LEANDRO FUMIO TAMURA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE
TÉRMICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DE
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO**

São Paulo

2009

LEANDRO FUMIO TAMURA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE
TÉRMICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DE
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração:
Sistemas de Potência**

**Orientador: Prof. Dr.
Luiz Lebensztajn**

São Paulo

2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de Julho de 2009

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Tamura, Leandro Fumio

Determinação de parâmetros do circuito equivalente térmico em transformadores de potência por meio de técnicas de otimização / L.F. Tamura. -- São Paulo, 2009.
p. 115

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Transformadores e reatores 2. Transferência de calor 3. Identificação de sistemas 4. Otimização não linear I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiz e Yoshiko Tamura por todo esforço, dedicação e sacrifício que fizeram para moldar a pessoa que sou hoje e por sempre estarem presentes na vida. É para eles que dedico a realização deste sonho.

Ao Professor Luiz Lebensztajn por toda a orientação, dedicação, conselhos e conhecimentos passados a mim durante toda a fase de mestrado.

À minha querida Katia Miagava por todo carinho, felicidade, compreensão e conforto passados a mim durante a fase mais difícil desta jornada.

Às minhas irmãs Karin e Larissa por acompanharem toda a trajetória da minha vida.

Aos colegas do LMAG pela estrutura que recebi para que os trabalhos de pesquisa fossem realizados.

Aos Dr. Hasse Nordman e Dr. Dejan Susa por prover valiosas informações para este trabalho.

Aos meus colegas da ABB por terem compreendido a importância pessoal deste trabalho durante as fases mais críticas.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Transformadores de potência representam um grande volume de investimento em sistemas de transmissão e distribuição. Falhas em transformadores têm um alto impacto econômico na exploração de uma rede. O parâmetro mais importante e que define a vida útil de isolamento de um transformador é a temperatura do ponto mais quente de seus enrolamentos.

O trabalho analisa dois modelos térmicos de transformadores de potência. Eles nos permitem calcular as temperaturas do óleo no topo e na parte inferior e a temperatura do ponto quente no enrolamento. Ambos os modelos são baseados em circuitos elétricos a parâmetros concentrados. O primeiro é uma proposta de Susa, que envolve a solução de dois circuitos elétricos acoplados. Já Tang sugere um segundo modelo, que consiste em um circuito elétrico de três nós.

O principal objetivo deste trabalho é a obtenção dos parâmetros térmicos de ambos os modelos baseados em temperaturas medidas para uma determinada carga. Duas abordagens diferentes de otimização serão avaliadas: uma mono objetivo e outra multi objetivo. A segunda oferece-nos uma análise de sensibilidade de parâmetros do modelo.

Ambos os métodos de otimização foram utilizadas para obter os parâmetros térmicos de um transformador de potência 250 MVA resfriamento ONAN (Óleo Natural, Ar Natural). Os parâmetros obtidos do modelo térmico são então utilizadas para outras curvas de carga e também são comparadas com a norma IEEE C57.91 1995 com boa precisão.

ABSTRACT

Power transformers represent a large amount of investment in transmission and distribution systems. Faults in transformers have a high economic impact in the operation of a network. One of the most important parameters that govern the life of transformers is its hotspot temperature, which defines the loss of life of the equipment.

The work analyzes two thermal models for a power transformer. They allow us to calculate the top oil temperature, the bottom oil temperature and the hotspot temperature of power transformers. Both models are based on lumped parameters. The first one is proposed by Susa, and involves the solution of two coupled electrical circuits. Tang suggests the second one, which consists on an electric circuit of three nodes to be solved.

The main objective of this work is to obtain the thermal lumped parameters of both models based on measured temperatures for a given load curve. Two different approaches will be adopted: a mono-objective optimization and a multiobjective optimization. The second one provides us a sensitivity analysis of the model parameters.

Both optimization methods were used to obtain the thermal lumped parameters in a 250 MVA ONAN power transformer. The obtained parameters of the thermal model are then used for other load curves and compared with the guide IEEE C57.91 1995 with good accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Arranjo típico interno de um transformador de potência.....	7
Figura 2.1 - Esquema básico de troca de calor em um transformador de potência.	13
Figura 2.2 - Circuito RC elétrico	16
Figura 2.3- Circuito térmico análogo	16
Figura 2.4 - Propriedades físicas do óleo do transformador: o fator C_1	21
Figura 2.5- Variação da viscosidade do óleo com a temperatura.....	22
Figura 2.6- Modelo de temperatura do topo do óleo	22
Figura 2.7- Modelo de temperatura do ponto quente do enrolamento	28
Figura 2.8 – Modelo térmico completo para determinação do ponto quente baseado na temperatura do topo do óleo.....	34
Figura 2.9 – Modelo térmico completo para determinação do ponto quente baseado na temperatura inferior do óleo.....	36
Figura 2.10 - Circuito equivalente do modelo térmico de 5 nós para o transformador de potência	40
Figura 2.11 - Circuito de calor equivalente simplificado de um modelo térmico para um transformador de potência	41
Figura 3.1 - Ilustração da disposição dos diversos componentes em uma metodologia de otimização. [35].....	46
Figura 3.2– Fluxograma de um AG simples. [35]	50
Figura 3.3– Esquema Básico da Dominância de Pareto	52
Figura 3.4 - Análise de Sensibilidade buscando soluções robustas. [35].....	55
Figura 4.1 - Diagrama esquemático de otimização de parâmetros para circuito térmico	61
Figura 4.2 - Modelagem térmica Susa – circuitos para determinação de temperatura de ponto quente do enrolamento baseados nas temperaturas de topo e inferior do óleo.....	62

Figura 4.3 - Modelagem térmica Tang – circuito para determinação de temperaturas de ponto quente no enrolamento e temperatura de topo e inferior do óleo	63
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Carga 1 e perdas aplicadas e HS, TO e BO para valores de parâmetros térmicos encontrados com otimização de AG mono objetivo para modelo Tang	77
Gráfico 5.2 -. HS, TO e BO calculados para a Carga 2 com parâmetros térmicos determinados na tabela 5.3.....	78
Gráfico 5. 3 - HS, TO e BO calculados para a Carga 3 com parâmetros térmicos determinados na Tabela 5.3.....	80
Gráfico 5.4 - Dominância de Pareto para erros médios absolutos de HS, TO e BO	82
Gráfico 5.5 - Número de ocorrências de cada parâmetro térmico.....	83
Gráfico 5.6 - Carga 1 e perdas aplicadas e HS e TO para valores de parâmetros térmicos encontrados com otimização de AG mono objetivo para Modelo Susa	85
Gráfico 5.7 - Carga 1 e perdas aplicadas e HS e BO para valores de parâmetros térmicos encontrados com otimização de AG mono objetivo para Modelo Susa	86
Gráfico 5.8- Carga 2 aplicada e HS e TO pelo modelo de Susa	87
Gráfico 5.9 - Carga 2 aplicada e HS e BO pelo modelo Susa	88
Gráfico 5.10 - Carga 3 aplicada e HS e TO pelo modelo Susa	90
Gráfico 5.11 - Carga 3 aplicada e HS e BO pelo modelo Susa	91
Gráfico 5.12 - Fronteira de Pareto para Modelo de Susa – AG multi objetivo – HS a partir de TO	93
Gráfico 5.13 - Análise de Sensibilidade Modelo de Susa – HS baseado em TO ..	94
Gráfico 5.14 - Fronteira de Pareto para Modelo de Susa – AG multi objetivo – HS a partir de BO.....	95
Gráfico 5.15 - Análise de Sensibilidade Modelo de Susa – HS baseado em BO ..	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Analogia térmica-elétrica.....	16
Tabela 2.2- Características térmicas do óleo do transformador, [28]	17
Tabela 2.3 - Valores empíricos para constantes C e n	19
Tabela 2.4 - Constantes empíricas n para o modelo térmico do topo do óleo	27
Tabela 2.5 - Constante empírica n para o modelo térmico do ponto-quente.....	33
Tabela 5.1 - Limites inferiores e superiores de parâmetros térmicos utilizados em todas as simulações AG mono objetivo.	71
Tabela 5.2 - Carga 1 aplicada no transformador de 250 MVA	75
Tabela 5.3 - Identificação de parâmetros térmicos para o AG mono objetivo do transformador de 250 MVA	75
Tabela 5.4- Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos determinados.	83
Tabela 5.5 - Identificação de parâmetros térmicos para o AG mono objetivo Susa HS baseado em TO do transformador de 250 MVA.....	84
Tabela 5.6 - Identificação de parâmetros térmicos para o AG mono objetivo Susa de HS baseado em BO do transformador de 250 MVA	86
Tabela 5.7 - Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos determinados. Modelo HS a partir de TO.....	94
Tabela 5.8 - Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos determinados. Modelo HS a partir de BO.....	96

