

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

Código del proyecto: 2857			
Título del proyecto: Validación experimental de un modelo multifísico de difusión de Humedad-temperatura para estimación de la dinámica de humedad en el aislamiento Celulósico de los transformadores de potencia.			
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) – Universidad del Valle. Grupo de Investigación en Control Industrial (GICI) – Universidad del Valle. Grupo de Investigación en Materiales Aislantes y Diagnóstico (DIAMAT) – Universidad Carlos III de Madrid.			
Entidades: Universidad del Valle y Universidad Carlos III de Madrid.			
Palabras claves: Transformadores, humedad, evaluación de vida útil, diagnóstico de aislamiento, monitoreo on-line.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Diego Fernando García Gómez	5	5
Coinvestigadores	Édison Franco Mejía	2	2
	Alexander Céspedes Fernández	10	10
	María Belén García de Burgos	2	2
	Wilver Correa Bravo	20	20
Otros participantes	Saul Giovanni Pinzón Delgado	-	-
	Mauricio Fernando Castro Grijalba	-	-
	Juan David Zorrilla Henao	-	-

2. Resumen ejecutivo:

El aumento continuo de la demanda conlleva condiciones más exigentes para el transformador durante su funcionamiento, volviendo más importante garantizar entornos adecuados para la operación del mismo, con el fin de reducir el número de fallas y de las intervenciones y duración

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.

del mantenimiento. Esto implica un monitoreo continuo de su condición, en el caso de los transformadores sumergidos en aceite, es de gran importancia mantener el conocimiento de la cantidad de humedad que posee el aislamiento (aceite y celulosa), ya que ésta degrada las propiedades del mismo.

Con el objetivo de monitorear de forma continua el comportamiento de la humedad en la celulosa, se ha desarrollado un modelo multifísico de humedad-temperatura que permite conocer estos dos parámetros sin involucrar mediciones o procedimientos que requieran la desconexión del equipo, sin embargo, este modelo no ha sido validado experimentalmente.

En el presente proyecto, se implementó el modelo anterior con ayuda de los software Matlab® y COMSOL Multiphysics® para comparar sus resultados con los obtenidos por medio de un experimento. Para la ejecución de este experimento, se desarrolló una Planta de Emulación Térmica de Transformadores – PETT, que permitió reproducir los perfiles de temperatura presentes en un transformador en operación, facilitando a su vez la medición de la humedad contenida en muestras de papel Kraft que eran objeto del estudio.

Como resultado se encontraron algunos errores entre el modelo y el experimento, debido algunas simplificaciones realizadas en la definición del modelo que pueden ser corregidas, para esto se proponen algunas mejoras que requieren estudios futuros.

Como conclusiones, la PETT logró reproducir el comportamiento térmico de un transformador en servicio, facilitando la ejecución de las mediciones de humedad en el papel que permitieron encontrar falencias en el modelo que era validado, sin embargo, esto sirvió para elaborar propuestas encaminadas a mejorar su desempeño.

Para estimar la humedad en el papel fue necesario desarrollar un método indirecto de medición a partir de la respuesta dieléctrica del papel, este demostró tener un buen desempeño al compararlo con el método de titulación por Karl Fisher.

Paralelamente se desarrolló una herramienta de cálculo que permite estimar el grado de polimerización del papel, el cual es una indicación del envejecimiento que ha sufrido, a partir de su humedad y temperatura de operación, sin embargo al comparar el resultado obtenido con mediciones, se presenta un error que es derivado de la estimación de la humedad del modelo multifísico, ya que este último aún requiere mejoras.

Abstract

The continuous rise of the demand creates much more challenging conditions for the transformer during its operation, making it much more relevant to guarantee an adequate environment for the transformer to work properly and for malfunctions, intervention and maintenance to be minimal. This implies continuous monitoring. In the case of oil immersed transformers, it is very important to know the quantity of humidity of the insulation (oil and cellulose), because it deteriorates its properties.

With the objective of monitoring continuously the behavior of the humidity in the cellulose, a temperature-humidity multi-physic model has been developed which allows us to know these parameters without involving measurements or procedures that might require disconnecting the equipment, nonetheless, this model has not been validated experimentally.

