

## Experiencias en la repotenciación de transformadores de potencia

### Repowering of power transformers- experiences

Jaime Andrés Padilla<sup>1</sup>, Héctor Cadavid<sup>1\*</sup>, César Rincón<sup>2</sup>, Juan Castro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA. Universidad del Valle, Cali, Colombia, Calle 13 No 100-00 Edificio 356

<sup>2</sup>Industrias Explorer. Avenida las Américas N.º 20-60, Duitama, Colombia

<sup>3</sup>Grupo de Investigación Grids E, Ingeniería Electromecánica Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Avenida Central del Norte. Tunja, Boyacá, Colombia

(Recibido el 18 de abril de 2010. Aceptado el 25 de abril de 2011)

#### Resumen

En este artículo se presenta la experiencia de repotenciación de un transformador de potencia de 20/25 MVA, 115/34,5 kV, Y/Y/D sumergido en aceite, al incrementar la potencia a 30/35 MVA. Después de un riguroso estudio se concluyó que la opción más eficiente consistía en rediseñar el transformador. Esta experiencia abarca los aspectos metodológicos, pruebas preliminares, rediseño del transformador y cambio del núcleo (construcción de los devanados principales y del devanado de compensación), pruebas finales en fábrica y validación de la metodología desarrollada. La implementación de la metodología se realizó a través de una herramienta computacional y la validación se realizó mediante ensayos en la planta de Industrias Explorer, Duitama, Colombia.

----- *Palabras clave:* Transformador, repotenciación, rediseño

#### Abstract

In this paper, an experience is presented showing repowering an oil-submerged power transformer. The most efficient option is the redesign and repowering a transformer 20/25 MVA, 115/34.5 kV, Y/Y/D to increase the power from 20 to 30/35 MVA. This experience considers methodological aspects, preliminary tests, redesign and construction of main winding and compensation winding; final tests factory and validation of the methodology were carried out.

---

\* Autor de correspondencia: teléfono : + 57 +2 + 333 42 52, fax : + 57 +2 + 321 215, correo electrónico: hector.cadavid@correounivalle.edu.co (H. Cadavid)

The implementation of the methodology was conducted through a computational tool and the validation was conducted by testing at the factory laboratory of Industries Explorer, Duitama, Colombia.

----- *Keywords:* Transformers, power upgrade, redesign

## **Introducción**

El transformador de potencia juega un papel muy importante como uno de los principales componentes de los sistemas eléctricos en el paso final del proceso de llevar la electricidad a los usuarios por parte de las empresas distribuidoras de energía, para las aplicaciones industriales, comerciales o residenciales. La mayoría de los transformadores que se encuentran en uso, han sido fabricados unos 40 años atrás, sus diseños generalmente se encuentran sobredimensionados, razón por la cual se pueden repotenciar para obtener más potencia, en vez de comprar transformadores nuevos de alto costo. Por tanto, la necesidad de aumentar la capacidad de suministrar potencia eléctrica ha llevado a la ingeniería a intervenir en la optimización del transformador mediante la repotenciación del mismo.

La metodología desarrollada para el redimensionamiento de transformadores es una adaptación de la metodología existente [1], pero además de dimensionar los devanados, se diseña el devanado de compensación, se evalúan los parámetros de cortocircuito y del sistema magnético.-

## **Repotenciación**

La repotenciación corresponde a las modificaciones necesarias en un transformador para aumentar su potencia nominal, las alternativas son mejorar la refrigeración, utilizar mejores materiales aislantes y líquidos refrigerantes, rediseñar el transformador y cambiar el núcleo del transformador. Por tanto, la repotenciación corresponde a las modificaciones necesarias en un transformador para aumentar su potencia nominal. Puede incluir desde el añadir dispositivos de refrigeración (ra-

diadores, moto ventiladores, etc) para obtener un incremento de potencia del orden del 10%, hasta la fabricación de nuevos bobinados que posibiliten aumentos de potencia del 30%.

Aunque en la industria se emplean los transformadores tipo seco y los inmersos en aceite, los últimos tienen la gran ventaja de la repotenciación. La repotenciación incluye el diseño, fabricación de nuevos componentes, desmontaje, montaje y ensayos previos a la puesta en servicio.

## **Mejorar la refrigeración**

El calor producido por el efecto Joule puede emplearse para aumentar la potencia del transformador hasta un 10 %, en este caso resulta útil mejorar el proceso de refrigeración denominado comúnmente como potencia forzada.

