

Análisis térmico por elementos finitos, diseño y optimización del área efectiva de ventilación de una celda para transformador tipo seco de 1000 kVA

Thermal finite element analysis, design and optimization of the effective area of a ventilation cell for dry type 1000 kVA transformer

Fabián R. Duque
GIM Ingeniería Eléctrica Ltda
frduqueb@correo.udistrital.edu.co

Milly A. Jaramillo
Dismet
majaramillom@correo.udistrital.edu.co

Carlos A. Bohórquez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
cabohorqueza@udistrital.edu.co

En el estudio que se realiza en este trabajo se hace un análisis por elementos finitos de la transferencia de calor de un transformador tipo seco de una potencia aparente de 1000 kVA, con el fin, de optimizar el área efectiva de ventilación de una celda diseñada para este tipo de transformadores, teniendo en cuenta la norma CODENSA CTS-518, CTS-518-2, CTS-519, que indica los parámetros principales que se deben cumplir para la instalación de transformadores tipo seco y la fabricación de las celdas que los van a contener, de acuerdo con las normas NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) y ANSI (*American National Standards Institute*) y diversas recomendaciones de seguridad y manejo de media tensión derivadas de dichas normas. A partir de esto, surge la problemática que la norma CODENSA CTS-518-2 aclara las áreas efectivas de ventilación para una celda de transformador tipo seco de una potencia de 150 kVA, 225 a 500 kVA y 630 a 800 kVA, pero no especifica el área efectiva de ventilación para una celda de transformador tipo seco de 1000 kVA.

Palabras clave: Elementos finitos, refrigeración, transformador de potencia

In the study performed in this work a finite element analysis of the heat transfer of a dry type transformer apparent power of 1000 kVA is done, in order to optimize the effective ventilation area of an enclosure designed for this type of transformer considering CODENSA standard CTS-518, CTS-518-2, CTS-519, indicating the main parameters that must be met for the installation of dry type transformers and manufacturing cell that will contain according NEMA (National Electrical Manufacturers Association) and ANSI (American National standards Institute) and various warning and management of medium voltage derived from these standards. From this arises the problem that the standard CODENSA CTS-518-2 clarifies the effective areas for an enclosure vent dry type transformer rated at 150 kVA, 225-500 kVA and 630-800 kVA, but does not specify the effective ventilation area to a cell dry type transformer of 1000 kVA.

Keywords: Cooling, finite element, power transformer

Introducción

La empresa GIM, Grupo Industrial Metalmecánico-GIM Ltda. (NIT: 830.005.424-3), dedicada a la fabricación metalmecánica e implantación eléctrica de tableros eléctricos de baja tensión (BT) y media tensión (MT), ofrece dentro de su variedad de productos la celda para transformador tipo seco, celda que se fabrica bajo las normas CODENSA

CTS-518, CTS-518-2, CTS-519 y las normas NEMA, IP y ANSI.

La norma CODENSA CTS-518 especifica cómo deben instalarse dentro de las celdas los transformadores tipo seco, de tal manera que cumpla con las normas NEMA en cuanto a la entrada de objetos extraños y protección contra la accesibilidad de personas no autorizadas y animales, además

de la ubicación de las ventanas de ventilación y las distancias mínimas de los transformadores secos al interior de la celda. Por último, esta norma aclara los parámetros de fabricación metalmeccánica de la celda para transformador como lo son: el soporte, las cubiertas laterales, posterior y frontal, el tipo de anclaje y el espacio al interior. La norma CODENSA CTS-518-2 (CODENSA S.A. ESP, 2009) aclara las áreas efectivas de ventilación para una celda de transformador tipo seco de una potencia de 150 kVA, 225 a 500 kVA y 630 a 800 kVA, pero no especifica el área efectiva de ventilación para una celda de transformador tipo seco de 1000 kVA.

Es por esta razón, que en esta investigación se modela mediante un software de elementos finitos (Roldan y Bastidas, 2002; Salas, Pérez, y Sepúlveda, 2006), una herramienta de análisis de la transferencia de calor de un transformador tipo seco de una potencia aparente de 1000 kVA, con el fin, de optimizar y complementar los parámetros que suministra la norma CODENSA CTS-518-2 (CODENSA S.A. ESP, 2009) en aspectos puntuales como lo son el valor y la ubicación del área efectiva de ventilación para una celda de transformador de 1000 kVA, que no se encuentra especificada en dicha norma (Holman, 1998).

Esta investigación es apoyada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica. Se desarrolló en el Laboratorio de Automatización, bajo la asesoría del Ingeniero Carlos Bohórquez. El laboratorio cuenta con el software de elementos finitos requerido para el análisis. Además, en las instalaciones de la empresa Grupo Industrial Metalmeccánico GIM Ltda, ubicada en la carrera 73A No. 68B-28 en la ciudad de Bogotá, empresa donde en base a la experiencia en el mercado de fabricación metalmeccánica y eléctrica, existen también herramientas como software CAD y procesos de manufactura que apoyan el desarrollo del proyecto (Ullman, 2009).

Metodología

Hipótesis

Si se analiza térmicamente por elementos finitos, se diseña y se optimiza el área efectiva de ventilación de una celda para

transformador tipo seco de 1000 kVA, entonces, podremos observar el comportamiento térmico del transformador y la potencia que será necesaria disipar por medio de áreas efectivas de ventilación.

Si se calcula el valor del área efectiva de ventilación para una celda de transformador de 1000kVA de acuerdo al análisis por elementos finitos, entonces, se podrá realizar el diseño de la distribución de dicha área.

Si se diseña la distribución del área efectiva de ventilación en base al análisis térmico, entonces, se tendrán los parámetros necesarios para realizar un análisis y una correcta optimización de dicha área.

Si se Comparan los resultados del diseño y del comportamiento térmico, entonces, se optimizará el área efectiva de ventilación de la celda, mejorando óptimamente el proceso de disipación térmica.

Antecedentes

En la empresa Grupo Industrial Metalmeccánico Ltda en el año 2010 se llevó a cabo un estudio de las celdas para transformadores, este estudio tuvo como enfoque el diseño y la estandarización de un producto que cumpliera con las normas establecidas actualmente para este tipo de celdas, como resultado de dicho estudio se obtuvieron una serie de parámetros que se deben cumplir para la realización de celdas para transformadores en esta empresa, esos parámetros a tener en cuenta son los siguientes (Fig. 1 y Fig. 2):

- La fabricación de la celda será en lámina *Cold Rolled* calibre 14 y 16 exceptuando algunos accesorios y su estructura interna.
- El grado de protección que deberá llevar es del tipo IP 20. El grado de protección IP hace referencia al estándar internacional IEC 60529 (ANSI, 2004). *Degrees of Protection* utilizado con mucha frecuencia en los datos técnicos de equipamiento eléctrico y/o electrónico).
- Para el ensamble de la celda esta deberá quedar atornillada internamente.
- La celda estará normalizada por la norma CODENSA CTS509/2002, CTS 509-1/2002 y CTS 518-2/2005.

Este estudio y posterior implementación bajo los estándares de la empresa se realizó en la ciudad de Bogotá. En la actualidad se han presentado algunos reclamos por parte de clientes insatisfechos, que justifican el recalentamiento de los transformadores de 1000 kVA, en el incumplimiento de un área efectiva de ventilación que cumpla con la exigencia hecha por estos equipos de tan alta potencia aparente (Fig. 3).