In the present project, the previous model was implemented using Matlab® and COMSOL Multiphysics® software to compare their results with those obtained through an experiment. For the execution of this experiment, a Thermal Emulation Plant of Transformers - PETT was developed, which allowed to reproduce the temperature profiles present in a transformer in operation, facilitating the measurement of the humidity contained in samples of Kraft paper that were object of the study.

As a result, some errors were found between the model and the data obtained in the experiment, due to some simplifications made in the definition of the model that can be corrected, for this reason, some improvements are proposed which will require future studies.

As conclusions, the PETT managed to reproduce the thermal behavior of a transformer in service, facilitating the execution of moisture measurements in the paper that allowed to find flaws in the model that was validated, however, this served to elaborate proposals aimed at improving its performance.

To estimate the moisture in the paper it was necessary to develop an indirect method of measurement based on the paper dielectric response, this proved to have a good performance when compared to the titration method by Karl Fisher.

At the same time, a calculation tool was developed to estimate the polymerization degree of the paper, which is an indication of the aging it has suffered, from its humidity and temperature of operation, however, when comparing the result obtained with measurements, it is presented an error that is derived from the estimation of the moisture of the multiphysical model, since the latter still requires improvements.

3. Síntesis del proyecto:

Tema

El transformador de potencia es uno de los activos más costosos que se utiliza en el proceso de transmisión de la energía eléctrica, adicionalmente la falla en su operación genera consecuencias muy graves para la continuidad del suministro eléctrico.

Las principales causas de falla en el transformador están estrechamente relacionadas con el deterioro natural de su aislamiento celulósico (papel), lo que reduce su capacidad para resistir esfuerzos eléctricos y mecánicos. Esta degradación está asociada a tres factores; la humedad alojada en aislamiento (hidrólisis), la temperatura de operación de los devanados (pirolisis) y la oxidación. Los dos primeros factores son los que afectan en mayor medida al papel, por lo tanto son de gran interés para la comunidad científica.

Determinar la temperatura de trabajo interna del transformador para conocer la temperatura a la que se encuentra expuesto el papel puede realizarse por medio de diferentes modelos que se encuentran en la literatura y en normas internacionales como la IEEE C57.91 – 2011.

Por otra parte, la estimación del contenido de humedad en los aislamientos sólidos del transformador puede realizarse de forma directa o por métodos indirectos. Sin embargo, estos métodos implican: la desconexión del transformador que representa grandes costos económicos asociados al descargo de este activo del sistema de potencia, no permiten el monitoreo continuo en línea del transformador y además son poco precisos ya que no consideran las condiciones de no equilibrio termodinámico que se presentan durante la operación del transformador.

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

Debido a lo anterior, se hace necesario desarrollar e implementar modelos que permitan estimar con mayor precisión la humedad en el aislamiento de los transformadores de potencia durante su operación. Como resultado de esta búsqueda, R. Villarroel propuso en su trabajo de doctorado, un modelo multifísico de humedad-temperatura, que permite conocer estos dos parámetros al interior del transformador mientras este está en funcionamiento, sin embargo este modelo no había sido validado hasta el momento de forma experimental.

Por medio del presente proyecto, fue posible realizar esta validación que permitió identificar algunas mejoras que se pueden aplicar al modelo para ajustar más su respuesta a las condiciones normales de operación de un transformador.

Objetivo General:

Validar experimentalmente un modelo multifísico de difusión de humedad y temperatura para la estimación dinámica de humedad en el aislamiento celulósico de los transformadores de potencia.

Objetivos Específicos:

- Implementar el modelo multifísico de humedad-temperatura usando las herramientas Matlab y Comsol.
- Realizar el diseño, implementación y puesta en marcha de una planta experimental para emular la operación termodinámica de un transformador de potencia.
- Evaluar el desempeño del modelo multifísico de estimación de la dinámica de humedad en los aislamientos celulósicos para distintas condiciones de operación del transformador.
- Emplear los resultados de la planta experimental para ajustar el modelo multifísico de humedad-temperatura.
- Estimar a partir de los resultados del modelo multifísico la pérdida de vida útil de los aislamientos y contrastar esta pérdida de vida con medición del grado de polimerización de los especímenes de aislamiento probados en la planta experimental.

Metodología

La metodología planteada para este proyecto inició con una revisión bibliográfica asociada a la temática de investigación, con el fin de presentar casos de estudios similares a nivel mundial y las diferentes técnicas utilizadas en la solución de este tipo de problemas.

