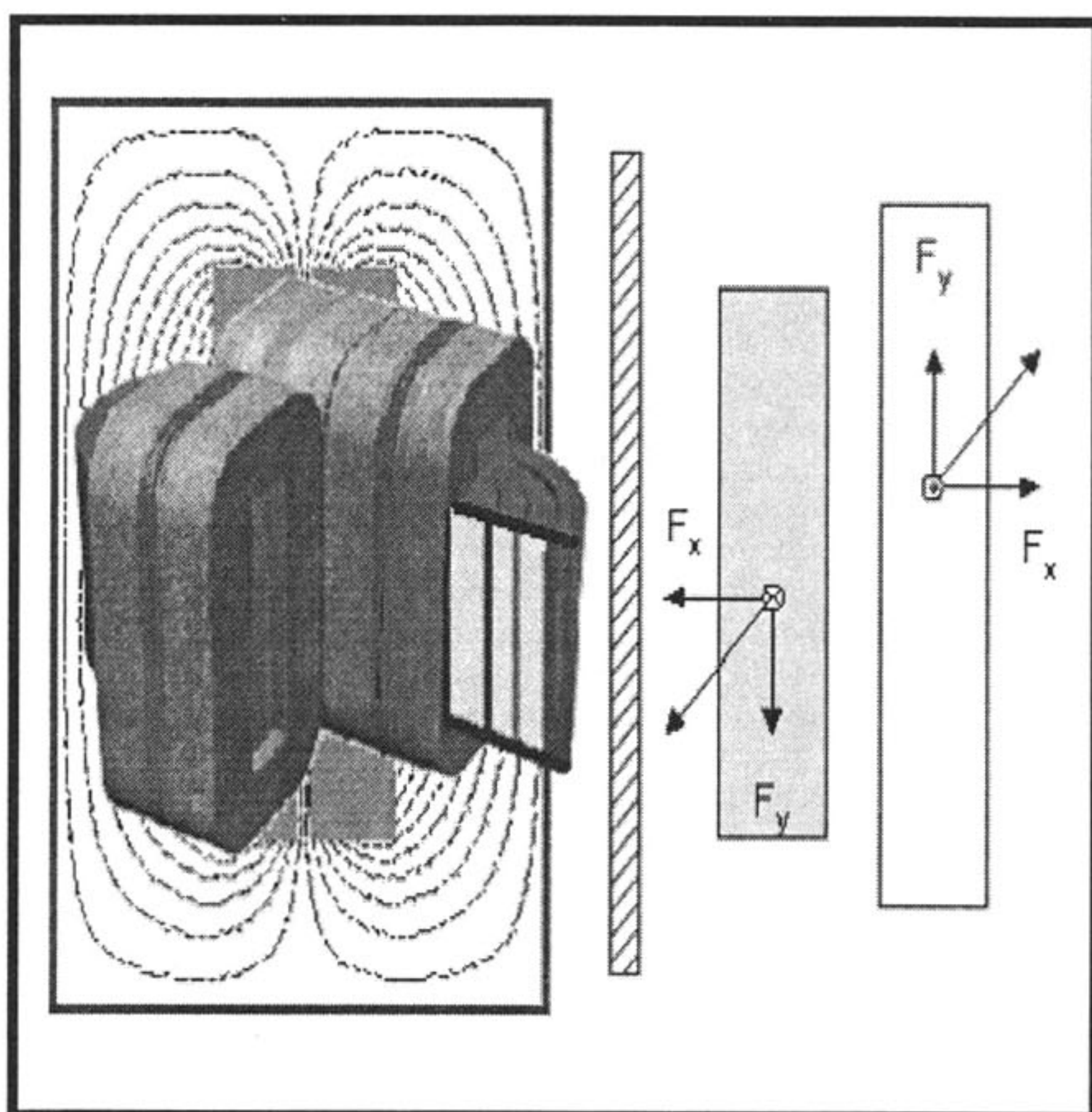


Efecto de la Magnetización durante el Cortocircuito en Transformadores de Distribución



□ **Diego Fernando García G. Ing.**
Profesor Auxiliar
Universidad del Valle

□ **Ferley Castro A., M.Sc.**
Profesor Auxiliar
Universidad del Valle

□ **Héctor Cadavid R., Ph.D.**
Profesor Titular
Universidad del Valle

□ **José Nelson Alfonso, Ing.**
Gerente Transformadores de
Distribución Siemens Colombia

Grupo de Investigación en Alta Tensión
GRALTA-Univalle.

RESUMEN

En este artículo se muestra cómo la magnetización durante la energización del transformador afecta el balance de amperios-vuelta del sistema y cómo esta condición de operación en transformadores de distribución produce un desbalance crítico de las fuerzas sobre los devanados al momento del cortocircuito. También se presenta la metodología implementada para minimizar el efecto de magnetización durante la prueba de cortocircuito.

PALABRAS CLAVES

Esfuerzos de cortocircuito, prueba de cortocircuito, corriente inrush.

ABSTRACT

How the magnetization effect during the transformer energization affects the system ampers-turn balance and how this operative condition produces a critical mismatch of the windings forces at the short circuit moment is shown. The methodology implemented to minimize the magnetization effect during the distribution transformers short circuit test is also presented.

KEYWORDS

Shortcircuit efforts, shortcircuit test, inrush current.

* La Revista recibió este artículo en Diciembre de 2.001

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la magnitud de los esfuerzos de cortocircuito en transformadores generalmente se ha realizado bajo supuestos que permiten simplificar los cálculos, considerando el fenómeno de forma aislada respecto de otros que pueden presentarse simultáneamente como el de magnetización. Estos supuestos son basados en estudios sobre transformadores de diseño común (núcleo apilado de sección transversal y bobinas circulares, configuración de los devanados baja tensión–alta tensión y diferenciación apreciable entre el diámetro de la espira media de ambos devanados) y se obtiene que los cálculos presentan un aceptable nivel de precisión. Sin embargo, en Colombia un gran porcentaje de los transformadores de distribución con potencias de hasta 1.2 MVA son diseñados empleando núcleos arrollados con bobinas de sección rectangular en los cuales el fenómeno de magnetización durante la energización se torna más pronunciado. En Colombia se exige la prueba de cortocircuito sobre los nuevos diseños de transformadores; esta prueba es realizada en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle (LAT) mediante la energización del devanado primario a tensión nominal (13.2 kV), estando previamente cortocircuitado el secundario (cortocircuito previo a la energización) [1],[2]. La metodología es contemplada en las normas [3], [4] y es válida para verificar la calidad de los transformadores de distribución. No obstante, es claro que bajo esta forma de ejecución de la prueba se presenta una evidente superposición de los fenómenos de cortocircuito y magnetización.

2. FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS AL INTERIOR DEL TRANSFORMADOR

El transformador es un sistema en el cual existe una constante interacción del campo magnético y la corriente eléctrica; por tanto, al interior del transformador y, en especial sobre los devanados, se ejercen fuerzas de carácter electromagnético que obedecen a la ecuación (1).

$$F = iL \times B \quad (1)$$

Donde:

i :Corriente instantánea por el conductor.

L :Longitud del conductor.

B :Densidad de campo magnético.

La fuerza que experimentan los conductores es proporcional al valor de la corriente al cuadrado. Bajo condiciones normales de operación, las fuerzas son

prácticamente despreciables pero bajo régimen de cortocircuito los campos de dispersión y las corrientes alcanzan valores que superan considerablemente los nominales, incrementando los valores de fuerzas electromagnéticas y esfuerzos mecánicos al interior del transformador.

Las componentes radiales del flujo producen fuerzas que actúan en sentido axial sobre los devanados, tendiendo a comprimir cada uno de ellos, pero si existe una resultante de las fuerzas axiales en cada devanado, aquella trata de desplazar un devanado respecto al otro. Las componentes axiales del campo producen fuerzas que actúan en sentido radial, tratando de alejar entre sí los dos devanados, comprimiendo contra el núcleo el devanado interno y alejando en sentido radial el devanado externo.

Teóricamente durante el régimen de cortocircuito existe un equilibrio de los amperios-vuelta entre los devanados; por tanto, mediante una correcta posición relativa entre ambos devanados es posible ubicar a igual altura los centros de acción magnéticos y compensar las fuerzas axiales actuantes sobre ellos. Esta estrategia es empleada por los fabricantes para diseñar sus transformadores de forma que presenten una distribución simétrica del campo de dispersión mejorando su comportamiento mecánico ante las corrientes de cortocircuito.

Otras medidas constructivas aplican restricciones mecánicas sobre los devanados y demás partes activas de la máquina, las cuales se ubican y dimensionan por conocimiento experimental y a partir de cálculos de las fuerzas debido al cortocircuito; éstos tradicionalmente se han basado en los siguientes supuestos:

- Distribución simétrica y homogénea del campo magnético de dispersión.
- Igualdad de amperios-vuelta entre los devanados.
- Comportamiento mecánico de cada devanado como un todo.
- Independencia del fenómeno de cortocircuito respecto al de magnetización.

Los supuestos mencionados permiten obtener valores estimados de las fuerzas que en la mayoría de los casos son aceptables para un correcto dimensionamiento de los transformadores.

Gracias al desarrollo de las herramientas computacionales basadas en el método de los elementos finitos se puede determinar en un mayor grado de detalle la distribución y magnitud del campo magnético en los devanados y por ende la ubicación, dirección y magnitud de las fuerzas actuantes sobre ellos. Así mismo, el cálculo de las fuerzas puede ser aún más detallado permitiendo un mejor dimensionamiento de la máquina, si se determina el valor real de fuerza magnetomotriz de cada devanado.

En una investigación previa [5] se demostró que no siempre existe igualdad de amperios-vuelta entre los devanados durante el régimen de cortocircuito, por ejemplo en algunos casos cuando se realiza la energización del transformador con el cortocircuito previo.

3. CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN «INRUSH»

A diferencia del período estable del transformador de distribución funcionando en vacío, en el cual la corriente alcanza generalmente valores inferiores al 5% de su corriente nominal, durante el transitorio de energización la corriente inrush en transformadores de distribución puede alcanzar valores de hasta 57 veces la nominal [5].

El aumento de la corriente durante la energización es debida a la saturación del núcleo. Cuando el flujo total en el núcleo sobrepasa el valor de saturación, el flujo restante es transportado a través del aire; en estas condiciones el núcleo se comporta como un núcleo de aire y la inductancia shunt equivalente vista por la fuente es mucho menor, ocasionando un aumento de la corriente.

En la figura 1 se muestra una onda de corriente inrush tomada a un transformador monofásico de 25 kVA; en ella se aprecia un pico cuyo valor máximo corresponde a 36 veces la corriente nominal.

Al momento de la energización la corriente puede descomponerse en una componente sinusoidal de estado estable y una aperiódica de DC, de tal forma que en $t=0$ la resultante sea cero; de igual forma estas corrientes crean un flujo de estado estable y uno aperiódico que al momento de la energización se anulan.

Si además de los dos flujos creados por la corriente de energización se toma en cuenta el flujo residual debido a la remanencia del núcleo se puede llegar a tener un nivel de sobresaturación de casi tres veces el valor en estado estable [5], lo que repercutiría en una corriente de energización mayor aún bajo régimen de cortocircuito.

Si se considera que la tensión aplicada varía sinusoidalmente, independiente del régimen de funcionamiento de la máquina y además se supone que el flujo total es una función lineal de la corriente, éste puede ser representado por la ecuación (2).

