



Análise do Comportamento Térmico de Transformadores

Msc. Nelson Clodoaldo de Jesus
AES Sul - Planejamento e Engenharia
nelson.jesus@aes.com

Msc. Carlos E. C. Figueiredo
AES Sul - Planejamento e Engenharia
carlos.figueiredo@aes.com

Msc. Daniel P. Bernardon
AES Sul - Operação
daniel.bernardon@aes.com

Tec. Gabriel Mello
AES Sul - Manutenção e Expansão AT
gabriel.mello@aes.com

Tec. Roberto Rech
AES Sul - Operação
roberto.rech@aes.com

Tec. Francisco Diuner
AES Sul - Operação
francisco.diuner@aes.com

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação das condições de operação de transformadores no que se refere ao comportamento térmico do equipamento. A partir da metodologia de cálculo das temperaturas do óleo e enrolamento do transformador, apresenta-se uma análise comparativa com resultados obtidos em campo. Utilizou-se o equacionamento clássico para as elevações de temperatura, determinando-as a partir do comportamento real das curvas de carga dos transformadores e temperatura ambiente. Os resultados serviram como suporte a implementação de um plano de ação, visando adequação e propostas de reajustes nos sistemas de imagem térmica, bem como alternativas de priorização no caso de necessidade de atuação do sistema de proteção.

PALAVRAS-CHAVE

Carregamento, limites térmicos, transformadores.

1. INTRODUÇÃO

A parte ativa de um transformador constitui-se de uma fonte de calor devido às perdas que surgem em suas condições operacionais, com isso, há a elevação de temperatura destas partes. O aquecimento do transformador diminui o rendimento e a vida útil do isolamento. Desta forma, a temperatura está intimamente ligada com as perdas no transformador, ou seja, quanto maior for o aquecimento, maior serão as perdas e menor será o rendimento. Com isso, há uma limitação da potência possível de ser solicitada ao equipamento, ou seja, a capacidade de carga do transformador está intrinsecamente ligada aos níveis de temperatura. Na realidade, pode-se considerar que o funcionamento em temperaturas elevadas causa um envelhecimento mais acelerado do isolamento, comparando-se com condições nominais. O envelhecimento do isolamento relaciona-se diretamente com a vida útil do transformador. Entretanto, este tempo é bastante variável dependendo do ciclo de carga do transformador, os quais o solicita termicamente. A seguir, apresentam-se considerações sobre o

aquecimento de transformadores e o equacionamento utilizado para estimação dos parâmetros térmicos, comparando-se os resultados de simulação com os obtidos em campo. Posteriormente, verificou-se a projeção e proposta de carregamento limite de acordo com as características próprias do sistema, servindo como base para diversos estudos e análise do comportamento térmico de transformadores e ações correlatas.

2. AQUECIMENTO DE TRANSFORMADORES

O calor gerado nas diversas partes dos transformadores resulta em elevação de temperatura dos enrolamentos e do óleo. E assim, são determinadas as respectivas temperaturas absolutas em relação a temperatura ambiente. O carregamento de transformadores sempre foi um assunto muito discutido na comunidade científica e a aplicação de uma carga superior a nominal pode trazer riscos ao equipamento. Mesmo a expectativa de vida do isolamento traz controvérsia, pois como é baseada na temperatura do ponto mais quente, normalmente na espira mais interna e elevada do enrolamento, sendo que muitos fatores influenciam o efeito cumulativo dessa temperatura. Portanto, não é fácil a tarefa de estimar com um grande grau de precisão a vida útil do isolamento, tanto em condições controladas, quanto mais em condições de serviço. O acréscimo e decréscimo das temperaturas do óleo e dos enrolamentos dependem de vários fatores, tais como:

- Perdas;
- Ciclo de trabalho;
- Condições ambientais.
- Características construtivas e sistema de refrigeração

2.1. Limites Normalizados

As normas adotam valores limites para ambos os casos, visando fornecer parâmetros de referência nas mais diversas situações operacionais. Entretanto, como os enrolamentos se aquecem mais intensamente, os limites são diferentes entre si. Estes valores são os fornecidos pela tabela 1, conforme estabelecido pela NBR 5316/1997¹. Os transformadores são descritos com referência de classe 55°C e 65°C, respectivamente. Para ambos os casos e sob condições normais de operação, a norma adota os limites de temperatura fornecidos pela tabela 1.

