

DETERMINAÇÃO DE LIMITES DE CARREGAMENTO DE TRANSFORMADORES LEVANDO EM CONTA MODELOS TERMODINÂMICOS E ANÁLISE TRIDIMENSIONAL 3D: ENFOQUE PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

Henrique Oliveira Henriques, Márcio Zamboti Fortes, Carlos Eduardo Vizeu Pontes, Mauricio Caldora Costa, Guilherme Gonçalves Sotelo, Jonaylton Moura Souza,

RESUMO:

Este artigo apresenta os estudos realizados para desenvolver um modelo tridimensional em elementos finitos de um transformador de potência de 30/40 MVA, verificando o seu comportamento térmico em função da temperatura ambiente e de sua curva de carga, comparando os resultados de simulação com valores obtidos a partir de medições de temperatura realizadas no topo do óleo, no ponto mais quente dos enrolamentos e em pontos externos do tanque e dos radiadores. A modelagem desenvolvida faz parte de um conjunto de ações e pesquisas realizadas com o objetivo de determinar os limites de carregamento para as unidades transformadoras de forma otimizada, de modo a estabelecer um critério menos conservativo para a expansão do sistema distribuidor, com conseqüente redução de custos no Plano de Obras da empresa.

PALAVRAS-CHAVE: Transformadores; Limites de carregamento; Elementos Finitos; Modelagem 3D; Critérios de Planejamento.

INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são – e continuarão a ser – o elemento mais dispendioso no processo de expansão das subestações do sistema elétrico. As empresas distribuidoras alocam milhões de reais no seu Plano de Expansão para a aquisição destes equipamentos que, devido ao seu elevado custo, devem ser explorados ao máximo em sua capacidade de transporte de energia e, ao mesmo tempo, ter garantida sua integridade durante todo o período esperado para sua vida útil. A garantia da integri-

-dade está diretamente relacionada com os limites de temperatura a que seus isolamentos poderão ser submetidos durante as solicitações em regime normal e em condições de emergência.

O presente trabalho apresenta um modelo para o comportamento térmico de transformadores de potência, os quais são utilizados pelas distribuidoras de energia, via de regra, em ciclos diários típicos de operação e em regiões com elevada concentração de carga.

O modelo desenvolvido foi implementado

Henrique Oliveira Henriques, UFF ,riqueh2o@globocom

Márcio Zamboti Fortes, UFF ,mzf@vm.uff.br

Carlos Eduardo Vizeu Pontes, LIGHT S.E.S.A., carloseduardo.vizeu@light.com.br

Mauricio Caldora Costa, ELECTROMAGETICS, mcosta@electromag.com.br

Guilherme Gonçalves Sotelo, UFF, gsotelo@id.uff.br

Jonaylton Moura Souza, UFF , jonaylton@hotmail.com

Bruno Soares Moreira Cesar Borba, UFF ,bborba@id.uff.br

Vitor Hugo Ferreira, UFF ,vhferreira@id.uff.br

num software comercial que utiliza o método de elementos finitos (MEF) em 3D, que permite avaliar o gradiente de temperatura estabelecido pelas fontes de calor (enrolamento, núcleo ferromagnético, radiação solar) e pela dinâmica da circulação do óleo, tanto no tanque quanto nos radiadores (COSTA, 2010) (PONTES et al., 2013).

A modelagem termodinâmica do transformador de potência está apresentada com detalhes em (SUSA, 2005). Para a dinâmica do óleo no circuito fechado tanque/radiador é utilizado um software complementar que simula o fluxo do isolante líquido entre as peças que constituem a parte ativa e a correspondente troca de calor da massa circulante. Nota-se pelo modelo desenvolvido, às vezes de forma intuitiva e às vezes não, a localização dos pontos quentes (hotspot) no equipamento, tendo-se uma excelente visão do que se passa dentro do equipamento em termos de estresse térmico.

O trabalho considerou um parque correspondente a cerca de 300 equipamentos de 20 a 40 MVA instalados em 95 subestações que suprem diferentes regiões dentro da área de concessão da empresa. Além das delimitações geofísicas e estanqueidade da troca de carga pela rede de distribuição, as regiões são também caracterizadas pela curva de carga típica dos consumidores agregados.

Outro ponto relevante do trabalho é a clusterização dos equipamentos em famílias (biótipos) que o representam termodinamicamente. Diante da quantidade de equipamentos do parque, da diversidade de fabricantes e potências nominais, e da consequente impossibilidade de se ter um modelo 3D para cada transformador individualmente, concluiu-se pela necessidade de definir transformadores-padrão (biótipos) para representar cada família.

A distribuidora tem como um dos critérios para expansão do seu sistema de subestações o critério chamado “Capacidade

Firme”, o qual estabelece que, após uma contingência associada à perda de uma unidade transformadora (Condição N-1), as remanescentes ficarão com uma sobrecarga de, no máximo, 30%. Este critério orientativo do Planejamento foi estabelecido a partir de ensaios de aquecimento realizados pela distribuidora nos meados dos anos 90, e permanece, até hoje, vigente para todo o seu sistema, independente da região em que se encontra a subestação. Tal ensaio, quando realizado, demonstrou existir uma folga apreciável nas condições pressupostas de operação das unidades, tanto no que se refere às condições de contorno (temperatura ambiente, velocidade do vento, radiação solar, etc.) quanto à fonte interna de calor (inércia térmica, curva de carga, etc.).

Outro ponto importante que é abordado neste trabalho é a questão relativa à ventilação forçada da unidade, que é ativada a partir de um determinado valor de temperatura interna. É demonstrado pelas simulações que a ventilação forçada tem um impacto relevante na refrigeração do óleo isolante e, conseqüentemente, da refrigeração da máquina como um todo. A simulação e visualização 3D permite entender as constantes de tempo envolvidas e avaliar o melhor momento para a entrada em operação da ventilação forçada, partindo do pressuposto que a unidade possa entrar em regime de sobrecarga no pior momento da curva de carga da região.

É proposto no trabalho um novo critério de expansão para as subestações da distribuidora, denominado “Critério de Capacidade Firme Local”, que leva em conta tanto as características do transformador mais restritivo da subestação quanto as características das cargas da região em que ele se encontra.

