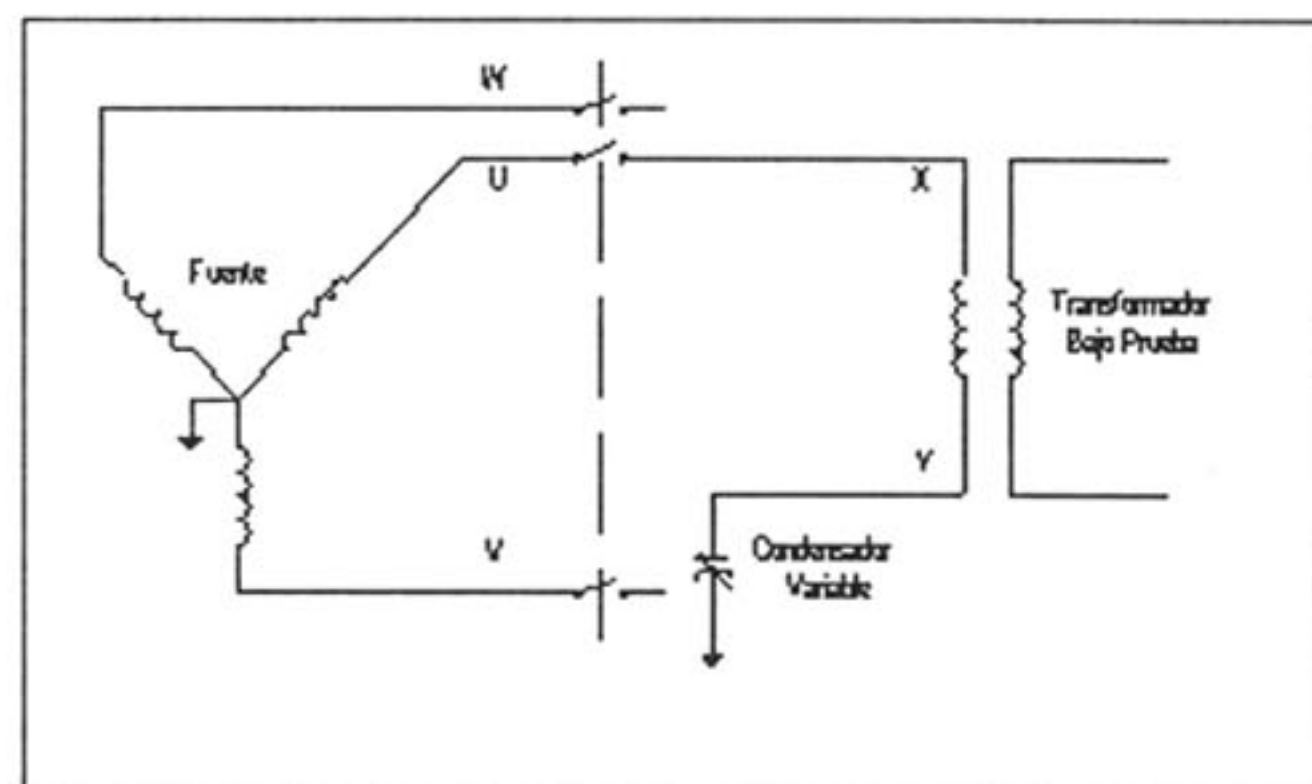


Figura 8. Montaje para Transformadores Monofásicos

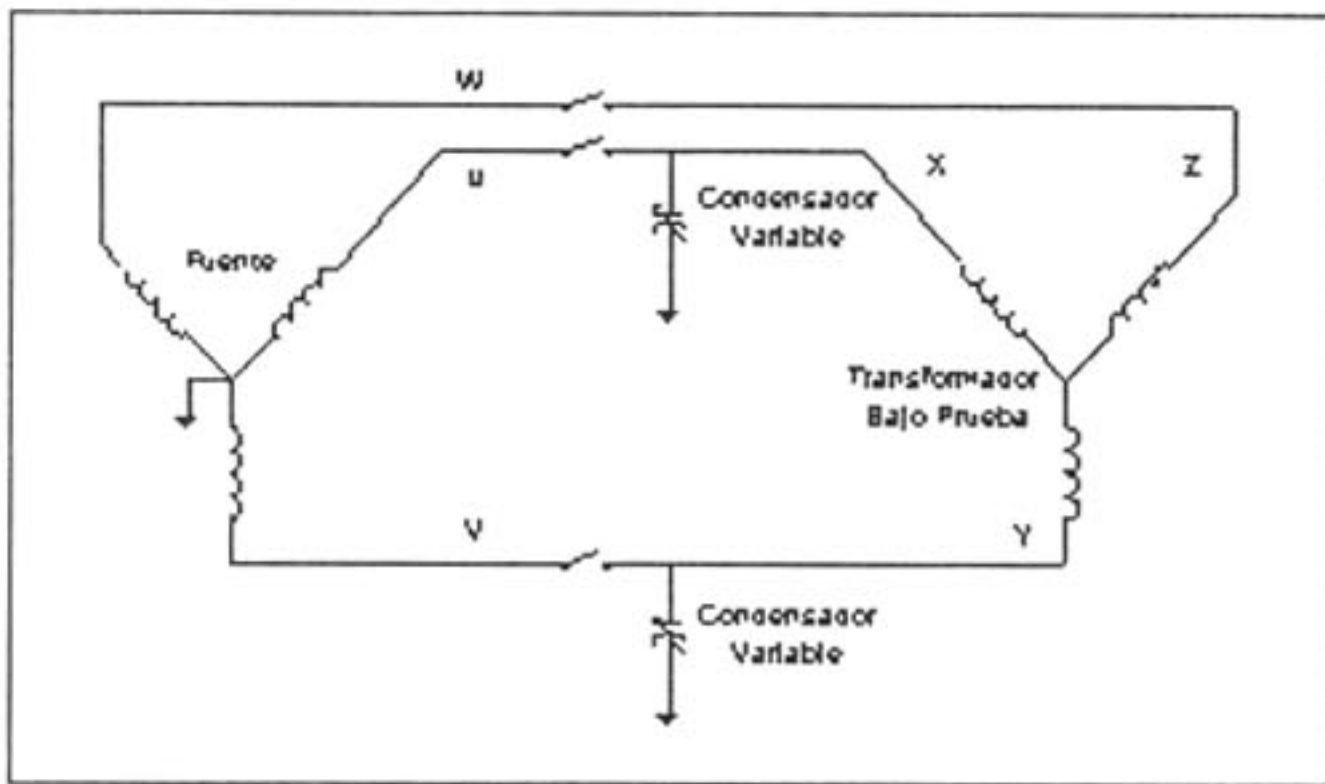


Figura 9. Montaje para Transformadores Trifásicos

La prueba consiste en realizar energizaciones aleatorias con diferentes valores de capacitancia para poder observar el voltaje en terminales del transformador y el condensador. Las ondas obtenidas fueron las que se muestran en la figura 10.