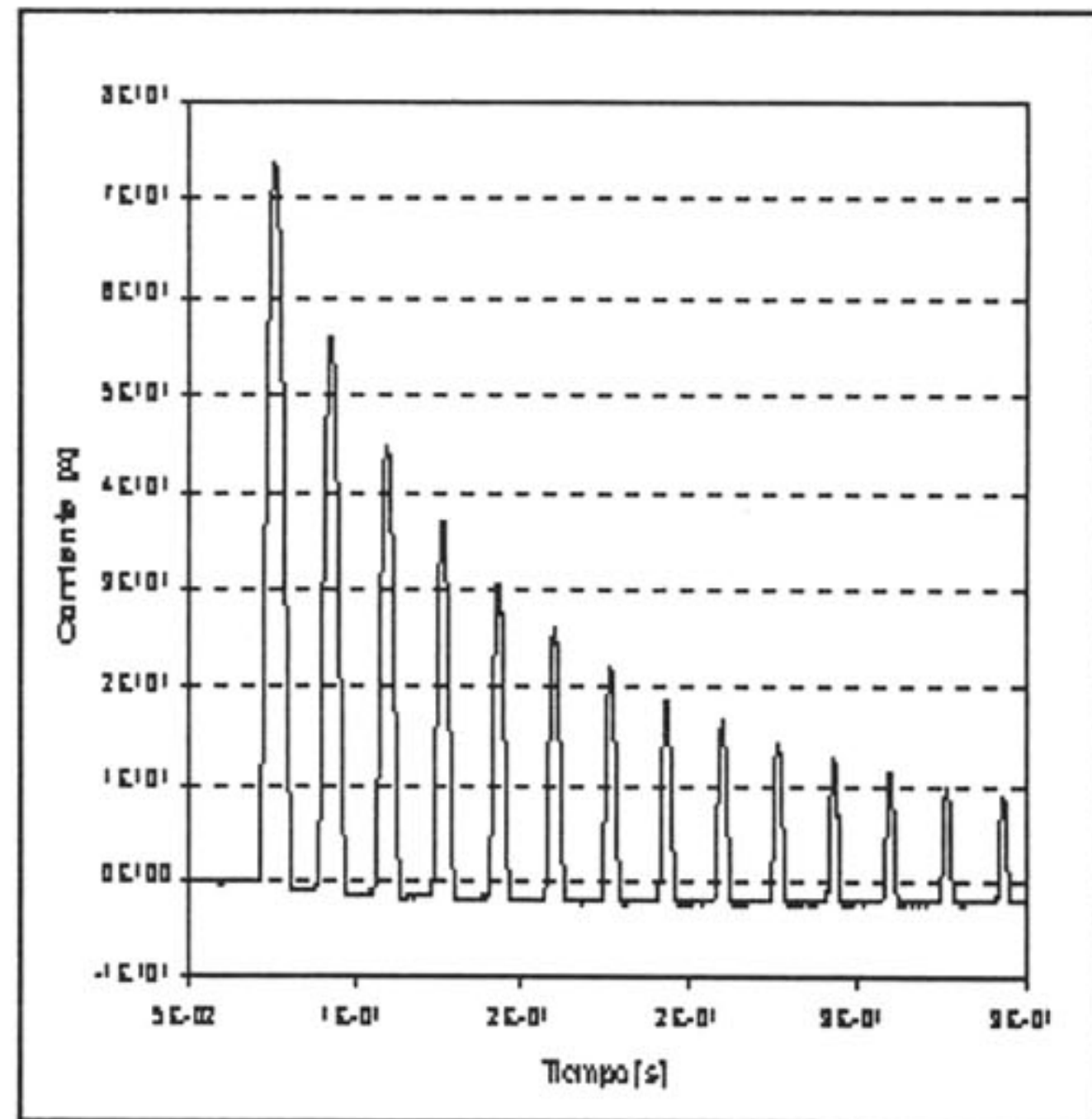


Figura 1. Onda de corriente Inrush.

$$\varphi_t = -\varphi_{est} \cos(\omega t + \alpha) + \varphi_{est} \cos(\alpha) * e^{\frac{-r}{Lm}t} \pm \varphi_{res} * e^{\frac{-r}{Lm}t} \quad (2)$$

donde:

- α : Ángulo de conexión
- ω : Frecuencia angular
- φ_t : Flujo total.
- φ_{est} : Flujo de estado estable.
- φ_{res} : Flujo residual
- r : Resistencia equivalente durante la energización
- Lm : Inductancia de magnetización.
- t : Tiempo

Podemos observar que la condición más crítica ocurre cuando la energización se realiza al cruce por cero de la señal de voltaje ($A=0$) y el flujo estable tiene igual signo que el flujo residual.

Otros factores que pueden afectar la magnitud de la corriente inrush corresponden a factores constructivos como el área de la espira media de los devanados ya que afecta directamente el valor de saturación de la máquina [6].

Como la corriente inrush sólo aparece en el devanado conectado a la fuente, causa un desequilibrio de los amperios-vuelta del sistema. Debido a este desequilibrio se crea una distribución asimétrica del campo de dispersión produciendo un efecto similar al de tener los centros de acción magnéticos de los devanados a diferente altura.

Ya que en transformadores de distribución el efecto de magnetización durante la energización puede llegar a ser más pronunciado que en transformadores de po-

tencia se pueden producir aumentos considerables de las fuerzas en ciertos puntos de los devanados. Es por esta razón que el fenómeno de cortocircuito en estos transformadores debe ser estudiado considerando simultáneamente el efecto de magnetización de la máquina.