METODOLOGIA

Foi desenvolvido um modelo computacional em 3D de um transformador de potência utili-

-zando o software FLUX3D®, baseado no MEF, dedicado ao cálculo térmico. O modelo foi desenvolvido considerando-se as principais características geométricas e físicas do transformador, tendo sido modelados o núcleo, os enrolamentos de alta e baixa tensão e o tanque do transformador. Estudo similar em transformadores de distribuição está apresentado em (CORDOBA et al., 2019).

Com relação às fontes de calor contempladas no modelo, foram consideradas as perdas no núcleo (perdas em vazio) e as perdas nos enrolamentos, sendo estas proporcionais à variação da carga alimentada pelo transformador ao longo do tempo. As correntes induzidas no tanque do transformador e os efeitos da radiação solar não foram consideradas no modelo, apesar de representarem fontes de calor existentes na prática.

A dissipação de calor do transformador para o meio ambiente foi contemplada através da modelagem dos fenômenos de convecção e de radiação térmica, levando-se em consideração a variação da temperatura ambiente ao longo do dia. Fatores relacionados à umidade relativa do ar e ao eventual vento soprando sobre a superfície do transformador não foram contemplados no modelo implementado.

Ainda no que se refere à dissipação de calor do transformador, considerou-se no modelo a troca de calor entre os enrolamentos e o óleo do tanque através do fenômeno de convecção. Buscou-se incorporar ao modelo o efeito de refrigeração do óleo resultante da ação do radiador ligado do transformador (sem ventilação forçada).

DESCRIÇÃO DO TRANSFORMADOR E DO MODELO UTILIZADO NA ANÁLISE

O transformador utilizado para o desenvolvimento do modelo em elementos finitos foi o transformador trifásico de 30/40 MVA, com

tensão nominal de 138/13,8kV e ligação Δ/Y . Este transformador dispõe de equipamento de ventilação forçada das placas dos radiadores e sua denominação 30/40 MVA se refere à carga nominal quando a ventilação forçada está desativada (30 MVA) e à carga nominal quando a ventilação forçada está ativada (40 MVA). Os valores de temperatura do topo do óleo para os quais os ventiladores entram em operação são 65 °C para o banco de ventiladores nº 1 (3 ventiladores ligados apenas) e 75 °C para o banco de ventiladores nº 2 (todos os 6 ventiladores ligados). O modelo foi desenvolvido nos softwares FLUX3D® e AcuSolve® dedicados à simulação multifísica do transformador nas grandezas eletromagnéticas e térmicas. O desenvolvimento do modelo foi realizado em diferentes etapas, envolvendo a definição da geometria, da malha de elementos finitos e das propriedades físicas, conforme descrito em sequência neste texto.

GEOMETRIA

Visando permitir uma alteração simples e rápida das dimensões do modelo do transformador e viabilizar a análise de outros transformadores que possuam topologia semelhante, a geometria do modelo foi criada utilizando-se os parâmetros geométricos de um transformador mais comum. Desta forma, a alteração do valor de qualquer um desses parâmetros implica na alteração automática da geometria do transformador a ser analisado.

A Figura 1 mostra a geometria criada no software FLUX3D, na qual é possível identificar o núcleo do transformador (azul), as bobinas dos enrolamentos de alta (vermelho) e baixa tensão (amarelo) e as linhas que descrevem o tanque do transformador. Observa-se na Figura 1 que os enrolamentos foram modelados como sendo estruturas cilíndricas contínuas, ou seja, sem o espaçamento entre espiras existente na prática. Esta simplifi-

-ção é justificada pela ausência de detalhes da geometria dos enrolamentos e, principalmente, pelo aumento significativo do esforço computacional caso todas as espiras dos enrolamentos fossem modeladas individualmente. Esta mesma observação é válida para a modelagem do núcleo que, diferentemente do caso real, não foi utilizada uma

geometria com estrutura laminada, ou seja, constituída por chapas milimétricas de aço. No entanto, a laminação do núcleo pode ser considerada no cálculo das perdas do transformador através de formulação disponível no software FLUX3D especificamente para esta finalidade.

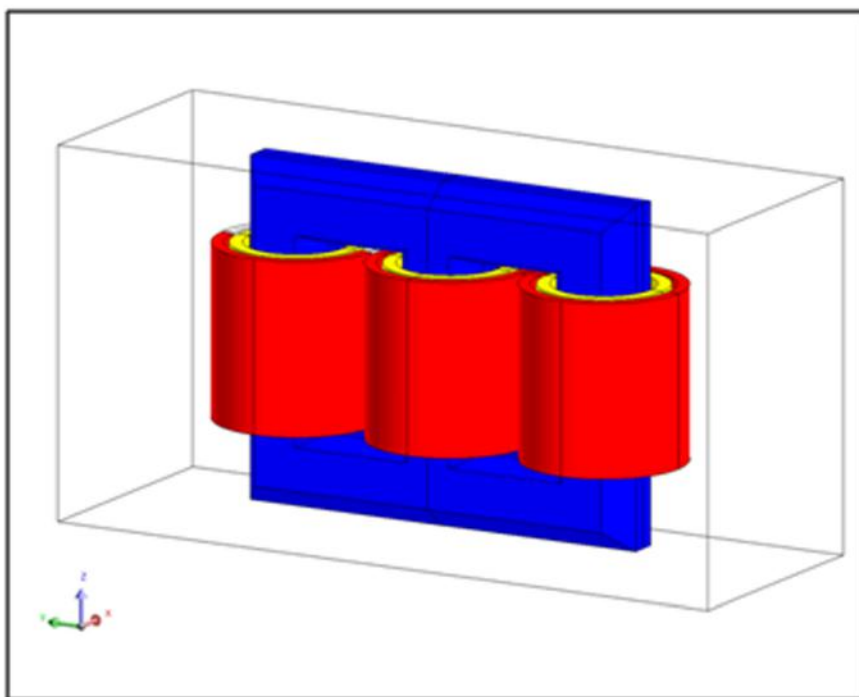


Figura 1 - Geometria do modelo Eletromagnético

É importante ressaltar que, devido à simetria existente entre as partes do transformador e a distribuição de temperatura também simétrica, a geometria do transformador utilizada no modelo de simulação térmica considerou apenas $\frac{1}{4}$ da geometria apresentada na Figura 1. Esta simplificação foi feita visando reduzir o tempo de simulação sem comprometer a qualidade dos resultados, uma vez que o fenômeno físico observado permite tal consideração.

