



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN  
TEÓRICA DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO EN  
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA.**

**CONVOCATORIA 3-2015  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES**

**INFORME FINAL**



**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ALTA TENSIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**Febrero 1 de 2018**

## Tabla de contenido

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO .....</b>                             | <b>2</b>  |
| <b>2. RESUMEN EJECUTIVO .....</b>                                        | <b>3</b>  |
| <b>3. SÍNTESIS DEL PROYECTO: .....</b>                                   | <b>4</b>  |
| 3.1 INTRODUCCIÓN .....                                                   | 4         |
| 3.2 OBJETIVO GENERAL .....                                               | 5         |
| 3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                          | 5         |
| 3.4 METODOLOGÍA .....                                                    | 5         |
| 3.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO DE LA NORMA IEC 60076-5 .....         | 8         |
| 3.6 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO ..... | 9         |
| 3.7 CALCULO DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO .....                            | 11        |
| 3.8 CALCULO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO .....                          | 13        |
| 3.9 RESULTADOS .....                                                     | 13        |
| 3.10 CONCLUSIONES .....                                                  | 24        |
| 3.11 REFERENCIAS .....                                                   | 24        |
| <b>4. IMPACTOS ACTUAL O POTENCIAL: .....</b>                             | <b>26</b> |
| <b>5. PRODUCTOS: .....</b>                                               | <b>27</b> |
| <b>6. DETALLE DE PRODUCTOS .....</b>                                     | <b>29</b> |

Fecha de presentación del Informe: Día  Mes  Año

## 1. Datos generales del Proyecto

|                                                                                                                                                               |                                            |                 |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Código del proyecto: 2853                                                                                                                                     |                                            |                 |                 |
| Título del proyecto: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN TEÓRICA DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA. |                                            |                 |                 |
| Facultad o Instituto Académico: INGENIERÍAS                                                                                                                   |                                            |                 |                 |
| Departamento o Escuela: ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA                                                                                         |                                            |                 |                 |
| Grupo (s) de investigación: GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ALTA TENSIÓN GRALTA                                                                                     |                                            |                 |                 |
| Entidades:                                                                                                                                                    |                                            |                 |                 |
| Palabras claves: Cortocircuito, transformador de distribución, transformador de potencia, esfuerzos y fuerzas dinámicas, simulación.                          |                                            |                 |                 |
| Investigadores <sup>1</sup>                                                                                                                                   | Nombre                                     | Tiempo asignado | Tiempo dedicado |
| Investigador Principal                                                                                                                                        | Guillermo aponte Mayor                     | 10 horas semana | 10 horas semana |
|                                                                                                                                                               |                                            |                 |                 |
| Coinvestigadores                                                                                                                                              | Héctor Cadavid Ramírez                     | 5 horas semana  | 5 horas semana  |
|                                                                                                                                                               | Andrés Felipe Zúñiga                       | 20 horas semana | 20 horas semana |
|                                                                                                                                                               |                                            |                 |                 |
| Otros participantes                                                                                                                                           | Guillermo Andrés Díaz (asesor)             | 2 horas semana  | 2 horas semana  |
|                                                                                                                                                               | Ibis Samir Angulo (estudiante semillero)   |                 |                 |
|                                                                                                                                                               | Fernando Ríos Castro (estudiante Pregrado) |                 |                 |

<sup>1</sup> Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

## **2. Resumen ejecutivo**

La prueba de aptitud al cortocircuito permite verificar la capacidad del transformador para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos generados durante una falla externa. El ensayo es considerado como el método directo para evaluar esta condición, sin embargo, debido a los altos costos y la ausencia de laboratorios con la capacidad suficiente para su realización, desde el año 2006 la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) definió un procedimiento alternativo de validación basado en el cálculo teórico de las fuerzas y esfuerzos originados por un cortocircuito. En el procedimiento, los valores calculados son comparados con los obtenidos en un transformador de referencia sometido al ensayo o con los valores definidos por la norma.

En este trabajo se realizó una revisión del procedimiento de validación teórica y se propuso una metodología, se desarrolló un caso de análisis teórico para un transformador trifásico de 400kVA y un caso práctico para un equipo de 75kVA el cual fue instrumentado para medir las deformaciones producidas por fuerzas radiales durante un cortocircuito.

Las fuerzas fueron calculadas a través del método de elementos finitos y los esfuerzos se estimaron a partir de fórmulas aproximadas. Los resultados del cálculo permiten concluir, para el caso teórico, que el equipo es teóricamente apto para soportar los esfuerzos de cortocircuito.

El transformador de 75kVA fue sometido a ensayos de rutina y prueba de respuesta en frecuencias antes y después del ensayo de aptitud al cortocircuito, a pesar de que se registraron grandes esfuerzos radiales en los conductores de los devanados, estos no presentaron deformaciones permanentes.

### **Abstract**

The short-circuit withstand test verifies that transformers support the thermal and mechanical stresses generated during an external failure. The test is considered as the direct way to evaluate this condition, however, due to high costs and lack of laboratories with enough capacity, since 2006, international Electrotechnical Commission (IEC) defined an alternative procedure based on theoretical calculations of forces and stresses. In this procedure, the calculated values are compared with those obtained in a reference transformer subjected to test or with standard recommended values.

In this document, the theoretical validation procedure is reviewed and a methodology is proposed, a theoretical case was developed for a 400kVA three phase transformer and a practical case for a 75kVA transformer with strain gages in.

The forces were calculated through finite elements method and stresses were estimated from approximate formulas. The calculated results allow to conclude, in the theoretical case, that the transformer is suitable to support the forces and mechanical stresses during a short-circuit.

The 75kVA transformer was subjected to routine tests and frequency response analysis prior and after the short circuit withstand test, despite large radial stresses were registered the windings were not deformed.

### **3. Síntesis del proyecto:**

#### **3.1 Introducción**

El ensayo de aptitud al cortocircuito permite verificar la capacidad de un transformador para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos producidos por sobre-corrientes. El ensayo se realiza conectando el transformador a una red de gran capacidad que pueda suministrar la potencia requerida por la prueba, a modo de ejemplo, un transformador de 100 KVA con una impedancia de cortocircuito de 4,0% demanda una potencia de 2500 KVA durante el ensayo, los requerimientos normativos obligan a que el ensayo se efectué en instalaciones especializadas para pruebas de alta potencia disponibles en Norteamérica y Europa principalmente.

En Colombia el ensayo de aptitud al cortocircuito empezó a ser obligatorio para transformadores de distribución en el año de 1994, esto motivó que en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle se implementara un campo de pruebas de cortocircuito, en estas instalaciones se pueden realizar ensayos en transformadores trifásicos de hasta 500 kVA. A lo largo de los 20 años de operación, el campo de pruebas de cortocircuito ha contribuido con el desarrollo y mejoramiento en la calidad de los transformadores de distribución fabricados en Colombia, sin embargo, este laboratorio no cubre todas las necesidades de ensayo de los fabricantes nacionales e internacionales de transformadores.

Ante las dificultades que representa la realización del ensayo, la Comisión electrotécnica internacional propuso un procedimiento de validación teórica de la aptitud al cortocircuito en transformadores, este se basa en el cálculo analítico de fuerzas y esfuerzos mecánicos.

En este proyecto se validó una metodología para el cálculo analítico de esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito en transformadores de distribución y media potencia, siguiendo las indicaciones de la norma IEC 60076-5 2006, adecuándola a las condiciones de los transformadores de distribución y considerando los diseños utilizados por los fabricantes nacionales, en la parte final se desarrollaron dos casos de aplicación: uno teórico aplicando la metodología en un equipo de 400kVA de núcleo enrollado y devanados concéntricos rectangulares y un caso práctico en un transformador de 75kVA instrumentado con sensores de deformación en las bobinas.

### 3.2 Objetivo general

Definir una metodología para el cálculo analítico de esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito en transformadores de distribución y media potencia, de acuerdo a lo planteado en la norma IEC 60076-5.

### 3.3 Objetivos específicos

- Identificar y clasificar los métodos para el cálculo analítico de los esfuerzos electrodinámicos que se presentan durante una condición de cortocircuito en transformadores de distribución y media potencia, hasta 44 kV y 20 MVA.
- Seleccionar un método de cálculo analítico de los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito aplicable a transformadores de distribución y media potencia.
- Definir una metodología para la aplicación de la validación teórica de la aptitud para soportar esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito de acuerdo a lo definido por la norma IEC 60076-5 2006.
- Realizar una aplicación de la metodología en el cálculo de los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito en un transformador de media potencia.

### 3.4 Metodología

El objetivo planteado fue el de validar una metodología para el cálculo analítico de esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito en transformadores de potencia, para lo cual se siguió la norma IEC 60076-5 2006.

