

# Modelagem e simulação do regime térmico-operativo de transformadores de potência – sistema de apoio à decisão<sup>1</sup>

Jorge Luiz Ferreira<sup>2</sup>

Alberto Tamagna<sup>3</sup>

## Resumo

Este artigo descreve o estudo para a obtenção de modelos individualizados do regime térmico-operativo de transformadores de potência, a partir de grandezas normalmente medidas pelos sistemas online de monitoramento destes equipamentos. Esse sistema possibilita a simulação das condições de trabalho quando os equipamentos forem submetidos a sobrecargas contingenciais. Esta técnica pode ser uma importante ferramenta para apoio à decisão e gerenciamento de sistemas elétricos de potência, na medida em que uma estimativa confiável das temperaturas de operação, sob as mais diversas condições de carregamento e temperatura ambiente, deve contribuir decisivamente para o estabelecimento de regimes que permitam desempenho eficaz e seguro da operação das subestações. A construção do simulador e modelador foi realizada com o software MATLAB versão 6.5, utilizando modelagem por regressão linear a múltiplas variáveis, tendo como grandezas de observação a potência aparente, a temperatura do ambiente externo e a temperatura crítica do fluido isolante-refrigerante ou a temperatura crítica do enrolamento. O modelo apresenta resultados confiáveis para um processo de decisão.

**Palavras-chave:** Transformadores. Sistemas supervisores. Modelagem térmica.

## Abstract

*This article describes a study for obtaining individualized models of the thermal-operative regime of power transformers from figures usually measured by the online monitoring systems of these devices. This system allows the simulation of work conditions when the equipment is subjected to contingent overloads. This technique may be an important support tool for decision making and management of power electrical systems insofar as a trustworthy estimative of the operational temperatures under diverse conditions of load and environmental temperature should decisively contribute towards the establishment of regimes that allow effective and safe operation of substations. MATLAB version 6.5 was used to build the model-maker and simulator using multiple linear regression modeling using as observational figures the apparent power, the external environment temperature, and the critical temperature of the isolating-refrigerating fluid or the critical wiring temperature. The model presented trustworthy results for the decision making process.*

**Keywords:** Transformers. Supervisory systems. Thermal modeling.

<sup>1</sup> Resumo da tese defendida junto ao Programa De Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Promec – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, em 07/08/2009.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica PROMEC-UFRGS. Engenheiro Mecânico, Professor da Fundação Liberato e da UERGS. E-mail: jorgeferreira@guesteng.com.br

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Engenheiro Civil Professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e-mail: albertotamagna@mecanica.ufrgs.br

Artigo recebido em 09/12/2009 e aceito em 04/05/2010

## 1 Introdução

Os transformadores de potência são equipamentos de alto custo e importância estratégica em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. São responsáveis pelo suprimento de energia nos níveis de tensão desejados para grandes conjuntos de consumidores. As dificuldades técnicas de substituição, a lentidão no transporte, os elevados custos e a pouca disponibilidade de reservas técnicas são fatores que, em caso de avaria, provocam imensos transtornos às concessionárias e aos consumidores. Além de prejuízos econômicos, as longas interrupções de fornecimento causadas pelas avarias de equipamentos deste porte promovem desgastes na confiabilidade do sistema e da concessionária perante os consumidores.

Frequentemente, por necessidades operacionais de manutenção ou indisponibilidades temporárias, os operadores de sistemas de energia elétrica necessitam transferir grandes blocos de carga elétrica entre transformadores de potência. Na maioria dos casos, essas transferências podem originar pequenas ou grandes sobrecargas que comprometem a expectativa de “vida útil” dos equipamentos, assim como colocam os mesmos em estresse momentâneo, aumentando bruscamente a temperatura de trabalho e, conseqüentemente, possibilitando riscos de uma pane imediata.

A proposta deste projeto foi experimentar e verificar a possibilidade de estabelecimento de modelos matemáticos que possam simular o regime térmico-operativo de transformadores de potência. A partir dos dados coletados em 13 equipamentos operando em situações normais, desenvolveu-se um algoritmo computacional em MATLAB 6.5 para simular o comportamento térmico do óleo ou da imagem térmica, comparando-o com os resultados medidos nas mesmas condições.

O objetivo primordial deste estudo foi provar que é possível e confiável a construção de modelos individualizados para o regime térmico-operativo dos transformadores de potência a partir de dados obtidos nos sistemas de supervisão on line, os quais poderão constituir sistemas que permitam apoiar decisões sobre a

operação e a influência na curva de comprometimento da “vida útil” destes equipamentos.

De uma forma sintética, este artigo apresenta um resumo dos resultados obtidos com os 13 experimentos realizados na elaboração da tese e descreve mais detalhadamente, com gráficos, tabelas e simulação, os resultados e observações em um deles.

## 2 Revisão bibliográfica

Relativamente à modelagem das trocas térmicas dos transformadores de potência, sintetizando a revisão bibliográfica do texto original, é possível afirmar que diversas pesquisas recentes buscam revisar e aprimorar a Metodologia IEEE C57.91 (1995) cujo objetivo principal é possibilitar um maior fator de carregamento no equipamento sem comprometer a vida útil. Voltadas a subsidiar os projetos de equipamentos e seus limites térmicos de operação, estas pesquisas preocupam-se exclusivamente com o fluxo térmico interno (por condução e convecção) do sistema “núcleo + enrolamentos + fluido”. Objetivam, ainda, uma melhor avaliação do comportamento da temperatura crítica ou *Hot Spot* a partir das medições da temperatura do óleo e da imagem térmica. As publicações referenciadas que abordam esta linha de pesquisa são: Lesieutre; Hagman e Kirtley Jr. (1997), Álvares; Samesima e Delaiba (1999), Ohis e Czaszejko (2002), Radakovic; Cardillo e Feser (2002), Radakovic; Cardillo; Feser e Schäfer (2002), Radakovic; Cardillo e Feser (2003), Radakovic e Feser (2003), Eckholz; Knorr; Schäfer; Feser e Cardillo (2004), Pradhan e Ramu (2004), Jardini; Brittes; Magrini; Bini e Yasuoka (2005), Silva (2005), Susan (2005), Tylavsky; Xiaolin e McCula (2005), Pan; Chen; Yun; Wang e Sun (2006), Vilaithong; Tenbohlen e Stirl (2006), Aragão; Almeida; Nottingham; Braga; Amora e Fontenele (2007) e Takami e Mahmoudi (2009).