Um outro elemento importante adicionado a este modelo de simulação foi o radiador que faz a troca de calor do óleo quente do transformador com o meio ambiente. Devido à sua geometria complexa, formada por várias aletas de pequena espessura quando comparada às dimensões das demais partes do

transformador, o radiador foi modelado como sendo um tanque cilíndrico onde a troca de calor com o ar externo é feita através de suas paredes. Para se obter uma melhor representação deste componente, foi considerado um radiador composto por seis tanques de cada lado do transformador (três tanques em $\frac{1}{4}$ de geometria), equivalente ao número de saídas de óleo presentes no transformador real, conforme mostra a Figura 2.

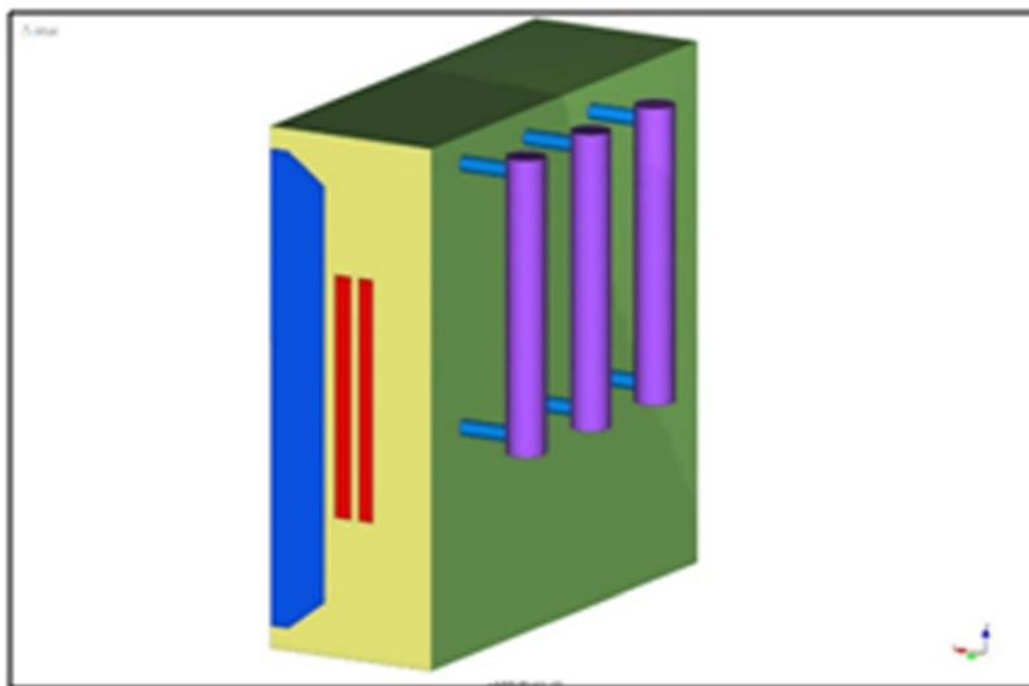


Figura 2 - Vista dos cilindros representando os radiadores do transformador.

A Figura 3 apresenta as principais dimensões físicas do transformador considerado na simulação:

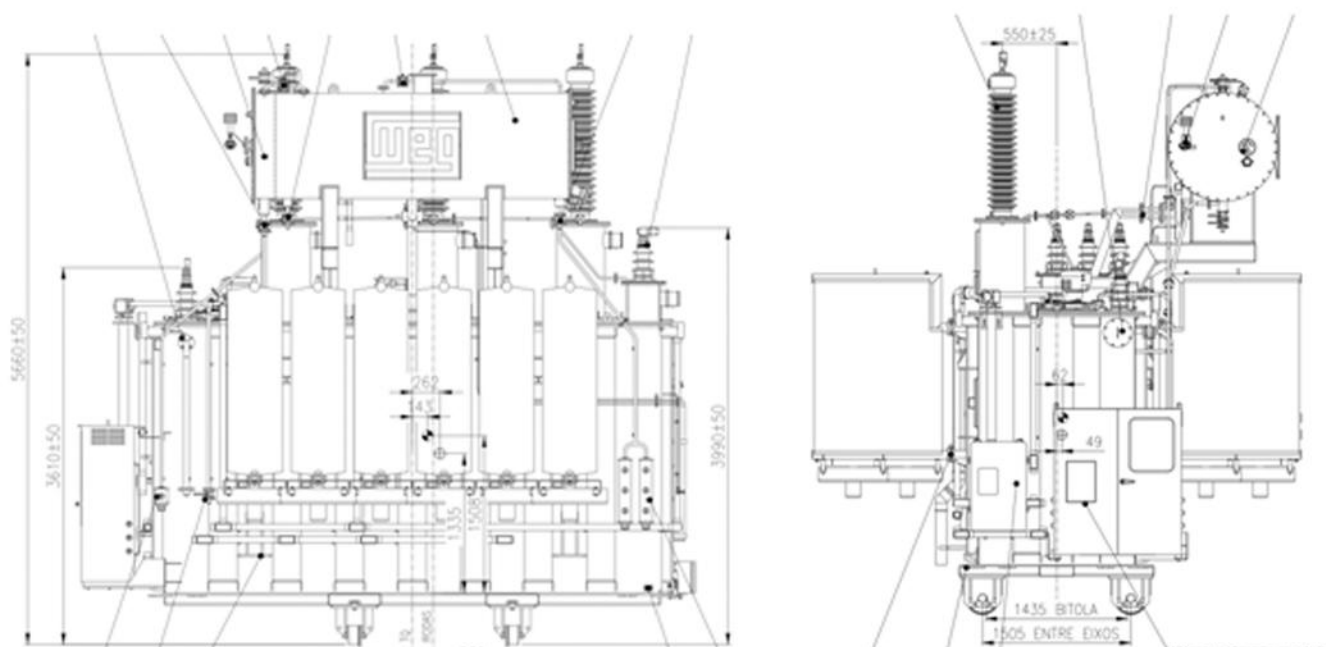


Figura 3 - Principais dimensões do transformador em estudo.

MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A geração da malha de elementos finitos é uma das etapas mais importantes no desenvolvimento do modelo, uma vez que a qualidade dos resultados obtidos está diretamente relacionada com a qualidade dos elementos da malha.