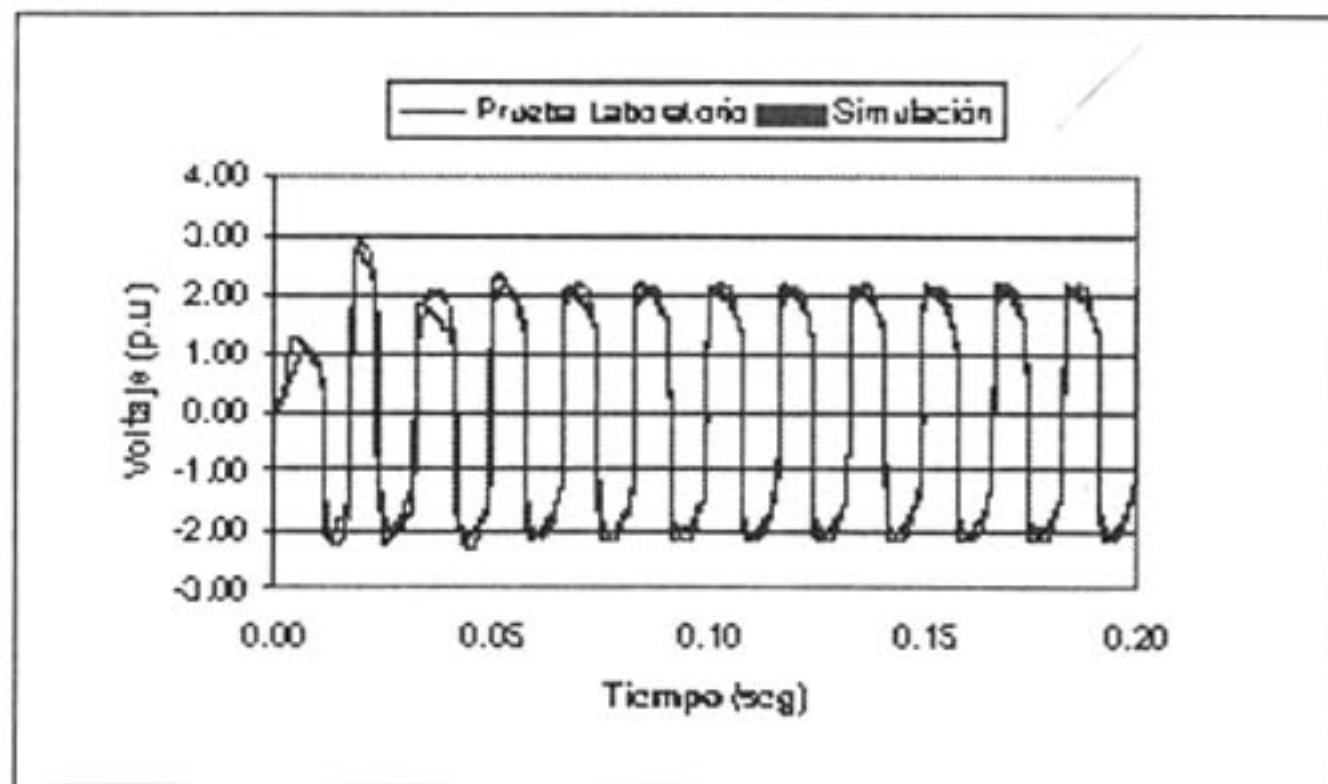


Figura 10 Voltaje en Terminales del Banco de Condensadores $C = 25.7 \text{ mF}$. Transf 25 kVA

8. ESTIMACIÓN DE LA LONGITUD CRÍTICA

Una de las medidas remediales para evitar sobrevoltaje por ferro-resonancia es la de asegurar que la reactancia capacitiva sea mucho mayor que la reactancia inductiva; esto se logra limitando la longitud de la acometida a un valor que puede utilizarse en la conexión de transformadores sin que se tenga el riesgo de sobrevoltaje por FERRO-RESONANCIA. Para el cálculo de dicha longitud se requiere definir cuál debe ser la relación mínima entre la reactancia capacitiva del cable y la reactancia inductiva del transformador

$$K = X_{co} / X_m \quad (6)$$

donde

$$K = \text{Constante.}$$

$$X_{co} = 10^6 / 2\pi f C l \quad (7)$$

X_{co} = Reactancia Capacitiva en ohms.

C = Capacitancia en μF

f = Frecuencia fundamental.

$$X_m = 10^5 * kV^2 / I_{exc\%} * kVA \quad (8)$$

Por tanto, si se conoce K la longitud se calcula como

$$l = (10 * I_{exc\%} * (kVA / K) * 2\pi f C * kV^2) \quad (9)$$

Es común encontrar transformadores monofásicos conectados con cable sin tener en cuenta la longitud crítica. Por tanto es necesario encontrar la relación X_c / X_m . Para encontrar dicha relación se realizaron varias energizaciones a los transformadores por el lado de baja tensión variando la capacitancia hasta encontrar el valor con el cual se produce la FERRO-RESONANCIA. Los resultados son mostrados en las figuras 11 y 12. 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 aliviadores de sobretensión), en el proyecto se encontró que para transformadores monofásicos la relación K debe ser 2.5 y para transformadores trifásicos, 2.

