

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año **1. Datos generales del Proyecto**

Código del proyecto: 2905			
Título del proyecto: <i>Sistema electrónico para calentamiento a baja frecuencia (low frequency heating) como coadyuvante en procesos de secado de transformadores eléctricos</i>			
Facultad o Instituto Académico: Facultad de Ingeniería			
Departamento o Escuela: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA) y Grupo de Investigación en Control Industrial (GICI)			
Entidades: Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad			
Palabras claves:			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Hernando Vásquez Palacios	5	5
Coinvestigadores	Diego Fernando García Gómez	5	5
Otros participantes	Andrés Mauricio Holguín Berrocal	20	20

2. Resumen ejecutivo:

En este proyecto se realizó el desarrollo, la construcción y la validación de un prototipo de sistema electrónico para coadyuvar en el secado de transformadores eléctricos por el método LFH (Low Frequency Heating). En este sistema LFH se incluyeron las funciones de mando, protección, regulación y monitoreo de las principales variables eléctricas y/o térmicas del transformador al cual se le aplicó el calentamiento controlado.

El prototipo de sistema electrónico construido se basó en un puente trifásico dual de

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

tiristores (cicloconvertidor), el cual se complementó con el adecuado diseño de las estructuras de control y regulación de las variables eléctricas y térmicas asociadas con el calentamiento del transformador bajo secado.

La validación del sistema diseñado se realizó sobre dos transformadores, de 15KVA, encontrando resultados muy positivos, que demostraron la validez de este sistema.

Abstract

In this project the development, construction and validation of an electronic system prototype was carried out to assist in the drying of electrical transformers by the LFH (Low Frequency Heating) method.

In this LFH system were included the functions of command, protection, regulation and monitoring of the main electrical and / or thermal variables of the transformer to which the controlled heating was applied.

The electronic system prototype built was based on a dual three-phase bridge of thyristors (cycloconverter), which was complemented with the adequate design of the control structures and regulation of the electrical and thermal variables associated with the heating of the transformer under drying.

The validation of the designed system was carried out on two transformers, of 15 KVA, finding very positive results, which demonstrated the validity of this system.

3. Síntesis del proyecto

Para contribuir a reducir el contenido de humedad en los aislamientos celulósicos de transformadores de mediana y alta potencia, es necesario someter al transformador a un secado artificial, en el cual, una de las formas de mejorar el aporte calórico al aislamiento celulósico del transformador durante el secado, es hacer circular corrientes por sus devanados. El calor generado por las pérdidas en los devanados del transformador es conducido a los aislamientos celulósicos en contacto con los conductores y por convección o radiación (dependiendo del método de secado) a los otros aislamientos celulósicos, favoreciendo así el secado de los mismos. Adicionalmente con esta técnica, el flujo de calor se produce en la misma dirección de la difusión de humedad.

Para lograr la circulación de corrientes por los devanados del transformador, estando este fuera de servicio (off-line), se suele aplicar tensión alterna en uno de sus devanados, mientras al menos otro de los devanados está en cortocircuito. Con ello circula corriente por el devanado alimentado y se inducen corrientes en los devanados en cortocircuito. Bajo estas condiciones la fuente empleada para el calentamiento ve al transformador como una impedancia predominantemente inductiva, definida por su impedancia de cortocircuito ($Z = R_{cc} + jX_{cc}$) donde la componente de mayor peso es la reactancia de cortocircuito ($X_{cc} = 2\pi f L_{cc}$),

la cual es función de la frecuencia de la señal de alimentación. La impedancia de cortocircuito define la tensión y potencia requeridas de la fuente para producir el calentamiento. En transformadores de potencia, la fuente requerida para hacer circular corrientes cuya magnitud garantice un calentamiento adecuado de los aislamientos sólidos, puede llegar a ser de considerable tamaño con lo cual pierde practicidad este método de calentamiento.

Una forma de reducir el tamaño de la fuente empleada para el calentamiento de transformadores de potencia durante el secado en campo es reduciendo la frecuencia de la señal de tensión aplicada, en lo que se conoce como *Calentamiento de Baja Frecuencia* o LFH por sus siglas en inglés (*Low Frequency Heating*), con lo cual se logra reducir la componente inductiva de la impedancia de cortocircuito, permitiendo que el sistema alimente una carga fundamentalmente resistiva. El LFH se constituye por tanto en un método coadyuvante en los diferentes tipos de secado convencionales que se utilizan para los transformadores.

