



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO – XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES,
MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**NOVO MODELO PARA O CÁLCULO DE CARREGAMENTO
DINÂMICO DE TRANSFORMADORES**

Luiz Cheim, PhD

Jose Geraldo Silveira

Alan Sbravati

Luiz Jovelli

SIEMENS LTDA.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia inovadora para o cálculo dinâmico das distribuições de temperatura ao longo dos múltiplos enrolamentos dos transformadores de potência. A inovação do modelo está no emprego de soluções numéricas acopladas a iterativamente à equacionamentos analíticos. As equações suporte do modelo analítico baseiam-se nos princípios termodinâmicos para transferência de calor e massa, assim como nas equações de dinâmica dos fluidos. O trabalho apresenta ainda a metodologia empregada para o cálculo dinâmico das temperaturas de hot-spot, no sistema on-line de monitoramento de transformadores, denominado TMDS (Transformer Monitoring and Diagnostics System).

PALAVRAS-CHAVE

Modelo Térmico, Simulação, Elementos Finitos, Transformadores de Potência, Transformadores Secos, Método Analítico, Dinâmica dos Fluidos, Monitoramento

1.0 - INTRODUÇÃO

Do ponto de vista teórico, os métodos de cálculo das distribuições de temperatura, ao longo dos múltiplos enrolamentos dos transformadores são, em geral, baseados em fenômenos físicos conhecidos e bem descritos matematicamente. Esses fenômenos estão associados aos princípios termodinâmicos de troca de calor entre enrolamentos, núcleo, óleo isolante e sistema de refrigeração (ar, água) bem como fenômenos de transporte através da dinâmica de fluidos aplicada ao óleo isolante.

O novo cálculo integra os modelos numérico e analítico. Devido à complexa geometria do enrolamento, o emprego de um modelo puramente analítico possui diversas limitações: detalhes da vazão e troca de calor dentro dos canais do enrolamento são desconhecidos e diversas correlações empíricas se fazem necessárias para que o cálculo funcione. Além disso, tem-se a dificuldade de utilização da conhecida equação de Navier-Stokes, que não possui uma solução analítica geral e deve ser resolvida em sua forma diferencial utilizando-se o suporte de métodos numéricos.

Do ponto de vista prático, todavia, esse cálculo esta intimamente associado à tecnologia de fabricação dos transformadores pois os modelos de troca de calor apresentam coeficientes numéricos que guardam forte dependência com parâmetros físicos dos enrolamentos, tais como dimensões, área de troca de calor, espessura das camadas isolantes, espessura dos canais de óleo, velocidade do fluido isolante, perdas em vazio e em carga, perdas nos diferentes níveis de comutação, etc. além de dependerem também das geometrias empregadas nos complexos modos de fabricação. Daí a dificuldade prática de se calcular e localizar, com precisão, o ponto mais quente do enrolamento, ou o chamado "hot-spot" ou ainda de se ter uma forma de cálculo universalmente utilizável

e que possibilite o cálculo daquela temperatura, estática e dinamicamente, para qualquer tipo de enrolamento ou tecnologia de fabricação.

A tecnologia de combinação entre a simulação numérica e as equações convencionais dos modelos termodinâmicos, normalmente empregados em transformadores, apresenta uma alternativa interessante à solução dos complexos problemas de avaliação das distribuições de temperatura ao longo dos enrolamentos, seja em condições estáticas ou dinâmicas. Destacamos especialmente a não necessidade de aplicação de modelos exponenciais baseados em constantes de tempo estimadas. Essa metodologia pode ser empregada na fase de cálculo do transformador ou posteriormente, como ferramenta de avaliação do desempenho térmico da máquina.

1.1 Método numérico

1.1.1 Dinâmica de fluidos

A hidrodinâmica é descrita pelas equações da continuidade e do momento. Considerando que a densidade do fluido independe do tempo, a equação da continuidade de um fluido homogêneo e incompressível assume a forma:

$$\partial_i(\rho v^i) = 0$$

Laundau & Lifshitz 1989. Transformando para coordenadas gerais, a equação da continuidade assume a forma:

$$J_\xi \frac{\partial}{\partial \xi^n} (\rho \beta_l^n v^l) = 0 \quad ; \quad \beta_i^j = J_\xi^{-1} \frac{\partial \xi^j}{\partial x^i} = J_\xi^{-1} \partial_i \xi^j$$

onde J_ξ é a matriz jacobiana de ξ , ξ é uma coordenada espacial curvilínea não-ortogonal, x é uma coordenada cartesiana, ρ é a densidade do fluido e v é a velocidade do fluido.