Tabela 1 - Temperaturas Limite para Carregamento Normal

Transformador		55°C	65°C
Máxima Temperatura	Topo do óleo	95 °C	105 °C
	Ponto mais quente	105 °C	120 °C

Ainda na citada tabela, tem-se:

- Transformadores com elevação de temperatura dos enrolamentos não superior a 55°C e elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima do ambiente, não superior a 65°C;
- Transformadores com elevação média de temperatura dos enrolamentos, acima do ambiente, não superior a 65°C e elevação de temperatura do ponto mais quente, acima do ambiente, não superior a 80°C.

3. EQUACIONAMENTO

Na metodologia utilizada para estimativa das temperaturas do transformador, adotou-se o equacionamento descrito na norma IEEE Std C.57.91/95² e considerações da norma NBR 5416/97¹ para avaliação do comportamento térmico dos transformadores. No procedimento de cálculo, utilizou-se à curva de carga com amostragem a cada minuto, tomando como base a temperatura ambiente medida para determinação das temperaturas do óleo e enrolamento. A temperatura do ponto quente é determinada, consistindo-se de três componentes como mostrado na equação (1).

$$\theta_E = \theta_A + \Delta\theta_O + \Delta\theta_E \quad (1)$$

Onde:

θ_E - Temperatura do ponto quente do enrolamento [°C]

θ_A - Temperatura ambiente [°C]

$\Delta\theta_O$ - Elevação do topo do óleo sobre o ambiente [°C]

$\Delta\theta_E$ - Elevação do ponto quente sobre o topo do óleo [°C]

3.1. Elevação de Temperatura do Óleo

A temperatura do topo do óleo $\theta_O(t)$ pode ser calculada conforme a equação a seguir.

$$\theta_O = \theta_A + \Delta\theta_O \quad (2)$$

A elevação de temperatura do topo de óleo sobre a ambiente é determinada como se segue.

$$\Delta\theta_O = (\Delta\theta_O(f) - \Delta\theta_O(i)) \times \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{60 \cdot \tau_o}} \right) + \Delta\theta_O(i) \quad (3)$$

Onde:

$\Delta\theta_O(i)$ - Elevação inicial do topo do óleo sobre a ambiente para o período inicial do intervalo [°C]

$\Delta\theta_O(f)$ - Elevação final do topo do óleo sobre a ambiente para qualquer carga [°C]

τ_o - Constante de tempo do topo do óleo [horas]

Δt - intervalo de aquisição da curva de carga [1 minuto]

A elevação de temperatura do topo do óleo no período final do intervalo é calculada como mostra a equação (4).

$$\Delta\theta_O(f) = \left(\frac{fc^2 \cdot R_P + 1}{R_P + 1} \right)^n \times \Delta\theta_{O(N)} \quad (4)$$

Sendo:

fc - Fator de carga

R_P - Relação das perdas em carga sobre as perdas a vazio

n - Expoente do óleo do transformador

$\Delta\theta_{O(N)}$ - Elevação do topo do óleo sobre a ambiente para carga nominal [°C]

Para qualquer valor de expoente do óleo (n) e qualquer valor de carregamento, a constante de tempo do topo do óleo é determinada de acordo com a seguinte expressão.

$$\tau_0 = \tau_{O(N)} \times \left(\frac{\frac{\Delta\theta_O(f)}{\Delta\theta_{O(N)}} - \frac{\Delta\theta_O(i)}{\Delta\theta_{O(N)}}}{\left(\frac{\Delta\theta_O(f)}{\Delta\theta_{O(N)}}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{\Delta\theta_O(i)}{\Delta\theta_{O(N)}}\right)^{\frac{1}{n}}} \right) \quad (5)$$

