

**Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
CUJAE**



CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE ...

Armando Gómez Quesada

La Habana, 2012



Tesis de Maestría

Consideraciones para el diseño de transformadores de distribución que garanticen mayor resistencia a los esfuerzos de cortocircuito. – La Habana : Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 2012. – Tesis (Maestría).

Dewey: 621.3 – Ingeniería eléctrica, electrónica.

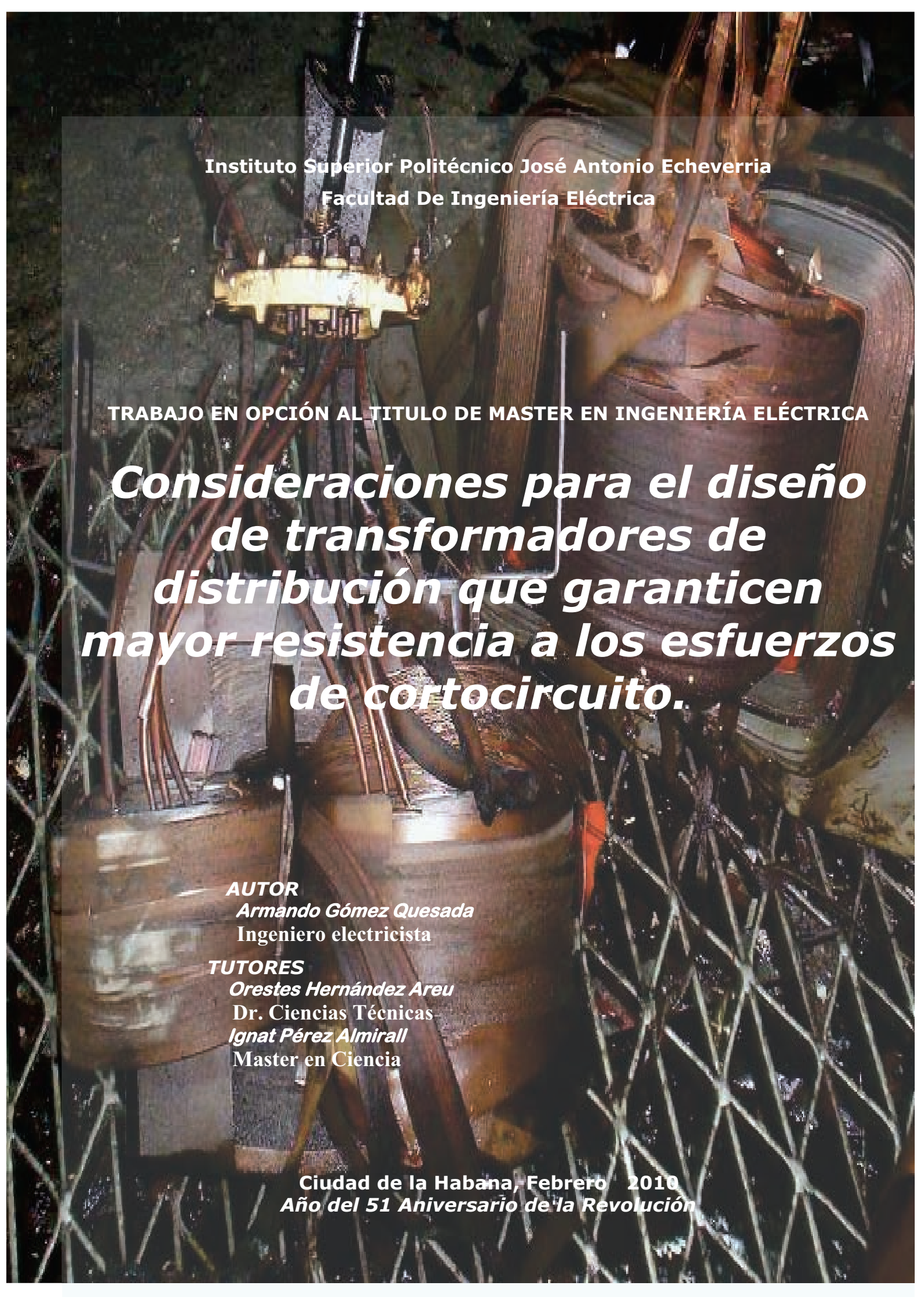
Registro No.: Maestria675 CUJAE.



(cc) Armando Gómez Quesada, 2012.

Licencia: *Creative Commons de tipo Reconocimiento, Sin Obra Derivada.*

En acceso perpetuo: <http://www.e-libro.com/titulos>



Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Facultad De Ingeniería Eléctrica

TRABAJO EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

***Consideraciones para el diseño
de transformadores de
distribución que garanticen
mayor resistencia a los esfuerzos
de cortocircuito.***

AUTOR

Armando Gómez Quesada
Ingeniero electricista

TUTORES

Orestes Hernández Areu
Dr. Ciencias Técnicas
Ignat Pérez Almirall
Master en Ciencia

Ciudad de la Habana, Febrero 2010
Año del 51 Aniversario de la Revolución

A la memoria de
Mi padre *Armando Gómez Reyes*
Mi madre *Gladys Quesada Aldana*
Del Ingeniero *Norman Toledo Carrión*

A mi hija por ser el fin y apoyo de todo
A mi esposa por su estoicismo

A mis tutores, el Dr. Orestes Hernández Areu y el Msc. Ignat Pérez Almirall por su inapreciable ayuda.

Al Msc. Roberto Garrido Díaz por su disposición y colaboración.

A mis colegas, los Ingenieros José Guillermo Sánchez, José Miguel Bruzón Hernández y Héctor Lozano Navarro por su apoyo.

A los MSc. Guillermo Aponte Mayor, Héctor Cadavid y Ernesto Noriega, al Ingeniero Benito Díaz Arocha, y en especial al desaparecido Ingeniero Norman Toledo Carrión, por su desinteresada colaboración y la facilidad brindada en relación con la bibliografía de este trabajo.

También mi más sincero agradecimiento a quien tanto ayudo para seguir adelante, la compañera Pura Marina Fong, así como a nuestras bibliotecarias Gladys Maritza García Rivera y Rosario Valdez Silva.

A todos mis profesores de la maestría, a mis compañeros de estudio y a todas aquellas personas que tuvieron que ver de una u otra forma con el buen desenvolvimiento de este proyecto.

A todos, Muchas gracias

Resumen

Se presenta un estudio de los elementos que intervienen en la magnitud de los esfuerzos de cortocircuito dinámico en transformadores.

Se desarrolla un programa de computación cuyo objetivo es evaluar el impacto que producen las variaciones en las magnitudes físicas de los devanados, sujetadores y núcleo de un transformador, en las intensidades de estos esfuerzos, pretendiendo ser útil como herramienta para la toma de decisiones del diseñador durante el proceso de proyección.

El “software” se valida a partir de la comparación con resultados obtenidos por otros autores, que emplearon diferentes métodos de cálculo.

La aplicación inmediata de los resultados de este proyecto se obtiene mediante un estudio de resistencia electrodinámica realizado a 36 transformadores de la Fábrica Latino, que arrojó información valiosa para sus productores.

Abstract

It is featured a study of the elements taking part in the magnitude of the efforts of dynamic short circuit in transformers.

A computation program is developed whose purpose is to evaluate the impact produced by variations in the physical magnitudes of the windings, grips and nucleus of a transformer, in the intensities of these efforts, trying to be useful as tool for the decision making of the designer during the projection process.

Software is validated from the comparison with results obtained by other authors, who used different methods of calculation.

The immediate application of the results of this project is obtained by means of a study of electrodynamic resistance applied to 36 transformers from Latino Factory, that threw valuable information for its producers.

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CRÍTICA DE LA BIBLIOGRAFÍA.....	4
1.1 CONCLUSIONES DE LA CRÍTICA BIBLIOGRAFICA.	20
2. GENERALIDADES DE LOS TRANSFORMADORES.	21
2.1 TIPOS DE TRANSFORMADORES.	21
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS DEVANADOS.	22
2.2.1 <i>Los devanados del transformador de distribución.</i>	22
2.2.2 <i>El devanado de Baja tensión en transformadores de distribución.</i>	23
2.2.3 <i>El devanado de Alta Tensión en transformadores de distribución.</i>	24
2.2.4 <i>Características mecánicas de los materiales conductores.</i>	25
2.2.5 <i>Características de los materiales aislantes.</i>	26
<i>El Papel adiamantado.</i>	26
3. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES.	28
3.1 CORRIENTE PERIÓDICA, APERIÓDICA Y DE CORTOCIRCUITO TOTAL.	28
4. ESFUERZOS EN CORTOCIRCUITOS.	34
4.1 DEFINICIÓN DE ESFUERZOS.....	34
4.2 FUERZAS RADIALES.	35
4.2.1 <i>Cálculo de las fuerzas electromagnéticas radiales para devanados concéntricos.</i>	37
4.2.2 <i>Esfuerzos radiales.</i>	39
4.2.3 <i>Criterio de aceptación.</i>	40
4.3 FUERZAS AXIALES.	40
4.3.1 CÁLCULO DE LAS FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS AXIALES.....	41
<i>Método de los “Ampere-vueltas residuales”.</i>	41
4.3.2 <i>Fuerzas axiales en dependencia de las derivaciones.</i>	43
4.3.3 <i>Esfuerzos axiales para bobinados concéntricos.</i>	44
4.4 ESFUERZOS TÉRMICOS EN CORTOCIRCUITOS.....	47
4.4.1 CRITERIO DE ACEPTACIÓN.	48
5. FORMULACIONES DEL CORTTRANSF.	49
5.1 INTRODUCCIÓN. PLATAFORMA DE SOPORTE.	49
5.2 PROCESO DE CÁLCULO DEL PROGRAMA.	51
5.2.1 <i>Cálculo de la corriente de cortocircuito por el CORTTRANSF.</i>	51
5.2.2 <i>Menú del programa.</i>	52
5.3 FORMA EN QUE SE MUESTRAN LOS RESULTADOS.	53
5.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.	56
6. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL CORTTRANSF.	59
6.1 RESULTADOS DE LAS CORRIDA DEL TRANSFORMADOR LATINO DE 10 kVA. 2400/120-240 (LAT SH6 10 2-12).....	60
6.2 COMPARACIÓN POR CAPACIDADES NOMINALES.....	62
6.3 ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN LOS ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO.	66
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	68
7.1 CONCLUSIONES.	68
7.2 RECOMENDACIONES.	68
REFERENCIAS	69
ANEXOS	
ÍNDICE DE TABLAS	
<i>Tabla 1 Expresiones para el cálculo de las fuerzas axiales para distintas ubicaciones del cambiador de derivaciones del transformador</i>	43
<i>Tabla 2 Valores máximos de la temperatura media de devanados después de un cortocircuito</i>	48
<i>Tabla 3 Resultados de la corrida del Transformador Latino 10 kVA. 2400/120-240</i>	60

Tabla 4 Resultados de la corrida: comparación por capacidades nominales.

62

Introducción

La generación y transporte de energía en forma de electricidad tiene importantes ventajas, por lo que dependen casi totalmente de ellas los procesos industriales y la mayoría de los servicios del mundo moderno. Las instalaciones eléctricas permiten utilizar la energía eléctrica a mucha distancia del lugar donde se genera. Estas instalaciones utilizan corriente alterna, ya que es fácil reducir o elevar la tensión con transformadores. De esta manera, cada parte del sistema puede funcionar con la tensión apropiada.

La importancia del transformador en los sistemas eléctricos es indiscutible, por lo que conocer el estado de sus condiciones técnicas durante su operación permite explotar adecuadamente toda su vida útil y también definir en qué momento se debe realizar algún tipo de mantenimiento para extender la misma. Igualmente, el detectar oportunamente algún tipo de condición anormal posibilita sacar el transformador de servicio para su reparación antes de que ocurra una falla catastrófica.

En Cuba se producen transformadores en la fábrica “*Latino*” la cual tiene un plan de producción anual de 15 000 equipos, lo cual en breve tiempo cubrirá todas las necesidades nacionales. Ello conduce a pensar en la posibilidad de lograr exportar excedentes de esta producción hacia el Caribe o América Latina, necesitándose para ello un transformador competitivo en calidad.

El transformador siempre y cuando cumpla con las normas de calidad y desempeño requeridas, está diseñado para cumplir las condiciones nominales de trabajo durante muchos años, pero también para soportar altos esfuerzos térmicos y mecánicos, generados por eventos especiales de corta duración como sobre tensiones y cortocircuitos. Sin embargo, la segunda causa de avería en los transformadores de distribución que hay en el país es el cortocircuito. Este fenómeno, tan común en la vida de un transformador, produce cuantiosas pérdidas, no solo por el impacto económico y social de la afectación al servicio de los clientes asociados al circuito secundario del mismo, sino además por la pérdida del propio equipo. Así, en el 2 008 por concepto de fallas por cortocircuito producidas en los transformadores *Latino*

se produjeron pérdidas a la economía cubana superiores a los 135 135 CUC*,

.

Para que un transformador sea capaz de superar con éxito los esfuerzos de este tipo que se puedan presentar durante su vida es necesario que tenga un buen diseño, el cual incluye a

En este trabajo se describen algunos métodos simplificados para calcular los esfuerzos electrodinámicos y térmicos a los que están sometidos los enrollados de los transformadores.

Objetivos.

El trabajo tiene como objetivos:

- ❖ Analizar un conjunto de elementos a tener en cuenta en el diseño de transformadores de distribución para garantizar mayor resistencia a los esfuerzos electrodinámicos durante un cortocircuito.
- ❖ Diseñar un “software” para evaluar y comparar, sobre la base de las características de diseño de los transformadores monofásicos, el impacto de las magnitudes físicas de ellos en los esfuerzos de cortocircuito.
- ❖ Aplicar dicho “software” a transformadores Latinos de diferentes capacidades y niveles de tensión, para obtener sus características mecánicas y térmicas ante cortocircuito.

Problema.

La no existencia en el país de un “software” para la evaluación del impacto de los parámetros físicos de los transformadores en la magnitud de los esfuerzos electrodinámicos y térmicos ante cortocircuito.

Objeto de la investigación.

El objeto de investigación lo constituye el transformador de distribución.

* Cálculo estimado del autor partiendo de que, según las estadísticas de la Unión Eléctrica, los transformadores *Latinos* que presentaron esta falla en el año 2008 en Ciudad Habana fueron 65 unidades, con un precio promedio de 2 079 CUC por unidad.

Campo de la investigación.

Estudio de los cortocircuitos en los transformadores de distribución.

Hipótesis preliminar.

Si durante el proceso de proyección de los transformadores en Cuba, sus parámetros físicos son evaluados desde el punto de vista electrodinámico y térmico, es posible mejorar el diseño de estos, para soportar los esfuerzos de cortocircuito.

Métodos de la Investigación:

Métodos teóricos.

- Histórico: Para conocer el estado del arte sobre el tema propuesto.
- Bibliográfico: Para estudiar los conceptos básicos sobre el tema así como los modelos matemáticos establecidos por los diferentes autores.

Métodos matemáticos.

- Modelación: Para aplicar el método analítico al problema de la investigación.

Aporte teórico-práctico:

Se presenta un estudio de los elementos que intervienen en la magnitud de los esfuerzos de cortocircuito dinámico en transformadores.

Se desarrolla un programa de computación que evalúa el impacto que producen las variaciones en las magnitudes físicas de los devanados, sujetadores y núcleo de un transformador, en las intensidades de los esfuerzos electrodinámicos y térmicos.

1. Crítica de la bibliografía

Principales textos analizados:

❖ *Análisis de la resistencia al pandeo de los devanados de los transformadores de distribución sujeto a fuerzas electromagnéticas bajo condiciones de cortocircuito.*

Autores	Kojima, H., Miyata, H., Shida, S., Okuyama, K. Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
Origen del artículo	IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems
Fecha de publicación	May 1980
Volumen	PAS-99, Issue: 3
En las página(s)	1288-1297
ISBN	0018-9510
Identificador digital	10.1109/TPAS.1980.319761
Posted online	2007-02-26 09:31:59.0

Resumen

El devanado interior de un transformador de distribución está sujeto a fuerzas electromagnéticas bajo condiciones de cortocircuito. Cuando estas fuerzas exceden cierto límite, los devanados del transformador se pandean.

Este artículo trata sobre el análisis de la resistencia al pandeo de los devanados del transformador, incluyendo la evaluación de la rigidez a la flexión de los devanados contruidos mediante enrollados a base de folios, el efecto de soporte de los espaciadores en la deformación del devanado y la deformación plástica causada por la tensión circunsferencial.

El método de los elementos finitos (ANEXO 1) es utilizado, en el análisis para obtener la resistencia al pandeo radial de los devanados y los resultados analíticos muestran la concordancia con los resultados experimentales del modelo sujeto a condiciones de cortocircuito.

Análisis

Este artículo le confiere una gran importancia al análisis teórico. Se toma en consideración el tipo de proceso de fabricación de los devanados de disco, las deformaciones plásticas causadas por la compresión circunsferencial así como el efecto de los distanciadores y apoyos en la deformación de los devanados. Los autores utilizan el método de los elementos finitos para calcular la resistencia al pandeo radial de los devanados en los transformadores de gran tamaño. Los problemas típicos son analizados por este método y los resultados analíticos están en concordancia con los resultados experimentales obtenidos a través de la prueba de cortocircuito en un transformador real utilizado. A la hora de comprobar la resistencia al pandeo solo se considera el efecto de la barrera de aislamiento sin considerar los sujetadores, los cuales ciertamente brindan fortaleza superior a la que brindan los parámetros tomados por los autores.

El artículo no toma en consideración que cuando un transformador está sujeto a esfuerzos por cortocircuito, éstos son dinámicos por lo cual las fuerzas en el mismo son variables en el tiempo, así como tampoco se consideran los posibles efectos de la dependencia del tiempo, los fenómenos de resonancia y las frecuencias naturales estructurales.

Los autores pudieran también considerar posibles combinaciones de fuerzas radiales con efectos de fuerzas axiales dinámicas y que tales fuerzas axiales tiendan a aflojar los espaciadores de cartón prensado y producir la inclinación radial de espaciadores u otras condiciones inestables.

❖ ***Normas para la resistencia de los transformadores a condiciones de cortocircuito.***

Autores

McNutt, W.J., McMillen, C.J., Nelson, P.Q., Dind, J.E.

Mechanical Engineering Research Laboratory,
Hitachi, Ltd.

Origen del artículo

IEEE, Transactions on Power Apparatus and
Systems

Fecha de publicación	March/April 1975
Volumen	94, Issue: 2, Part 1
En las página(s)	432- 443
ISBN	0018-9510
Poster online	2006-03-27 11:00:03.0

Resumen

En este artículo se revisan las normas relacionadas con la capacidad de los transformadores para resistir las condiciones de cortocircuito e identificar las secciones inadecuadas. Para cada una de estas partes, el material básico relacionado con estos conocimientos debe ser considerado por los grupos relacionados con la revisión de dicha norma. Las recomendaciones son hechas para secciones específicas de la misma.

Análisis

Actualmente fuera cual fuere un proceso fabril de mediana importancia para la economía de cualquier país, este está regido por algún tipo de norma ya sea nacional o internacional.

Por lo tanto, es una necesidad impostergable que la generación eléctrica, (siendo esta de vital importancia para la economía de cualquier país), esté regida por normas o parámetros y dentro de éste, las referidas a los transformadores de distribución.

Por una parte, el volumen y la rigidez de las exigencias que se ciernen sobre estos equipos, las normas nacionales de muchos países y las internacionales en general y por otra parte, la escasez y muchas veces la no existencia de márgenes de seguridad con que se diseñan y producen en la actualidad los transformadores, tratando de abaratar los costos, hace que éstas cobren una gran importancia.

Para la explotación, diseño o fabricación de transformadores, el conocimiento de las normas y el control de la calidad debe ser parte integrante de la política energética. De ahí emana la importancia que cualquier artículo relacionado con el tema tiene, en especial uno que contribuya a mejorar dichas normas.

Las normas a la que va dirigida este artículo y el artículo en sí, ya tienen varios años de conformadas por lo cual su vigencia debe ser reconsiderada.

Debido al natural desarrollo en todas las ramas de la ciencia, estas normas y sus posteriores correcciones deben ser revisadas continuamente para que no pierdan su vigencia debido a la continua creación de nuevos materiales con mayor resistencia a los cortocircuito y al desarrollo de nuevos transformadores con mayores prestaciones en todo sentido.

❖ *Análisis del efecto de la disposición de los devanados en el transformador de distribución en su comportamiento ante el cortocircuito franco.*

Autores	Cadavid. H., Arango.E., Castro, F. Grupo de Investigación en Alta Tensión, GRALTA [†]
Origen del artículo	IV Jornadas Latinoamericanas y I Iberoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico.
Lugar	Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Medellín, Colombia
Fecha	14 al 16 de Octubre de 1999

Resumen

En este artículo se muestran los resultados de ensayos de cortocircuito franco a transformadores de distribución y la simulación en programas basados en el método de los elementos finitos, que pretender identificar la influencia que tiene la disposición de los devanados en los esfuerzos de cortocircuito.

Análisis

El artículo plantea que el fenómeno afecta por igual a transformadores con disposición en sus devanados alta - baja o baja - alta, y los resultados muestran una tendencia a obtener mayores corrientes porcentuales en los transformadores con disposición alta - baja, lo que representa mayores

[†] GRALTA: High Voltage Research Group

esfuerzos de cortocircuito lo cual es corroborado por otros autores. La corriente adicional que se presenta en el transformador, es una corriente magnetizante, es decir, contribuye a crear flujo en el circuito magnético principal y no flujo de dispersión, lo que implica que circulará sólo en el devanado conectado a la fuente y los esfuerzos adicionales que aquí se presenten afectarán principalmente a éste.

Dado que normalmente el devanado de baja tensión se fabrica en fleje y el de alta tensión en capas de varios conductores de alambre redondo y considerando el mejor comportamiento ante los esfuerzos axiales del fleje, las condiciones se hacen más críticas, en transformadores con disposición alta - baja. Es por esto que durante el ensayo de cortocircuito franco a transformadores de distribución, la corriente debe estar definida por la impedancia de cortocircuito de la máquina y la impedancia de la red. Corrientes adicionales como las aquí expuestas, deben evitarse bien sea con la ejecución del cortocircuito posterior a la energización o desmagnetizando el aparato antes de someterlo a ensayo. Aunque la segunda alternativa da buenos resultados en transformadores de potencia, en pequeños transformadores puede llegar a ser insuficiente, debido a que la sola componente asimétrica de corriente por el circuito magnético puede llegar a saturarlo. Por lo cual en este análisis es de vital importancia la potencia de los transformadores de distribución a los cuales será aplicado. En el ensayo se utilizó como fuente la red de distribución local de 13 200 V, para la ejecución del ensayo y se cortocircuitó el devanado de baja tensión. Esta condición garantiza el cumplimiento de la norma para la mayoría de los transformadores que en el País se fabrican, con algunas pocas excepciones.

❖ ***Windings disposition effect on distribution transformers behavior under short-circuit condition.***

Autores

García,D., Cadavid,H., Alfonso.N.

Grupo de Investigación en Alta Tensión, GRALTA

Origen del artículo

Advanced Research Workshop on Modern Transformers, ARWtr2004

Fecha 28 -30 octubre 2004.

Lugar Vigo, España

Resumen

En este artículo se presentan el desarrollo y los resultados de un proyecto de Investigación mediante el cual se analizó el comportamiento del transformador de distribución ante un cortocircuito franco. El estudio abarcó dos diferentes etapas que incluyeron la simulación del fenómeno (comportamiento electromagnético y comportamiento mecánico) y la realización de pruebas de cortocircuito franco sobre una muestra de catorce transformadores. Se analizaron dos diseños de transformadores cuya diferencia más notoria fue la disposición de sus devanados (disposición AT-BT y disposición BT-AT) lo que permitió analizar la influencia de cada disposición en el comportamiento del transformador durante el cortocircuito. El proyecto contribuyó a modernizar el campo de pruebas de cortocircuito franco del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle (LAT), esto permitió determinar la incidencia del método de prueba (cortocircuito previo a la energización y cortocircuito posterior a la energización), en el comportamiento del transformador durante el cortocircuito franco.

Análisis

El artículo plantea que entre los transformadores de distribución de pequeña potencia, con diferente disposición en sus devanados (BT-AT y AT-BT), no existe diferencia significativa en su comportamiento ante el cortocircuito franco, ya que el área de la espira media, del devanado que se energiza durante la prueba, no presenta diferencias significativas entre los dos diseños. Además el método de aplicación del cortocircuito, influye significativamente en el comportamiento de los transformadores de distribución de pequeña potencia. Esto se debe a que los transformadores con núcleo arrollado generalmente presentan niveles de corriente inrush mayores que los encontrados en transformadores de núcleo apilado, por lo tanto, cuando el cortocircuito es aplicado con el método de cortocircuito previo, es posible que se presenten

incrementos considerables de las fuerzas electromagnéticas sobre los devanados.

La metodología desarrollada para la construcción de un modelo computacional, con el cual se puede simular el comportamiento mecánico del transformador bajo condición de cortocircuito, puede ser empleada por los fabricantes de transformadores para evaluar y depurar sus diseños antes de construir prototipos para ser probados en laboratorios. Aunque el proyecto se concentró en el análisis del comportamiento mecánico del transformador de distribución bajo condición de cortocircuito, la metodología para el desarrollo de las simulaciones puede ser extrapolada para ser empleada en el análisis del comportamiento de transformadores de mayor potencia.

En resumen este artículo es una actualización del anterior de los mismos autores ya que utiliza modelaciones más actualizadas y además plantea que entre los transformadores de distribución de pequeña potencia, con diferente disposición en sus devanados (BT-AT y AT-BT), no existe diferencia significativa en su comportamiento ante el cortocircuito franco.

❖ ***Esfuerzos de cortocircuito en transformadores.***

Autores	Sacchi, Jorge N. L., Rifaldi, Alfredo
Origen del artículo	Cálculo y diseño de máquinas eléctricas
Fecha de publicación	1990
Lugar	La Plata, Argentina
Identificador digital	http://davinci.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/cme/vol-07/1cap13/cm-13a.htm

Resumen

En este trabajo se hace un análisis de los esfuerzos térmicos y electrodinámicos a los que están sometidos los transformadores en condición de cortocircuito. Para esto es necesario encontrar el valor de la corriente de cortocircuito más representativo considerando que éste debe ser el valor máximo que puede presentarse.

Se hace una determinación de la temperatura máxima alcanzada por los conductores de los devanados. En este trabajo se describe una metodología simplificada para calcular los requerimientos de los enrollados sometidos a estos esfuerzos mediante el análisis de las características mecánicas de los materiales conductores y de los materiales aislantes, de las fuerzas estáticas y dinámicas de los enrollados externos e internos. Además se señala la orientación para efectuar estudios más rigurosos para mejorar el conocimiento de estos fenómenos y evaluar cuantitativamente sus consecuencias mediante el estudio de la inestabilidad a la compresión axial del enrollado externo e interno, como de la frecuencia propia del enrollado externo debido a las vibraciones radiales, la propia del enrollado interno por vibraciones radiales y la propia de los conductores debido a las vibraciones axiales.

Los ensayos de laboratorio son los que finalmente permiten verificar la validez de los modelos adoptados en los cálculos y en consecuencia, realimentar la experiencia de quien realiza este tipo de trabajos siempre y cuando se tengan en cuenta factores como la frecuencia de resonancia y otros.

Las normas también establecen las condiciones que deben cumplir los transformadores con relación a estos ensayos.

Análisis

Se describen los principales factores que influyen en los transformadores cortocircuitados y otros aspectos relacionados con los mismos lo que permite una mayor comprensión de los procesos que ocurren durante un cortocircuito para así desarrollar nuevos y mejores procesos que brinden una mayor resistencia a esta condición.

Se debe señalar que aunque los análisis teóricos son buenas herramientas de desarrollo, los mismos deben ser exhaustivamente comprobados con ensayos reales.

Este artículo es, de todos los consultados por el autor, el que mas profundamente analiza el fenómeno desde el punto de vista puramente mecánico, de ahí su mérito.

❖ *Esfuerzos mecánicos en transformadores de distribución.*

Autores	Agudelo, M.I., Cadavid,H., Jaramillo P,G.A., Aguilar C,Y.A
Origen del artículo	Revista: Energía y Computación
Lugar	Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Medellín, Colombia
Fecha de publicación	Segundo Semestre de 2001
Volumen	Volumen X , No. 2, Edición No. 18

Resumen

Un transformador de distribución, en su vida útil, se encuentra sujeto a un estado de carga que puede ser destructivo ocasionado por los cortocircuitos. Este fenómeno ha sido estudiado en transformadores de potencia y literalmente despreciado en transformadores de distribución. Se muestra como puede hacerse una aproximación a la descripción del comportamiento mecánico a bajo costo. Se describe un sistema de marcación que permitió medir los desplazamientos relativos acumulativos de las partes de interés del transformador al final de las pruebas de cortocircuito. El método de elementos finitos permitió cuantificar la magnitud de los desplazamientos y esfuerzos mecánicos del transformador durante el cortocircuito.

Análisis

Este artículo aporta herramientas para el análisis de los procesos destructivos que ocurren cuando un transformador de distribución esta sujeto a condiciones de cortocircuito ya que logra un acercamiento al comportamiento mecánico de los transformadores de una forma asequible económicamente. Se toman en consideración los elementos físicos que interactúan en el comportamiento mecánico del transformador durante el cortocircuito. El desarrollo de un sistema de marcación que permite medir los desplazamientos relativos acumulativos de las partes de interés del transformador al final de las pruebas de cortocircuito, permite observar el fenómeno en vez de utilizar cualquier dispositivo adicional

externo como transductores u algún otro tipo de instrumento de medición que elevaría el costo de las pruebas y limitaría su aplicación.

Las ventajas entre la utilización de los anteriores dispositivos y el empleo de marcas radica en que estas últimas no afectan el campo magnético ni afectan en lo mas mínimo su configuración geométrica. Complementar el análisis con la aplicación del método de elementos finitos permite cuantificar la magnitud de los desplazamientos y esfuerzos mecánicos del transformador durante el cortocircuito, lo cual es mencionado en diferentes artículos de prestigiosos autores relacionados con el tema [9, 10]. Por supuesto que como toda aproximación con la aplicación de modelos, es necesario tener en cuenta un número significativo de consideraciones como es asumir una serie de suposiciones de tipo mecánico que regirán el procedimiento mismo de la simulación, las cuales, en los modelos reales, tienen sus variaciones. Entre ellas se puede mencionar la influencia que tienen sobre los desplazamientos, los elementos aislantes y de sujeción, otra consideración puede ser el suponer que las dimensiones de todos los elementos de construcción se mantuvieron invariables en sus medidas en todo el proceso de fabricación y ensamblado de los mismos. Como se sabe esto dista mucho de la realidad.

Por ser la fabricación de transformadores un proceso manual se puede presentar alguna diferencia en las alturas eléctricas (excentricidad) aumentando de esta manera las fuerzas axiales en los devanados.

En el artículo se menciona que el fenómeno de cortocircuito en un transformador es el resultado de la interacción de la corriente y la geometría que cambian durante cada instante de tiempo, alterando de esta manera el campo magnético y por lo tanto, las fuerzas magnéticas.

En los modelos reales, los esfuerzos del transformador por efecto del cortocircuito son un problema del carácter no lineal, dinámico y varios componentes mecánicos presentan un comportamiento no lineal y, si se desea una aproximación a la situación real, no sería correcto ejecutar los modelos en el rango del análisis lineal estático. Por otra parte, tomando en consideración estas suposiciones y otras mencionadas, además de la adecuación a las diferentes variantes de transformadores su objetivo es acertado ya que los principales problemas en los transformadores ocurren por desplazamientos

axiales y radiales del devanado y por el movimiento del núcleo ocasionando la variación del circuito magnético y su respectiva falla a nivel eléctrico.