## **Mejorar los materiales aislantes y los líquidos refrigerantes**

En los procesos de repotenciación se ha encontrado útil reemplazar los materiales existentes por materiales de mayor capacidad aislante y refrigerante [4].

## **Rediseñar el transformador**

El rediseño abarca el dimensionamiento de las nuevas bobinas según las corrientes nominales dadas por la nueva potencia, sin embargo la ventaja que este ofrece, desde el punto de vista técnico, es la reutilización del cobre en la fabricación de los devanados; además el estudio de los parámetros eléctricos podría arrojar resultados que permitan conservar la geometría original de algunas bobinas.

**Cambiar el núcleo del transformador**

Cuando se repotencia un transformador se determina cuanto es la densidad de campo magnético a la que operaría, los ensayos previos determinan si es necesario cambiar el núcleo para la nueva potencia. Las tres primeras opciones de repotenciar tienen en cuenta que el núcleo del transformador puede conservar su geometría original. Los cambios, de ser necesarios se limitarían a reemplazar algunas de sus láminas dependiendo de su estado, de todas formas, aunque no se rediseña el núcleo, las propiedades del mismo y sus parámetros son fundamentales en la repotenciación. En el proceso de la repotenciación es necesario analizar que parámetros (eléctricos, mecánicos, térmicos), dimensiones (devanados, núcleo) y características constructivas se pueden conservar o es necesario modificar (por ejemplo la geometría del devanado puede variar por la nueva potencia). Los resultados de las pruebas preliminares sirven de indicativo para seleccionar la alternativa de repotenciación más conveniente. En esta experiencia de repotenciación, después de un riguroso estudio se concluyó que la opción más eficiente consistía en rediseñar el transformador.

**Parámetros y variables involucradas en el rediseño de un transformador de potencia**

Los parámetros involucrados en el rediseño de un transformador de potencia dependen en gran parte del acuerdo cliente-reparador, dado que es posible mantener los niveles de tensión se pueden conservar los diseños originales de los devanados incluso en un aumento de potencia.

**Tensión**

Es el primer parámetro involucrado en el rediseño de un transformador, este puede ser modificado o mantenerse constante de acuerdo a los nuevos parámetros de diseño. Al repotenciar un transformador se pueden cambiar los niveles de tensión, si estos se mantienen constantes es necesario que la densidad de corriente no supere lo indicado en la tabla 1, puede ser necesario modificar la sección del conductor lo cual indica que el rediseño debe mantener la tensión original con una nueva organización de los devanados.

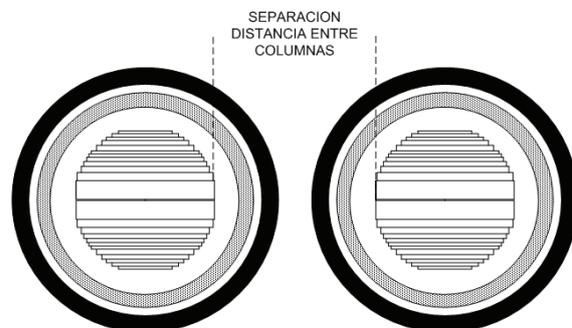
**Tabla 1** Densidad de corriente media en los devanados J, M A/m<sup>2</sup>

Potencia kVA	25-40	63-630	1.000-6300	10.000-16.000	25.000-60.000
<b>Cobre</b>	1,8 – 2,2	2,2 – 3,5	2,2 – 3,5	2,0 – 3,5	2,0 – 3,5
<b>Aluminio</b>	1,1 – 1,8	1,2 – 2,5	1,5 – 2,6	1,5 – 2,7	-

Tomado de la ref. [1]

**Reactancia de dispersión**

La reactancia de dispersión depende de la geometría y organización de los devanados, sin embargo dos dimensiones son las más significativas: la distancia de la bobina más cercana al núcleo con el núcleo y la distancia entre ambos devanados. Por lo tanto la separación entre los devanados deben tener tiene una limitante por la geometría del núcleo, figura 1.