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Aplicação Prática.....	5
1.4 Aspectos Básicos	7
2. MODELAGEM TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	9
2.1 Introdução	9
2.1.1 Aspectos Gerais	12
2.2 Modelo proposto por Susa	14
2.2.1 Introdução	14
2.2.2 A resistência térmica não-linear	18
2.2.3 Determinação de Temperatura do topo do óleo.....	22
2.2.4 Determinação da Temperatura do Ponto-quente do Enrolamento Baseado na Temperatura do Topo do Óleo.....	27
2.2.5 Modelo Global da Determinação da Temperatura do Ponto-quente do Enrolamento Baseado na Temperatura do Topo do Óleo	33
2.2.6 Análise Nodal para Identificação de Parâmetros do Modelo Global da Temperatura do Ponto Quente do Enrolamento Baseado na Temperatura do Topo do Óleo.....	34
2.2.7 Modelo Global da Determinação da Temperatura do Ponto Quente do Enrolamento Baseado na Temperatura Inferior do Óleo	36
2.2.8 Análise Nodal para Identificação de Parâmetros do Modelo Global da Temperatura do Ponto Quente do Enrolamento Baseado na Temperatura Inferior do Óleo.....	38
2.3 Modelo proposto por Tang	39

2.3.1 Introdução.....	39
2.3.2 Determinação de Temperatura do Topo e Inferior do Óleo	39
2.3.2.1 Determinação de Parâmetros e Entradas do Modelo Térmico	42
2.3.2.1.a. Estimativa de Fontes de calor	42
2.3.2.1.b Capacitâncias	42
2.3.2.1.c. Condutâncias.....	43
3. OTIMIZAÇÃO.....	44
3.1 Introdução	44
3.2 Conceitos Básicos e Terminologia sobre Otimização	45
3.3 Programação Linear.....	46
3.4 Programação Não Linear.....	47
3.4.1 Algoritmo Genético	48
3.4.1.1 Algoritmo Genético Mono Objetivo.....	49
3.4.1.2 Algoritmo Genético Multi Objetivo	51
4. METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO	58
4.1 Introdução	58
4.2 Proposta de Identificação de Parâmetros.....	61
4.3 Identificação de Parâmetros Modelo de Tang	64
4.3.1 Função Objetivo para AG Mono Objetivo	65
4.3.2 Função Objetivo para AG Multi Objetivo	66
4.4 Identificação de Parâmetros: Modelo de Susa.....	67
4.4.1 Função Objetivo para AG Mono Objetivo	67
4.4.1.1 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura do topo do óleo	67

4.4.1.1 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura inferior do óleo	68
4.4.2 Função Objetivo para AG Multi Objetivo	68
4.4.2.1 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura do topo do óleo	69
4.4.2.2 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura inferior do óleo	69
5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	70
5.1 Introdução	70
5.2 Comentários Sobre as Resoluções dos AG Mono e Multi Objetivos	72
5.2.1 Resolução do AG Mono Objetivo	72
5.2.2 Comentários sobre a resolução do AG Multi Objetivo	74
5.3. Transformador Trifásico 250 MVA, Resfriamento ONAF	74
5.3.1 Tang Mono Objetivo	75
5.3.1.1 Identificação de Parâmetros para as curvas de medições originais	75
5.3.1.2 Teste com a Carga 2	78
5.3.1.3 Teste com a Carga 3	80
5.3.2 Parâmetros do Modelo de Tang e a Otimização a Múltiplos Objetivo	81
5.3.2.1 Análise de sensibilidade	81
5.3.3 Susa Mono Objetivo	84
5.3.3.1 Identificação de Parâmetros para as curvas de medições originais – HS a partir de TO	84
5.3.3.2 Identificação de Parâmetros para as curvas de medições originais – HS a partir de BO	85
5.3.3.3 Teste com a Carga 2 – HS a partir de TO	87
5.3.3.4 Teste com a Carga 2 – HS a partir de BO	88
5.3.3.5 Teste com a Carga 3 – HS a partir de TO	89
5.3.3.6 Teste com a Carga 3 – HS a partir de BO	90
5.3.4 Parâmetros do Modelo de Susa e a Otimização a Múltiplos Objetivo	92

5.3.4.1.a Análise de sensibilidade – HS baseado na TO	92
5.3.4.1.b Análise de sensibilidade– HS baseado na BO	95
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	97
6.1 Considerações Finais	97
6.2 Propostas de Continuidade	98
7. BIBLIOGRAFIA	100
ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE ÓLEO	104
ANEXO B – PARTIDA DO TRANSFORMADOR A FRIO	106
ANEXO C – CONSTANTE DE TEMPO DO ENROLAMENTO	108
ANEXO D – CONSTANTE DE TEMPO DO ÓLEO	109
ANEXO E – MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO ÓLEO E ENROLAMENTO DA NORMA IEC 6007-7 - 2005	110
ANEXO F - MEDIÇÃO DIRETA DE TEMPERATURA NOS ENROLAMENTOS	111

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Transformadores de potência são um dos componentes mais caros de um sistema elétrico de potência. Conhecer sua real condição de operação é essencial para conseguir maximizar os retornos de investimentos e para minimizar o custo associado à sua operação.

A determinação do valor da temperatura do ponto quente do enrolamento é um dos aspectos mais críticos no projeto térmico de um transformador, porque é neste momento que se definem tanto a potência nominal como a capacidade de sobrecarga em transformadores de potência. Os valores do ponto quente determinam a perda de vida do transformador.

Os teores de oxigênio e umidade contidos no óleo e na isolação também contribuem para o envelhecimento e deterioração das propriedades elétricas, químicas e mecânicas do sistema de isolação do transformador e pioram com temperaturas além das permitidas em norma. O trabalho de Assunção [1] trata detalhadamente desse assunto.

Monitoramento e proteção de transformadores de potência são de importância crítica em sistemas de potência, pois tais equipamentos podem causar grandes prejuízos quando paradas não planejadas ocorrerem.

Este trabalho aborda uma nova maneira para determinar parâmetros de circuitos equivalentes térmicos para o monitoramento em transformadores de potência, principalmente para sobrecargas de curta e longa duração.

O modelo pode permitir a exploração da capacidade completa do transformador, mas requer um monitoramento preciso do estado térmico do transformador, em especial, da medição do ponto quente nos enrolamentos. Tal temperatura é essencial para avaliar a perda de vida da isolação na presença de uma condição de emergência ditada por uma mudança de carga abrupta.

Sem dúvida, uma medição direta de temperaturas de ponto quente no enrolamento pode garantir um monitoramento térmico muito preciso em um transformador, porém são necessários o uso de fibras ópticas, equipamentos de leitura, mão de obra especializada e materiais especiais, que tornam o equipamento mais custoso se comparado a um projeto sem monitoramento térmico direto nos enrolamentos.

1.2 Objetivos

No trabalho proposto é apresentado um método de identificação de parâmetros em transformadores de potência na condição normal de operação e condições de sobrecarga para transformadores novos e transformadores reparados.

O modelo proposto parte de medições de temperaturas de óleo e de enrolamentos no transformador, feitas em ensaio de elevação de temperatura em fábrica ou feitas com medições reais em campo.

Com as medições feitas em fábrica ou em campo, dois modelos térmicos de transformadores de potência, de Susa [2] e de Tang [3] são utilizados para a identificação de seus parâmetros.

Então, dois métodos de otimização, baseados no paradigma de algoritmos genéticos (AG), um mono objetivo e outro a múltiplos objetivos são aplicados. O primeiro método determina os parâmetros térmicos para a previsão das curvas de temperaturas de óleo e enrolamentos e o segundo, além de prever as curvas de temperatura, tem a capacidade de realizar uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros térmicos encontrados.

A determinação de parâmetros térmicos para um transformador de potência inicia-se com o monitoramento de uma carga aplicada conhecida ao transformador e com medições de temperatura do ponto quente do enrolamento e temperaturas do topo e inferior do óleo feitas em fábrica no ensaio de elevação de temperatura ou no campo, com o transformador em operação.

As temperaturas medidas serão comparadas com as temperaturas calculadas pelos modelos térmicos de Susa [2] ou Tang [3]. Os valores de erro encontrados entre as temperaturas são acondicionados ao algoritmo de otimização AG mono

objetivo ou multi objetivo, que visam minimizar o erro entre as temperaturas medidas e calculadas.

Após a fase de otimização, novos valores de parâmetros do modelo térmico são gerados para realimentar o circuito térmico. Segue então nova comparação entre valores medidos e calculados. Esse ciclo continua até que um dos critérios de parada, precisão ou número de iterações, seja atingido.