Inicialmente se hizo una revisión bibliográfica estudiando los métodos para el cálculo de fuerzas de cortocircuito aplicables a las diferentes formas constructivas de los transformadores, se estudiaron las formulaciones teóricas para el cálculo de esfuerzos mecánicos y la estimación de fuerzas, además de los modos de falla que las fuerzas de cortocircuito pueden ocasionar en los transformadores (ver

Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Principales actividades de la revisión bibliográfica.

| Actividades                                                                                                                                                                                 | Resumen resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Búsqueda y organización de documentación técnica relacionada con los métodos de cálculo de esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito en transformadores de media potencia y distribución. | Fuerzas de cortocircuito<br>Las fuerzas electromagnéticas son de carácter oscilatorio y actúan en un sistema elástico complejo compuesto de diversos materiales (cobre, aislamiento, estructuras no metálicas, acero) las fuerzas se transmiten dinámicamente a través de los diversos componentes de los devanados y sus estructuras de sujeción y |

|                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                      | <p>soporte. Las fueras aplicadas en varias partes pueden ser muy diferentes en forma y magnitud a las fuerzas electromagnéticas generadas. El enfoque del cálculo de fuerzas es estático.</p> <p>Métodos de calculo<br/>Dentro de los métodos de cálculo encontrados destacan:</p> <p>Método de las imágenes, asume una configuración plana de los devanados.</p> <p>Métodos numéricos (aplicados a geometrías asimétricas).</p> <p>Método Analíticos (Roth y Rabins) aplicados principalmente a geometrías planares.</p>  |
| Búsqueda de documentación donde se soporte la aplicación de la guía de validación teórica de esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito de acuerdo a lo estipulado en la norma IEC 60076-5 de 2006. | El método de verificación no cubre en detalle transformadores que tienen los devanados hechos de cables o en láminas, o bobinas tipo sándwich tanto circulares como no circulares, así como transformadores CAT I con características peculiares. Sin embargo, para transformadores CAT I es también posible adoptar un procedimiento conformado por una comparación directa de algunos valores de esfuerzos claves relativos a la unidad bajo evaluación con respecto a un transformador similar exitosamente probado.    |
| Revisión de bibliografía relacionada con los diseños de los devanados de transformadores de distribución y media potencia.                                                                           | <p>Los diseños más comunes de los devanados de los transformadores son:</p> <p>Devanados helicoidales</p> <p>Devanados tipo capas (devanados de media tensión y baja corriente)</p> <p>Devanados en disco</p> <p>Devanados en platina o flejes (habituales en bobinas de baja tensión y alta corriente).</p> <p>Constructivamente se tienen dos tipos de transformadores (acorazados y tipo núcleo). Los transformadores tipo núcleo son los más comunes para el alcance estipulado en este proyecto de investigación.</p> |

Tabla 2. Clasificación de las referencias seleccionadas.

| Referencia | Tipo de documento      | Tema principal          | País        | Año  | Tema del documento     |
|------------|------------------------|-------------------------|-------------|------|------------------------|
| [1]        | Estándar internacional | Metodologías            | SUIZA       | 2006 | (a), (b), (c), (d)     |
| [2]        | Estándar internacional | Procedimientos          | SUIZA       | 2006 | (i)                    |
| [3]        | Reporte ensayo         | Pruebas y ensayos       | ITALIA      | 2010 | (i)                    |
| [4]        | Tesis                  | Cálculos y simulaciones | SUDÁFRICA   | 2007 | (d), (e) y (f)         |
| [5]        | Libro                  | Conceptos               | ITALIA      | 2006 | (a), (b), (h)          |
| [6]        | Libro                  | Metodologías            | REINO UNIDO | 1966 | (a), (b),(c), (d), (h) |

|      |          |                         |               |      |               |
|------|----------|-------------------------|---------------|------|---------------|
| [7]  | Ponencia | Metodologías            | CHINA         | 2003 | (a)           |
| [8]  | Articulo | Pruebas y ensayos       | HOLANDA       | 2007 | (h), (i)      |
| [9]  | Articulo | Pruebas y ensayos       | HOLANDA       | 2009 | (h)           |
| [10] | Articulo | Cálculos y simulaciones | RUMANIA       | 2009 | (d), (e), (f) |
| [11] | Libro    | Procedimientos          | EEUU          | 2012 | (c), (d), (f) |
| [12] | Articulo | Pruebas y ensayos       | ALEMANIA      | 2014 | (h), (i)      |
| [13] | Articulo | Simulaciones            | COREA DEL SUR | 2012 | (d)           |
| [14] | Articulo | Simulaciones            | IRÁN          | 2005 | (d)           |
| [15] | Articulo | Cálculos matemáticos    | INDIA         | 2011 | (d)           |
| [16] | Ponencia | Cálculos y simulaciones | BRASIL        | 2007 | (d), (e)      |
| [17] | Ponencia | Cálculos y simulaciones | BRASIL        | 2006 | (e)           |
| [18] | Ponencia | Cálculos matemáticos    | EEUU          | 1972 | (f)           |
| [19] | Ponencia | Pruebas y ensayos       | EEUU          | 1972 | (f),(h)       |
| [20] | Ponencia | Pruebas y ensayos       | EEUU          | 1975 | (h)           |
| [21] | Tesis    | Cálculos matemáticos    | ARGENTINA     | 2013 | (d), (e), (g) |

**TEMAS PRINCIPALES**

- (a) Formulaciones para cálculo de fuerzas en transformadores tipo núcleo
- (b) Formulaciones para cálculo de fuerzas en transformadores acorazados
- (c) Formulaciones para cálculo de esfuerzos de cortocircuito
- (d) Métodos analíticos de cálculo de fuerzas
- (e) Métodos numéricos de cálculo de fuerzas
- (f) Análisis dinámico del devanado y estructuras de sujeción
- (g) Cálculo de fuerzas en transformadores de conductores laminados
- (h) Pruebas y ensayos de aptitud al cortocircuito.
- (i) Pruebas y procedimiento de validación teórica



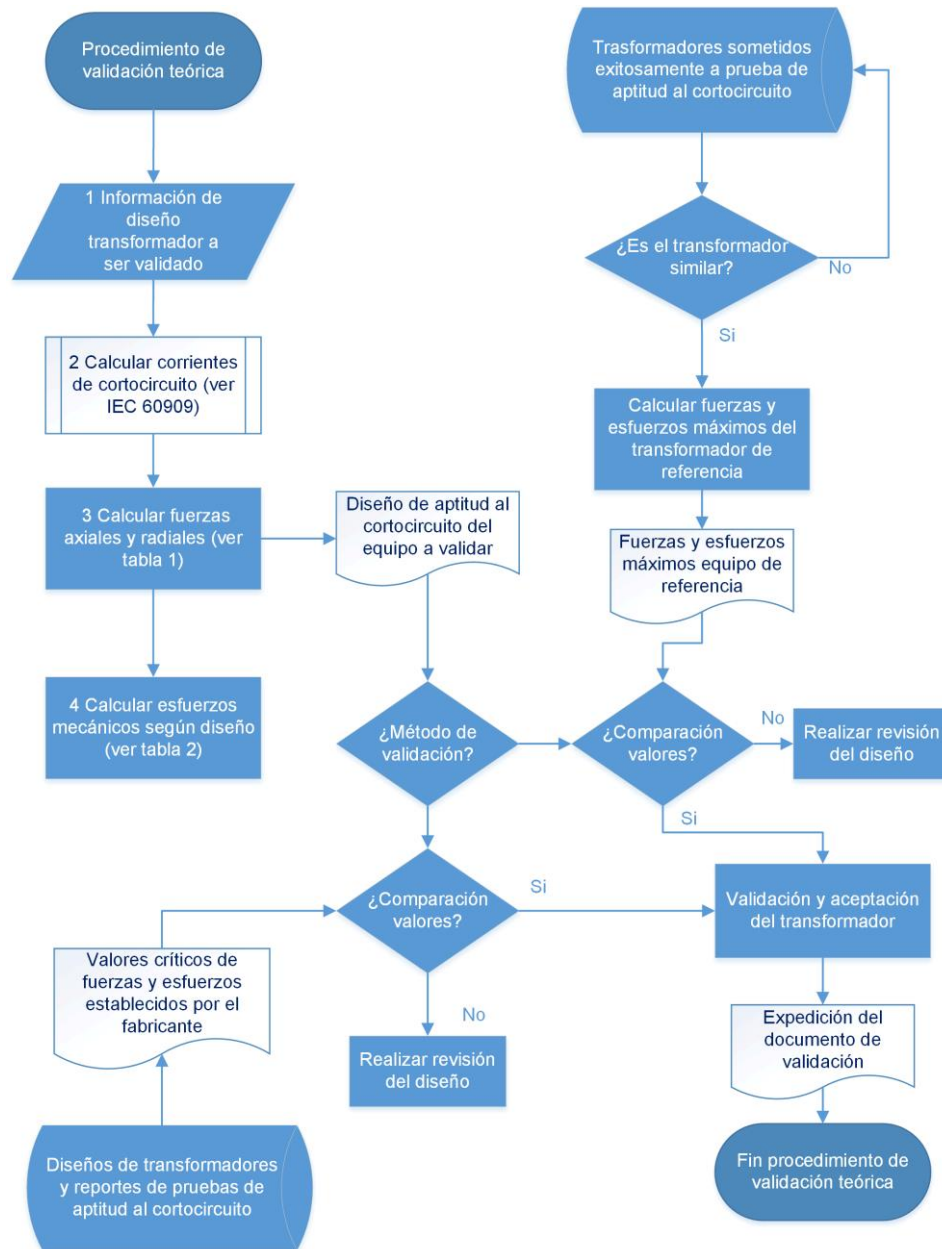
### **3.5 Descripción general del método de la norma IEC 60076-5**

El procedimiento de validación se basa en la comparación de esfuerzos claves y características relativas al transformador bajo evaluación con respecto los límites de diseño de aptitud al cortocircuito establecidos por el fabricante en la construcción de sus equipos o con los límites dados por la norma. También se puede hacer la validación comparando los valores de fuerzas y esfuerzos con los de un transformador de referencia (con características constructivas similares) sometido exitosamente a una prueba de aptitud al cortocircuito. Figura 1 se resume el diagrama de flujo del procedimiento de validación teórica.

El cálculo de fuerzas electromagnéticas es preliminar al cálculo de esfuerzos mecánicos resultantes. Los esfuerzos que aparecen en los devanados o estructuras de sujeción son el resultado de varios tipos de fuerzas adicionales a las que se generan electromagnéticamente, algunas de estas son producidas por: La inercia, la elasticidad del aislamiento y la fricción.

Las fuerzas electromagnéticas deben ser entendidas como una fuerza de acción mientras la inercia, la elasticidad y la fricción son fuerzas de reacción. Por lo tanto, la determinación de esfuerzos mecánicos requiere que el problema sea abordado desde el punto de vista dinámico, considerando tanto las fuerzas de acción como las de reacción, sin embargo, calcular los esfuerzos mecánicos es bastante complejo debido a la gran cantidad de variables involucradas.

Figura 1. Procedimiento de validación teórica según norma IEC 60076-5.