**Figura 1** Limitación de separación de devanados

### *Impedancia de cortocircuito $Z_{cc}$*

La impedancia de cortocircuito es otro de los parámetros más significativos que un diseñador debe tener presente cuando diseña un transformador, y se debe determinar por un acuerdo cliente-reparador. Los parámetros geométricos que tienen mayor influencia en estos cálculos son las distancias de separación de los dos devanados principales y del devanado más cerca al núcleo, por tanto al mejorar las distancias y las geometrías significa mejorar la impedancia de cortocircuito.

La impedancia  $Z_{cc}$  es un parámetro que depende principalmente del valor de la reactancia, Ecuación 1.

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \quad (1)$$

Donde,

$R_{cc}$  Resistencia de cortocircuito

$X_{cc}$  Reactancia de dispersión.

Para el cálculo de la impedancia de corto se emplearon dos metodologías, la descrita en J&P [2] y en “Dimensionamiento de transformadores” [1].

### *Corriente eléctrica*

La organización de los devanados y el cálculo de la sección de conductor dependen, entre otros factores ya mencionados, de la corriente que circulará por ellos, por tanto si la corriente aumenta se espera lo mismo en la sección; esto supone una limitante ya que el área de trabajo esta circunscrita por las dimensiones del núcleo.

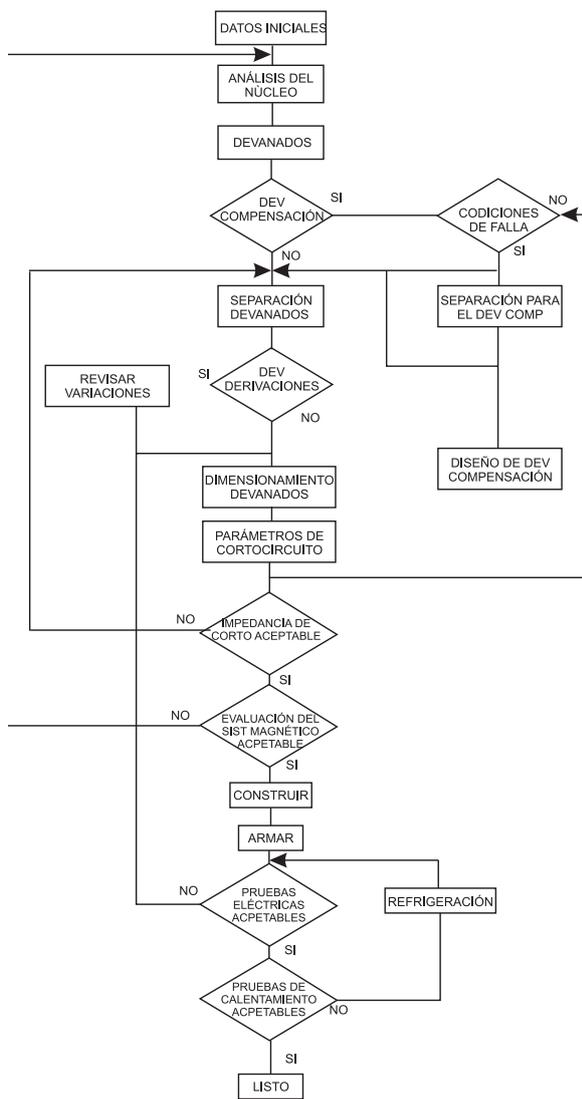
### **Metodología**

La metodología de rediseño aplicada [3] se ilustra en algoritmo de la figura 2. Se considera que los transformadores fabricados años atrás se encuentran sobredimensionados. Por tanto, los puntos iniciales en la determinación de la

capacidad del transformador son las dimensiones del núcleo y la geometría de los devanados. Otros elementos en el núcleo son las dimensiones y características de la chapa magnética, estas son algunas de las limitantes para el dimensionamiento de las nuevas bobinas, además las características magnéticas influyen en la decisión de conservar el núcleo, cambiarlo o modificarlo, para ello hay que tener un conocimiento de las pérdidas y la densidad de campo magnético (de forma experimental se construye una curva característica). Posteriormente, se estiman las dimensiones mínimas y máximas de trabajo, las mínimas corresponden al diámetro de la columna y las máximas al diámetro externo del devanado original mas lejano al núcleo (sí se conserva el núcleo original) y se complementan con un conocimiento de todas las variables asociadas como longitudes, altura y ancho de la ventana, número de escalones variables geométricas asociadas al núcleo.