Apresentando aspectos relativos à implantação e ao funcionamento dos sistemas supervisores das grandezas elétricas e térmicas presentes nos transformadores de potência quando em operação, também podem ser agrupados

da revisão bibliográfica efetuada os trabalhos de: Cardillo e Feser (2004), Marino; Poza; Otero e Machado (2005), Ely; Biasoli; Lambert-Torres e Moraes (2006), Firouzifar e Mahmoudi (2007), Silva (2007) e Andrade; Coelho; Fröhlich; Pires; Moreira e Guimarães (2008).

A pesquisa bibliográfica não encontrou nenhum trabalho que avalie o comportamento térmico dos transformadores de potência relativamente às suas trocas térmicas com o meio externo num regime operativo cíclico (diário) e sujeito às variações climáticas intensas e constantes, além de outros fatores não previstos no projeto, tal como a presença de outras fontes de calor próximas (outros transformadores ou equipamentos presentes nas subestações). Tampouco foi observado qualquer estudo que utilizasse os dados dos sistemas supervisores para subsidiar os processos de decisão para o regime térmico-operativo futuro dos equipamentos.

### 3 Conceitos gerais sobre regime térmico nos transformadores de potência

Os transformadores de potência são constituídos dos seguintes componentes principais:

- núcleo de ferro magnético;
- enrolamentos primário e secundário (em alguns casos são acrescidos de um enrolamento terciário e de outro de tensão de serviço);
- fluido refrigerante e isolante;
- invólucro (caixa, tanque ou carcaça) e radiadores;
- comutador a vazio ou sob carga;
- instrumentação e acessórios de interligação, proteção, sinalização e controle.

Quando em operação, a passagem da corrente elétrica alternada pelos enrolamentos provoca as chamadas “perdas no ferro” (por histerese magnética e por correntes parasitas) e “perdas no cobre ou no enrolamento”, decorrentes do “efeito ou Lei de Joule” (James Prescott Joule, 1818-1889). As perdas traduzem-se em dissipação de potência e aquecimento na chamada “parte ativa” do equipamento (núcleo magnético e enrolamentos) numa relação que, de forma simplificada, pode afir-

mar-se que quanto maior a potência transformada, e conseqüentemente maior corrente elétrica, maior a potência dissipada na forma de perdas térmicas.

Relativamente às perdas no ferro e no cobre e seus respectivos comportamentos nas diversas condições de carregamento do transformador, cabe citar os resultados do experimento de Kosow (2005) que, observando os resultados da medição e comparação das perdas em um transformador de 500 kVA, constatou que nas condições de baixo carregamento a influência das perdas no ferro nas perdas totais é alta. Nas condições de carregamento elevadas cresce a influência das perdas no cobre sobre o resultado obtido para as perdas totais.

Além das perdas no ferro, que se comportam como valores quase constantes, é possível concluir que um aumento de potência transformada reflete-se imediatamente no aumento da temperatura do fluido refrigerante e nos fluxos convectivos internos (parte ativa, fluido, invólucro e radiadores) e externos (invólucro, radiadores e ambiente externo).

Em equipamentos de grande porte, com a finalidade de ampliar as trocas térmicas com o meio externo e possibilitar a operação nas temperaturas previstas na norma de projeto e operação os projetistas empregam recursos como estágios de ventilação forçada nos radiadores, convecção forçada por bombeamento do fluido e trocadores de calor externos com fluidos refrigerados.

Sendo assim, a NBR 5416 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) classifica os equipamentos em dois grupos: aqueles com limites operativos de 55° C acima da temperatura ambiente e que não podem exceder a 65° C no ponto mais quente do enrolamento (*Hot Spot*); e aqueles que podem operar com 65° C, ou, no máximo, 80° C no ponto mais quente. É relevante considerar que os materiais e fluidos isolantes empregados nestes equipamentos começam a deteriorar-se com o aumento da temperatura, chegando a limites de acelerada degradação na faixa dos 105° C, e riscos de inflamação na faixa dos 115° C. Como fator de projeto, é usual estipular-se que as tem-

peraturas do fluido isolante acima de 75° C influirão na diminuição da “vida útil” do equipamento e na redução dos intervalos entre manutenções preventivas e preditivas recomendadas (MILASCH, 1984).

Na maioria dos casos, as concessionárias de energia elétrica, assim como as empresas que possuem subestações de grande porte para abastecimento próprio, estabelecem padrões de operação que permitem sobrecarregar os equipamentos em percentuais aplicáveis à respectiva potência nominal. Determinam o acompanhamento instrumental da temperatura de trabalho como forma de controle do comprometimento da vida útil e dos prazos de manutenção. Tal técnica, quando aplicada de forma indiscriminada, sem considerar a “história” da operacionalidade de cada equipamento, pode representar, em alguns casos, situações de extremo conservadorismo por não utilizar o equipamento no seu melhor potencial operativo, ou de risco excessivo para a segurança, expondo o equipamento a avarias e reduzindo sua vida útil.