A partir de esta información y el estudio detallado del modelo multifísico de difusión de humedad-temperatura, se utilizaron las herramientas de software Matlab® y COMSOL Multiphysics® para implementar el modelo que sería validado.

Paralelamente, fueron determinadas las especificaciones técnicas para el diseño, implementación y puesta en servicio de una planta experimental que permitió reproducir la temperatura de operación de un transformador, con cierto grado de automatización para facilitar el óptimo funcionamiento del equipo por largos periodos.

De forma simultánea, se desarrolló un procedimiento para la preparación de las muestras que fueron sometidas al experimento y para la ejecución del mismo, junto con una metodología para estimar la humedad contenida en el papel a partir de mediciones de la respuesta dieléctrica del aislamiento, que sirvió de referencia para la validación del modelo multifísico.

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

Finalmente, a partir de los resultados entregados por el modelo, se realizó una estimación de la pérdida de vida útil en el aislamiento celulósico del transformador, el cual se comparó con la degradación de una muestra del papel sometida al experimento.

Resultados obtenidos

Modelo multifísico de difusión de humedad-temperatura implementado en los software Matlab® y COMSOL Multiphysics®.

Planta de Emulación Térmica de Transformadores – PETT, construida y puesta en marcha.

Procedimiento experimental para la validación del modelo multifísico de humedad-temperatura.

Método para la estimación de la humedad en papel Kraft a partir de la medición de espectroscopia dieléctrica en la frecuencia (FDS) combinada con la medición de corrientes de polarización y des-polarización (PDC).

Validación del modelo multifísico de humedad – temperatura, junto con una propuesta de ajuste.

Herramienta de cálculo que permite la estimación de la vida útil remanente que tienen los aislamientos celulósicos a partir de su temperatura y humedad de operación – Diagnóstico de Vida DP.

Productos de divulgación; 2 artículos sometidos en revistas A1 y A2, 1 ponencia internacional, 1 ponencia nacional.

Productos de formación; 2 trabajos de pregrado sustentados, un trabajo de maestría presentado a evaluación.

Principales conclusiones y/o recomendaciones

Teniendo en cuenta el comportamiento de la humedad y la temperatura obtenidas en el experimento, se puede decir que la PETT es capaz de reproducir el perfil de temperatura del devanado y como consecuencia de esto, induce la distribución de humedad en la celulosa, siempre y cuando no se presenten perturbaciones en el suministro de energía que afecten la generación de calor por largos periodos.

Durante el desarrollo del método para la estimación de la humedad en papel Kraft a partir de la medición de FDS, se usaron metodologías distintas a las típicas para obtener la humedad de la celulosa cuando se utiliza la medición de FDS. En este proyecto se buscó eliminar el inconveniente de la geometría utilizando el valor del $\tan(\delta)$, y se aplicó el uso del área bajo la curva formada por este parámetro en función de la frecuencia, después de corregir la medición a una temperatura de referencia. Esta metodología resultó satisfactoria al momento de compararla con los resultados obtenidos por medio de titulación de Karl Fisher y curvas de equilibrio.

Se presentaron ciertas diferencias entre el valor de la concentración de humedad en la celulosa obtenido por medio de mediciones en el experimento y el encontrado a través del modelo que se deseaba validar. Estas diferencias se atribuyeron a simplificaciones que se realizaron en la concepción del modelo, como la designación de la temperatura de operación del papel o la omisión de algunas fuentes de humedad, sin embargo estas pueden corregirse para mejorar el desempeño del modelo.

Es recomendable realizar un estudio futuro que permita ajustar el modelo según las mejoras recomendadas, para esto se debe agregar al procedimiento experimental una revisión de la sensibilidad del modelo frente a los diferentes agentes que intervienen en la dinámica de la humedad, como son el aporte de otras fuentes de humedad, la interacción de otros tipos de aislamientos celulósicos, el efecto del envejecimiento en las concentraciones de equilibrio, el efecto de la histéresis.

Cuando se comparó la medición del grado de polimerización de una muestra del papel sometida al experimento contra el resultado entregado por la herramienta Diagnóstico de Vida DP, se presentó un error del 1,9%, lo que demuestra un buen desempeño de la herramienta. Esta pequeña diferencia puede atribuirse al propio error del método de medición.