El siguiente paso es el dimensionamiento de los devanados. Adicional a los devanados de AT y BT se considera la fabricación del devanado de compensación y del devanado de regulación. El dimensionamiento del devanado de regulación depende de las variaciones de los parámetros eléctricos, sí la densidad de corriente es muy alta (tabla1) se debe modificar el área del conductor, y sí se realiza algún cambio en los niveles de tensión se deben modificar las espiras de regulación. En la mayoría de los casos se conserva el nivel de voltaje del devanado de alta tensión, por tanto su devanado de regulación se conserva. En esta etapa se evalúa la opción de mantener iguales algunos parámetros geométricos como el número de espiras, número de discos y la geometría del conductor.

En el rediseño puede utilizarse el mismo conductor, esto depende de la magnitud de nueva densidad de corriente, si esta aumenta hay que replantear un cambio en organización del devanado, o en su defecto utilizar otro conductor con la misma organización.



**Figura 2** Algoritmo utilizado para la repotenciación

Los diámetros de las nuevas bobinas también representan una limitante dentro del proceso de repotenciación. Dentro del cálculo de los diámetros de las nuevas se considera el valor de la impedancia de cortocircuito acordada, para el caso de transformadores con devanado de compensación se aparta el área para trabajar en el diámetro de los dos devanados principales [3], el valor de los diámetros se determinan de acuerdo a las iteraciones que convengan como diseñador, de manera que los diámetros seleccionados pueden variar de un diseñador a otro. En el cálculo de

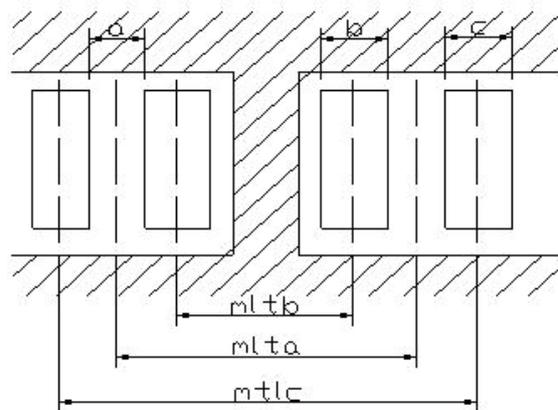
la componente reactiva de la impedancia de cortocircuito se utiliza la siguiente expresión:

$$\%X = KF(3aml_t_a + bml_t_b + cml_t_c) / \phi_m l \quad (2)$$

Donde:

- $l$  Longitud axial del devanado
- $a$  Espacio radial entre los devanados
- $b$  Ancho radial del devanado próximo al núcleo
- $c$  Ancho radial del devanado alejado del núcleo
- $k$  Constante que se determina con los valores geométricos de los devanados originales.
- $F$  Ampere-vuelta del devanado primario o secundario
- $\phi_m$  Flujo total en el núcleo
- $ml_t_b$  Diámetro medio de la bobina cercana al núcleo
- $ml_t_c$  Diámetro medio de la bobina alejada al núcleo
- $ml_t_a$  Diámetro medio entre las bobinas principales

La geometría necesaria para calcular la ecuación 2 está definida en la figura 3.



**Figura 3** Distancia entre diámetros de los devanados

Dado que la componente más significativa en la impedancia de cortocircuito es la reactiva, se asume el valor de la impedancia como el valor de la componente reactiva. Para el cálculo de los diámetros de las bobinas se considera lo siguiente:

- El valor de la impedancia de cortocircuito
- El diámetro máximo de trabajo. Es el diámetro original de la bobina de AT.
- El diámetro mínimo para la bobina de BT. Es determinado con el diámetro máximo para la bobina de compensación.
- Conservar los mismos canales de refrigeración, aunque suponga realizar un cambio en la separación.

Dentro de las iteraciones para determinar los nuevos diámetros se analizan las siguientes opciones:

- Mantener constante el diámetro del devanado de AT y BT, esto consideraría el nuevo espacio entre devanados, lo cual incrementaría la impedancia de cortocircuito.
- Mantener constante el diámetro del devanado de AT y acercar el devanado de BT, esto incrementaría la cantidad de cobre, además se debe analizar la distancia de BT contra el núcleo, que al ser grande incrementaría el valor de la impedancia de cortocircuito.
- Tomar como valor inicial el diámetro establecido para el devanado de compensación, que sería el más cercano al núcleo, luego fijar el diámetro mínimo para el devanado de BT. Variar las distancias de separación entre los devanados principales desde el valor mínimas y realizar la iteración para obtener el mejor valor con la impedancia seleccionada.