Os softwares FLUX3D® e AcuSolve® utilizados na modelagem geram os elementos finitos automaticamente a partir da densidade de elementos definida preliminarmente para as diferentes faces e regiões que compõem o modelo. Conforme discutido anteriormente, algumas simplificações foram incorporadas à geometria do modelo (em particular ao

núcleo e aos enrolamentos) visando garantir a qualidade da malha de elementos finitos sem um aumento exagerado no tempo de simulação. Os cilindros do radiador também foram considerados com uma geometria simplificada, uma vez que o detalhamento da geometria de todas as aletas acarretaria um número extremamente elevado de elementos.

Foram utilizados elementos tetraédricos de segunda ordem na malha, cuja distribuição nas faces do domínio (óleo, núcleo e enrolamentos) pode ser vista na Figura 4, totalizando aproximadamente 176.000 elementos de volume e 315.000 nós em $\frac{1}{4}$ da geometria completa do transformador.

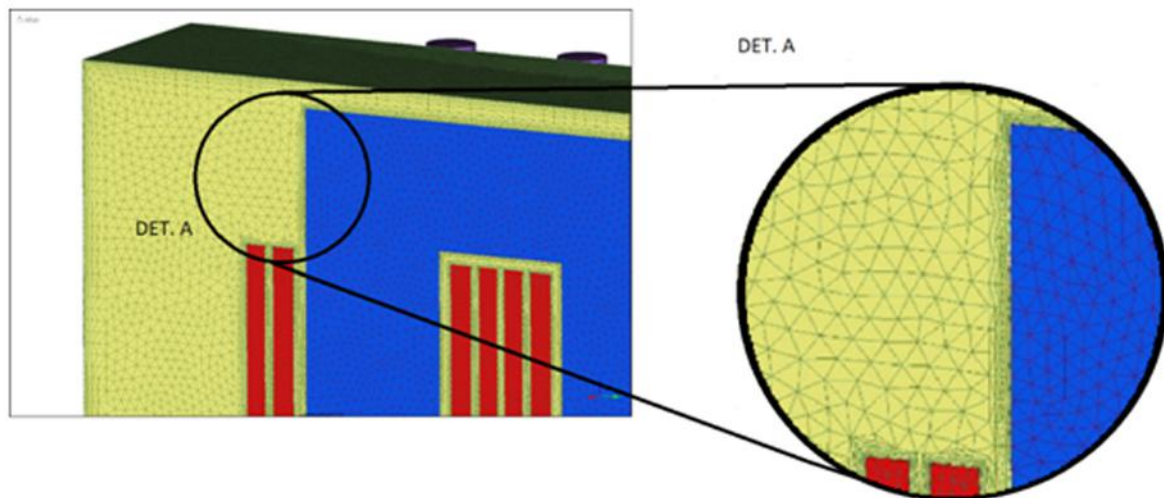


Figura 4 – Malha de Elementos Finitos do Modelo do Transformador.

Mesmo com as simplificações de geometria inseridas no modelo, a simulação térmica envolvendo Dinâmica de Fluidos (CFD) exige um refinamento maior da malha, sobretudo nas regiões próximas às paredes do tanque, bobinas e núcleo, onde ocorre a troca de calor dessas partes com o óleo através do fenômeno de convecção térmica. Nessas regiões de contato entre fluido e sólido requer a utilização de uma malha formada por camadas de elementos, de modo a modelar corretamente o fenômeno de escoamento do fluido. Uma referência de pesquisa experimental sobre este comportamento está

apresentada em Córdoba et al.(2018).

PROPRIEDADES FÍSICAS

A caracterização física do modelo representa a etapa na qual é feita a escolha da formulação física apropriada e a criação das regiões do domínio de estudo, com a definição de suas respectivas propriedades físicas.

Com relação à formulação física, foi considerado inicialmente o transformador operando em regime permanente, em sua carga nominal de 30 MVA (ventilação forçada desa-

-tivada), sem variação da temperatura ambiente (mantida constante em 40 °C). Neste caso, utilizou-se a análise “SteadyState” disponível no software AcuSolve®, a qual leva em consideração o deslocamento do óleo por convecção natural e o fluxo de calor entre as diferentes partes que compõem o transformador. Com relação ao tipo de escoamento do óleo no interior do transformador, utilizou-se no modelo de simulação o escoamento laminar, uma vez que o tipo de refrigeração adotado é o ONAN (Óleo Natural, Ar Natural).

No que diz respeito às regiões do domínio de estudo, seis principais regiões do transformador foram definidas: núcleo, enrolamento primário, enrolamento secundário, óleo, tanque e radiador. Para cada uma dessas regiões, foram definidas propriedades físicas visando à caracterização térmica observada no caso real.

O núcleo foi definido como sendo uma região com condutividade térmica igual à do aço (150 W/m.K), com fonte de calor equivalente às perdas em vazio do transformador, de valor igual a 20 kW. Este valor equivale a uma perda da ordem de 15 % das perdas totais do transformador quando ele está com carregamento de 30 MVA (ventilação forçada desativada).

Os enrolamentos de alta e baixa tensão foram considerados como sendo regiões com condutividade térmica igual à do cobre (394 W/m.K) e capacidade térmica volumétrica de valor igual a 3,52E6 J/m³.K. A fonte de calor nos enrolamentos foi calculada a partir das perdas Joule nos enrolamentos, sendo proporcional à resistência elétrica do enrolamento e à corrente que circula pelo enrolamento em um determinado instante de tempo (que deve ser obtida a partir da curva de carga do transformador).

As perdas nos enrolamentos do transformador modelado, para a situação de carga nominal de 30 MVA (ventilação forçada desativada), é estimada como sendo igual a 112,5

kW. Assim sendo, é possível determinar o valor das perdas no cobre para as diferentes condições de carga do transformador.

O óleo foi caracterizado como uma região com condutividade térmica equivalente à do óleo mineral utilizado em transformadores, igual a 0,1262 W/m.K. A constante térmica do óleo é caracterizada por sua capacidade térmica volumétrica, a qual é resultado do produto entre o calor específico do óleo (2100 J/kg.K) e sua densidade (848 kg/m³). Além disso, o óleo foi considerado no modelo com expansividade de valor igual a 0,00064 °C⁻¹, de modo a contemplar o fenômeno de convecção natural através do modelo de Boussinesq.