$\tau_{O(N)}$ - Constante de tempo térmica para carga nominal com temperatura inicial do topo do óleo igual a temperatura ambiente [horas]

3.2. Elevação de Temperatura do Enrolamento

De maneira similar, a elevação de temperatura do ponto quente do enrolamento poder ser determinada a partir da temperatura do topo do óleo, conforme apresentado.

$$\theta_E = \theta_O + \Delta\theta_E \quad (6)$$

O cálculo da elevação de temperatura do ponto quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo é obtido conforme a equações (7) e (8).

$$\Delta\theta_E = (\Delta\theta_E(f) - \Delta\theta_E(i)) \times \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{60 \cdot \tau_E}} \right) + \Delta\theta_E(i) \quad (7)$$

$$\Delta\theta_E(f) = \Delta\theta_{E(N)} \cdot fc^{2 \cdot m} \quad (8)$$

Onde:

$\Delta\theta_E(i)$ - Elevação inicial do ponto quente sobre o topo do óleo para o período inicial do intervalo [°C]

$\Delta\theta_E(f)$ - Elevação final do ponto quente sobre o topo do óleo para qualquer carga [°C]

τ_E - Constante de tempo do ponto quente do enrolamento [horas]

m - Expoente do enrolamento

$\Delta\theta_{E(N)}$ - Elevação do ponto quente do enrolamento sobre o topo do óleo para carga nominal [°C]

4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

4.1 Dados do Transformador

Tomando como referência as informações e dados de catálogo do transformador localizado na SE de São Leopoldo (SE SLE), bem como os parâmetros típicos e limites normalizados, obteve-se o comportamento da elevação de temperatura do óleo e enrolamento. Os dados nominais do transformador utilizados na simulação foram os seguintes.

- Potência Nominal: 36/48/60 MVA
- Tipo de Refrigeração: ONAN/ONAF/ONAF
- Limite de Elevação de Temperatura dos Enrolamentos: 55°C
- Limite de Elevação de Temperatura do Óleo: 55°C
- Peso do Núcleo e Enrolamento: 40450 kg
- Peso do Tanque e Acessórios: 16700 kg
- Volume do Óleo: 18990 litros
- Perdas a Vazio: 42,94 kW
- Perdas Joule: 146,46 kW
- Perdas Adicionais: 39,44 KW

4.2 Análise Térmica

Para uma melhor avaliação do limite de carregamento do transformador, utilizaram-se dados típicos do sistema, incluindo o comportamento e perfil de potência demandada e temperatura ambiente. Em um primeiro momento, tem-se o levantamento da curva de carga típica do transformador da SE SLE, registrada em 22/11/05. Neste caso, para uma demanda máxima de 56,7 MVA registrou-se o alarme relacionado à temperatura dos enrolamentos. A figura 1 mostra o perfil da potência aparente do transformador registrado nesta data. Esta subestação apresenta monitoramento em tempo real das temperaturas ambiente, do óleo e enrolamento. Na mesma condição de carregamento, verificou-se uma temperatura máxima de 90°C nos enrolamentos. Para análise comparativa, estimaram-se ambas as temperaturas, do topo do óleo e do ponto quente do enrolamento, utilizando-se do método ponto a ponto e parâmetros específicos do transformador, como descrito anteriormente.