### **Devanado de compensación (Terciario)**

El devanado de compensación cumple funciones muy específicas, filtrar los armónicos de tercer orden, soportar corrientes de fallo y/o emplearse como devanado auxiliar. Un transformador

puede tener múltiples devanados incluyendo el devanado terciario. Aunque en la mayoría de los transformadores de potencia se emplean solo dos devanados, el primario y el secundario, se podría adicionar un tercero, este se conoce como un devanado terciario y su conexión es en delta. La metodología de rediseño [3] aplicada toma como punto de partida la corriente de fallo de secuencia cero que afectan al devanado de alta tensión y al de baja tensión así como el devanado de compensación al cual se debe especificar su tensión.

Para calcular el devanado de compensación hay que conocer el valor de la corriente que circulará por él, para ello se emplean dos metodologías:

Utilizando la ecuación 3, para ello es necesario tener la información del sistema de potencia donde se instalará el transformador.

$$I_{03} = \frac{P_{SC3}}{\sqrt{3} * U_3} \quad (3)$$

Donde,

$P_{SC3}$  Es la potencia de cortocircuito que soportará el devanado terciario.

$U_3$  Es la tensión de que soportará el devanado terciario.

La potencia de cortocircuito que soportará el devanado terciario se calcula con base en la potencia de cortocircuito del devanado de alta tensión y baja tensión, ecuación 4.

$$P_{SC3} = P_{SC1} - P_{SC2} \quad (4)$$

$P_{SC1}$  Potencia de cortocircuito de secuencia cero para el devanado secundario.

$P_{SC2}$  Potencia de cortocircuito de secuencia cero para el devanado primario.

$P_{SC3}$  Potencia de cortocircuito de secuencia cero para el devanado terciario.

En el caso de no se conocer las condiciones del sistema, la corriente del devanado de compensación se puede calcular a partir de la corriente de cortocircuito que se calcula en la evaluación de los parámetros de cortocircuito.

Posteriormente, se establece un porcentaje de corriente, como un acuerdo cliente –reparador, con la cual será construido el devanado terciario, con esta corriente se calcula la tensión a la que trabajará el devanado, ecuación 5.

$$U = \frac{S_{CC}}{3 * I_f} \quad (5)$$

Donde,

$S_{CC}$  Es la potencia del devanado terciario (tomado a partir de las condiciones del sistema de potencia ó de los parámetros empleados en el cálculo de los parámetros de cortocircuito).

$I_f$  Es la corriente por fase que circulará por el devanado

Dado que hay dimensiones establecidas, los diámetros de este devanado deben estar dentro de los márgenes que se han separado para este fin (estos espacios son para el diseño y se toman en base a la experiencia y con otros diseños de varios fabricantes). Conociendo la tensión y la corriente de trabajo se organiza el devanado, el tipo que se emplea, según la experiencia en otros diseños es continuo de múltiples capas.

### Modificaciones al transformador repotenciado

El transformador repotenciado corresponde a un transformador de potencia de 20 MVA, el cual se incrementó su potencia a 30 MVA, el rediseño abarcó el dimensionamiento de un devanado de compensación. Como se mencionó en el apartado 4, la metodología de rediseño aplicada [3] se ilustra en algoritmo de figura 2. La tabla 2 resume las modificaciones de potencia, tensión, conexiones y corrientes realizadas en el rediseño.

### Monitoreo de temperatura en los devanados

En este transformador se instaló un sistema de monitoreo en fibra óptica para incrementar el conocimiento del mismo y de esta forma optimizar

el tiempo de vida útil del transformador ayudando a la empresa de energía a planear la carga.

En este transformador se instaló un sistema de monitoreo en fibra óptica, el cual está compuesto por seis sensores, del tipo Ga-As ubicados en la última espira de cada fase de las bobinas de AT y BT, en medio de un separador de las galletas (Figuras 4 y 5). En este sitio se espera tener el mayor calentamiento de las bobinas debido a es el punto de mayor esfuerzo eléctrico

El sistema de medición se ubicó próximo al tablero de control del transformador como muestra la figura 6. Este sistema permite medir y monitorear en tiempo real la temperatura de los devanados, de manera local y remota (centro de control).