### 3.6 Definición del sistema de medida de esfuerzos de cortocircuito.

Dentro del alcance del proyecto se planteó realizar la medición de los esfuerzos durante una prueba de aptitud al cortocircuito. Para esta actividad se trabajó en conjunto con el grupo de mejoramiento industrial (GIMI) de la escuela de ingeniería mecánica. Para ello se construyó un

sistema que emulará el montaje de los sensores de deformación sobre los conductores de los devanados. En la Figura 2 se presenta una imagen del montaje para las pruebas realizadas.

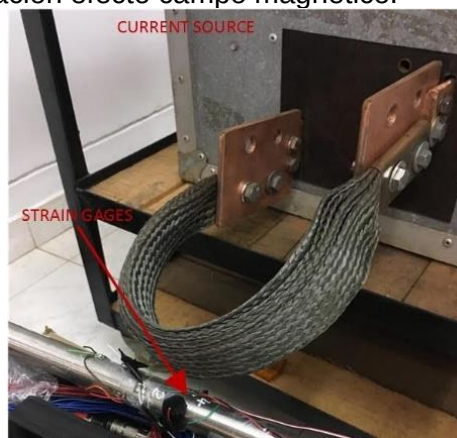
Figura 2: montaje de prototipo de devanado para prueba de medición de esfuerzos.



Los ensayos consistieron en aplicar tensión a los conductores a través de fuerzas conocidas, para ello se utilizó una prensa hidráulica que permite generar esfuerzos dinámicos sobre materiales. Los resultados de los ensayos permiten evidenciar que, a pesar de contar con una capa aislante entre los conductores y el sensor, no se presentan diferencias en los esfuerzos medidos.

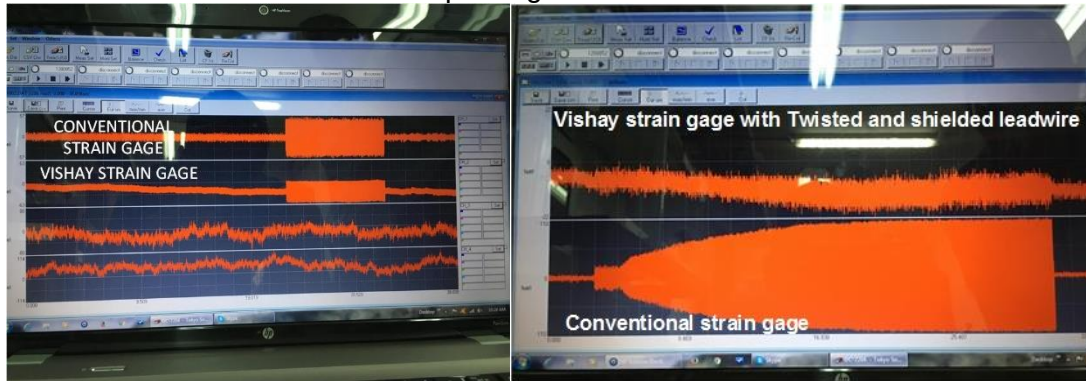
Una vez realizadas las pruebas mecánicas sobre el sistema de medida, se efectuaron pruebas tendientes a verificar si la medición del sensor no se ve afectada por la alta concentración de campo magnético, esta condición estará presente durante las pruebas en el prototipo real. Para estos ensayos se dispuso el sensor cerca de una fuente de alta corriente disponible en el laboratorio de alta tensión (Figura 3).

Figura 3. Montaje para verificación efecto campo magnético.



Inicialmente las pruebas mostraron una afectación del registro producto del campo magnético, se repitieron los ensayos utilizando un sensor con conductor trenzado y apantallado, con esto se redujo el efecto del campo magnético sobre la medición (ver Figura 4).

Figura 4. Verificación del efecto del campo magnético.



Con estas pruebas se definió totalmente el sistema de medida requerido para el registro de los esfuerzos en devanados de transformadores durante un cortocircuito. En resumen, el sistema de medida estuvo compuesto por:

- 1) Strain gage Vishay referencia H06-AC1-125-700 para medicación en ambientes de alta concentración de campo magnético.
- 2) Cable trenzado y apantallado con recubrimiento en teflón referencia 430-FST 100' STD SILVER-PLATE CU,TWISTED,TEFLON.
- 3) Registrador de esfuerzos TML DC 204R strain recorder (prestado por la escuela de ingeniería mecánica).

El sensor y el cable se seleccionaron para soportar temperaturas de hasta 120°C ya que, durante el proceso de curado y secado de las bobinas estas se someten a ciclos térmicos que pueden alcanzar estos valores.

### **3.7 Calculo de fuerzas de cortocircuito**

La estimación de las fuerzas representa la primera etapa para aplicar el procedimiento de validación teórica, para este propósito se pueden utilizar diferentes métodos de modelado magnético, estos se clasifican en métodos aproximados, métodos analíticos, métodos numéricos y métodos especializados (ver Figura 5).

Figura 5. Clasificación métodos para cálculo de fuerzas de cortocircuito.



Las fórmulas sencillas aplican para transformadores con geometría circular, núcleo apilado y devanados construidos en conductor convencional (rectangular o redondo). El cálculo de fuerzas depende del diámetro de los devanados, altura de las bobinas, numero de espiras, corrientes de cortocircuito.

Los métodos analíticos en 2D se empezaron a difundir desde la década de 1930, estos aplican a geometrías sencillas y se basan en el uso de series de Fourier para resolver las ecuaciones de Laplace (regiones sin densidad de corriente) y Poisson (regiones con densidad de corriente), dentro de estos métodos los más destacados son los propuestos por Roth y Rabins.

Los métodos numéricos permiten la solución a problemas con geometrías más complejas y no linealidades, los tiempos de cálculo de estos métodos están asociados a la complejidad del problema y pueden ser mayores a los obtenidos con métodos analíticos. La ventaja es que se reducen las limitaciones asociadas a los supuestos asumidos en otras metodologías. El método numérico más utilizado para el modelamiento magnético de transformadores es el Método de elementos finitos (MEF).

El MEF es utilizado en el análisis de campos eléctricos y magnéticos, los problemas resueltos pueden evaluarse desde el punto de vista estático ó transitorio, en 2D o 3D y en un solo tipo de fenómeno o multifísico. El análisis por MEF puede dividirse en tres etapas pre-procesado, solución y post-procesado.

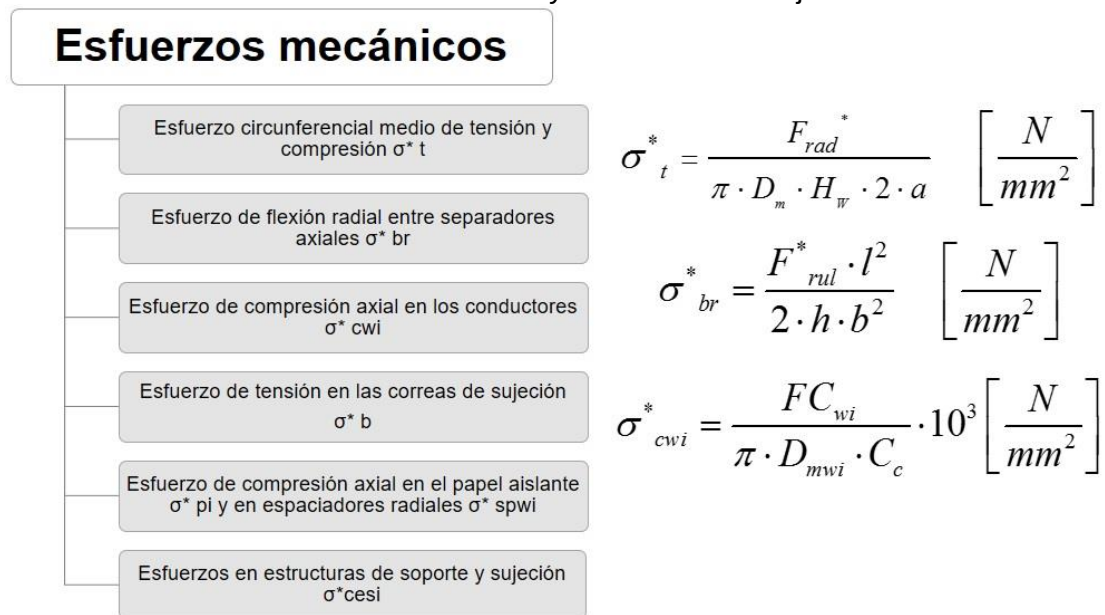
En equipos de distribución se acostumbra a utilizar conductores laminados para elaborar las bobinas de baja tensión, en estos conductores la dimensión axial es mayor a la profundidad de penetración del campo magnético, debido a esto la distribución de corriente es no homogénea haciéndose necesario la implementación de simulaciones magnéticas de baja frecuencia, debido a la variedad de formas constructivas de los transformadores de distribución y media potencia,

en este trabajo se utilizó el método de elementos finitos en 2D con simulación detallada de los flejes y análisis en AC para el cálculo de las fuerzas de cortocircuito.

### 3.8 Calculo de esfuerzos de cortocircuito

Las fórmulas para el cálculo de esfuerzos de cortocircuito se basan en la teoría de resistencia a materiales, algunos de los esfuerzos a calcular según la norma IEC 60076-5 de 2006 se presentan en la Figura 6.

Figura 6. Esfuerzos mecánicos en conductores y estructuras de sujeción de las bobinas.