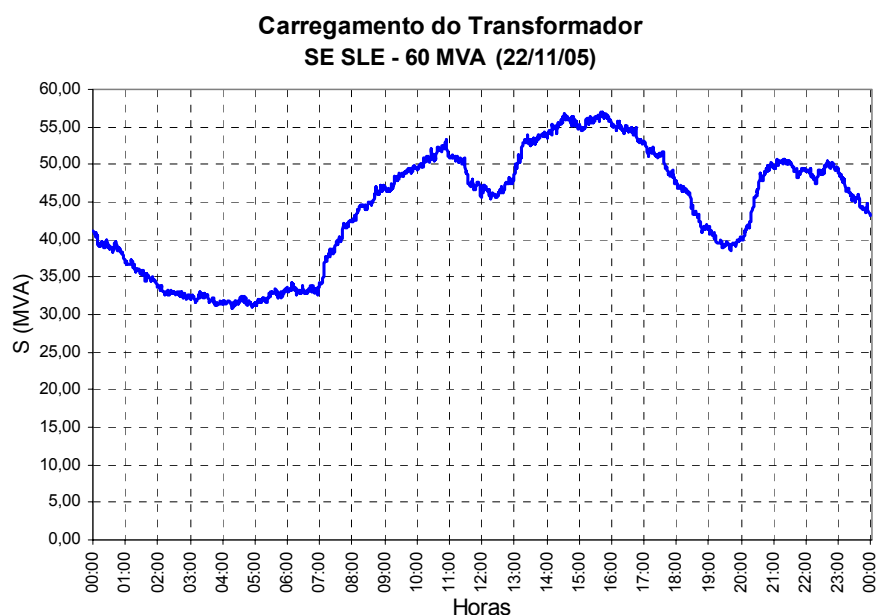


Figura 1 - Carregamento do Transformador

A figura 2 mostra a comparação entre as grandezas medidas e estimadas. Observa-se na figura 2 um comportamento similar entre as grandezas medidas e estimadas, entretanto, em torno do carregamento térmico mais significativo, existe uma diferença em torno de 5°C entre as temperaturas do ponto quente do enrolamento. Além da utilização da fórmula clássica, mais conservativa, existe também a diferença de desempenho real das condições de troca e dissipação de calor do transformador sob análise em relação aos limites normalizados.

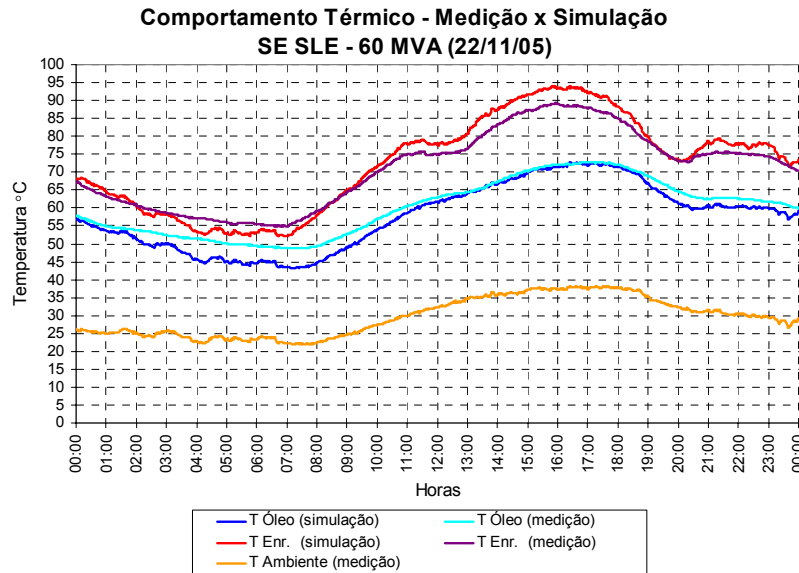


Figura 2 - Comportamento térmico do transformador

4.3 Ajuste de Parâmetros de Cálculo

De posse dos resultados da medição, realizou-se um ajuste dos parâmetros com o objetivo de reduzir os erros para esta condição. Neste caso, o parâmetro que tem maior influência na análise comparativa refere-se ao gradiente de temperatura dos enrolamentos sobre o óleo, bem como de pequenas alterações nos expoentes das fórmulas que determinam as diferenças entre as temperaturas do óleo e enrolamento. A figura 3 mostra a mesma análise comparativa considerando o ajuste dos parâmetros. Neste caso, adotou-se uma diferença de cerca de 20°C entre a elevação da temperatura do ponto quente do enrolamento sobre o óleo. Este dado está em acordo com os valores observados nas medições, como se verifica pela análise dos resultados apresentados.