De outra forma, os métodos de carregamento por aplicação genérica de sobrecargas percentuais, até então muito utilizados pelas concessionárias, podem ser contestados. É possível afirmar que uma alta sobrecarga de curta duração, quando a temperatura ambiente externa é baixa, pode ser menos danosa ao equipamento que uma sobrecarga baixa, com longa duração, principalmente em regime climático externo de temperaturas elevadas. Ou seja,

em princípio, a mesma regra para admitir ou limitar sobrecargas não pode ser aplicada em equipamentos operando no inverno e no verão, ou em regimes temporários e permanentes, ou ainda em regiões e regimes de carga diferenciados.

#### 4 Análise e validação do modelo para simulação do regime térmico-operativo

Com a finalidade de simular a temperatura de operação dos transformadores de potência, o objetivo desta fase do experimento consistiu em obter uma equação que modelasse a troca térmica entre o calor “gerado” internamente no transformador (perdas no ferro e perdas no cobre) e seu meio fluídico de refrigeração (óleo) e entre este e o ambiente externo.

Conforme apresentado na figura 1, o fluxo estabelecido previu como grandezas iniciais a temperatura do ambiente externo ao transformador, a temperatura do fluido e a potência aparente (carga).

Foram estabelecidas como premissas iniciais:

- a carga e o calor gerado pelas perdas têm uma dependência do ambiente externo, sendo o regime de carga próprio do grupamento de consumidores, com alguma influência da temperatura e das condições climáticas do ambiente num maior ou menor carregamento do equipamento. Na realidade, é comum considerar-se que a elevação da temperatura externa demanda mais energia e carga;

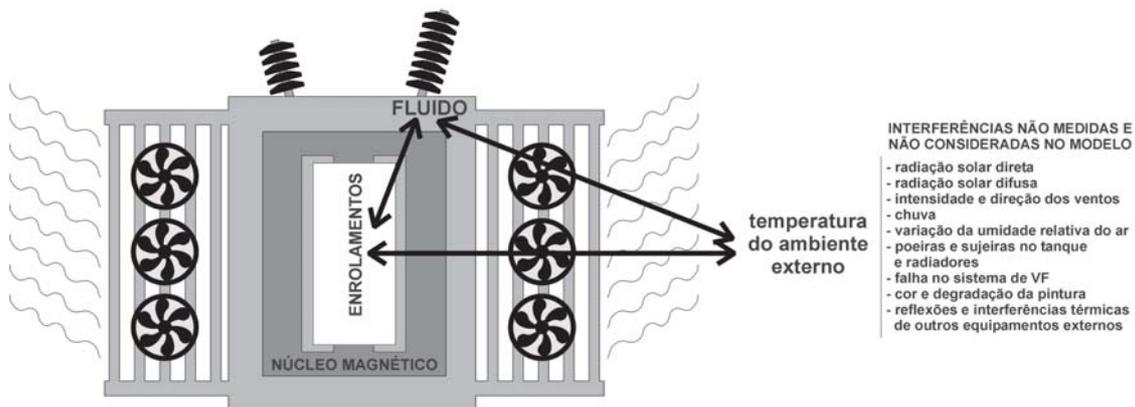


Figura 1: Esquema dos fluxos térmicos entre o transformador e o ambiente externo

- a temperatura do fluido é dependente da carga e das perdas, não ocorrendo o fluxo inverso, em que a temperatura do fluido elevaria a carga (ou as perdas);
- há uma interdependência entre a temperatura do fluido e as condições do ambiente externo. Ela é mais forte, crítica e presente no fluxo de trocas térmicas do sentido fluido para o ambiente externo, onde a temperatura do fluido é maior que a temperatura externa. É mais fraca, menos presente e tecnicamente não importante, quando ocorre a condição inversa, em que a temperatura do ambiente externo é maior que a temperatura do fluido.

É importante ressaltar também dois fatores ou duas premissas:

- o sistema de trocas térmicas entre parte ativa, fluido e ambiente externo já foi estabelecido quando do projeto do equipamento.

Portanto são fatores que não podem ser alterados;

- para o ambiente externo será considerado somente o fator temperatura.

Alguns fatores não mensuráveis ou de difícil mensuração têm influência no regime de trocas térmicas, mas é possível supor que os dados de temperatura externa recebidos já contemplem todas as circunstâncias em que eles possam influir. Tais fatores podem ser: a incidência da radiação solar direta e difusa; a intensidade e direção da ventilação natural; a chuva e a umidade relativa do ar; poeiras e sujeiras no sistema “tanque + radiadores”; falhas no sistema de refrigeração forçada; cor da pintura do equipamento, entre outros.

A equação geral do modelo é:

$$y = A + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 \quad (4.1)$$

Sendo:

y temperatura do óleo (variável dependente) [°C]

x<sub>1</sub> carga (variável independente) [MVA ou V.A.10<sup>6</sup>]

x<sub>2</sub> temperatura do ambiente externo (variável independente) [°C]

A, B, C, coeficientes estimadores

Conforme Silva e Silva (1999) e Spiegel; Schiller e Srinivasan (2004), o equacionamento para modelagem da regressão linear múltipla

representa um “plano de um sistema tridimensional de coordenadas ou plano de regressão”. Portanto, para determinar os coeficientes A, B e C, a partir do método dos mínimos quadrados, utiliza-se o seguinte equacionamento geral e as respectivas equações de desmembramento:

$$\sum y = nA + B \sum x_1 + C \sum x_2 \quad (4.2)$$

$$\sum x_1 y = A \sum x_1 + B \sum x_1^2 + C \sum x_1 x_2 \quad (4.3)$$

$$\sum x_2 y = A \sum x_2 + B \sum x_1 x_2 + C \sum x_2^2 \quad (4.4)$$

A solução do sistema de equações cujas incógnitas são os coeficientes A, B e C pode ser obtida por dois processos:

a) processo da “eliminação gaussiana” com matriz 3 x 3 e vetor coluna 3 x 1 ou por subtração duas a duas;

b) processo da substituição, isolando-se A em 4.12, B em 4.13 e calculando-se C.