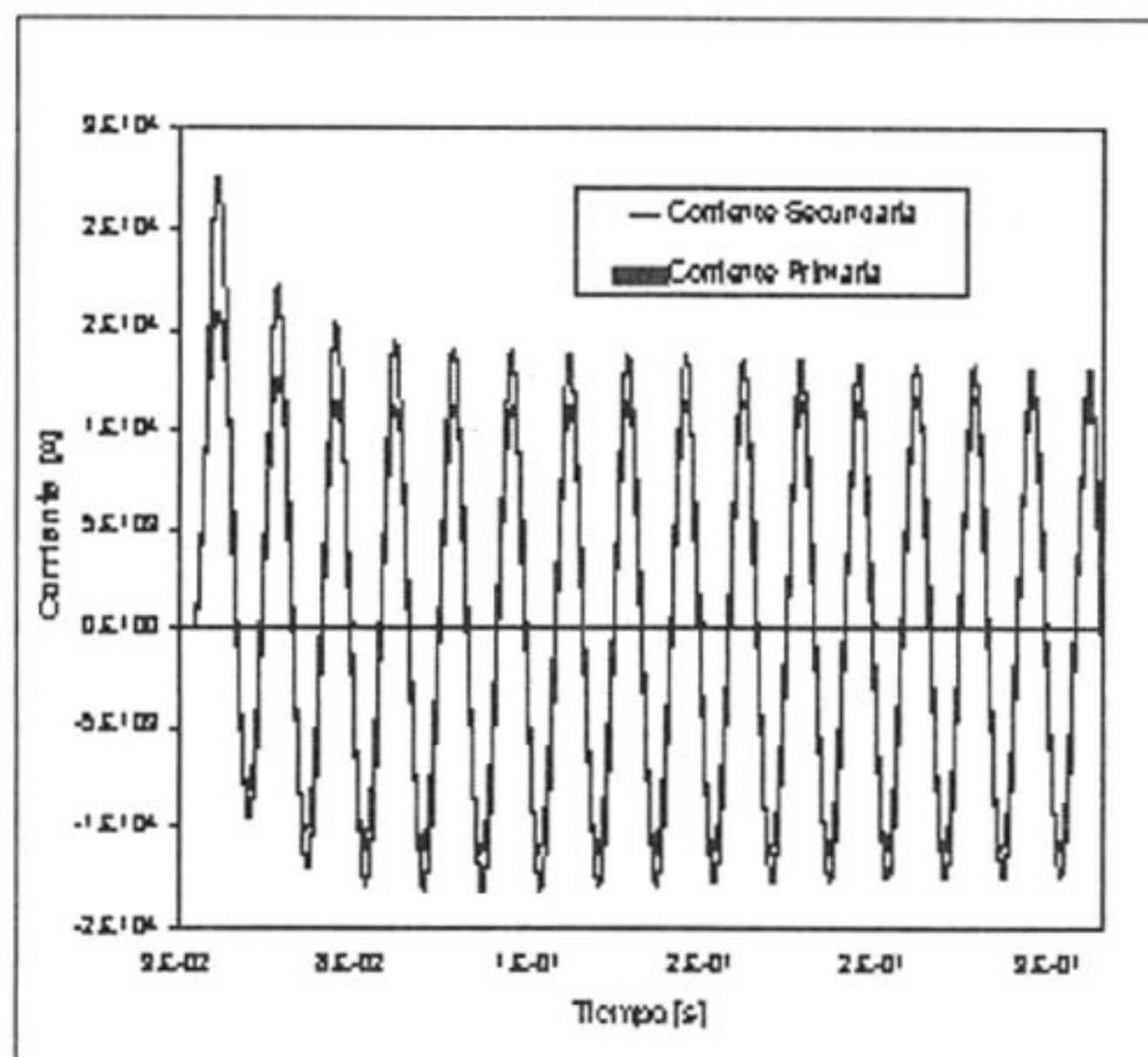


Figura 2. Corrientes de corto transformador 75 kVA.

En la figura 2 se muestran los oscilogramas tomados durante la prueba de cortocircuito a un transformador de distribución trifásico de 75 kVA 13200-240 V. En ellas están superpuestas la corriente primaria y secundaria del transformador, la curva más sobresaliente representa la corriente primaria referida al secundario; esta corriente tiene un pico superior en un 60% a la corriente por el secundario lo cual representa el efecto inrush durante la prueba.

4. SIMULACIÓN DE CAMPOS Y CÁLCULO DE FUERZAS

Para la simulación de los campos magnéticos al interior del transformador se empleó el programa ELCUT 3.0, el cual permite obtener una respuesta bidimensional del comportamiento magnetoestático del sistema mediante el método de elementos finitos.

Para realizar la simulación se definieron dos zonas de estudio:

- Zona 1: Corresponde a la porción de los devanados comprendida dentro de la ventana del núcleo.
- Zona 2: Considera la porción de las bobinas ubicadas fuera de la ventana del núcleo.

Ambas zonas son diferenciadas claramente por la geometría y las condiciones de frontera impuestas por la presencia o no del núcleo en la simulación.

La geometría en ambos casos se construyó a partir de los datos técnicos suministrados por el fabricante y se consideraron cada una de las capas de conductores tanto del devanado de alta tensión como el de baja tensión. En el caso del devanado de alta tensión en el cual los conductores son de sección aproximadamente rectangular, se consideró cada capa como una barra sólida de conductor para disminuir el número de elementos en la simulación. También se consideraron las zonas correspondientes a las etapas de regulación de forma independiente para poder simular los campos de dispersión ante diferentes posiciones del cambiador de derivaciones.

Las fuentes de campo corresponden a las corrientes a través de los devanados, definidas como densidades de corriente superficial. En la simulación se emplea la máxima corriente a través de los devanados, la cual produce fuerzas máximas sobre éstos.

Para determinar el valor de densidad de corriente a emplear para cada devanado se consideraron dos situaciones. En la primera se presupone igualdad de amperios-vuelta entre ambos devanados (Caso teórico), en este caso las corrientes máximas por cada devanado cumplen con la relación de transformación y son calculadas a partir de la impedancia de cortocircuito mediante la ecuación (3).

$$I_{pico\ asym} = I_{sym} * \left[1 + \text{Sen}(\phi) * e^{-\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right)} \right] \quad (3)$$

I_{sym} : Corriente simétrica, calculada a partir de los datos de impedancia de cortocircuito.

ϕ : Arco tangente de la relación X/R del transformador.

En el segundo caso (Caso real), las corrientes empleadas para determinar las densidades se obtuvieron mediante medición directa de las máximas corrientes pico primaria y secundaria, durante pruebas de cortocircuito a transformadores reales.

Debido a que la prueba de cortocircuito es realizada para la posición nominal, mínima y máxima del cambiador de derivaciones, inicialmente se determinó mediante simulación de los casos teóricos, cuál de estas tres condiciones era más crítica en cuanto a magnitud y desequilibrio de las fuerzas actuantes. La regulación de tensión de transformadores de distribución en Colombia está estandarizada como +1-3*2.5%, por esta razón el mayor desequilibrio y por ende la condición más crítica correspondió, inicialmente a la posición nominal del transformador ("tap" 2).

Por cada capa de conductor se determinaron 20 valores de fuerza, utilizando la ecuación (1), esto se realizó

dividiendo cada capa en igual número de elementos, de tal forma que se pudiera considerar como constante la densidad de flujo en cada uno de estos elementos. Para cada uno de ellos se calculó la densidad de campo magnético como la correspondiente al centro geométrico del elemento y se discriminó en densidad de campo radial y axial (). El $\hat{B}_x$, $\hat{B}_y$ e corriente asignado a cada elemento fue igual a la densidad de corriente de cada devanado multiplicada por el área del elemento. Fue necesario considerar las correspondientes direcciones tanto de corriente como de campo magnético para determinar el sentido y dirección de las fuerzas. Estos datos también sirvieron como entrada de otros modelos computacionales, desarrollados para analizar el comportamiento mecánico de los devanados del transformador durante el cortocircuito [7].

5. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

La figura 3 muestra la distribución del campo magnético de dispersión de un transformador monofásico de 25 kVA, correspondiente al caso teórico. La figura 4 muestra la distribución de la fuerza axial total de cada devanado para el caso teórico. Las fuerzas mostradas son el resultado de sumar los valores obtenidos para cada capa; éstos son discriminados por altura.