**Tabla 2** Resumen de modificaciones en el transformador repotenciado

<i>Potencia</i>		<i>Tensiones</i>	
<i>Original</i>	<i>Repotenciado</i>	<i>Original</i>	<i>Repotenciado</i>
		115 kV	115 kV
20 / 25 MVA	30 / 35 MVA	57,5 kV	34,5 kV
		34,5 KV	12,81 kV <sup>(1)</sup>
<i>Conexiones</i>		<i>Corrientes</i>	
<i>Original</i>	<i>Repotenciado</i>	<i>Original</i>	<i>Repotenciado</i>
Y	Y <sup>(2)</sup>	Y	Y <sup>(2)</sup>
Y	D	Y	D
D	Y	D	Y

<sup>(1)</sup> Tensión que se obtuvo en el diseño del devanado de compensación, sin embargo esta tensión no es útil, ya que no se habilitaron salidas, solamente se aterrizo la delta.

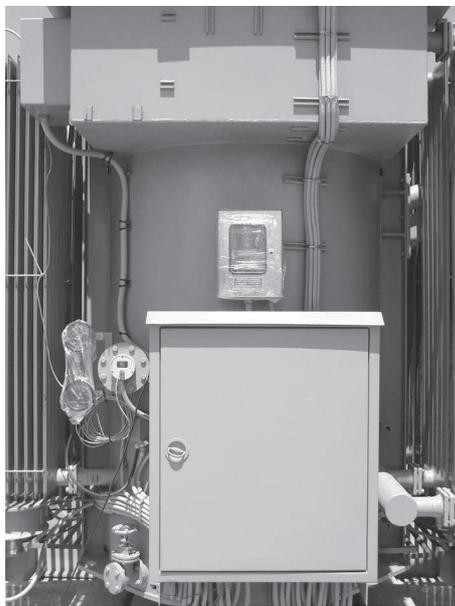
<sup>(2)</sup> El devanado se diseñó para una tensión de 34,5 kV en Y.



**Figura 4** Ubicación del sensor de temperatura



**Figura 5** Ubicación del sensor de temperatura

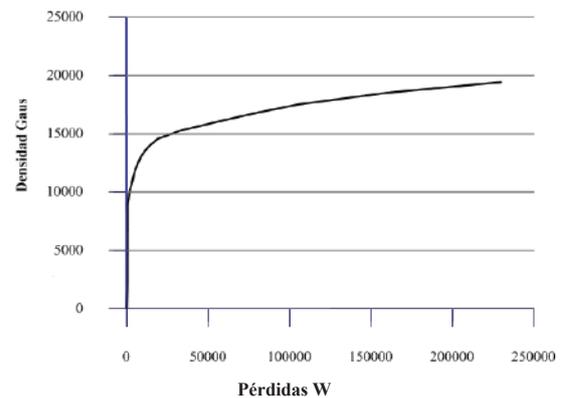


**Figura 6** Sistema de monitoreo

## Resultados y discusión

Como el punto de partida era los ensayos que se realizan al núcleo, los resultados eran que la densidad de campo magnético es aproximadamente 16000 Gauss, figura 7.

En el nuevo diseño de transformador se observa que las nuevas geometrías permiten tener un menor tamaño que el original logrando así una mejor refrigeración, en la figura 8 se puede apreciar estas nuevas geometrías. Para evaluar el diseño se calcularon los parámetros del sistema magnético y de cortocircuito, y una vez que el transformador fue reconstruido se realizaron pruebas de laboratorio, la tabla 3 indica los valores de los ensayos y la diferencia en las medidas, donde se encuentra una muy buena aproximación, indicando que las pérdidas eléctricas medidas están por debajo de lo esperado.



**Figura 7** Gráfica de magnetización del núcleo

Los datos fueron medidos con un analizador de potencia Fluke 434. Las diferencias indican que es necesario realizar algunos ajustes en el valor de algunos coeficientes [3].

Los nuevos diámetros son menores con respecto a los diámetros originales como se observa en la figura 9, esto permite tener una mejor refrigeración y mejor impedancia con respecto a los diámetros anteriores.