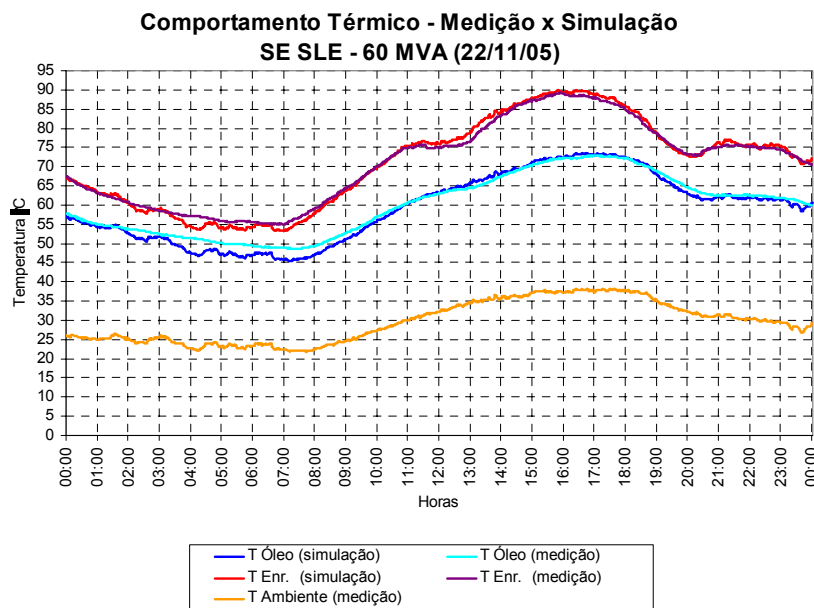


Figura 3 - Comportamento térmico do transformador (parâmetros ajustados)

4.4 Limites de Carregamento

Como os resultados comparativos indicaram que as simulações podem ser utilizadas com certa aproximação, principalmente sob carregamento elevado, onde o modelo se apresentou mais conservativo, pode-se adotar o mesmo método para estimar um limite de carregamento em função da curva de carga típica. Adotando-se a curva típica de carregamento, verificam-se os valores previstos para o crescimento de carga em conformidade aos valores adotados como limites de operação. A figura 4 mostra o perfil do carregamento máximo estimado para o transformador durante o período de verão. Neste caso, estimou-se para os dados de temperatura ambiente o valor relativo a 40°C, mantendo-a constante ao longo do dia típico. A partir de dados previstos em termos do crescimento de demanda, determinou-se o comportamento dos parâmetros térmicos e elevação das temperaturas do óleo e do ponto quente do enrolamento. O valor máximo encontrado na simulação foi de 106,3° C, conforme mostrado na figura 5. Salienta-se que os valores utilizados para este item não foram os ajustados e sim aqueles da simulação original, os quais mostram temperaturas mais elevadas, reduzindo-se assim a possibilidade de subestimar os limites.