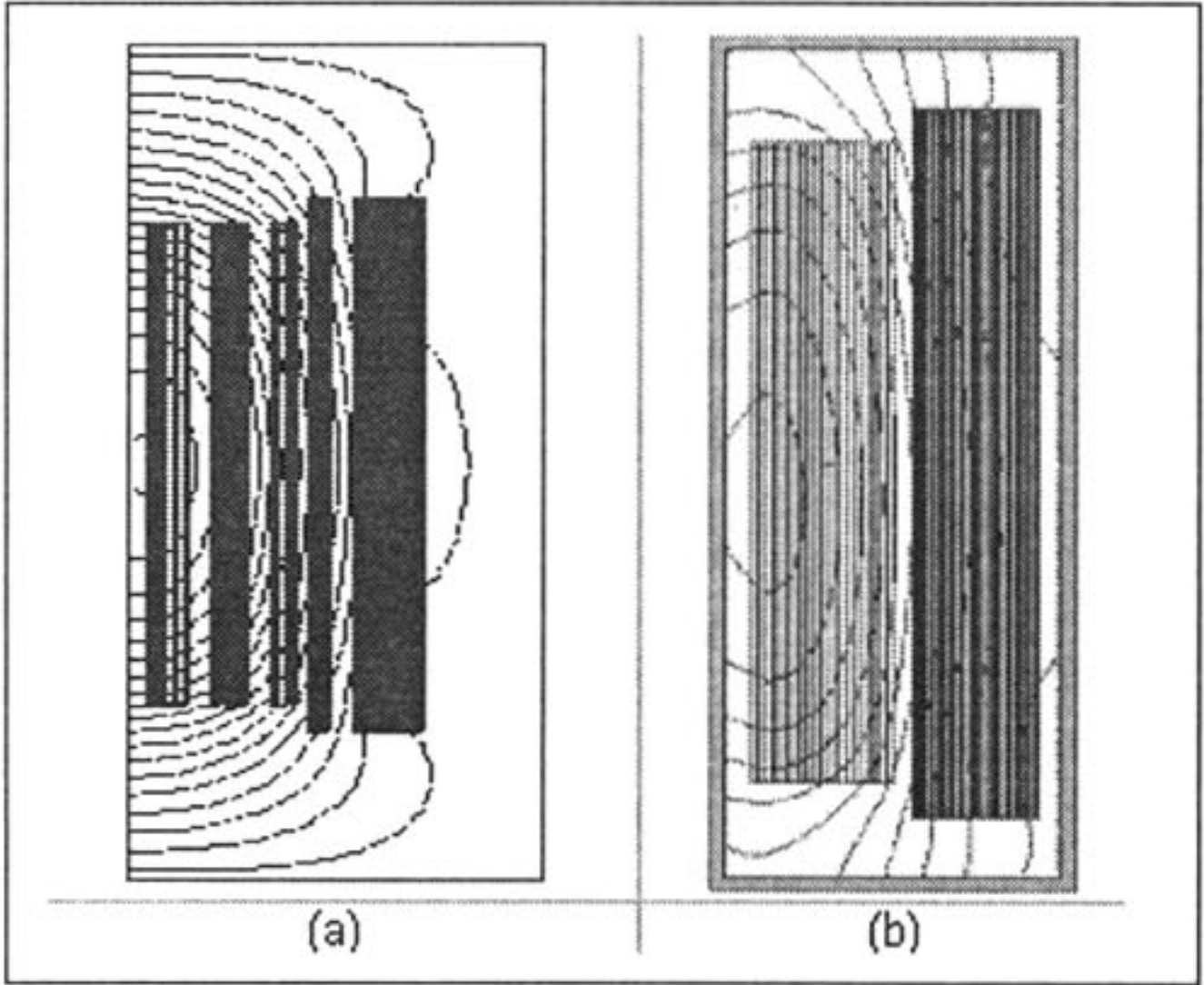


Figura 3. (a) Zona fuera de la ventana, (b) zona dentro de la ventana

En la figura 5 se muestra la misma distribución de fuerzas obtenida para un aumento de 30% en los amperios-vuelta del devanado primario, correspondientes a un caso real. Sólo son mostrados los resultados de fuerzas axiales en la zona fuera de la ventana ya que éstos son los más relevantes porque para transformadores de distribución las restricciones mecánicas en esta parte de los devanados son generalmente mínimas.

Se puede observar que las fuerzas axiales tienden a ser mayores en los extremos de los devanados y prácticamente cero en el centro, esto es, debido a que en los extremos la magnitud de la componente