En este proyecto se logró construir un prototipo de fuente LFH, que ha servido como precursor de una fuente LFH de tipo industrial, con la cual se espera mejorar los procesos de secado de transformadores de potencia en el país y con ello repercutir en menores costos de operación, mantenimiento e inversión; así como en un mayor índice de confiabilidad de las redes eléctricas del país.

Con la fabricación de este prototipo se logró la comprobación de la eficacia de este método, pues con él se pudo cuantificar la temperatura estimada a la cual se realizaba el proceso de secado, conduciendo por tanto este método, a la obtención de una forma de secado más efectiva y más segura.

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo general.

Diseñar, construir y poner en funcionamiento un prototipo electrónico hasta de 1kVA, para el calentamiento por el método LFH (*Low Frequency Heating*), de la parte activa de los transformadores eléctricos, como ayuda en los procesos de secado de sus aislamientos.

3.1.2 Objetivos específicos

- L Diseñar, construir y evaluar un sistema electrónico para el calentamiento en baja frecuencia (LFH), basado en un puente trifásico dual de tiristores conocido como cicloconvertidor, el cual servirá como actuador de potencia para el secado de transformadores.
- L Implementar en el sistema LFH las funciones de mando, medidas, módulos de prioridad y funciones de limitación, relacionados con los cambios de temperatura en el transformador bajo secado.
- L Implementar y validar, en el sistema LFH, las estrategias para el control y la

regulación de las variables eléctricas y térmicas del transformador bajo secado.

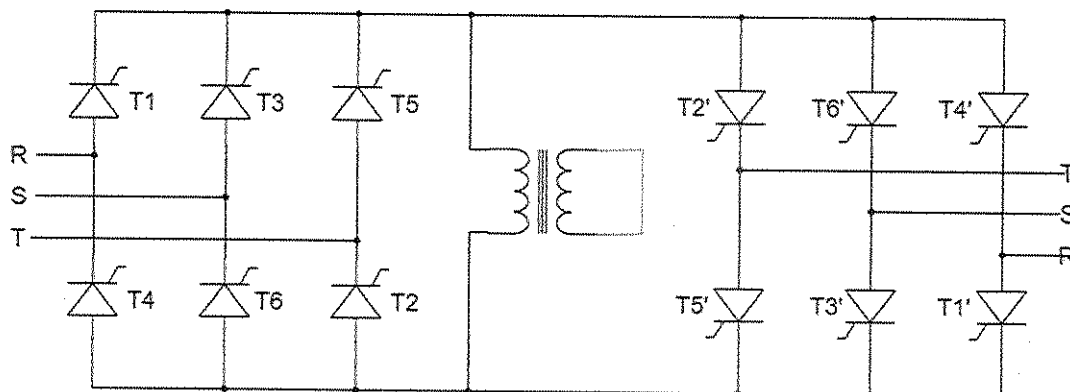
- L Evaluar el impacto del sistema electrónico LFH sobre la red eléctrica de alimentación (inyección de armónicos a la red).

3.1.3 Metodología

Este proyecto se basa en la realización de dos Trabajos de grado previos, donde se estudió el problema a solucionar y con base en simulaciones de los circuitos propuestos, se definió el camino a seguir para la construcción física de este equipo.

El sistema se basa en controlar apropiadamente un convertidor de potencia llamado cicloconvertidor, el cual está compuesto de 1 convertidor de dos vías (Two way converter) (Ver Fig. 1), que funciona de manera similar al rectificador trifásico controlado, con la diferencia de que el cicloconvertidor permite manipular la señal de salida en amplitud y en frecuencia, o sea que puede rectificar e invertir el voltaje y por consiguiente generar una salida alterna a partir de una entrada trifásica, sin necesidad de realizar una conversión AC/DC/AC.

Figura 1. Cicloconvertidor



Se revisó y se mejoró la simulación del circuito propuesto, a partir de esta simulación se especificaron los diferentes componentes eléctricos y electrónicos del circuito. Con esta base se procedió al diseño de los puentes controlados de rectificadores que conforman el circuito cicloconvertidor, y de los disipadores de calor que requiere el circuito de potencia, logrando el suministro adecuado de todas estas componentes para las necesidades planteadas.

Luego se procedió a diseñar y construir las tarjetas de disparo, para el comando controlado del cicloconvertidor.