❖ *Modelamiento y evaluación de fuerzas por cortocircuito en transformadores de distribución.*

Autores	Aponte G., Cadavid H., Lurie, A. Grupo de Investigación en Alta Tensión, GRALTA; Instituto de Investigaciones Eléctricas V.E.I., Moscú, Rusia, E-250
Origen del artículo	VII Congreso Latinoamericano y IV Iberoamericano en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico
Fecha	26 al 30 de julio del 2005

Resumen

En este artículo se presenta la modelación y evaluación de las fuerzas electromagnéticas que surgen en los transformadores bajo condiciones de cortocircuito brusco. La investigación se desarrolló con el propósito de comprobar teórica y experimentalmente la aptitud para soportar las fuerzas de cortocircuito en los transformadores de distribución producidos en Colombia. Con este propósito fueron seleccionados dos transformadores de 25 kVA y 75 kVA. Para el modelo se supuso el comportamiento estático de las fuerzas y para el cálculo fue adoptado el programa REST .La evaluación experimental se realizo en el campo de pruebas de la Universidad del Valle.

Análisis

En este artículo los autores realizan comparaciones mediante el “software” REST de dos transformadores, uno trifásico de 75 kVA a y otro monofásico de 25 kVA, con respecto al transformador de 75 kVA exponen que se logra una menor fuerza axial durante el cortocircuito cuando las alturas de ambos devanados sean lo mas próximas posible, y en cuanto al transformador de 25 kVA, comprueba que la mayor acción de las fuerzas axiales se producen en la zona donde no existen soportes en el sentido axial, lo que reduce

considerablemente su aptitud ante cortocircuitos, estos resultados brindan una base para el calculo de las fuerzas de cortocircuito en la zona más críticas y fueron adoptados por el autor del presente trabajo para el desarrollo del mismo.

❖ ***Limitación de corriente durante ensayos de aptitud para soportar cortocircuito en transformadores de distribución.***

Autores	Muñoz, M., García, D., Aponte, G. Grupo de Investigación en Alta Tension GRALTA.
Este artículo aparece en	VII Congreso Latinoamericano y IV Iberoamericano en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico
Fecha	26 al 30 de julio del 2005

Resumen

Este artículo describe los métodos que pueden emplearse para lograr distintos valores de corriente cuando se realiza el ensayo de aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución o en ensayos especiales como los de verificación de la coordinación de protecciones en transformadores de distribución autoprotegidos. Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos en la limitación de corriente durante pruebas realizadas en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, mediante el uso de transformadores limitadores.

Análisis

Es un complemento de los diferentes procedimientos de análisis de la resistencia a los cortocircuito de los transformadores y posee las mismas ventajas y limitaciones de las pruebas reales realizadas a los transformadores.

❖ ***Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: a time domain approach.***

Autores	De Azevedo, A. C., Delaiba, A C., De Oliveira, J. C., Carvalho, B.C., De Sousa B. H.
Origen del artículo	International Conference on Power Systems Transients (IPST'07)

Lugar Lion, France
Fecha June 4 -7, 2007

Resumen

Este artículo presenta los resultados de una investigación llevada a cabo en el campo de los efectos del cortocircuito en los transformadores. Se basó en modelos del transformador en el dominio del tiempo, utilizando las fuerzas electromagnéticas y las reluctancias. Este modelo permite simular el transitorio del transformador y su conducta en estado estable considerando variables eléctricas, magnéticas y mecánicas del mismo. La metodología se aplica a un transformador de potencia típico que opera bajo las condiciones de corrientes nominales y cortocircuitos. Se utiliza un “software” para la comparación en el dominio de tiempo confrontándose el mismo con los resultados ya validados de otro programa basado en el método de los elementos finitos.

Análisis

Es de los artículos estudiados, el que presenta un mayor acercamiento al problema concreto del cálculo de las fuerzas electromagnéticas, también es el más actualizado hasta el momento.

Los valores obtenidos de ambas estrategias, han demostrado que la metodología que aquí se propuso, en el dominio del tiempo y el método de los elementos finitos es similar en cuanto a la actuación de ambas simulaciones bajo condiciones normales y de cortocircuito. Esto indica que el modelo en el dominio del tiempo puede suponerse como un buen procedimiento para evaluar las fuerzas interiores y las tensiones mecánicas en el transformador aunque las investigaciones del artículo en cuestión, sólo se llevaron a cabo para las fuerzas radiales.

❖ ***Investigation of transformer electromagnetic forces caused by external faults using fem.***

Autores De Azevedo, A. C., Delaiba, A C., J. C. De Oliveira, J. C., Carvalho, B.C., De Sousa B. H.

	: TDC '06, IEEE/PES
Origen del artículo	Transmission & Distribution. Conference and Exposition, Aug. 2006
Fecha de publicación	2007-04-02 09:58:21.0
En las página(s)	1-6
ISBN	1-4244-0287-5
Identificador digital	10.1109/TDCLA.2006.311522
INSPEC	Accession Number: 9441348

Resumen

Este artículo se centra en la investigación de las fuerzas electromagnéticas causadas por fallas externas, emplea una simulación basada en el método de los elementos finitos (FEM) y calcula las fuerzas por la vía tradicional y por el método (FEM) mencionado.

Análisis

Este artículo presenta un programa que utiliza el Método de los Elementos Finitos para obtener las fuerzas electromagnéticas en los bobinados concéntricos de un transformador bajo las condiciones de cortocircuito externo. Con respecto a los aspectos cuantitativos, se observó una concordancia entre el “software” (FEM) y los resultados analíticos para todas las condiciones estudiadas, mostrando con ello la aprobación del método analítico utilizado en el presente trabajo. Con respecto a los aspectos cualitativos, las simulaciones llevadas a cabo han manifestado que el uso de secciones del “tap” puede producir grandes cambios en la distribución de flujo magnético ya que el mismo se incrementa y esto tiende a causar un aumento de las fuerzas axiales, siendo posteriormente éstas responsables de un gran daño y perjuicios a los transformadores. Utilizar secciones del “tap” en el enrollado externo puede ser visto como un cortocircuito entre espiras el cual produce asimetría en el enrollado lo que tiende a causar un incremento en ambas fuerzas radiales y axiales, lo cual es responsable de daños a los transformadores .

En definitiva, este artículo amplía los estudios sobre el tema utilizando el conocido método de los elementos finitos, aunque confirma el camino trazado

para la realización de este trabajo, es decir la utilización del método de cálculo analítico, ya que al igual que el artículo anterior, valida las ecuaciones de “The Short-Circuit Strength of Power Transformers”, texto de referencia utilizado por la mayoría de la literatura sobre el tema.

❖ ***The short-circuit strength of power transformers.***

Autores	Waters, M. M.I. & E. Surges wid Transformer Department 77w Electricity Research Association Leatherhead. SuJrey,
Editorial	McDonald & Co. Ltd, London
Fecha	1966

Resumen

Los transformadores de Potencia y los transformadores de distribución, para brindar un servicio satisfactorio, deben diseñarse para poder resistir los cortocircuitos que es probable que ellos reciban durante un período de más de veinte años.

Para sobrevivir un cortocircuito los devanados deben tener la fuerza mecánica suficiente para resistir el daño electromagnético producido por la corriente y al mismo tiempo, los materiales utilizados en la construcción del mismo, tales como, conductores y aisladores, deben poder soportar sin deteriorarse significativamente las altas temperaturas que producen las corrientes de fallas. Es necesario para el diseñador saber las características de las corrientes de falla pertinente a su problema y los efectos en la temperatura que tienen las mismas, así como ser capaz de diseñarlo teniendo en cuenta las fuerzas electromecánicas que estas fallas producen.

Análisis

Este libro constituye la bibliografía fundamental de este trabajo, por la amplitud con que aborda el tema, y por la cantidad de referencias que al mismo se le hacen en la literatura existente.

❖ ***The J & P Transformer Book, A Practical Technology of the Power Transformer.***

Autores	Martin J., FIEEE
Editorial	Oxford, Elsevier Science Ltd
Fecha	2007, 13 edition

Resumen

Esta edición, es la actualización de la anterior y contiene al igual que ésta, una renovada información la cual es util en fábricas de transformadores, instituciones docentes y asociaciones industriales. La diferencia fundamental con la edición anterior es que ésta ya alcanza experiencia de talleres y fábricas de transformadores fuera del Reino Unido, además, se basa en las normas IEC y no en la BS:171 como la anterior edición.

Análisis

En este texto se apoya, fundamentalmente y de forma casi textual en “The Short-Circuit Strength of Power Transformers”, el cual es de 1966, aunque mantienen vigentes sus postulados y como aporte positivo se debe señalar que ya utiliza el Sistema Internacional de Unidades .

❖ ***Short-circuit duty of power transformer.***

Autores	Giorgio Bertagnolli
Origen del artículo	The ABB aproach
Editorial	Golinelli Editore
Fecha	1998,

Resumen

Esta edición revisada de una anterior del mismo autor tiene como objetivo darle a conocer al lector qué sucede cuando los transformadores de potencia sufren un cortocircuito. Más allá de la información involucra las maneras en que los

transformadores de potencia pueden fallar en el servicio debido a las fuerzas de cortocircuito y los esfuerzos.

Análisis

En este texto se plasma la experiencia de un especialista de la corporación ABB, con respecto a las fallas de los transformadores de potencia debido a cortocircuitos. Plantea análisis ya vistos en textos anteriores y metodologías de trabajo utilizadas por esta firma para el diseño de dichos transformadores, así como sus pruebas, es de notar que alguno de ellos fueron muy importantes para el desarrollo de este proyecto.

1.1 Conclusiones de la Crítica Bibliografica.

Como se puede apreciar, aunque la mayoría de la literatura consultada, analiza el fenómeno de los esfuerzos de cortocircuito en transformadores mediante el método numérico de los elemento finitos; el autor del presente trabajo basándose en la formulaciones expuestas en [8], utiliza las mismas a través de un método analítico, coincidiendo con lo planteado en [9, 10] y realizando dicho análisis para las zonas mas criticas del transformador acorde a [2].

2. Generalidades de los transformadores.

2.1 Tipos de transformadores.

Se distinguen dos tipos principales de transformadores, tipo acorazado y tipo núcleo (ver Figuras 2.1 y 2.2). La diferencia fundamental entre ellos radica en que en el transformador tipo acorazado, el núcleo envuelve a las bobinas y en el transformador tipo núcleo, las bobinas envuelven al núcleo.

En cada uno se presentan campos de distinta forma y en consecuencia los esfuerzos resultantes difieren.



Figura 2.1. Transformador tipo acorazado

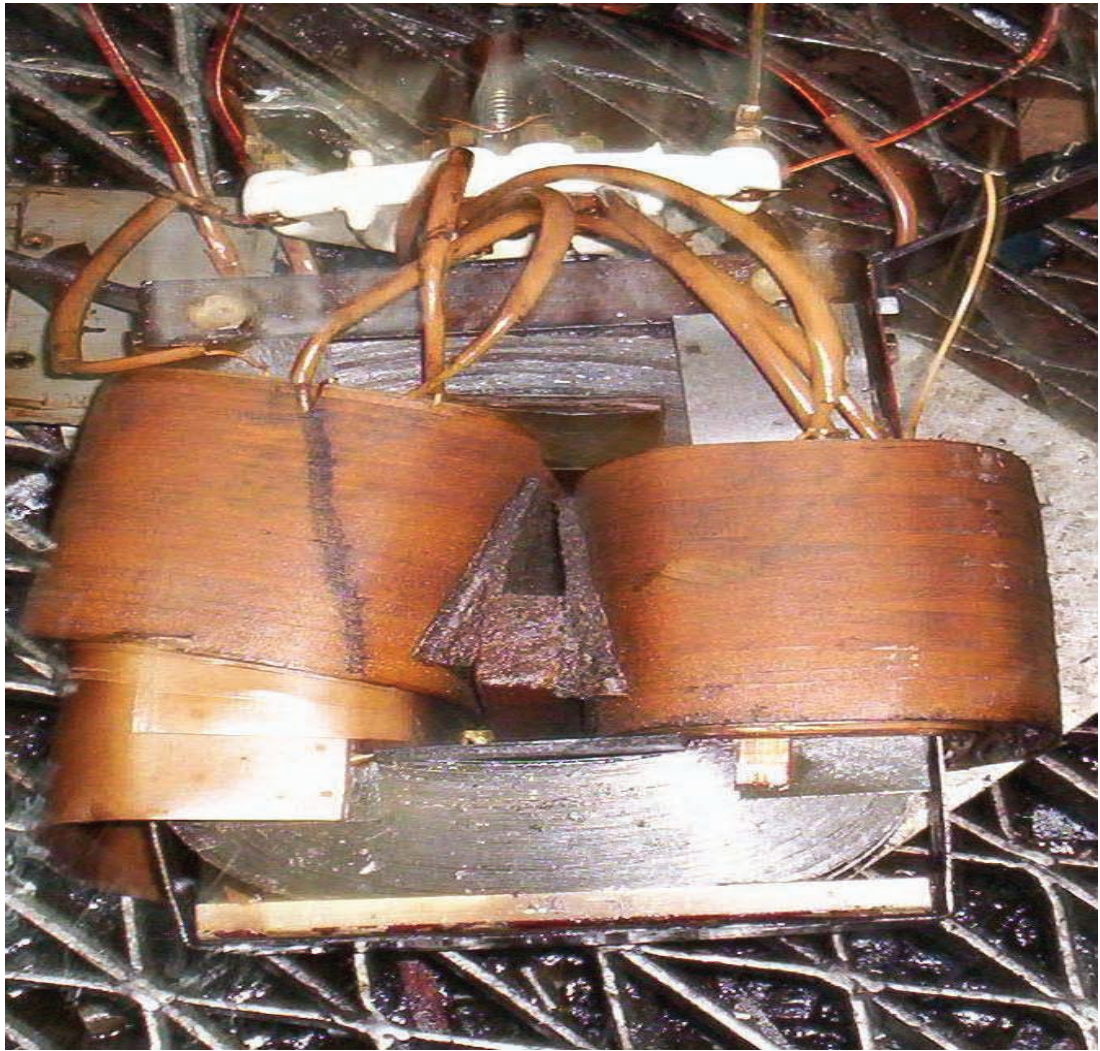


Figura 2.2. Transformador tipo núcleo

2.2 Características de los devanados.

2.2.1 Los devanados del transformador de distribución.

Los devanados del transformador constituyen elementos formados por capas de conductor y capas de papel aislante. Estos devanados pueden dividirse en dos o tres elementos en dependencia de la configuración que se utilice.

Una configuración utilizada en transformadores acorazados monofásicos es la “baja-alta-baja”, es decir se enrolla sobre el núcleo, medio devanado de baja, luego el devanado de alta y por último la otra mitad del devanado de baja. En transformadores tipo núcleos y tipo acorazados la configuración que puede ser utilizada es la “baja-alta” o sea se enrolla sobre el núcleo todo el devanado de baja y sobre este el devanado de alta.

Esta configuración establece una longitud media de las espiras del devanado de alta mayor a la configuración anterior lo cual provocara una mayor resistencia, reactancia, impedancia y pérdidas de cortocircuito.

También está ganando en presencia la configuración “alta-baja”.

El diseño que se emplea actualmente en la fábrica de transformadores “Latino”, es de transformadores acorazados y se utiliza la distribución “baja-alta”. Esto se justificó a finales de los 90 por la alta incidencia del cortocircuito externo en los transformadores de distribución. Para tratar de contrarrestar la destrucción de los transformadores por esta causa se decidió la elevación del porcentaje de impedancia a valores superiores a $2,5 \Omega$ para tratar de disminuir el daño en éstos debido a las fallas.

Los transformadores con distribución “baja-alta-baja” presentan valores de porcentaje de impedancia inferiores al 2 %, además de que la distribución presentada por los mismos es más sensible a los esfuerzos electrodinámicos, debidos a las corrientes de cortocircuito.

2.2.2 El devanado de Baja tensión en transformadores de distribución.

El devanado de baja de un transformador se divide en varios elementos. El primer elemento que se sitúa sobre el núcleo a partir de una cierta holgura es una capa de electrocartón con la función de servir de medio aislante entre el núcleo y el devanado de baja y a la vez de soporte mecánico para el propio enrollado. Seguidamente se sitúan capas de conductor intercaladas con capas de papel aislante, estas capas de papel aislante deben cumplir la función de aislar eléctricamente dos capas contiguas de conductores. En los casos necesarios aquí también se puede colocar un canal de refrigeración.

Una parte fundamental de este devanado es la distribución de los conductores en las capas. El tipo de conductor que se utiliza es un conductor rectangular formado por un ancho y un espesor determinado recubierto por una capa aislante.

Otro aspecto significativo de la distribución de los conductores de este devanado es la utilización de conductores en paralelo, es decir, que el área de la sección transversal del conductor del devanado de baja puede estar formada

desde una hasta cuatro unidades de conductor rectangular cuya distribución puede ser alguna de las que se muestra en la Figura 2.3



Figura 2.3 Tipos de distribución posibles de conductores en paralelo para el devanado de baja de un transformador de distribución. 1) Un conductor; 2) Dos conductores en paralelo; 3) Tres conductores en paralelo; 4) Cuatro conductores en paralelo.

2.2.3 El devanado de Alta Tensión en transformadores de distribución.

Luego del devanado de baja se sitúan una serie de papeles electro aislantes denominados papeles entre devanados de baja y alta. La función fundamental de estos papeles es aislar eléctricamente ambos devanados. En caso necesario en el centro de estos papeles se puede colocar un canal de refrigeración. A partir de este punto se comienzan a situar capas del conductor del devanado de alta intercaladas con capas de papel aislante. El conductor del devanado de alta es un conductor cilíndrico, o sea que posee una sección transversal circular de un diámetro determinado y está recubierto por una capa aislante que comúnmente es de barniz de 0,035 mm. Debido a la gran cantidad de vueltas que posee el devanado de alta con respecto al de baja este devanado no mantiene la forma rectangular sino que toma forma elíptica dando lugar a las denominadas cabezas del devanado de alta que se muestran en la Figura 4.2. Este devanado también admite situar varios canales de refrigeración (desde uno hasta tres por cada cabeza) por las cabezas del devanado. Al final de este devanado se sitúan varias capas de papel electro aislante, el número de las mismas es igual al que se utiliza en los papeles entre baja y alta y se le denomina papeles del final de la bobina o forro cuyo objetivo es servir como una capa aislante del medio externo.

2.2.4 Características mecánicas de los materiales conductores.

Las características más interesantes de los materiales conductores desde el punto de vista de este proyecto son; el módulo de elasticidad E y la carga límite de fluencia σ dado que son necesarias para determinar la resistencia mecánica de los metales sometidos a esfuerzos [1].

Como concepto se puede decir que el módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación relativa producidos. Es decir:

$$E = \frac{d \sigma}{d \varepsilon} \quad (2.1)$$

Donde:

$d\sigma$: Incrementos de tensión aplicados.

$d\varepsilon$: Incrementos de deformación relativa.

El límite de fluencia o límite elástico aparente, es el valor de la tensión mecánica límite que soporta una probeta de un material dado, a partir del cual, su deformación deja de ser elástica para convertirse en plástica (fenómeno de la cedencia o fluencia). Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.

Los materiales utilizados en la construcción de los devanados de los transformadores son el cobre y el aluminio en aleación con otros metales que pueden mejorar el límite de fluencia de la aleación, sin empeorar la conductividad de la misma.

Por ejemplo en el cobre, puede haber un 0,04 % de plata. Para el aluminio el contenido de cobre no debe ser mayor de 0,05 % y de cobre más silicio más hierro no mayor que 0,5 %.

Las características de deformación en función de la carga para el cobre y el aluminio se apartan gradualmente de la linealidad, no estando bien definidos sus límites de fluencia. Por esta razón se adopta como límite de fluencia, en

estos casos, la carga para la cual corresponde una deformación permanente igual a 0,2 % de la longitud inicial de la probeta, y se le denomina $\sigma_{0.2}$ (70×10^6 Pa para el cobre y 45×10^6 Pa para el aluminio [2]).

2.2.5 Características de los materiales aislantes.

Los materiales aislantes más utilizados en la elaboración de los devanados de los transformadores, son el papel tipo kraft con una densidad del orden de 0,75 a 0,85 kg/dm³, con espesores desde 0,1 mm y el electro cartón para la elaboración de cajetín de soporte, distanciadores, listones separadores etc. Este es normalmente de tipo duro, prensado en caliente, con una densidad del orden de 1,25 kg/dm³ y espesores desde 1mm en adelante.

El Papel adiamantado.

De acuerdo a [3] se conoce como papel adiamantado a el Papel kraft térmicamente mejorado, con resina epoxi en grado B.

La resina es aplicada formando cuadrados de 9,5 mm de lado dispuestos formando un diamante.

Las condiciones que debe cumplir el papel aislante son:

1. Que la fuerza de fricción generada por la resistencia al desgarre del papel aislante cuando se adhiere al cobre sea despreciable en comparación con las fuerzas a las que es sometido el cobre por efectos del campo magnético.
2. Que el papel actúe como un sistema resorte amortiguador, donde presenta una resistencia importante a la compresión en la dirección de las fuerzas radiales.

Basado en sus propiedades puede ser utilizado para la unión entre sí de las distintas capas de cobre o aluminio, capas de aislamiento, laminaciones y tiras. La distribución de los puntos de resina asegura un espacio suficiente entre ellos para facilitar la impregnación del aceite.

El papel adiamantado puede ser aplicado en una o más capas entre las partes a aislar como se observa en la Figura 2.4. Mediante calentamiento en un horno de secado, la fina capa de resina, se funde y polimeriza. A través de este proceso las capas quedan pegadas entre ellas.

Se aplica de forma tal que las distintas capas del bobinado quedan unidas consiguiendo que toda la bobina se convierta en un bloque sólido.

Con su utilización la resistencia a los cortocircuitos de dichos bobinados se incrementa considerablemente comparada con los sistemas convencionales. Además se consigue un gran ahorro debido a la reducción de los elementos de soporte.

La mejora térmica del papel de base proporciona de un 12 % a un 15 % de incremento en la resistencia térmica en comparación con los productos de celulosa habituales.

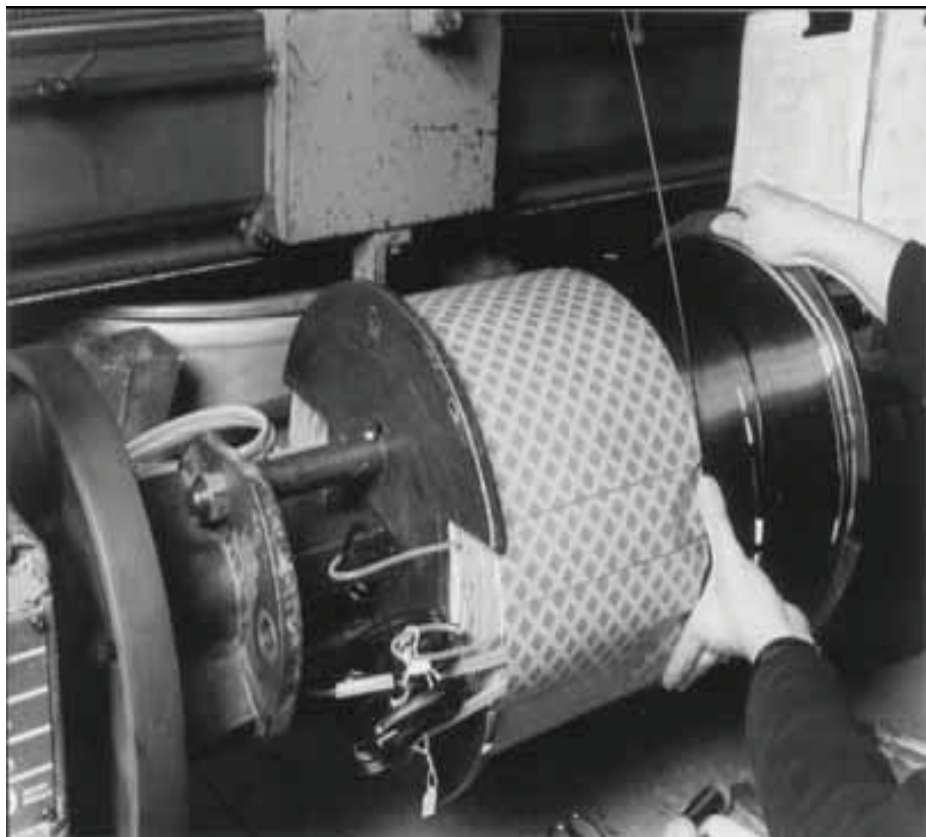


Figura 2.4. Papel adiamantado en los transformadores de distribución

3. Corrientes de cortocircuito en transformadores.

3.1 Corriente periódica, aperiódica y de cortocircuito total.

Cuando un transformador proporciona una corriente de carga tendrá una red complicada de fuerzas interiores que actúan sobre los conductores, las estructuras de apoyo y las estructuras de aislamiento.

Estas fuerzas son producidas por la interacción de los conductores que transportan la corriente dentro de los campos magnéticos asociados a la fuente de corriente alterna.

Las cargas severas y particularmente las corrientes de fallas como resultado de un evento de cortocircuito externo, provocan crecimientos ostensibles de la corriente y desatan fuerzas de gran magnitud proporcionales al cuadrado de la corriente.

Dado que un cortocircuito se establece como un proceso abrupto y transitorio, en la corriente producida durante el mismo aparecerá una componente de corriente directa aperiódica y decreciente, superpuesta a otra componente alterna periódica y sinusoidal, de frecuencia igual a la nominal del sistema, también llamada corriente simétrica.

Es decir que la corriente de cortocircuito como resultante de la suma de ambas componentes, en sus primeros instantes, será una onda sinusoidal asimétrica que se irá atenuando exponencialmente en el tiempo hasta convertirse en una onda sinusoidal simétrica estacionaria en el tiempo.

El tiempo que demora la componente aperiódica en atenuarse depende de la constante de tiempo del circuito equivalente asociado.

La corriente de cortocircuito en su etapa asimétrica, por su magnitud, será la más peligrosa para la máquina y dentro de ésta, su primer pico será el más agresivo.

En los transformadores monofásicos los cálculos de esfuerzos electrodinámicos, se realizan para el valor del primer pico asimétrico de la corriente por ser éste el que mayor estrés produce. En los transformadores trifásicos se considera el instante en que una fase alcanza el primer pico asimétrico y en las otras dos el valor es la mitad y opuesto. Este valor está

condicionado por la tensión de alimentación, por la impedancia de la red, por la impedancia del transformador y por el ángulo de fase de la tensión en el momento en que se produce el cortocircuito.

En el instante en que ocurre un cortocircuito la onda de tensión puede estar en cualquier ángulo de su fase caracterizado por α . Si esta onda es sinusoidal, se puede representar por la siguiente expresión:

$$U(t) = U_{max} \operatorname{sen}(wt + \alpha) \quad (3.1)$$

Donde:

$U(t)$: Es el valor de la tensión instantánea, en volt.

U_{max} : Es el valor máximo de la onda de tensión, en volt.

$$U_{max} = \sqrt{2} U$$

U : Es el valor efectivo de la tensión, en volt.

ω : Es la frecuencia angular de oscilación de la tensión, en radianes por segundo.

t : Es el tiempo en segundo.

α : Es el ángulo de fase de la tensión en el instante del cortocircuito, en radianes.

El circuito equivalente de un transformador en cortocircuito sin considerar la rama de magnetización, se puede aproximar a un circuito RL de valores constantes. El valor instantáneo de la corriente simétrica o periódica, en general es:

$$I_{cs}(t) = I_{max} \operatorname{sen}(wt + \alpha - \phi) \quad (3.2)$$

O lo que es igual a:

$$I_{cs}(t) = \frac{U_{max}}{(Z_{cc} + Z_s)} \operatorname{sen}(wt + \alpha - \phi) \quad (3.3)$$

Donde:

I_{max} : Es la corriente simétrica máxima en ampere.

Z_{cc} : Es la impedancia de cortocircuito del transformador en ohm.

Z_s : Es la impedancia del sistema en ohm

Φ : Es el ángulo de defasaje entre la tensión y la corriente que introduce la impedancia del transformador en radianes.

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{(x_s + x_{cc})}{(R_{cc} + R_{cc})} \quad [rad] \quad (3.4)$$

X_{cc} : Es la reactancia de cortocircuito del transformador en ohm.

R_{cc} : Es la resistencia de cortocircuito del transformador en ohm.

X_s : Es la reactancia del sistema en ohm.

R_s : Es la resistencia del sistema en ohm.

Si se considera al sistema, de forma conservadora, una barra infinita, se puede suponer; Z_s igual a cero y el valor efectivo de la corriente simétrica será:

$$I_{cs} = \frac{U}{Z_{cc}} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

Escribiendo las ecuaciones (3.1) y (3.2) en función de I_{cs} , queda:

$$I_{cs}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (3.6)$$

El valor instantáneo de la componente de directa o aperiódica, en general es:

$$I_{ca}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.7)$$

Donde:

$$T = \frac{L_{cc}}{R_{cc}}$$

Entonces:

$$I_{ca}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \sin(\alpha - \phi) e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \quad (3.8)$$

La corriente de cortocircuito total será la suma de la componente aperiódica y periódica y provisionalmente se expresará así:

$$I_{ca}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + \sqrt{2} I_{cs} \sin(\alpha - \phi) e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \quad (3.9)$$

El primer término de la ecuación varía sinusoidalmente con el tiempo. El segundo término es aperiódico y decae exponencialmente con una constante de tiempo L_{cc}/R_{cc} .

En el instante del cortocircuito, ($t = 0$), $\omega t = 0$, $e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} = 1$, y :

$$I_{cs}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\alpha - \phi) \text{ y } I_{ca}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\alpha - \phi),$$

quiere decir que:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\alpha - \phi) + \sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\alpha - \phi)$$

La corriente total aparece como la suma de las dos componentes de igual magnitud, pero en realidad en $t = 0$, aun no hay corriente de cortocircuito, por lo que las componentes de CD y de estado estable tendrán signos opuestos con el fin de producir el valor cero de corriente que existe en ese momento y la ecuación (3.9), queda, definitivamente, [4, 5] de la siguiente forma:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\omega t + \alpha - \phi) - \sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\alpha - \phi) e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \quad (3.10)$$

O lo que es igual a:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} [\text{sen}(\omega t + \alpha - \phi) - e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \text{sen}(\alpha - \phi)] \quad (3.11)$$

La condición más severa de cortocircuito es cuando este ocurre en un instante en que $(\alpha - \phi) = \pm \pi/2$

Esto ocurre cuando α es muy cercano a 0 ó π rad (téngase en cuenta que ϕ tiene un valor muy cercano a $\pi/2$).

$$\text{Si } (\alpha - \phi) = -\pi/2$$

La componente de CD tendrá la forma: $\sqrt{2} I_{cs} e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \text{sen}(-\pi/2)$

- La componente simétrica tendrá la forma: $\sqrt{2} I_{cs} \text{sen}(\omega t - \pi/2)$

La ecuación (3.10) quedará:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} [\text{sen}(\omega t - \pi/2) - e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \text{sen}(-\pi/2)] \quad (3.12)$$

o lo que es igual a:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} [\text{sen}(2\pi ft - \pi/2) + e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}}] \quad (3.13)$$

$$\text{Si } (\alpha - \phi) = \pi/2$$

- La componente de CD tendrá la forma: $\sqrt{2} I_{cs} e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)$

- La componente simétrica tendrá la forma: $\sqrt{2} I_{cs} \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

La ecuación (3.11) quedará:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \left[\text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3.14)$$

o lo que es igual a:

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} I_{cs} \left[\text{sen}\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right) - e^{-t \frac{R_{cc}}{L_{cc}}} \right] \quad (3.15)$$

El primer pico de la corriente de cortocircuito asimétrica, ocurre para: $t = \frac{1}{2f}$

Entonces, evaluando la expresión (3.13) para este valor de t y teniendo en cuenta que

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{2\pi f}$$

queda:

$$I_{cc}\left(\frac{1}{2f}\right) = \sqrt{2} I_{cs} \left[\text{sen}\left(2\pi f \frac{1}{2f} - \frac{\pi}{2}\right) + e^{-\frac{2\pi f R_{cc}}{2f X_{cc}}} \right],$$

resolviendo queda

$$I_{cc}\left(\frac{1}{2f}\right) = \sqrt{2} I_{cs} \left[1 + e^{-\frac{\pi R_{cc}}{X_{cc}}} \right] \quad (3.16)$$

Evaluando para estas mismas condiciones, la ecuación (3.15), quedaría:

$$I_{cc}\left(\frac{1}{2f}\right) = \sqrt{2} I_{cs} \left[-1 - e^{-\frac{\pi R_{cc}}{X_{cc}}} \right] \quad (3.17)$$

Es decir que el primer pico aperiódico de la corriente de cortocircuito tendrá la expresión siguiente [6]:

$$I_p = k \times I_{cs} \quad (3.18)$$

Donde:

k: Es un factor que tiene en cuenta el efecto de la componente aperiódica o el llamado efecto de asimetría, su valor en magnitud, sin tener en cuenta su signo es:

$$k = \sqrt{2} \left[1 + e^{-\frac{\pi R_{cc}}{X_{cc}}} \right] \quad (3.19)$$

La expresión (3.18) es la que se emplea para obtener las fuerzas y esfuerzos en los transformadores ante cortocircuitos.