Es principalmente por esta razón, y debido a que las normas CODENSA CTS509/2002, CTS 509-1/2002 y CTS 518-2/2005 no brindan la información suficiente sobre el área de ventilación en equipos de más de 800 kVA, que surge la necesidad de dar solución a este problema realizando

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 23, 2014

Fecha aceptación del manuscrito: Junio 9, 2014

Fabián R. Duque, GIM Ingeniería Eléctrica Ltda; Milly A. Jaramillo, Dismet; Carlos A. Bohórquez, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Esta investigación fue financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Correspondencia en relación con el artículo debe ser enviada a: Fabián Ricardo Duque. Email: fduqueb@hotmail.com

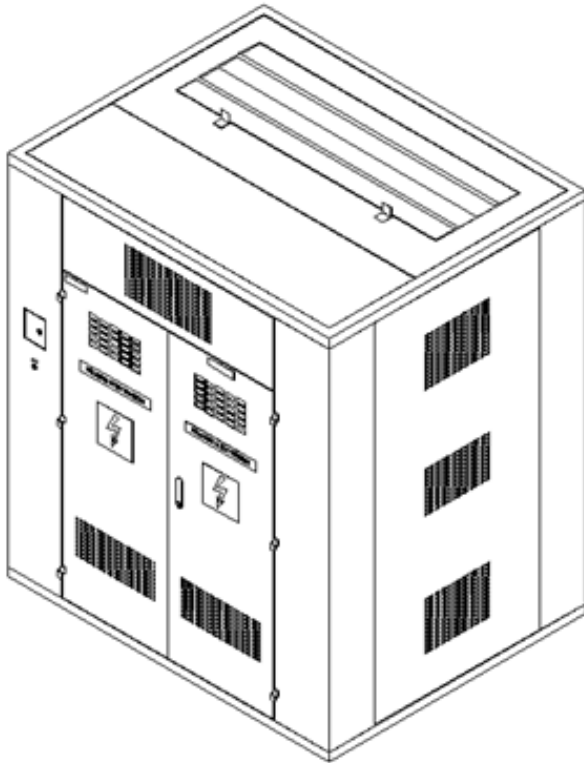


Figura 1. Celda para transformador fabricada en GIM Ltda (vista isométrica) (GIM Ltda, 2012).



Figura 2. Fotografía celda para transformador fabricada en GIM Ltda.

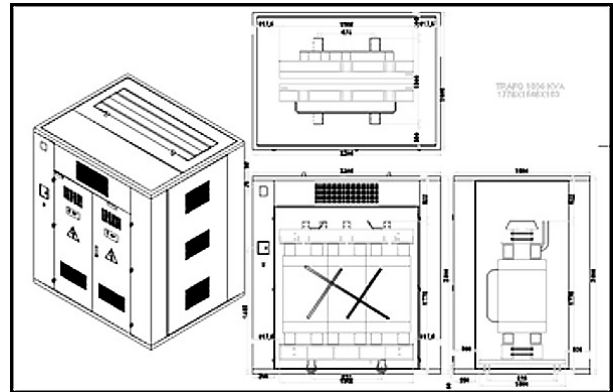


Figura 3. Detalle instalación del transformador de 1000 kVA (vistas isométrico) (GIM Ltda, 2012).

un nuevo estudio que con argumentos teórico-prácticos en base a transferencia de calor y procesos de manufactura metalmecánica. Se plantea la investigación de un nuevo diseño de estas celdas a fin de garantizar la satisfacción del cliente, y el crecimiento de la empresa.

Transformadores tipo seco

Los transformadores tipo seco que se usan generalmente, son equipos que están diseñados para instalarse junto a los centros de carga para optimizar la regulación del voltaje en instalaciones residenciales, comerciales e industriales con el propósito de obtener la mejor eficiencia que sea posible (Fig. 4 y Fig. 5). Principalmente son utilizados en sistemas de iluminación, sistemas de aire acondicionado, sistemas de ventilación y calefacción, en lugares como oficinas, hoteles, complejos habitacionales, fábricas, minas, plantas petroquímicas, cementeras, entre otros (Nacional de Transformadores Tesla, 2012).

Fenómenos térmicos y análisis por elementos finitos

El control de los fenómenos térmicos, en la investigación de equipos eléctricos, es de todos el más importante, principalmente por tres razones:

- Por la tendencia a instalar el material eléctrico bajo envolventes (seguridad) que suelen ser de material aislante (poco eficaces para disipar el calor).
- Por la evolución del equipamiento que integra, cada vez en mayor medida, la electrónica, cuyas dimensiones se van reduciendo sistemáticamente.
- Por la tendencia a ocupar el volumen del tablero al máximo y aumentar el coeficiente de diversidad, que se trata de instalar gran cantidad de equipos eléctricos en un espacio reducido y con poca tolerancia entre ellos.

Al involucrarse en el estudio de los aspectos más importantes a tener en cuenta, a la hora de analizar

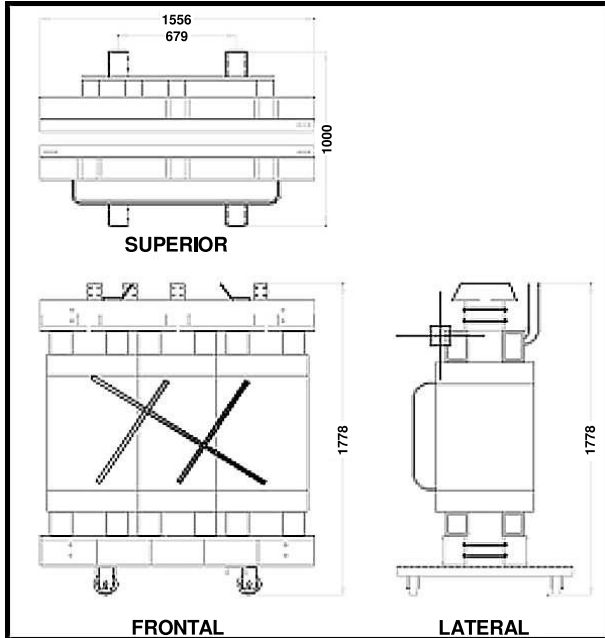


Figura 4. Detalle transformador Tesla (GIM Ltda, 2012).



Figura 5. Foto transformador Tesla (Nacional de Transformadores Tesla, 2012).

térmicamente un tablero eléctrico, se encuentra que la temperatura de un material eléctrico es el resultado de:

- Del efecto Joule ($P = I^2R$), es decir, de su resistencia al paso de la corriente.
- De la temperatura ambiente (Kilind, 1988).

Con la utilización de software (ANSYS, SOLIDWORKS CAD y FEA) es posible determinar, en función de las características de la envolvente, el área óptima de

ventilación, según factores de diseño y tipo de equipos, de voltajes e intensidad eléctrica y de temperatura para cada una de las fuentes de calor, dispositivos, conductores ó barraje) y todo ello en función de su posición, respecto a las rejillas de ventilación, y de la temperatura del aire que los envuelve.

Proceso metodológico

Para el desarrollo del proyecto se realiza una investigación y un análisis de las normas CODENSA CTS-518, CTS-518-2, CTS-519 y NEMA-IP para la construcción de celdas para transformadores tipo seco, y de esta manera se indaga sobre el área efectiva de ventilación necesaria en una celda para un transformador de 1000kVA, para garantizar un funcionamiento óptimo del equipo eléctrico y una temperatura segura de trabajo. Luego de este previo análisis, se realiza un estudio térmico mediante un modelado computacional por elementos finitos que se compone de tres partes principales que son: (1) El pre-procesador, que permite construir el modelo del transformador y añadir las variables, las constantes y las restricciones deseadas, (2) el solucionador, que permite ensamblar y resolver el sistema algebraico de ecuaciones que representan el sistema físico térmico, y (3) el pos-procesador, que facilita la manipulación de los resultados numéricos bien sea en forma de listas, tablas o en forma gráfica.