A figura 1.1 ilustra esquematicamente o que foi comentado anteriormente.

Figura 1.1 – Diagrama esquemático de otimização de parâmetros para circuito térmico

1.3 Aplicação Prática

Podem-se citar os seguintes benefícios práticos do uso da identificação de parâmetros:

- permite uma avaliação mais precisa da temperatura real no óleo e nos enrolamentos, já que os algoritmos utilizados nas normas são muito genéricos e por isso às vezes as temperaturas em questão podem se distanciar muito dos valores reais;
- provê parâmetros térmicos estimados para a determinação relativamente precisa de temperaturas reais no óleo e enrolamentos, pois devido ao alto custo de ensaio de elevação de temperatura, na maioria das vezes tal ensaio não é requisitado e, portanto, não há informações sobre os parâmetros térmicos do transformador;
- Com a identificação de parâmetros, monitoramento de carga e temperatura ambiente é possível prever o envelhecimento sofrido pelo enrolamento e planejar o crescimento de carga. Usando esta metodologia em associação ao monitoramento e análise de gás dissolvido, os transformadores podem ser repostos seguramente, sem risco significativo, com alguns anos de atraso além do determinado pelas presentes normas que usam aproximações conservadoras;
- se a determinação de parâmetros for feita em tempo real, pode-se detectar eventuais falhas no sistema de resfriamento, tais como mau funcionamento de radiadores, trocadores de calor e bombas;
- mesmo em caso de indisponibilidade temporária de um ou mais radiadores ou trocadores de calor é possível fazer previsões de temperaturas do óleo e enrolamentos. Basta apenas realizar novas medidas de temperaturas de óleo e enrolamento e fazer a nova identificação de parâmetros. Com este conjunto de

dados é possível prever, por exemplo, se o transformador poderia continuar eventualmente em serviço com um valor de demanda reduzido.

Neste ponto vale ressaltar que a construção de transformadores preparados para fazer a medição de ponto quente no enrolamento não é prática comum no Brasil devido às dificuldades no processo de fabricação, tais como a fragilidade mecânica da fibra óptica e necessidade de proteções especiais para receber os dispositivos de medição [44]. Com isso, a instalação de pontos de medições diretas nos enrolamentos torna-se custosa, pois envolve materiais e mão de obra especializada. Porém, em outros países, tais como Finlândia e Estados Unidos, o uso da fibra óptica já é mais comum [9] e [7].

Portanto, a única dificuldade para a otimização de parâmetros térmicos em um transformador de potência diz respeito à obtenção de dados de temperatura de ponto quente no enrolamento, que ainda é pouco comum no Brasil.

1.4 Aspectos Básicos

Um arranjo típico de um transformador imerso em óleo é mostrado na Figura 1.1. Durante a sua operação o transformador cede calor fundamentalmente a partir do núcleo ferromagnético e dos enrolamentos.

Figura 1.1 Arranjo típico interno de um transformador de potência

No núcleo magnético as perdas são geradas pela tensão induzida de fluxo alternado no circuito magnético, por isso são diretamente relacionadas com a indução e, portanto, com a tensão aplicada. As perdas no enrolamento são

devidas às perdas Joule e às correntes parasitas, portanto, estão relacionadas com a carga do transformador.

O fluxo de dispersão dos enrolamentos, terminais e conexões criam ainda perdas adicionais por correntes parasitas nos componentes metálicos magnéticos, tais como tanque, tampa, viga de grampo, etc. Outras perdas, de menores relevâncias são geradas nas conexões, comutadores e buchas.

Todas as perdas geradas causam aquecimento nas partes correspondentes dos transformadores e o calor deve ser transferido das partes metálicas para o óleo do transformador e do óleo para o meio ambiente, via radiadores ou trocadores de calor.

Tanto o cobre do enrolamento mantém sua estrutura mecânica por centenas de graus Celsius como o óleo não se degrada abaixo de 110 °C, mas a isolação de papel no cobre começa a se deteriorar mais rapidamente acima dos 90 °C. Adicionalmente, umidade, acidez e oxigênio no óleo têm um efeito desgastante na vida da isolação.

Portanto, a capacidade de um transformador é definida em termos de envelhecimento térmico das suas isolações e as temperaturas de ponto-quente no enrolamento. Há certo consenso de que para um intervalo de temperatura entre 80 a 140 °C a expectativa de vida seja dividida por 2 a cada 6 °C de aumento na temperatura [4].

Desta forma o bom conhecimento da distribuição de temperaturas no interior do transformador e, por conseqüência, a determinação de seu ponto quente é fundamental para a determinação da vida útil do equipamento.

2. MODELAGEM TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Neste capítulo será feito um breve descritivo de alguns modelos feitos em recentes artigos de modelagem térmica. Em seguida, serão detalhados os modelos térmicos para previsão de temperaturas de óleo e de enrolamentos de Susa [2] e Tang [3]. A modelagem proposta por estes autores é colocada na forma matricial de tal forma que a identificação de parâmetros térmicos em transformadores de potência torne-se mais simples.

2.1 Introdução

Por razões econômicas, uma crescente ênfase é colocada para manter o transformador em serviço mais tempo do que se conseguia no passado, pois esta extensão pode trazer um aumento de vida útil da isolação e também pode trazer uma considerável economia [5].

A vida útil de um transformador é determinada principalmente pela temperatura do seu ponto quente (*hotspot*), que dependerá da capacidade do transformador em dissipar o calor gerado internamente para o ambiente.

Durante as duas últimas décadas, medições por fibra ótica têm sido usadas para obter a distribuição de temperatura no interior de um transformador [2], mas o cálculo de pior caso de elevação de temperatura permanece essencialmente ligado à fase de projeto térmico do transformador e continua a ter um papel muito importante na manutenção do equipamento.

Pesquisas recentes mostram que a temperatura do ponto quente não segue uma função exponencial [6-7] e os métodos de cálculo recomendados nas normas de carregamento [4] e [8] apontam temperaturas de ponto quente muito baixas para carregamentos emergenciais de curta duração devido ao fenômeno de sobre-excitação térmica¹.

Um dos autores que realizou pesquisas mais detalhadas sobre o fenômeno de sobre-excitação térmica é Linden Pierce e seus resultados [9-10] formam a base do procedimento de cálculo de temperatura do ponto quente dinâmico no Guia de carregamento IEEE, Anexo G [8]. Este modelo é mais rigoroso, pois, ao contrário do guia de carregamento IEEE, capítulo 7, que trabalha com processo de carga e descarga de um circuito RC, o anexo G usa diretamente os princípios da termodinâmica e de transferência de calor [5]. Este modelo, embora bastante conveniente ao fabricante, usualmente não o é para o consumidor, que pode não ter todos os dados necessários para utilizar o modelo [16].

Diversos trabalhos fazem uso da Norma IEEE C57.91, capítulo 7, como [11-12], [32-33] para determinação de temperaturas de óleo e enrolamentos, mas as limitações desta norma são ressaltadas em [13], [15] e [33], principalmente quando existe alguma comparação entre valores calculados e resultados reais.

As correntes de carga de alguns transformadores especiais, por exemplo, transformadores de tração, mudam abruptamente, o que causa erros relativos grandes quando o método de cálculo de temperatura tradicional é empregado [17].

Com intuito de calcular temperaturas de transformadores com mais precisão, alguns autores tem apresentado novos métodos de cálculo. Swift desenvolveu um modelo que utiliza um circuito equivalente térmico para o cálculo de elevação de temperatura [5] e [18]. Radakovic [19-21] propõe um modelo simples cujos

¹ Conhecido em trabalhos em língua inglesa como “overshooting”

parâmetros são obtidos a partir de testes em laboratório. Tang obteve os parâmetros de seu modelo usando um Algoritmo Genético [3] e [22]. Susa desenvolveu um modelo térmico considerando tanto a viscosidade como as perdas dependentes da temperatura [2].

Esses métodos fazem o cálculo de temperatura de forma precisa e bastante conveniente ao projetista e para fins de planejamento de rede, mas não conseguem explicar o fenômeno da sobre-excitação. Uma função de sobre-excitação dependente do tempo foi introduzida por Nordman [6-7] para diminuir os efeitos de sobre-excitação no cálculo de elevação de temperatura do ponto quente, o qual aumenta a precisão de tal temperatura, especialmente sob carregamento de emergência de curta duração.

A forma desta função e seu máximo dependem de diversas características de um transformador, quais sejam: tipo de carga, modo de circulação nos enrolamentos e modo de resfriamento [6]. Isto faz com que a função de sobre excitação dependente do tempo deva ser obtida principalmente por experimento e experiência. O ponto de partida para o novo guia de carregamento da norma IEC 60076-7 [23] foi [6], em que se sugere expoentes, constantes de tempo e constantes de função de óleo e enrolamento a serem utilizados no algoritmo da norma.