Usando o processo de substituição, Silva e Silva (1999) propõem resolver um sistema de equações para regressão linear múltipla a duas variáveis independentes, utilizando-se de subcoeficientes parciais S, que representam partes agrupadas dos termos componentes das equações resultantes da substituição, conforme relacionado na sequência:

$$S_{y1} = \sum yx_1 - \frac{\sum y \cdot \sum x_1}{n} \quad (4.5)$$

$$S_{y2} = \sum yx_2 - \frac{\sum y \cdot \sum x_2}{n} \quad (4.6)$$

$$S_{11} = \sum x_1^2 - \frac{(\sum x_1)^2}{n} \quad (4.7)$$

$$S_{22} = \sum x_2^2 - \frac{(\sum x_2)^2}{n} \quad (4.8)$$

$$S_{12} = \sum x_1 x_2 - \frac{\sum x_1 \cdot \sum x_2}{n} \quad (4.9)$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (4.10)$$

Substituindo-se os coeficientes parciais  $S_{ij}$  em 4.2, 4.3 e 4.4, obtém-se:

$$B = \frac{S_{y1} \cdot S_{22} - S_{y2} \cdot S_{12}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12}^2} \quad (4.11)$$

$$C = \frac{S_{y2} \cdot S_{11} - S_{y1} \cdot S_{12}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12}^2} \quad (4.12)$$

$$A = \frac{\sum y - B \sum x_1 - C \sum x_2}{n} \quad (4.13)$$

$$R^2 = \frac{B \cdot S_{y1} + C \cdot S_{y2}}{S_{yy}} \quad (4.14)$$

$$R = \sqrt{R^2} \quad (4.15)$$

Onde:

$$R^2 \text{ coeficiente de explicação} \quad (4.16)$$

$$R \text{ coeficiente de correlação} \quad (4.17)$$

O desenvolvimento do modelo aplicativo para simulação do regime térmico-operativo teve as seguintes premissas:

- Ao longo de sua vida operativa, por necessidade técnica ou manutenção, muitos equipamentos são movimentados para subestações que operam em localidades com condições climáticas médias diversificadas, havendo alteração no regime de troca de calor com o meio externo.
- Em regiões com diversidade climática diversificada, como as de clima temperado e com estações climáticas bem definidas, é possível ter um modelo para as condições de operação em temperaturas médias baixas (inverno), outro para condições de temperaturas médias altas (verão) e, possivelmente, outro para condições intermediárias de operação (outono e primavera).
- Considerou-se como única fonte o calor gerado internamente ou dissipado de forma convectiva no fluido, aquele decorrente das perdas no núcleo e nos enrolamentos.
- Na medida em que os dados provenientes dos sistemas supervisores das subestações são usados pelas concessionárias para controle e acompanhamento da operação, considerou-se

o sistema de medição e aquisição de dados confiável e que os dados adquiridos e utilizados na modelagem são adequadamente precisos para o objeto em desenvolvimento.

f) Considerou-se que as diferenças entre os valores medidos e simulados poderiam também decorrer de fatores não controlados e não avaliados pelo modelo, mas que influenciam as trocas térmicas, conforme aqueles listados na figura 1.

Foram propostas as seguintes hipóteses e questões:

- Um modelo matemático do regime térmico-operativo, desenvolvido com base no método da regressão linear múltipla a duas variáveis independentes (carga e temperatura ambiente externa) e uma variável dependente (temperatura do fluido isolante-refrigerante) a partir de uma base de dados representativa das condições operativas de determinados períodos de tempo, pode ser aplicado a qualquer equipamento de transformação?
- O modelo obtido para cada transformador pode apresentar resultados que permitam apoiar decisões de regimes de carregamento e condições de operação com níveis de confiabilidade aceitáveis?
- A aplicação do modelo para simular a temperatura do fluido ou a temperatura crítica do enrolamento em um mesmo equipamento, com a mesma base de dados, apresenta os mesmos níveis de confiabilidade?
- A aplicação de modelos obtidos para um equipamento, usando bases de dados diferenciadas, pode apresentar bons níveis de confiabilidade na simulação?

O gráfico 1 apresenta a comparação entre a temperatura do óleo medida e a simulada pelo aplicativo desenvolvido no MatLab 6.5, referente ao transformador TR1, da Subestação Scharlau (São Leopoldo-RS), com dados em intervalos de 15 minutos do período de 01 a 31 de março de 2004. O quadro 1 apresenta os resultados obtidos com esta modelagem e um resumo estatístico das diferenças entre os valores medidos e simulados pelo experimento.

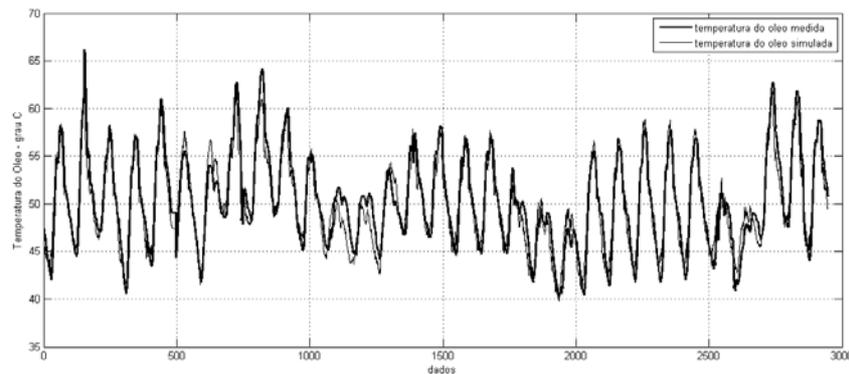


Gráfico 1: Gráfico comparativo da temperatura do óleo medida e simulada em função da carga e da temperatura do ambiente externo (SE Scharlau/TR1, mar/2004, dados com intervalo de 15 minutos)