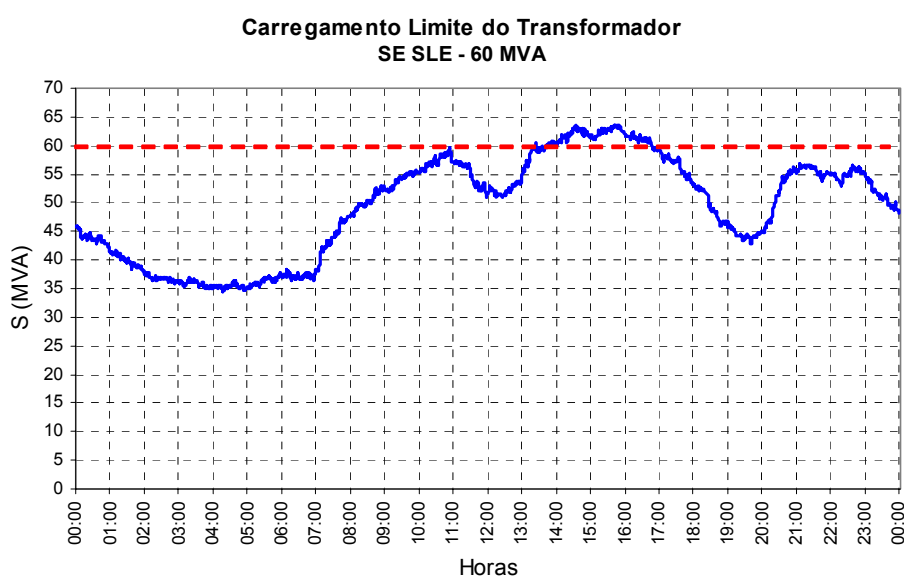


Figura 4 - Carregamento limite do transformador

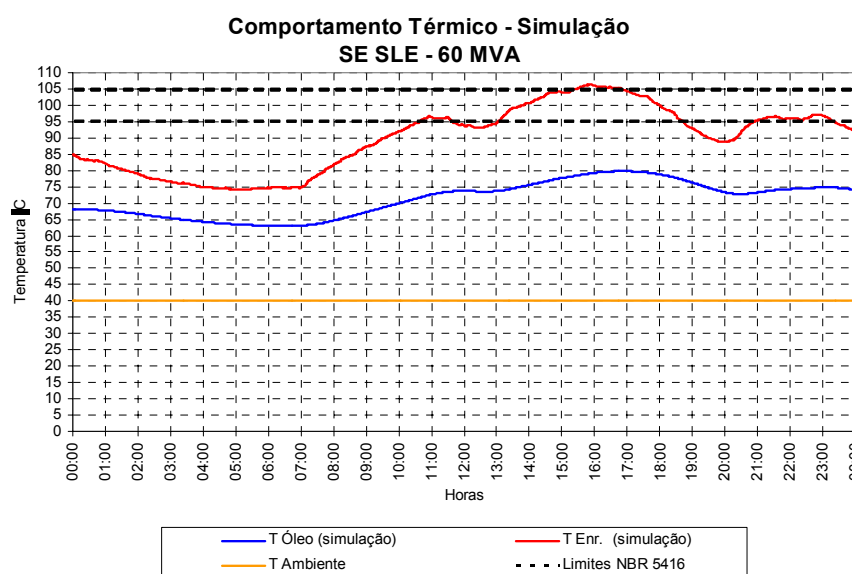


Figura 5 - Comportamento térmico do transformador para carregamento limite

Com base nos resultados obtidos, foram propostos novos ajustes para o sistema de proteção térmica e potência de referência para o máximo carregamento. Os valores de ajuste aprovados em conjunto ao fabricante são os seguintes: O acompanhamento das temperaturas do transformador em tempo real permite a otimização do carregamento térmico, onde se tem como premissa estabelecer condições adequadas de produtividade da transformação sem a degradação da aceleração da vida útil do equipamento. Os limites propostos na época do estudo são mostrados em seguida. Após avaliação final e como apresentado posteriormente, utilizou-se nova filosofia de proteção sem os respectivos níveis de alarme, mantendo-se os valores máximos definidos.

- Limite de Carregamento: 63,6 MVA (1,06 pu)
- Temperatura Máxima do Topo do Óleo: 95°C
- Temperatura Máxima do Ponto Quente: 110°C
- Ajustes Atuais do Alarme e Trip para Temperatura do Óleo: 75°C e 85°C
- Ajustes Propostos: 80°C e 95°C
- Ajustes Atuais do Alarme e Trip para Temperatura dos Enrolamentos: 85°C e 105°C
- Ajustes Propostos: 95°C e 110°C

5 SUPORTE E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Com o estudo apresentado e resultados obtidos, validou-se a modelagem junto ao próprio fabricante do equipamento, onde foram propostos novos reajustes para o sistema de proteção. Como suporte adicional, foram estimadas as temperaturas para outros transformadores de potência. Neste sentido, desenvolveu-se um plano de ação, envolvendo atividades de operação, manutenção do sistema da AES Sul. Neste procedimento, abordou-se diversas etapas no processo de análise do comportamento térmico de transformadores da AES Sul, como descrito a seguir.