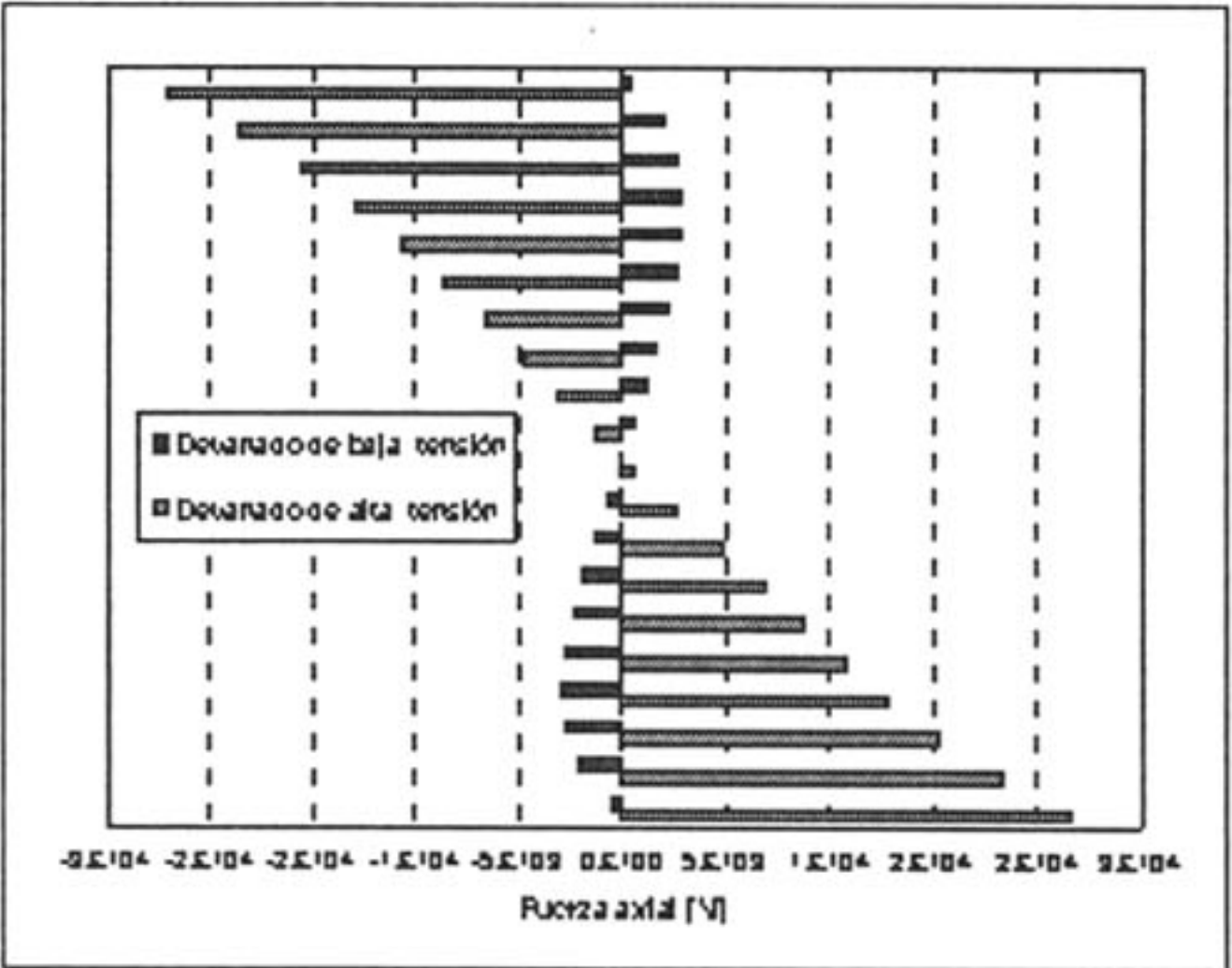


Figura 4. Distribución de la fuerza axial por la altura para los devanados, caso teórico.

radial de densidad de campo ($\hat{B}_x$) es más pronunciada y en el centro de los devanados mínima.

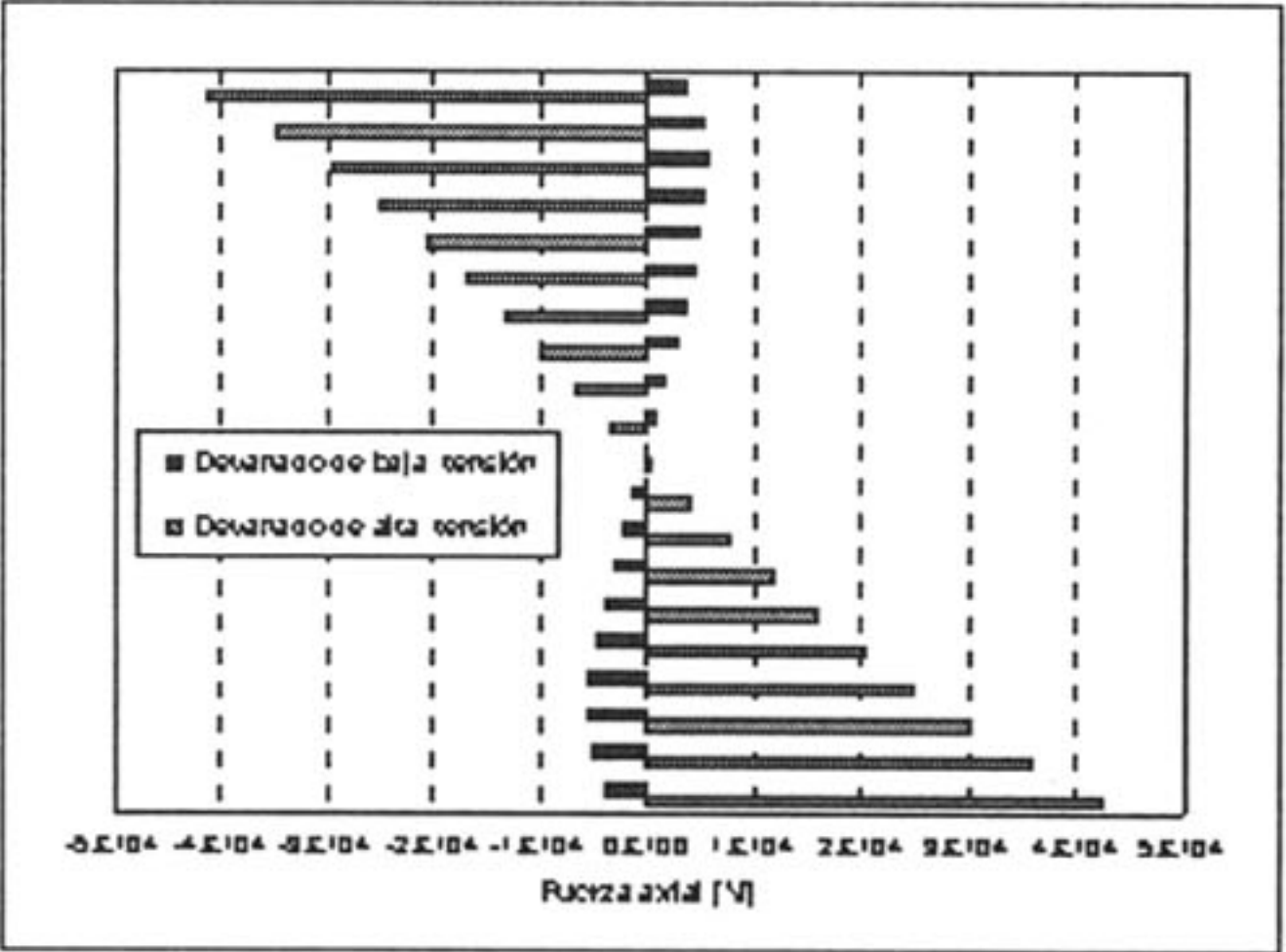


Figura 5. Distribución de la fuerza axial por la altura para los devanados, caso real.

En la Tabla I se indican las resultantes de fuerzas axiales para ambos casos.

Tabla I. Resultantes de fuerzas axiales.

Devanado	Alta [N]	Baja [N]	Diferencia [N]
Teórico	-2511.8	1224.46	3736
Real	-8952.6	1589.34	10541.94

Cuando existe desigualdad de amperios-vuelta la magnitud de las fuerzas se incrementa considerablemente respecto al caso teórico; así mismo, la diferencia entre las resultantes de las fuerzas entre ambos devanados aumenta.

6. CORTOCIRCUITO POSTERIOR A LA ENERGIZACIÓN

Se ha demostrado que la igualdad de amperios-vuelta del transformador durante la prueba de cortocircuito puede llegar a ser afectada por la forma de realización de ésta y a su vez que esta asimetría afecta la distribución de las fuerzas sobre los devanados. Para reducir el efecto de la «inrush» durante la prueba de cortocircuito las normas [3], [4], sugieren que cuando el cortocircuito se realiza previo a la energización, el devanado más alejado del núcleo sea quien se conecte a la fuente. Esta sugerencia puede llegar a ser efectiva en transformadores con núcleo apilado y una diferenciación apreciable entre el área de la espira media de ambos devanados pero posiblemente no en transformadores de distribución con núcleos arrollados y devanados con poca diferencia entre las áreas de sus espiras medias.