A equação do momento, em coordenadas cartesianas, para um fluido incompressível é:

$$\rho D_t v_i - \partial_m \sigma_i^m = -\partial_i p + \rho g_i$$

onde D_t é a derivada temporal total, σ_i^m é a força viscosa e d_i^j é a tensão de cisalhamento. Incluindo a transformação para coordenadas gerais e a equação da continuidade, para um fluido newtoniano temos a forma geral da equação do momento:

$$\rho \partial_t v_i + J_\xi \frac{\partial}{\partial \xi^n} \left[\rho v_i \left(\frac{\partial_i \xi}{J_\xi} + \beta_l^n v^l \right) - J_\xi \mu \beta_l^n \left(\beta_l^m \frac{\partial v_i}{\partial \xi^m} + \beta_i^m \frac{\partial v_l}{\partial \xi^m} \right) + \beta_i^n p \right] = \rho g_i$$

Para resolver as equações dinâmicas foi empregada uma discretização temporal implícita utilizando diferenças finitas centrais, Patankar 1980.

1.1.2 Equação de transferência de calor

Da mesma forma que a equação do momento, a equação de condução de calor é resolvida implicitamente no tempo. Para uma densidade de condução de calor

$$q_m^i = -\lambda \nabla_m T,$$

considerando uma condutividade térmica λ que inclui transferência por condução e convecção.

Uma vez que o método numérico utiliza exclusivamente de conceitos físicos e propriedades dos materiais, independente da geometria, o método é aplicável a qualquer parte do transformador (enrolamentos, radiadores, tubulação etc.) e a transformadores de qualquer origem e fabricação.

1.2 Modelo analítico

O cálculo numérico exige diversas iterações no tempo e no espaço para resolver uma determinada geometria. Para acelerar o cálculo, um modelo analítico é aplicado para as geometrias mais simples do transformador. Para essas geometrias as equações dinâmicas e térmicas podem ser resolvidas de maneira analítica.

Acoplando esse modelo analítico ao numérico, podemos finalmente calcular a troca de calor em todo o transformador, estática ou dinamicamente e reproduzir em detalhes os fenômenos térmicos e hidrodinâmicos.

2.0 - APLICAÇÕES

2.1 Transformadores refrigerados a óleo com geometria detalhada conhecida

Uma das principais aplicações do modelo é no cálculo de refrigeração de transformadores refrigerados a óleo. Através do novo modelo podemos estudar detalhadamente o fluxo do óleo e a troca de calor no transformador, além de estudar a evolução no tempo da temperatura em diversas partes do transformador.



FIGURA 1 – Exemplo de transformador a óleo de grande potência e elevada tensão

A Figura 2 mostra a vazão através dos canais de um enrolamento. Na figura, a imagem à esquerda está uma seção do enrolamento, e os vetores mostram o caminho percorrido pelo óleo e sua velocidade em cada parte do enrolamento. À direita é uma ampliação da região demarcada, mostrando o fluxo por um canal em uma simulação de alta resolução.