Posteriormente se realiza la toma de datos correspondiente al modelado para al final generar resultados y basados en estos se plasma en una gráfica final el comportamiento térmico del transformador según el software.

Finalmente, y en base a los resultados obtenidos en el modelado previo, se diseña y optimiza la distribución del área efectiva de ventilación en la celda para transformador, por medio del proceso de mejora óptima, obteniendo un resultado de diseño detallado siendo este la solución al problema formulado.

Modelado en ANSYS

Uno de los principales objetivos a alcanzar al momento de fabricar una celda para transformador de 1000 kVA y en general de cualquier tablero eléctrico, consiste en garantizar el funcionamiento eléctrico del tablero, garantizando el ciclo de vida de los componentes eléctricos y no eléctricos, es por esta razón, que la utilización de un software como ANSYS y con ayuda de la experiencia del fabricante, es posible determinar, en función de las características del equipo eléctrico, (transformador de 100kVA), las temperaturas ideales de trabajo para cada una de las fuentes de calor y conductores, todo esto en función de su posición dentro de la celda y de la temperatura del aire que envuelve dichos equipos.

Al realizar el estudio térmico del transformador de 1000 kVA en el software ANSYS, se decide hacerlo en

la plataforma Workbench mediante un estudio térmico - eléctrico de la temperatura, especialmente en los conductores eléctricos (Fig. 6).

La geometría se realiza en el software CAD SolidWorks, que permite diseñar con mayor detalle cada uno de los componentes principales de un transformador Tesla de 1000 kVA, teniendo en cuenta sus materiales y dimensiones. Posteriormente, se decide importar el modelo a la sección de geometría del análisis térmico eléctrico de la plataforma Workbench ANSYS (Fig. 7).

Hay que resaltar que el principal objeto de este estudio es el de lograr encontrar el promedio de la temperatura y los intercambios térmicos, que permiten describir el comportamiento del sistema referente a la transferencia de calor al interior de los cuerpos, dada la convección y conducción térmica de una barra de cobre recorrida por una corriente eléctrica. Con estos resultados se busca luego diseñar un área de ventilación en la envolvente o celda que permita garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos (Fig. 8).

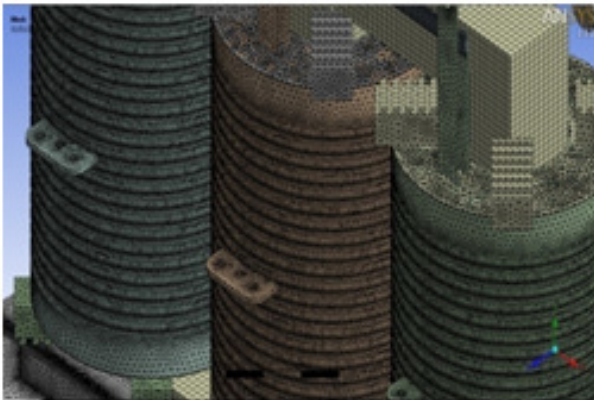


Figura 8. Detalle enmallado 1.

El software de ANSYS toma cada una de las partes del enmallado y las analiza según las variables y constantes introducidas en el *setup* (configuración) y genera un resultado acorde con lo que ocurre en cada una de las partes de la división geométrica (Fig. 9).

Al momento de realizar el análisis térmico del transformador de 1000 kVA, es necesario introducir varias variables y constantes que dependen del tipo de conductor eléctrico, el voltaje entrada, el voltaje de salida y la generación interna de calor, entre otros.

El principal parámetro de entrada es la conexión del barraje de cobre principal al suministro de energía, la cual generalmente se realiza mediante una línea trifásica de 13.2 kV. De la línea de media tensión trifásica de 13.2 kV se realiza la conexión del transformador de 1000 kVA, con el fin de tener un voltaje de salida común de 220 V, en la mayoría de los casos.

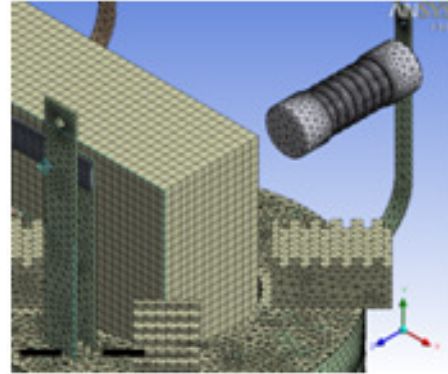


Figura 9. Detalle enmallado 2.

Teniendo en cuenta los valores térmicos relativos de un juego de barras situados en un ambiente dado, se sabe que una temperatura ideal de un barraje de entrada como el de este transformador es de 60°C y es muy importante saber que no se puede superar la barrera de los 110°C, debido a que se provocan deformaciones notables en las barras, rotura de los soportes aislantes y un calentamiento excesivo (Fig. 10).

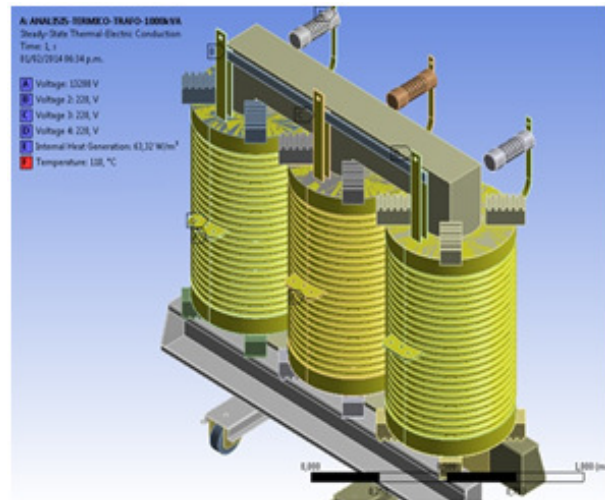


Figura 10. Disposición (*setup*) variables-constantes.

Se debe notar que además del voltaje de entrada de 13200 V, y el voltaje de salida de 220 V, se tiene una temperatura máxima de 110°C que es la temperatura luego de la cual el trabajo del transformador no es óptimo. Además, la generación interna de calor es de $63.32 \frac{W}{m^3}$, que se calcula mediante la ecuación de la ley de Stefan, que tiene en cuenta la geometría del cuerpo en cuestión, coeficientes térmicos y coeficientes de emisividad térmica aproximados, dependientes del material conductor por donde circula la corriente eléctrica. Ley de Stefan para generación interna de calor (*Internal Heat Generation*) esta dada en la ecuación 1 (Staff, 2003).