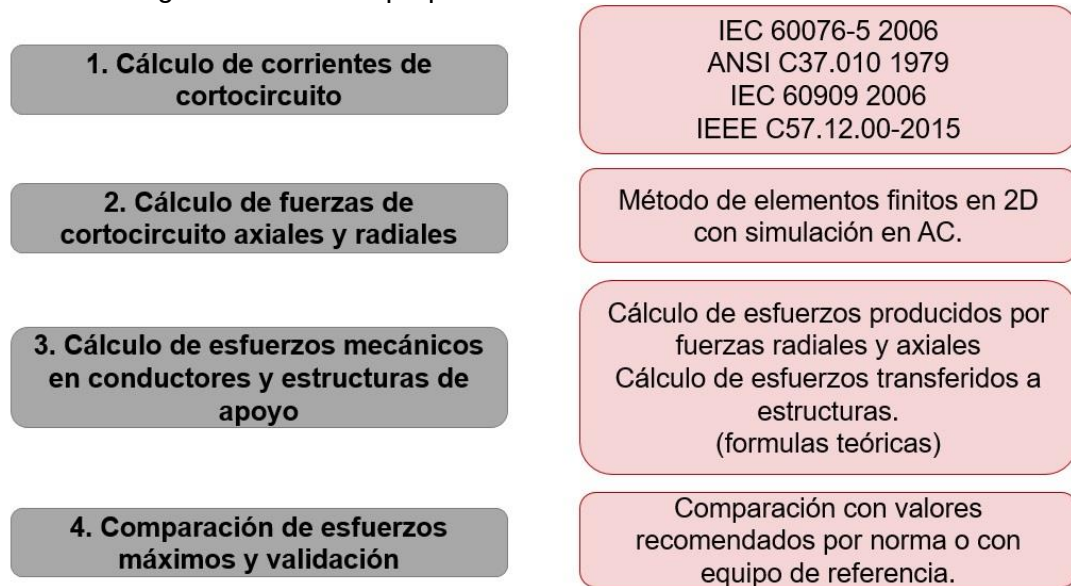


### 3.9 Resultados

La metodología de validación teórica consta de cuatro etapas las cuales son. Cálculo de corrientes de cortocircuito, cálculo de fuerzas radiales y axiales, cálculo de esfuerzos mecánicos y comparación de esfuerzos y validación (ver Figura 7).



Figura 7. Metodología de validación propuesta.



La metodología fue aplicada a dos casos:

**Caso 1: caso teórico transformador de 400kVA con núcleo enrollado y devanados concéntricos rectangulares.**

El transformador del caso teórico fue un equipo de 400kVA el cual pasó satisfactoriamente el ensayo de aptitud al cortocircuito realizado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, el fabricante suministro información de diseño como: tamaño del núcleo, tamaño de las bobinas y ubicación de separadores, número de espiras, distancia entre bobinas, calibre de los conductores. En la Tabla 3 se resumen los datos de este equipo.

Tabla 3. Datos constructivos transformador de 400kVA caso teórico.

|                                                |                     |
|------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Potencia nominal (kVA)</b>                  | 400                 |
| <b>Numero de fases</b>                         | 3                   |
| <b>Tensión nominal del primario (V)</b>        | 13200               |
| <b>Tensión nominal del secundario (V)</b>      | 220                 |
| <b>Corriente nominal primaria (A)</b>          | 17,49               |
| <b>Corriente nominal secundaria (A)</b>        | 1049,7              |
| <b>Frecuencia</b>                              | 60                  |
| <b>Impedancia de cortocircuito (%) a 85 °C</b> | 5,51                |
| <b>Taps de derivación</b>                      | +2 * 2,5 a -2 * 2,5 |
| <b>Material de los devanados</b>               | AT Al / BT Al       |
| <b>Conexión</b>                                | Dyn5                |

A través del programa de elementos finitos *FEMM 4.2* se calcularon las densidades de flujo magnético radial  $B_r$ , axial  $B_a$  y la densidad de corriente  $J$  sobre la altura de cada una de las capas de alta tensión y flejes de baja tensión (Figura 8), los resultados se procesaron con Matlab para determinar las componentes AC y DC de las fuerzas de cortocircuito (1).

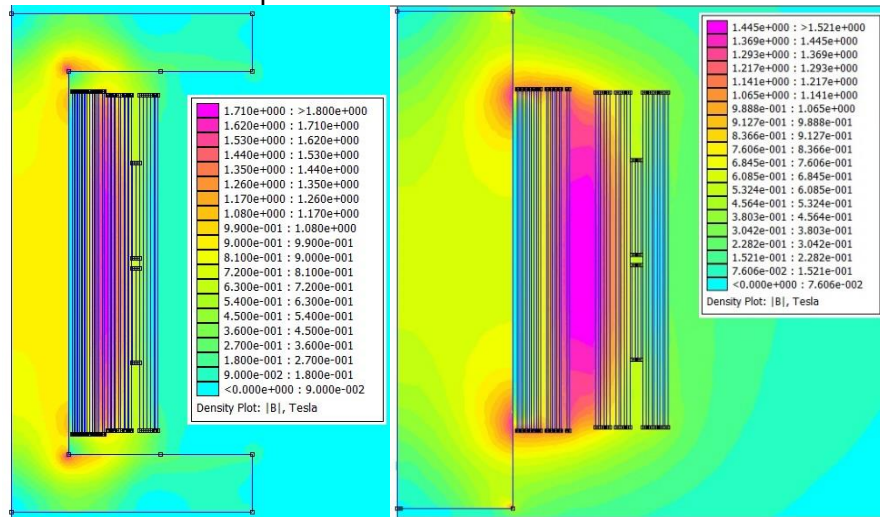
$$\vec{df}_{ac} = \frac{1}{2} \vec{J} \times \vec{B} \left[ \frac{N}{m^3} \right] \quad \vec{df}_{dc} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \vec{J} \times \vec{B} \right\} \left[ \frac{N}{m^3} \right] \quad (1)$$

A través de las componentes ac y dc se calculan las fuerzas radiales y axiales en el dominio del tiempo (2).

$$df_{r(t)} = df_{rdc} + |df_{rac}| * \cos \left( 2\omega t + \arg \left[ df_{rac} \right] \right) \left[ \frac{N}{m^3} \right] \quad (2)$$

$$df_{z(t)} = df_{zdc} + |df_{zac}| * \cos \left( 2\omega t + \arg \left[ df_{zac} \right] \right) \left[ \frac{N}{m^3} \right]$$

Figura 8. Simulaciones en FEMM para transformador de 400kVA.



En la Tabla 4 se presentan los resultados de fuerzas calculadas para el transformador de 400kVA del caso teórico a través de diferentes métodos, las fuerzas radiales totales en los devanados de alta y baja tensión no presentaron diferencias significativas al comparar los métodos MEF detallado y Roth, la mayor diferencia se obtiene en la fuerza radial del devanado de baja tensión alcanzando un 33%; para las fuerzas axiales máximas las diferencias son del 36% para el



devanado de alta tensión y 15% para el de baja tensión; para las fuerzas axiales acumulativas se obtiene un 8% para el devanado de alta tensión y 318% para el de baja. Para propósitos de cálculo de esfuerzos de cortocircuito se recomienda utilizar las fuerzas obtenidas con el método de elementos finitos detallado.

Tabla 4. Resultados de fuerzas de cortocircuito para transformador de 400kVA.

| Fuerza (kN)               | MEF detallado | MEF simplificado | Formulas sencillas | Método Roth |
|---------------------------|---------------|------------------|--------------------|-------------|
| Radial total AT           | 452,26        | 463,42           | 332,29             | 427,21      |
| Radial total BT           | -295,30       | -303,14          | -191,88            | -393,42     |
| Axial máxima extremos AT  | 10,570        | 8,350            | -                  | 6,70        |
| Axial máxima extremos BT  | 22,095        | 8,008            | -                  | 18,75       |
| Axial compresión total AT | 730,180       | 625,498          | 8,472              | 670,45      |
| Axial compresión total BT | 448,209       | 546,632          | 16,94              | 1875,83     |

En la Tabla 5 se presentan los resultados de esfuerzos producidos por fuerzas radiales calculados para el transformador de 400kVA del caso teórico, estos fueron calculados a través de fórmulas teóricas utilizando las fuerzas radiales estimadas a través del método de elementos finitos detallado. Todos los valores de esfuerzos calculados están por debajo de los esfuerzos límites definidos por la norma IEC.

Tabla 5. Resultados de esfuerzos radiales de cortocircuito para transformador de 400kVA.

| Esfuerzos producidos por fuerzas radiales            | Valor calculado (MPa) | Valor límite por norma IEC (MPa) |
|------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Esfuerzo circunferencial promedio alta tensión (MPa) | 4,2                   | 58,5                             |
| Esfuerzo circunferencial promedio baja tensión (MPa) | 4,3                   | 22,7                             |
| Esfuerzo circunferencial capa 1 alta tensión (MPa)   | 9,3                   | 58,5                             |
| Esfuerzo circunferencial fleje 11 baja tensión (MPa) | 15,3                  | 22,7                             |

### **Caso 2: caso práctico transformador de 75kVA con núcleo enrollado y devanados concéntricos rectangulares.**

En el caso práctico, en conjunto con un fabricante nacional se diseñó y construyó un transformador con ventana de acrílico para registrar visualmente el movimiento de los devanados durante las pruebas, además, se instalaron sensores de deformación en las capas y flejes más cercanos al canal de dispersión para registrar las deformaciones producidas por las fuerzas radiales de cortocircuito. La cara expuesta de los sensores fue recubierta con silicona de alta temperatura para protegerlos de cualquier afectación térmica o mecánica (ver Figura 10). Los sensores fueron instalados en las capas más cercanas al canal de dispersión que de acuerdo a

la teoría es la zona donde se concentran las mayores fuerzas radiales de cortocircuito. En la Tabla 6 se presentan los datos de construcción del equipo de 75kVA.

Figura 9. Sensores de deformación sobre devanados de transformador de 75kVA.