Buscando garantizar la flexibilidad del sistema se decidió implementar las acciones de mando, control y protección de éste en una "tarjeta inteligente", la FPGA, o tarjeta de desarrollo de circuitos integrados de lógica programable CycloneV SOC Dev Kit 5CSEMA, la cual se adquirió con fondos del proyecto.

Sobre esta tarjeta se realizaron las siguientes funciones:

- Selección de la frecuencia y magnitud de la señal que debe entregar el cicloconvertidor al devanado a secar.
- Programación del algoritmo de control de corriente, que se encargará del manejo deseado del sistema.
- Selección de los puentes de tiristores que deben conducir el semiciclo correspondiente – positivo o negativo- de la señal de salida del conversor.
- Sincronización del programa de disparo de los tiristores con el voltaje de línea – línea V_{RS} .
- Generación de los pulsos de disparo de los dos puentes de tiristores.
- Evaluación en la señal de salida del cumplimiento de la frecuencia y magnitud especificadas.
- Medición instantánea de la corriente y el voltaje que se le aplican al devanado bajo secado.
- Evaluación periódica del proceso de calentamiento del devanado a secar, mediante el cálculo de la resistencia eléctrica del devanado [...].
- Estimación de la temperatura interna a la que está siendo sometido el devanado secundario del transformador.
- Evaluación permanente del funcionamiento del sistema, que permita la rápida desconexión del mismo, en caso de que se detecte una falla.
- Suministro de información sobre el estado actual del proceso, que permita definir posibles cambios en la señal de salida del sistema (frecuencia y magnitud de esta señal).

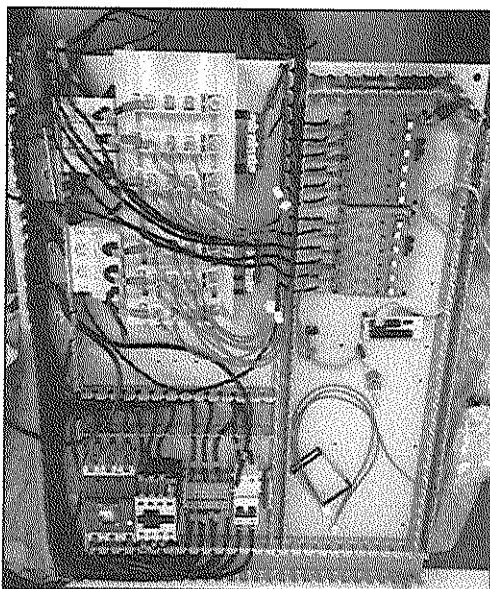
Una vez se probaron todas estas componentes se dio inicio al montaje, el cual se realizó en una caja metálica adecuada para este propósito, como se detalla a continuación.

4. Construcción y puesta en funcionamiento del equipo LFH

Enseguida se detalla el proceso de montaje del equipo diseñado

En la figura 2 se presenta la foto del equipo en proceso de construcción, en donde se pueden identificar los dos puentes de tiristores con sus tarjetas de disparo, así como los interruptores de potencia, necesarios para la alimentación en CA y la conexión a la carga en CC. Aquí aún faltaba conectar los sensores de corriente y voltaje, la tarjeta del sistema inteligente en la FPGA y la tarjeta de acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente que debe entregar el sistema.

Figura 2 Equipo en proceso constructivo



En la Figura 3 se presenta la vista del equipo ya construido y cableado, para dar inicio al proceso de pruebas del mismo. En esta figura se destaca la conexión de los siguientes elementos: 2 tarjetas de disparo; circuitos de medida del voltaje y la corriente de salida; puentes de tiristores, con sus fusibles de protección; 2 Tarjetas de disparo, para cada puente de tiristores; tarjetas de medida del voltaje y la corriente de salida; tarjeta de la FPGA, Terasic, modelo DE1-SoC; circuitos de filtrado y procesamiento de la corriente y el voltaje de la carga.

Con la instalación del equipo mostrada en la Figura 4, se dio inicio a la puesta en servicio del mismo, para lo cual fue necesario conectar la FPGA del equipo a un computador externo, lo cual se realizó a través de un conector I2C. También se observan las conexiones eléctricas, para la adecuada polarización de los diferentes elementos del sistema.