<b>Subestação/Transformador</b>		Scharlau/TR1 - São Leopoldo		
<b>Potência nominal (MVA)</b>		36/48/60		
<b>Tensão (kV)</b>		138 - 22		
<b>Período de aquisição dos dados</b>		01 a 31/03/2004		
<b>Intervalo de aquisição dos dados (minutos)</b>		15		
<b>Equação de modelagem</b>		temp.oleo=21,0173+0,2663carga+0,8145tamb		
<b>Coefficiente de explicação</b>		0,8831 ou 88,31%		
<b>Coefficiente de correlação</b>		0,9397 ou 93,97 %		
<b>Valores Limites dos Dados</b>				
Limites	Carga (MVA)	Temp Amb. Ext (oC)	Temp Oleo. Medida (oC)	Temp Óleo. Simulada (oC)
Máximo	50,08	36,47	66,19	63,61
Mínimo	15,61	15,52	40,13	39,86
Médio	33,34	24,65	50,13	50,13
<b>Diferenças entre temperaturas do óleo medida - simulada</b>				
quantidade de registros	tipo	média (°C)	desvio padrão (°C)	
1413	negativo	1,3913	0,9713	
1533	positivo	1,2824	0,9728	
<b>Diferenças entre temperaturas do óleo medida - simulada (valores absolutos)</b>				
Média da diferença (°C)		1,3347		
Desvio padrão (°C)		0,9734		
<b>Diferenças em °C (valores absolutos)</b>	<b>dados</b>	<b>%</b>	<b>acumulado</b>	<b>%</b>
até 1	1302	44,20%	1302	44,20%
até 2	898	30,48%	2200	74,68%
até 3	562	19,08%	2762	93,75%
até 4	163	5,53%	2925	99,29%
até 5	19	0,64%	2944	99,93%
maior que 5	2	0,07%	2946	100,00%
Total de dados	2946	100,00%	2946	100,00%
<b>Enquadramento Média Absoluta + Desvio Padrão</b>	<b>dados</b>	<b>%</b>	<b>acumulado</b>	<b>%</b>
até a Média Abs.	1691	57,40%	1691	57,40%
até a Média Abs. + 1,96 DP	1145	38,87%	2836	96,27%
até a Média Abs. + 2,58 DP	82	2,78%	2918	99,05%
maior que a Média Abs. + 2,58 DP	28	0,95%	2946	100,00%
Total de dados	2946	100,00%	2946	100,00%
<b>Probabilidade dos resultados da simulação</b>				
<b>Intervalo dos resultados medidos - simulados</b>		<b>valores ± (°C)</b>		<b>percentual</b>
no intervalo da média das diferenças		1,33		57,40%
no Intervalo de Confiança de 95% (média diferenças+1,96 DP)		3,24		96,27%
no Intervalo de Confiança de 99% (média diferenças+2,58 DP)		3,85		99,05%

Quadro 1. Dados comparativos entre as temperaturas do óleo medidas e simuladas pelo modelo aplicado no transformador da SE Scharlau, março/2004

Observa-se que para a simulação aplicada ao transformador TR1 da SE Scharlau (potência nominal de 36/48/60 MVA), com medições de 01 a 10/03/2004 (gráfico 2 e quadro 1), período de verão caracterizado por altas temperaturas ambientes (média 24,6°C e máxima 36,5°C) e forte demanda (máxima de 50,1 MVA e média de 33,3 MVA), o Coeficiente de Correlação obtido foi de 93,97%, a diferença média entre os valores medidos e simulados foi de  $\pm 1,33^\circ\text{C}$ , compreendendo 57,4% dos resultados. Observando-se ainda que 96,27% dos resultados simulados situaram-se na faixa de

diferença de  $\pm 3,24^\circ\text{C}$  (Intervalo de Confiança de 95%).

Conforme apresentado no quadro 2, a rotina foi aplicada em bases de dados referentes a 13 circunstâncias diferenciadas, onde, para cada equipamento e subestação, consta o período, o número de dias, a quantidade e o intervalo entre os dados; o coeficiente de correlação obtido; a diferença absoluta média entre os valores medidos e simulados; o desvio padrão e o enquadramento dos dados nos padrões do intervalo de confiança de 99% (média  $\pm 2,58$  desvio padrão).

Ensaio utilizando a Temperatura do Óleo									
	Subestação	Mês	Dias	Dados	Intervalo (min)	Correlação	Dif. Abs. Média °C	Desv. Padrão °C	Int. Conf. 99%
1	Scharlau-SL	março	31	2946	15	93,97%	1,33	0,97	99,05%
2	São Leopoldo	junho	10	864	15	84,70%	1,00	1,03	96,30%
3	São Leopoldo	setembro	30	2707	15	80,15%	1,55	1,35	96,93%
4	São Leopoldo	outubro	31	2784	15	84,33%	1,58	1,53	96,84%
5	São Leopoldo	novembro	30	2880	15	85,57%	2,33	1,89	97,19%
6	São Leopoldo	dezembro	14	1344	15	93,47%	1,76	1,21	99,18%
7	Campo Bom - TR2	março	31	2976	15	93,13%	1,66	1,31	98,05%
8	Campo Bom - TR2	julho	31	2954	15	88,21%	1,98	1,70	97,60%
Ensaio utilizando a Temperatura da Imagem Térmica									
	Subestação	Mês	Dias	Dados	Intervalo (min)	Correlação	Dif. Abs. Média °C	Desv. Padrão °C	Int. Conf. 99%
9	São Leopoldo	dezembro	13	1248	15	96,23%	1,99	1,32	99,12%
10	São Leopoldo	novembro	30	2869	15	92,61%	2,49	1,98	97,53%
11	Campo Bom - TR2	março	31	2976	15	96,24%	1,61	1,28	97,98%
12	Campo Bom - TR2	julho	30	2953	15	89,78%	2,07	1,93	96,27%
13	Nova Petrópolis - TR2	junho	10	923	15	91,67%	1,30	0,97	98,59%