Um recente estudo feito por Rivera [16] e [24] faz uma análise estatística de quatro modelos em que verifica a aceitabilidade, consistência e precisão dos modelos para dois transformadores: o primeiro de 28 MVA ONAF (óleo natural, ar forçado) e o segundo de 167 MVA OFAF (óleo forçado, ar forçado). Ela classifica quatro métodos:

- norma IEEE C57.91 capítulo 7 linearizado [13] e [25],
- norma IEEE C57.91 capítulo 7 não-linearizado corrigido para a variação da temperatura ambiente [8],

- Swift não-linear [5] e [18] e
- Susa não-linear [2].

A autora chega à conclusão que o primeiro modelo é inaceitável, o segundo, aceitável dependendo do tipo de refrigeração e o terceiro e quarto são modelos aceitáveis.

Dentre os modelos discutidos acima, os modelos de Tang [3] e [22] e Susa [2] serão detalhados nas próximas seções e alguns métodos de otimização serão aplicados a eles no Capítulo 4 - Identificação de Parâmetros.

2.1.1 Aspectos Gerais

O calor, que é gerado por perdas no ferro, perdas no cobre e perdas adicionais em um transformador, será transferido para o óleo e dissipado pela superfície do tanque e radiadores de três formas: convecção, condução e radiação. Um esquema simplificado de troca de calor de um transformador de potência é ilustrado na figura 2.1.

Figura 2.1 - Esquema básico de troca de calor em um transformador de potência.

Na figura 2.1, P_{load} denota a potência gerada pelas perdas em carga, P_{fe} representa a perdas geradas em vazio (núcleo), θ_{hs} é a temperatura do ponto quente, θ_{to} é a temperatura em que o óleo sai do tanque e entra nos radiadores ou trocadores de calor, θ_{tk} temperatura externa do tanque, θ_{amb} é a temperatura ambiente, G_{wc} é a condutância de calor devido à troca de calor entre o enrolamento e o núcleo, G_{wo} é a condutância de calor do enrolamento para o óleo, G_{co} é a condutância de calor do núcleo para o óleo e G_{or} é a condutância de calor do óleo para o tanque e o resfriamento médio.

Considerando os métodos de transferência de calor e a existência de relações térmicas não lineares, o circuito incluirá resistores térmicos, capacitâncias térmicas e fontes de corrente de calor. Essencialmente, o modelo térmico proposto é composto de quatro elementos principais:

- Núcleo,
- Enrolamentos,

- Óleo isolante,
- Tanque do transformador e resfriamento externo

Baseados nos conceitos apresentados anteriormente, dois modelos térmicos serão apresentados nas próximas seções: o modelo de Susa [2] e o modelo de Tang [3] e [22].

2.2 Modelo proposto por Susa

A analogia térmica-elétrica é bastante usual na modelagem térmica de transformadores. A não linearidade térmica dos parâmetros do transformador é descrita a partir da definição de resistências não-lineares.

Dois modelos térmicos para transformadores de potência são discutidos e definidos. Tais modelos são: o modelo de temperatura do topo do óleo e temperatura do ponto quente no enrolamento baseado na temperatura do topo do óleo e o modelo de temperatura inferior do óleo e temperatura do ponto quente baseado na temperatura inferior do óleo.

2.2.1 Introdução

Para analisar as condições de temperatura no interior do transformador, a analogia entre processos elétricos e térmicos é brevemente revisada abaixo, [2], [5], [18] e [26-27].

Um processo térmico pode ser definido a partir da equação de balanço de energia:

$$q \cdot dt = C_{th} \cdot d\theta + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}} \cdot dt \quad (2.1)$$

em que:

q é a potência gerada,

C_{th} é a capacitância térmica,

θ é temperatura,

R_{th} é a resistência térmica,

θ_{amb} é a temperatura ambiente

$$q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}} \quad (2.2)$$

Ao se definir um circuito elétrico RC paralelo, como o dado pela figura 2.2, é possível escrever uma equação baseada na primeira lei de Kirchhoff e lei de Ohm:

$$i = C_{el} \cdot \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_{el}} \quad (2.3)$$

em que:

i é a corrente elétrica,

C_{el} é a capacitância elétrica,

R_{el} é a resistência elétrica,

u é tensão elétrica.

Figura 2.2 - Circuito RC elétrico

Comparando-se as equações (2.2) e (2.3), obtém-se a analogia entre os processos térmicos e elétricos, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Analogia térmica-elétrica

Térmica		Elétrica	
Potência Gerada	q	Corrente	i
Temperatura	θ	Tensão	u
Resistência	R_{th}	Resistência	R_{el}
Capacitância	C_{th}	Capacitância	C_{el}

O circuito térmico análogo para o circuito elétrico da Figura 2.2 é descrito na Figura 2.3.

Figura 2.3- Circuito térmico análogo

A capacitância e resistência térmica podem ser entendidas como a habilidade do equipamento em armazenar calor e se opor à passagem do fluxo de calor, respectivamente.

A análise anterior assume que as características térmicas dos materiais são constantes, isto é, eles não são variáveis com a temperatura. Para usar esta analogia térmica-elétrica para cálculos de temperatura do transformador será necessária uma modificação adicional para o método das capacitâncias concentradas, introduzindo uma resistência térmica não linear, que se altera a partir de variações de temperatura no interior do transformador.

As resistências térmicas não-lineares serão definidas posteriormente para os modelos de temperatura do topo do óleo e ponto quente do enrolamento. O óleo mineral de transformador tem características térmicas fortemente dependentes da temperatura, conforme pode ser visto na Tabela 2.2, em que a dependência da viscosidade do óleo em relação à temperatura é mais pronunciada.

Tabela 2.2- Características térmicas do óleo mineral de transformador, [28]

Temperatura θ , °C	Densidade ρ , kg/m ³	Calor Específico C_{oil} , Ws/(kg°C)	Condutividade Térmica k , W/(m°C)	Coeficiente de expansão cúbica térmica β , 1/°C	Viscosidade Dinâmica μ , kg/(ms)
-15	896.885	1900	0.1262	8.6×10^{-4}	0.0694
-5	890.295	1940	0.1247	8.6×10^{-4}	0.0463
5	883.705	1980	0.1232	8.6×10^{-4}	0.0318
15	877.115	2020	0.1217	8.6×10^{-4}	0.0224
25	870.525	2060	0.1201	8.6×10^{-4}	0.0162
35	863.935	2100	0.1186	8.6×10^{-4}	0.0119
45	857.345	2140	0.1171	8.6×10^{-4}	0.0089
55	850.755	2180	0.1156	8.6×10^{-4}	0.0068
65	844.165	2220	0.114	8.6×10^{-4}	0.0053
75	837.575	2260	0.1125	8.6×10^{-4}	0.0042
85	830.985	2300	0.111	8.6×10^{-4}	0.0033
100	821.1	2360	0.1087	8.6×10^{-4}	0.0024

2.2.2 A resistência térmica não-linear

A resistência térmica do óleo não-linear, R_{th-oil} (m^2K/W), de acordo com a teoria de transferência de calor, [2], [5], [18], [26-27] e [29-30], é dada pelas seguintes equações:

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h.A} = \frac{\Delta\theta_{oil}}{q} \quad (2.4)$$

em que:

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção,

A é a área de troca de calor,

$\Delta\theta_{oil}$ é o gradiente (elevação) de temperatura do óleo,

q é a potência gerada pelas perdas correspondentes.

A expressão (2.4) mostra que a resistência térmica não-linear é inversamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor cuja dependência com a temperatura pode ser explicada a partir da teoria de transferência de calor. De uma forma genérica, o fluxo de óleo de convecção natural em volta de placas e cilindros verticais, inclinadas e horizontais pode ser descrito pela seguinte correlação empírica, que envolve números adimensionais:

$$Nu = C.[Gr.Pr]^n \quad (2.5)$$

em que C e n são constantes empíricas, que dependem fundamentalmente da forma pela qual a circulação do óleo é realizada (laminar ou turbulenta). Os valores básicos são apresentados na Tabela 2.3

Tabela 2.3 - Valores empíricos para constantes C e n

Circulação de Óleo	C	n
Laminar	0.59	0.25
Turbulenta	0.10	0.33

O número de Nusselt (**Nu**), número de Prandtl (**Pr**) e número de Grashof (**Gr**) são descritos nas expressões que seguem: [2], [5], [18], [26-27] e [29-30].

$$Nu = \frac{h.L}{k} \quad (2.6)$$

$$Pr = \frac{c_{oil} \cdot \mu}{k} \quad (2.7)$$

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho_{oil}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \quad (2.8)$$

em que:

L é a dimensão característica, comprimento, largura ou diâmetro,

g é a aceleração da gravidade,

k é a condutividade térmica do óleo,

ρ_{oil} é a densidade do óleo,

β é o coeficiente de expansão térmica do óleo,

c_{oil} é o calor específico do óleo,

μ é a viscosidade do óleo.