Para verificar esta hipótesis, en el LAT, se implementó el método de cortocircuito posterior a la energización, también contemplado en las normas y mediante el cual se puede aislar el fenómeno de energización y el de cortocircuito para así determinar la influencia real de la inrush durante la prueba. Para ello es relevante poder obtener medidas de la corriente primaria y secundaria durante el cortocircuito.

Las modificaciones en el campo de pruebas se realizaron de tal forma que permitiesen realizar el ensayo de cortocircuito mediante cualquiera de los dos métodos (corto previo ó posterior a la energización). Esto requirió modificaciones en el circuito de control de la prueba, cambio del esquema de protección, adquisición de nuevos equipos de medición y la adición de un interruptor de bajo voltaje para la realización del cortocircuito posterior a la energización.

En la figura 6 se muestra el diagrama esquemático del campo de pruebas considerando el corto posterior a la energización.

En la figura 7 se muestra una de las pruebas de corto en las cuales se empleó el método del corto posterior a la energización.

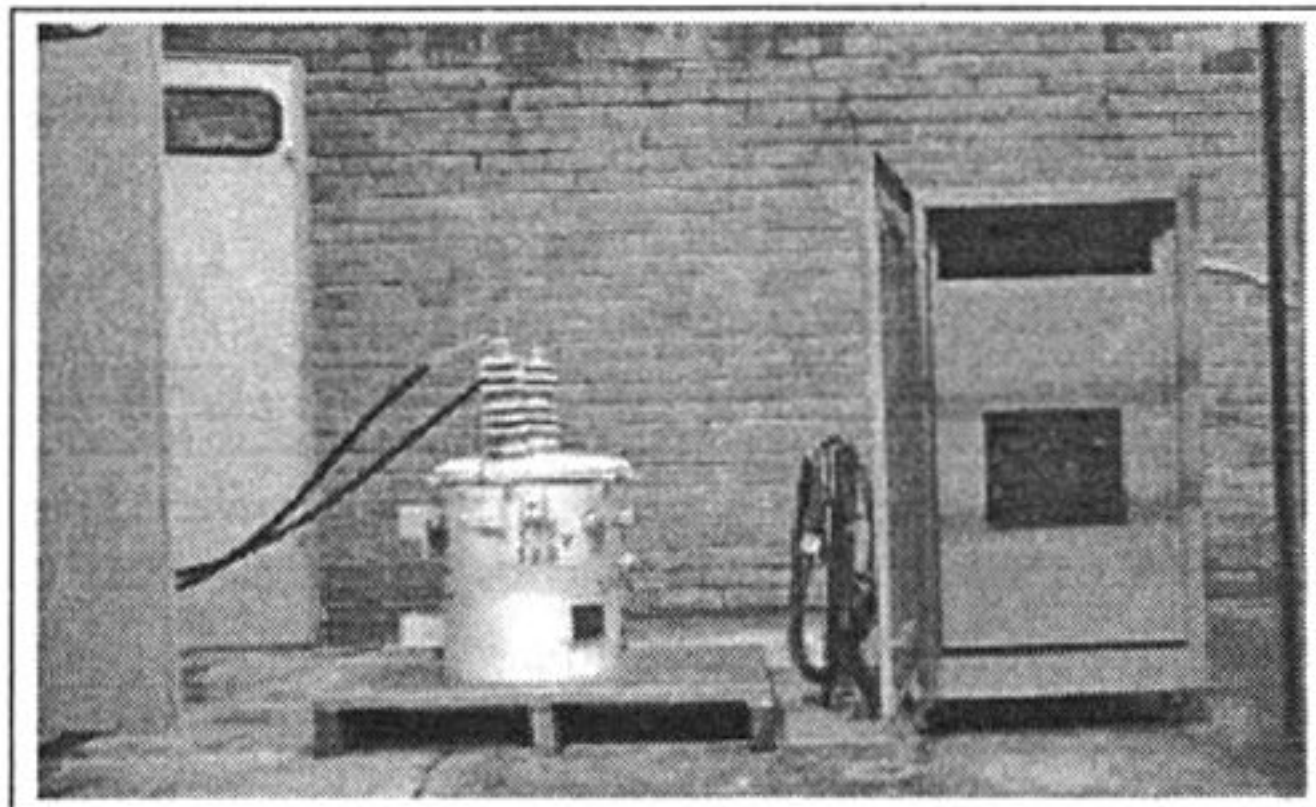


Figura 7. Fotografía del montaje para el corto posterior a la energización

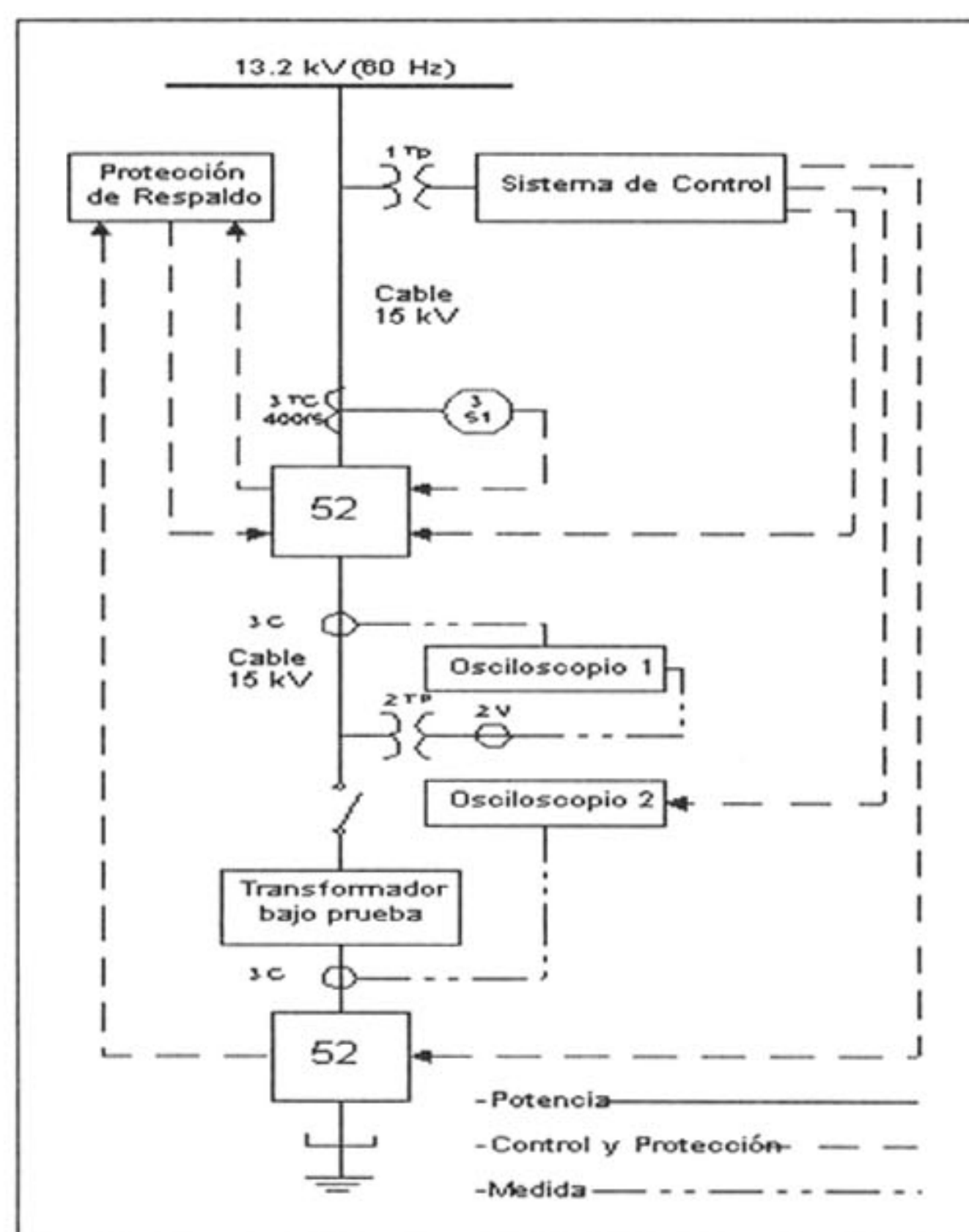


Figura 6. Esquemático del montaje de la prueba de cortocircuito, para el corto posterior a la energización.

7. CONCLUSIONES

- En transformadores de distribución la corriente «inrush» sobrepasa los valores típicos indicados por la literatura técnica.
- Ya que la magnitud de la «inrush» depende entre otros factores del ángulo de energización, esta condición es crítica para la prueba de cortocircuito en la cual se exige que la energización del transformador se realice cerca al cruce por cero de la señal de tensión.
- Debido a que uno de los factores que determina el nivel de saturación del transformador es el área de la espira media de los devanados, el fenómeno «inrush» durante la prueba de cortocircuito afecta tanto a transformadores con disposición de sus devanados alta-baja como a los transformadores con disposición baja-alta. Queda por determinar en qué proporción es afectado cada uno.
- El efecto de la magnetización sobre las fuerzas electromagnéticas en los devanados se traduce en incrementos considerables de la magnitud de dichas fuerzas en cada punto y además aumenta la asimetría de las resultantes, volviendo aún más crítica la condición mecánica a la cual se somete la máquina.
- El nivel de detalle de la simulación del campo magnético al interior del transformador, permitió

determinar que los devanados del transformador no se comportan mecánicamente como un todo [7] justificando la necesidad de discriminar los cálculos de fuerza por cada capa de conductor.

- En muchos casos se presentaron fuerzas axiales de tracción en ciertas partes del devanado como consecuencia de la distribución del campo magnético y la disposición de los devanados.