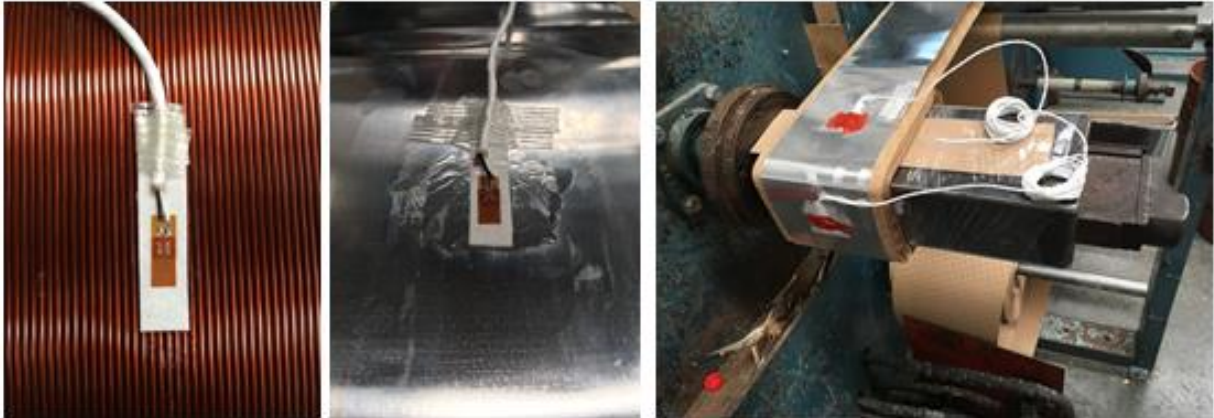


Tabla 6. Datos constructivos transformador de 75kVA caso práctico.

|                                                |                     |
|------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Potencia nominal (kVA)</b>                  | 75                  |
| <b>Numero de fases</b>                         | 3                   |
| <b>Tensión nominal del primario (V)</b>        | 13200               |
| <b>Tensión nominal del secundario (V)</b>      | 208                 |
| <b>Corriente nominal primaria (A)</b>          | 3,28                |
| <b>Corriente nominal secundaria (A)</b>        | 208,17              |
| <b>Frecuencia</b>                              | 60                  |
| <b>Impedancia de cortocircuito (%) a 85 °C</b> | 3,23                |
| <b>Taps de derivación</b>                      | +2 * 2,5 a -2 * 2,5 |
| <b>Material de los devanados</b>               | AT Al / BT Al       |
| <b>Conexión</b>                                | Yyn5                |

El fabricante suministró las dimensiones del núcleo, distancias entre bobinas, ubicación de separadores y dimensiones de conductores para elaborar un modelo en 2D de elementos finitos para el cálculo de las fuerzas de cortocircuito. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad del Valle (ver Figura 10).

**Figura 10.** Montaje prueba sobre el transformador de 75kVA.



El cálculo de fuerzas para el caso del transformador de 75kVA se realizó con el software FEMM bajo un análisis en 2D, de igual forma se utilizaron otras metodologías para calcular las fuerzas y comparar resultados, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultado de fuerzas de cortocircuito para transformador de 75kVA.

| Fuerza (kN)               | MEF detallado | Formulas sencillas | Método Roth |
|---------------------------|---------------|--------------------|-------------|
| Radial total AT           | 219,1         | 135,89             | 174,2       |
| Radial total BT           | -147,8        | 79,08              | 146,5       |
| Axial máxima extremos AT  | 0,37          | -                  | 4,6         |
| Axial máxima extremos BT  | 3,4           | -                  | 5,5         |
| Axial compresión total AT | 53,1          | 8,39               | 466,6       |
| Axial compresión total BT | 185,5         | 12,26              | 551,1       |

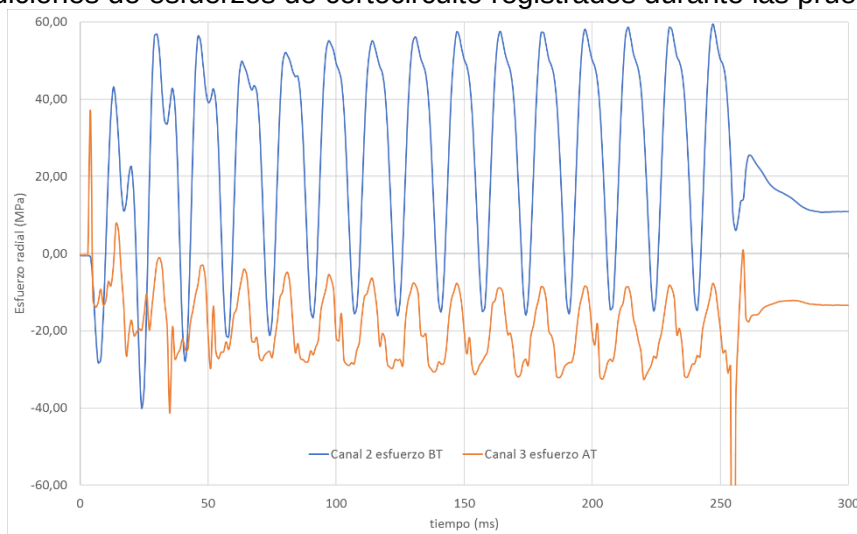
Utilizando los resultados de fuerzas del método de elementos finitos detallado se calcularon los esfuerzos circunferenciales producidos por las fuerzas radiales de cortocircuito tanto para el devanado completo como para las espiras y capas donde se instalaron los sensores (espira 18 en baja tensión y capa 1 en alta tensión).

Tabla 8. Resultados de esfuerzos radiales de cortocircuito calculados para transformador de 75kVA.

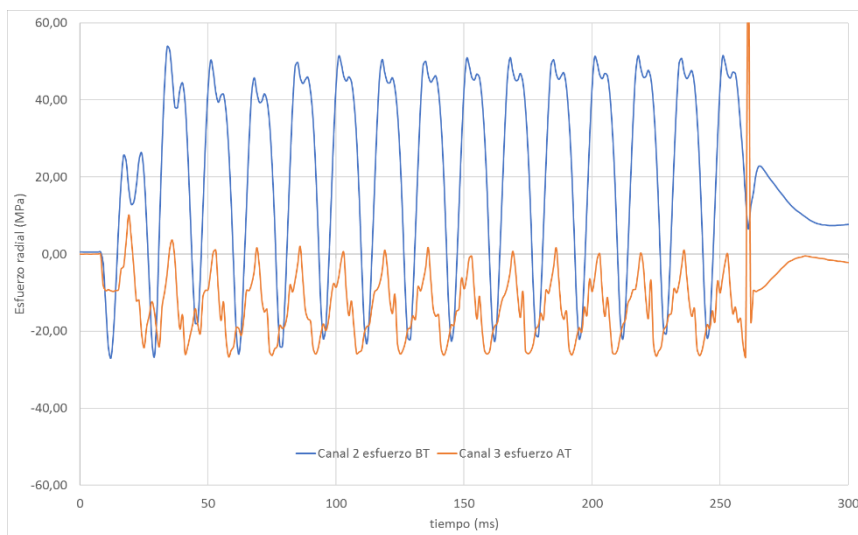
|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Fuerza radial espira 18 baja tensión (N)</b>            | -16643,63 |
| <b>Fuerza radial capa 1 alta tensión (N)</b>               | 20594,78  |
| <b>Esfuerzo circunferencial promedio devanado AT (MPa)</b> | 6,27      |
| <b>Esfuerzo circunferencial promedio devanado BT (MPa)</b> | -7,84     |
| <b>Esfuerzo circunferencial espira 18 BT (MPa)</b>         | -21,27    |
| <b>Esfuerzo circunferencial capa 1 AT (MPa)</b>            | 10,94     |

Se realizaron cinco cortocircuitos con una duración de 250ms, se registraron corrientes de cortocircuito en el lado de alta tensión del transformador y deformaciones a través de las strain gages (ver Figura 11). El canal 2 corresponde al sensor en el fleje de baja tensión y el canal 3 al sensor en la primera capa del devanado de alta tensión.

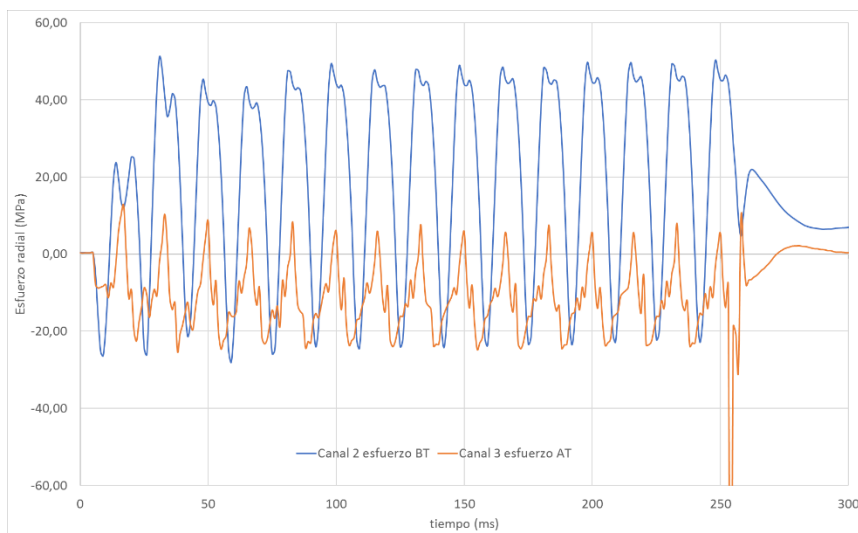
Figura 11. Mediciones de esfuerzos de cortocircuito registrados durante las pruebas.