$\Delta\theta_{oil}$ é elevação de temperatura do óleo, (K)

Os valores típicos para as propriedades térmicas do óleo do transformador que serão importantes para o cálculo dos adimensionais encontram-se na Tabela 2.2.

Substituindo (2.6), (2.7) e (2.8) em (2.5), obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{h.L}{k} = C \cdot \left[\left(\frac{c_{oil} \cdot \mu}{k} \right) \left(\frac{L^3 \cdot \rho_{oil}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (\Delta \theta_{oil})}{\mu^2} \right) \right]^n \quad (2.9)$$

O impacto da variação da temperatura sobre a viscosidade do óleo é bem maior que sobre qualquer outro parâmetro físico do óleo do transformador, conforme se nota na Tabela 2.2. [9], [28] e [30]. Portanto, todos os parâmetros físicos do óleo, com exceção da viscosidade em (2.9) são assumidos constantes e (2.9) pode ser escrita na seguinte forma:

$$h = C_1 \cdot \left(\frac{\Delta \theta_{oil}}{\mu} \right)^n \quad (2.10)$$

em que C_1 é assumido como uma constante, expressa por:

$$C_1 = C \cdot \left[\rho_{oil}^2 \cdot g \cdot \beta \cdot k^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \cdot L^{\left(\frac{3n-1}{n}\right)} \cdot c_{oil} \right]^n \quad (2.11)$$

A dependência da viscosidade com a temperatura é dada pela seguinte equação, [9-10]:

$$\mu = A_1 \cdot e^{\left(\frac{A_2}{\theta_{oil} + 273} \right)} \quad (2.12)$$

em que a viscosidade é dada na temperatura do óleo que corresponde à temperatura do topo do óleo ou do ponto-quente nas seções 2.2.3 e 2.2.4, respectivamente. As constantes **A1** e **A2** para o óleo do transformador são dadas em [8-10] e Anexo A.

O fator C_1 é representado por uma função de temperatura na Figura 2.4 para o óleo do transformador.

Figura 2.4 - Propriedades físicas do óleo do transformador: o fator C_1

Considera-se a variação do parâmetro n no intervalo [0.2 a 2]. O valor 2 é aplicado para o transformador em partida fria (ver Anexo B). Para as temperaturas normais de operação de transformadores de potência entre 40 e 100 °C, o fator C_1 varia na faixa de 1 a 0.944, e de 1 para 0.964 por unidade, correspondentes aos valores $n=0.2$ e $n=2$, respectivamente. Assim, como um resultado geral, o fator C_1 pode ser assumido fixo quando comparado à mudança na viscosidade do óleo com a temperatura.

No caso em que é necessário considerar a influência de todos os parâmetros, ou seja, se o comportamento térmico do óleo isolante do transformador difere significativamente do óleo usado no transformador abordado nessa modelagem, as correções a serem feitas são dadas no Anexo A. Um exemplo da variação da viscosidade do óleo com a temperatura, comparada como as outras propriedades físicas do óleo do transformador, é dado na Figura 2.5.

Figura 2.5- Variação da viscosidade do óleo com a temperatura

2.2.3 Determinação de Temperatura do topo do óleo

O modelo de temperatura do topo do óleo é dado no circuito térmico da Figura 2.6, baseado na analogia entre circuitos elétricos e teoria de transferência de calor, [2], [5], [18], [26-27] e [29-30].

Figura 2.6- Modelo de temperatura do topo do óleo

em que:

q_{tot} é a potência gerada pelas perdas totais,

q_{fe} é a potência gerada pelas perdas em vazio,

q_l é a potência gerada pelas perdas em carga,

C_{th-oil} é a capacitância térmica equivalente do óleo do transformador,

θ_{oil} é a temperatura do topo do óleo,

$R_{th-oil-air}$ é a resistência térmica óleo-ar não-linear,

θ_{amb} é a temperatura ambiente.

O calor gerado pelas perdas do transformador em vazio e em carga é representado por duas fontes de calor ideais e a temperatura ambiente é representada como uma fonte de temperatura ideal, [2], [5], [18] e [26-27].

A equação diferencial para o circuito térmico mostrado na Figura 2.6 é:

$$q_{fe} + q_l = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{R_{th-oil-air}} \quad (2.13)$$

Se na equação (2.13) for substituída a resistência térmica não linear da equação (2.4), a equação seguinte é obtida:

$$q_{fe} + q_l = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{\frac{1}{h.A}} \quad (2.14)$$

Então, substituindo a equação (2.10) pelo coeficiente de transferência de calor, h , a equação diferencial é alterada para:

$$(q_{fe} + q_l) \left(\frac{\mu^n}{C_1.A} \right) = \left(\frac{\mu^n}{C_1.A} \right) \cdot C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n} \quad (2.15)$$

Pode-se definir a variável μ , viscosidade do óleo, como:

$$\mu = \mu_{pu} \cdot \mu_{rated} \quad (2.16)$$

e as seguintes constantes:

a resistência térmica não-linear, $R_{th-oil-air,rated}$,

$$R_{th-oil-air,rated} = \frac{1}{C_1 \cdot A} \cdot \left(\frac{\mu_{rated}}{\Delta\theta_{oil,rated}} \right)^n \quad (2.17)$$

a elevação de temperatura topo do óleo acima da temperatura ambiente nominal, $\Delta\theta_{oil,rated}$,

$$\Delta\theta_{oil,rated} = (q_{fe} + q_l)_{rated} \cdot R_{th-oil-air,rated} \quad (2.18)$$

a constante de tempo do topo do óleo nominal, $\tau_{oil,rated}$, Anexo D,

$$\tau_{oil,rated} = R_{th-oil-air,rated} \cdot C_{th-oil,rated} \quad (2.19)$$

a razão das perdas em carga em corrente nominal pelas perdas em vazio, R ,

$$R = \frac{q_l}{q_{fe}} \quad (2.20)$$

o fator de carga, K ,

$$K = \frac{I}{I_{rated}} \quad (2.21)$$

em que I é a corrente em carga e I_{rated} é a corrente nominal.

A dependência de temperatura das perdas em carga, $P_{l,pu}(\theta_e)$, é também levada em conta como segue [2]²:

$$P_{l,pu}(\theta_e) = P_{dc,pu} \cdot \left(\frac{\theta_e + T_k}{\theta_{e, rated} + T_k} \right) + P_{a,pu} \cdot \left(\frac{\theta_{e, rated} + T_k}{\theta_e + T_k} \right) \quad (2.22)$$

em que:

$P_{dc,pu}$ é a perda em corrente contínua por unidade,

$P_{a,pu}$ é a perda adicional (i.e., igual à soma das perdas adicionais nos enrolamentos e partes metálicas) por unidade,

θ_e é a temperatura na qual as perdas são estimadas, °C, (2.23),

T_k é a fator de temperatura para a correção de perdas, igual a 225 para alumínio e 235 para cobre.

Tanto o enrolamento de alta como de baixa tensão do transformador afetam a temperatura do óleo, portanto as perdas são estimadas a uma temperatura igual à média dos valores de temperatura do ponto quente:

$$\theta_e = \frac{\theta_{hs,lv} + \theta_{hs,hv}}{2} \quad (2.23)$$

em que:

$\theta_{hs,lv}$ é a temperatura do ponto quente do enrolamento de baixa tensão, °C,

$\theta_{hs,hv}$ é a temperatura do ponto quente do enrolamento de alta tensão, °C,

A equação (2.15) é então reduzida a sua forma final:

² a Fórmula foi retirada diretamente de [2], porém na maioria das literaturas encontradas, a perda adicional é diretamente proporcional à temperatura do enrolamento.

$$\frac{1 + R.P_{l,pu}(\theta_e).K^2}{1 + R} \cdot \mu_{pu}^n \cdot \Delta\theta_{oil,rated} = \mu_{pu}^n \cdot \tau_{oil,rated} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n}}{\Delta\theta_{oil,rated}^n} \quad (2.24)$$

que forma o modelo básico para o cálculo da temperatura do topo do óleo. A importância da variação de temperatura de viscosidade do óleo, μ_{pu} , é que este afeta tanto a resistência térmica do óleo como a constante de tempo do topo do óleo.

Assume-se que a circulação de óleo dentro do tanque do transformador é laminar e então a constante n para este tipo de fluxo particular é igual a 0.25, conforme Tabela 2.3. Adicionalmente, quando se considera a constante n , é necessário levar em conta se o calor é dissipado por convecção forçada ou livre, [2], [4-5], [8-10], [26-27] e [30-31].