O tanque representa a região do transformador em contato com o ar, com a qual ocorre a troca de calor por convecção e radiação. No caso da convecção, a densidade de fluxo de calor que é dissipada do tanque para o ar depende da temperatura do ar imediatamente em contato com o tanque e do coeficiente de troca de calor por convecção h [W/m²K], conforme indicado na Equação (1). A troca de calor com o ar ambiente foi considerada através da definição do coeficiente de convecção natural em toda as paredes do tanque. Ressalta-se que o tanque foi considerado como sendo uma região sem fonte de calor, ou seja, não foram consideradas as perdas geradas pelas correntes induzidas em suas paredes ou mesmo a radiação solar incidente durante o período diurno.

$$\vec{\varphi} = -h(T_s - T_a)$$

Onde:

φ - densidade de fluxo de calor (normal à superfície) [W/m²]

h - coeficiente de troca de calor por convecção [W/m²K]

T_s - temperatura da parede do tanque [K]

T_a - temperatura do ar [K]

Além da troca de calor por convecção entre as paredes do tanque e o ar externo, o modelo desenvolvido contempla também a dissipação de calor dos enrolamentos para o óleo por convecção natural. Para tanto, foram definidas regiões referentes às diferentes faces dos enrolamentos no software AcuSolve, que calcula e contempla automaticamente o fenômeno de troca de calor por convecção, sem a necessidade de se calcular previamente os valores dos coeficientes de convecção envolvidos na troca de calor entre essas partes do transformador.

Finalmente, os radiadores foram considerados no modelo de simulação como sendo uma região onde a superfície dos cilindros em contato com o ar ambiente dissipa uma determinada quantidade de potência, que foi definida de modo a se obter o regime térmico no interior do tanque do transformador em função do seu carregamento. Exemplo de avaliação de carregamento de unidades

transformadoras está destacado em GESU-ALDI Jr.et al. (1987).

RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados obtidos do modelo de simulação para o caso do transformador operando em regime permanente, na condição de carga nominal referente à potência de 30 MVA (ventilação forçada desativada) com temperatura ambiente a 40°C, considerando as perdas no núcleo em vazio descritas anteriormente, assim como a dissipação de calor pelos cilindros que modelam o radiador.

A Figura 5 apresenta o mapa de cores de temperatura na superfície dos enrolamentos e do núcleo do transformador onde é possível observar que a região mais quente está nas bobinas, onde a temperatura está próxima a 105 °C. A Figura 6 apresenta os valores de temperatura na superfície do núcleo.

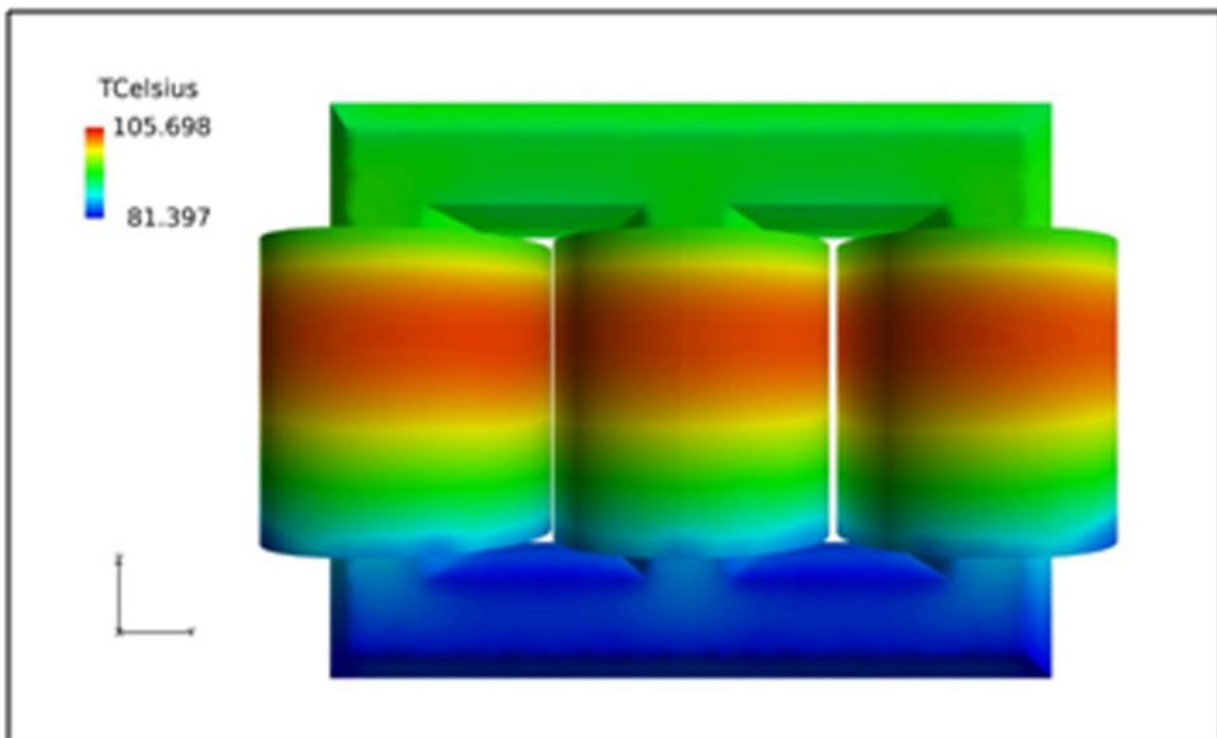


Figura 5 – Temperatura do núcleo e dos enrolamentos do transformador – 30 MVA – 40°C.