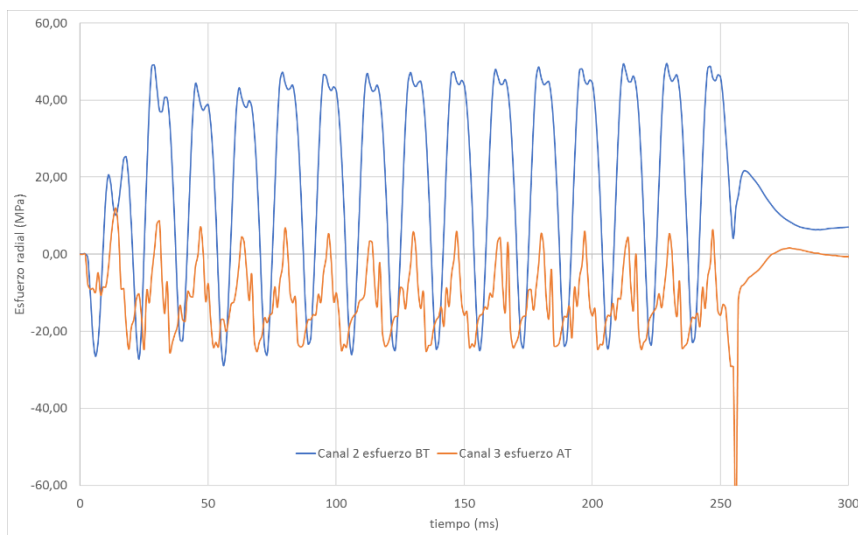
Prueba de cortocircuito 1



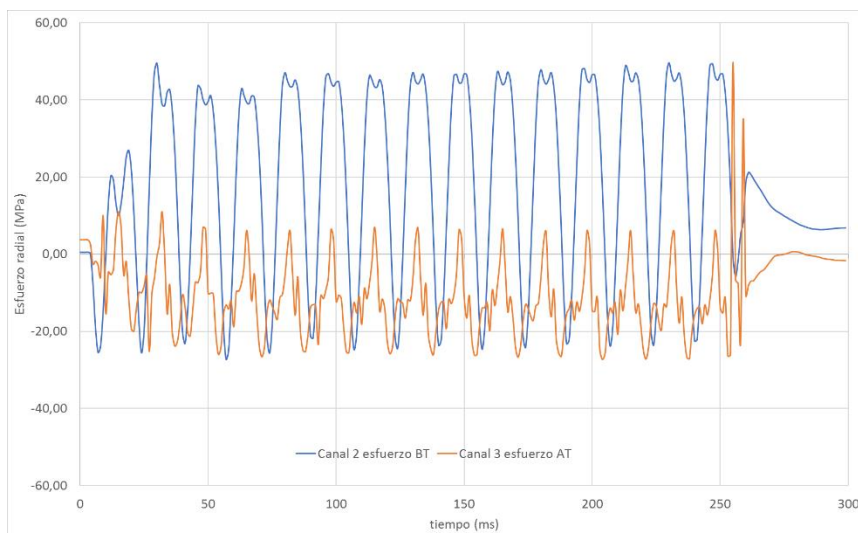
Prueba de cortocircuito 2



Prueba de cortocircuito 3



Prueba de cortocircuito 4



Prueba de cortocircuito 5

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los esfuerzos registrados durante las pruebas en el equipo de 75kVA, al comparar los valores se puede observar que los mayores esfuerzos se obtienen en el devanado de baja tensión (esfuerzos de compresión), mientras que los esfuerzos de tensión en el devanado de alta tensión son menores.

Tabla 9. Esfuerzos medidos pruebas en transformador de 75kVA.

| Prueba          | Esfuerzo promedio (MPa) |              | Esfuerzo máximo (MPa) |              |
|-----------------|-------------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|                 | Espira18 BT             | Capa 1 AT    | Espira 18 BT          | Capa 1 AT    |
| 1               | 23,59                   | 18,85        | 56,33                 | 41,31        |
| 2               | 20,09                   | 11,59        | 52,83                 | 25,78        |
| 3               | 18,14                   | 9,82         | 47,94                 | 25,23        |
| 4               | 17,62                   | 10,43        | 48,79                 | 25,35        |
| 5               | 18,20                   | 10,02        | 49,55                 | 27,28        |
| <b>Promedio</b> | <b>19,53</b>            | <b>12,14</b> | <b>51,09</b>          | <b>28,99</b> |

En la Tabla **10** se presenta la comparación de los resultados de los valores calculados y las mediciones de esfuerzos realizadas en cada una de las pruebas, obsérvese que el error relativo respecto a los valores de esfuerzo promedio son mucho menores comparados a los obtenidos para los valores máximos de esfuerzos en cada prueba.

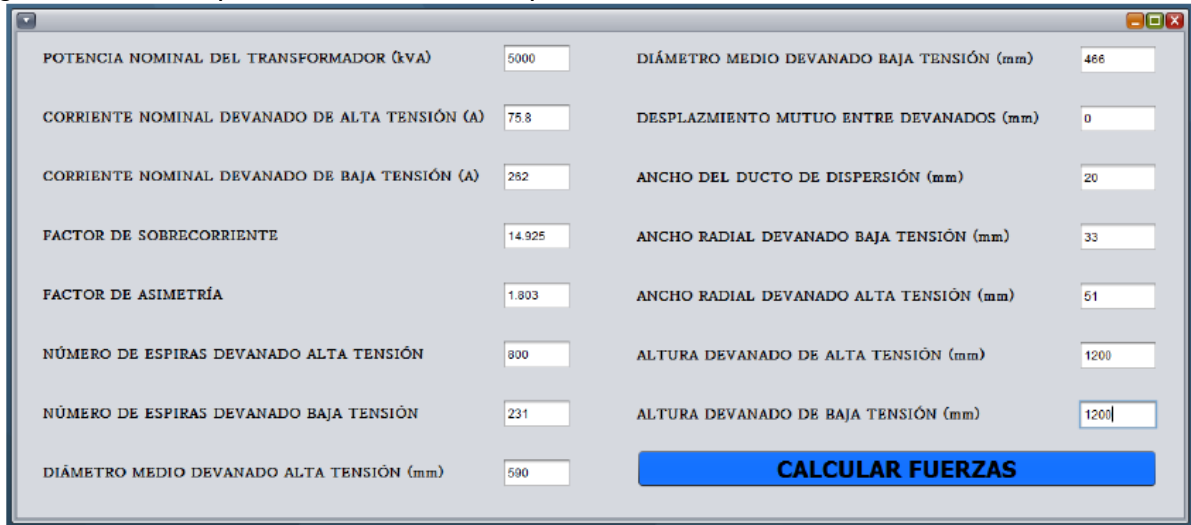
Tabla 10. Comparación de resultados de pruebas y cálculos de esfuerzos.

| Prueba      | Espira 18 baja tensión |                 |             |               |                | Capa 1 alta tensión |                 |               |               |                |
|-------------|------------------------|-----------------|-------------|---------------|----------------|---------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|
|             | Calculado              | Promedio medido | Error (%)   | Máximo medido | Error (%)      | Calculado           | Promedio medido | Error (%)     | Máximo medido | Error (%)      |
| 1           | 21,27                  | 23,59           | -10,90      | 56,33         | -164,83        | 10,94               | 18,85           | -72,27        | 41,31         | -277,60        |
| 2           |                        | 20,09           | 5,53        | 52,83         | -148,37        |                     | 11,59           | -5,94         | 25,78         | -135,64        |
| 3           |                        | 18,14           | 14,69       | 47,94         | -125,38        |                     | 9,82            | 10,22         | 25,23         | -130,62        |
| 4           |                        | 17,62           | 17,16       | 48,79         | -129,38        |                     | 10,43           | 4,70          | 25,35         | -131,71        |
| 5           |                        | 18,20           | 14,41       | 49,55         | -132,95        |                     | 10,02           | 8,38          | 27,28         | -149,36        |
| <b>prom</b> | <b>21,27</b>           | <b>19,53</b>    | <b>8,18</b> | <b>51,09</b>  | <b>-140,19</b> | <b>10,94</b>        | <b>12,14</b>    | <b>-10,98</b> | <b>28,99</b>  | <b>-164,99</b> |

Como parte del desarrollo de este proyecto de investigación se desarrolló una herramienta computacional para el cálculo de fuerzas, esfuerzos y para la validación de los cálculos de acuerdo a los datos definidos por la norma. El programa permite calcular las fuerzas por el método de Roth, calcular fuerzas por formulas teóricas y calcular esfuerzos mecánicos, en la Figura 12 y Figura 13 se muestra capturas de pantalla del software.

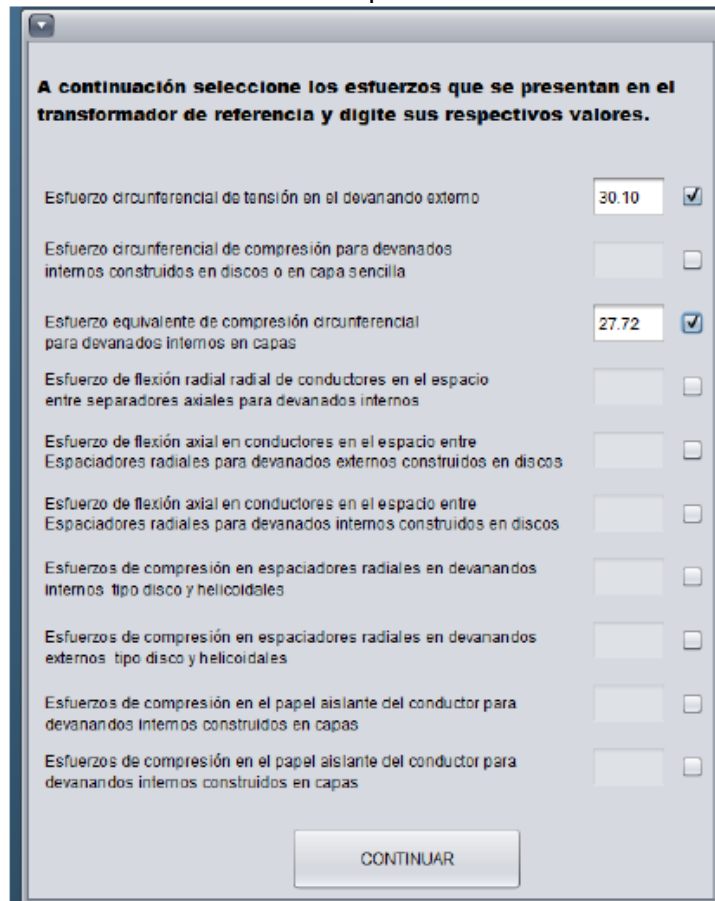


Figura 12. Modulo para cálculo de fuerzas por formulas.



|                                                |        |                                           |      |
|------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------|------|
| POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR (kVA)       | 5000   | DIÁMETRO MEDIO DEVANADO BAJA TENSIÓN (mm) | 466  |
| CORRIENTE NOMINAL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (A) | 75.8   | DESPLAZAMIENTO MUTUO ENTRE DEVANADOS (mm) | 0    |
| CORRIENTE NOMINAL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (A) | 282    | ANCHO DEL DUCTO DE DISPERSIÓN (mm)        | 20   |
| FACTOR DE SOBRECORRIENTE                       | 14.925 | ANCHO RADIAL DEVANADO BAJA TENSIÓN (mm)   | 33   |
| FACTOR DE ASIMETRÍA                            | 1.803  | ANCHO RADIAL DEVANADO ALTA TENSIÓN (mm)   | 51   |
| NÚMERO DE ESPIRAS DEVANADO ALTA TENSIÓN        | 800    | ALTURA DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (mm)      | 1200 |
| NÚMERO DE ESPIRAS DEVANADO BAJA TENSIÓN        | 231    | ALTURA DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (mm)      | 1200 |
| DIÁMETRO MEDIO DEVANADO ALTA TENSIÓN (mm)      | 590    | <b>CALCULAR FUERZAS</b>                   |      |

Figura 13. Modulo para validación de esfuerzos por transformador de referencia.