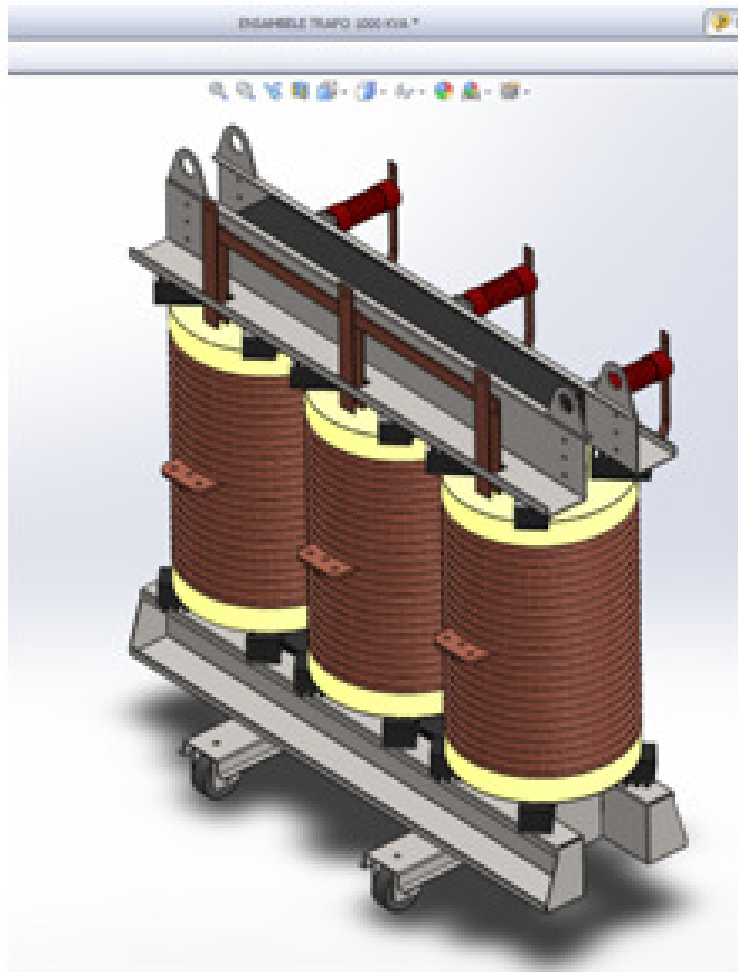


Figura 6. Diseño CAD en Solid Works transformador de 1000 kVA.

$$IGH = 5,7e \left(\frac{^{\circ}\text{C} + 273}{1000} \right) \frac{W}{\text{cm}^3} \quad (1)$$

Donde e es igual a la emisividad del cobre que es aproximadamente 0.2 en referencia a un cuerpo negro ideal (Fig. 11 y Fig. 12).

Al realizar el análisis de los resultados, se puede notar que a pesar de que el barraje está diseñado para poder soportar el paso de la corriente nominal necesaria, sin provocar un calentamiento de las barras que pueda ejercer un deterioro de los elementos del transformador causando la falla del equipo, la temperatura tiene un pico de 150°C lo cual genera un deterioro y mal funcionamiento al punto de llevar a el equipo a una falla total, razón por la cual se evidencia la necesidad de diseñar un área efectiva de ventilación que permita disminuir dicha temperatura en por lo menos 50°C, con el fin de llevar al transformador a un óptimo funcionamiento y que el barraje este trabajando entre los 70 y los 90°C.

De esta manera y conociendo la temperatura externa del aire, se puede manejar un fenómeno térmico convectivo, que

corresponde a la transferencia de calor entre un cuerpo sólido y un fluido en movimiento.

En este caso, la temperatura interna del aire en el tablero resulta de los intercambios de calor por convección entre el aire interno y las superficies de los diferentes dispositivos como por ejemplo los conductores, y la temperatura ambiente del aire externo transmitida a través de las paredes de la celda (Fig. 13).

Balance de resultados obtenidos en análisis por elementos finitos

Al finalizar el análisis por elementos finitos, de la transferencia de calor y temperaturas de los componentes del transformador, se puede observar que al realizar una convección con una temperatura ambiente de 30°C se llega a una generación interna de calor de 45 W/m³ lo que genera una reducción de alrededor del 18 % en la generación interna de calor, lo que nos lleva a tener una temperatura de trabajo de entre 80 y 100°C en condiciones extremas.

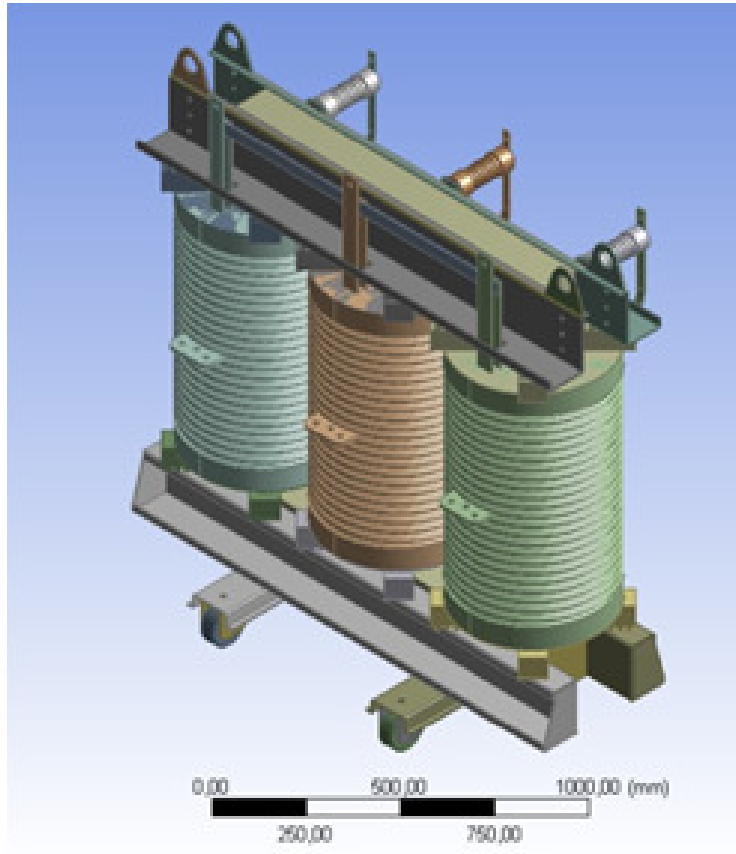


Figura 7. Análisis térmico eléctrico en la plataforma Workbench.

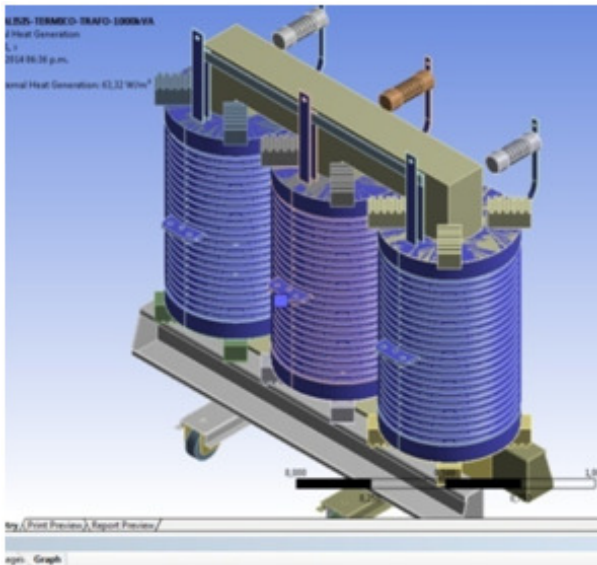


Figura 11. Generación interna de calor.