Figura 3. Equipo construido

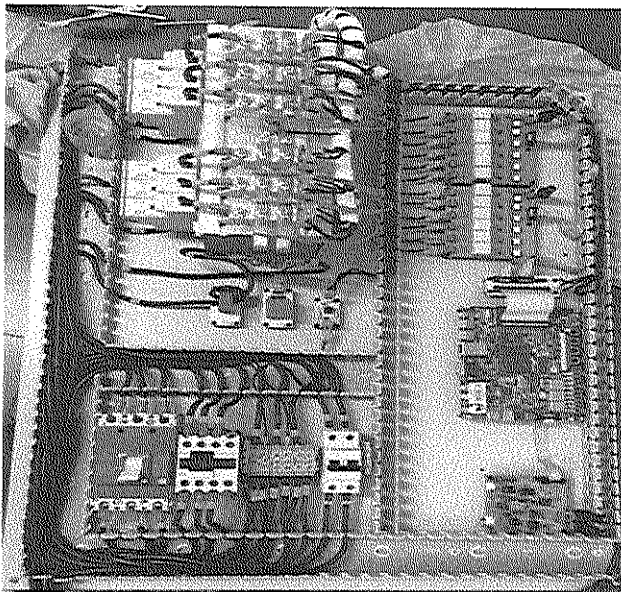
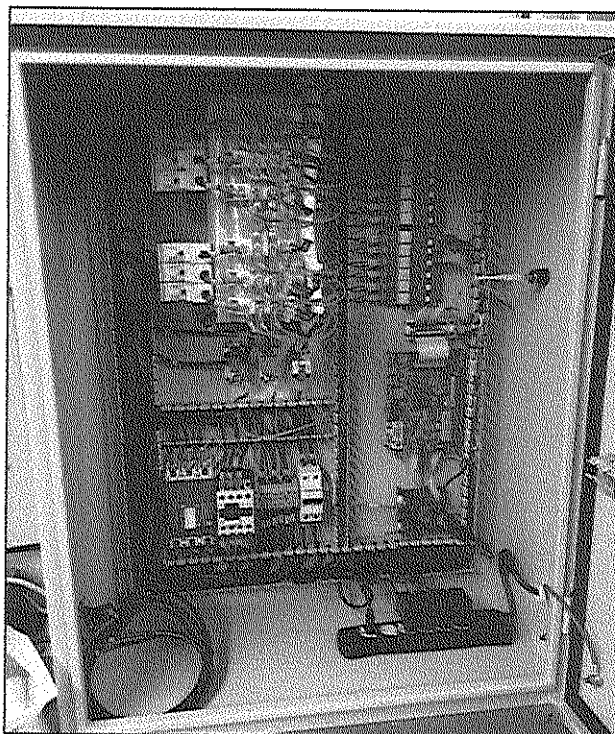


Figura 4. Equipo instalado y montado en su caja final



En la figura 5 se muestran los inicios del proceso de ajuste y puesta en servicio del equipo ya construido, para lo cual se destaca presencia del computador personal, el cual está conectado

en todo momento con el equipo LFH, pues a través de él se programa la FPGA, para su posterior puesta en servicio.

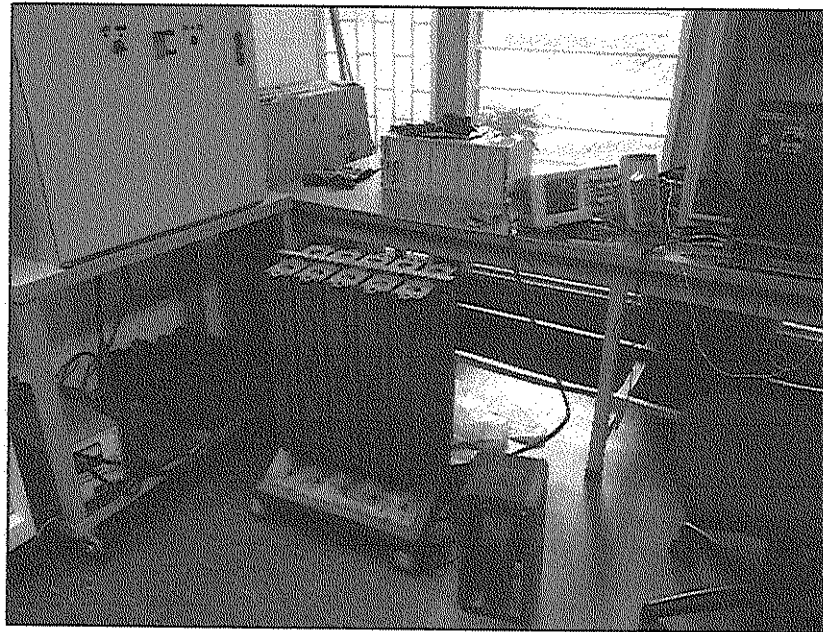
Una vez el equipo fue puesto en servicio, se dió inicio a las pruebas del mismo, para lo cual inicialmente se conectó a una carga RL, como se muestra en la figura 6. Con esta carga se trató de simular el efecto que le produciría el transformador que debe secarse.