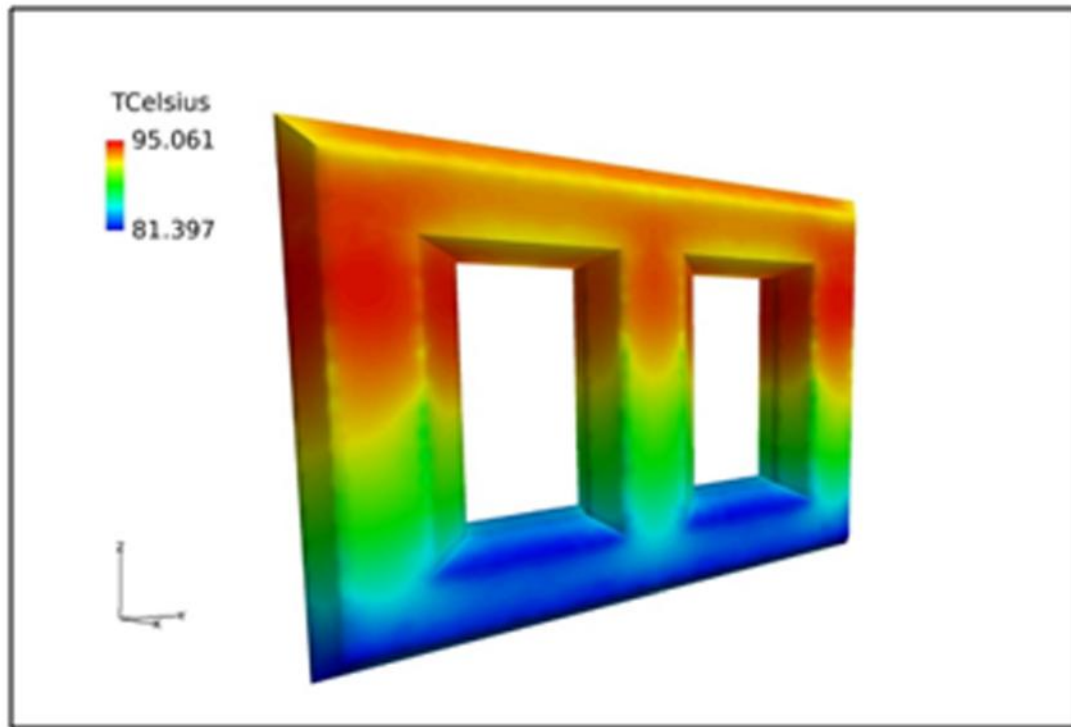


Figura 6—Temperatura na superfície do núcleo do transformador – 30 MVA – 40°C.

A Figura 7 apresenta o mapa de cores de temperatura ao longo de um plano vertical no tanque do transformador onde é possível verificar a variação da temperatura do óleo desde a base do transformador até o topo.

Observa-se a partir da Figura 7 que a temperatura no topo do óleo é de aproximadamente 91°C, ou seja, da ordem de 14,5°C abaixo da temperatura do ponto mais quente do transformador.

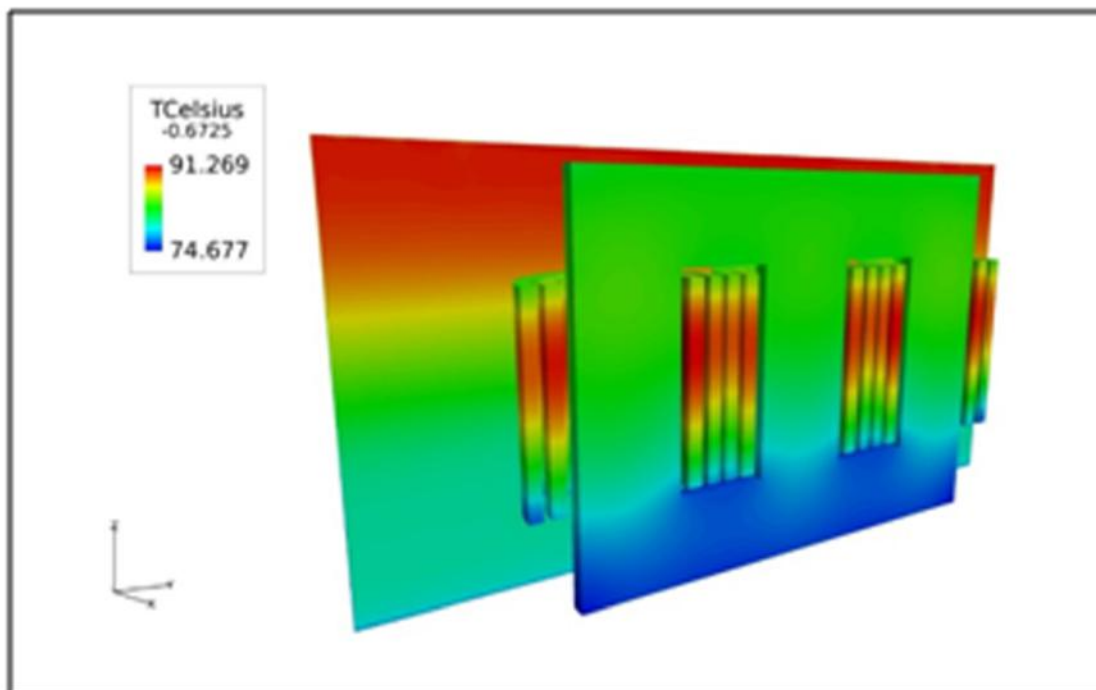


Figura 7 – Variação da temperatura do óleo no interior do tanque do transformador – 30 MVA – 40 °C.

Na Figura 8 são apresentados os vetores de fluxo do óleo nos dutos de entrada e de saída dos cilindros do radiador. A legenda dessa figura representa o valor de temperatura desses vetores, sendo possível observar

uma variação de temperatura de aproximadamente 17 °C entre a temperatura do óleo na entrada do radiador e a temperatura média do óleo na sua saída.

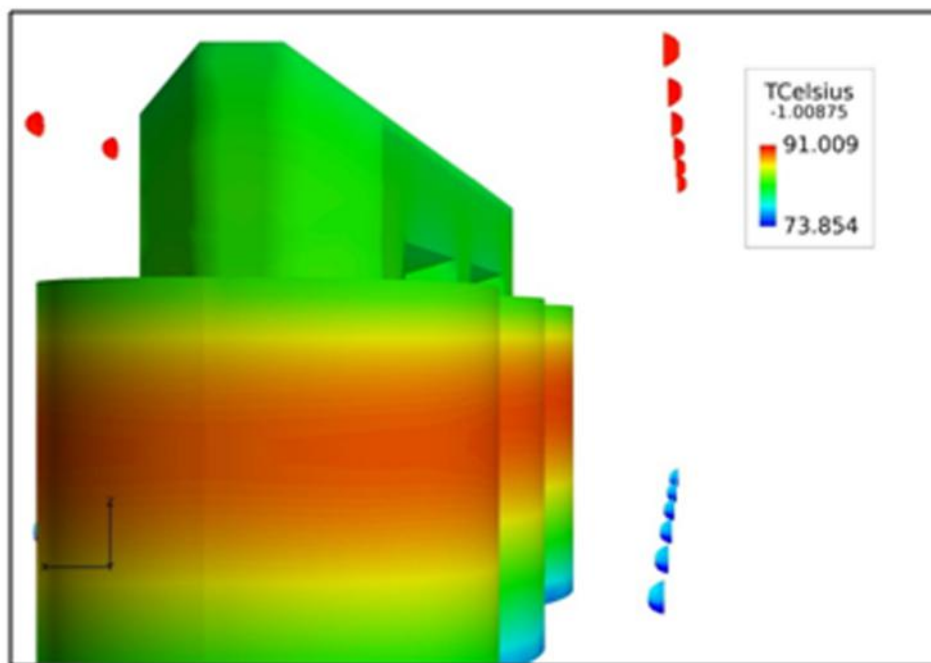


Figura 8 – Temperatura do óleo nos dutos de entrada e de saída do radiador.