4. Impactos actual o potencial:

Ámbito Académico:

Impacto	Plazo	Descripción
Formación de recursos humanos en investigación	Corto plazo (1-4 años)	2 trabajos de pregrado y 1 de maestría finalizados
Fortalecimiento del grupo de investigación con nuevo software de simulación	Corto y mediano plazo (1-9 años)	Adquisición de licencia de software para simulación por medio del método de elementos finitos.
Fortalecimiento del grupo de investigación con una planta experimental nueva	Corto y mediano plazo (1-9 años)	Planta experimental que permite emular el comportamiento térmico de un transformador. Planta de Emulación Térmica de Transformadores – PETT

Ámbito Investigativo:

Impacto	Plazo	Descripción
Divulgación de los resultados en revistas especializadas	Corto plazo (1-4 años)	Un artículo sometido a evaluación en revista A1 y otro en revista A2.
Divulgación de los resultados en eventos	Corto plazo (1-4 años)	Participación con una ponencia oral en un evento nacional. Participación con una ponencia oral en un evento internacional. Participación con un poster en un evento institucional.
Implementación de Redes de información y colaboración científico-tecnológica	Corto plazo (1-4 años)	Participación de un docente como asesor externo. Estancia del estudiante de doctorado en la Universidad Carlos Tercero de Madrid.

Desarrollos Futuros:

Impacto	Plazo	Descripción
Financiación de proyectos de investigación	Corto plazo (1-4 años)	Continuación de la línea de investigación por medio de un proyecto con recursos externos (COLCIENCIAS)

5. 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: (sometido según términos de la convocatoria)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
	2		0	0	2		0	0
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
	0	0	0	0	0	0	0	0
Libros de autor que publiquen resultados de investigación	0				0			
Capítulos en libros que publican resultados de investigación	0				0			
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados	0				0			
☐ Prototipos y patentes	0				0			
☐ Software	0				0			
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial	0				0			
Normas basadas en resultados de investigación	0				0			
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis	
Estudiantes de pregrado	2		2		3		2	
Semillero de Investigación	1		1		2		1	
Estudiantes de maestría	1		1		1		1	
Estudiantes de doctorado	1		0		1		0	
Joven investigador	0		0		0		0	
Productos de divulgación								

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Publicaciones en revistas no indexadas	0		0	
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
	1	1	1	1
Presentación de resultados en eventos de orden institucional	1		1	
Propuesta de investigación				
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.	1		1	

Tabla No. 2. Detalle de productos

Tipo de producto:	Artículo en revista ISI-SCOPUS: (sometido según términos de la convocatoria)
Nombre General:	Revista Ingeniería Energética.
Nombre Particular:	Artículo Emulación del comportamiento térmico de un transformador de potencia.
Ciudad y fechas:	Fecha del envío del artículo 18/09/2017
Participantes:	Wilver Correa Bravo, Alexander Céspedes Fernández, Diego Fernando García Gómez.
Sitio de información:	Publicación digital en la página web de la biblioteca SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_serial&pid=1815-5901
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Artículo en revista ISI-SCOPUS: (sometido según términos de la convocatoria)
Nombre General:	Revista Información Tecnológica.
Nombre Particular:	Artículo Evaluación de modelos térmicos para determinar la temperatura del punto caliente en los transformadores de distribución