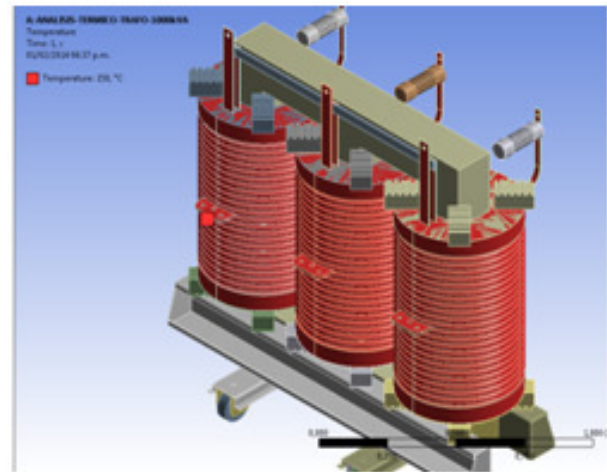


Figura 12. Temperatura emitida en cuerpos conductores.

Luego de este análisis térmico eléctrico, se procede a realizar el diseño de una celda para transformador, con un

área efectiva de ventilación que adecue el comportamiento de los componentes internos de la celda a una temperatura óptima de trabajo que oscile entre los 80 y los 100°C, por lo que se hace necesario que este diseño tenga como prioridad conseguir por lo menos el doble del área efectiva

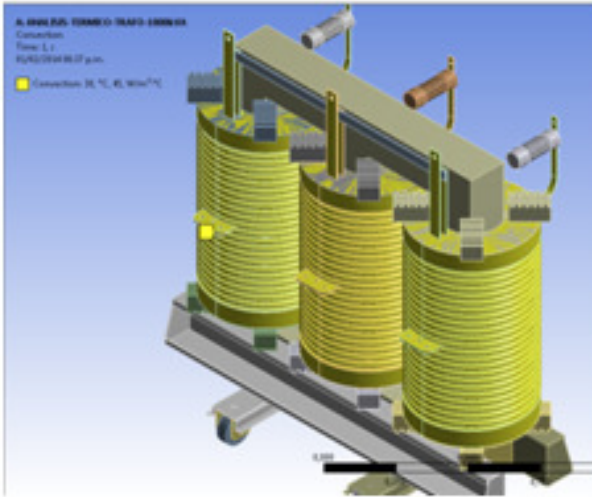


Figura 13. Fenómeno convectivo transformador de 1000 kVA.

de ventilación, propuesta para transformadores entre 360 y 800 kVA por la norma CODENSA CTS 518-2.

Opción de Diseño: Ventilación asistida por ventiladores eléctricos

En la Fig. 14 se puede observar una celda para un transformador de 1000 kVA con ventilación asistida. Los implementos usados en este caso son ocho ventiladores Unikey de 5 pulgadas.



Figura 14. Ventiladores Unikey 5 pulgadas.

Al realizar un análisis del comportamiento y de los requerimientos de una celda de este tipo, se puede ver que el costo para llevarla a cabo es bastante elevado, debido a que los ventiladores son costosos y la cantidad de estos a utilizar es grande, esto sin tener en cuenta el consumo de energía que generan, la fabricación de una celda con ventilación asistida requiere mayor tiempo de trabajo, para instalar los ventiladores correctamente, lo cual también genera costos en mano de obra ya que su ensamble es más complicado que el de una celda común con punzonados o mallas.

Opción de Diseño: Ventilación por agujeros punzonados

La Fig. 15 muestra la ubicación del área efectiva de ventilación de una celda con agujeros o rejillas punzonados, para un transformador de 1000 kVA. Para este tipo de celda son realizados agujeros de 10 milímetros por 10 milímetros, separados entre sí a esta misma distancia. Las longitudes totales para realizar este procedimiento están limitadas, no solo por las normas CODENSA E IP, sino también por la resistencia mecánica que pierde el material al realizar una cantidad excesiva de agujeros.



Figura 15. Fotografía celda con ventilación por agujeros punzonados.

Como se pudo verificar al realizar un estudio del área de ventilación de las celdas de este tipo, se encontró como resultado un incremento desfavorable en el costo de fabricación de la celda, esto debido a que el proceso de manufactura es bastante extenso, por la cantidad de punzonados que se deben realizar.

Opción de Diseño: Ventilación por mallas IMT 20

La Fig. 16 y Fig. 17 muestran el diseño y fabricación del área de ventilación de una celda con mallas para un transformador de 1000 kVA. Para este tipo de celda se usa malla IMT 20 galvanizada (número del troquel, es la distancia en mm entre centros de uniones de las mallas). Esta área de ventilación está distribuida de la siguiente manera: en las perforaciones de las tapas laterales el área de ventilación

de cada una de estas es de $0.51 \text{ m} \times 0.47 \text{ m}$ o bien 0.2397 m^2 , por tanto en 16 perforaciones de las tapas laterales el área efectiva tiene un total de 3.8352 m^2 , el área de ventilación de cada una de las perforaciones de los espaldares es de $0.51 \text{ m} \times 0.37 \text{ m}$, para un total de 0.1887 m^2 , consecuentemente en 16 perforaciones estos espaldares tienen 3.0192 m^2 . En el resto de la celda el área de ventilación es de 0.1182 m^2 , que hacen referencia al punzonado del perfil frontal y de las puertas. En su totalidad el área efectiva de ventilación de una celda con mallas es de 6.9726 m^2 .



Figura 16. Fotografía celda de transformador con ventilación por malla IMT 20.

La malla debe tener unas dimensiones de 150×370 milímetros, en las perforaciones de los espaldares, y de 510×470 milímetros, en las perforaciones de las tapas laterales. Al realizar el estudio de la elaboración de una celda para un transformador de 1000 kVA, con ventilación por medio de perforaciones con malla IMT 20, se ve reflejado en los resultados un ahorro bastante favorable en el costo de fabricación de la celda, este ahorro se debe a la optimización del proceso de elaboración del punzonado.

Balance de los resultados obtenidos en las opciones de diseño

Por medio de estas perforaciones con malla IMT 20, se logra llegar a un total neto de área efectiva de ventilación

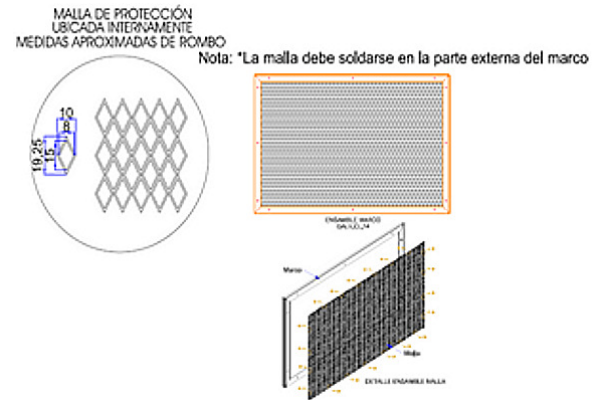


Figura 17. Plano de ensamble ventilación por malla IMT 20.

aproximado a los siete metros cuadrados, por lo que se garantiza la conservación de una temperatura óptima de trabajo para el transformador en condiciones no ideales. Teniendo en cuenta, entre otros parámetros, que se está tres veces por encima del área efectiva de ventilación, propuesta por la norma CODENSA CTS 518-2 para transformadores tipo seco que van desde 360 kVA hasta 800 kVA, además, dado que este es un transformador tipo seco de 1000 kVA y que el área efectiva de ventilación no está definida por la norma CTS 518-2, se puede concluir que para una celda para un transformador de 1000 kVA no es de mayor importancia si la cantidad de área efectiva de ventilación que se diseña, en este caso 7 m^2 , es muy grande ya que no se tiene un tope máximo al que se tenga que regir la fabricación metalmeccánica, siempre y cuando este entre los parámetros establecidos por las normas de protección IP.