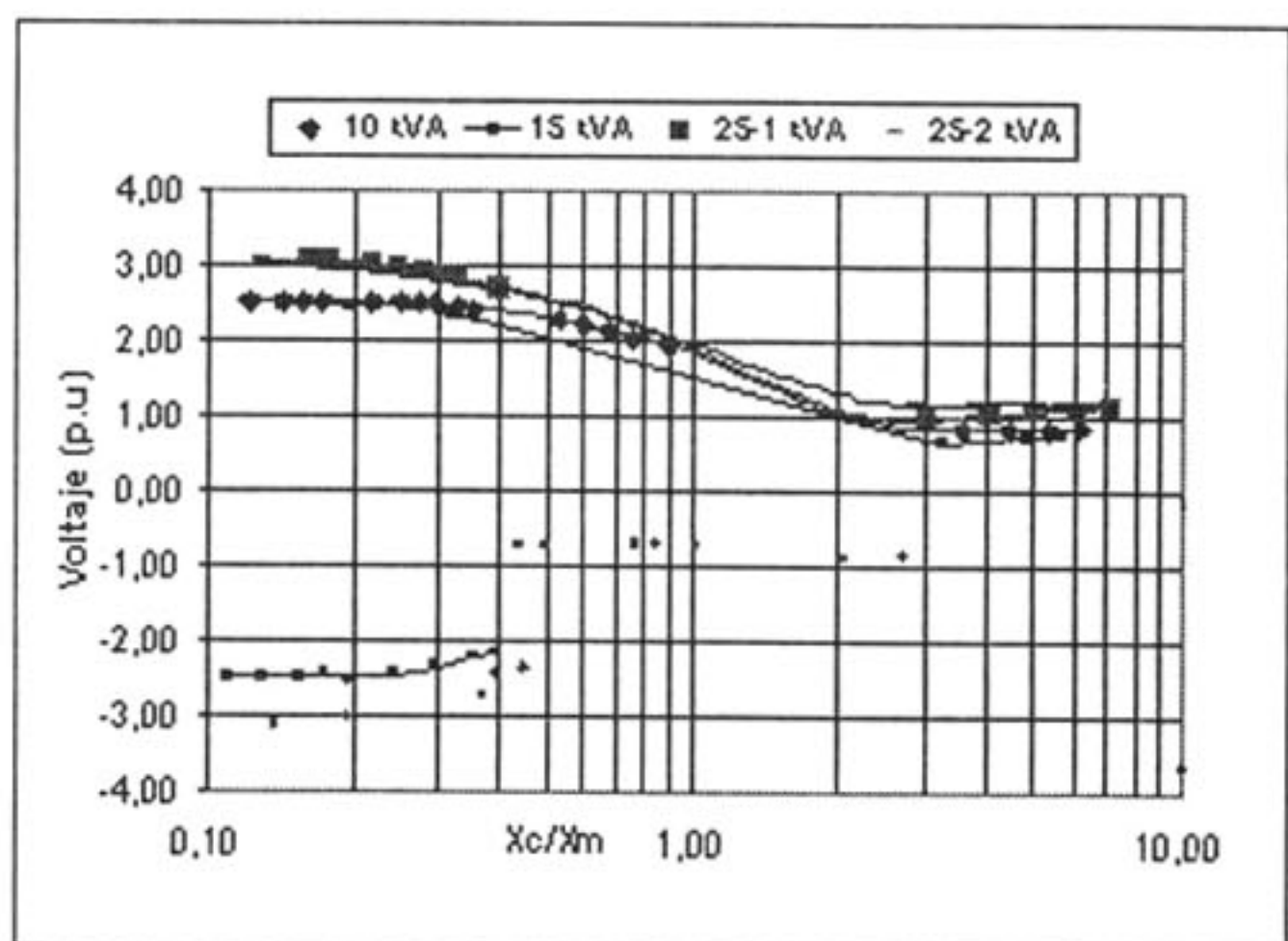


Figura 11. Voltaje en Banco de Condensadores. Transformadores Monofásicos

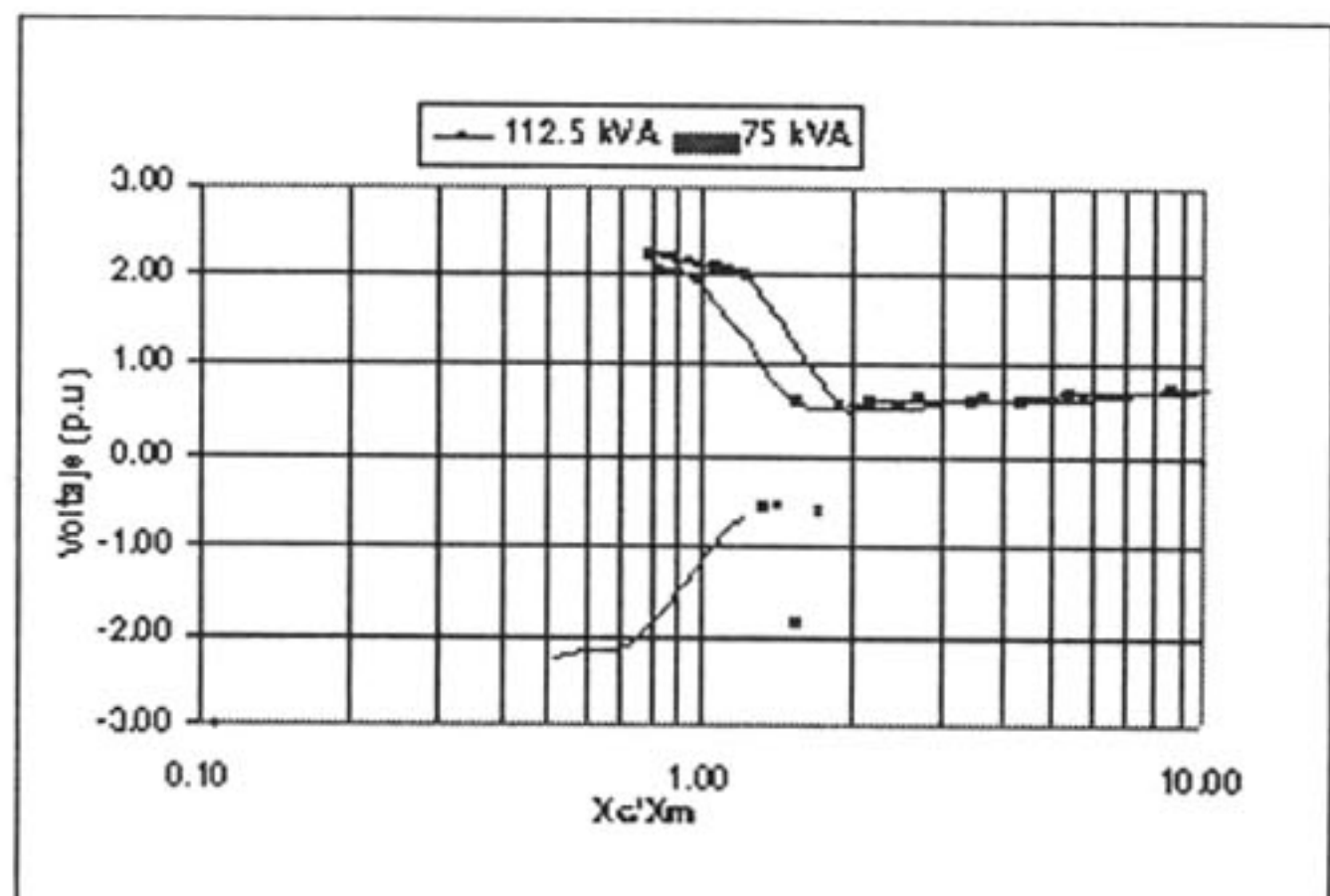


Figura 12. Voltaje en banco de condensadores. Transformadores Trifásicos

Como se puede notar en las figuras 11 y 12, existe una región en la cual está la posibilidad de obtener más de un valor de voltaje para un circuito en particular descrito por la relación X_c/X_m , donde X_m es el valor de la reactancia de magnetización a voltaje nominal. La característica de saturación del transformador permite más de una solución de estado estable, la cual es dependiente de las condiciones iniciales y el tiempo de energización.

Para grandes valores de X_c/X_m , la curva se aproxima a 1 p.u., éste es el caso donde la capacitancia del sistema es muy pequeña; entonces el voltaje de la fase abierta es igual al voltaje de la fuente. Debido a que no hay corriente circulante, el voltaje en terminales del transformador se aproxima a cero. Para valores bajos de X_c/X_m los voltajes pueden alcanzar valores muy altos debido a que el núcleo del transformador está saturado y una condición de verdadera resonancia es alcanzada entre X_c y la reactancia de núcleo de aire del transformador; de esta forma los voltajes son limitados únicamente por la resistencia del sistema. Los resultados encontrados aquí difieren notoriamente de los presentados en [5]. Lo anterior es debido a las simplificaciones y consideraciones que se deben hacer al realizar estudios con TNA. Las más relevantes son:

- Las pruebas de [5] se realizaron utilizando TNA, y no sobre muestras reales.
- Las longitudes críticas fueron encontradas para transformadores de potencia y no de distribución.
- No existe acoplamiento magnético entre fases adyacentes.
- Se despreciaron las pérdidas del núcleo.
- Se consideró una característica de saturación aproximada para los transformadores bajo prueba.