AVALIAÇÃO DO PARQUE DE TRANSFORMADORES DA DISTRIBUIDORA.

Via de regra as concessionárias de energia elétrica têm em seu sistema uma, duas ou mais tensões de distribuição e algumas capacidades padronizadas para os seus transformadores de Alta Tensão (AT) e Média Tensão (MT). Como mencionado na introdução, a distribuidora analisada neste estudo possui 294 transformadores de 20 a 40 MVA em seu parque, que estão distribuídos por 95 subestações. As unidades transformadoras do parque são de diversos fabricantes, cada um com o seu projeto específico para os componentes da máquina. É certo que, devido a esta especificidade, dois transformadores de mesma capacidade, mas de fabricantes diferentes terão um desempenho térmico diferente quando submetidos às mesmas condições de carga e de temperatu-

-ra ambiente e a avaliação do estado operativo de transformadores é um desafio a várias décadas como destaca DUPONT (2013).

A modelagem 3D desenvolvida neste trabalho mostrou-se adequada para determinar, com bastante precisão, quais são os limites de cada unidade transformadora em particular. Porém, no processo de planejamento da expansão da subestação, as concessionárias optam por estabelecer um critério conservativo de sobrecarga para todas as suas unidades transformadoras, uma vez que o tratamento individual se torna inviável para o grande número de unidades do seu parque. Este tratamento individual poderia ser utilizado para uma concessionária com algumas dezenas de unidades, mas, quando o número atinge a casa de centenas, esta individualização é inviável e a padronização se torna necessária, estabelecendo um valor único de sobrecarga admissível para sinalizar a ne-

-cessidade de um reforço. Neste trabalho, este critério conservativo de expansão será denominado “Critério de Capacidade Firme (CCF), o qual determina que quando detectada uma sobrecarga superior a 30% em qualquer uma das unidades do parque num determinado ano, neste mesmo ano já deverá existir uma obra de reforço de ampliação da subestação, ou, ainda, uma subestação nova.

É claro que este valor de 30% (ou outro qualquer) não é simplesmente arbitrado, mas

decorre da experiência da concessionária baseada em seus estudos próprios e/ou ensaios de campo realizados. Tendo em conta este critério, é interessante avaliar o parque de transformadores da concessionária, responsável pelo atendimento a um significativo mercado em uma extensa área de concessão. Os dados são os apresentados na Tabela 1, a qual destaca apenas a parte atendida pelos transformadores de tensão secundária de 13,8 kV.

FABRICANTE	QUANTIDADE
1	49
2	30
3	43
4	32
5	57
6	24
7	28
8	10
9	4
10	7
11	1
12	3
13	6
TOTAL	294

Tabela 1 – Transformadores relacionados por fabricante

Nota-se, na Tabela 1 a variedade considerável de fabricantes e, conseqüentemente, de modelos 3D que seriam necessários para a exploração maximizada e segura de cada unidade da concessionária. Devido à inviabilidade desta individualização procedeu-se à classificação do conjunto em famílias (biótipos) utilizando-se a metodologia de Kohonen, que resultou em 9 famílias (biótipos) diferentes de transformadores. A metodologia de Kohonen é amplamente aplicada na organização de conjuntos como apresentado em DRAGOMIR et al. (2014). Os parâmetros utilizados para a classificação foram as prin-

-cipais características construtivas da máquina (fabricante, potência, peso, volume de óleo, tipo de ventilação, etc), além das informações sobre os respectivos radiadores (localização em relação ao tanque). A Figura 9 ilustra o resultado da classificação.

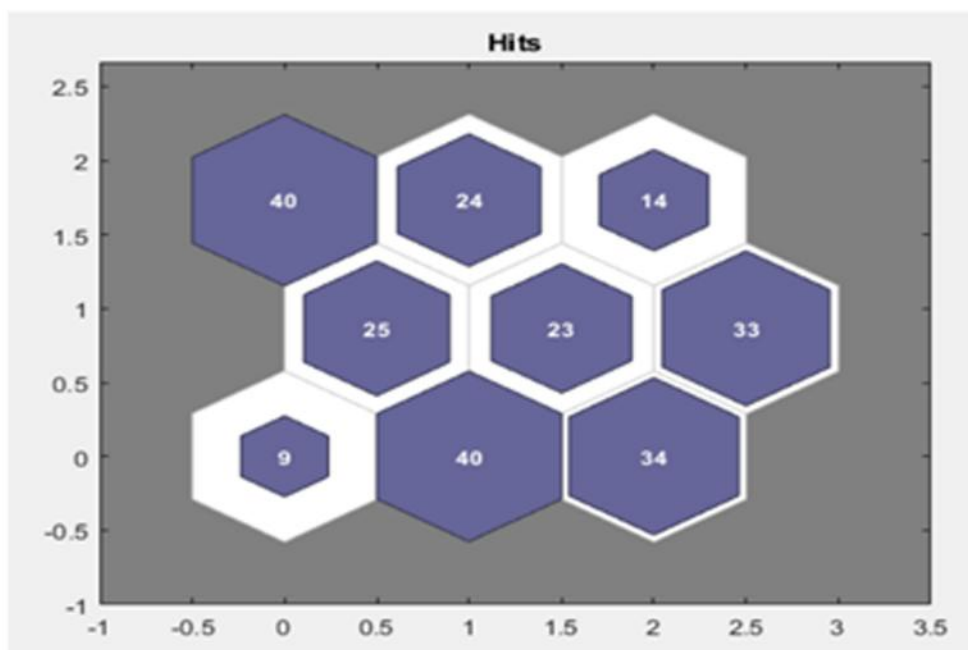


Figura 9 – Transformadores com similaridades agrupados em nove famílias pela metodologia de Kohonen utilizando redes neurais SOM desenvolvidas em toolbox do MATLAB.