Debido a su relativo bajo costo, garantía del correcto funcionamiento del equipo eléctrico y optimización en los tiempos de trabajo y ensamble, en comparación con las otras dos opciones anteriormente expuestas, se puede concluir que, debido principalmente a los factores anteriores, la mejor solución para optimizar el área efectiva de ventilación de una celda para transformador de 1000 kVA es la sustitución de agujeros punzonados y ventilación asistida por un sistema de mallas IMT 20, que es de mayor efectividad para el cliente y para la refrigeración del transformador, además de cumplir las normas de seguridad requeridas. Sin embargo se continúa con el estudio del área efectiva de ventilación para mejoras óptimas.

Matriz de calidad

Para llevar a cabo la mejora óptima, como primer paso se realiza una matriz QFD, o Despliegue de la función de calidad, el análisis se realiza con las tres opciones de diseño que fueron seleccionadas, estas son: Diseño por ventilación asistida, diseño por agujeros punzonados y diseño por ventilación con malla. El fin de esta matriz es tomar la mejor

decisión que permita a los clientes obtener lo que demandan y que luego, la empresa aplique en su fabricación la solución más óptima al problema de la ventilación de este tipo de celdas.

Luego, como segundo paso, para ejecutar de manera correcta la toma de decisiones, es necesario conocer cierto tipo de parámetros, como lo es la temperatura máxima que irradia el transformador y el lugar exacto en donde se ubica, para esto, primero se realiza el modelo del transformador de 1000 kVA en SolidWorks, ya que es bastante complicado hacer este tipo de geometría en el software ANSYS debido a su complejidad en la plataforma de dibujo, después es necesario que el transformador se modele con la menor cantidad de piezas sueltas que sean posibles, esto, con el objetivo de impedir la generación de errores al momento de impórtalo al software de análisis finitos ANSYS. Como paso final, los tres diseños a tener en cuenta para la mejora optima, se analizan mediante los cuadros de evaluación de soluciones ó matriz de decisión ponderada de soluciones, en el que se van descartando los diseños menos favorables, de acuerdo a lo ya analizado en la matriz QFD con los requerimientos del cliente y los requerimientos de diseño, hasta llegar a una única solución final, que será la correcta, optima y más efectiva de acuerdo a los parámetros más importantes a mejorar y la información recopilada a lo largo del proceso.

Matriz QFD (Quality Function Deployment) despliegue de la función calidad

Con este análisis QFD, se diseña un sistema en búsqueda de focalizar los diseños de la celda de transformador de 1000 kVA, para dar respuesta a los requerimientos de los clientes, es decir, alinear los parámetros que el cliente requiere con los parámetros bajo los cuales se está fabricando la celda en la compañía. La matriz QFD se distribuye como se muestra en la Fig. 18.

Análisis de la matriz QFD

- QUIEN: El cliente. El análisis QFD está dirigido a la satisfacción del cliente, este a su vez, establece una serie de requerimientos los cuales orientan a la compañía acerca de lo que él necesita.

- QUE: Requerimientos del cliente. A continuación se nombran los principales requerimientos que solicita el cliente para la realización de una celda para un transformador tipo seco.

1. Tiempo de fabricación corto.
2. Condiciones y medidas correctas.
3. Mejor calidad de protección.
4. Disminución de pérdidas de materia prima.
5. Alta confiabilidad.
6. Disminución de costos en mantenimiento.
7. Seguridad industrial.
8. Cumplimiento normas CODENSA.

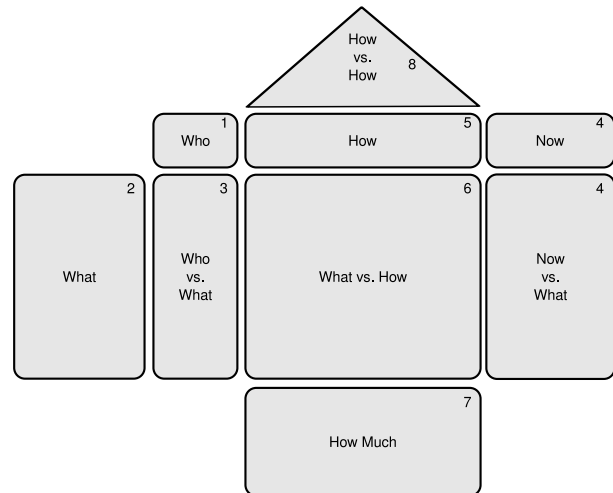


Figura 18. Casa de la calidad, también conocida como diagrama QFD.

9. Buena resistencia al entorno.
10. Construcción duradera.
11. Experiencia del fabricante.
12. Excelente circulación de aire.
13. Disipación del calor generado por el transformador.

- QUE VS QUE: En este paso se analizan los requerimientos del cliente con estos mismos y se establece una relación de importancia entre ellos, para esto se realiza un tipo de comparación donde el nivel de importancia más alto lo obtiene aquel requerimiento que este marcado con el número 1 y el nivel de menos importancia lo obtiene el marcado con el número 0 (tablas 1 y 2).

Tabla 1
Qué vs Qué (requerimientos del cliente).

	Cust. Requir. 1	Cust. Requir. 2	Cust. Requir. 3	Cust. Requir. 4	Cust. Requir. 5	Cust. Requir. 6	Cust. Requir. 7	Cust. Requir. 8	Cust. Requir. 9	Cust. Requir. 10	Cust. Requir. 11	Cust. Requir. 12	Cust. Requir. 13	PONDERADO	
Tiempo de fabricación corto	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3	3.840%
Condiciones y medidas correctas	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	9	11.538%
Mejorar la calidad de protección	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	8	10.256%
Disminuir pérdidas de materia prima	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	2.564%
Confiabilidad	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	11	14.103%
Disminuir costos en mantenimiento	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	4	5.128%
Seguridad industrial	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	10	12.821%
Cumplimiento normas CODENSA	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	12	15.385%
Mejor resistencia al entorno	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	5	6.410%
Construcción duradera	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	2.564%
Experiencia del fabricante	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4	5.128%
Excelente circulación de aire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	3	3.840%
Disipación del calor generado por el transformador	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	5	6.410%

De las tablas 1 y 2 se puede evidenciar que los requerimientos del cliente con mayor peso, y por ende de mayor importancia para el cliente son, las condiciones y medidas correctas, la mejor calidad de protección, la alta confiabilidad, la seguridad industrial, y la más importante, el cumplimiento de las normas CODENSA.

Tabla 2
Resultados obtenidos de la tabla Qué vs Qué.

Row #	Weight Chart	Relative Weight	Customer Importance	Maximum Relationship	Column #
					Direction of Improvement
					Functional Requirements
					Customer Requirements (Explicit and Implicit)
1	I	4%	3	9	Tiempo de fabricacion corto
2	IIII	12%	9	9	Condiciones y medidas correctas
3	IIII	10%	8	9	Mejor calidad de protección
4	I	3%	2	9	Disminución de pérdidas de materia prima
5	IIIIII	14%	11	9	Alta Confiabilidad
6	II	5%	4	9	Disminución de costos de mantenimiento
7	IIIIII	13%	10	9	Seguridad industrial
8	IIIIII	15%	12	9	Cumplimiento normas CODENSA
9	III	6%	5	9	Excelente resistencia al entorno
10	I	3%	2	9	Construccion duradera
11	II	5%	4	9	Experiencia del fabricante
12	I	4%	3	9	Excelente circulacion de aire
13	III	6%	5	9	Disipación del calor generado por el transformador

• AHORA VS QUE: En este paso se hace una comparación entre las opciones o conceptos que se tienen en el momento, analizando, de qué manera cada una de ellas cumple con los requerimientos del cliente, en donde 5 es la que más cumple y 0 la que menos cumple, todo esto para llegar a la selección de la opción correcta. Este cuadro también es llamado, Evaluación competitiva del cliente. Para llevarlo a cabo se definieron y se analizaron tres conceptos:

1. Ventilación asistida.
2. Ventilación por agujeros punzonados.
3. Ventilación por malla IMT 20.

Los conceptos con mejor puntuación fueron el dos y el tres, ventilación por agujeros punzonados y ventilación por malla IMT 20 respectivamente.