Por tanto, para los transformadores monofásicos bajo prueba la máxima longitud permisible de cable es la que aparece en la tabla 2.

S(kVA)	Voltaje (kV)	Io (%)	Longitud(m)
10.00	13.20	1.96	9.32
15.00	13.20	1.20	8.56
25.00	13.20	0.85	10.11
25.00	13.20	0.83	9.87

Tabla 2. Longitudes Críticas Transformadores Monofásicos Bajo Prueba

Para los transformadores trifásicos bajo prueba, aparecen en la tabla 3.

S(kVA)	Voltaje (kV)	Io (%)	Longitud (m)
75	13.2	0.51	22.75
112.5	13.2	0.54	36.13

Tabla 3. Longitudes Críticas Transformadores Trifásicos Bajo Prueba

Los anteriores resultados se pueden extender a las diversas potencias de transformadores de distribución monofásicos y trifásicos que se construyen en el país tomando como referencia la norma técnica colombiana NTC 818 y 819 (Tabla 4 y figura 13).

S(kVA)	Voltaje (kV)	Io (%)	Longitud (m)
10.00	13.20	2.50	11.89
15.00	13.20	2.40	17.13
25.00	13.20	2.00	23.79
37.50	13.20	2.00	35.68
50.00	13.20	1.90	45.19
75.00	13.20	1.70	60.66

Tabla 4. Longitudes Críticas Transformadores Monofásicos (lexc norma)