5.1 Medidores de Temperatura

Realizou-se levantamento de todos os transformadores com possibilidade de alarme e/ou atuação devido a temperatura, seja esta temperatura do óleo ou do enrolamento. Juntamente a este trabalho, inclui-se os transformadores que estavam com seus carregamentos acima de 90%. Com base nas informações de carregamento, sinalização óleo ou enrolamento, desarme ocorrido foi estabelecido um critério de priorização. A informação correta da temperatura é de fundamental importância para a realização deste trabalho, sendo assim, foram executadas atividades de campo para aferição e calibração de todos os medidores de temperaturas dos transformadores selecionados. De posse dos equipamentos devidamente calibrados e aferidos, iniciou-se a segunda etapa para a definição dos limites de Trip.

5.2 Ajustes da Proteção de Temperatura

Utilizando a NBR 5416, bem como os dados de placa fornecidos pelo fabricante e as análises de óleo efetuadas periodicamente pelas equipes de manutenção, pode-se avaliar mais precisamente cada caso. Após estudos realizados, obtivemos de forma mais clara os pontos mais críticos no sistema da AES Sul. Para a implementação dos ajustes de Trip, criamos uma nova metodologia, o qual mantém a segurança do equipamento e minimiza os impactos ocasionados aos clientes da AES Sul. Com os dados históricos dos indicadores técnicos de continuidade, e avaliação da performance atual dos alimentadores, definiram-se os critérios de priorização em função da criticidade dos clientes. Definiu-se dois estágios de Trip, sendo o primeiro estágio de Trip acionado quando da sinalização do alarme, o qual enviara sinal para redução momentânea em um circuito alimentador, o qual deverá obrigatoriamente cortar cerca de 30% da carga do transformador de potência, reduzindo as temperaturas de operação e o risco de desarme do transformador. Como forma de manter a proteção do equipamento, o segundo estágio de Trip foi mantido no transformador de potência, como forma de proteção de retaguarda.

5.3 Projeção de Carregamento e Temperatura

A AES Sul através do histórico de crescimento de carga dos transformadores de potência, junto as solicitações novas de demanda do sistema, projetou o cenário de carga para estes equipamentos, bem como a informação das obras previstas para ampliação do sistema. Estes cenários de carga foram projetados para os períodos mais críticos, no verão de 2006, 2007 e 2008, os quais visam a curto e médio prazo atender a demanda da AES Sul até a execução das obras de ampliação e expansão do sistema.

5.4 Revisão da Proteção

Paralelamente as atividades mencionadas anteriormente, revisou-se todo o sistema de proteção, para a definição de novos valores de carregamento, em função das temperaturas obtidas, avaliando-se os pontos onde a proteção poderia ocasionar restrição ao sistema, o que conduziu a alternativas e medidas no sentido de minimizar os possíveis impactos de carregamento ao sistema como um todo.

Portanto, as atividades do plano de acompanhamento dos transformadores constituiriam-se na aferição/calibração dos medidores de temperatura, definição da filosofia de proteção e valores de atuação, definição dos critérios para priorização de alimentadores, implementação dos valores de trip e projeção da temperatura em função da previsão dos carregamentos. A figura 6 mostra um exemplo dos dados utilizados na planilha de acompanhamento do desempenho dos transformadores.