• COMO: Requerimientos de diseño: Los requerimientos de diseño también son parte importante en el desarrollo del proyecto, ya que existe una serie de parámetros necesarios para la fabricación que no se pueden pasar por alto, estos requerimientos pueden ser estructurales, de transmisión, de

consumo y de control. A continuación se nombran los requerimientos de diseño para realizar una celda para un transformador tipo seco:

1. Total hermeticidad.
2. Resistencia mecánica SY.
3. Índice de protección.
4. Ventilación.
5. Consumo de energía.
6. Fuente de energía.
7. Reducción de volumen.
8. Materiales aislantes.
9. Alarmas por sobrecalentamiento.
10. Distribución de los componentes.

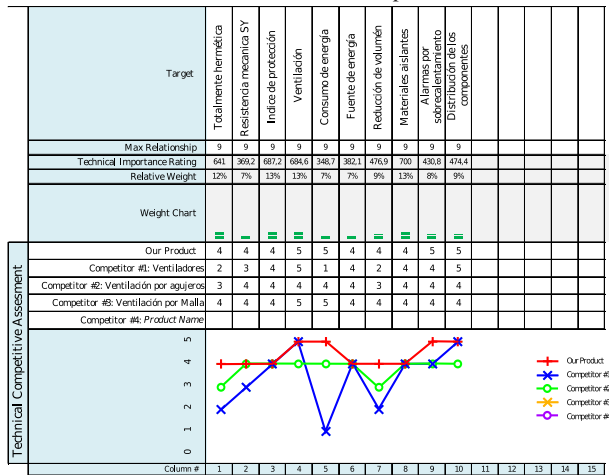
• QUE VS COMO: En este paso de la matriz QFD se estudia el tipo de relación que existe entre los requerimientos del cliente y los requerimientos de diseño, se establece si la relación es fuerte, moderada, o si entre estas no hay ningún tipo de relación, luego se realiza la dirección de la mejora donde se escogen los requerimientos de diseño a maximizar, a minimizar y los que son objetivos en el proyecto, con la finalidad de cumplir a completamente con los requerimientos expuestos por el cliente (tabla 3).

Tabla 3
Qué vs Cómo, relación entre los Req. del cliente y los Req. de diseño.

Customer Requirements (Explicit and Implicit)	Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Direction of Improvement	▲	◇	▲	▲	▼	▲	▼	▲	◇	◇
Functional Requirements	Total hermeticidad	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Resistencia mecánica SY	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Índice de protección	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Ventilación	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Consumo de energía	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Fuente de energía	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Reducción de volumen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Materiales aislantes	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Alarmas por sobrecalentamiento	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Distribución de los componentes	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Tiempo de fabricacion corto	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Condiciones y medidas correctas	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Mejor calidad de protección	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Disminución de pérdidas de materia prima	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Alta Confiabilidad	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Disminución de costos de mantenimiento	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Seguridad industrial	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Cumplimiento normas CODENSA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Excelente resistencia al entorno	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Construccion duradera	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Experiencia del fabricante	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Excelente circulacion de aire	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Disipación del calor generado por el transformador	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

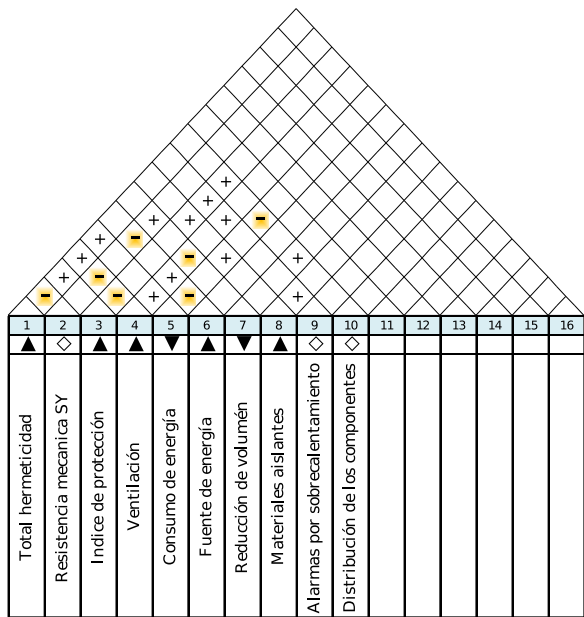
• CUANTO: En esta parte, se realiza la evaluación técnica de la competencia, a diferencia del AHORA VS QUE, aquí son evaluados los requerimientos de diseño con las opciones o conceptos escogidos, esto, para determinar cuál de ellos es el más competitivo o el mejor para cumplir con los requerimientos de diseño, requerimientos que se ven aquí como objetivos. Para este caso, se puede apreciar que la mejor opción, está orientada hacia la ventilación por malla, esto debido al puntaje que obtuvo en el análisis (tabla 4).

Tabla 4
Cuánto. Evaluación técnica de la competencia.



• COMO VS COMO: Por último, en el techo del QFD, se analizan los requerimientos de diseño con estos mismos, se indica si tienen una correlación, positiva, negativa o de ningún tipo (tabla 5).

Tabla 5
Cómo vs Cómo. Correlaciones entre los requerimientos de diseño.



Mejora óptima (optimización)

Por último, se procede a realizar una mejora optima de las soluciones planteadas en el diseño CAD-FEM, con el fin de enfocar el diseño final a una mejora continua

de los parámetros de fabricación y que no deje a un lado el buen funcionamiento de los equipos eléctricos, la seguridad del personal que tendrá relación con el producto final, la normatividad y demás parámetros de producción y requerimientos del cliente que llevarán a la fabricación de un producto optimo y seguro.

Dicha mejora optima se hace mediante el análisis de los conceptos y alternativas, que se califican de acuerdo al grado de cumplimiento con los requerimientos del cliente de cada una de ellas, para al final llegar a tener una solución de calidad, mejorada óptimamente, por los parámetros en los cuales los diseños descartados se destacaban, que sea segura, productiva, que cumpla con la normatividad explicada con anterioridad y que no genere inconformidad por parte del cliente, debido a su no cumplimiento técnico en el desarrollo de sus funciones.

Se debe tener en cuenta que los conceptos que estarán sujetos al análisis de los resultados de la mejora óptima son:

- Concepto 1: ventilación asistida por ventiladores eléctricos.
- Concepto 2: ventilación por agujeros punzonados en las tapas.
- Concepto 3: ventilación por agujeros con malla IMT 20.

Análisis de los resultados de la mejora óptima

Tomando como referencia los resultados de la matriz QFD, se procede a realizar la mejora optima del proceso de diseño y fabricación del área efectiva de ventilación de la celda para transformador tipo seco de 1000 kVA, realizando una tabla de evaluación de las soluciones, en esta tabla se analizan los requerimientos del cliente inicialmente con los tres conceptos que se tienen (ventilación asistida, ventilación por agujeros punzonados y ventilación por mallas IMT 20), de estos tres conceptos se pondera la calificación referente a cuál de estos cumple con mejor satisfacción los requerimientos del cliente, paso a seguir, se declina el concepto que menor puntaje tenga, y los dos restantes avanzan al siguiente paso, donde se convierten en alternativas, no sin antes realizar una mejora del diseño con relación al concepto excluido.