Al realizar la comparación frente a los datos entregados por la hoja de cálculo y los determinados de forma experimental mediante los ensayos, se en-

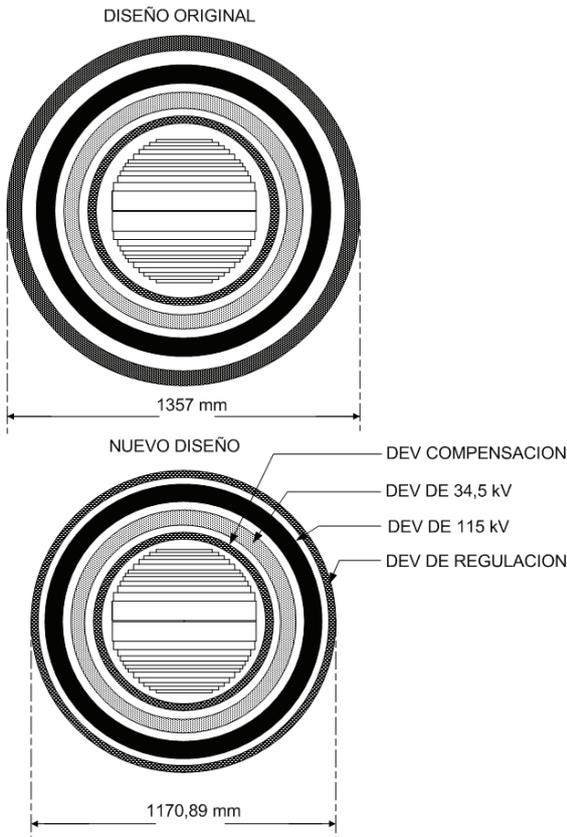
cuenta una muy buena aproximación para las pérdidas de corto y la impedancia de corto circuito.

La repotenciación de transformadores de potencia también ofrece una alternativa a la conservación ambiental; repotenciar mediante

el redimensionamiento es volver a hacer el transformador, así que hay reutilización de material que pudiera contaminar como el cobre y el aceite, el cual es regenerado y aumenta la vida útil del transformador.

**Tabla 3** Tabla comparativa de parámetros eléctricos medidos

	<b>Pactado</b>	<b>(Calculado)</b>	<b>Ensayos</b>	<b>Diferencia (calculado - pactado)</b>	<b>Diferencia (calculado -ensayo)</b>
<b>Perdidas de vacío</b>		35.498 W	32.330 W		3.168 W
<b>Corriente de vacío</b>		0,8 %	0,25 %		0,55 %
<b>Perdidas bajo carga</b>	-	107.700 W	100.043 W <b>(85°)</b>	-	6.657 W
<b>Ucc %</b>	10,5 +/- 5%	10,38	10,92 <b>(85°)</b>	0 %	0,54



**Figura 8** Transformador repotenciado



**Figura 9** Bobina completa con todos los devanados

### Conclusiones

En el estudio y aplicación de la metodología se desarrolló una herramienta computacional, que resultó ser muy práctica en el dimensionamiento de transformadores de potencia y en la evaluación del sistema magnético y de los parámetros de cortocircuito.

Al incrementar la potencia a un transformador se debe dar atención especial a la densidad de corriente de los devanados, esto determina si con la misma configuración del devanado puede operar a una corriente diferente o si se debe cambiar

de conductor y de configuración al organizar el devanado. Sin embargo, esta densidad tiene una fuerte influencia en las pérdidas por cortocircuito ya que varían con el cuadrado de esta, por tanto esta debe estar dentro de lo establecido como paso preliminar al diseño.

Los nuevos diámetros son menores con respecto a los diámetros originales lo que permite tener una mejor refrigeración y mejor impedancia con respecto a los diámetros anteriores reduciendo los flujos de dispersión, disminuyendo así la reactancia de dispersión, la cual es muy significativa en el cálculo de la impedancia de cortocircuito.

### Agradecimientos

Los autores agradecen las contribuciones de Industrias Explorer y la Universidad del Valle.

### Referencias

1. H. Cadavid. *Dimensionamiento de transformadores*. Ed. Universidad del Valle. Cali. 1996. pp. 1-240.
2. M. J. Heathcote. *J & P Transformer Book*. Ed. Planta Tree. Guildford. Kings Lynn (UK). 1998. pp. 24.
3. J. A. Padilla. *Repotenciación de transformadores de potencia*. Tesis de grado. Universidad del Valle. 2007. pp. 1-142.
4. C. P. McShane, J. L. Corkran, K. J. Rapp, J. Luksich, "Aging of paper insulation retrofilled with natural ester dielectric fluid". *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Annual Report Conference*. 2003. pp. 124- 127.