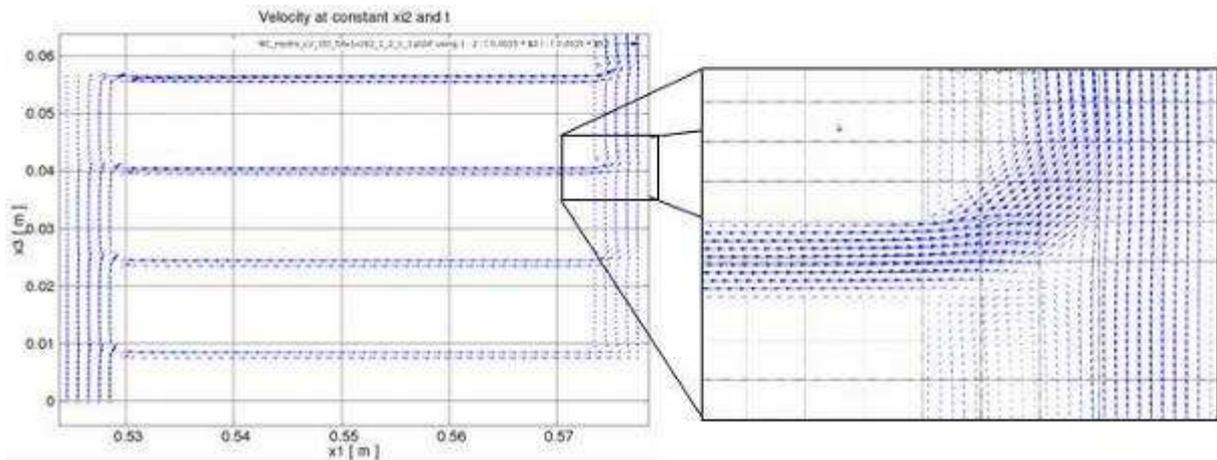


FIGURA 2 – Vetores velocidade do óleo nos canais do enrolamento

A transferência de calor é mostrada na figura 3. Novamente temos à esquerda uma seção do enrolamento, e à direita uma ampliação da área demarcada resolvida em simulação de alta resolução, resolvendo inclusive as camadas-limite hidro e termodinâmica.

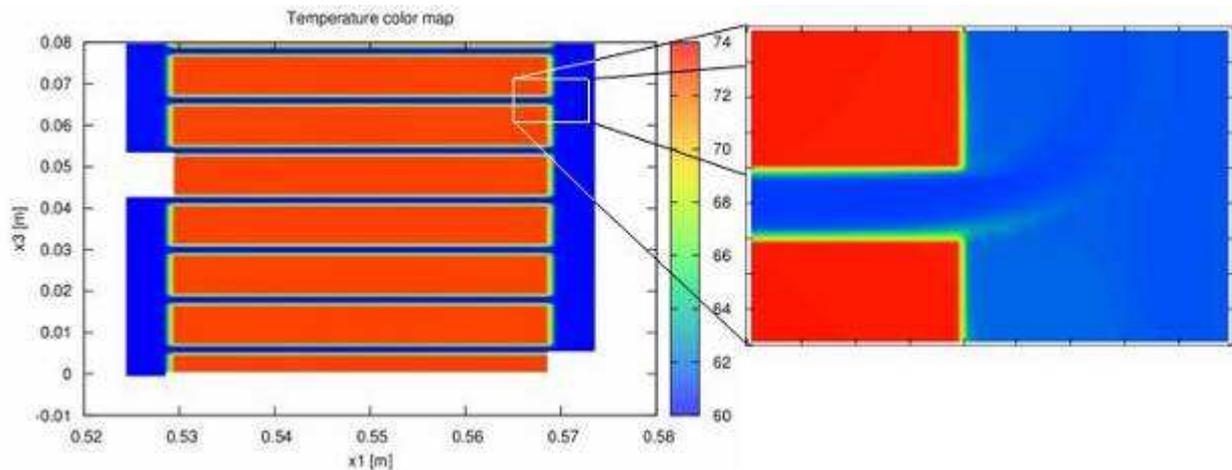


FIGURA 3 – Mapa de temperatura do enrolamento

A Figura 4 mostra a perda de carga através do enrolamento. A imagem à esquerda mostra a pressão total – perda de carga com contribuição hidrostática – e a imagem à direita mostra a perda de carga sem a contribuição hidrostática.