Adicionalmente se logró con esta serie de pruebas comprobar el adecuado funcionamiento del equipo, en un rango de frecuencias entre 0,1 Hz y 5 Hz, lo cual supera el propósito inicial, dado que en la propuesta del proyecto se propuso un rango entre 1 Hz y 5 Hz.

Figura 5. Pruebas y puesta en servicio del equipo LFH



Figura 6. Equipo LFH conectado a una carga RL, con $R=30\ \Omega$ y $L=120\text{ Mh}$



Con estos resultados se conectó el equipo LFH a dos transformadores de 15 KVA y 30 kVA, 7620/240 V, de los cuales se conocían sus características eléctricas principales, gracias a pruebas eléctricas previas, realizadas por el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad.

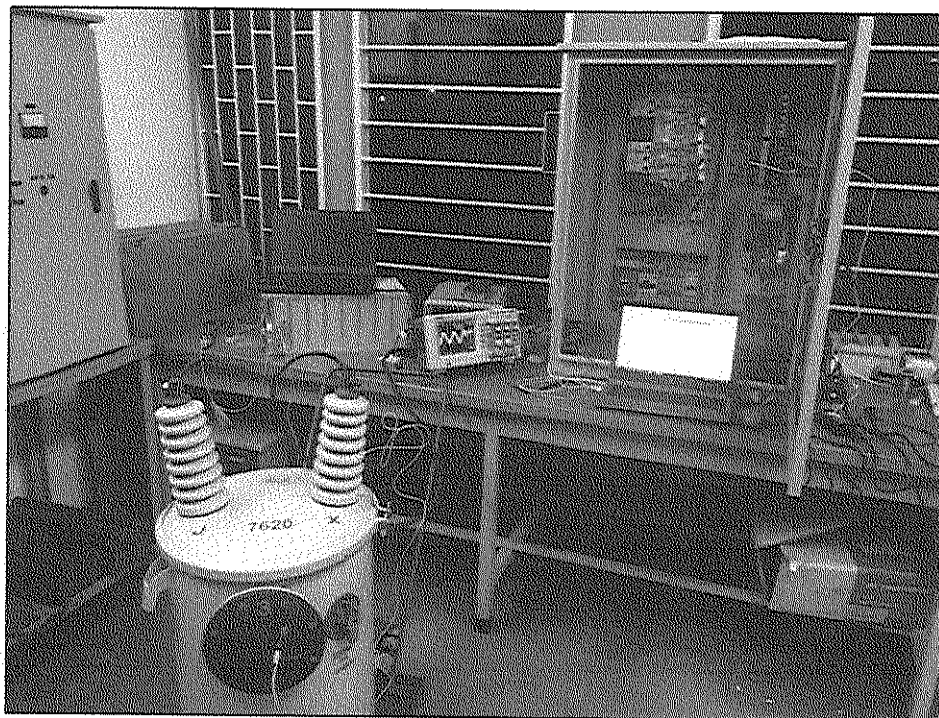
Adicionalmente estos transformadores tienen tres sensores de temperatura, que se conectan al equipo *Neoptix*, con el cual se miden en todo momento las temperaturas de los devanados primario y secundario del transformador bajo prueba y del núcleo del mismo, lo que permite tener una visión total del comportamiento del transformador bajo secado.

Este montaje se muestra en la Figura 7, en donde se observa que el equipo LFH alimenta el primario del transformador, mientras que el secundario del mismo ha sido cortocircuitado, lo que posibilita que por el secundario del transformador fluya la corriente nominal máxima, lo que a la larga ocasiona el calentamiento esperado de este devanado, produciendo por tanto la evacuación buscada de la humedad de estos devanados.

Con la ayuda del equipo *Neoptix*, se adquieren las señales enviadas por los tres sensores de temperatura, pudiendo por tanto comparar estas señales físicas con las calculadas a partir de la correcta medida del voltaje y la corriente de salida, así como el ángulo de desfase entre ellas.