Ciudad y fechas:	Fecha del envío del artículo (Pendiente de pago, se anexa solicitud de compra)
Participantes:	Daniel Fernando Martínez Quintero, Alexander Céspedes Fernández, Diego Fernando García Gómez.
Sitio de información:	Publicación digital en la página web de la biblioteca SciELO: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_issues&pid=0718-0764&lng=es&nrm=iso
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Formación de recursos humanos.
Nombre General:	Vinculación de estudiantes de pregrado.
Nombre Particular:	Estudiantes de pregrado: Saul Giovanni Pinzón Delgado (semillero de investigación), Mauricio Fernando Castro Grijalba, Juan David Zorrilla Henao (semillero de investigación)
Ciudad y fechas:	Cali, 01/09/2015
Participantes:	Diego Fernando García, Alexander Céspedes Fernández.
Sitio de información:	Acta de propiedad intelectual.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Formación de recursos humanos.
Nombre General:	Trabajo de grado pregrado.
Nombre Particular:	Estudiante de pregrado Mauricio Fernando Castro Grijalba
Ciudad y fechas:	Cali, 06/09/2016
Participantes:	Diego Fernando García, Alexander Céspedes Fernández.
Sitio de información:	Acta de sustentación, dirección del programa académico de Ingeniería Eléctrica.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Formación de recursos humanos.
Nombre General:	Trabajo de grado pregrado.
Nombre Particular:	Estudiante de pregrado Juan David Zorrilla Henao (estudiante vinculado al semillero de investigación)
Ciudad y fechas:	Cali, 26/04/2017
Participantes:	Diego Fernando García, Alexander Céspedes Fernández.
Sitio de información:	Acta de sustentación, dirección del programa académico de Ingeniería Eléctrica.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Formación de recursos humanos.
Nombre General:	Vinculación de estudiante de maestría.
Nombre Particular:	Estudiantes de maestría Wilver Correa Bravo.
Ciudad y fechas:	Cali, 01/09/2016
Participantes:	Diego Fernando García, Alexander Céspedes Fernández.
Sitio de información:	Modificación acta de propiedad intelectual.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Formación de recursos humanos.
Nombre General:	Trabajo de grado Maestría
Nombre Particular:	Estudiante de maestría Wilver Correa Bravo.
Ciudad y fechas:	Cali, (Pendiente por sustentación, se anexa remisión del informe final del trabajo de maestría al comité de posgrado)
Participantes:	Diego Fernando García, Alexander Céspedes Fernández.

Sitio de información:	Dirección del programa académico de Posgrado de Maestría en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Eléctrica.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Formación de recursos humanos.
Nombre General:	Vinculación de estudiante de doctorado.
Nombre Particular:	Estudiantes de doctorado Alexander Céspedes Fernández
Ciudad y fechas:	Cali, 01/07/2015
Participantes:	Diego Fernando García.
Sitio de información:	Acta de propiedad intelectual.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Productos de divulgación
Nombre General:	Conferencia International Conference on Dielectrics (ICD2016) (del 3 al 7 de julio del 2016).
Nombre Particular:	Artículo Modelling the dielectric response of a water-in-solid insulation sensor for power transformer monitoring
Ciudad y fechas:	Fecha de presentación 06/07/2016
Participantes:	Alexander Céspedes Fernández, Diego Fernando García Gómez, María Belén García de Burgos
Sitio de información:	Publicación digital en la página web de la base de datos IEEE Explore: http://ieeexplore.ieee.org/document/7547765/
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA, Grupo de Investigación en Materiales Aislantes y Diagnóstico – DIAMAT.

Tipo de producto:	Productos de divulgación
Nombre General:	Conferencia IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC) (del 18 al 20 de octubre del 2017).

Nombre Particular:	Artículo Temperature Control Experimental Plant for Moisture Model Assessment in Power Transformers
Ciudad y fechas:	Fecha de presentación 19/10/2017
Participantes:	Wilver Correa Bravo, Alexander Céspedes Fernández, Diego Fernando García Gómez
Sitio de información:	Publicación digital en la página web de la base de datos IEEE Explore: http://ieeexplore.ieee.org.bd.univalle.edu.co/document/8276415/
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Productos de divulgación
Nombre General:	Evento institucional: XVII Jornada Regional de Electrónica
Nombre Particular:	Poster Planta experimental para la emulación del comportamiento térmico de transformadores de potencia
Ciudad y fechas:	Cali, Fecha de presentación 2 y 3 de junio del 2017
Participantes:	Wilver Correa Bravo, Alexander Céspedes Fernández, Diego Fernando García Gómez
Sitio de información:	No aplica
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA

Tipo de producto:	Propuesta de investigación
Nombre General:	Convocatoria 745-2016 "CONVOCATORIA PARA PROYECTOS DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN Y SU CONTRIBUCIÓN A LOS RETOS DE PAÍS – 2016 "
Nombre Particular:	Sistema de monitoreo en línea para la estimación de la vida útil de transformadores de potencia.
Ciudad y fechas:	Bogotá, 07/03/2016
Participantes:	Diego Fernando García Gómez, Diego Fernando Echeverry Ibarra, Belén García de Burgos, Alexander Céspedes Fernández, Oscar Darío Bautista, Daniel Martínez Quintero, Mauricio Fernando Castro Grijalba.



Sitio de información:	Vicerrectoría de investigaciones.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA, Grupo de Investigación en Materiales Aislantes y Diagnóstico – DIAMAT.

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

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