APLICAÇÃO DOS RESULTADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DAS SUBESTAÇÕES

Considerando que a modelagem 3D permitiu determinar, com segurança, o limite de carregamento das unidades transformadoras, propôs-se, à luz dos resultados obtidos, a troca do Critério de Sobrecarga Padrão adotado pela distribuidora pelo Critério de Sobrecarga Local, o qual leva em consideração o tipo de transformador da subestação e a região onde se encontra.

Assim, uma vez conhecidos a curva de carga característica da região da subestação, a condição geotérmica característica do local (radiação solar, temperatura ambiente, etc) e as características das unidades transformadoras, estabelece-se um valor específico de sobrecarga para sinalizar a expansão do sistema.

Portanto, para compor este novo critério, seguiu-se o seguinte procedimento:

- Classificação dos transformadores em famílias (biótipos);
- Determinação do limite de carregamento de

cada unidade representativa da família (biótipo) para diversas curvas de carga características (modelagem 3D);

- Determinação para cada Região de Planejamento da curva de carga e da condição térmica característica para o período mais crítico do ano;
- Identificação do elemento mais restritivo da Região de Planejamento;
- Estabelecimento, para cada Região de Planejamento, de um novo limite de sobrecarga em função da sobrecarga máxima suportada pelo biótipo.

O resultado deste processo é apresentado na Tabela 2 onde são destacados alguns valores obtidos. Nota-se, por exemplo, que para a curva de carga da Região R3 todos os biótipos têm um excelente desempenho. Nota-se também que o biótipo B6 é bastante robusto, uma vez que tem excelente desempenho para qualquer curva de carga.

BIÓTIPOS	REGIOES DE PLANEJAMENTO								
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
B1	138	140	150	138	140	138	130	140	130
B2	137	142	150						
B3	135	144	150						
B4	141	146	150						
B5	143	148	150						
B6	150	150	150	150	150	150	150	150	150
B7	149	145	150						
B8	140	135	150	139	140	135	137	137	139
B9	135	138	150						

Tabela 2 – Valores de carregamentos (%) admissíveis nos biótipos de cada região de planejamento

Os valores da Tabela 2 são resultados de simulações que podem ser refinadas nos parâmetros da modelagem, na definição das curvas características das regiões e no método de correspondência entre os radiadores físicos e os radiadores equivalentes. No entanto, estes resultados sugerem que um novo critério de limite de sobrecarga, denominado “Capacidade Firme Local” é uma opção à distribuidora na avaliação de oportunidades para reduzir seus custos de expansão da transformação AT/MT pois é evidenciado que os equipamentos podem operar acima do limite de 30% de sobrecarga sem que sejam ultrapassados os limites de temperatura do ponto mais quente do enrolamento e do topo do óleo.

CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um modelo tridimensional em elementos finitos no intuito de simular o comportamento térmico de transformadores de potência trifásicos submetidos à variação de carga e de temperatura ambiente. O modelo desenvolvido permite fácil alteração

de dados físicos (materiais, correntes, resistências) e geométricos (dimensões das bobinas, tanque), podendo ser utilizado para simular outros modelos de transformadores com topologia semelhante.

A partir dos resultados da simulação, pode-se verificar que o atual critério de expansão, denominado “Capacidade Firme” utilizado pela concessionária em estudo é muito conservador e sugere-se substituí-lo pelo método apresentado como “Capacidade Firme Local” o qual permite uma utilização segura e eficiente do equipamento reduzindo os altos custos envolvidos na expansão da subestação.

Apesar de algumas limitações e dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho, os resultados obtidos permitem apresentar às concessionárias de energia um método para reavaliação do seu critério geral de expansão do sistema de distribuição.

Abstract: This paper presents a research to develop a three-dimensional model in finite elements applied a 30/40 MVA power transformer, verifying its thermal behavior as a function of ambient temperature and its load curve, comparing the simulation results with values obtained from temperature measurements performed at the top of the oil, in the hottest spot of the windings and in the external points of the tank and Radiators. The developed modeling is part of a researches carried out with the aim to determine the power transformer unit loading limits in an optimized way establishing a less conservative criteria for the expansion to a distribution system, with consequent cost reduction in the company's work planning...

Keywords: Power Transformer; Loading Limits; Finite element; 3D Modeling; Planning Criteria.

REFERÊNCIAS

CORDOBA, P.A.; SILIN, N.; OSORIO, D.; DARI, E. **An experimental study of natural convection in a distribution transformer slice model.** International Journal of Thermal Science, v.129, p.94-105, 2018. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.02.029.

CORDOBA, P.A.; DARI, E.; SILIN, N. **A 3D numerical model of an ONAN distribution transformer.** Applied Thermal Engineering, v.148, p.897-906, 2019. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.098.

COSTA, M.C. **Modelagem Térmica de Transformador de Potência pelo Método dos Elementos Finitos.** ELECTROMAGNETICS. RT.08.123.01.A, 2010.

DRAGOMIR, O.E.; DRAGOMIR, F.; RADULESCU, M. **MATLAB application of Kohonen Self-Organizing Map to classify Consumer's Load Profiles.** Procedia Computer Science, v.31, p.474-479, 2014. doi:10.1016/j.procs.2014.05.292.

DUPONT, C.J. **Integração de Análises de Defeitos e Definição de um Grau de Risco Global para Transformadores de Potência.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

GESUALDI JUNIOR, L C; BEZERRA, L R; RAMOS, D.S. **Avaliação de carregamento em unidades transformadoras: aspectos metodológicos e computacionais.** Anais.. Rio de Janeiro: IEEE, 1987.

PONTES, C.E.V. et al. **Thermodynamic Models and Three-Dimensional Analysis for Loading Transformer Limits Determinations.** IEEE Latin America Transactions, v.11, n.5, p.1225-1231, 2013. doi: 10.1109/TLA.2013.6684397.

SUSA, D. **Dynamic thermal modelling of power transformers.** Tese de Doutorado, Helsinki University of Technology, Finlândia, 2005

Submetido em: 23/08/2019

Aceito em: 05/02/2020