Dado que las fuerzas producidas son proporcionales al cuadrado de la corriente, una reducción moderada en la corriente provoca una reducción sustancial en los esfuerzos del cortocircuito.

Los cortocircuitos más frecuentes que muchos transformadores soportan, están por debajo del cortocircuito máximo, debido a la aleatoriedad en que se verifica el instante de falla. Este instante determina la magnitud de la componente aperiódica y el efecto de asimetría que producirá en la corriente de cortocircuito total.

Para determinar el esfuerzo térmico, se utiliza solo el valor efectivo de la corriente simétrica (3.5), por ser esta la que permanece estacionaria.

4. Esfuerzos en cortocircuitos.

4.1 Definición de esfuerzos.

Cuando ocurre un cortocircuito en la red, la alta corriente ocasiona en los transformadores; esfuerzos térmicos y mecánicos severos que a su vez pueden causar sobre elevaciones de temperatura, movimientos y deformaciones internas.

La distribución del flujo de dispersión y la intensidad de la corriente influyen notablemente en estos esfuerzos. La trayectoria del flujo incide en las pérdidas adicionales, en la presencia de sobre elevaciones de temperatura locales y además en los esfuerzos mecánicos que se presentan en los devanados debido al cortocircuito, es decir que la distribución de las fuerzas de cortocircuito depende de la disposición, las dimensiones de los enrollados y de la distribución de los ampere-vueltas.

Esfuerzos electrodinámicos, los que son consecuencia de la coexistencia de las elevadas corrientes, con el campo magnético de dispersión y alcanzan valores elevados que pueden llevar al transformador al colapso o rotura.

Debido a la ley de Ampere cada elemento rectilíneo de conductor de longitud dl recorrido por una corriente i , ubicado en un campo magnético de inducción B , está sometido a una fuerza elemental.

$$dF = i \times dl \times B \quad (4.1)$$

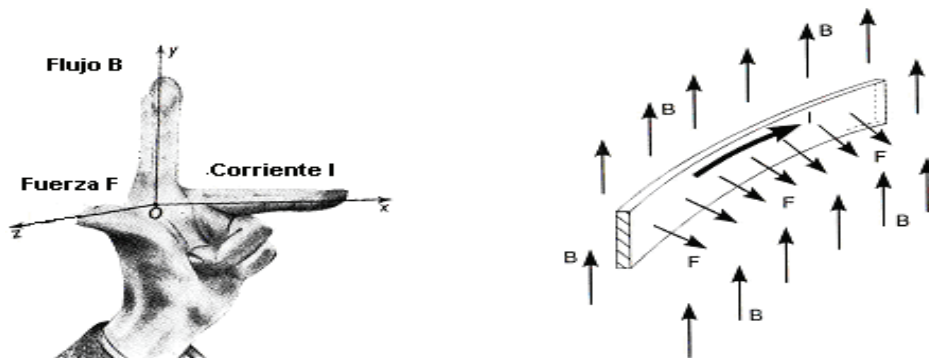


Figura 4.1 Direcciones de la fuerza, el Flujo magnético y la Corriente

La fuerza es el producto vectorial de $i \, dl$ por B , resultando perpendicular al plano formado por el elemento conductor y la inducción magnética como aprecia en la Figura 4.1. Estas fuerzas son máximas en el espacio que queda entre dos devanados distintos, pues aquí coexisten los campos de dispersión de ambos.

La fuerza es proporcional al cuadrado de la corriente. En ella también existen dos componentes variables, una de la misma frecuencia que la corriente nominal que desaparece con la componente continua y la otra permanente con frecuencia doble de la nominal. Estas componentes aplicadas sobre los conductores provocan esfuerzos y vibraciones que pueden presentarse en forma radial y axial.

4.2 Fuerzas radiales.

Para un transformador de dos enrollados concéntricos (baja – alta), donde los ampere-vueltas están uniformemente distribuidos y equilibrados, el campo magnético de dispersión, es axial a lo largo de la mayor parte de la altura, produciendo fuerzas normales a su dirección. Este campo diverge en ambas extremidades y la inducción se puede descomponer en una componente axial y una componente radial.

La fuerza radial (F_r) es debida a la interacción entre los ampere-vueltas instantáneos en cada enrollado (ni) y la densidad de flujo axial a lo largo de la mayor parte de la altura (B_a).

Estas fuerzas tienden a abrir el devanado externo y en cambio a aplastar el devanado interno sobre la columna.

La zona de acción de las fuerzas radiales se aprecia en la Figura 4.2 [2, 6, 7, 8].

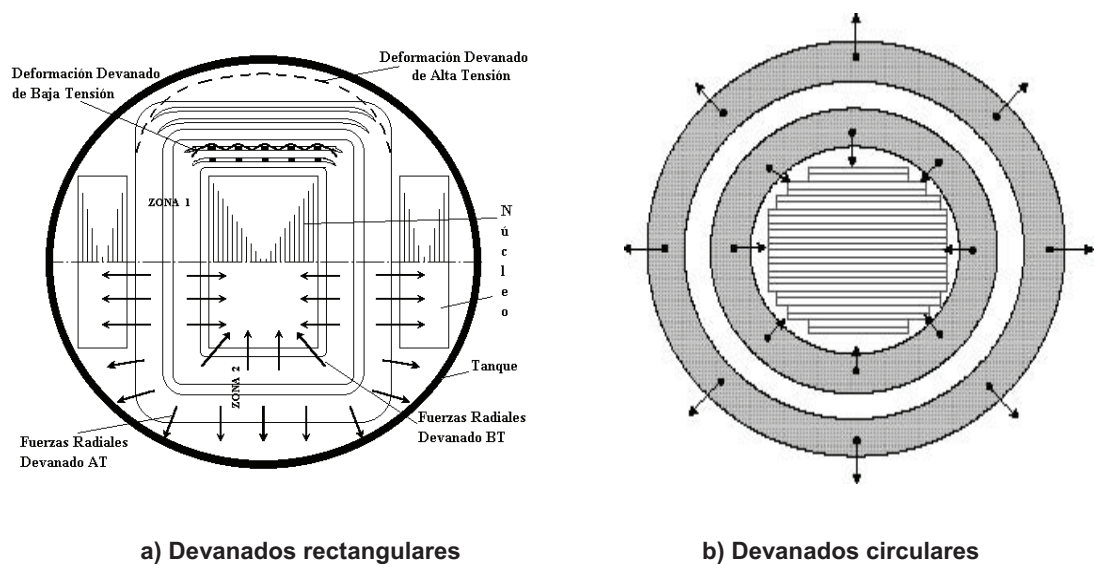


Figura 4.2. Las fuerzas radiales en devanados rectangulares y circulares

En la zona frontera entre dos devanados distintos existirá el máximo campo de dispersión, por coexistir los campos magnéticos de los dos devanados. Por esta razón, las espiras más cercanas a esta zona, serán las más estresadas, descargando las fuerzas sobre el resto de las espiras.

En los devanados más internos las fuerzas radiales, comprimen los conductores contra el núcleo pudiendo ocasionar el colapso por inestabilidad de forma (pandeo).

Si el devanado interno tiene apoyos o canales, el esfuerzo radial total o parcial se descarga siempre sobre los apoyos de los devanados.

Las dos posibilidades de deformación para éste son las mostradas en la Figura 4.3, la estrella de mar (a) o el pandeo (b).

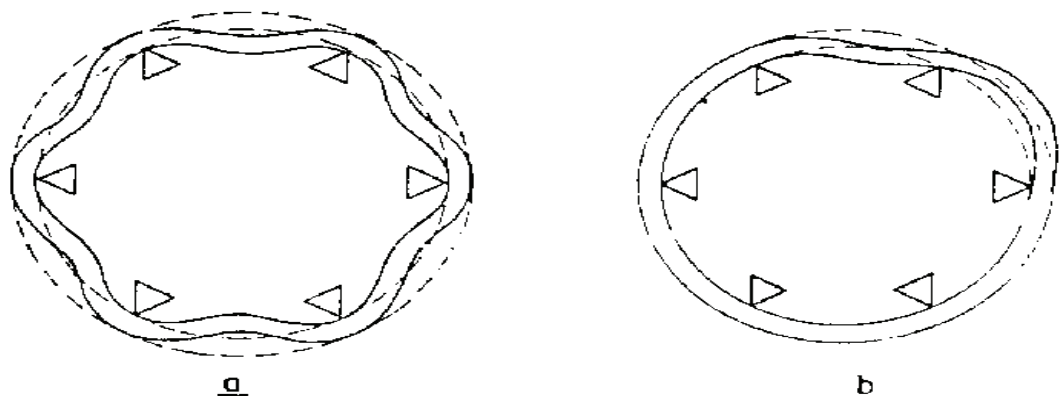


Figura 4.3 Deformaciones en el devanado interno

En un devanado externo, las espiras de la primera capa (interior) que son las más estresadas (campo de dispersión máximo) se descargan sobre las capas más externas menos estresadas. Si el devanado tiene canales de refrigeración que dividen el enrollado en secciones, los esfuerzos de las espiras internas se descargan sobre las espiras externas a lo largo de los distanciadores verticales, creando un efecto de “abofamiento” o elongación de la bobina.

4.2.1 Cálculo de las fuerzas electromagnéticas radiales para devanados concéntricos.

Los componentes de fuerza radiales en un transformador con los devanados concéntricos son calculados como se muestra a continuación.

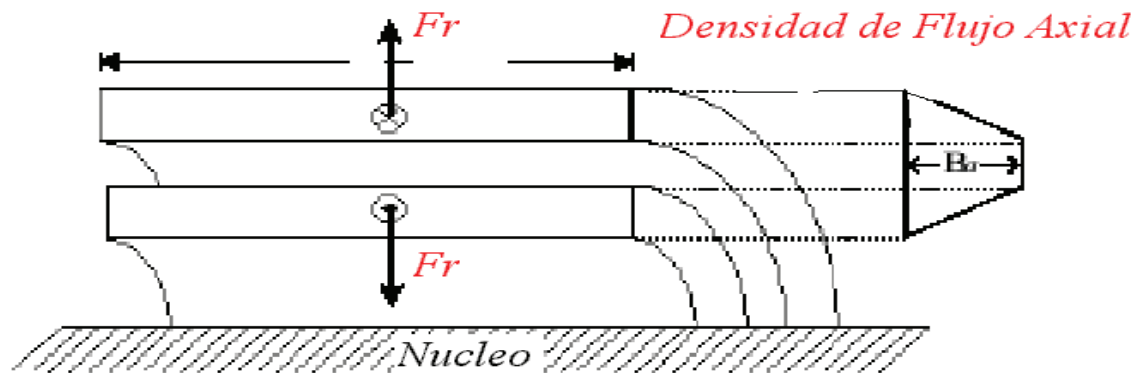


Figura 4.4 Fuerzas radiales y densidad de flujo axial.

La Figura 4.4 muestra las fuerzas resultantes en una sección transversal de un transformador con dos devanados concéntricos, interno y externo.

La densidad del flujo axial (B_a) según [4, 8, 9, 10] tiene la siguiente expresión:

$$B_a = \frac{4\pi \times (ni)}{10^4} [T] \quad (4.2)$$

Donde:

i: corriente en los enrollados del transformador, en ampere.

n: número de vueltas.

Como ya se dijo, tiene su valor máximo en la región entre los bobinados y es nulo en las superficies interiores y externas de los devanados internos y exteriores, respectivamente. Siendo así, se puede considerar la fuerza radial total prácticamente constante en por unidad de longitud, a lo largo de la altura

de la bobina y calcularse despreciando el flujo que se extiende fuera de los extremos de los devanados. Es decir y de acuerdo con [3, 4, 8, 9, 10]:

$$Fr_T = \frac{2\pi^2 \times (ni)^2 \times Dm}{10^7 \times h} \quad (4.3)$$

Donde:

Fr_T : Fuerza radial total.

i: corriente en los enrollados del transformador, en ampere.

n: número de vueltas del devanado analizado.

h : altura del devanado analizado, en metros.

Dm: diámetro medio del devanado interno (2) o externo (1), en metros.

Como se aprecia en la figura 4.2 en las zona 1 y 2, para el devanado más externo de acuerdo a [11],

$$Dm_1 = Afe + 2 \times et_2 + 2 \times et_1$$

$$Dm_2 = Apro + 2 \times et_2 + 2 \times et_1$$

$$Dm_1 = \frac{Dm_1 + Dm_2}{2} \quad (4.4)$$

y la del devanado más interno de acuerdo también a [11]:

$$Dm_1 = Afe + 2 \times et_2$$

$$Dm_2 = Apro + 2 \times et_2$$

$$Dm_2 = \frac{Dm_1 + Dm_2}{2} \quad (4.5)$$

Siendo:

Dm_1 : Diámetro medio del devanado externo en la zona 1

Dm_2 : Diámetro medio del devanado externo en la zona 2

Dm_1 : Diámetro medio del devanado interno en la zona 1

Dm_2 : Diámetro medio del devanado interno en la zona 2

et1 : "Espesor del devanado de alta, en milímetro"

et2 : "Espesor del devanado de baja, en milímetro"

Apro : "Profundidad del núcleo, Ancho de la Cara Lateral, en milímetro"

Afe : "Ancho del núcleo, Ancho de la Cara frontal, en milímetro"

Dm_1 : Diámetro medio externo

Dm_2 : Diámetro medio interno

Estas fuerzas actuarán sobre cada enrollado ya sea externo o interno como se muestra en la Figura 4.2 comprimiendo el núcleo. La compresión del núcleo por estas dos fuerzas, no es peligrosa para el transformador e inclusive conlleva en muchos casos a la reducción de las pérdidas y de la corriente de vacío.

También se aprecia que la fuerza radial F_{rT} actúa sobre el perímetro del devanado $\pi \times Dm$, sin embargo la fuerza transversal en las dos mitades opuestas del devanado es equivalente a la presión que se ejerce sobre el diámetro de la bobina, no sobre el perímetro y su expresión será la misma de F_{rT} dividida por π , es decir:

$$F_r = \frac{2\pi \times (ni)^2 \times Dm}{10^7 \times h} \quad (4.5)$$

4.2.2 Esfuerzos radiales.

Como definición, el esfuerzo radial es la relación entre la fuerza radial y dos veces el área transversal del devanado, es decir, es la fuerza radial distribuida en el área transversal de un enrollado.

El esfuerzo mecánico radial medio, considerando que el enrollado tiene n vueltas y una área transversal a_c , es calculado mediante la siguiente ecuación [6, 8, 9, 10]:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2n \times a_c^2} \quad \frac{N}{m^2} \quad (4.6)$$

Donde:

σ_r : Esfuerzo de compresión, en newton por metro cuadrado.

a_c : Área transversal del conductor, en metro cuadrado.

Este es el esfuerzo radial medio en todo el devanado, si se quisiera obtener el esfuerzo producido por las fuerzas en la zona más peligrosa, es decir la zona 2, sería de la siguiente forma:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2n \times a_c^2} \times \frac{Dm_2}{Dm} \quad (4.7)$$

4.2.3 Criterio de aceptación.

El criterio de aceptación para reconocer que un transformador es capaz de soportar las fuerzas radiales de determinada magnitud de cortocircuito, es que los cálculos de estos esfuerzos, realizados para cada uno de los devanados, no arrojen valores que excedan a los límites de fluencia del material conductor, es decir, $70 \times 10^6 \text{ Pa}$ para el cobre y $45 \times 10^6 \text{ Pa}$ para el aluminio [2].

4.3 Fuerzas axiales.

La fuerza axial (F_a) es debida a la interacción entre los ampere-vueltas instantáneos en cada enrollado (n_i) y la densidad de flujo radial (B_r). La dirección de las fuerzas axiales durante el cortocircuito depende también de la disposición y de la distribución de los ampere-vueltas.

Cuando los dos enrollados están perfectamente alineados y con una distribución uniforme de los ampere-vueltas, las fuerzas axiales tienen el mismo efecto en ambos, tendiendo a comprimirlos hacia el centro.

Cualquier desequilibrio de los ampere-vueltas provocado por perturbaciones locales de la inducción magnética (debidas a no uniformidades, cambiador de derivaciones, etc.) produce una componente radial de la inducción en esa zona. Cuando los enrollados no están alineados, la distribución de las fuerzas radiales permanece casi invariable, mientras que la distribución de las fuerzas axiales varía y las fuerzas resultantes tienden a aumentar el desequilibrio.

Las fuerzas axiales pueden provocar que un enrollado de discos, por ejemplo, ceda debido a una brusca inclinación de los conductores como muestra la Figura 4.5. Esta inclinación ("tilting") se puede presentar en uno o más discos de un enrollado, y se debe a que las fuerzas axiales que se transmiten a través de los distanciadores pueden no estar centradas, en esas condiciones aparecen momentos que tienden a inclinar los conductores.

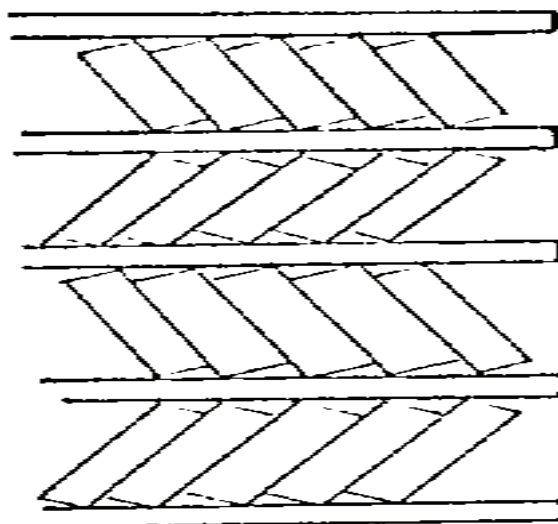


Figura 4.5. Deformaciones por fuerzas axiales

4.3.1 Cálculo de las fuerzas electromagnéticas axiales.

Método de los “Ampere-vueltas residuales”.

El cálculo analítico de la densidad de flujo radial y por consiguiente de la fuerza axial no es tan simple como los cálculos empleados para la densidad de flujo axial.

Un método aceptado y establecido para el cálculo analítico de la densidad de flujo radial es el conocido como el método de los “Ampere-vueltas residuales” [6, 8, 9, 10]. Este se basa en el principio de que cualquier disposición de enrollados concéntricos puede dividirse en dos grupos equilibrados de amperes-vueltas, uno produce el campo axial y el otro el campo radial.

La Figura 4.6 muestra la distribución del campo radial y las fuerzas axiales en una disposición de bobinados asimétricos. Puede notarse que la altura del bobinado exterior es más corta que la del bobinado interno. Esta asimetría causa una gran densidad de flujo radial en la región dónde existe desbalance de ampere-vueltas.

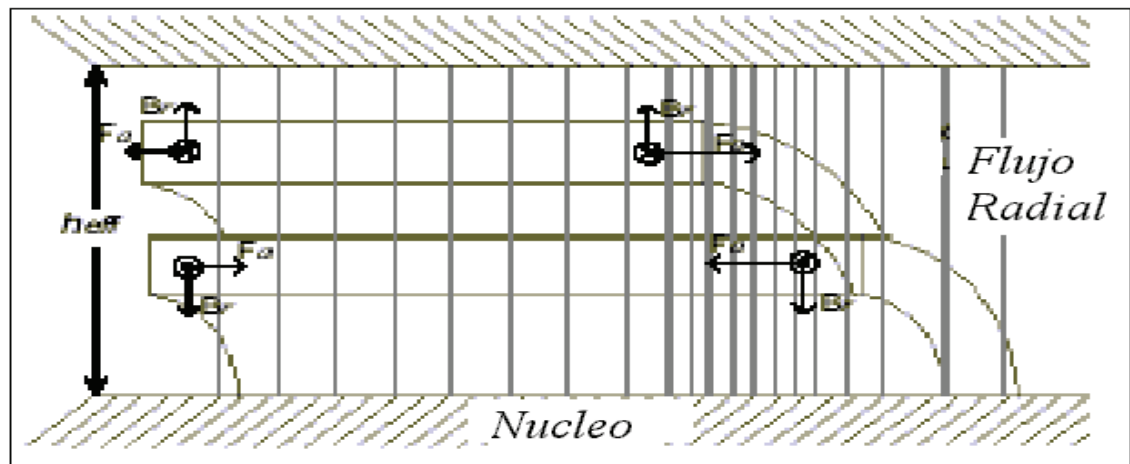


Figura 4.6 Sección cruzada de un transformador, densidad del campo radial y fuerza axial

Para calcular la fuerza axial por el método de los “Ampere-vueltas residuales” es necesario conocer los parámetros siguientes:

- La longitud eficaz de camino del flujo radial, h_{eff} , difiere para cada disposición del cambiador de derivaciones. (Ver Figura 4.6).
- La densidad media de flujo radial (B_r), considerado el diámetro promedio del devanado del transformador.
- El valor promedio de ampere-vueltas, los cuales son iguales a **(1/2) a (ni)**, donde **a** es la longitud de sección del cambiador de derivaciones, expresada como un fragmento de la longitud total del enrollado, también se puede expresar como la relación entre el número de vueltas del cambiador de derivaciones y el número de vueltas primarias del transformador.

Teniendo en cuenta lo anterior [6, 8, 9, 10]

$$B_r = \frac{4 \pi \times a \times (ni)}{10^4 \times 2 \times h_{eff}} [tesla] \quad (4.8)$$

Dónde:

a: Relación entre el numero de vueltas del cambiador de derivaciones y el número de vueltas primarias del transformador .

h_{eff} : 0,222 x h, de acuerdo a [6, 8, 9, 10]

h: altura del devanado en milímetros

En la Figura 4.2 se observan dos zonas de acción de las fuerzas axiales, zona 1 y zona 2. Constructivamente, la zona 2 tiene un mayor espesor (ancho) radial del devanado que la zona 1.

Debido a esto, en la zona 2 las fuerzas axiales son considerablemente mayores que en la otra zona 1 (de 1,5 a 2 veces) [2].

Por esta razón, para ser conservadores, el presente trabajo centrará los cálculos de las fuerzas axiales en la zona 2.

4.3.2 Fuerzas axiales en dependencia de las derivaciones.

La magnitud de las fuerzas axiales depende de la ubicación del cambiador de derivaciones.

A continuación se muestra en la Tabla 1 [6, 8] las expresiones para calcular las fuerzas axiales para disposiciones específicas de los cambiadores de derivaciones:

Tabla 1 Expresiones para el cálculo de las fuerzas axiales para distintas ubicaciones del cambiador de derivaciones del transformador

	Fuerza axial	Posición del cambiador de derivaciones
1	$F_A = \frac{2 \pi \times a \times (ni)^2}{10^7} \times \frac{\pi \times D_m}{h_{eff}}$	Derivación en un extremo del enrollado externo
2	$F_A = \frac{\pi \times a \times (ni)^2}{2 \times 10^7} \times \frac{\pi \times D_m}{h_{eff}}$	Derivación en el medio del enrollado externo
3	$F_A = \frac{\pi \times a \times (ni)^2 \times \pi \times D_m}{4 \left(1 - a \frac{1}{2}\right) \times 10^7 h_{eff}}$	Derivación en ambos mitades de los dos enrollados
4	$F_A = \frac{\pi \times a \times (ni)^2}{8 \times 10^7} \times \frac{\pi \times D_m}{h_{eff}}$	Derivación en el $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ del enrollado externo
5	$F_A = \frac{\pi \times a \times (ni)^2}{16 \times \left(1 - a \frac{1}{2}\right) \times 10^7} \times \frac{2 \pi \times D_m}{h_{eff}}$	Derivación en el $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de ambos enrollados.

Las derivaciones en los transformadores de distribución en el devanado primario, se encuentran localizadas en la zona media o central del devanado y

en el secundario, la derivación central, está en la mitad exacta de este enrollado.

Por esta razón, las fuerzas axiales tanto para el enrollado primario como para el secundario son calculadas mediante la expresión 3 de la tabla 1, es decir:

$$F_A = \frac{2 \pi \times a (ni)^2 \times A}{4 \times \left(1 - a \frac{1}{2}\right) \times 10^7} \quad (4.9)$$

Donde

$$A = \frac{\pi \times Dm}{h_{eff}} \quad (4.10)$$

$$h_{eff} = 0.222 \times h \quad (4.11)$$

Donde:

h: altura de la bobina analizada en milímetros.

a : Relación entre el numero de vueltas del cambiador de derivaciones y el número de vueltas primarias del transformador

Dm: diámetro medio del enrollado analizado, en milímetros.

h_{eff} : 0,222 x h. [6, 8, 9, 10]

El cálculo de la fuerza axial total se hace mediante la siguiente expresión [8].

$$F_{at} = \frac{2 \times \pi^2 \times (ni)^2 \times D_w}{10^7 \times h^2} \times \left(d_0 + \frac{et_1 + et_2}{3} \right) \quad (4.12)$$

Donde:

D_w = diámetro medio de las espiras de ambos bobinados en milímetros.

d_0 = ancho del canal de refrigeración en milímetros.

et_1 y et_2 = espesores radiales de los bobinados en milímetros.

4.3.3 Esfuerzos axiales para bobinados concéntricos.

Como ya se sabe, la componente radial de la inducción magnética para el enrollado externo, a lo largo de su altura, produce una fuerza axial que actúa sobre cada conductor. Como cada conductor transmite fuerza al vecino, la fuerza acumulada es la suma (integral) de las fuerzas elementales (proporcional a la componente radial de la inducción).

Entonces, un conductor cualquiera está sometido a la suma de dos tipos de esfuerzos:

1. El esfuerzo electrodinámico propio, debido a la inducción magnética presente en el lugar en que está ubicado.
2. El esfuerzo que experimenta debido a la acción que sobre él hacen los conductores vecinos.

El devanado externo está sometido a esfuerzos de compresión axial que alcanzan el valor máximo en el plano medio de los enrollados.

Los esfuerzos aplicados en la mitad superior del enrollado están en equilibrio con los aplicados en la mitad inferior.

Si se trabaja con fuerzas finitas (en lugar de infinitesimales) se debe pensar en acumular fuerzas iniciando en ambos extremos y terminando en el centro. Para esto se deben sumar partiendo de un extremo, y siguiendo el sentido de las fuerzas aplicadas, de manera que se pueda observar como:

- Cada conductor carga al contiguo.
- Los amperes están siempre uniformemente distribuidos en cada enrollado.
- La componente radial de la inducción magnética correspondiente al enrollado externo es mayor en la parte superior del mismo.
- La curva integral deja de ser simétrica, y el enrollado exterior está sometido, además de a un esfuerzo de compresión axial, a un esfuerzo de empuje hacia abajo.
- Por reacción el enrollado interior está sometido a un esfuerzo de empuje hacia arriba. Debido a este fenómeno, que tiende a que los devanados se muevan axialmente, se presentan esfuerzos de reacción sobre los elementos de sujeción axial, que deben estar preparados para soportarlos. Este efecto también se presenta en devanados de igual altura cuando hay pequeñas imperfecciones de montaje. Debe observarse que cuando se inicia dicho movimiento axial la fuerza de repulsión entre devanados tiende a incrementarse por lo que esta situación lleva a la rotura, al colapso.

Ejercen influencia además sobre los conductores las fuerzas debidas a:

- la gravitación (masa de los conductores)
- la inercia de los conductores

- la elasticidad de los materiales aislantes
- el rozamiento entre los conductores y sus aislantes

Estas últimas, las fuerzas de rozamiento, dependen de la cantidad y de la superficie de los distanciadores radiales y axiales, de la manera como ha sido ajustado el enrollado durante su fabricación, de su compacticidad después del tratamiento térmico del transformador.

El esfuerzo causado por las fuerzas axiales [6, 8, 9, 10] se calcula mediante

$$\sigma_a = \frac{F_{ad} \times L^2}{2 \times t \times b^2} \quad \text{N/m}^2 \quad (4.13)$$

Donde:

F_{ad} : Fuerza axial distribuida, en newton por metro.

L : Distancia entre los soportes horizontales de la bobina, en metros.

b : Dimensión axial del conductor en metros.

t : Dimensión radial del conductor en metros.

$$F_{ad} = \frac{F_a}{h} \quad \text{N/m} \quad (4.14)$$



Figura 4.7 Efecto de los esfuerzos de cortocircuito en los transformadores

En la figura 4.7 se puede observar el efecto de los esfuerzos mecánicos tanto en un transformador tipo acorazado como en un tipo núcleo, nótese el desplazamiento de las espiras en sentido axial en ambos equipos.

4.4 Esfuerzos térmicos en cortocircuitos.

Al aumentar la corriente en los devanados como consecuencia del cortocircuito, las pérdidas en el cobre crecen proporcionalmente al cuadrado de la corriente produciéndose un incremento de temperatura. Al aumentar la temperatura del cobre, el calor fluye hacia el aislamiento adyacente al conductor. Dicha transferencia depende de la capacidad térmica del aislamiento, esto determina una capacidad térmica efectiva del conjunto conductor-aislamiento.

Como la norma IEC 60076-5 2000-07 fija algunas condiciones límites, para los cálculos de temperatura de un transformador ante un cortocircuito, se puede suponer que la temperatura inicial del devanado del mismo es la temperatura límite de operación normal del equipo, es decir, la temperatura ambiente más la sobre elevación del conductor correspondiente a la clase de aislamiento (para Clase A por ejemplo 65 °C), a partir de esta premisa es posible determinar la temperatura final para cierta duración de la corriente de cortocircuito.

De acuerdo con [4, 12, 13] la temperatura final ϑ_1 resulta:

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \frac{2 \times (\vartheta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 x t_{cc}} - 1} [^{\circ}C] \quad (\text{cobre}) \quad (4.15)$$

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \frac{2 \times (\vartheta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2 x t_{cc}} - 1} [^{\circ}C] \quad (\text{aluminio}) \quad (4.16)$$

Donde:

ϑ_0 : Temperatura inicial del conductor, en grados Celsius.

J^2 : Densidad de corriente en cortocircuito, en amperes por milímetro cuadrado.

Donde la densidad de corriente J

$$J = \frac{I_{ccs}}{A} \left[\frac{A}{mm^2} \right] \quad (4.17)$$

t_{cc} : duración del cortocircuito, en segundos.

El tiempo de duración de un cortocircuito utilizado para los cálculos térmicos está limitado según las publicaciones [6, 8, 14]. De esta forma se verá que para transformadores de entre 5 y 500 kVA, el tiempo estará limitado a los

siguientes valores, a menos que se acuerde una duración diferente:

$$t = \frac{1250}{(I_{sim})^2} [seg] \quad (4.18)$$

Para capacidades mayores que las anteriores puede llegar hasta 2 segundos [12,14].