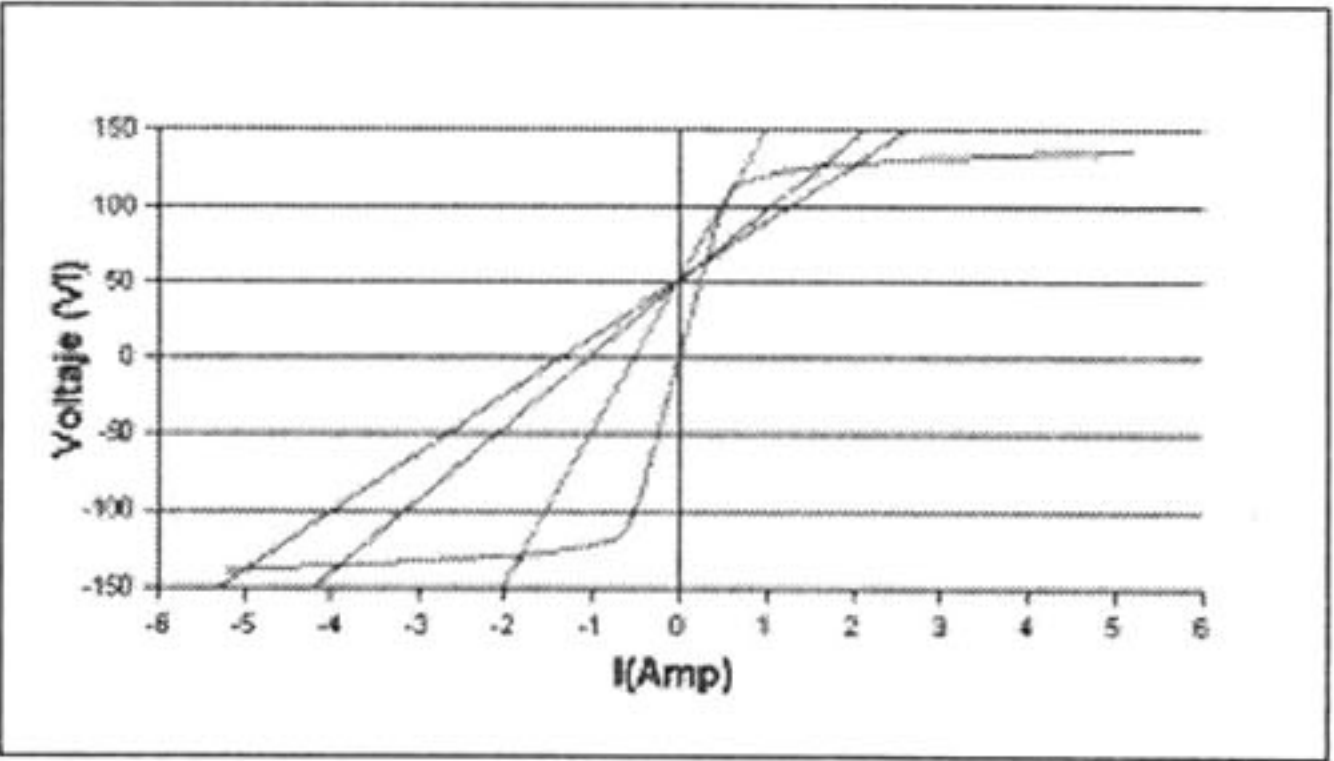


Figura 13. Longitudes Críticas Transformadores Trifásicos (lexc norma)

Estas longitudes disminuyen si la corriente de excitación es menor que el valor máximo indicado en las respectivas normas.

Los anteriores cálculos fueron realizados considerando un cable monopolar 15 kV XLPE 100%, aislamiento calibre 2 como acometida de alimentación.

9. CONCLUSIONES

- Se pudo confirmar que el fenómeno de la ferro-resonancia se presenta en los sistemas eléctricos de distribución cuando se conecta un transformador a través de cables monopolares apantallados.
- Debido a los sobrevoltajes que se originan durante la aparición del fenómeno el transformador puede experimentar sobreexcitación ya que el voltaje que aparece en terminales del mismo alcanza valores de 2 p.u.
- Examinando los resultados obtenidos se puede apreciar que no es recomendable que algunas potencias de transformadores tanto monofásicos y trifásicos se conecten mediante cable apantallado debido a que las longitudes críticas encontradas no son prácticas.
- La modalidad en el país de emplear transformadores tipo pedestal de baja potencia, conectado entre fases (para el caso de los monofásicos), debe revisarse estableciendo un límite de potencia y analizando la posibilidad de emplear la conexión fase – tierra.
- Las formas de onda obtenidas de las pruebas de laboratorio son muy cercanas a las ondas obtenidas por simulación. Lo anterior indica que el modelo propuesto para las simulaciones es apropiado.
- Una de las medidas remediales para mitigar la ferro-resonancia es la inserción de resistencias de carga en el lado secundario del transformador. Otra solución es la realización de operaciones de apertura y cierre utilizando seccionadores tripolares.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] NAIDU, S. R. And SOUZA, B. A. Analysis of ferroresonant Circuits Using A Newton Raphson Scheme. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 12, No 4 Octubre 1997.