- Cuando se consideró igualdad de amperios-vuelta el mayor desequilibrio ocurrió para la posición nominal del "tap". Por el contrario cuando se consideró desigualdad de amperios-vuelta el caso más crítico correspondió a la posición de máxima tensión primaria; es decir, considerando la totalidad de espiras del devanado de 13.2 kV.
- Hasta el momento los modelos empleados corresponden a una condición magnetoestática como punto de partida para el cálculo de las fuerzas; el siguiente paso es plantear modelos para la determinación del comportamiento magnetodinámico de la máquina.
- Actualmente se están realizando las pruebas previas para la puesta en punto del nuevo sistema, el paso siguiente es determinar la efectividad del empleo del corto posterior a la energización como solución para contrarrestar el efecto «inrush» durante la prueba y a la vez determinar el aporte real del fenómeno de magnetización.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] CADAVID, H y APONTE, G. "Evaluación de la Aptitud al Cortocircuito de los Transformadores de Distribución Construidos en Colombia", Revista Electrotécnica No 4, Marzo de 1997.
- [2.] APONTE, G., CADAVID, H., CASTRO, F., LOZANO, C. "Colombian Experiences in Distribution Transformer Withstand Aptitude Test", X Simposio Internacional sobre Ingeniería de Alto Voltaje, ISH'97, Agosto 25-29 de 1997, Montreal Canadá.
- [3.] ANSI/IEEE C57.12.90-1993 "Guide for Short-Circuit Testing of distribution and power Transformers"
- [4.] Norma Técnica Colombiana NTC 532 "Transformadores, Aptitud de Soportar el Cortocircuito"
- [5.] ARANGO, E. "Análisis del Efecto de la Disposición de los Devanados del Transformador de Distribución ante el Cortocircuito Franco" Tesis, Universidad del Valle, 1999.
- [6.] GIL, G. "Diseño de Transformadores de Distribución, Efectos de la corriente de Energización" Tesis, Universidad del Valle, 1999.
- [7.] ISAACS, M., JARAMILLO, G. "Modelamiento y Medición de Esfuerzos Mecánicos en un Transformador de Distribución Sometido a Cortocircuito Franco", Tesis Universidad del Valle, 2000

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas", COLCIENCIAS por el financiamiento parcial de la investigación y a SIEMENS Colombia por el apoyo brindado al proyecto.

AUTORES



Diego Fernando García G. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 1999; estudiante de Maestría en sistemas de Generación de Energía, profesor auxiliar Universidad del Valle.

Hector Cadavid Ramirez. Ingeniero Electromecánico, Ph.D. en Ingeniería Eléctrica del Instituto Superior Energético de Moscú, 1996, Profesor Titular de la Escuela Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, y Decano de la Facultad de Ingeniería.
hcadavid@gralta.edu.co.



Ferley Castro Aranda. Ingeniero Electricista, y M.Sc de la Universidad del Valle. Profesor titular de la Universidad del Valle desde 1999. Actualmente realiza sus estudios de doctorado, en la Universidad Politécnica de Cataluña.

José N Alfonso B. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, 1992 y Especialista en Administración Financiera de la Escuela de Administración de Negocios 2000. Gerente Fábrica de Transformadores de Distribución SIEMENS.