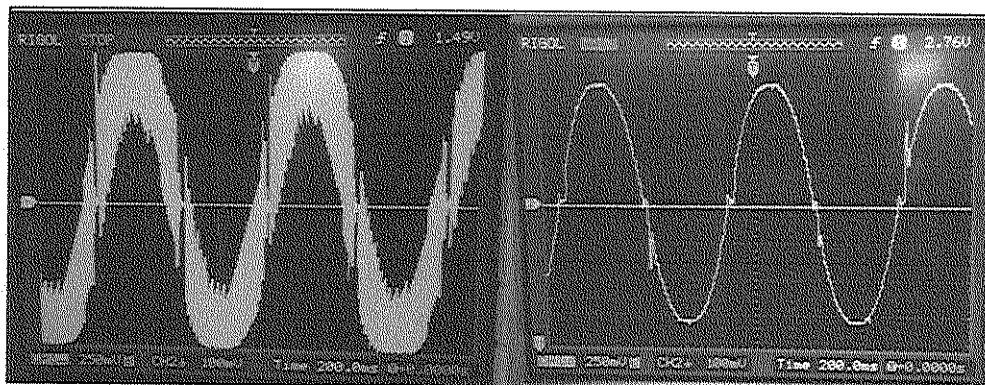
En la figura 7 se observan todos los componentes del sistema de prueba, donde se distinguen el equipo LFH, el computador personal, el equipo *Neoptix* de medición de temperaturas, y el transformador de 15 kVA. Adicionalmente, se observa en el osciloscopio la señal de corriente que se le está aplicando al transformador.

Figura 7. Equipo LFH conectado a un transformador de 15 kVA,



En la figura 8 se muestran las formas de onda del voltaje obtenidas con el sistema diseñado, a una frecuencia de 1 Hz; la figura 8.a muestra la tensión sin filtrar, cuyo valor de pico es 73.5 V; la figura 8.b muestra el voltaje después del filtro de cuarto orden, con lo cual se comprueba que la componente fundamental de esta señal es de 1 Hz, con un valor eficaz de aproximadamente 41.58 V.

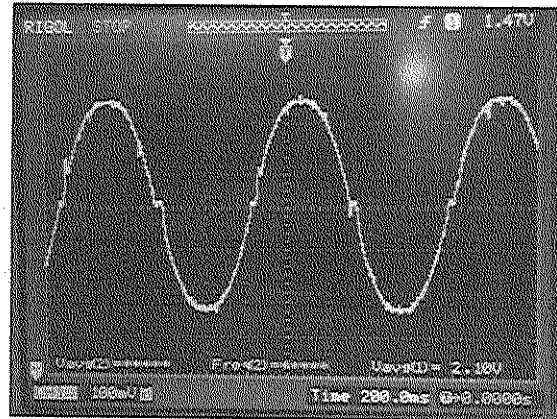
Figura 8. Formas de onda del voltaje aplicado al transformador bajo prueba, con $f = 1\text{ Hz}$, a) sin filtrar; b) filtrada



En la figura 9 se observa una fotografía de la señal de salida del sensor de corriente, también de efecto Hall compensado; de allí se observa que el transformador se encarga de gran parte del filtrado de esa señal, con lo que se puede concluir que la corriente que circula por el

primario es de 2.16 A y en el secundario es de aproximadamente 60 A.

Figura 9. Forma de onda de la corriente aplicada al transformador bajo prueba, con $f = 1\text{Hz}$



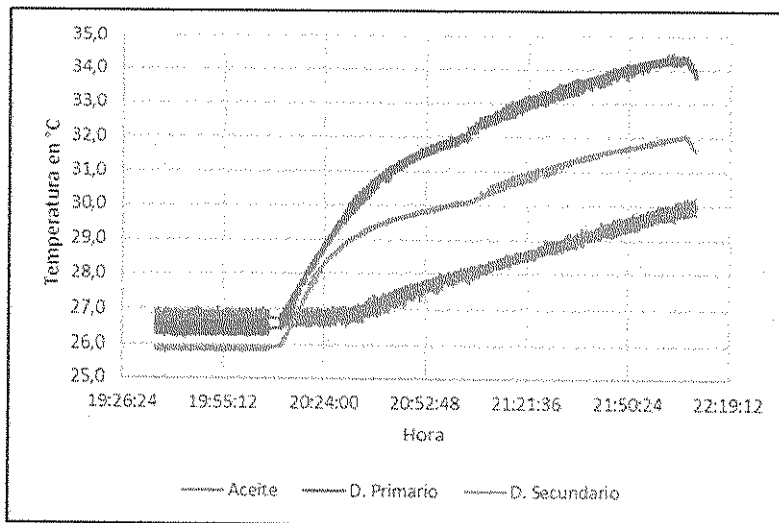
5. Resultados obtenidos

Una vez finalizó el proceso de pruebas y puesta en servicio, se dió inicio a las pruebas del equipo, obteniendo resultados notables, cumpliendo en su totalidad con los objetivos del proyecto.