Quadro 2. Quadro resumo dos ensaios realizados em subestações

Após os experimentos foi possível constatar que:

- cinco experimentos com dados de verão (mar/dez), períodos com altas temperaturas ambiente e alto carregamento, obtendo-se coeficiente de correlação entre 93,13% e 96,24% (média 94,6%);
- quatro experimentos com dados de inverno (jun/jul), período com baixas a médias temperaturas ambiente e médio carregamento, obtendo-se coeficiente de correlação entre 84,7% e 91,67% (média 88,6%);
- quatro experimentos na primavera (set/out/nov), com temperaturas ambiente muito variáveis, carregamento médio para alto, obtendo-se coeficiente de correlação entre 80,15% e 92,61% (média 85,7%).

Continuando os procedimentos para validação da modelagem, foram realizados mais três experimentos utilizando as mesmas bases de dados das SE Scharlau/TR1 (março/2004),

SE São Leopoldo (setembro/2005) e SE Campo Bom/TR2 (julho/2006). Estas bases de dados foram escolhidas por serem, respectivamente, os experimentos que apresentaram melhor, intermediário e pior desempenho do coeficiente de correlação nas simulações anteriores. Para obter os coeficientes com a rotina simul.m, a modelagem utilizou a primeira metade dos dados, referentes à primeira quinzena de cada base de dados. A segunda metade dos dados (carga e temperatura ambiente) foi aplicada na rotina simulmet.m para comparação com os dados medidos da temperatura do óleo.

Os dados da temperatura medida do óleo apresentados nos resultados não foram usados na modelagem, somente para a confecção do gráfico comparativo e da avaliação das diferenças.

O gráfico 2 e o quadro 3 apresentam os resultados obtidos nesta validação aplicada a SE Scharlau/TR1.

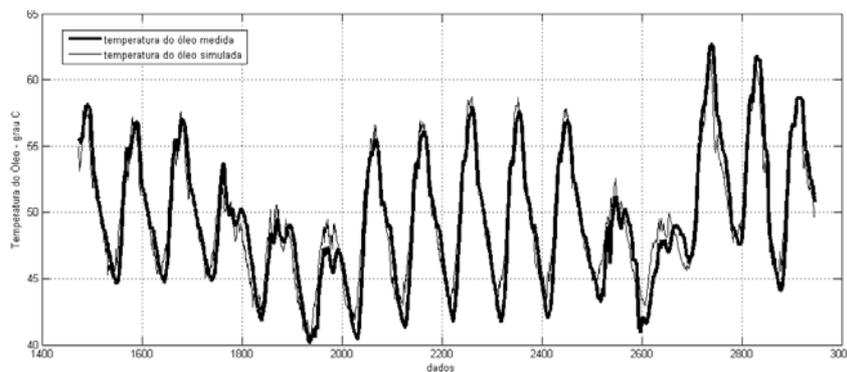


Gráfico 2: Gráfico comparativo da temperatura do óleo medida e simulada em função da carga e da temperatura do ambiente externo, obtido pela equação de modelagem com outra base de dados (SE Scharlau/TR1, segunda quinzena de mar/2004, dados com intervalo de 15 minutos)

Subestação/Transformador	Scharlau/TR1 - 01 a 31/03/2004							
	Resultados obtidos com a rotina simul.m aplicado na primeira metade dos dados				Resultados obtidos com a rotina simulmet.m para a segunda metade dos dados			
Equação de modelagem	temp.óleo=22,1665+0,27397carga+0,76944tamb				temp.óleo=22,1665+0,27397carga+0,76944tamb			
Média da diferença (°C)	1,334				1,3202			
Desvio padrão (°C)	1,016				0,99414			
Diferenças em °C (valores absolutos)	dados	%	acumulado	%	dados	%	acumulado	%
até 1	657	44,60%	657	44,60%	679	46,10%	679	46,10%
até 2	459	31,16%	1116	75,76%	424	28,78%	1103	74,88%
até 3	242	16,43%	1358	92,19%	260	17,65%	1363	92,53%
até 4	96	6,52%	1454	98,71%	99	6,72%	1462	99,25%
até 5	17	1,15%	1471	99,86%	10	0,68%	1472	99,93%
maior que 5	2	0,14%	1473	100,00%	1	0,07%	1473	100,00%
Total de dados	1473	100,00%	1473	100,00%	1473	100,00%	1473	100,00%
Enquadramento Média Absoluta + Desvio Padrão	dados	%	acumulado	%	dados	%	acumulado	%
até a Média Abs.	857	58,18%	857	58,18%	842	57,16%	842	57,16%
até a Média Abs. + 1,96 DP	545	37,00%	1402	95,18%	576	39,10%	1418	96,27%
até a Média Abs. + 2,58 DP	49	3,33%	1451	98,51%	43	2,92%	1461	99,19%
maior que a Média Abs. + 2,58 DP	22	1,49%	1473	100,00%	12	0,81%	1473	100,00%
Total de dados	1473	100,00%	1473	100,00%	1473	100,00%	1473	100,00%
Probabilidade dos resultados da simulação								
Intervalo dos resultados medidos - simulados	valores ± (°C)		percentual		valores ± (°C)		percentual	
no intervalo da média das diferenças	1,33		58,18%		1,32		57,16%	
no Intervalo de Confiança de 95% (média diferenças+1,96 DP)	3,33		95,18%		3,27		96,27%	
no Intervalo de Confiança de 99% (média diferenças+2,58 DP)	3,96		98,51%		3,89		99,19%	

Quadro 3. Dados comparativos da simulação com bases de dados diferentes

## 5 Conclusão

Para a simulação da temperatura do óleo, os dados disponíveis permitiram aplicar testes de validação nas SE São Leopoldo (junho, setembro, outubro, novembro e dezembro), SE Campo Bom/TR2 (março e julho) e na SE Scharlau/TR1 (março).