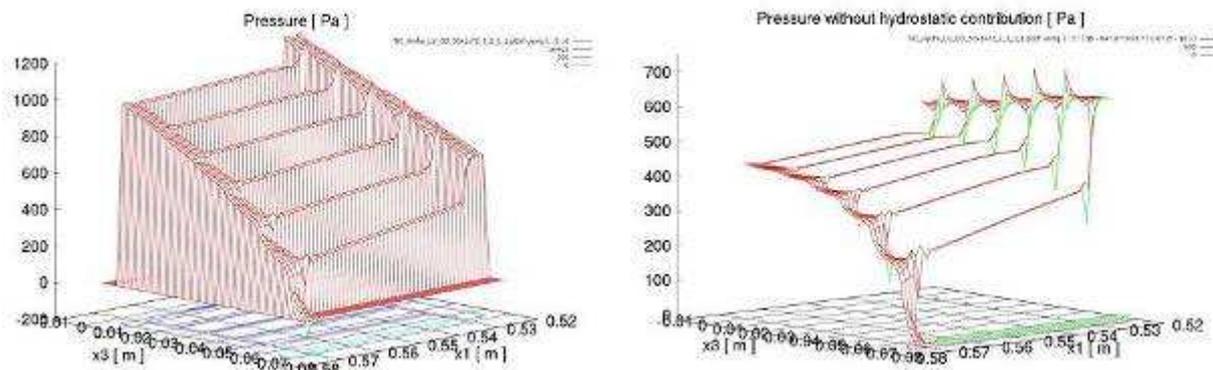


FIGURA 4 – Variação da pressão do óleo no enrolamento

2.2 Transformadores refrigerados a óleo com geometria detalhada não conhecida

Nos casos onde a geometria detalhada do equipamento não é conhecida, utilizamos ferramentas numéricas para extrair a maior quantidade possível de informações do documento essencialmente disponível, que é o ensaio de aquecimento original do equipamento.

A partir da análise detalhada do ensaio de aquecimento, especialmente das curvas resultantes das medições de resistência dos desligamentos, é possível inferir muito mais informações sobre o equipamento do que usualmente se apresenta nos relatórios.

Apesar de usualmente representada como uma única função exponencial, na realidade a curva oriunda da medição de resistência durante o desligamento de um enrolamento representa uma combinação de, pelo menos, três fenômenos representáveis por curvas exponenciais compostas. Cada uma destas curvas possui constantes de tempo distintas e em faixas pré-definidas, representando os diferentes mecanismos de transferência de calor desde o enrolamento até a dissipação para o ambiente. Podemos destacar:

- Transferência de calor entre o enrolamento e o óleo dentro dos canais de refrigeração do enrolamento;
- Fluxo axial de óleo através do enrolamento;
- Dissipação de calor do óleo para o ambiente.

Desta forma, a curva de desligamento do enrolamento poderia ser representada por:

$$f(t) = (T_w - T_o) \cdot e^{-t/\tau_1} + (T_o - T_{o\min}) \cdot e^{-t/\tau_2} + (T_{o\min} - T_{amb}) \cdot e^{-t/\tau_3}$$

onde, T_w é a temperatura média do enrolamento, T_o é a temperatura média do óleo nos canais do enrolamento, $T_{o\min}$ é a temperatura mínima do óleo no transformador e T_{amb} é a temperatura ambiente.