- [2.] ANSI/IEEE. IEEE Guide for Application of Transformers Connections in Three Phase Distribution Systems: Ferro-resonance. P 22-33 ANSI/IEEE C57.105-1978 .
- [3.] SALVADOR, A. Análisis de Ferro-resonancia en Transformadores Eléctricos.
- [4.] SLOW TRANSIENTS TASK FORCE OF THE IEEE WORKING GROUP ON MODELING AND ANALYSIS OF SYSTEMS TRANSIENTS USING DIGITAL PROGRAMS. Modeling And Analysis Guidelines for Slow Transients. Part III. The Study of Ferroresonance. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 15 No 1 Enero 2000.
- [5.] HOPKINSON, Ralph. Ferroresonant Overvoltage

Control Based on TNA Test on Three Phase Delta-Wye Transformers Banks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol 86 No 10 Octubre 1967.

[6.] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. NTC 818, 819. ICONTEC 1995.

[7.] VARGAS C, Aicardo. Análisis de La Ferro-resonancia en Transformadores de distribución Tipo Normal y Pedestal. Tesis de Grado. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Marzo 2001.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y MAGNETRÓN S.A, por el financiamiento recibido para el desarrollo del proyecto **1**

AUTORES



Guillermo Aponte M, Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle 1978; M.Sc del Instituto de Ciencia y Tecnología Universidad de Manchester UMIST Inglaterra, 1985. Especialista en transmisión y distribución de energía eléctrica de la Universidad del Valle, 2000.

Ferley Castro A, Ingeniero Electricista, y M.Sc de la Universidad del Valle en 1992 y 1995 respectivamente. Doctorando de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.



Aicardo Vargas C, Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 2001. Asistente de Investigación y Docencia de la Universidad del Valle. Estudiante de la Maestría en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica.

Jairo Suárez, Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, 1986. Actualmente se desempeña como Jefe de Ingeniería de Industrias Electromecánicas MAGNETRÓN S.A.