Considerando todos os ensaios e os parâmetros que podem indicar uma melhor ou pior aproximação entre os resultados medidos e simulados da grandeza em observação (temperatura do óleo), é possível afirmar que o

melhor resultado, correspondente ao teste da SE Scharlau/TR1 com dados de março de 2004, é: Coeficiente de Correlação de 93,97%; diferença média em valores absolutos entre a temperatura medida e simulada de 1,33° C, compreendendo 57,4% dos resultados; o total de 96,3% dos resultados estavam enquadrados no intervalo de diferenças de ± 3,24° C, correspondendo ao Intervalo de Confiança de 95% (média + 1,96 desvio padrão).

O resultado considerado mais afastado correspondeu ao ensaio na SE São Leopoldo, com dados do mês de setembro de 2005, o

qual apresentou os seguintes dados: Coeficiente de Correlação de 80,15%; diferença média em valores absolutos entre a temperatura medida e simulada de 1,55° C, compreendendo 61,3% dos resultados; o total de 95,0% dos resultados estavam enquadrados no intervalo de diferenças de  $\pm 4,2^\circ\text{C}$ , correspondendo ao Intervalo de Confiança de 95%.

Para os ensaios aplicados com a rotina simulit.m, relativos à simulação da temperatura da imagem térmica, os dados disponíveis permitiram testar os seguintes equipamentos: SE São Leopoldo (novembro e dezembro), SE Campo Bom/TR2 (março e julho) e SE Nova Petrópolis/TR2 (junho).

Considerando os ensaios com melhor e pior aproximação entre os valores medidos e simulados da temperatura da imagem térmica, é possível concluir que o melhor resultado foi o apresentado pelo ensaio na SE Campo Bom/TR2, correspondente a março de 2006, obtendo-se: Coeficiente de Correlação de 92,6%; diferença média em valores absolutos entre a temperatura medida e simulada de 1,61° C, compreendendo 59,1% dos resultados; o total de 95% dos resultados estavam enquadrados no intervalo de diferenças de  $\pm 4,12^\circ\text{C}$ , correspondendo ao Intervalo de Confiança de 95%.

O resultado mais afastado também ocorreu com o ensaio no equipamento da SE Campo Bom/TR2, porém com os dados referentes ao mês de julho de 2006, cuja síntese é: Coeficiente de Correlação de 89,8%; diferença média em valores absolutos entre a temperatura medida e simulada de 2,07° C, compreendendo 61,5% dos resultados; o total de 95,2% dos resultados estavam enquadrados no intervalo de diferenças de  $\pm 5,86^\circ\text{C}$ , correspondendo ao Intervalo de Confiança de 95%.

Portanto, pela quantidade de experimentos e validações aplicadas, considerando a diversidade de equipamentos e condições climáticas das condições dos ensaios e, principalmente, a qualidade e pouca margem de diferença dos resultados obtidos com as simulações e o valor real medido, é possível responder as hipóteses 1, 2 e 3 da seguinte forma:

- a rotina de construção de modelos matemáticos de regressão linear múltipla com base no

método dos mínimos quadrados pode ser aplicada, de forma generalizada, para modelar o regime térmico-operativo de transformadores de potência com base na temperatura exterior, na carga e na temperatura do óleo, ou da imagem térmica. É imprescindível que a base de dados seja expressiva e confiável e que os modelos sejam construídos para situações específicas de condições climáticas e de carregamento.

- os resultados das simulações e os respectivos modelos desenvolvidos podem dar suporte às decisões que envolvam o estabelecimento de condições térmicas e operativas dos equipamentos, respeitados os níveis de correlação entre o real e o simulado, considerando os limites estatísticos de erros e diferenças.

Por fim, com os experimentos de validação realizados e descritos, relativos a três equipamentos com coeficientes de correlação diferenciados, é possível concluir que a metodologia e as rotinas propostas são eficazes e confiáveis na sua finalidade de simular parâmetros térmico-operativos, respondendo afirmativamente a hipótese 4. Tal circunstância é relevante principalmente nas condições de altas temperaturas ambientes e de níveis de carregamento próximo aos limites da potência nominal. Condições estas que são as mais exigidas e presentes num processo decisório contingencial de gerenciamento de cargas.

## 6 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5416**: Aplicação de cargas em transformadores de potência: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 91 p.

ALVARES, M. C.; SAMESIMA, M. I.; DELAIBA, A. C. Análise do Comportamento Térmico de Transformadores Suprindo Cargas Não Lineares Utilizando Modelos Térmicos. In: SEMINÁRIO DE NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15, 1999, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 1999.