AES Sul												
Acompanhamento de Transformadores												
Equipamento	Capacidade (MVA)	Carreg (%)	Mês Alarmou	Cenário Atual				Projeção de Carga (2007)			Previsão de Obra	
				Trip AL		Trip TR		Desarmou por Temperatura?	Carreg (%)	°C Enrolamento		°C Óleo
				Enrolamento	Óleo	Enrolamento	Óleo					
CCE TR-2	10	107%	Jan/06	103	90	105	95	sim	116%	113	82,5	Ampliação 2006
SBO1 TR-1	25	107%	Jan/06	103	90	105	95	sim	108%	114	86	Ampliação 2006/2007 - SE SBO2
LAJ1 TR-1	25	105%	Jan/06	103	90	105	95	não	112%	110	81	Transf. Carga p/ LAJ2 (2,5 MVA)
CDL TR-2	5	105%	-	103	90	105	95	não	120%	103	69,5	Obra distr p/ transferir carga p/ TR1 - 2006
QUA TR-1	10	104%	Jan/06	103	90	105	95	sim	116%	108	79,3	Ampliação 2006
ETL2 TR-2	13	102%	-	103	90	105	95	não	115%	108	79	Ampliação 2006
SCR2 TR-1	25	99%	-	103	90	105	95	não	114%	95	67	Ampliação 2007 - SE Sinimbu
ZOO TR-1	38	98%	-	103	90	105	95	não	104%	102	76	Ampliação final 2007 + SE Sapucaia
EVE TR-1	42	97%	Jan/06	103	90	105	95	não	102%	100	75	Ampliação 2007 - SE DIR
DIR TR-1	25	96%	Nov/05	103	90	105	95	não	108%	104	77,7	Ampliação 2007 - SE DIR
ENC TR-1	25	94%	-	103	90	105	95	não	104%	100	76	
SLE TR-1	60	94%	Nov/05	108	90	110	95	não	103%	105	79	Ampliação 2007 - SE Sapucaia

Figura 6 - Planilha de acompanhamento de transformadores

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo apresentou uma avaliação do comportamento térmico de transformadores de potência da AES Sul. Para estimativa das temperaturas do topo de óleo e ponto quente do enrolamento aplicou-se a metodologia e equacionamento em um caso exemplo, comparando-se os resultados de simulação e de campo. Após análise desses resultados e consulta ao próprio fabricante, validou-se os resultados, propondo-se novos ajustes e limites de operação, sem entretanto, considerar a perda excessiva de vida útil do equipamento. Deve-se salientar que é fundamental os dados de catálogo e ensaios para obtenção de resultados adequados. De modo adicional, estimou-se o limite de carregamento para crescimento da demanda, bem como o cálculo para as demais instalações e transformadores a partir das curvas de carga detalhada em cada caso. Um aspecto importante sobre a análise do perfil térmico dos transformadores são os dados para aplicação da metodologia, pois os dados típicos de norma podem levar a resultados distintos e, normalmente, se obtém valores mais conservativos.

De forma a contribuir com as necessidades, elaborou-se um plano de ação, envolvendo as áreas de engenharia, manutenção e operação. Um fator importante observado é a diferença real de desempenho de transformadores classe 55 °C, mas que usam papel do tipo termo-estabilizado, como no caso exemplo analisado, resultando em uma menor solicitação ao sistema de isolamento. Para análise do tempo de vida útil, deve-se considerar a produtividade do transformador, a qual é baseada na relação entre a perda de vida percentual real e a referencial, tomada em relação a um determinado período de tempo³. Salienta-se que devem ser realizadas análises criteriosas sobre os resultados de simulação, pela própria complexidade dos parâmetros, incluindo-se avaliações físico-químicas, grau de polimerização do papel isolante, gás-cromatográficas do óleo, ciclos de carregamento emergenciais e níveis de risco dos equipamentos, definindo as condições operativas do sistema, ou mesmo, no uso de sistema de monitoramento e diagnósticos integrados a outros aspectos relacionados aos limites operacionais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ABNT, NBR 5416. *Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência – Procedimento*, julho/1997.

2 IEEE Std. C57.91. *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformer*, junho/1995.

3 DUPONT, J. Carlos; CHAVES, A.M. José. *Metodologia para Avaliação das Condições Admissíveis de Sobrecarregamento e da Perda de Vida Útil de Transformadores*. XV SNPTEE, Foz do Iguaçu/PR, outubro/1999.