4.4.1 Criterio de aceptación.

El criterio de aceptación para reconocer que un transformador es capaz de soportar los efectos térmicos de determinada magnitud de cortocircuito, es que los cálculos anteriores, realizados para cada uno de los devanados, no deben arrojar valores que se excedan los valores máximos de temperatura de la Tabla 2 de acuerdo a [14].

Tabla 2 Valores máximos de la temperatura media de devanados después de un cortocircuito

Tipo de transformador	Temperatura del sistema de aislamiento, ° C (clase térmica entre paréntesis)	Valor máximo de la temperatura ° C	
		Cobre	Aluminio
Sumergido en Aceite	105 (A)	250	200
Seco	105 (A)	180	180
	120 (A)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	220	350	200

5. Formulaciones del CORTANSF.

5.1 Introducción. Plataforma de soporte.

El programa **CORTANSF** es un “software” desarrollado por el autor del presente trabajo, realizado en Microsoft Visual Estudio, destinado a analizar el comportamiento de uno o varios transformadores monofásicos de distribución, tipo núcleo o acorazados antes la ocurrencia de un cortocircuito. La siguiente figura muestra una imagen de su presentación.

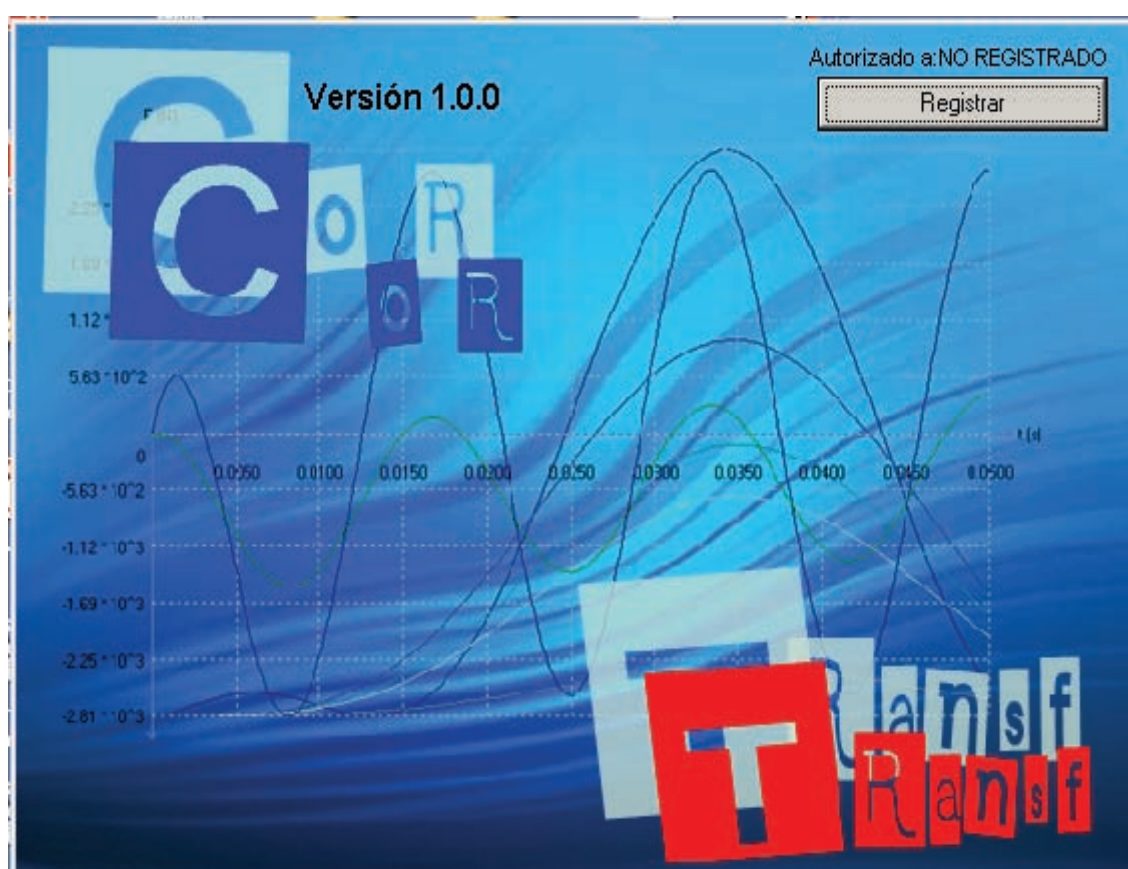


Figura 5.1 Presentación del Programa CORTANSF

Para el trabajo del programa, es necesario que el usuario disponga de una serie de datos de diseño y operación del transformador. Estos son expuestos a continuación:

Dato Solicitado. ID = "Identificación del transformador"

Dato Solicitado. h1 = "Altura de la bobina del devanado primario (milímetros)"

Dato Solicitado. h_2 = "Altura de la bobina del devanado secundario (milímetros)"

Dato Solicitado. E_{t1} = "Espesor del devanado primario (milímetros)"

Dato Solicitado. E_{t2} = "Espesor del devanado secundario (milímetros)"

Dato Solicitado. a = "Relación entre el numero de vueltas de los TAP y el número de vueltas primarias del transformador (porcentaje)"

Dato Solicitado. S = "Potencia aparente del transformador (kVA)"

Dato Solicitado. $\% Z$ = "% de Impedancia de cortocircuito"

Dato Solicitado. P_{cc} = "Pérdidas de cortocircuito, (Watts)"

Dato Solicitado. "Angulo de conexión"

Dato Solicitado. U_{n1} = "Tensión nominal del devanado primario (Volts)"

Dato Solicitado. U_{n2} = "Tensión nominal del devanado secundario (Volts)"

Dato Solicitado. N_1 = "Número de vueltas del devanado primario"

Dato Solicitado. N_2 = "Número de vueltas del devanado secundario"

Dato Solicitado. A_{FE} = "Ancho de la columna del Núcleo (milímetros)"

Dato Solicitado. A_{PRO} = "Profundidad del núcleo, ancho de la cara lateral (milímetros)"

Dato Solicitado. D_o = "Ancho del canal de ventilación entre primario y secundario (milímetros)"

Dato Solicitado. Diámetro Cond. = "Diámetro del conductor primario (milímetros)"

Dato Solicitado. $Altura_{Cond}$ = "Altura del conductor secundario (milímetros)"

Dato Solicitado. $Ancho_{Cond}$ = "Ancho del conductor secundario (milímetros)"

Dato Solicitado. $Temp_A$ = "Temperatura ambiente, (grados Celsius)"

Dato Solicitado. t = "Tiempo en que se quiera analizar la temperatura que alcanza el transformador, (segundos)"

Dato Solicitado. f_{psc} = "Factor de precisión predeterminado para los cálculos (Incremento en las Iteraciones)"

Dato Solicitado. t = "Intervalo de tiempo que se quiera graficar, (segundos)"

Dichos datos son utilizados en dicho "software" para obtener todos los parámetros de cálculo.

5.2 Proceso de cálculo del programa.

5.2.1 Cálculo de la corriente de cortocircuito por el CORTANSF.

El programa comienza calculando la corriente de cortocircuito del transformador en el dominio del tiempo y para el peor instante de conexión.

Para esto utiliza los datos de porcentaje de impedancia de cortocircuito, la tensión de alimentación y pérdidas de cobre y determina ángulo del factor de potencia del transformador.

A continuación calcula las fuerzas axiales, radiales y los esfuerzos, en la zona más comprometida del transformador, es decir, la zona 2 (Ver figura 4.2).

Como criterio de aceptación de la magnitud de los esfuerzos radiales, se realiza la comprobación de la magnitud de los esfuerzos con respecto a la máxima tensión mecánica permitida para los materiales conductores.

Para esto utiliza, datos físicos de los devanados como son:

- Altura de los devanados.
- Espesores de los devanados.
- Número de vueltas de los devanados.
- Dimensiones de los conductores.
- Dimensiones del núcleo.

Seguidamente, se obtienen las temperaturas, que alcanzaría el transformador ante el evento de cortocircuito, después de transcurrido un tiempo, que puede ser escogido por el usuario o por defecto se evalúa para el intervalo de tiempo que establecen las normas:

$$t = \frac{1250}{(I_{sim})^2} [seg] \quad (4.18)$$

Para este análisis se emplean los valores de densidad de corriente a que trabaja el equipo y la magnitud de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito.

5.2.2 Menú del programa.

Las variables y entradas del CORTANSF se pueden observar en Figura 5.2, así como los diferentes resultados que puede ofertar el programa.

Figura 5.2 Ventana de Entrada de datos del “software” CorTransf.

El programa brinda la facilidad de analizar varios transformadores (hasta 10 unidades) y finalmente poder comparar sus resultados gráfica y numéricamente.

Así mismo, cuenta con opciones para poder variar la forma de respuestas del mismo a criterio del usuario.

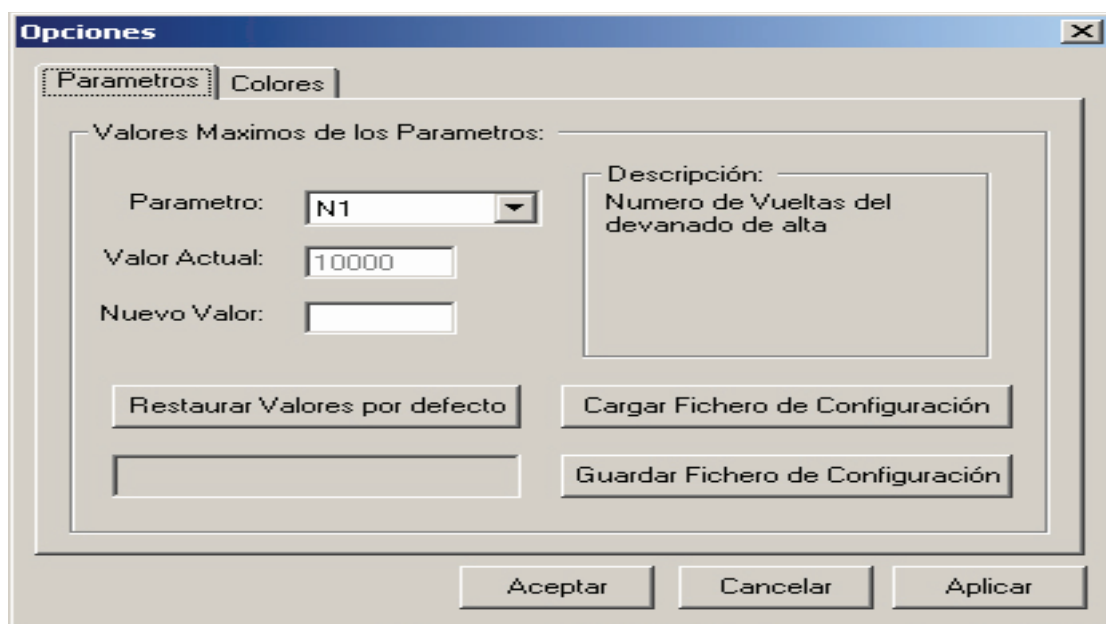


Figura 5.3 Menú de Opciones, presentando el submenú parámetros.



Figura 5.4 Menú de Opciones, presentando el submenú colores

5.3 Forma en que se muestran los resultados.

Entre las salidas del “software”, se pueden apreciar los gráficos con la forma de onda de la corriente de cortocircuito (Ver Figura 5.5).

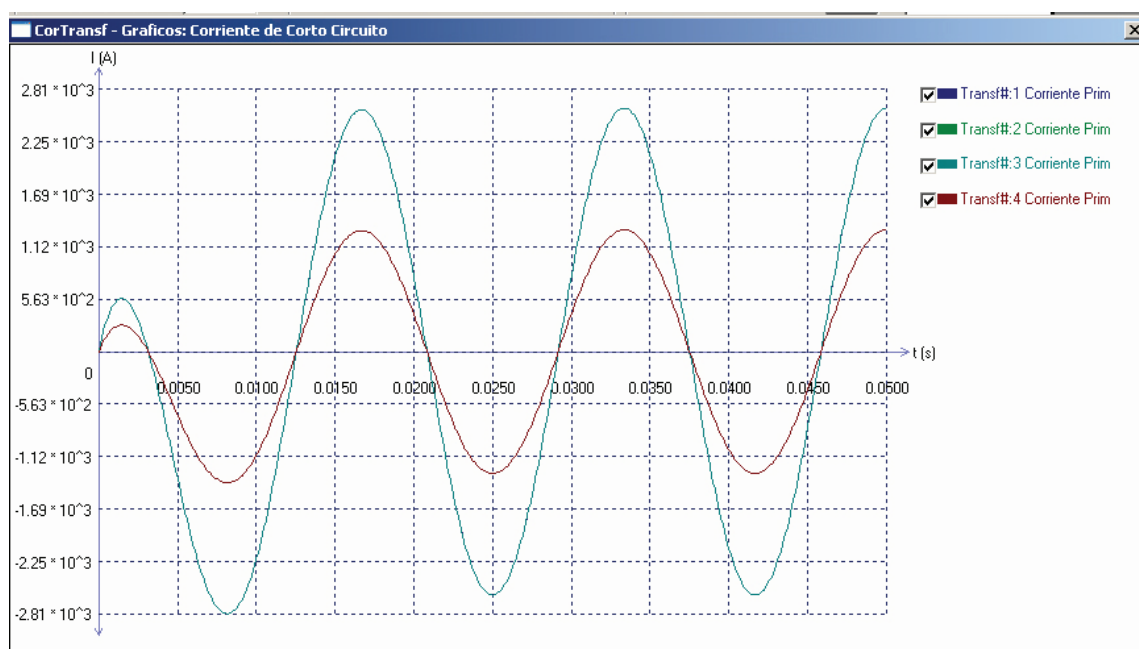


Figura 5.5 Gráfico de forma de onda de las corrientes de cortocircuito para dos transformadores.

El “software”, en dependencia del intervalo de tiempo especificado por el usuario, puede especificar el lapso de la curva que se desee mostrar o los detalles del comportamiento del parámetro que se solicite apreciar en la Figura 5.6

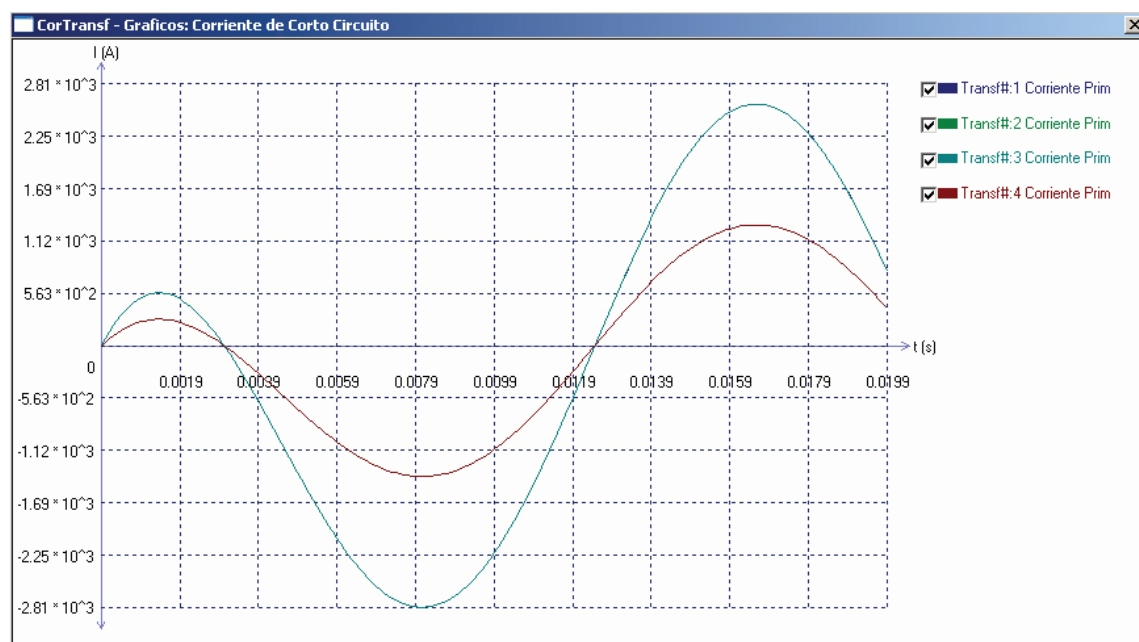


Figura 5.6 Gráfico de forma de onda de las corrientes de cortocircuito en un intervalo de tiempo reducido.

Se exponen los gráficos de fuerzas y esfuerzos en el dominio del tiempo.

En las Figuras 5.7 y 5.8 se puede apreciar el comportamiento de las fuerzas axiales y radiales, respectivamente, tanto en los enrollados internos como externos, así como sus valores tanto para uno, como para varios transformadores.

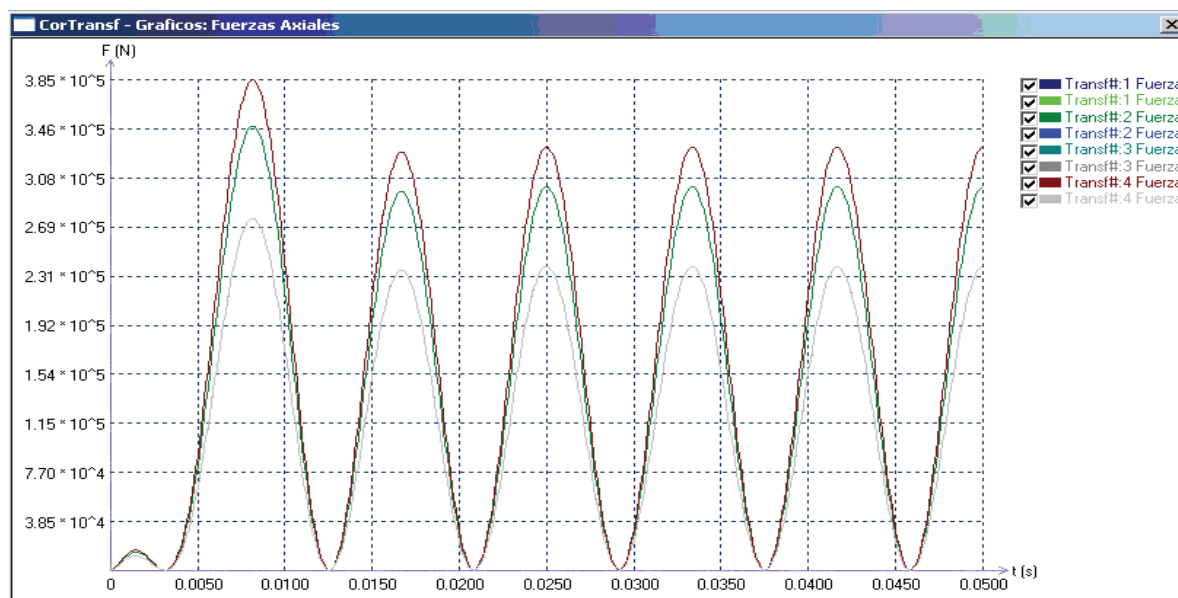


Figura 5.7 Gráfico de forma de onda de las fuerzas axiales para cuatro transformadores.

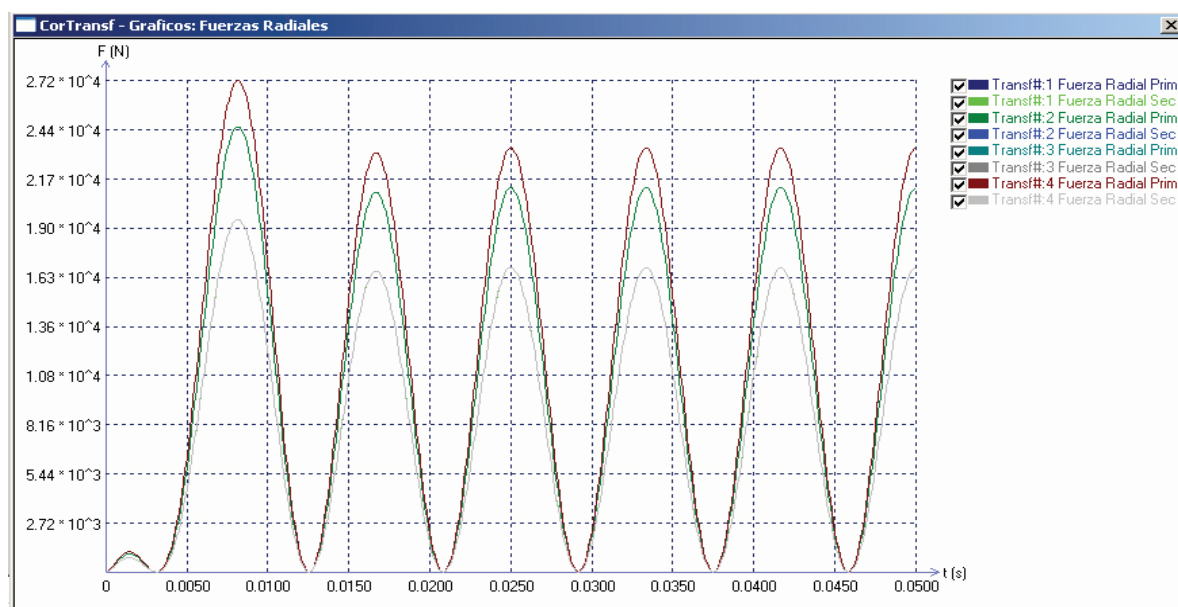


Figura 5.8 Gráfico de forma de onda de las fuerzas radiales para cuatro transformadores.

También se expone una tabla comparativa en la cual se aprecian, entre otros resultados del programa los valores de los picos máximos de corriente, las corrientes simétricas, las fuerzas axial y radial, la temperatura y los esfuerzos para ambos devanados.

CorTransf - Tablas Comparativa:

Valores Maximos para las Fuerzas Axiales y Radiales :

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexion
LAT SH6 10 2-12	9.08 * 10 ¹ A	2.88 * 10 ³ A	1.00 * 10 ⁵ N	7.23 * 10 ⁴ N	5.44 * 10 ⁷ N	2.85 * 10 ⁴ N	2.04 * 10 ⁴ N	140.43 °
LAT SH6 10 2-24	2.88 * 10 ² A	1.44 * 10 ³ A	9.14 * 10 ⁴ N	7.23 * 10 ⁴ N	5.44 * 10 ⁷ N	2.58 * 10 ⁴ N	2.04 * 10 ⁴ N	140.439 °
LAT SH6 10 7-12	9.08 * 10 ¹ A	2.88 * 10 ³ A	1.00 * 10 ⁵ N	7.23 * 10 ⁴ N	5.44 * 10 ⁷ N	2.85 * 10 ⁴ N	2.04 * 10 ⁴ N	140.439 °
LAT SH6 10 7-24	9.08 * 10 ¹ A	1.44 * 10 ³ A	1.00 * 10 ⁵ N	7.23 * 10 ⁴ N	5.44 * 10 ⁷ N	2.85 * 10 ⁴ N	2.04 * 10 ⁴ N	140.439 °

Valores de Corrientes, Esfuerzo y Temperatura despues de Cortocircuito :

Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 10 2-12	58.326 A	1851.851 A	2.79 * 10 ¹³ Pa	1.39 * 10 ¹¹ Pa	1.26 * 10 ⁷ Pa	1.38 * 10 ⁷ Pa	149.185 °C	221.335 °C
LAT SH6 10 2-24	185.185 A	925.925 A	2.52 * 10 ¹³ Pa	1.39 * 10 ¹¹ Pa	3.82 * 10 ⁷ Pa	6.93 * 10 ⁶ Pa	2241.404 °C	122.618 °C
LAT SH6 10 7-12	58.326 A	1851.851 A	2.78 * 10 ¹³ Pa	1.39 * 10 ¹¹ Pa	1.26 * 10 ⁷ Pa	1.38 * 10 ⁷ Pa	149.185 °C	221.335 °C
LAT SH6 10 7-24	58.326 A	925.925 A	2.78 * 10 ¹³ Pa	1.39 * 10 ¹¹ Pa	1.26 * 10 ⁷ Pa	6.93 * 10 ⁶ Pa	149.185 °C	122.618 °C

Aceptar Cancelar Reportes

Figura 5.9 Ventana de resultados del “software”.

5.4 Validación de los resultados.

El método de validación empleado fue la aplicación de todo el proceso de cálculo expuesto en este proyecto a un ejemplo desarrollado en la publicación [2].

Esta publicación presenta un ejemplo de cálculo de parámetros de cortocircuito dinámico de un transformador monofásico de 25 kVA, 13 200/240 V mediante el programa “REST” desarrollado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas de Rusia (VEI) [15], mediante el método de elemento finito, el cual está concebido para el cálculo de campos magnéticos, perdidas y verificación de la aptitud electromecánica de los devanados de transformadores y reactores bajo el efecto de corrientes de cortocircuito brusco y corrientes de conexión, para una amplia gama de potencias [16].

Dado que en el citado ejemplo se exponen una gran cantidad de datos físicos del transformador, fue posible emplearlo como herramienta de comprobación.

Los resultados de la aplicación del Cortansf a dicho transformador son los siguientes

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	136 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	126 mm
Espesor del Devanado de Alta	26,4mm	Espesor del Devanado de Baja	15.47mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	13200 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	240 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	198	Número de vueltas del Devanado de Baja	34
Potencia Aparente del Transformador	25 KVA	Porciento de Impedancia de Cortocircuito	3,06 %
Tipo de Transformador	ACORAZADO	Perdidas de Cortocircuito	319,125 W
Ancho de la Columna del Núcleo	80 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	170 mm
Ancho del Canal de Ventilación	3 mm	Angulo de Conexión	155,34 °
Distancia entre Calzos Primarios	0,257 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	0,174 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,1 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	8 mm	Ancho del conductor por el Secundario	0,35 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	3230,5 N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	19396,5 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	27426 N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	19384 N
Fuerza Axial Total	1.30×10^7 N	Angulo de Conexión	155,34 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$1,53 \times 10^{12}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$1,68 \times 10^8$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$17,5 \times 10^6$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$1,35 \times 10^7$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	61,893 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	3404,139 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	108,227 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	5952,517 A
Temperatura en el Devanado Primario	103,723 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	109,182 °C

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos mediante el programa CORTANSF y el programa REST.

Elementos obtenidos	Programa		Por ciento de Error
	CORTANSF	REST	
Fuerza Radial Primaria	27426 N	28900 N	-5,1
Fuerza Radial Secundaria	19384 N	19300 N	0,43
Fuerza Axial Primaria	3230,5 N	3500 N	-7,7
Fuerza Axial Secundaria	19396,5 N	20100 N	-3,5
Esfuerzo Radial	$17,5 \times 10^6$ Pa	$16,2 \times 10^6$ Pa	8,02

Como se puede apreciar en los resultados de las corridas de ambos “software”, el porcentaje de error en las mismas es inferior al 10%, por lo cual se pueden considerar aceptables los resultados del Cortransf.

6. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL CORTANSF.

La fabrica de transformadores “Latino”, produce 7 capacidades de transformadores de distribución, a saber; 10 kVA, 15 kVA, 25 kVA, 37,5 kVA, 50 kVA, 75 kVA, y 100 kVA, cada capacidad se elabora además, con varios niveles de tensión 7620/240-480 V, 7620/120-240 V, 2400/240-480 V y 2400/120-240 V, lo cual hace un total de 28 tipos de transformadores.

Actualmente todos los transformadores producidos son tipo acorazados, pero hace más de 10 años, se fabricaban únicamente, tipo núcleo.

Cada modelo acorazado fue evaluado desde el punto de vista térmico y mecánico con el programa Cortransf.

Además se evaluaron también 8 prototipos tipo núcleo de capacidades 10 kVA, 15 kVA, 25 kVA, 37,5 kVA y 50 kVA, con niveles de tensión 7620/120-240 V, obteniéndose los resultados expuestos.

6.1 Resultados de las corrida del Transformador LATINO de 10 kVA. 2400/120-240 (LAT SH6 10 2-12).

Tabla 3 Resultados de la corrida del Transformador Latino 10 kVA. 2400/120-240
LAT SH6 10 2-12

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	104 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	112 mm
Espesor del Devanado de Alta	12 mm	Espesor del Devanado de Baja	12mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	2400 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	240 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	520	Número de vueltas del Devanado de Baja	52
Potencia Aparente del Transformador	10 KVA	Porciento de Impedancia de Cortocircuito	2,14 %
Tipo de Transformador	ACORAZADO	Perdidas de Cortocircuito	127,54 W
Ancho de la Columna del Núcleo	76,5 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	150 mm
Ancho del Canal de Ventilación	4 mm	Angulo de Conexión	143,41 °
Distancia entre Calzos Primarios	0,208 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	0,157 mm
Diámetro del conductor por el Primario	0,91 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	8 mm	Ancho del conductor por el Secundario	1,81 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	6681,146 N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	5289,659 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	28327,309 N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	22427,56 N
Fuerza Axial Total	5,71 x 10 ⁷ N	Angulo de Conexión	143,41 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	1,84 x 10 ¹² Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	5,08x10 ⁹ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	4,18 x 10 ⁷ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	1,51x10 ⁷ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	194,704 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	1947,040 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	302,098 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	3020,989 A
Temperatura en el Devanado Primario	113,352 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	98,772 °C

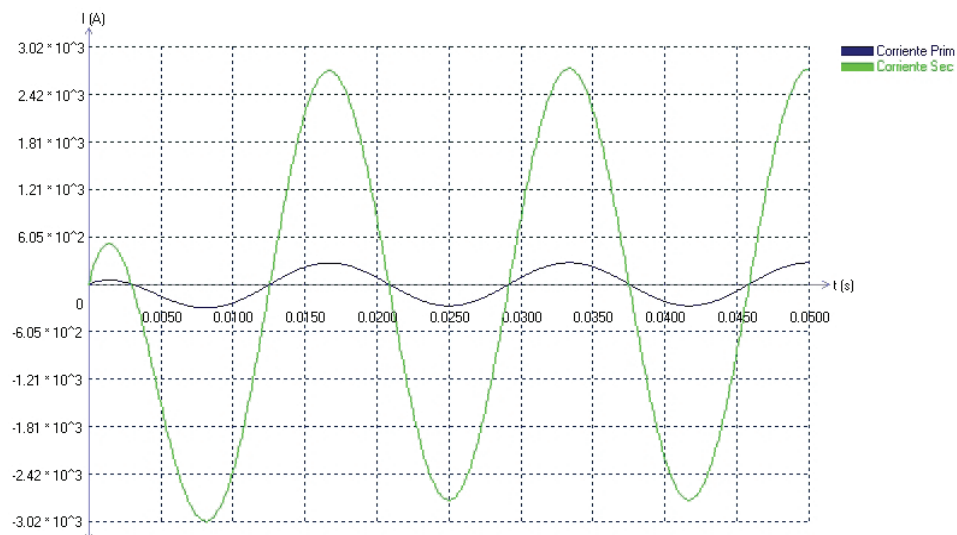


Figura 6.1 Resultados de la corrida: Gráfica de corriente de Cortocircuito

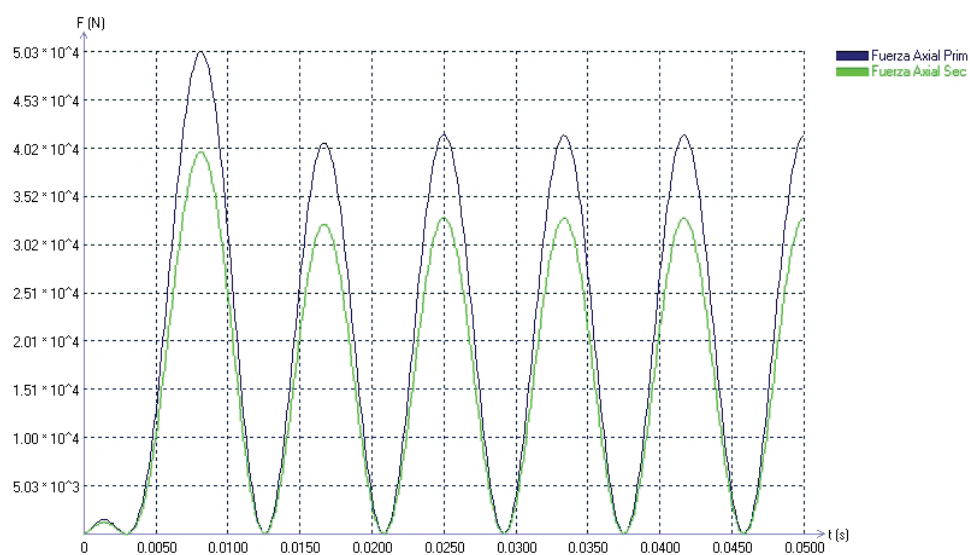


Figura 6.2 Resultados de la corrida: Gráfica de Fuerzas Axiales

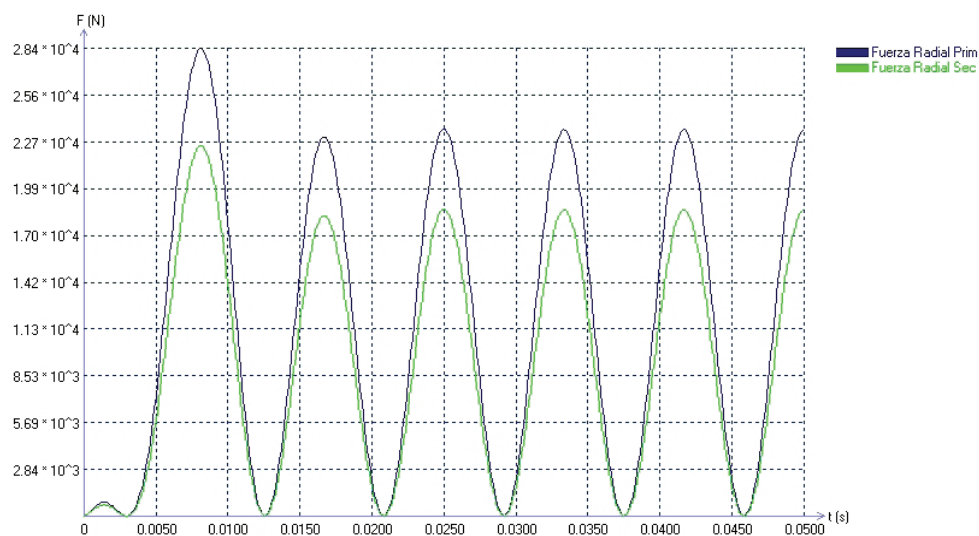


Figura 6.3 Resultados de la corrida: Gráfica de Fuerzas Radiales

Todas las corridas del “software” por capacidades de los transformadores evaluados pueden apreciarse en el ANEXO 2.