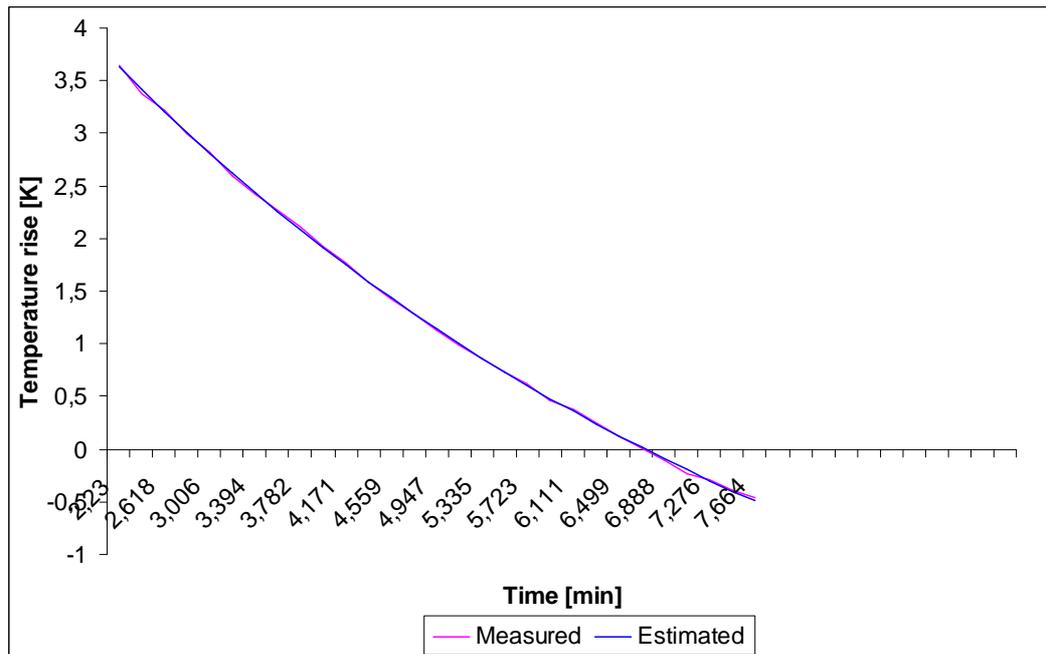


FIGURA 5 – Comparação entre curva medida e função exponencial tripla ajustada

Com essa representação é possível inferir com muito mais precisão as diferenças existentes entre os enrolamentos. O método usualmente aplicado, onde apenas um gradiente entre a temperatura média do enrolamento e a temperatura média do óleo no transformador, chamado “gradiente cobre-óleo”, mas que, na realidade, não representa diretamente qualquer transferência de calor, acaba impossibilitando a separação do fenômeno de troca de calor entre o enrolamento e o óleo do escoamento do óleo através do enrolamento. Estes dois fenômenos são fisicamente distintos, representados pelo verdadeiro gradiente cobre-óleo e pelo gradiente de temperatura do óleo ao longo do enrolamento (gradiente longitudinal).

A separação destes fenômenos é essencial para aumentar a acuidade da estimativa do hot spot (temperatura máxima do enrolamento) sob diferentes condições de carregamento do transformador.

Apesar da grande complexidade em se extrair diversos parâmetros a partir uma única curva medida, a diferença entre os valores típicos para cada constante de tempo permite inferir com bastante precisão a participação de cada uma das exponenciais componentes da curva medida.

Esta ferramenta representa um grande avanço para o aumento da precisão quando se deseja estimar o comportamento de equipamentos cujos detalhes construtivos não são conhecidos, situação muito comum nos casos de implementação do monitoramento em transformadores já em operação.

3.0 - CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma nova metodologia empregada no cálculo das distribuições de temperatura ao longo dos enrolamentos dos transformadores de potência, baseada no método de simulação numérica e nos modelos analíticos de termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos.

Além desta metodologia de cálculo detalhado do equipamento, apresentamos também uma metodologia alternativa para estimativa dos parâmetros mais relevantes do equipamento. Esta segunda metodologia mostra especialmente adequada para as situações onde não se tem detalhado conhecimento das características construtivas.

A maior contribuição dos modelos está em sua universalidade, em termos de aplicação, não estando restritos a nenhum tipo específico de tecnologia de fabricação. O modelo numérico é especialmente adequado para equipamentos novos, sendo utilizado na fase de cálculo, para a avaliação detalhada da distribuição esperada de temperatura ao longo de todos os enrolamentos. Ambos os métodos podem ser aplicados na avaliação do desempenho térmico dos transformadores em operação, agregando muito qualitativa e quantitativamente aos modelos de previsão de temperatura sob diversas condições de operação.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INCROPERA, F. P., DE WITT, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer – John Wiley & Sons, 1990
- (2) LANDAU, L. D., LIFSHITZ, E. M. Course of theoretical physics, vol 6: Fluid mechanics – Pergamon Press, Oxford, UK, 1989
- (3) PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow – Hemisphere publishing corporation, New York, USA, 1980

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Luiz Cheim, PhD –

Natural de Macaé, Rio de Janeiro: 05/04/1959

Doutorado em Engenharia Elétrica pela University of Nottingham, England em 1993, MSc pela COPPE/UFRJ em 1987 e BSc em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1982. Trabalhou no Cepel de 1984 a 1999 e na Siemens Transformadores desde Janeiro de 2000.

José Geraldo G. Silveira

Natural de Jundiaí – SP; Nascimento: 27/10/1956

Bsc em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP em 1979. Bsc em Economia pela FEA da USP em 1983. Está na Siemens Transformadores desde 1980, tendo exercido funções relacionadas a Campo de Provas, Qualidade, Desenvolvimento de Produto, Planejamento de Produção, Projeto de transformadores de força e desde 2000 em Monitoramento e Gerenciamento de Vida de Transformadores.

Luiz Jovelli

Natural de Jundiaí – SP; Nascimento: 12/09/1980

Graduando em Bacharelado em Física – Universidade de São Paulo

Experiência: Iniciação Científica em Simulações Numéricas em Astronomia – IAG/USP (2005-2007); Desenvolvedor – Siemens; Certificações LPI (*Linux Professional Institute*) LPIC-1 e LPIC-2, Especialização em HPC (*High-performance Computing*)

Alan Sbravati

Natural de Piracicaba – SP; Nascimento: 02/09/1979

Engenheiro Mecânico – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 2001

Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da unidade de Transformadores de Potência da Siemens, com diversas publicações na área.