**A continuación seleccione los esfuerzos que se presentan en el transformador de referencia y digite sus respectivos valores.**

|                                                                                                                                 |       |                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------|
| Esfuerzo circunferencial de tensión en el devanado externo                                                                      | 30.10 | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Esfuerzo circunferencial de compresión para devanados internos contruidos en discos o en capa sencilla                          |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzo equivalente de compresión circunferencial para devanados internos en capas                                             | 27.72 | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Esfuerzo de flexión radial radial de conductores en el espacio entre separadores axiales para devanados internos                |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzo de flexión axial en conductores en el espacio entre Espaciadores radiales para devanados externos contruidos en discos |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzo de flexión axial en conductores en el espacio entre Espaciadores radiales para devanados internos contruidos en discos |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzos de compresión en espaciadores radiales en devanados internos tipo disco y helicoidales                                |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzos de compresión en espaciadores radiales en devanados externos tipo disco y helicoidales                                |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzos de compresión en el papel aislante del conductor para devanados internos contruidos en capas                          |       | <input type="checkbox"/>            |
| Esfuerzos de compresión en el papel aislante del conductor para devanados internos contruidos en capas                          |       | <input type="checkbox"/>            |

**CONTINUAR**



### 3.10 Conclusiones

Se demostró que es posible utilizar un transformador sometido al ensayo como equipo de referencia para validar la aptitud al cortocircuito de otros transformadores. En el caso de análisis, con el equipo de 400kVA se podrían validar transformadores entre 150 y 500kVA que tengan un diseño similar y cumplan con las restricciones de esfuerzos máximos.

El procedimiento de validación teórica planteado por la norma IEC está orientado a la revisión de transformadores con potencias mayores a 2500kVA con devanados concéntricos circulares. En este proyecto se plantea la posibilidad de aplicar dicha validación para transformadores de menor capacidad, con devanados concéntricos rectangulares, haciendo una revisión de los principales esfuerzos generados.

La distribución no homogénea de la densidad de corriente en los flejes del devanado de baja tensión tiene efecto sobre las fuerzas de cortocircuito. En el fleje más cercano al núcleo, la fuerza axial es dominante alcanzando valores máximos en los extremos. El fleje ubicado cerca al canal de dispersión experimenta fuerzas predominantemente radiales de naturaleza compresiva.

En el caso del devanado en capas, las fuerzas radiales son más significativas en la medida que las capas estén más cercanas al canal de dispersión, por su parte, las fuerzas axiales tienen un comportamiento opuesto, siendo predominantes en las capas más alejadas.

Si bien las strain gages han sido probadas en ambientes con altas concentraciones de campo magnético, en ensayos preliminares se encontró que los campos eléctricos tienen un efecto sobre el registro de deformaciones que pueden distorsionar la medida, por tal razón, para el futuro se ha planteado un proyecto utilizando sensores ópticos los cuales son inmunes a interferencias electromagnéticas.

Se encontró un error relativo bajo entre los valores promedios de esfuerzos medidos y los calculados para el caso práctico, sin embargo, al comparar los valores máximos medidos con respecto a los calculados, el error es significativo.

### 3.11 Referencias

- [1] International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-5 Annex B Calculation method for the demonstration of the ability to withstand the dynamic effects of Shortcircuit*. Geneve, 2006.
- [2] International Electrotechnical Commission, *IEC 60076-5 Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit*, 3rd ed. Geneve, 2006.
- [3] TESAR, "Ability to Withstand Dynamic Effects of Short Circuit Comparative Statement," Milan, 2010.
- [4] M. S. Aslam Minhas, "Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuits," University of the Witwatersrand, 2007.

- [5] G. Bertagnolli, *The ABB Approach to Short-circuit Duty of Power Transformers*, 3rd ed. Zurich, Suiza: ABB Management Services, 2007.
- [6] M. Waters, *The Short-circuit Strength of Power Transformers*, 1st ed. Londres: MacDonald, 1966.
- [7] Z. Liang, J. Li, and R. Tang, "A 2D calculation method for transformers with helicoidal windings," *Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on*, vol. 1. pp. 329–331 vol.1, 2003.
- [8] Veens J, "Short-Circuit test on 120 MVA Power Transformer," in *3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment MatPost' 07*, 2007, p. 5.
- [9] R. Smeets and L. te Paske, "13 Years Of Test Experiences with Short-Circuit Withstand Capability of Large Power Transformers," *EnergóEkspert*, vol. 15, no. 4, p. 4, 2009.
- [10] I. Deaconu, A. Chirilă, C. Ghiță, V. Năvrărescu, and G. Chicco, "Analytical computation method for electrodynamic forces acting over electrical transformer windings," *UPB - Sci. Bull.*, vol. 71, no. series C, p. 12, 2009.
- [11] J. Turowski, *Transformers: Analysis, Design, and Measurement*. Boca Ratón, Florida EEUU: CRC Press, 2012.
- [12] G. Leber, H. Passath, M. Ryadi, and P. Hurlet, "Short circuit verification for a 570 MVA, 420 kV single-phase GSU-transformer by SC-withstand tests on a mock-up unit," *e i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 131, no. 8, pp. 340–348, Dec. 2014.
- [13] H.-M. Ahn, Y.-H. Oh, J.-K. Kim, J.-S. Song, and S.-C. Hahn, "Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 819–822, Feb. 2012.
- [14] S. Jamali, M. Ardebili, and K. Abbaszadeh, "Calculation of short circuit reactance and electromagnetic forces in three phase transformer by finite element method," in *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, p. 1725–1730 Vol. 3.
- [15] P. Geno, "Calculations for Short Circuit Withstand Capability of a Distribution Transformer," *Int. J. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 243–246, 2011.
- [16] A. C. Azevedo, Ana C. de Delaiba, J. C. de Oliveira, and H. de S. Carvalho, Bismarck C. Bronzeado, "Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: a time domain approach," in *In International Conference on Power Systems Transients.*, 2007, p. 6.
- [17] A. De Azevedo, I. Rezende, A. Delaiba, J. De Oliveira, B. Carvalho, and S. Herivelto De, "Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM," in *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, pp. 1–6.
- [18] M. Patel, "Dynamic Response of Power Transformers Under Axial Short Circuit Forces Part I - Winding and Clamp as Individual Components," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, no. 5, pp. 1558–1566, Sep. 1973.
- [19] M. Patel, "Dynamic Response of Power Transformers Under Axial Short Circuit Forces Part II - Windings and Clamps as a Combined System," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, no. 5, pp. 1567–1576, Sep. 1973.
- [20] R. E. Ayers, G. O. Usry, M. R. Patel, and R. B. Steel, "Dynamic measurements during short-circuit testing of transformers part II: Test results and analysis," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 94, no. 2, pp. 198–206, Mar. 1975.
- [21] G. Diaz, "Nueva metodología para el modelado magnético de transformadores con devanados en conductor laminado," Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2013.

#### **4. Impactos actual o potencial:**

##### **Académico**

- Elaboración de la tesis de maestría del estudiante Andrés Felipe Zúñiga con código 1404563 graduado el 16 de diciembre de 2017.
- Elaboración de la tesis de pregrado del estudiante Ibis Samir Angulo graduado el 24 de junio de 2017. El estudiante estuvo vinculado al programa de semilleros de investigación.
- Elaboración de la tesis de pregrado del estudiante Fernando Ríos, pendiente de sustentación para graduarse en el periodo febrero junio de 2018.

##### **Investigativo**

- Ponencia congreso internacional en alta tensión y aislamiento eléctrico ALTAE 2017 “MÉTODO DE VALIDACIÓN TEÓRICA PARA DEMOSTRAR LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO DEL TRANSFORMADOR: UN CASO DE APLICACIÓN”, La Habana, Cuba. Noviembre 30 de 2017.
- Ponencia V congreso internacional CIER DE LA ENERGÍA 2017 “REVISIÓN DE DISEÑO PARA LA VERIFICACIÓN DE LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES”, Medellín, Colombia. Noviembre 30 de 2017.
- Artículo científico sometido a la revista nacional TECNURA, “VIGENCIA DEL MÉTODO DE ROTH PARA LA DETERMINACIÓN DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN DEVANADOS DE TRANSFORMADORES”. Aceptado para publicación en edición.
- Artículo científico sometido a la revista internacional IEEE Latinoamérica, “TRANSFORMER SHORT CIRCUIT WITHSTAND VERIFICATION USING FORCES AND STRESSES CALCULATIONS”. Trabajo en espera de revisión por parte del editor.

### Impacto actual

Este proyecto fue desarrollado por el grupo de investigación en alta tensión GRALTA con el apoyo de una empresa fabricante de transformadores que suministro los datos de diseño de un equipo que fue sometido a pruebas en el laboratorio de alta tensión y también construyó el transformador de 75kVA para el caso práctico. El grupo de investigación en mejoramiento industrial de la Universidad de Valle GIMI nos brindó apoyo en la definición del sistema de medida de esfuerzos y la instalación de los sensores, de igual forma, se contó con la asesoría del profesor Guillermo Díaz de la Universidad de la Salle. En este sentido, este proyecto fomentó el desarrollo de actividades multidisciplinarias generando sinergias entre la universidad y el sector productivo.