6.2 Comparación por capacidades nominales.

Nomenclatura para identificar el tipo de transformador en estas tablas

Lat. : Transformador Latino

SH6: Transformador tipo acorazado

Núcleo: Transformador tipo Núcleo

La cifra a continuación de SH6 o Núcleo es la capacidad en kVA del transformador

El código 2-12 equivale a un nivel de tensión del equipo 2400/120-240 V

El código 2-24 equivale a un nivel de tensión del equipo 2400/240-480 V

El código 7-12 ó 7600/240 equivale a un nivel de tensión del equipo 7620/120-240 V

El código 7-24 equivale a un nivel de tensión del equipo 7620/240-480 V

Tabla 4 Resultados de la corrida: comparación por capacidades nominales.

10 KVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
LAT SH6 10 2-12	3.02×10^2 A	3.02×10^3 A	6.68×10^3 N	5.28×10^3 N	5.71×10^7 N	2.83×10^4 N	2.24×10^4 N	143.417 °
LAT SH6 10 2-24	2.81×10^2 A	1.40×10^3 A	5.79×10^3 N	4.58×10^3 N	5.29×10^7 N	2.45×10^4 N	1.94×10^4 N	144.109 °
LAT SH6 10 7-12	8.33×10^1 A	2.64×10^3 A	5.66×10^3 N	4.06×10^3 N	5.18×10^7 N	2.40×10^4 N	1.72×10^4 N	138.239 °
LAT SH6 10 7-24	8.78×10^1 A	1.39×10^3 A	6.27×10^3 N	4.50×10^3 N	5.58×10^7 N	2.66×10^4 N	1.91×10^4 N	133.422 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 10 2-12	194.704 A	1947.040 A	1.84×10^{12} Pa	1.01×10^{10} Pa	4.18×10^7 Pa	1.51×10^7 Pa	113.352 °C	98.772 °C
LAT SH6 10 2-24	180.375 A	901.875 A	1.60×10^{12} Pa	1.76×10^{10} Pa	3.63×10^7 Pa	1.31×10^7 Pa	113.714 °C	98.089 °C
LAT SH6 10 7-12	55.607 A	1765.536 A	1.56×10^{12} Pa	7.80×10^9 Pa	1.06×10^7 Pa	1.16×10^7 Pa	113.915 °C	127.877 °C
LAT SH6 10 7-24	59.924 A	951.293 A	1.73×10^{12} Pa	1.73×10^{10} Pa	1.17×10^7 Pa	1.29×10^7 Pa	113.921 °C	136.393 °C

10 KVA. TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
ucleo 10 7600/24	8.84×10^1 A	2.80×10^3 A	2.56×10^3 N	1.83×10^3 N	5.71×10^7 N	1.08×10^4 N	7.79×10^3 N	128.593 °
ucleo 10 7600/24	8.74×10^1 A	1.38×10^3 A	2.31×10^3 N	4.41×10^2 N	7.36×10^7 N	9.80×10^3 N	1.87×10^3 N	127.305 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
ucleo 10 7600/24	61.324 A	1947.040 A	3.92×10^{18} Pa	6.83×10^{15} Pa	9.57×10^6 Pa	7.16×10^6 Pa	125.635 °C	125.099 °C
ucleo 10 7600/24	60.840 A	965.847 A	2.90×10^{18} Pa	1.21×10^{15} Pa	7.89×10^6 Pa	1.33×10^6 Pa	125.324 °C	100.216 °C

15 kVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
LAT SH6 15 2-12	4.12×10^2 A	4.12×10^3 A	9.62×10^3 N	7.40×10^3 N	8.97×10^7 N	4.08×10^4 N	3.13×10^4 N	146.880 °
LAT SH6 15 2-24	4.27×10^2 A	2.13×10^3 A	1.03×10^4 N	7.71×10^3 N	9.69×10^7 N	4.38×10^4 N	3.26×10^4 N	141.605 °
LAT SH6 15 7-12	1.46×10^2 A	4.66×10^3 A	1.35×10^4 N	9.47×10^3 N	9.91×10^7 N	5.75×10^4 N	4.01×10^4 N	149.379 °
LAT SH6 15 7-24	1.37×10^2 A	2.17×10^3 A	1.18×10^4 N	7.99×10^3 N	9.20×10^7 N	5.00×10^4 N	3.38×10^4 N	149.876 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 15 2-12	258.264 A	2582.644 A	1.73×10^{12} Pa	6.72×10^9 Pa	4.09×10^7 Pa	2.80×10^7 Pa	102.002 °C	100.542 °C
LAT SH6 15 2-24	279.017 A	1395.089 A	3.29×10^{11} Pa	6.78×10^9 Pa	1.38×10^7 Pa	1.45×10^7 Pa	95.712 °C	96.428 °C
LAT SH6 15 7-12	89.886 A	2853.881 A	2.45×10^{12} Pa	4.30×10^9 Pa	1.73×10^7 Pa	1.79×10^7 Pa	102.259 °C	109.674 °C
LAT SH6 15 7-24	83.411 A	1324.152 A	2.13×10^{12} Pa	7.03×10^9 Pa	1.50×10^7 Pa	1.51×10^7 Pa	102.266 °C	109.688 °C

15 kVA. TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
ucleo 15 7600/241	1.39×10^2 A	4.41×10^3 A	3.91×10^3 N	2.97×10^3 N	1.29×10^8 N	1.65×10^4 N	1.26×10^4 N	129.591 °
N 15 7600/240 2	1.39×10^2 A	4.41×10^3 A	3.86×10^3 N	2.93×10^3 N	1.31×10^8 N	1.63×10^4 N	1.24×10^4 N	129.591 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
ucleo 15 7600/241	96.212 A	3054.740 A	2.40×10^{18} Pa	3.74×10^{15} Pa	1.02×10^7 N/m²	7.69×10^6 Pa	107.859 °C	106.396 °C
N 15 7600/240 2	96.212 A	3054.740 A	2.34×10^{18} Pa	3.64×10^{15} Pa	1.00×10^7 N/m²	7.59×10^6 Pa	107.859 °C	106.396 °C

25 kVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
LAT SH6 25 7-24	1.63×10^2 A	5.19×10^3 A	1.18×10^4 N	3.55×10^4 N	1.05×10^8 N	5.00×10^4 N	1.50×10^5 N	155.406 °
LAT SH6 25 2-24	5.28×10^2 A	2.64×10^3 A	1.16×10^4 N	9.20×10^3 N	1.00×10^8 N	4.93×10^4 N	3.90×10^4 N	160.303 °
LAT SH6 25 7-12	1.58×10^2 A	5.02×10^3 A	1.10×10^4 N	8.31×10^3 N	9.80×10^7 N	4.68×10^4 N	3.52×10^4 N	158.450 °
LAT SH6 25 2-12	5.67×10^2 A	5.67×10^3 A	1.27×10^4 N	1.06×10^4 N	1.08×10^8 N	5.42×10^4 N	4.49×10^4 N	159.969 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 25 7-24	93.471 A	2967.711 A	1.27×10^{12} Pa	1.43×10^{10} Pa	1.13×10^7 Pa	2.36×10^7 Pa	97.865 °C	100.003 °C
LAT SH6 25 2-24	282.294 A	1411.472 A	2.71×10^{11} Pa	1.85×10^9 Pa	1.17×10^7 Pa	3.07×10^6 Pa	95.268 °C	95.029 °C
LAT SH6 25 7-12	86.794 A	2755.731 A	2.10×10^{11} Pa	3.34×10^9 Pa	3.33×10^6 Pa	1.10×10^7 Pa	95.278 °C	99.977 °C
LAT SH6 25 2-12	304.580 A	3045.808 A	2.43×10^{11} Pa	2.13×10^9 Pa	1.28×10^7 Pa	7.07×10^6 Pa	95.270 °C	95.118 °C

25 kVA. TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
N 25 7600/240 1	2.14×10^2 A	6.82×10^3 A	7.07×10^3 N	5.23×10^3 N	2.21×10^8 N	2.99×10^4 N	2.21×10^4 N	141.035 °
N 25 7600/240 2	1.91×10^2 A	6.08×10^3 A	5.20×10^3 N	3.96×10^3 N	2.50×10^8 N	2.20×10^4 N	1.68×10^4 N	127.941 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
N 25 7600/240 1	140.808 A	4470.672 A	2.16×10^{18} Pa	6.62×10^{15} Pa	1.22×10^7 N/m²	1.55×10^7 Pa	99.5846 °C	107.316 °C
N 25 7600/240 2	133.150 A	4227.543 A	1.59×10^{18} Pa	5.12×10^{15} Pa	1.06×10^7 N/m²	1.26×10^7 Pa	102.240 °C	111.330 °C

37.5 kVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
.AT SH6 37.5 7-12	3.25×10^2 A	1.03×10^4 A	3.45×10^4 N	2.49×10^4 N	2.57×10^8 N	1.46×10^5 N	1.05×10^5 N	160.644 °
.AT SH6 37.5 7-24	3.02×10^2 A	4.80×10^3 A	1.07×10^4 N	2.15×10^4 N	2.37×10^8 N	4.56×10^4 N	9.13×10^4 N	160.995 °
LAT SH637.5 2-12	9.13×10^2 A	9.13×10^3 A	2.73×10^5 N	1.95×10^4 N	2.32×10^8 N	1.15×10^6 N	8.27×10^4 N	159.178 °
.AT SH6 37.5 2-24	9.43×10^2 A	4.71×10^3 A	1.04×10^5 N	2.08×10^4 N	2.50×10^8 N	4.44×10^5 N	8.82×10^4 N	156.292 °

APLICACION PRÁCTICA DEL CORTANSF

Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
AT SH6 37.5 7-12	172.675 A	5482.456 A	2.52×10^{12} Pa	2.55×10^9 Pa	3.09×10^7 Pa	2.20×10^7 Pa	96.752 °C	96.555 °C
AT SH6 37.5 7-24	159.781 A	2536.525 A	7.87×10^{11} Pa	8.85×10^9 Pa	1.60×10^7 Pa	1.91×10^7 Pa	96.756 °C	96.559 °C
LAT SH637.5 2-12	496.031 A	4960.317 A	1.99×10^{13} Pa	2.00×10^9 Pa	224×10^6 Pa	1.73×10^7 Pa	96.763 °C	95.154 °C
AT SH6 37.5 2-24	533.276 A	2666.382 A	7.66×10^{12} Pa	8.55×10^9 Pa	156×10^6 Pa	1.84×10^7 Pa	96.630 °C	95.143 °C

37.5 kVA. TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
JCLEO 37 7600/2	3.35×10^2 A	1.06×10^4 A	1.11×10^4 N	8.44×10^3 N	3.07×10^8 N	4.71×10^4 N	3.58×10^4 N	144.709 °
JCLEO 37 7600/2	3.08×10^2 A	4.89×10^3 A	9.79×10^3 N	1.84×10^3 N	2.75×10^8 N	4.15×10^4 N	7.81×10^3 N	144.051 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
JCLEO 37 7600/2	214.154 A	6799.390 A	3.23×10^{18} Pa	7.66×10^{15} Pa	2.14×10^7 N/m²	2.33×10^7 Pa	97.839 °C	100.308 °C
JCLEO 37 7600/2	197.958 A	3142.598 A	3.08×10^{18} Pa	2.68×10^{15} Pa	1.88×10^7 N/m²	6.35×10^6 Pa	97.785 °C	97.024 °C

50 kVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
LAT SH6 50 7-12	4.36×10^2 A	1.38×10^4 A	3.43×10^4 N	2.75×10^4 N	3.30×10^8 N	1.45×10^5 N	1.17×10^5 N	161.104 °
LAT SH6 50 7-24	4.06×10^2 A	6.44×10^3 A	2.96×10^4 N	2.31×10^4 N	3.05×10^8 N	1.25×10^5 N	9.81×10^4 N	161.447 °
LAT SH6 50 7-12	1.22×10^3 A	1.22×10^4 A	2.68×10^4 N	2.16×10^4 N	2.98×10^8 N	1.13×10^5 N	9.17×10^4 N	159.676 °
LAT SH6 50 2-24	1.26×10^3 A	6.34×10^3 A	2.87×10^4 N	2.23×10^4 N	3.21×10^8 N	1.21×10^5 N	9.48×10^4 N	156.867 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 50 7-12	230.234 A	7309.941 A	2.38×10^{12} Pa	4.71×10^9 Pa	3.34×10^7 Pa	4.28×10^7 Pa	96.099 °C	97.784 °C
LAT SH6 50 7-24	213.041 A	3382.034 A	2.06×10^{12} Pa	1.56×10^{10} Pa	2.89×10^7 Pa	3.63×10^7 Pa	96.104 °C	97.864 °C
LAT SH6 50 7-12	661.375 A	6613.756 A	3.31×10^{11} Pa	3.76×10^9 Pa	2.62×10^7 Pa	3.38×10^7 Pa	95.078 °C	95.200 °C
LAT SH6 50 2-24	711.035 A	3555.176 A	3.53×10^{11} Pa	1.51×10^{10} Pa	2.80×10^7 Pa	3.51×10^7 Pa	95.090 °C	95.233 °C

50 kVA. TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
JCLEO 50 7600/2	3.83×10^2 A	1.21×10^4 A	1.30×10^4 N	9.81×10^3 N	3.94×10^8 N	5.52×10^4 N	4.15×10^4 N	144.965 °
CLEO 50 7600/24	4.79×10^2 A	1.52×10^4 A	1.66×10^4 N	1.26×10^4 N	5.83×10^8 N	7.06×10^4 N	5.37×10^4 N	145.893 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
JCLEO 50 7600/2	244.291 A	7756.267 A	2.47×10^{18} Pa	7.71×10^{13} Pa	1.98×10^7 Pa	2.65×10^6 Pa	96.718 °C	95.048 °C
CLEO 50 7600/24	302.660 A	9609.471 A	1.75×10^{18} Pa	2.36×10^{15} Pa	2.01×10^7 Pa	1.40×10^7 Pa	96.078 °C	95.813 °C

75 kVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
LAT SH6 75 7-12	6.66×10^2 A	2.11×10^4 A	4.55×10^4 N	4.85×10^4 N	5.14×10^8 N	1.93×10^5 N	2.05×10^5 N	162.204 °
LAT SH6 75 7-24	6.20×10^2 A	9.84×10^3 A	3.94×10^4 N	4.41×10^4 N	4.75×10^8 N	1.67×10^5 N	1.87×10^5 N	162.526 °
LAT SH6 75 7-12	1.09×10^3 A	1.09×10^4 A	1.09×10^5 N	1.16×10^5 N	3.10×10^8 N	4.64×10^5 N	4.95×10^5 N	150.550 °
LAT SH6 75 2-24	1.93×10^3 A	9.69×10^3 A	1.53×10^5 N	1.71×10^5 N	5.00×10^8 N	6.48×10^5 N	7.26×10^5 N	158.237 °
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 75 7-12	345.351 A	10964.912 A	1.82×10^{12} Pa	4.46×10^9 Pa	3.63×10^7 Pa	3.19×10^7 Pa	95.973 °C	95.664 °C
LAT SH6 75 7-24	319.562 A	5073.051 A	1.58×10^{12} Pa	8.53×10^9 Pa	3.14×10^7 Pa	2.90×10^7 Pa	95.434 °C	95.296 °C
LAT SH6 75 7-12	661.375 A	6613.756 A	9.88×10^{11} Pa	1.07×10^{10} Pa	3.41×10^7 Pa	2.56×10^7 Pa	95.042 °C	95.020 °C
LAT SH6 75 2-24	1066.552 A	5332.764 A	1.37×10^{12} Pa	3.31×10^{10} Pa	71.4×10^6 Pa	5.63×10^7 Pa	95.055 °C	95.027 °C

100 kVA. TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
LAT SH6 100 7-12	7.95×10^2 A	2.52×10^4 A	5.16×10^4 N	5.47×10^4 N	5.97×10^8 N	2.19×10^5 N	2.32×10^5 N	164.879°
LAT SH6 100 7-24	7.41×10^2 A	1.17×10^4 A	4.48×10^4 N	4.74×10^4 N	5.54×10^8 N	1.90×10^5 N	2.01×10^5 N	165.112°
LAT SH6 100 2-12	2.24×10^3 A	2.24×10^4 A	4.07×10^4 N	4.31×10^4 N	5.40×10^8 N	1.72×10^5 N	1.82×10^5 N	163.751°
LAT SH6 100 2-24	2.58×10^3 A	1.29×10^4 A	5.41×10^4 N	5.73×10^4 N	6.78×10^8 N	2.29×10^5 N	2.43×10^5 N	158.299°
Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
LAT SH6 100 7-12	394.094 A	12512.512 A	1.16×10^{12} Pa	4.89×10^9 Pa	2.88×10^7 Pa	3.63×10^7 Pa	95.174 °C	95.248 °C
LAT SH6 100 7-24	365.553 A	5803.156 A	1.01×10^{12} Pa	8.50×10^9 Pa	2.50×10^7 Pa	3.15×10^7 Pa	95.169 °C	95.240 °C
LAT SH6 100 2-12	1132.246 A	11322.463 A	3.23×10^{11} Pa	3.85×10^9 Pa	3.59×10^7 Pa	2.86×10^7 Pa	95.004 °C	95.002 °C
LAT SH6 100 2-24	1422.070 A	7110.352 A	4.06×10^{11} Pa	1.02×10^{10} Pa	4.60×10^7 Pa	3.81×10^7 Pa	95.006 °C	95.004 °C

El resultado de las comparaciones gráficas de estos transformadores puede apreciarse en el ANEXO 2.

Según el criterio de aceptación expresado en 4.2.3 para los esfuerzos radiales y en 4.4.1 para los esfuerzos térmicos, todos los transformadores cumplen con este requerimiento a excepción de los transformadores LAT SH6 37,5 kVA 2400/120-240, LAT SH6 37,5 kVA 2400/240-480 V y LAT SH6 75 kVA 2400/240-480 V, los cuales sobrepasan los 70×10^6 Pa permitidos para el cobre, aunque su comportamiento térmico normal.

En el caso de los transformadores LAT SH6 37,5 kVA 2400/120-240 y LAT SH6 37,5 kVA 2400/240-480 V, para que cumplan con los criterios de aceptación expuestos en los epígrafes mencionados, es preciso una adecuación de varios de sus parámetros físicos. Esta puede ser:

- Aumentar el diámetro del conductor primario. Esto aumentaría el espesor del devanado de alta, afectando las dimensiones del núcleo.
- Aumentar la altura del devanado primario. Esto disminuiría el espesor de este devanado, pudiendo afectar también la altura del núcleo.

En resumen en estos casos es preciso un rediseño de los transformadores.

En el caso del transformador LAT SH6 75kVA 2400/240-480 V, no es necesaria una gran variación pues con un aumento mínimo del diámetro del conductor primario ya cumpliría con los requerimientos.

6.3 Análisis del impacto de la variación de los parámetros en los esfuerzos de cortocircuito.

Partiendo del hecho de que ante la ocurrencia de un cortocircuito franco en la barra secundaria de un transformador y considerando al sistema un “bus infinito”, los únicos parámetros que pueden limitar la magnitud de la corriente de cortocircuito y los esfuerzos que ésta genera, son la impedancia de cortocircuito del propio transformador y el ángulo de fase de la onda de tensión en el instante en que se produce el cortocircuito.

Sobre esta base y ante la aleatoriedad del momento en que se produce el cortocircuito, solo queda actuar sobre la impedancia de cortocircuito del transformador, tratando de que esta sea lo más grande posible, sin comprometer la regulación de tensión de la máquina y las dimensiones que racionalmente debe tener.

En transformadores de iguales parámetros nominales, es decir, la misma capacidad nominal y las mismas tensiones primaria y secundaria, se logra una mejor aptitud en el equipo para soportar cortocircuitos, cuando tienen:

- a) Mayor número de vueltas en general. Aumenta la impedancia y disminuye la corriente de cortocircuito, ya que la reactancia depende cuadráticamente del número de vueltas y la resistencia depende linealmente.
- b) Para la misma densidad de flujo, menor sección neta del núcleo. Esto provoca que aumente el número de vueltas produciéndose el mismo efecto del inciso a.
- c) Para la misma sección del núcleo, menor densidad de flujo. Esto provoca que aumente el número de vueltas produciéndose el mismo efecto del inciso a.
- d) Para el mismo número de vueltas, menor altura de ventana y alturas de bobinas. Aumenta la impedancia, disminuye la corriente de cortocircuito y las fuerzas axial y radial que se generan ya que estas fuerzas y la reactancia de cortocircuito, dependen inversamente de la altura de la bobina.

- e) Lograr que las alturas de los devanados sean iguales, sin incluir los topes mecánicos, es la opción ideal para evitar los desplazamientos verticales entre devanados.
- f) La condición anterior es muy difícil de lograr en la práctica. En los casos en que no se logran iguales alturas de bobinas, hacer coincidir los centros geométricos de los devanados disminuye ostensiblemente la probabilidad de desplazamiento axial.
- g) Para el mismo número de vueltas, mayor ancho de ventana y espesor de las bobinas. Aumenta la impedancia, disminuye la corriente de cortocircuito y las fuerzas axial y radial que se generan ya que estas fuerzas, la reactancia y la resistencia de cortocircuito, son directamente proporcionales al diámetro medio y espesor de la bobina.
- h) Menor densidad de corriente en los conductores. Aumenta la capacidad de los devanados para resistir las fuerzas sobre ellos, es decir, disminuye el esfuerzo. Disminuye la temperatura al final del evento en los devanados.
- i) Para la misma densidad de corriente, mayor dimensión axial del conductor. Aumenta la resistencia del devanado a los esfuerzos axiales.
- j) El uso de conductor de folios en los devanados de baja tensión aumenta la resistencia del devanado a los esfuerzos axiales.
- k) Cuando se ponen conductores en paralelo, si se coloca cada hilo al lado del otro en la dirección axial de la bobina, aumenta su resistencia a los esfuerzos axiales.
- l) Paredes de aislamiento más resistentes, aumentan la resistencia del devanado a los esfuerzos radiales.

7. Conclusiones y Recomendaciones.

7.1 Conclusiones.

Como conclusiones, se pueden plantear las siguientes:

- 1- La peor condición para la ocurrencia de un cortocircuito en transformadores de distribución no es cuando la onda de tensión cruza el eje de las abscisas, es decir cuando su ángulo de fase es 0° ó 180° , como se plantea en toda la bibliografía consultada. La aseveración anterior se basa en el hecho de que la impedancia de cortocircuito del transformador es casi inductiva. Sin embargo en transformadores de distribución, la resistencia de cortocircuito nunca es despreciable frente a la reactancia de cortocircuito, por lo que el ángulo del factor de potencia del transformador no se acerca a 90° .
- 2- Se logra estudiar los parámetros que intervienen en la generación de esfuerzos de cortocircuitos en transformadores y mediante un proceso de cálculo y análisis se sintetiza el impacto que tiene cada parámetro involucrado, en la magnitud de dichos esfuerzos.
- 3- Se desarrolló un programa de cómputo para evaluar las magnitudes de fuerzas y esfuerzos de cortocircuito en transformadores de distribución, cuyo costo en el mercado oscila entre 4 000 y 4 500 USD.
- 4- El programa fue validado con resultados obtenidos de un “software” similar desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas de Rusia.
- 5- El programa fue aplicado a 36 transformadores Latino de distintos diseños, arrojando resultados importantes para sus diseñadores.

7.2 Recomendaciones.

Se recomienda continuar con la introducción y generalización del programa de cómputo desarrollado y extender su alcance a transformadores de distribución trifásicos, lo cual es factible realizándole algunas adaptaciones.

1. Sacchi, Jorge N. L., Rifaldi, Alfredo. "Esfuerzos de cortocircuito en transformadores". <http://davinci.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/cme/vol-07/1cap13/cm-13a.h>. Texto original: Cálculo y diseño de máquinas eléctricas 1990. La Plata, Argentina.
2. Aponte G., Cadavid H., Lurie, A. "Modelamiento y evaluación de fuerzas por cortocircuito en transformadores de distribución. III Jornadas Latinoamericanas y I Iberoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, 1997.
3. Martin J. The J & P Transformer Book, A Practical Technology Of The Power Transforme. 13th ed., Oxford, Elsevier Science Ltd, 2007.
4. Bertagnolli, Giorgio. Short-circuit duty of power transformer The ABB approach 1998, Golinelli editore.
5. Cadavid H., Arango, E., Castro, F. "Análisis del Efecto de la Disposición de los Devanados en el Transformador de Distribución en su comportamiento ante el cortocircuito franco" IV Jornadas Latinoamericanas y I Iberoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, Medellin - Colombia 14 Al 16 De Octubre De 1999.
6. Winders, J. J., "Power Transformers Principles and Applications", Marcel Dekker, Inc, 2002. pp 159-201.
7. Harlow, J. H., "Electric Power Transformer Engineering", Second Edition, CRC Press LLC, 2004. pp 150-201.
8. Waters, M., "The short-circuit strength of power transformers.," M.I. & E. Surges wid Transformer Department 77w Electricity Research Association, Leatherhead. SuJrey, McDonald & Co. Ltd, London, 1966, pp. 15–64.
9. De Azevedo, A. C., Delaiba, A C., J. C. De Oliveira, J. C., Carvalho, B.C., De Sousa B. H., "Investigation of transformer electromagnetic forces caused by external faults using fem" Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC '06. IEEE/PES pp 1-6.
10. De Azevedo, A. C., Delaiba, A C., De Oliveira, J. C., Carvalho, B.C., De Sousa B. H., "Transformer mechanical stress caused by external short- circuit: a time domain approach". http://www.ipst.org/techpapers/2007/ipst_2007/papers_IPST2007/Session27/174.pdf
11. Garrido D .R, "Software para el diseño optimo de transformadores acorazados de distribución. Tesis de Maestría. CIPEL 2004.
12. Cadavid H., Aponte G., García, D. F., Muñoz, M. E., Urrego, C. A., Rodríguez, C., Giraldo, O. "Evaluación del comportamiento térmico del transformador de distribución
13. Internacional Estándar, IEC 60076-5:2006 "Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit ", Third edition February 2006 pp 19-24.
14. Norma Técnica Colombiana NTC 532 "Transformadores: Aptitud de soportar el cortocircuito" segunda revisión.
15. Cadavid R.H. , Zenova V. L., Lurie A. I., Panibrates A. N. , "Investigación y cálculo experimental de la aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución con devanados rectangulares". Electrotecnia, No. 3, 1997, Moscú, Rusia. (En ruso)
16. Lurie A. I. "Esfuerzos axiales en devanados de transformadores. Electrishevstvo. Pags 23-32, No. 4, 1972, Moscú, Rusia. (En ruso)

Anexos

Anexo 1 El Método De Los Elementos Finitos

El método de los **elementos finitos** (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico muy general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de [ingeniería](#) y [física](#),

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) — sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema — en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos», El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización, Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos», Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos, El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla»,

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso, De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad, El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de [sistema de ecuaciones](#) lineales (o linealizadas), La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama [matriz de rigidez](#) del sistema, El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos,

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de [mecánica de medios continuos](#), El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo

complejos (en dos o tres dimensiones), Además el método es fácilmente adaptable a problemas de [difusión del calor](#), de [mecánica de fluidos](#) para calcular campos de velocidades y presiones (fluidodinámica [CFD](#)) o de [campo electromagnético](#), Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo,

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones,

Formulaciones

Existen dos tipos de caminos para su formulación, basándose en el principio de los trabajos virtuales, es decir, formulaciones [variacionales](#), o mediante el método de Galerkin,

¿Cómo trabaja el MEF en la práctica?

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número de finito de puntos y extrapola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

Preproceso, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y preconditionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

Cálculo, el resultado del preproceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuyo input depende del output del paso anterior.

Postproceso, el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se computan magnitudes derivadas, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

Preproceso y generación de la malla [editar]

La malla se genera automáticamente y en general consta de miles (e incluso centenares de miles) de puntos. La información sobre las propiedades del material y otras características del problema se almacena junto con la información que describe la malla. Por otro lado las fuerzas, los flujos térmicos o las temperaturas se reasignan a los puntos de la malla. A los nodos de la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente probados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Las tareas asignadas al preproceso son:

- . El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de preproceso.
- . Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.
- . Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Por ejemplo el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos podría venir definido por: $u = N_1 u_1 + N_2 u_2$, siendo N_1 y N_2 las funciones comentadas (funciones de forma) y u_1 y u_2 los desplazamientos en el nodo 1 y en el nodo 2.
- . Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
- . Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k \cdot u$, que como vemos es similar a la del cálculo matricial.

Cálculo y resolución de sistemas de ecuaciones

En un problema mecánico lineal no-dependientes del tiempo, como un problema de cálculo estructural estático o un problema elástico, el cálculo generalmente se reduce a obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.

Cuando el problema es no-lineal en general la aplicación de las fuerzas requiere la aplicación incremental de las fuerzas y considerar incrementos numéricos, y calcular en cada incremento algunas magnitudes referidas a los nodos. Algo

similar sucede con los problemas dependientes del tiempo, para los que se considera una sucesión de instantes, en general bastante cercanos en el tiempo, y se considera el equilibrio instantáneo en cada instante. En general estos dos últimos tipos de problemas son requieren un tiempo de computación substancialmente más elevado que la consideración de un problema estacionario y lineal.

Postproceso

Actualmente, el MEF es usado para calcular problemas tan complejos, que generan los ficheros de salida del MEF con tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensible e ilustrar diferentes aspectos del problema. En la etapa de post-proceso los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados, para obtener representación gráficas y obtener magnitudes derivadas, que permitan extraer conclusiones del problema.