ANDRADE, F. F.; COELHO, J.; FRÖHLICH, A. A. M.; PIRES, R. P.; MOREIRA, W. S. C.;

- GUIMARÃES, V. L. **Gestão e monitoração remota de transformadores em redes de distribuição de energia elétrica subterrâneas.** WORKSPOT – International Workshop on Power Transformers, 5, 2008, Belém, PA. e CLADE 2008 – Congreso Latinoamericano de Distribucion Electrica, 2008, Mar del Plata, Argentina. (artigo científico)
- ARAGÃO, A. P.; ALMEIDA, O. M.; NOTTINGHAM, A. C. S.; BRAGA, P. R. O.; AMORA, M.; FONTENELE, M. Sistema Distribuído para Monitoramento e Modelagem de Parâmetros de Transformadores Imersos em Óleo. In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 7, 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, CE, 2007.
- CARDILLO, E.; FESER, K. **Monitoring system of large power transformers based on up-to-date information technology.** Stuttgart, Alemanha: University of Stuttgart, Institute of Power Transmission and High Voltage Technology, 2004. (Artigo Científico). Disponível em: [http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2004\\_hve\\_cardillo.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2004_hve_cardillo.pdf)
- ECKHOLZ, K.; KNORR, W.; SCHÄFER, M.; FESER, K.; CARDILLO, E. **New developments in transformer cooling calculations.** Stuttgart, Alemanha: University of Stuttgart e Siemens AG, 2004. (Artigo Científico). Disponível em: [http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2004\\_cigre\\_eckholz.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2004_cigre_eckholz.pdf)
- ELY, F.; BIASOLI, P. K.; LAMBERT-TORRES, G.; MORAES, C. H. V. Sistema Inteligente para Inspeção de Transformadores. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26, 2006, Fortaleza. **Anais ...** Fortaleza, 2006.
- FIROUZIFAR, S.; MAHMOUDI, J. Assessment of Power Transformer Cooler With FEMLAB. In: SCANDINAVIAN CONFERENCE ON SIMULATION AND MODELING, 48, 2007, Vasteras, Suécia. **Anais...** Vasteras, Suécia, 2007.
- JARDINI, J. A.; BRITTES, J. L. P.; MAGRINI, L. C.; BINI, M. A. e YASUOKA, J. Power Transformer Temperature evaluation for overloading conditions.. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 1, 2005.
- KOSOW, I. **Máquinas elétricas e transformadores.** São Paulo: Ed. Globo, 2005.
- LESIEUTRE, B. C.; HAGMAN, W. H.; KIRTLEY JR., J. R. An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 1, 1997.
- MARINO, P.; POZA, F.; OTERO, S.; MACHADO, F. Development of condition monitoring instrumentation for sensing power transformers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSING TECHNOLOGY, 1, Nov. 2005, Palmerston Nort. **Proceedings...** Palmerston Nort, New Zealand: 2005.
- MILASCH, M. Manutenção de transformadores em líquido isolante. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2008.
- OHIS, V.; CZASZEJKO, T. Thecniques for estimation of hot spot temperatures in transformers. In: AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2002, Melbourne, Austrália. **Proceedings...** Melbourne, Austrália: AUPEC, 2002.
- PAN, C.; CHEN, W.; YUN, Y.; WANG, Y; SUN, C. **Power transformer top-oil temperature model based on thermal-electric analogy theory.** Chongqing, China: State Key Laboratory of Safety and New Technology of Power Transmission & Distribution Equipment and System Chongqing University, 2006.
- PRADHAN, M. K. e RAMU, T. S. On-line monitoring of temperature in power transformers using optimal linear combination of ANNs. In: Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004, Indianápolis, USA. **Proceedings...** Indianápolis, USA: 2004.
- RADAKOVIC, Z.; CARDILLO, E.; FESER, K. Temperature distribution in windings of transformers with natural oil circulation. Stuttgart, Alemanha: Institute for High Voltage Technology and Power Transmission, University of Stuttgart, 2002. (Artigo Científico)

- RADAKOVIC, Z.; CARDILLO, E.; FESER, K.; SCHÄFER, M. **Thermal behavior of transformers with natural oil convection cooling**. Stuttgart, Alemanha: Institute for High Voltage Technology and Power Transmission, University of Stuttgart, 2002. (Artigo Científico) <[http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2002\\_etg\\_radakovic.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2002_etg_radakovic.pdf)>
- RADAKOVIC, Z.; FESER, K. A New Method for the Calculation of the Hot-spot Temperature in Powers Transformers with ONAN Cooling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 4, 2003.
- RADAKOVIC, Z.; CARDILLO, E.; FESER, K. The Influence of Transformer Loading to the Ageing of the Oil-paper Insulation. Rotterdam, Holanda In: International Symposium on High Voltage Engeneering, 12, 2003, Netherlands. **Proceedings....** Rotterdam: Millpress, 2003.
- SILVA, E. M.; SILVA, E. M. **Matemática e estatística aplicada**. São Paulo: Ed. Atlas, 1999. 167 p.
- SILVA, J. R. Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- SILVA, P. R. C. Gerenciamento de Dados para o Monitoramento e Avaliação da Condição Operativa de Transformadores. In: SEMINÁRIO “TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A LONGA DISTÂNCIA, 2007, Recife. **Anais...** Recife, Toshiba do Brasil, 2007.
- SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. A. **Teoria e problemas de probabilidade e estatística**. São Paulo: Ed. Bookman, 2004. 398 p.
- SUSAN, D. **Dynamic thermal modelling of power transformers**. Tese. (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology. Helsinki, Finlândia: 2005.
- TAKAMI, K. M.; MAHMOUDI, J. A novel device (Oil Spraying System) for local cooling of hot spot and high temperature areas in power transformers. Vasteras, Suécia: Malardalen University, 2009. (Artigo Científico).
- TYLAVSKY, D. J.; HE, Q.; MCCULA, G. A.; HUNT, J. R. Transformer top-oil temperature modeling and simulation. **IEEE Transaction on Industry Applications**, v. 36, n. 5, 2000.
- VILATHONG, R.; TENBOHLEN, S.; STIRL, T. **Investigation of different top-oil temperature models on-line monitoring system of power transformer..** Stuttgart, Alemanha: Institute of Power Transmission and High Voltage Technology, University of Stuttgart, 2006. (Artigo Científico)