Paso a seguir, se califican de nuevo en la tabla de alternativas con las mejoras realizadas y se escoge una solución final mejorada, que en el caso de nuestro problema de diseño es el concepto 3 (ventilación por agujeros con malla IMT 20), que será enriquecida a su vez por la alternativa eliminada para tener una solución final evaluada, eficiente que cumpla con los requerimientos del cliente de la mejor forma posible teniendo en cuenta los estándares y parámetros de fabricación.

Conclusiones

Se analizó térmicamente por elementos finitos la transferencia de calor de un transformador tipo seco de

1000 kVA, se diseñó y realizó una mejora óptima, del área efectiva de ventilación de una celda para este tipo de transformadores, garantizando el funcionamiento óptimo de los equipos eléctricos.

Al finalizar el proceso de análisis, estudio térmico, investigación de las garantías de los clientes evaluando los aspectos a mejorar y el estudio de la mejora óptima de los conceptos de la fabricación industrial, se llega a dar el cumplimiento de los objetivos propuestos en la presente investigación, esto debido a que:

- Se evidencia recurrentemente que se analizó por elementos finitos, el comportamiento térmico de un transformador de 1000 kVA, observando los fenómenos de conducción (en la búsqueda de la temperatura máxima de trabajo), y los fenómenos de convección (en la manera en que se ve afectada la temperatura máxima de trabajo con una temperatura ambiente, dando lugar a un entorno convectivo), para de esta manera continuar con el desarrollo del siguiente objetivo.

- Se evidencia el cálculo del área efectiva de ventilación, de acuerdo a los datos entregados luego del análisis térmico, dando como resultado 3 opciones de fabricación, con 3 diferentes tipos de elementos industriales (ventiladores, agujeros punzonados, agujeros con malla IMT 20), para de esta manera llevar a cabo el siguiente objetivo.

- Se evidencia el diseño y la distribución, del área efectiva de ventilación, luego de tener el valor de la temperatura óptima de funcionamiento del equipo eléctrico (transformador de 1000 kVA), resultante del análisis FEA, y de esta forma se indaga en la manera de cumplir con el siguiente objetivo, realizar una mejora óptima del área de ventilación, con base en los requerimientos del cliente y la capacidad de diseño empresarial.

- Se evidencia la optimización del diseño del área efectiva de ventilación, realizada con el objetivo de mejorar óptimamente el diseño, de acuerdo a los requerimientos del cliente y los requerimientos de diseño, maximizando y minimizando los requerimientos de diseño más importantes (mostrados en la tabla del que vs como figura 11 de la matriz QFD), en la búsqueda del cumplimiento del objetivo primordial (mejorar óptimamente el área efectiva de ventilación), garantizando el óptimo funcionamiento del equipo eléctrico (transformador de 1000 kVA en un encerramiento tipo celda).

- Se evidencia la comparación de los resultados del diseño (basados en el análisis por elementos finitos), mediante el despliegue de la función de calidad y la matriz de decisión ponderada de soluciones, para llegar al resultado final del estudio, que da certeza del cumplimiento de la investigación, que es la fabricación de la celda con ventilación por medio de agujeros con malla IMT 20.

Como conclusiones específicas se puede anotar:

- Se observó y analizó el comportamiento térmico de la temperatura y la convección térmica de un transformador de 1000 kVA mediante el modelado en un software de análisis por elementos finitos (ANSYS-WORKBENCH- thermal electric).

- Se calculó el valor del área efectiva de ventilación para una celda de transformador de 1000 kVA teniendo en cuenta el modelado en ANSYS y la experiencia en la fabricación empresarial.

- Se diseñó la distribución del área efectiva de ventilación con base en el análisis térmico.

- Se realizó una mejora óptima al área efectiva de la ventilación con malla IMT 20 como mejor opción, de la celda, comparando los resultados del diseño y fabricación empresarial con el balance de los resultados del comportamiento térmico en ANSYS.

Nomenclatura

- BT: baja tensión.
- MT: media tensión.
- IP: hace referencia al estándar internacional *IEC 60529 Degrees of Protection* utilizado con mucha frecuencia en los datos técnicos de equipamiento eléctrico y/o electrónico.
- kVA: (kilovoltiamperio) - característica de potencia aparente en transformadores.
- CAD: (computer-aided-design), diseño asistido por computador.
- Lamina C.R.: lamina acero *cold rolled*.
- F.E.A.: (*Finite Element Analysis*) análisis por elementos finitos.
- NEMA: *National Electrical Manufacturers Association*.
- ANSI: *American National Standards Institute*.
- IMT: IMT 20: (Numero del troquel) Distancia en mm entre centros de uniones de las mallas.
- QFD: *Quality Function Deployment* o despliegue de la función calidad.
- Envoltente de MT: Expresión genérica que designa los gabinetes, tableros de MT. Abarca también la estructura que permite asegurar la protección de los diversos componentes y de los dispositivos en MT contra ciertas influencias externas y la protección contra contactos directos.
- Juego de barras: Expresión genérica que designa el conjunto de conductores rígidos de distribución de corriente eléctrica en el interior de una envoltente de BT ó MT.
- Sistema: En el sentido térmico de la expresión, es la región del espacio que se toma en consideración y en la que se estudian los procesos térmicos y su evolución. Está limitado por las fronteras, reales o ficticias, que según el tipo de intercambio que se produzca en su interior nos permite distinguir entre los sistemas aislados (sin ningún intercambio de energía ni de materia a través de su frontera), sistemas cerrados (únicamente se intercambia energía a través de su

frontera y sistemas abiertos (eventual intercambio de materia y energía a través de su frontera.

- Termodinámica: Parte de la Física que trata de la generación, transmisión y utilización del calor. Aquí, se considera el aspecto de la transmisión, exponiendo sintéticamente las leyes de transferencia (conducción, convección y radiación) y de las nociones sobre los métodos para su evaluación.

Referencias

- ANSI. (2004). *ANSI/IEC 60529-2004 degrees of protection provided by enclosures (ip code)*. On line.
- CODENSA S.A. ESP. (2009, Octubre). *CTS-518-2 celda para transformador tipo seco (nivel 2)*. On line.
- GIM Ltda. (2012). *Especificaciones mt*. Impreso. (listado maestro de documentos de GIM Ltda)
- Holman, J. (1998). *Transferencia de calor*. McGraw-Hill.
- Kilind, C. (1988, Julio). *Estudio térmico de los tableros eléctricos bt*. Impreso. (Cuaderno Técnico No 145) Nacional de Transformadores Tesla. (2012). *Catalogo nacional de transformadores tesla*. Impreso. (Nacional de Transformadores Tesla)
- Roldan, F., y Bastidas, U. (2002). Estudio experimental y por análisis de elementos finitos del factor de concentrador de esfuerzo producido por un agujero en una placa plana. *Dyna*, 69(137), 1-8.
- Salas, M., Pérez, J., y Sepúlveda, P. (2006). *Análisis térmico de un motor marino mediante el método de elementos finitos*. Tesis de Master no publicada, Instituto de Ciencias Navales y Marítimas, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.
- Staff, E. (2003). *Circuitos magnéticos y transformadores*. Reverté S.A.
- Ullman, D. (2009). *The mechanical design process* (4.^a ed.). McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.