El post-proceso del MEF generalmente requiere software adicional para organizar el output, de tal manera que sea más fácilmente comprensible el resultado y permita decidir si ciertas consecuencias del problema son o no aceptables. En el cálculo de estructuras por ejemplo, el post-proceso puede incluir comprobaciones adicionales de si una estructura cumple los requisitos de las normas pertinentes, calculando si se sobrepasan tensiones admisibles, o existe la posibilidad de pandeo en la estructura.

Problemas termomecánicos

Un amplio rango de funciones objetivo (variables con el sistema) están disponibles para la minimización ó la maximización:

Masa, volumen, temperatura

Energía tensional, estrés tensional

Fuerza, desplazamiento, velocidad, aceleración

Sintético (definidos por el usuario)

Hay múltiples condiciones de carga que se pueden aplicar al sistema. Algunos ejemplos son:

Puntuales, presión, térmicas, gravedad, y cargas centrífugas estáticas

Cargas térmicas de soluciones del análisis de transmisión de calor

Desplazamientos forzados

Flujo de calor y convección

Puntuales, de presión, y cargas de gravedad dinámicas

Cada programa MEF puede venir con una librería de elementos, o una que es construida con el tiempo. Algunos ejemplos de elementos son:

Elementos tipo barra

Elementos tipo viga

Placa/Cáscara/Elementos compuestos

Panel de sándwich

Elementos sólidos

Elementos tipo muelle

Elementos de masa

Elementos rígidos

Elementos amortiguadores viscosos

Muchos programas MEF también están equipados con la capacidad de usar múltiples materiales en la estructura, como:

Modelos elásticos isotrópicos / ortotrópicos / anisótropicos generales

Materiales homogéneos / heterogéneos

Modelos de plasticidad

Modelos viscosos

Tipos de análisis ingenieriles

El programador puede insertar numerosos algoritmos ó funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales toman en cuenta las deformaciones plásticas, y algunos incluso son capaces de testear el material hasta la fractura.

Algunos tipos de análisis ingenieriles comunes que usan el método de los elementos finitos son:

Análisis estructural consiste en modelos lineales y no lineales. Los modelos lineales usan simples parámetros y asumen que el material no es deformado plásticamente. Los modelos no lineales consisten en tensionar el material más

allá de sus capacidades elásticas. La tensión en el material varía con la cantidad de deformación, como en la figura.

Análisis vibracional es usado para testear el material contra vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estos incidentes puede actuar en la frecuencia natural del material, que en cambio, puede causar resonancia y el consecuente fallo.

Análisis de fatiga ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura, enseñando el efecto de los ciclos de carga sobre el espécimen. Este análisis puede enseñar las áreas donde la propagación de la grieta es más posible que ocurra. El fallo por fatiga puede también enseñar la tolerancia al fallo del material (figura).

Los modelos de análisis de transferencia de calor por conductividad o por dinámicas térmicas de flujo del material o la estructura. Esto consiste en una transferencia con un transitorio regular. El estado continuo de transferencia se refiere a las propiedades térmicas en el material que tiene una difusión lineal de calor.

Resultados del MEF

El MEF se ha vuelto una solución para la tarea de predecir los fallos debidos a tensiones desconocidas enseñando los problemas de la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las teóricas tensiones involucradas. Este método de diseño y prueba del producto es muy superior a los costes de manufactura que podrían acarrear si actualmente cada ejemplo fuera construido y probado.

Las grandes ventajas del cálculo por ordenador se pueden resumir en:

Hace posible el cálculo de estructuras que, bien por el gran número de operaciones que su resolución presenta (entramados de muchos pisos, por ejemplo) o por lo tedioso de las mismas (entramados espaciales, por ejemplo) eran, en la práctica, inabordables mediante el cálculo manual.

En la mayoría de los casos reduce a límites despreciables el riesgo de errores operatorios.

Limitaciones

En general el MEF tal como se usa actualmente tiene algunas limitaciones:

El MEF computa soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, muchos códigos no un análisis de sensibilidad sencillo en que permita conocer como variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente. Es decir, proporciona sólo respuestas numéricas cuantitativas concretas no relaciones cualitativas generales.

El MEF proporciona una solución aproximada cuyo margen de error en general es desconocido. Si bien algunos tipos de problemas permiten acotar el error de la solución, debido a los diversos tipos de aproximaciones que usa el método, los problemas no-lineales o dependientes del tiempo en general no permiten conocer el error.

El MEF la mayoría de aplicaciones prácticas requiere mucho tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas, desigual grado de convergencia de la solución aproximada hacia la solución exacta en diferentes puntos, etc. En general una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente pretende simularse, antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

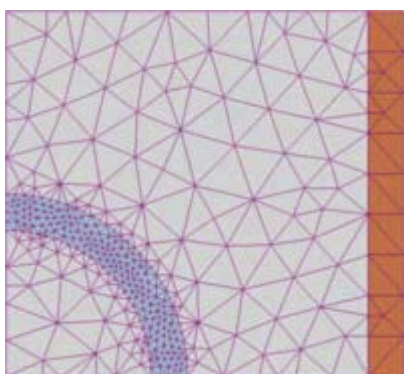
Programas para elementos finitos

- [Flux](#)
- [Cosmos](#)
- [Staad.pro](#)
- [Catia v5](#)
- [Cype](#)
- [Dlubal RFEM](#)
- [Sap2000](#)
- [Algor](#)
- [HKS/Abaqus/Simulia](#)
- [ANSYS](#)
- [CAELinux](#)
- [Elmer](#)
- [FEAP](#)
- [Phase2](#)
- [Nastran](#)
- [I-deas](#)
- [Femap](#)
- [Pro/ENGINEER Mechanical](#)
- [Elas2D](#)
- [Comsol](#)
- [Castem](#)
- [SALOME-Code Aster](#)

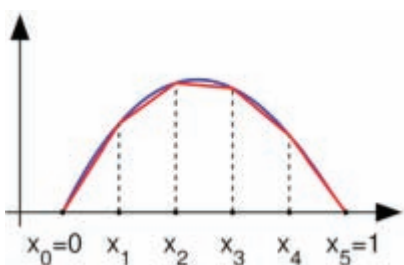
- [FreeFem](#)
- [OpenFEM](#)
- [OpenFlower](#)
- [OpenFOAM](#)
- [Calculix](#)
- [Tochnog](#)
- [Gmsh-GetDP](#)
- [Z88](#)

EJEMPLOS

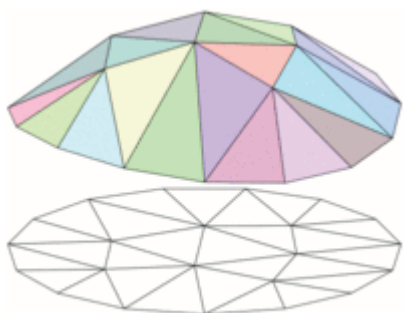
Solución de MEF en 2D para una configuración de un magnetostato, (las líneas muestran la dirección de la densidad de flujo calculada, y el color, su magnitud),



La malla 2D para la imagen superior (la malla es más densa alrededor del nuestro objetivo, aquellas zonas de mayor interés, o de mayor complejidad en el cálculo),



Una función en H^1_0 , con valor cero en los puntos finales (azul), y una aproximación lineal (rojo),



Bibliografía

- P. G. Ciarlet (1978): The Finite Element Method for Elliptic Problems, North-Holland, Ámsterdam, 1978.
- P. G. Ciarlet (1991): "Basic error estimates for elliptic problems" en *Handbook of Numerical Analysis* (Vol II) J.L. Lions y P. G. Ciarlet (ed.), North-Holland, Ámsterdam, 1991, p. 17-351.
- http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos

ANEXO 2 Reporte De Transformadores (Formato Html)

**TRANSFORMADORES DE 37,5kVA
TIPO ACORAZADO**

TRANSFORMADORES DE 37,5kVA TIPO ACORAZADO

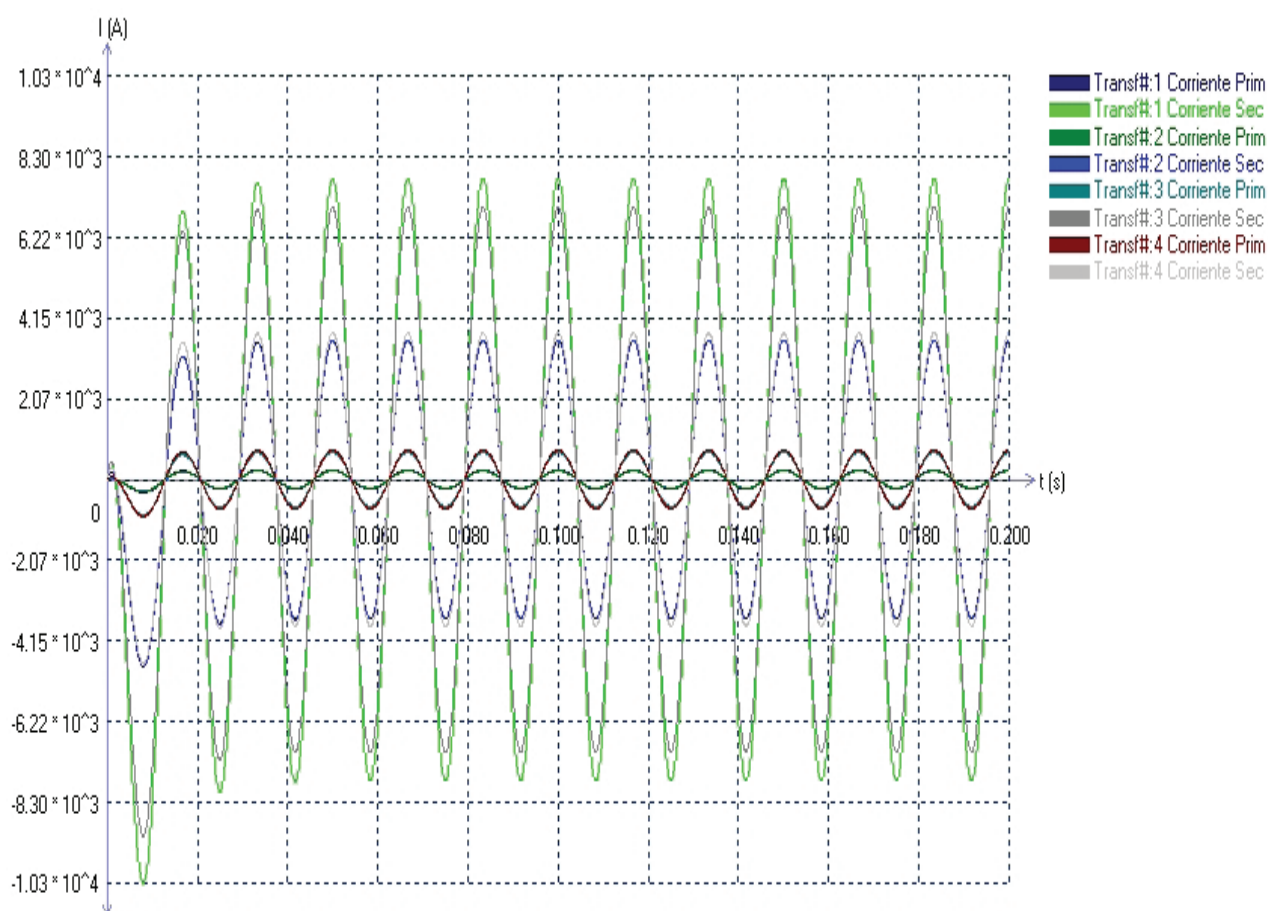
Resumen	TR 1	TR 2	TR 3	TR 4
-------------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Reporte de Transformadores: Tablas Comparativas:

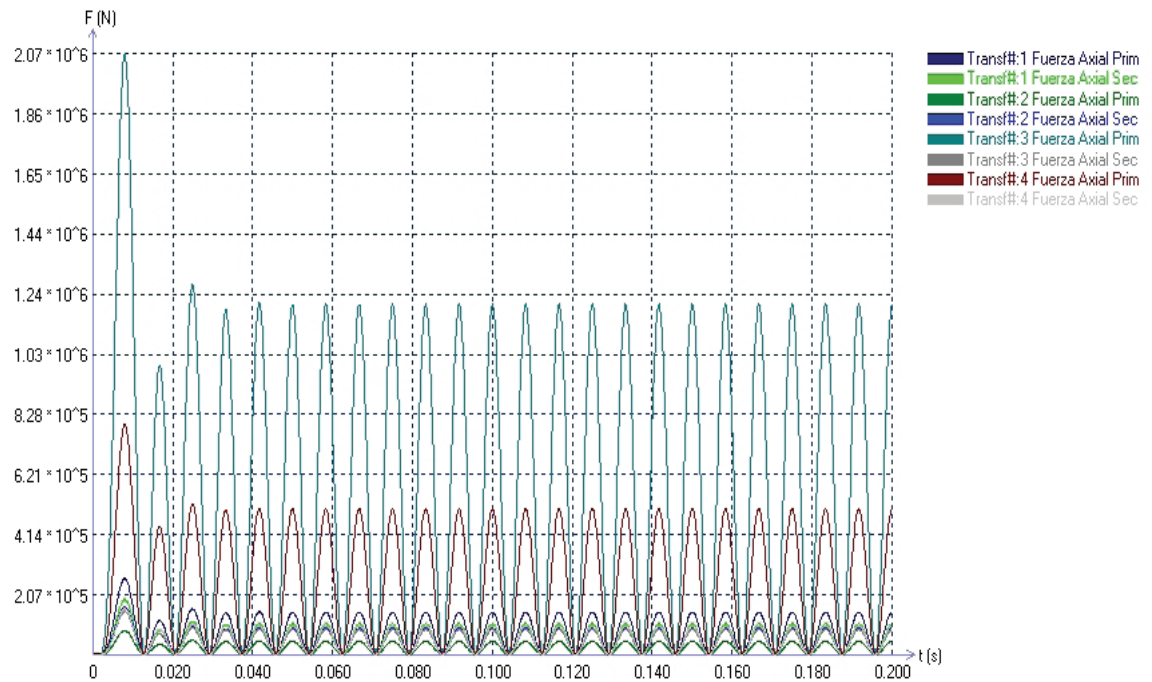
Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
_AT SH6 37.5 7-12	3.25×10^2 A	1.03×10^4 A	3.45×10^4 N	2.49×10^4 N	2.57×10^8 N	1.46×10^5 N	1.05×10^5 N	160.644 °
_AT SH6 37.5 7-24	3.02×10^2 A	4.80×10^3 A	1.07×10^4 N	2.15×10^4 N	2.37×10^8 N	4.56×10^4 N	9.13×10^4 N	160.995 °
LAT SH637.5 7-12	9.13×10^2 A	9.13×10^3 A	2.73×10^5 N	1.95×10^4 N	2.32×10^8 N	1.15×10^6 N	8.27×10^4 N	159.178 °
_AT SH6 37.5 2-24	9.43×10^2 A	4.71×10^3 A	1.04×10^5 N	2.08×10^4 N	2.50×10^8 N	4.44×10^5 N	8.82×10^4 N	156.292 °

Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
_AT SH6 37.5 7-12	172.675 A	5482.456 A	2.52×10^{12} Pa	2.55×10^9 Pa	3.09×10^7 Pa	2.20×10^7 Pa	96.752 °C	96.555 °C
_AT SH6 37.5 7-24	159.781 A	2536.525 A	7.87×10^{11} Pa	8.85×10^9 Pa	1.60×10^7 Pa	1.91×10^7 Pa	96.756 °C	96.559 °C
LAT SH637.5 7-12	496.031 A	4960.317 A	1.99×10^{13} Pa	2.00×10^9 Pa	2.44×10^8 Pa	1.73×10^7 Pa	96.763 °C	95.154 °C
_AT SH6 37.5 2-24	533.276 A	2666.382 A	7.66×10^{12} Pa	8.55×10^9 Pa	1.56×10^8 Pa	1.84×10^7 Pa	96.630 °C	95.143 °C

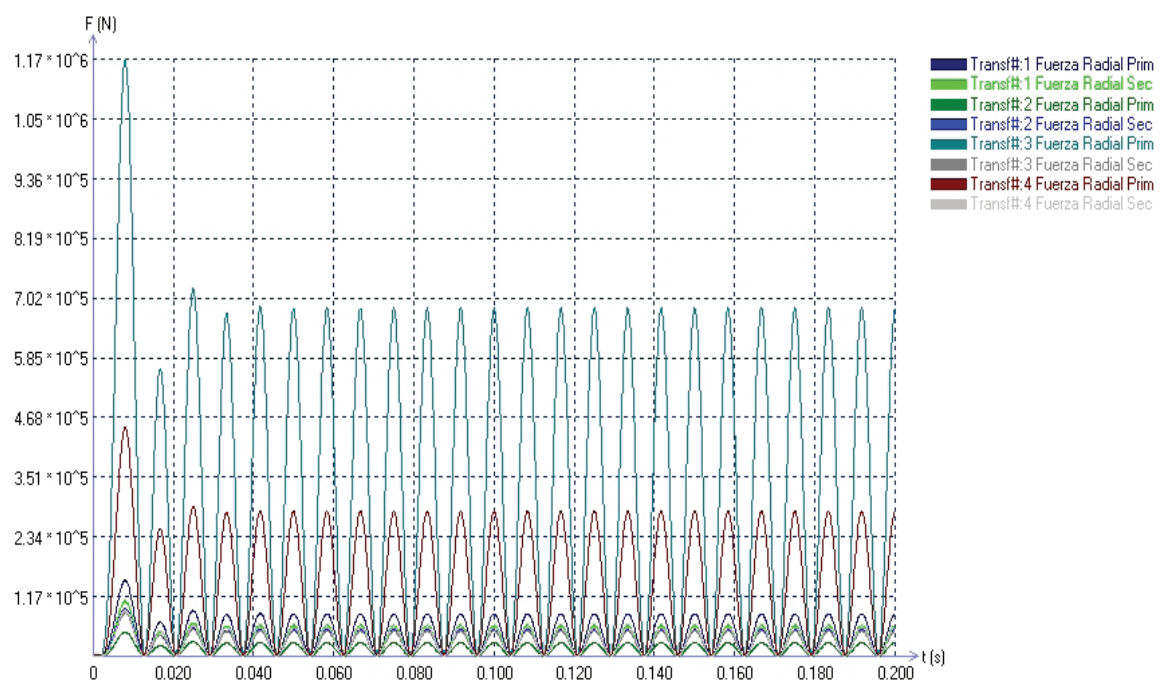
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales



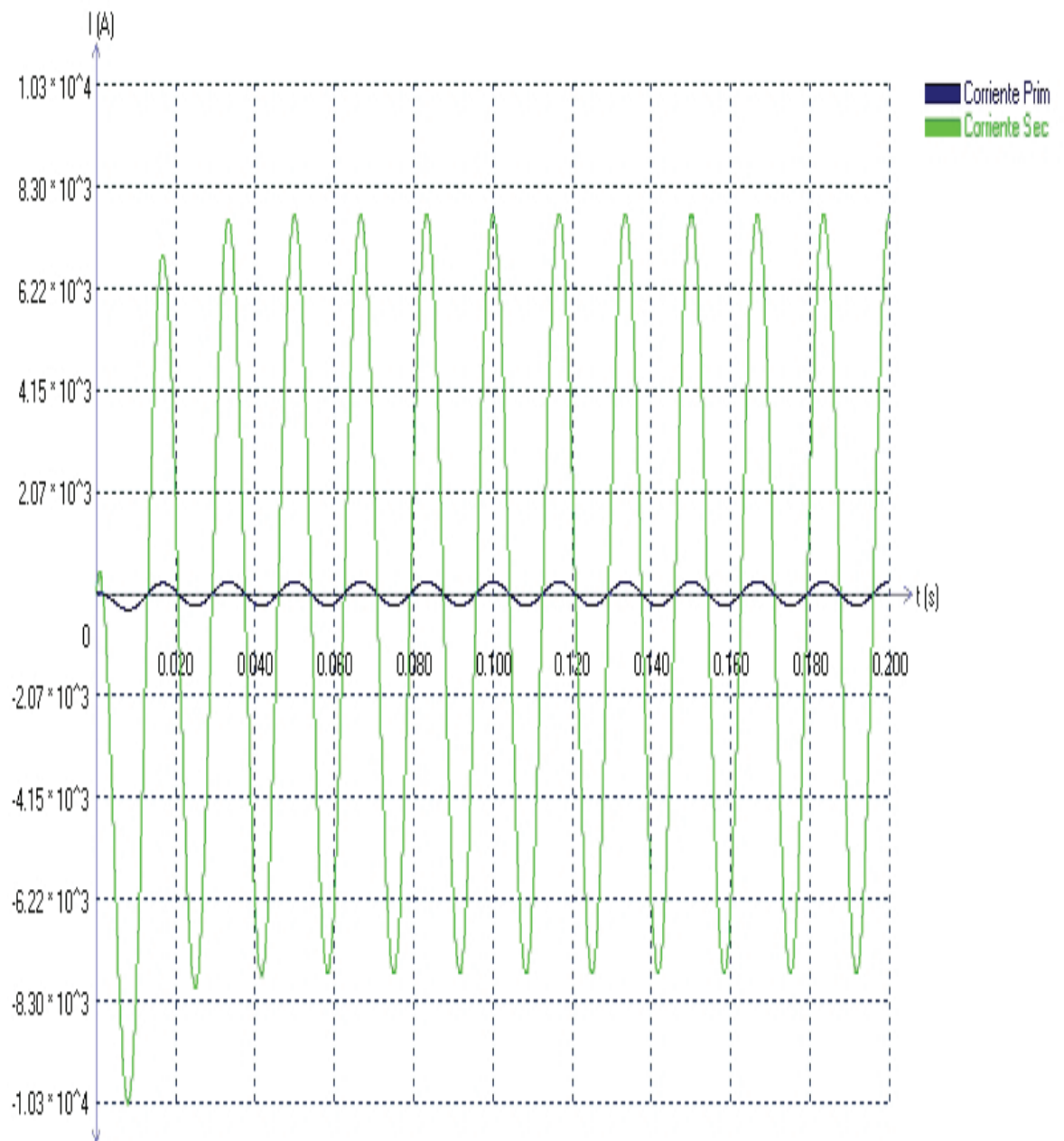
[Resumen](#)[TR 1](#)[TR 2](#)[TR 3](#)[TR 4](#)

Reporte del Transformador:

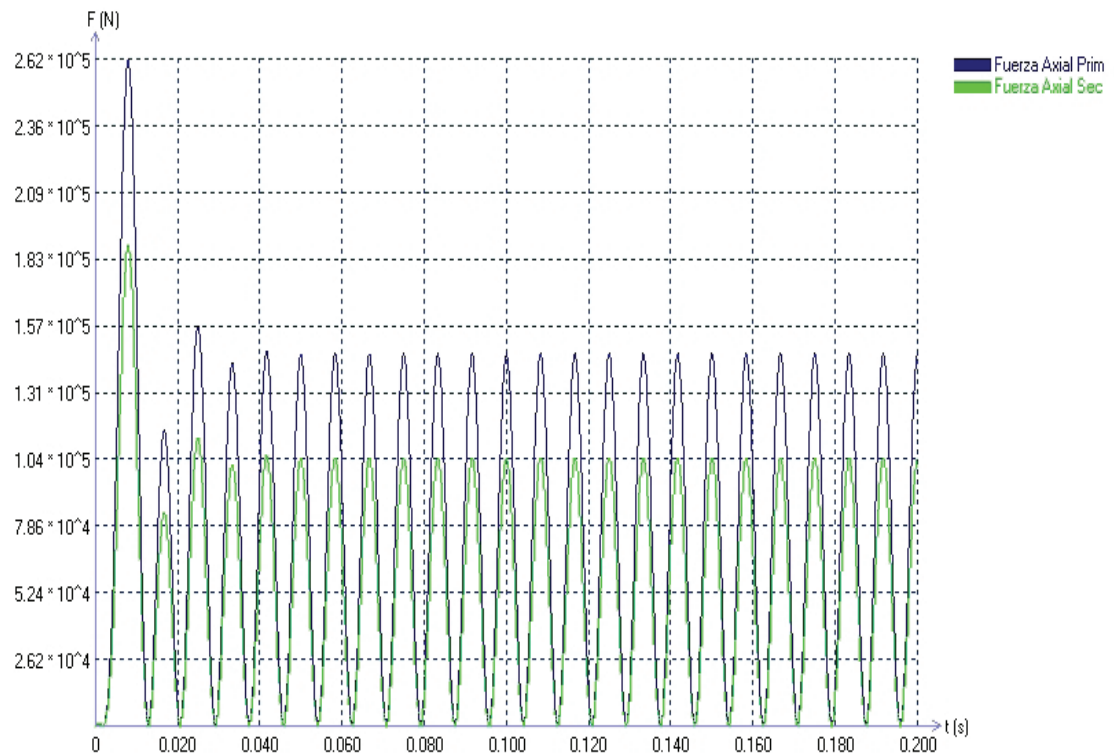
LAT SH6 37,5 7-12

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	166 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	165 mm
Espesor del Devanado de Alta	165 mm	Espesor del Devanado de Baja	25 mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	7620 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	240 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	1134	Número de vueltas del Devanado de Baja	34
Potencia Aparente del Transformador	37,5 kVA,	Porcentaje de Impedancia de Corto-Circuito	2,85 %
Tipo de Transformador	ACOR	Perdidas de Corto-Circuito	354,22 W
Ancho de la Columna del Núcleo	86,4 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	200 mm
Ancho del Canal de Ventilación	4 mm	Angulo de Conexión	160,64 °
Distancia entre Calzos Primarios	0,324 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	0,214 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,63 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	18,88 mm	Ancho del conductor por el Secundario	3,8 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	$3,45 * 10^4$ N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	24903,303 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	$1,46 * 10^5$ N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	$1,05 * 10^5$ N
Fuerza Axial Total	$2,57 * 10^8$ N	Angulo de Conexión	160,64 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$2,52 * 10^{12}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$2,55 * 10^9$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$3,09 * 10^7$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$2,20 * 10^7$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	172,675 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	5482,456 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	325,194 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	10324,939 A
Temperatura en el Devanado Primario	96,752 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	96,555 °C

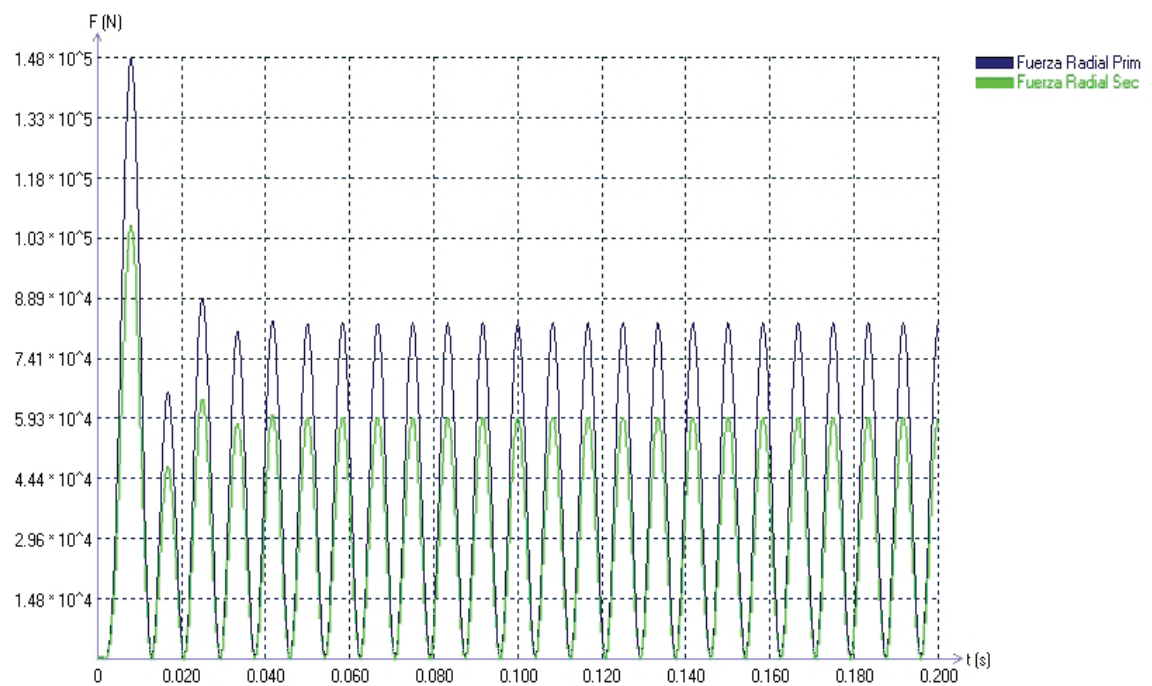
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:

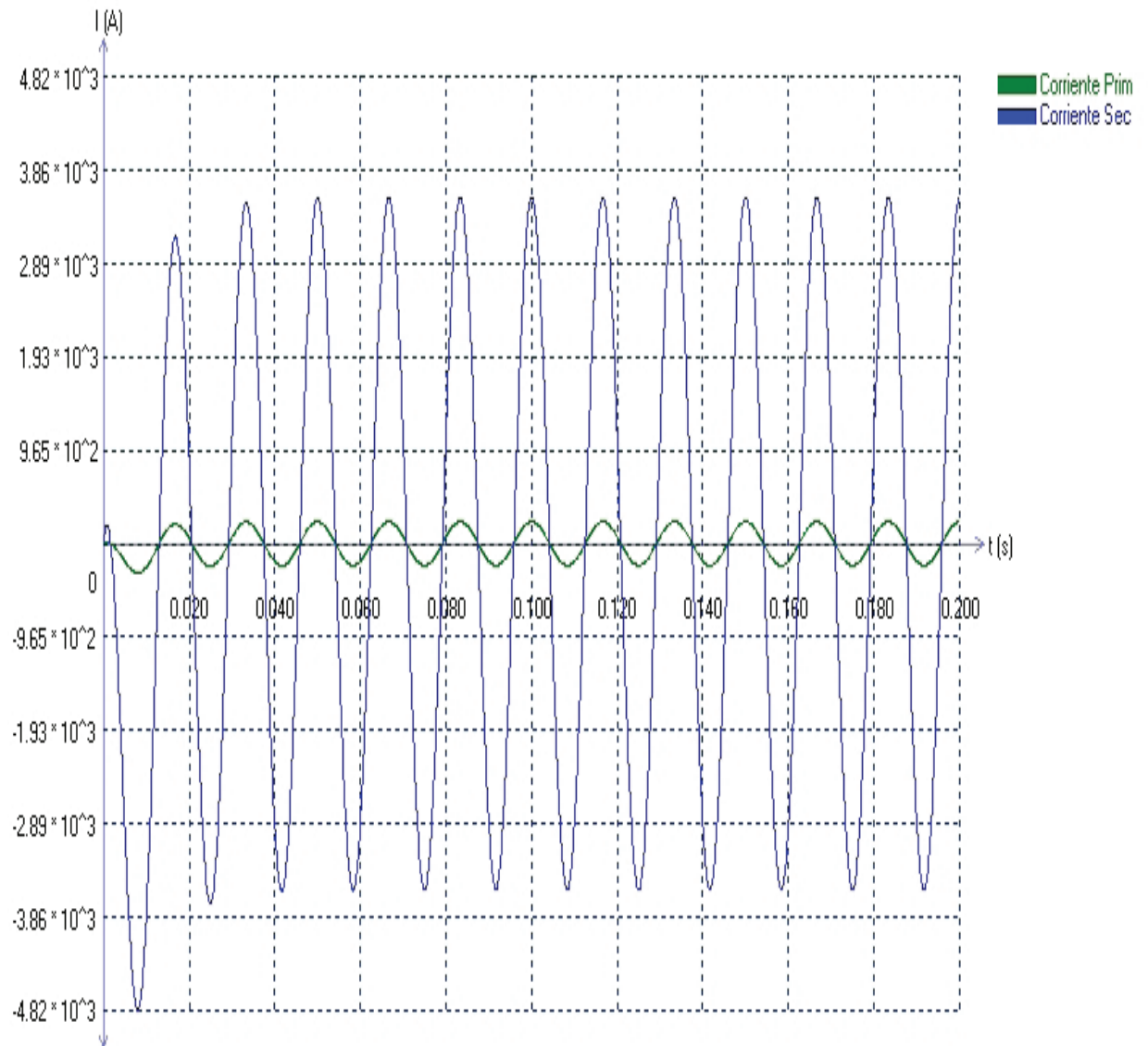


Reporte del Transformador:

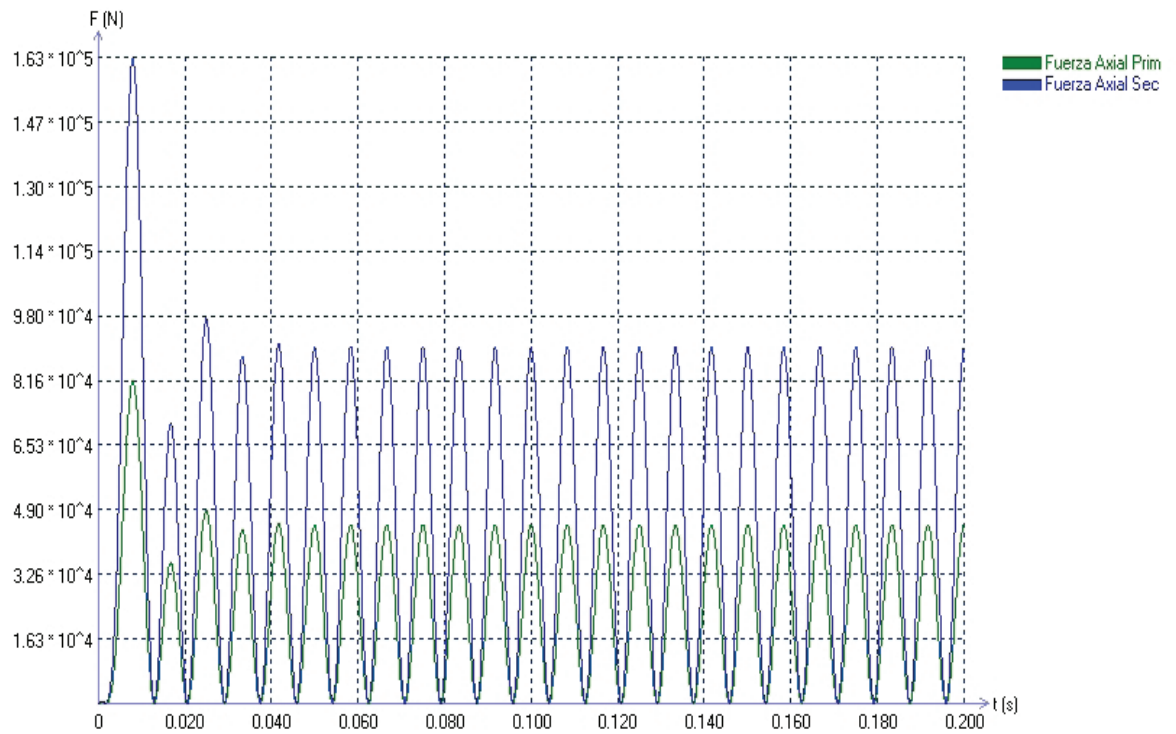
LAT SH6 37,5 7-24

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	166 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	165 mm
Espesor del Devanado de Alta	165 mm	Espesor del Devanado de Baja	25 mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	7620 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	480 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	680	Número de vueltas del Devanado de Baja	68
Potencia Aparente del Transformador	37,5 kVA	Porcentaje de Impedancia de Corto-Circuito	3,08 %
Tipo de Transformador	ACOR	Perdidas de Corto-Circuito	376,11 W
Ancho de la Columna del Núcleo	86,4 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	200 mm
Ancho del Canal de Ventilación	4 mm	Angulo de Conexión	160,99 °
Distancia entre Calzos Primarios	0,324 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	0,214 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,63 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	9,44 mm	Ancho del conductor por el Secundario	3,8 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	10768,883 N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	21555,590 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	$4,56 * 10^4$ N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	$9,13 * 10^4$ N
Fuerza Axial Total	$2,37 * 10^8$ N	Angulo de Conexión	160,99 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$7,9 * 10^{11}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$8,85 * 10^9$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$1,60 * 10^7$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$1,91 * 10^7$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	159,781 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	2536,525 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	302,548 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	4802,960 A
Temperatura en el Devanado Primario	96,756 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	96,559 °C

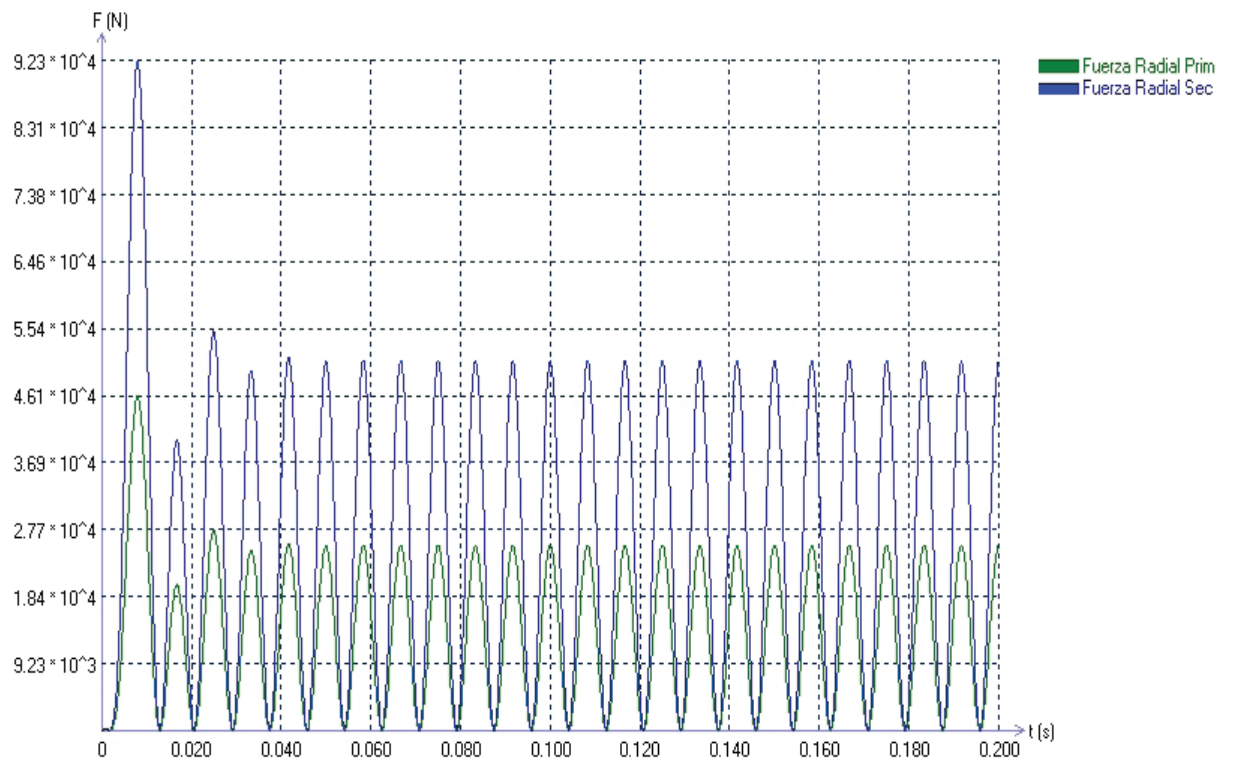
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:

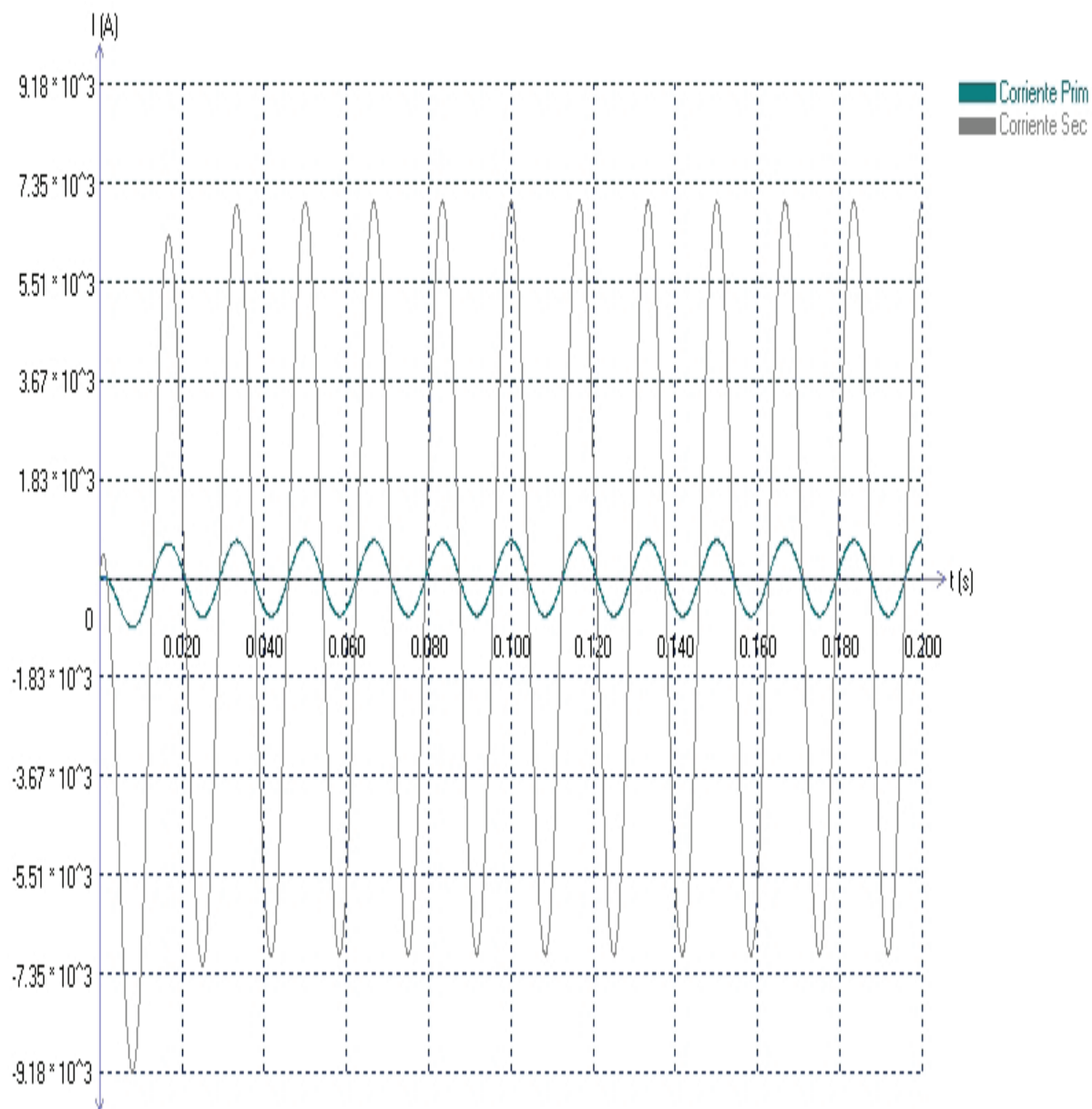

[Resumen](#)
[TR 1](#)
[TR 2](#)
[TR 3](#)
[TR 4](#)

Reporte del Transformador:

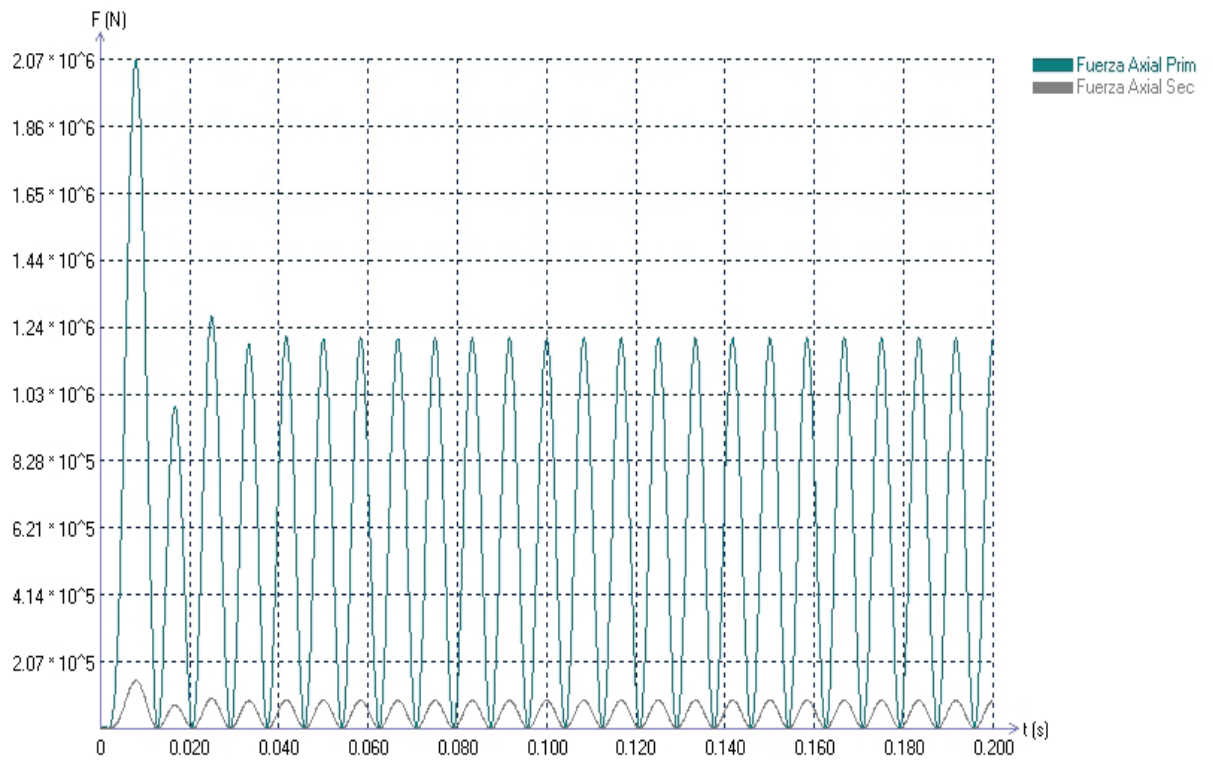
LAT SH637,5 2-12

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	166 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	165 mm
Espesor del Devanado de Alta	165 mm	Espesor del Devanado de Baja	25 mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	2400 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	240 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	1134	Número de vueltas del Devanado de Baja	34
Potencia Aparente del Transformador	37,5 kVA	Porcentaje de Impedancia de Corto-Circuito	3,15 %
Tipo de Transformador	ACOR	Perdidas de Corto-Circuito	419,89 W
Ancho de la Columna del Núcleo	86,4 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	200 mm
Ancho del Canal de Ventilación	4 mm	Angulo de Conexión	159,17 °
Distancia entre Calzos Primarios	0,324 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	0,214 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,63 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	18,88 mm	Ancho del conductor por el Secundario	3,8 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	$2,73 \cdot 10^5$ N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	19510,730 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	$1,15 \cdot 10^6$ N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	$8,27 \cdot 10^4$ N
Fuerza Axial Total	$2,32 \cdot 10^8$ N	Angulo de Conexión	159,17 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$1,99 \cdot 10^{13}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$2,00 \cdot 10^9$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$2,44 \cdot 10^8$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$1,73 \cdot 10^7$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	496,031 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	4960,317 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	913,893 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	9138,939 A
Temperatura en el Devanado Primario	96,763 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	95,154 °C

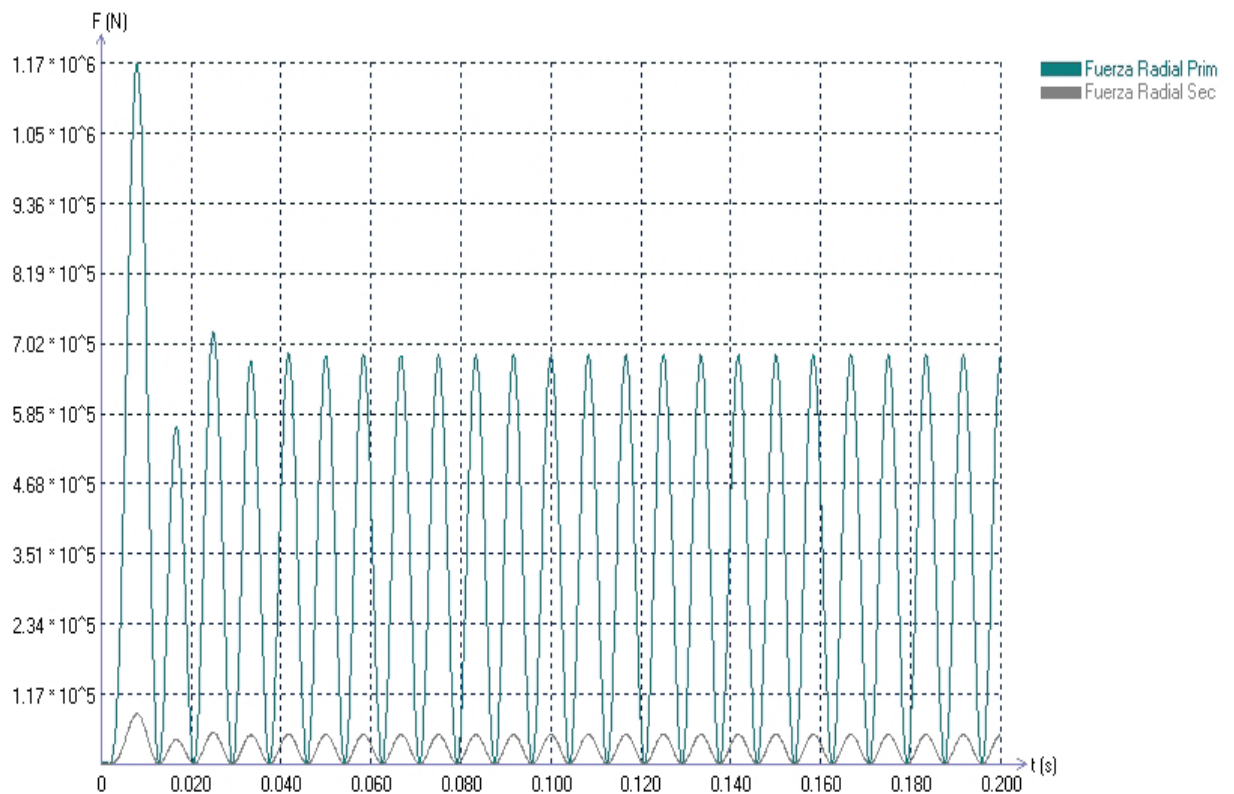
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:

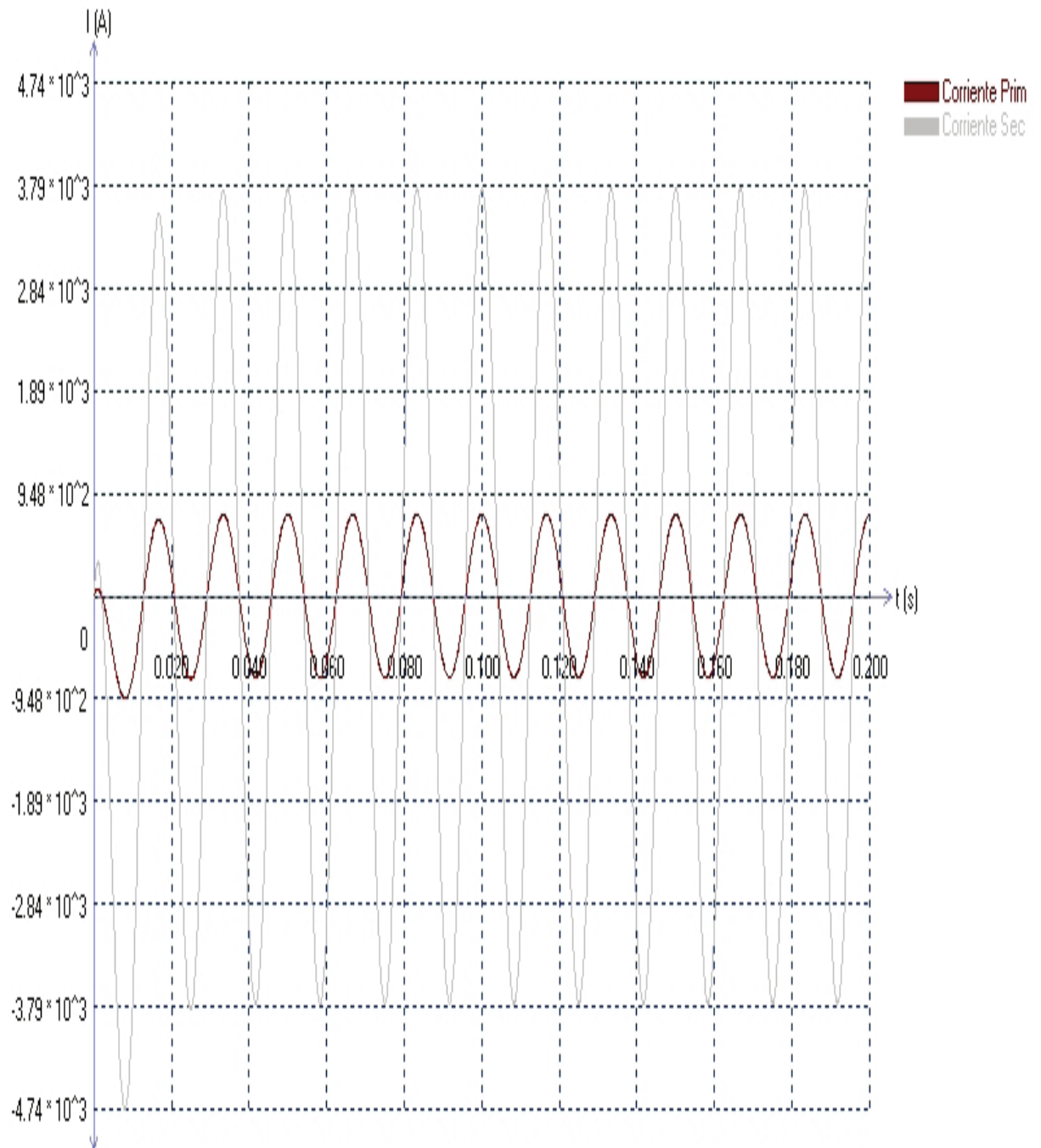

[Resumen](#)
[TR 1](#)
[TR 2](#)
[TR 3](#)
[TR 4](#)

Reporte del Transformador:

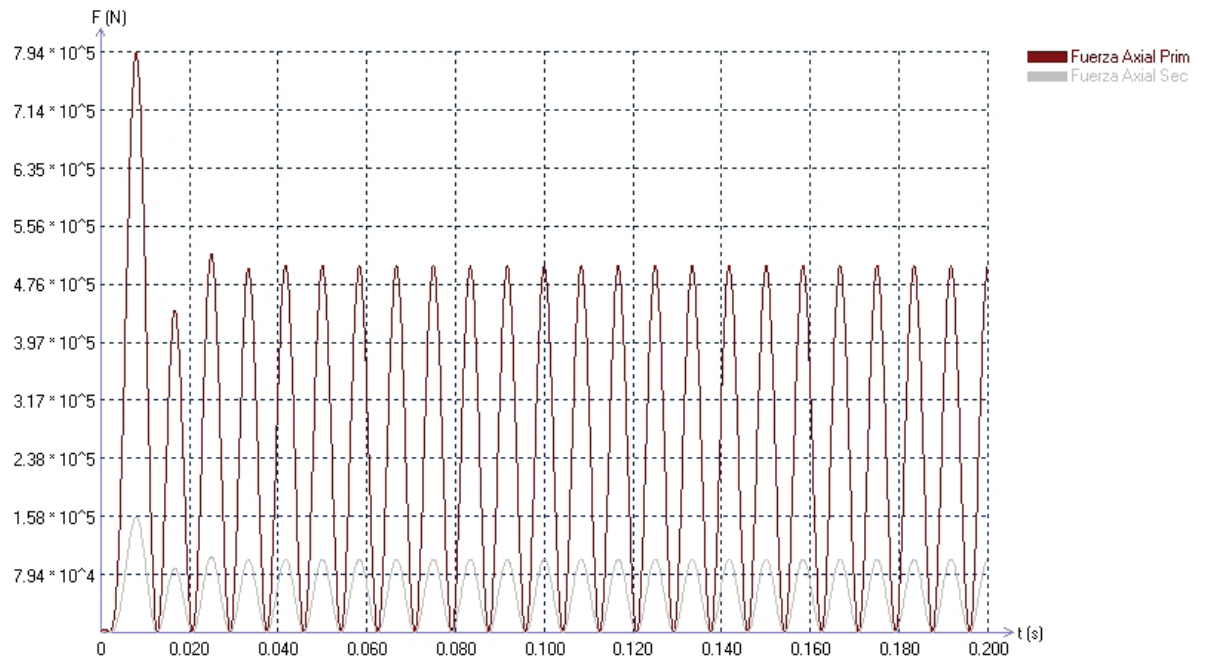
LAT SH6 37,5 2-24

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	166 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	165 mm
Espesor del Devanado de Alta	165 mm	Espesor del Devanado de Baja	25 mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	2400 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	480 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	680	Número de vueltas del Devanado de Baja	68
Potencia Aparente del Transformador	37,5 kVA	Porcentaje de Impedancia de Corto-Circuito	2,93 %
Tipo de Transformador	ACOR	Perdidas de Corto-Circuito	441,78 W
Ancho de la Columna del Núcleo	86,4 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	200 mm
Ancho del Canal de Ventilación	4 mm	Angulo de Conexión	156,29 °
Distancia entre Calzos Primarios	0,324 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	0,214 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,63 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	9,44 mm	Ancho del conductor por el Secundario	3,8 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	$1,04 \cdot 10^5$ N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	20816,401 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	$4,44 \cdot 10^5$ N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	$8,82 \cdot 10^4$ N
Fuerza Axial Total	$2,50 \cdot 10^8$ N	Angulo de Conexión	156,29 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$7,66 \cdot 10^{12}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$8,55 \cdot 10^9$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$1,56 \cdot 10^8$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$1,84 \cdot 10^7$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	533,276 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	2666,382 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	943,977 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	4719,889 A
Temperatura en el Devanado Primario	96,630 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	95,143 °C

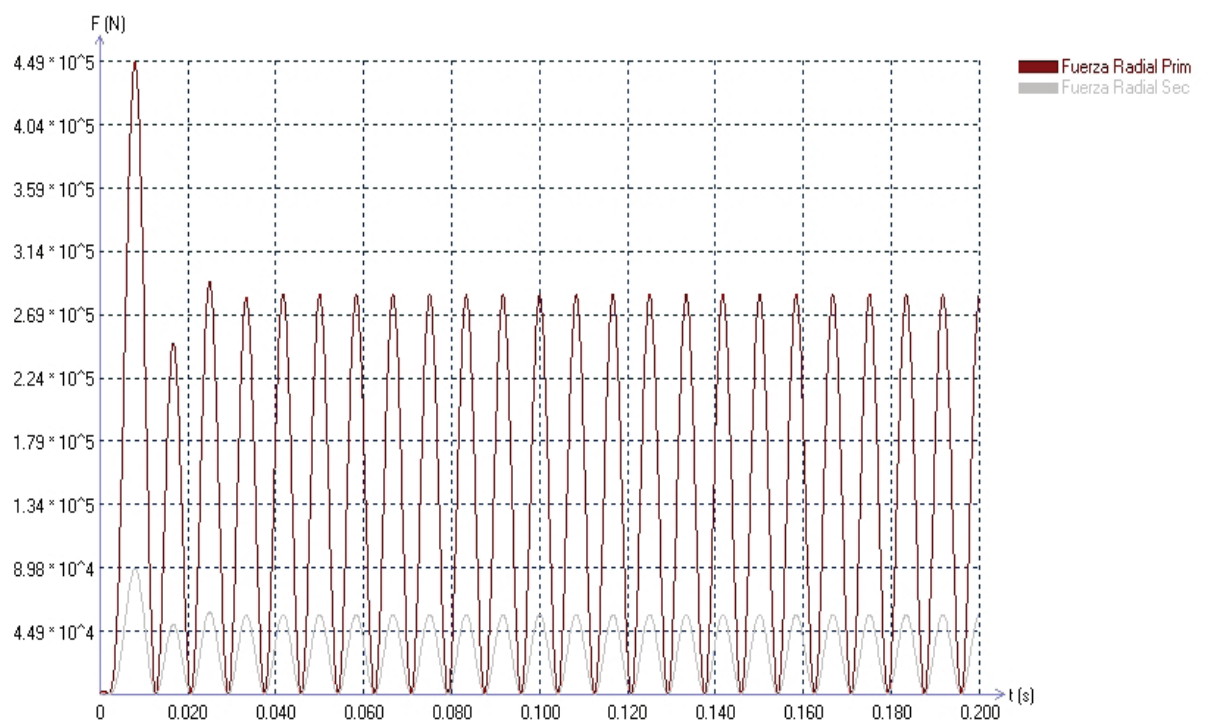
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:



TRANSFORMADORES DE 37,5kVA TIPO NUCLEO

TRANSFORMADORES DE 37,5kVA TIPO NUCLEO

[Resumen](#)[TR 1](#)[TR 2](#)

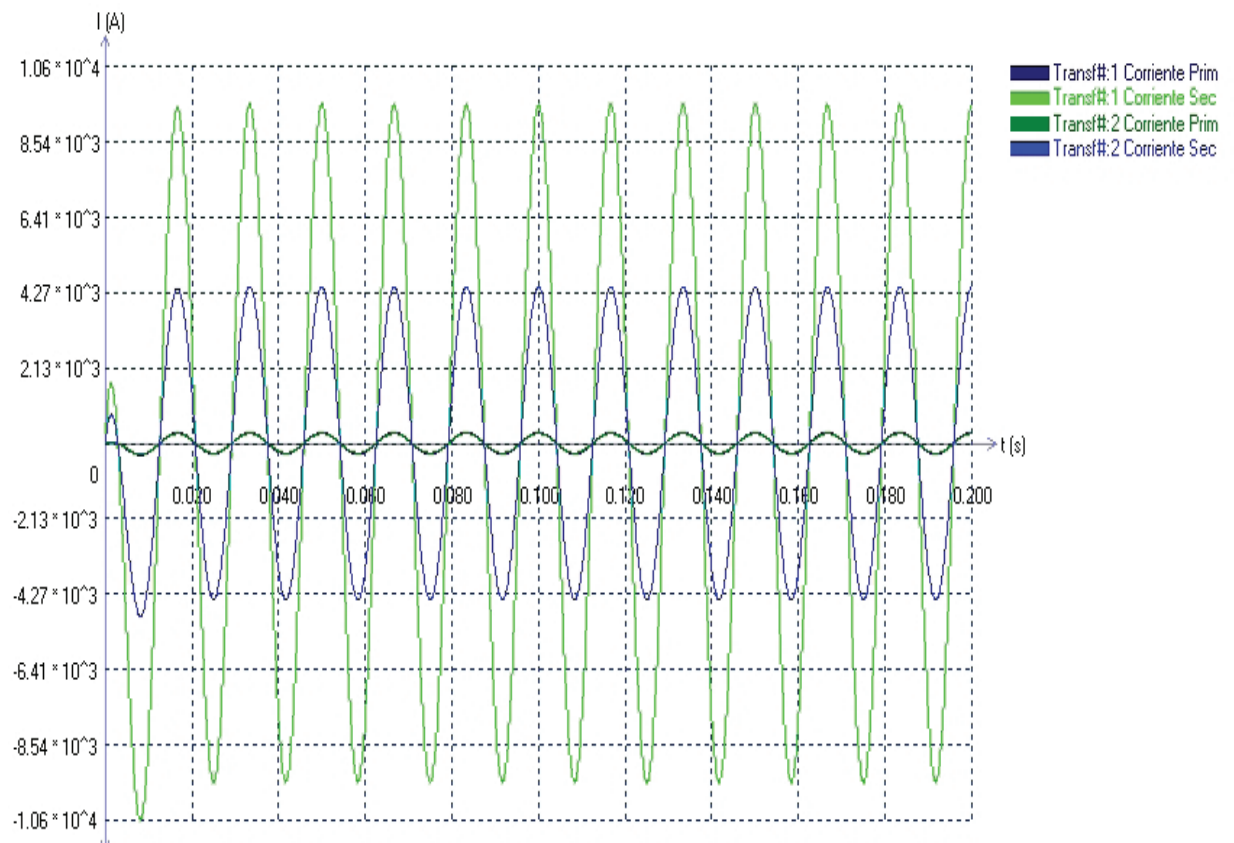
Reporte de Transformadores:

Tablas Comparativas:

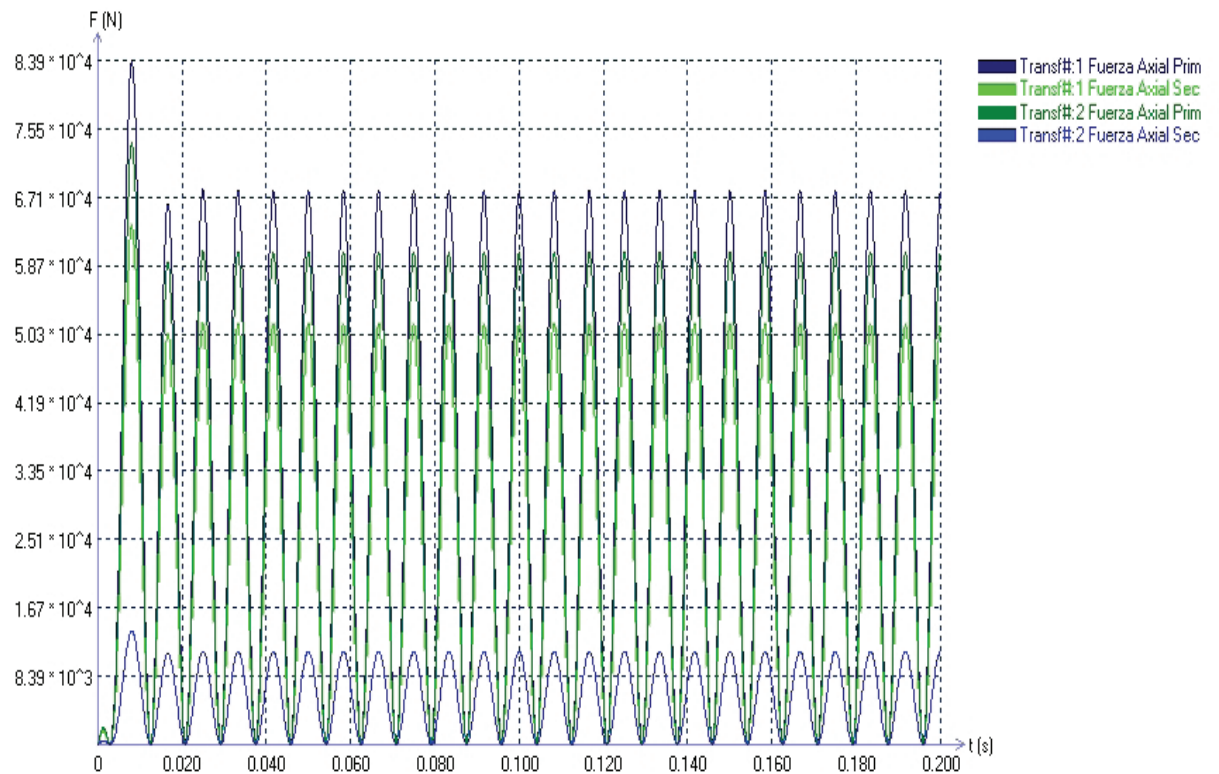
Transformador	Corriente Max Prim	Corriente Max Sec	Fuerza Axial Prim	Fuerza Axial Sec	Fuerza Axial Total	Fuerza Radial Prim	Fuerza Radial Sec	Angulo de Conexión
JCLEO 37 7600/2	$3.35 * 10^2$ A	$1.06 * 10^4$ A	$1.11 * 10^4$ N	$8.44 * 10^3$ N	$3.07 * 10^8$ N	$4.71 * 10^4$ N	$3.58 * 10^4$ N	144.709 °
JCLEO 37 7600/2	$3.08 * 10^2$ A	$4.89 * 10^3$ A	$9.79 * 10^3$ N	$1.84 * 10^3$ N	$2.75 * 10^8$ N	$4.15 * 10^4$ N	$7.81 * 10^3$ N	144.051 °

Transformador	Corriente Sim Prim	Corriente Sim Sec	Esfuerzo Axial Prim	Esfuerzo Axial Sec	Esfuerzo Radial Prim	Esfuerzo Radial Sec	Temperatura Prim °C	Temperatura Sec °C
JCLEO 37 7600/2	214.154 A	6799.390 A	$3.23 * 10^{18}$ Pa	$7.66 * 10^{15}$ Pa	$2.14 * 10^7$ N/m ²	$2.33 * 10^7$ Pa	97.839 °C	100.308 °C
JCLEO 37 7600/2	197.958 A	3142.598 A	$3.08 * 10^{18}$ Pa	$2.68 * 10^{15}$ Pa	$1.88 * 10^7$ N/m ²	$6.35 * 10^6$ Pa	97.785 °C	97.024 °C

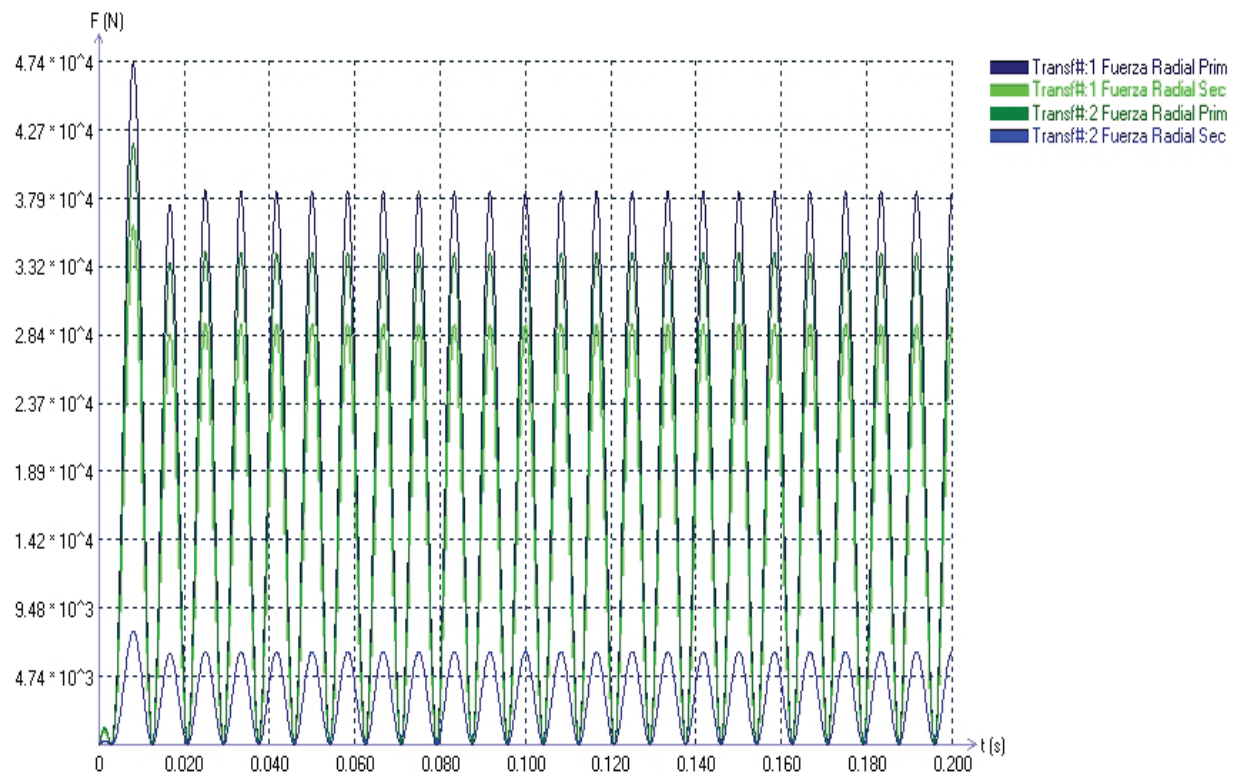
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:

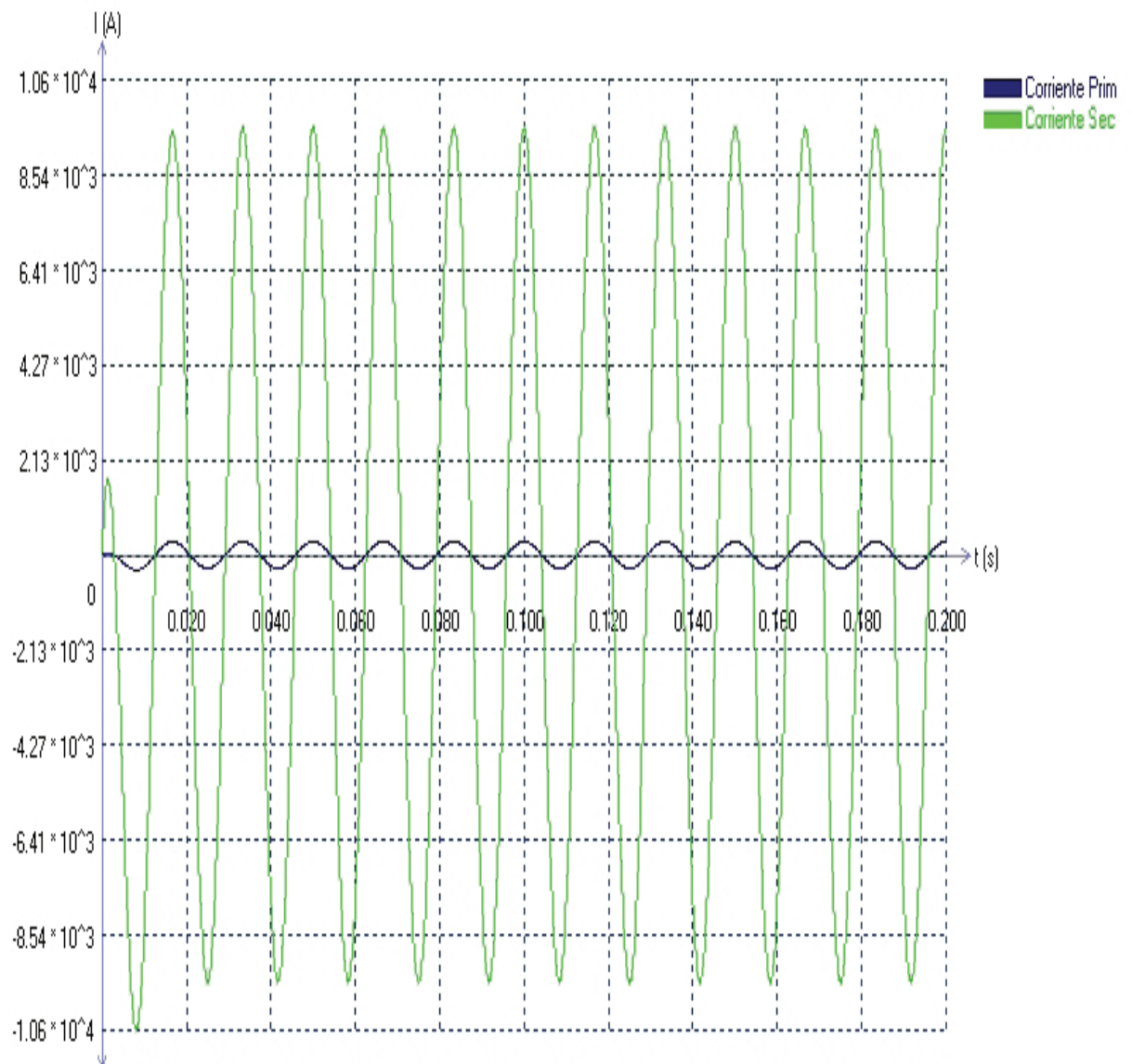


Reporte del Transformador:

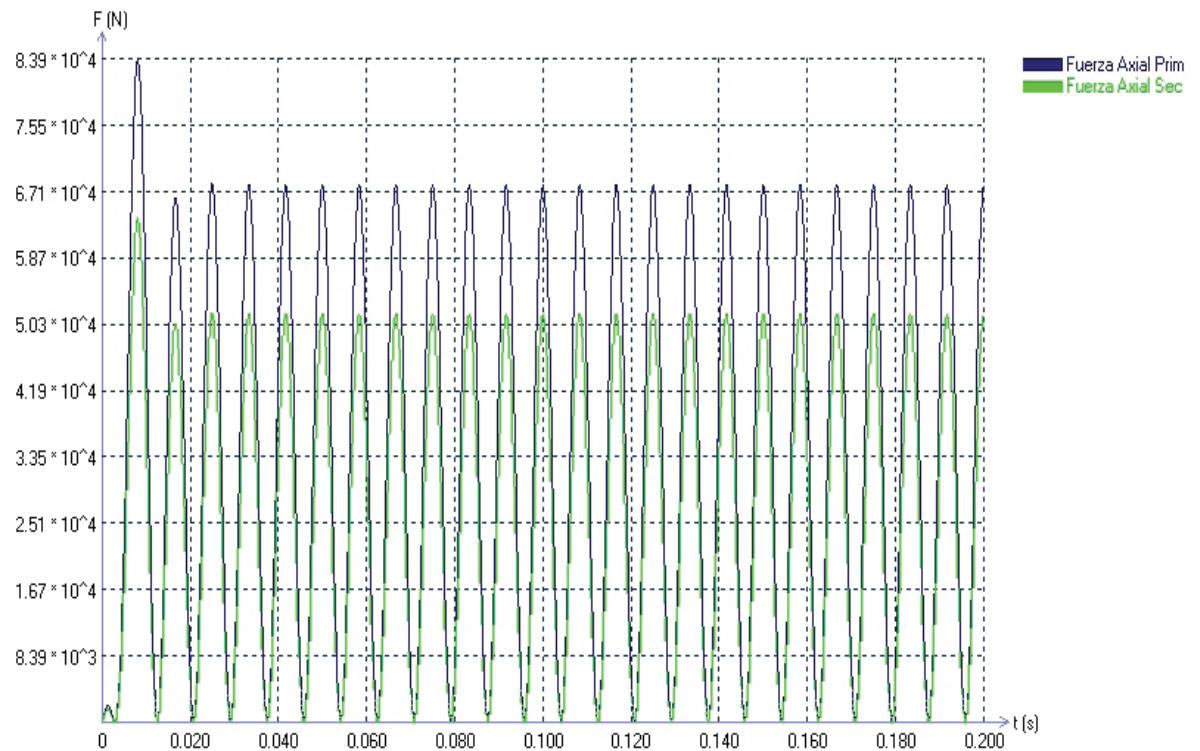
NUCLEO 37.5 7600/240

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	160 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	160 mm
Espesor del Devanado de Alta	160 mm	Espesor del Devanado de Baja	17,784 mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	7620 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	240 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	1334	Número de vueltas del Devanado de Baja	40
Potencia Aparente del Transformador	37,5 kVA,	Porcentaje de Impedancia de Corto-Circuito	2,298 %
Tipo de Transformador	NUCL	Perdidas de Corto-Circuito	497,85 W
Ancho de la Columna del Núcleo	76 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	183 mm
Ancho del Canal de Ventilación	3 mm	Angulo de Conexión	144,70 °
Distancia entre Calzos Primarios	532,268 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	399,195 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,45 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	14 mm	Ancho del conductor por el Secundario	2,8 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	11128,751 N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	8447,297 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	$4,71 * 10^4$ N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	$3,58 * 10^4$ N
Fuerza Axial Total	$3,07 * 10^8$ N	Angulo de Conexión	144,70 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$3,23 * 10^{18}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$7,66 * 10^{15}$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$2,14 * 10^7$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$2,33 * 10^7$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	214,154 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	6799,390 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	335,635 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	10656,426 A
Temperatura en el Devanado Primario	97,839 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	100,308 °C

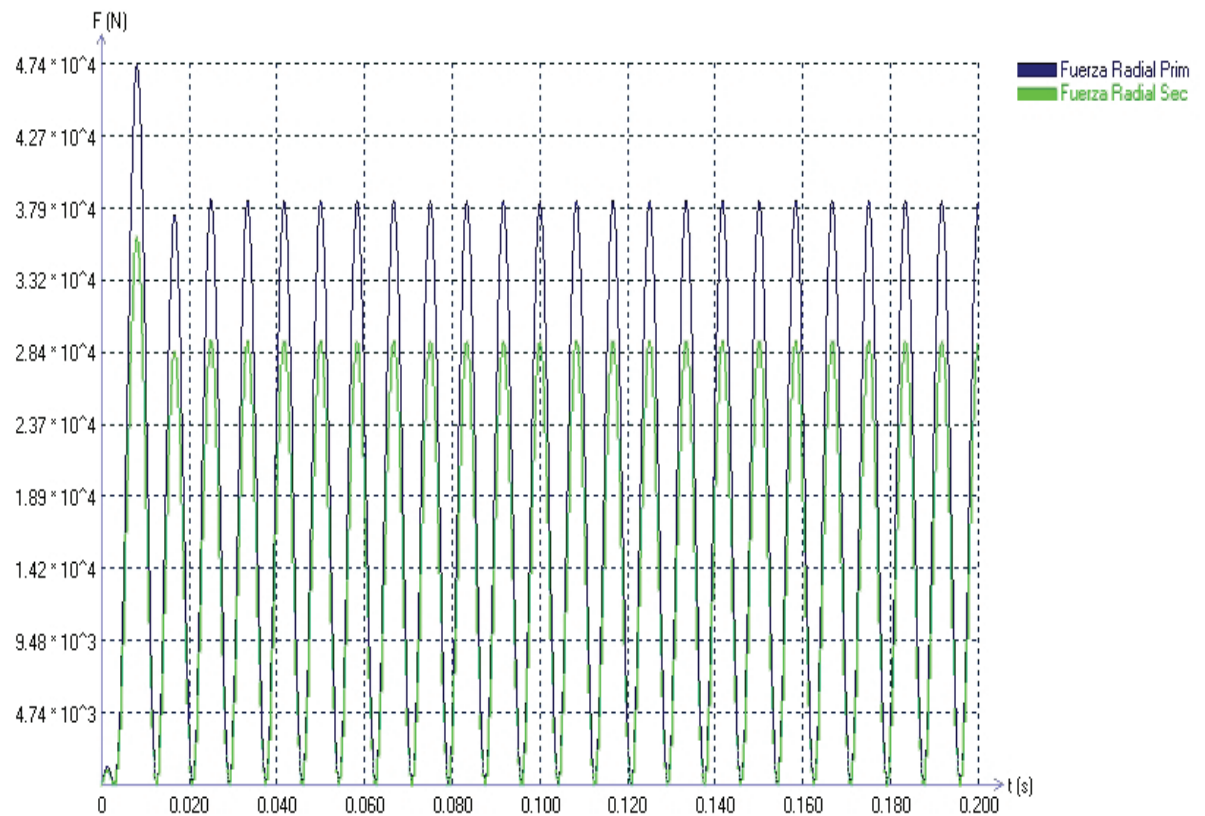
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:

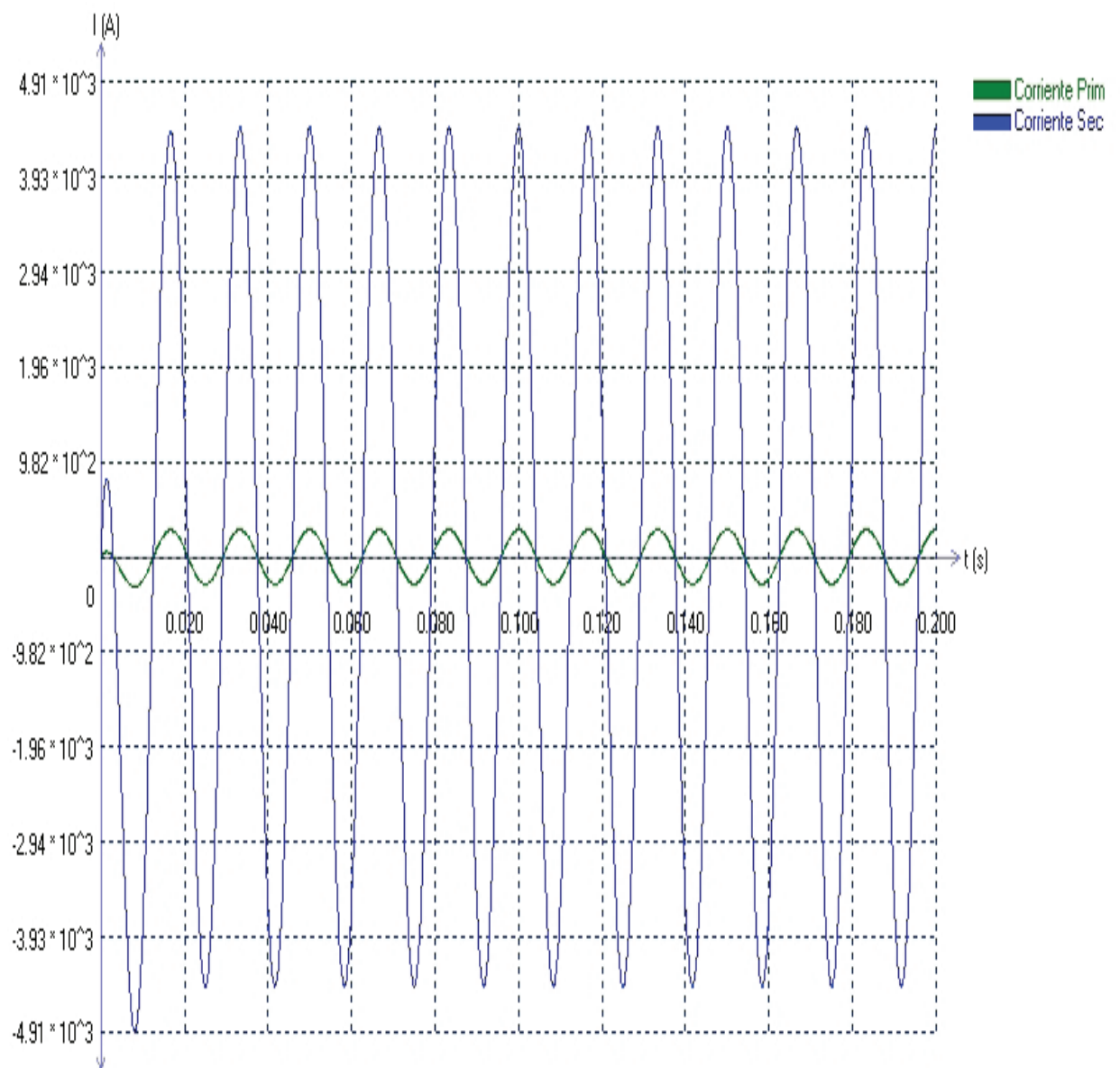


Reporte del Transformador:

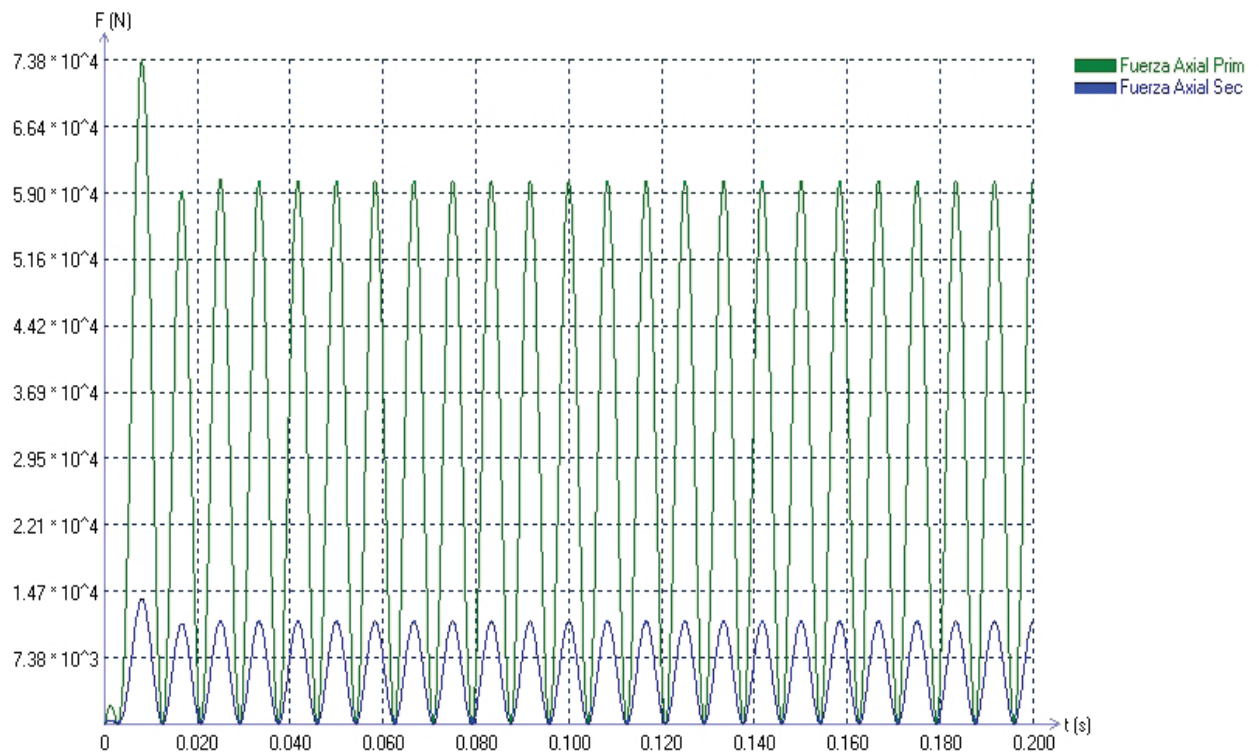
NUCLEO 37 7600/240

Característica	Valor	Característica	Valor
Altura de la bobina del Devanado de Alta	155 mm	Altura de la bobina del Devanado de Baja	155 mm
Espesor del Devanado de Alta	155 mm	Espesor del Devanado de Baja	17,64 mm
Tensión nominal por el Devanado Primario	7620 V	Tensión nominal por el Devanado Secundario	480 V
Número de vueltas del Devanado de Alta	1334	Número de vueltas del Devanado de Baja	40
Potencia Aparente del Transformador	37,5 KVA	Porcentaje de Impedancia de Corto-Circuito	2,486 %
Tipo de Transformador	NUCL	Perdidas de Corto-Circuito	547,29 W
Ancho de la Columna del Núcleo	76 mm	Profundidad del Núcleo, Ancho Cara Lateral	183 mm
Ancho del Canal de Ventilación	3 mm	Angulo de Conexión	144,05 °
Distancia entre Calzos Primarios	545,315 mm	Distancia entre Calzos Secundarios	398,291 mm
Diámetro del conductor por el Primario	1,45 mm	Temperatura Inicial	30 °C
Altura del conductor por el Secundario	11,2 mm	Ancho del conductor por el Secundario	2,8 mm
Característica	Valor	Característica	Valor
Fuerza Axial en el Devanado Primario	9792,561 N	Fuerza Axial en el Devanado Secundario	1842,084 N
Fuerza Radial en el Devanado Primario	$4,15 * 10^4$ N	Fuerza Radial en el Devanado Secundario	7810,233 N
Fuerza Axial Total	$2,75 * 10^8$ N	Angulo de Conexión	144,05 °
Esfuerzo Axial en el Devanado Primario	$3,08 * 10^{18}$ Pa	Esfuerzo Axial en el Devanado Secundario	$2,68 * 10^{15}$ Pa
Esfuerzo Radial en el Devanado Primario	$1,88 * 10^7$ Pa	Esfuerzo Radial en el Devanado Secundario	$6,35 * 10^6$ Pa
Corriente Simétrica en el Devanado Primario	197,958 A	Corriente Simétrica en el Devanado Secundario	3142,598 A
Corriente Máxima en el Devanado Primario	308,642 A	Corriente Máxima en el Devanado Secundario	4899,696 A
Temperatura en el Devanado Primario	97,785 °C	Temperatura en el Devanado Secundario	97,024 °C

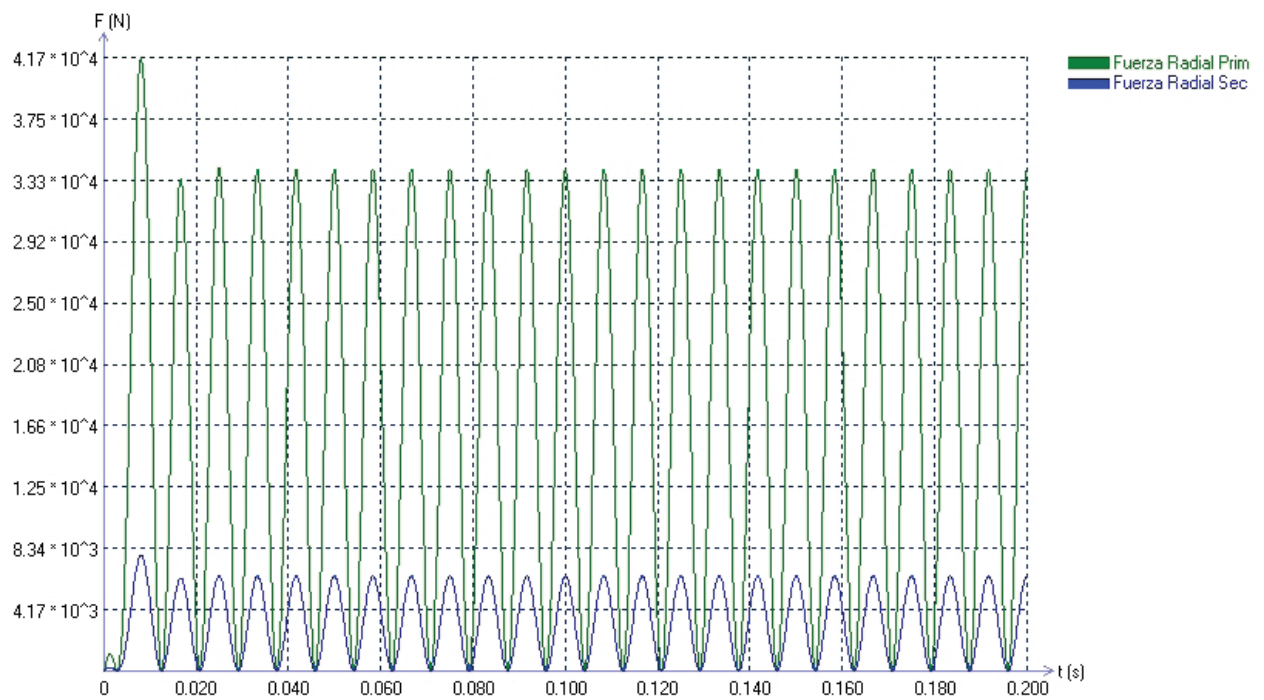
Gráfica de corriente de Cortocircuito:



Gráfica de Fuerzas Axiales:



Gráfica de Fuerzas Radiales:



GALERÍA DE IMÁGENES

FÁBRICA DE TRANSFORMADORES LATINOS