Se logró el diseño y la construcción de un sistema electrónico de potencia que permite realizar el proceso de secado de los devanados de un transformador, de forma muy eficiente y con un presupuesto adaptado a la propuesta del proyecto.

Para comprobar el desempeño del equipo y evaluar los resultados, se realizó la conexión del mismo a dos transformadores monofásicos, uno de 15 kVA y el otro de 37.5 kVA ambos de 7620/240 V. En la figura 10 se muestra el desempeño del equipo conectado al primer transformador, al inicio de la prueba, observando que la temperatura interna en el transformador subió 9 grados, en un lapso de dos horas.

Figura 10. Captura de las temperaturas de un transformador de 15 kVA cuando está en reposo y se inicia la circulación de corriente de baja frecuencia

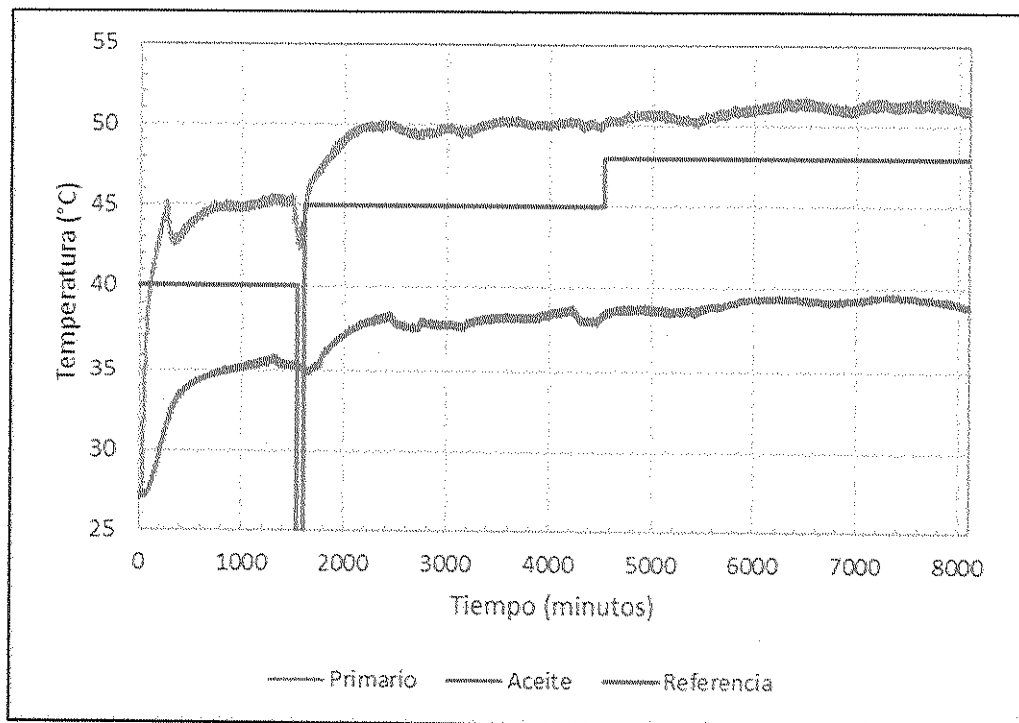


En la figura 11 se muestran los resultados del calentamiento del segundo transformador, en donde se resalta el buen desempeño del control de temperatura implementado. Se observa que el sistema responde muy bien a cambios en el valor de referencia de temperatura, aunque dado el carácter proporcional del controlador utilizado, y de la ubicación física de las sondas de temperatura al interior del transformador no se logra una coincidencia total de la respuesta con el valor solicitado.

Con base en las anteriores consideraciones se destacan los resultados que se detallan a continuación:

- En el sistema se logró la generación de señales de corriente de muy baja frecuencia (entre 0,1 Hz y 5Hz), con valores eficaces variables entre 0,5 A y 15 A, cumpliendo con un rango de frecuencias de prueba más amplio, que el especificado en el anteproyecto.