Para transformadores com partida a frio ou quando a velocidade do óleo dentro do tanque do transformador for igual a zero (i.e., quando a elevação de temperatura entre o topo e o inferior do transformador é aproximadamente igual a zero), a constante n terá diferentes valores empíricos para os vários modos e projetos de refrigeração, conforme mostra Tabela 2.4. No Anexo B há maior detalhamento sobre este tópico.

Tabela 2.4 - Constantes empíricas n para o modelo térmico do topo do óleo

Circulação de Óleo	n		
	com refrigeração externa		sem refrigeração externa
	ONAF/OFAF	ONAN	ONAN
Velocidade de circulação de óleo = 0 (partida à frio)	0.5	0	0.25
Velocidade de circulação de óleo > 0 (Transformador em carga)	0.2	0.25	0.25

A constante n é inteiramente empírica e seus valores são baseados na teoria de transferência de calor convencional, [9-10] e [29-30], e em pesquisas sugeridas por diversos autores, [2], [4-5], [8-10], [26-27] e [30-31]. Em parte, o parâmetro n é mais especificamente relacionado às condições de operação tais como partida a frio e seu valor é obtido por técnicas de extrapolação e ajustes interpretados nos resultados obtidos durante vários ensaios térmicos de vários transformadores, [6-7].

2.2.4 Determinação da Temperatura do Ponto-quente do Enrolamento Baseado na Temperatura do Topo do Óleo

O modelo de temperatura do ponto quente, que é baseado na temperatura do topo do óleo, será definido por correlações da resistência não-linear entre a superfície de isolamento do enrolamento e o óleo no topo do enrolamento. O primeiro modelo é baseado na teoria de transferência de calor convencional para fluxo de óleo de convecção natural em volta de placas verticais [29-30].

Similar à teoria de transferência de calor convencional para o modelo de temperatura do topo do óleo e resistência térmica não-linear, o modelo de

temperatura do ponto quente é também representado por um circuito térmico, Figura 2.7, [2], [5], [12], [26-27].

Figura 2.7- Modelo de temperatura do ponto quente do enrolamento

Em que:

q_{wdn} é o calor gerado pela perda nos enrolamentos

C_{th-wdn} é a capacitância térmica do enrolamento

θ_{hs} é temperatura de hotspot

$R_{th-hs-oil}$ é a resistência térmica não-linear do enrolamento para o óleo

θ_{oil} é a temperatura de topo do óleo

O calor gerado pelas perdas dos enrolamentos é outra vez representado por uma fonte de calor ideal e a temperatura do óleo forma uma fonte de temperatura ideal [2], [5], [12], [26-27]. A resistência térmica não-linear, $R_{th-hs-oil}$, é definida pela teoria de transferência de calor, a qual já foi aplicada para o modelo térmico do topo do óleo, explicada anteriormente.

A resistência térmica não-linear do enrolamento para o óleo é dada pela seguinte equação:

$$R_{th-hs-oil} = R_{th-wdn} + R_{th-insul} + R_{th-insul-oil} \quad (2.25)$$

R_{th-wdn} é a resistência térmica do enrolamento,

$R_{th-insul}$ é a resistência térmica de isolamento do enrolamento,

$R_{th-insul-oil}$ é a resistência térmica não-linear da isolamento do enrolamento para o óleo.

Comparando as resistências dadas em (2.25), é assumido que:

$$R_{th-insul-oil} \gg R_{th-wdn} \quad (2.26)$$

$$R_{th-insul-oil} \gg R_{th-insul} \quad (2.27)$$

Para temperaturas de ponto-quente medidas na superfície mais externa da isolamento enrolada em volta dos condutores, ver [7].

Assim, a equação final para a resistência térmica não-linear do enrolamento para o óleo é:

$$R_{th-hs-oil} = \frac{1}{h.A} = \frac{\Delta\theta_{oil}}{q} \quad (2.28)$$

A equação (2.28) é similar à (2.4) para o modelo de temperatura do topo do óleo, portanto a equação para o coeficiente de transferência de calor, h , é completamente análoga ao coeficiente de transferência de calor em (2.10):

$$h = C_1 \cdot \left(\frac{\Delta\theta_{hs}}{\mu} \right)^n \quad (2.29)$$

em que a viscosidade é outra vez avaliada a temperatura do topo do óleo e $\Delta\theta_{hs}$ é agora o elevação de temperatura do topo do óleo para o ponto-quente.

A equação diferencial para o circuito térmico mostrado na Figura 2.7 é:

$$q_{wdn} = C_{th-wdn} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{R_{th-hs-oil}} \quad (2.30)$$

Se a equação para a resistência térmica não-linear (2.28) for substituída em (2.30), a equação é obtida:

$$q_{wdn} = C_{th-wdn} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{\frac{1}{h.A}} \quad (2.31)$$

Então, substituindo a equação para o coeficiente de transferência de calor, (2.29), em (2.31), a equação diferencial é modificada para:

$$q_{qwn} \cdot \left(\frac{\mu^n}{C_1.A} \right) = \left(\frac{\mu^n}{C_1.A} \right) \cdot C_{th-wdn} \cdot \frac{d\theta_{hs}}{dt} + (\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1} \quad (2.32)$$

Novamente é definida a variável μ , viscosidade do óleo, Figura 2.5, como:

$$\mu = \mu_{pu} \cdot \mu_{rated} \quad (2.33)$$

e as seguintes constantes:

a resistência térmica não-linear do ponto-quente para o topo do óleo, $R_{th-hs-oil,rated}$,

$$R_{th-hs-oil,rated} = \frac{1}{C_1.A} \cdot \left(\frac{\mu_{rated}}{\Delta\theta_{hs,rated}} \right)^n \quad (2.34)$$

a elevação de temperatura do ponto-quente acima da temperatura do topo do óleo, $\Delta\theta_{hs,rated}$,

$$\Delta\theta_{hs,rated} = q_{wdn,rated} \cdot R_{th-hs-oil,rated} = H \cdot g_r \quad (2.35)$$

em que **H** é o fator de ponto-quente e **g_r** é o gradiente de temperatura da média do enrolamento para a média do óleo, descrito no anexo E.

a constante de tempo do enrolamento nominal, **τ_{wnd,rated}**, Anexo D, é

$$\tau_{wdn,rated} = R_{th-hs-oil,rated} \cdot C_{th-wdn,rated} \quad (2.36)$$

A dependência de temperatura das perdas em carga, **P_{wdn,pu}(θ_{hs})**, é [2]:

$$P_{wdn,pu}(\theta_{hs}) = P_{dc,pu} \cdot \left(\frac{\theta_{hs} + \theta_k}{\theta_{hs,rated} + \theta_k} \right) + P_{eddy,pu} \cdot \left(\frac{\theta_{hs,rated} + \theta_k}{\theta_{hs} + \theta_k} \right) \quad (2.37)$$

em que:

P_{dc,pu} é a perda em corrente contínua por unidade,

P_{eddy,pu} é a perda adicional no enrolamento por unidade,

θ_{hs} é a temperatura na qual as perdas são estimadas, °C,

θ_k é a fator de temperatura para a correção de perdas, igual a 225 para alumínio e 235 para cobre.

Segue que a equação final é:

$$\{K^2 \cdot P_{wdn,pu}(\theta_{hs})\} \mu_{pu}^n \cdot \Delta\theta_{hs,rated} = \mu_{pu}^n \times \tau_{wdn,rated} \cdot \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1}}{\Delta\theta_{hs,rated}^n} \quad (2.38)$$

em que:

R é a relação entre perdas em carga e vazio

$P_{wdn,pu}$ é a soma das perdas joule e perdas parasitas considerando a correção de temperatura

K é o valor de carga da corrente dada em pu

τ_{wdn} é a constante de térmica do enrolamento

De forma similar à suposição feita no modelo do topo do óleo, em que o fluxo de óleo interno ao tanque do transformador é laminar, o valor para constante n é igual a 0.25, se a circulação de óleo já está formada.

Porém, é também necessário levar em conta se o calor é dissipado por convecção livre ou forçado da superfície do enrolamento. Para transformadores sem refrigeração externa para óleo natural (ON), o modo de resfriamento pode ser modelado assumindo transferência de calor de convecção livre, cuja constante n é igual ao valor para fluxo de óleo laminar (i.e., $n=0.25$).

Em casos em que bombas forçam o óleo para uma alta taxa de fluxo de óleo pela parte inferior do tanque, algum óleo circulará internamente ao enrolamento, mas a maioria do óleo contornará os enrolamentos e alcançará o topo sem muita mudança na temperatura. Tal afirmação é válida quando o fluxo de óleo não está direcionado diretamente para o enrolamento.