### Desarrollos futuros

Se planteará un proyecto de investigación en el cual se consideren la medición con sensores ópticos para registro de esfuerzos de cortocircuito, de igual manera se incluirán simulaciones en 3D con programas de elementos finitos, esto teniendo en cuenta las tendencias de investigación en relación al cálculo de esfuerzos de cortocircuito en transformadores.

Con los resultados de las pruebas eléctricas y las mediciones de esfuerzos se elaborará un artículo científico en inglés para someter a revista Q2, esta actividad se realizará en el periodo febrero junio de 2018.

## 5. Productos:

Tabla 11. Cantidad y tipo de productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso y productos finalmente presentados.

| TIPO DE PRODUCTOS                                            | No. de PRODUCTOS PACTADOS |    |    |    | No. de PRODUCTOS PRESENTADOS |                  |    |    |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|----|----|----|------------------------------|------------------|----|----|
| Productos de nuevos conocimientos                            |                           |    |    |    |                              |                  |    |    |
| Artículo en revista ISI-SCOPUS:                              | Q1                        | Q2 | Q3 | Q4 | Q1                           | Q2               | Q3 | Q4 |
|                                                              | 0                         | 1  | 0  | 0  | 0                            | 1 <sup>(a)</sup> | 0  | 0  |
| Artículo completo publicado en revistas indexadas            | A1                        | A2 | B  | C  | A1                           | A2               | B  | C  |
|                                                              | 0                         | 0  | 0  | 0  | 0                            | 1 <sup>(b)</sup> | 0  | 0  |
| Libros de autor que publiquen resultados de investigación    | 0                         |    |    |    | 0                            |                  |    |    |
| Capítulos en libros que publican resultados de investigación | 0                         |    |    |    | 0                            |                  |    |    |
| Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados   | 0                         |    |    |    | 0                            |                  |    |    |

| TIPO DE PRODUCTOS                                                                               | No. de PRODUCTOS PACTADOS     |                                  | No. de PRODUCTOS PRESENTADOS  |                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| • Prototipos y patentes                                                                         | 0                             |                                  | 0                             |                                  |
| • Software                                                                                      | 0                             |                                  | 0                             |                                  |
| Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial | 0                             |                                  | 0                             |                                  |
| Normas basadas en resultados de investigación                                                   | 0                             |                                  | 0                             |                                  |
| <b>Formación de recursos humanos</b>                                                            | No. de estudiantes vinculados | No. de tesis                     | No. De estudiantes Vinculados | No. De tesis                     |
| Estudiantes de pregrado                                                                         | 1                             | 1                                | 1                             | 1                                |
| Semillero de Investigación <sup>(d)</sup>                                                       | 1                             | 1                                | 1                             | 1                                |
| Estudiantes de maestría                                                                         | 1                             | 1                                | 1                             | 1                                |
| Estudiantes de doctorado                                                                        | 0                             | 0                                | 0                             | 0                                |
| Joven investigador                                                                              | 0                             | 0                                | 0                             | 0                                |
| <b>Productos de divulgación</b>                                                                 |                               |                                  |                               |                                  |
| Publicaciones en revistas no indexadas                                                          | 0                             |                                  | 0                             | 0                                |
| Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)                      | No. de ponencias nacionales   | No. de ponencias internacionales | No. de ponencias nacionales   | No. de ponencias internacionales |
|                                                                                                 | 1                             | 1                                | 0                             | 2                                |
| <b>Propuesta de investigación</b>                                                               |                               |                                  |                               |                                  |
| Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.                 | 1                             |                                  | 1 <sup>(c)</sup>              |                                  |

(a) Artículo sometido a revista internacional IEEE Latin-america Transactions ISSN 1548-0992. En espera de revisión.

(b) Artículo sometido a revista nacional TECNURA clasificación A2 Colciencias ISSN 2248-7638. Artículo en edición para publicación.

(c) Se tiene propuesta elaborada, se está buscando la convocatoria para la cual el proyecto sea compatible.

(d) Estudiante Ibis Samir Angulo vinculado a programa semilleros periodo agosto diciembre 2015.

## 6. Detalle de productos

|                       |                                                                                                                                                                          |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | TESIS DE MAESTRÍA                                                                                                                                                        |
| Nombre General:       | DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN TEÓRICA DE ESFUERZOS DINÁMICOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA (Año 2017). Págs.: 115 |
| Ciudad y fechas:      | Santiago de Cali Sustentación septiembre 1 2017.                                                                                                                         |
| Participantes:        | Andrés Felipe Zúñiga Calvache                                                                                                                                            |
| Sitio de información: | Biblioteca Central.                                                                                                                                                      |
| Formas organizativas: | Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica.                                                                                                                           |

|                       |                                                                                                                                                                  |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | TESIS DE PREGRADO                                                                                                                                                |
| Nombre General:       | ANÁLISIS DEL MÉTODO DE VALIDACIÓN POR COMPARACIÓN PARA VERIFICAR LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES SEGÚN LA NORMA IEC 60076-5 (Año 2017). Págs.: 84 |
| Ciudad y fechas:      | Santiago de Cali Sustentación abril 19 2017.                                                                                                                     |
| Participantes:        | Ibis Samir Angulo Cachimbo                                                                                                                                       |
| Sitio de información: | Biblioteca Central.                                                                                                                                              |
| Formas organizativas: | Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica.                                                                                                                   |

|                       |                                                                                                                                                                               |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | TESIS DE PREGRADO                                                                                                                                                             |
| Nombre General:       | DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE ESFUERZOS MECÁNICOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA. (Año 2017). Págs.: 128 |
| Ciudad y fechas:      | Santiago de Cali entrega programa académico diciembre 5 2017.                                                                                                                 |
| Participantes:        | Fernando Ríos Castro                                                                                                                                                          |
| Sitio de información: | Secretaría programa académico de ingeniería eléctrica                                                                                                                         |
| Formas organizativas: | Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica.                                                                                                                                |

|                       |                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | SOFTWARE                                                                                                                                                                                                 |
| Nombre General:       | SHORTCIRCUIT UV                                                                                                                                                                                          |
| Ciudad y fechas:      | Santiago de Cali entrega programa académico diciembre 5 2017.                                                                                                                                            |
| Participantes:        | Fernando Ríos Castro, Andrés Felipe Zúñiga, Guillermo Aponte                                                                                                                                             |
| Sitio de información: | Desarrollo de una herramienta de software para el cálculo de esfuerzos mecánicos de cortocircuito en transformadores de distribución y media potencia (año 2017). Págs.: 128 tesis en biblioteca central |
| Formas organizativas: | Grupo de investigación en alta tensión GRALTA.                                                                                                                                                           |

|                       |                                                                                                                  |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | Memorias evento                                                                                                  |
| Nombre General:       | Congreso en alta tensión y aislamiento eléctrico ALTAE 2017                                                      |
| Nombre Particular:    | MÉTODO DE VALIDACIÓN TEÓRICA PARA DEMOSTRAR LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO DEL TRANSFORMADOR: UN CASO DE APLICACIÓN |
| Ciudad y fechas:      | La Habana, Cuba noviembre 30 2017.                                                                               |
| Participantes:        | Andrés Felipe Zúñiga, Guillermo Aponte Mayor, Héctor Cadavid, Guillermo Díaz.                                    |
| Sitio de información: | Centro de documentación Grupo de investigación en Alta tensión                                                   |
| Formas organizativas: | Grupo de investigación en alta tensión GRALTA                                                                    |

|                       |                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | Memorias evento                                                                                                                                                                                      |
| Nombre General:       | V congreso CIER de la energía 2017                                                                                                                                                                   |
| Nombre Particular:    | REVISIÓN DE DISEÑO PARA LA VERIFICACIÓN DE LA APTITUD AL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES                                                                                                            |
| Ciudad y fechas:      | Medellín, Colombia noviembre 30 de 2017                                                                                                                                                              |
| Participantes:        | Andrés Felipe Zúñiga, Guillermo Aponte Mayor, Héctor Cadavid.                                                                                                                                        |
| Sitio de información: | Centro de documentación grupo de investigación en alta tensión y memorias del evento ( <a href="http://www.cocier.org/index.php/es/memorias-es">http://www.cocier.org/index.php/es/memorias-es</a> ) |
| Formas organizativas: | Grupo de investigación en alta tensión GRALTA                                                                                                                                                        |

|                       |                                                                                                               |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | Artículo científico                                                                                           |
| Nombre General:       | Revista TECNURA Universidad distrital. Págs: 20                                                               |
| Nombre Particular:    | VIGENCIA DEL MÉTODO DE ROTH PARA LA DETERMINACIÓN DE FUERZAS DE CORTOCIRCUITO EN DEVANADOS DE TRANSFORMADORES |
| Ciudad y fechas:      | Santiago de Cali, sometido febrero 3 2017                                                                     |
| Participantes:        | Wilver Correa, Andrés Felipe Zúñiga, Héctor Cadavid, Guillermo Aponte, Diego García, Guillermo Díaz.          |
| Sitio de información: | Página web revista                                                                                            |
| Formas organizativas: | Grupo de investigación en alta tensión GRALTA                                                                 |

|                       |                                                                                         |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de producto:     | Artículo científico                                                                     |
| Nombre General:       | Revista IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS (En revisión). Págs: 7                          |
| Nombre Particular:    | Transformer short-circuit withstand verification using forces and stresses calculations |
| Ciudad y fechas:      | Santiago de Cali, sometido noviembre 20 2017                                            |
| Participantes:        | Andrés Felipe Zúñiga, Héctor Cadavid, Guillermo Aponte                                  |
| Sitio de información: | Página web revista                                                                      |
| Formas organizativas: | Grupo de investigación en alta tensión GRALTA                                           |

\_\_\_\_\_  
Firma del investigador principal

\_\_\_\_\_  
VoBo. Vicedecano de Investigaciones