Figura 11. Gráfico de la temperatura registrada del transformador de 37.5 kVA durante una prueba de calentamiento.



- Con este sistema se demostró que se puede lograr la reducción del tiempo de mantenimiento del secado controlado de los devanados de un transformador, con relación a los métodos tradicionales que se vienen implementando en el país.
- La tecnología utilizada en este sistema representa una mejora considerable, con relación a otras tecnologías que se utilizaban hasta el momento con este propósito.
- El sistema diseñado garantiza una alta eficiencia, con una reducción apreciable en el tiempo en que el transformador va a estar fuera de operación, antes de volver a ser conectado a la red eléctrica.
- Se comprobó que el accionar del equipo introduce en el voltaje de alimentación del sistema una distorsión armónica total menor al 2%.
- Se destaca la evaluación del avance logrado en el secado, con el cálculo en tiempo real de los parámetros eléctricos internos del devanado, que permiten definir el porcentaje de secamiento alcanzado, lo que indica la finalización del proceso.

6. Impactos actual o potencial:

Desde el punto de vista académico, este trabajo de investigación se desarrolló con el soporte del Trabajo de Grado del estudiante Andrés Mauricio Holguín, que incluyó aspectos tales como simulación del equipo a construir, diseño de las principales componentes de este equipo, construcción del mismo y pruebas de funcionamiento. En todos estos aspectos el estudiante Holguín realizó un excelente trabajo.



Este proyecto sirvió de base para fortalecer la alta cooperación académica e investigativa, que desde hace un par de años mantiene el Grupo de Investigación en Alta Tensión, GRALTA, con la empresa *Transformadores de Colombia S. A., TRACOL S. A.*

Como fruto de esa cooperación TRACOL decidió presentarse, en compañía del *Centro de Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico (CIDET)*, de Medellín, a la convocatoria *Programa de financiación de proyectos de desarrollo tecnológico en el sector energético colombiano*, ofrecida por Colciencias y Ruta N, en el año 2017. En esta propuesta TRACOL incluyó como soporte técnico, a los grupos GRALTA y GICI de la Universidad del Valle.

Cumpliendo con este objetivo TRACOL y el CIDET, presentaron la propuesta:

- *Prototipo de sistema de calentamiento de baja frecuencia (LFH) para el mejoramiento del proceso de secado in situ, de transformadores de distribución y potencia,*

La cual fue favorecida como una de las cuatro propuestas que recibieron la financiación en el País. En este proyecto de investigación la Universidad del Valle participa como entidad aliada de TRACOL, para lo cual se firmó el convenio de asociación para actividades científicas y tecnológicas N° VRIN-OTRI 001 de 2017, que se encuentra en ejecución desde diciembre 11 del año 2017; las actividades que allí se realizan se basan en los resultados alcanzados en esta investigación.

Dados los excelentes resultados que se obtuvieron en este proyecto, se le solicitó a la Vicerrectoría de Investigaciones que evaluara la posibilidad de presentar estos resultados, para la obtención de una patente de desarrollo tecnológico.

7. Productos

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
						1		
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
· Prototipos y patentes								
· Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis	
Estudiantes de pregrado	1		1					
Semillero de Investigación								
Estudiantes de maestría								
Estudiantes de doctorado								



Joven investigador				
Productos de divulgación				
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Sexto Congreso nacional de Gestión Tecnológica y de la Innovación – COGESTEC 16 -18 de marzo 2019	1			
Propuesta de investigación				
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.	1			

Tabla No. 2. Detalle de productos

Para cada uno de los productos obtenidos y relacionados en la tabla anterior, indique la información solicitada para cada uno, anexando copia de las respectivas constancias. Como anexo a este formato encontrará el instructivo para instructivo para la revisión de informes finales y productos

Tipo de producto:	Tesis de Pregrado
Nombre General:	Trabajo de Grado
Nombre Particular:	Implementación y validación de un prototipo de calentamiento a baja frecuencia para transformadores eléctricos.
Ciudad y fechas:	Cali, junio de 2019.
Participantes:	Andrés Felipe Holguín, Cód. 201224996
Sitio de información:	Biblioteca Central
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión, GRALTA Grupo de Investigación en Control Industrial, GICI

La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:



VICERRECTORIA DE INVESTIGACIONES

**ELABORACIÓN DE INFORMES
FINALES - PROYECTOS DE
INVESTIGACIÓN**

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

*Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11,
con espacios de 1 1/2*