A constante n terá valores diferentes no caso de uma partida a frio do transformador, ou seja, quando a velocidade do óleo for igual à zero (Anexo B). Os valores empíricos para a constante n para diferentes modos de resfriamento e diferentes condições de circulação de óleo são dados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Constante empírica n para o modelo térmico do ponto-quente

Circulação de Óleo	n	
	com resfriamento externo	sem resfriamento externo
	ONAF/ONAN/OFAF	ONAN
Velocidade de circulação de óleo = 0 (partida à frio)	2	0.25
Velocidade de circulação de óleo > 0 (Transformador em carga)	0.2	0.25

De forma similar ao modelo térmico do topo do óleo, no modelo térmico do ponto-quente a constante n tem valor igualmente empírico baseado na teoria transferência de calor convencional, [29]. A menos de condições particulares de operação, tal como partida de transformador a frio, os valores de n são obtidas por técnicas de ajustes ou extrapolação, a partir de resultados obtidos durante vários ensaios térmicos de vários transformadores, [6-7].

2.2.5 Modelo Global da Determinação da Temperatura do Ponto-quente do Enrolamento Baseado na Temperatura do Topo do Óleo

A equação (2.38) forma o modelo básico para o cálculo da temperatura do ponto-quente baseado na temperatura do topo do óleo. Em analogia a (2.24), a equação leva em conta a mudança na resistência térmica e constante de tempo do enrolamento devido à variação da viscosidade de óleo com a temperatura. A figura 2.8 mostra o modelo térmico completo para determinação do ponto quente baseado na temperatura do topo do óleo.

Figura 2.8 – Modelo térmico completo para determinação do ponto quente baseado na temperatura do topo do óleo.

2.2.6 Análise Nodal para Identificação de Parâmetros do Modelo Global da Temperatura do Ponto Quente do Enrolamento Baseado na Temperatura do Topo do Óleo

Com o intuito de se fazer a identificação de parâmetros para o modelo global de temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura do topo do óleo, o equacionamento do circuito da figura 2.8 deve ser colocado na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} q_{wdn} \\ q_{fe} + q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{hs} & -G_{hs} \\ 0 & G_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{hs} \\ \theta_{oil} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_w & 0 \\ 0 & C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \theta_{hs} \\ \frac{d}{dt} \theta_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ G_o \theta_{amb} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

em que:

$$G_{hs} = 1 / R_{th-hs-oil, rated} \quad (2.40)$$

$$G_o = 1 / R_{th-oil-air, rated} \quad (2.41)$$

$$C_w = C_{th-wdn} \quad (2.42)$$

$$C_o = C_{th-oil} \quad (2.43)$$

$R_{th-hs-oil, rated}$ é definida na equação (2.34)

$R_{th-oil-amb, rated}$ é definida na equação (2.17)

q_{fe} é a potência gerada pelas perdas em vazio,

q_l é o a potência gerada pelas perdas em carga,

q_{wdn} é a potência gerada pela perda nos enrolamentos

θ_{hs} é temperatura de hotspot

θ_{oil} é a temperatura de topo do óleo

θ_{amb} é a temperatura ambiente

Pela equação (2.34), a condutância é dependente da elevação de temperatura do ponto quente do enrolamento, viscosidade e, propriedades físicas do óleo e enrolamento:

$$G_{hs} = C_1 A \left(\frac{\Delta \theta_{hs}}{\mu} \right)^n \quad (2.44)$$

A parcela correspondente às propriedades físicas, $C_1 A$ e n , tornam-se respectivamente igual a m_1 e n_1 e a viscosidade (μ) é incorporada ao termo de elevação de temperatura do ponto quente do enrolamento ($\Delta \theta_{hs}$). Portanto, com as mudanças citadas anteriormente, tem-se a equação de condutância do ponto quente do enrolamento definida para a identificação de parâmetros, que será discutida no capítulo 4:

$$G_{hs} = m_1 (\Delta \theta_{hs})^{n_1} \quad (2.45)$$

De forma análoga, considerando a equação (2.17), pode-se definir a condutância do topo do óleo para a identificação de parâmetros:

$$G_o = m_2 (\Delta \theta_{oil})^{n_2} \quad (2.46)$$

2.2.7 Modelo Global da Determinação da Temperatura do Ponto Quente do Enrolamento Baseado na Temperatura Inferior do Óleo

O modelo completo de temperatura de ponto quente baseado na temperatura inferior do óleo é dado na figura 2.9. A teoria envolvida na construção deste modelo é similar aos itens 2.2.3 e 2.2.4. A principal diferença dos modelos anteriores está na definição da resistência térmica não linear, $R_{th-hs-boil}$, entre a superfície de isolamento do enrolamento no nível superior e o nível inferior do óleo.

Figura 2.9 – Modelo térmico completo para determinação do ponto quente baseado na temperatura inferior do óleo.

As equações envolvidas são as seguintes:

- para a temperatura inferior do óleo,

$$\frac{1 + R.P_{l,pu}(\theta_{be}).K^2}{1 + R} \cdot \mu_{pu}^n \cdot \Delta\theta_{boil,rated} = \mu_{pu}^n \cdot \tau_{boil,rated} \cdot \frac{d\theta_{boil}}{dt} + \frac{(\theta_{boil} - \theta_{amb})^{1+n}}{\Delta\theta_{boil,rated}^n} \quad (2.47)$$

- para a temperatura do ponto quente do enrolamento:

$$\{K^2 \cdot P_{wdn,pu}(\theta_{hs})\} \mu_{pu}^n \cdot \Delta\theta_{hs-boil,rated} = \mu_{pu}^n \times \tau_{wdn-b,rated} \cdot \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{boil})^{n+1}}{\Delta\theta_{hs-boil,rated}^n} \quad (2.48)$$

em que:

R é a relação entre as perdas em carga e perdas em vazio, p.u.,

$P_{l,pu}(\theta_{be})$ é a dependência das perdas em carga na temperatura inferior do óleo (ver 2.22),

K é o fator de carga, p.u.,

μ_{pu} é a viscosidade do óleo, p.u.,

$\Delta\theta_{boil,rated}$ é elevação de temperatura inferior do óleo nominal, K,

$\tau_{boil,rated}$ é a constante de tempo do inferior do óleo nominal, min,

θ_{boil} é temperatura inferior do óleo, °C,

θ_{amb} é a temperatura ambiente, °C,

$P_{wdn,pu}(\theta_{hs})$ é a dependência das perdas em carga na temp. do ponto quente (ver 2.37),

$\Delta\theta_{hs-boil,rated}$ é elevação de temperatura inferior do óleo para o ponto quente nominal, K,

$\tau_{wdn-b,rated}$ é a constante de tempo do enrolamento, min,

θ_{hs} é a temperatura do ponto quente do enrolamento, °C,

2.2.8 Análise Nodal para Identificação de Parâmetros do Modelo Global da Temperatura do Ponto Quente do Enrolamento Baseado na Temperatura Inferior do Óleo

Com o intuito de se fazer a identificação de parâmetros para o modelo global de temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura inferior do óleo, é necessário colocar o circuito da Figura 2.9 na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} q_{wdn} \\ q_{fe} + q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{hsb} & -G_{hsb} \\ 0 & G_{ob} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{hs} \\ \theta_{ob} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{wb} & 0 \\ 0 & C_{ob} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \theta_{hs} \\ \frac{d}{dt} \theta_{ob} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ G_{ob} \theta_{amb} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Os componentes térmicos θ_{hs} , q_{wdn} , q_{fe} , q_l e θ_{amb} têm a mesma definição do item 2.2.6.

$$G_{hsb} = 1 / R_{th-oil-air, rated} \quad (2.50)$$

$$G_{ob} = 1 / R_{th-oil-air, rated} \quad (2.51)$$

$$C_{wb} = C_{th-oil} \quad (2.52)$$

$$C_{ob} = C_{th-oil} \quad (2.53)$$

Para fins de identificação de parâmetros, que será discutido no capítulo 4, da mesma forma que se definiram as equações de condutância do item 2.2.6, podem-se definir a equação de condutância de ponto quente do enrolamento e condutância do inferior do óleo para este item, respectivamente:

$$G_{hs} = m_3 (\Delta \theta_{hs})^{n_3} \quad (2.54)$$

$$G_{ob} = m_4 (\Delta\theta_{oil})^{n_4} \quad (2.55)$$

Em que m_3 , m_4 , n_3 , e n_4 são parâmetros a serem identificados.

2.3 Modelo proposto por Tang

2.3.1 Introdução

Assim como discutido no item 2.1, o circuito térmico equivalente inclui fundamentalmente três elementos de circuitos elétricos: as resistências (ou condutâncias) térmicas, as capacitâncias térmicas e as fontes de calor.

2.3.2 Determinação de Temperatura do Topo e Inferior do Óleo

Para estabelecer um circuito térmico equivalente para um transformador de potência, o modelo térmico proposto é desenvolvido considerando-se o transformador a ser analisado composto pelas seguintes partes principais: o núcleo, o conjunto de enrolamentos, o óleo isolante, o tanque do transformador e os resfriadores externos.

Um modelo simplificado baseado em circuito equivalente térmico, com cinco nós, para um transformador de força imerso em óleo foi recentemente discutido em [3] e [22], conforme mostra a Figura 2.10.

Figura 2.10 - Circuito equivalente do modelo térmico de 5 nós para o transformador de potência

Entretanto, este modelo de cinco nós apresenta um número relativamente grande de parâmetros térmicos a ser determinado. Também, medidas em tempo real são usualmente limitadas, ou seja, nem todos os nós de temperatura são mensuráveis.

Geralmente, apenas as temperaturas de topo e inferior do óleo estão disponíveis para obter todo o conjunto de parâmetros térmicos, o que pode causar imprecisão e instabilidade no processo de otimização, e conseqüentemente, simplificações adicionais ao modelo térmico de cinco nós são práticas e naturais. Considera-se então que os processos de aprendizagem e previsão podem ser acelerados, se o número dos parâmetros térmicos é diminuído.

O modelo análogo térmico-elétrico simplificado é mostrado na Figura 2.11. Durante a simplificação do modelo, os capacitores e condutâncias associados ao núcleo, enrolamentos, e parte do óleo são combinados em um único capacitor C_1 e uma única condutância G_1 não linear. Subseqüentemente, as perdas no cobre distribuídas, P_{cu} , perdas do ferro, P_{fe} e perdas adicionais, P_{ad} são representadas como uma fonte de calor total, P_{all} .

Ao se isolar os nós da temperatura do topo e inferior do óleo, uma vez que estes dados podem ser fornecidos por medição pelos controladores da subestação, tem-

se uma descrição completa do comportamento térmico destes dois nós da temperatura. As capacitâncias e condutâncias C_2 , C_3 , G_2 , G_3 da Figura 2.10 são os componentes relevantes com relação a estes dois nós de temperatura.

Figura 2.11 - Circuito de calor equivalente simplificado de um modelo térmico para um transformador de potência

Pode-se mostrar que as equações resultantes destes modelos correspondem exatamente às equações de diferenças finitas derivadas das equações diferenciais originais de transferência de calor. Em consequência desta simplificação e a subdivisão modelo do transformador, as temperaturas calculadas são as elevações de temperaturas médias de cada parte principal, isto é, $\theta_{oil-avg}$, $\theta_{oil-out}$ e θ_{oil-in} , respectivamente a temperatura média do óleo, do topo e da entrada.

O modelo térmico construído é empregado para prever $\theta_{oil-out}$ e θ_{oil-in} que pode ser expresso por um conjunto de equações diferenciais ordinárias, de primeira ordem e não homogênea.

$$P = \frac{Cd\theta}{dt} + G\theta \quad (2.56)$$

$$\begin{bmatrix} P_{all} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \\ \frac{d\theta_3}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & -G_2 \\ 0 & -G_2 & G_2 + G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

O sistema de equações (2.57) pode ser resolvido através do Método de Runge Kutta.

2.3.2.1 Determinação de Parâmetros e Entradas do Modelo Térmico

2.3.2.1.a. Estimativa de Fontes de calor

As fontes de calor geradas podem ser divididas basicamente em:

- Perdas em vazio. São geradas no núcleo. As perdas não variam com a variação de carga;
- Perdas em carga. São geradas principalmente nos enrolamentos, mas há ainda uma parcela que é estabelecida nas partes metálicas do transformador, fora dos enrolamentos, devido às correntes parasitas. As perdas em carga variam com o quadrado da variação da corrente;

2.3.2.1.b Capacitâncias

A determinação das capacitâncias térmicas passa pela obtenção dos valores de capacidade de calor específico (c_p), densidade (ρ) e volume (v). O valor aproximado da capacitância térmica pode ser expressa por:

$$C = c_p \rho v \quad (2.58)$$

2.3.2.1.c. Condutâncias

As condutâncias térmicas não lineares são relacionadas a muitos parâmetros físicos e térmicos de um transformador de potência, tais como geometria do núcleo, altura e largura dos enrolamentos, massa de óleo, elevação de temperatura entre outros. Pela experiência obtida em [3] e [22] foi proposta a seguinte fórmula exponencial para a condutância:

$$G = a(\Delta\theta)^b \quad (2.59)$$

Na fórmula acima, **G** é um elemento da matriz de condutância de calor, **$\Delta\theta$** representa a elevação de temperatura no óleo ou no enrolamento e **a** e **b** são argumentos a serem encontrados a partir de valores experimentais, sejam eles de laboratório ou de campo.

3. OTIMIZAÇÃO

Este capítulo aborda alguns aspectos relativos à otimização, tanto na sua forma escalar (mono-objetivo) como em sua forma vetorial (a múltiplos objetivos). Os conceitos básicos relativos à otimização são apresentados com destaque para uma classe particular de métodos de otimização: os algoritmos genéticos, que serão utilizados na determinação de parâmetros de circuito equivalente térmico de transformadores de potência.

3.1 Introdução

Segundo Deb [34], otimização é o procedimento para encontrar e comparar soluções viáveis até que nenhuma solução melhor possa ser encontrada. Soluções são consideradas boas ou ruins de acordo com objetivos, que podem ser o custo de fabricação, quantidade de gases venenosos, eficiência de um processo, a confiabilidade de um produto, entre outros.

Uma significativa parte de pesquisas e aplicações está no campo de otimização que considera apenas um objetivo, porém grande parte dos problemas reais envolve mais que um objetivo. A presença de objetivos múltiplos conflitantes (tais como simultaneamente minimizar o custo de fabricação e maximizar a confiabilidade de produto) é natural em muitos problemas e aumenta o interesse em novas metodologias de otimização.

3.2 Conceitos Básicos e Terminologia sobre Otimização

Antes de apresentar o problema de otimização, é conveniente definir conceitos inerentes a tal metodologia. De acordo com Avila [35], os principais são:

- Função objetivo: equação matemática que representa o que se deseja melhorar em um dispositivo. Tem como sinônimos: critério de otimização, função custo ou ainda função de mérito (*fitness function*);
- Parâmetros: correspondem às variáveis da função objetivo. São ajustados durante o processo de otimização visando obter a(s) solução(ões) ótima(s). Podem ser chamados de variáveis de otimização, variáveis objeto, variáveis de concepção ou de projeto;
- Espaço de busca: domínio (delimitado ou não) que contém os valores dos parâmetros a serem otimizados e que corresponde ao espaço de soluções. A dimensão do espaço de busca é definida pelo número de parâmetros envolvidos nas soluções.
- Espaço de objetivos: conjunto imagem do espaço de busca determinado por todos os valores possíveis das funções objetivo;
- Restrições: especificações do problema que delimitam os espaços de parâmetros (restrições construtivas, etc.) e/ou que não permitem determinada faixa de valores nos objetivos (por exemplo, requisitos de projeto podem impor que abaixo de certo valor a solução não seja considerada);
- Domínio realizável: região do espaço (dos parâmetros e/ou objetivos) onde as restrições são respeitadas. É também conhecido como espaço viável, admissível ou factível;

- Domínio não-viável: região do espaço onde as restrições são violadas.

Os mecanismos para a exploração do espaço de busca, específicos a cada metodologia de otimização, são condicionados por parâmetros de controle (números de iterações, direção de procura, verificação de convergência, etc.) e por condições iniciais (valores iniciais dos parâmetros, limites dos domínios, etc.).

A figura 3.1 ilustra um arranjo genérico das metodologias de otimização.

Figura 3.1 - Ilustração da disposição dos diversos componentes em uma metodologia de otimização. [35]

De acordo com as características dos problemas, pode-se classificar as ferramentas de otimização em dois grandes grupos: programação linear e programação não-linear [36-37].

3.3 Programação Linear

A programação linear tem como objetivo encontrar a solução ótima de problemas que sejam perfeitamente representados por um conjunto de equações lineares. O propósito da programação linear está em minimizar ou maximizar uma função linear, chamada função objetivo, respeitando-se um sistema linear de desigualdades denominadas restrições.

3.4 Programação Não Linear

De acordo com Bazaraa et al. [36], as técnicas para programação não-linear podem ser subdivididas em três subgrupos: métodos determinísticos, estocásticos e enumerativos.

Os métodos determinísticos, em geral, são baseados no cálculo de derivadas do problema, ou em aproximações destas. Necessitam, portanto, de alguma informação do vetor gradiente, seja procurando o ponto onde ele se anula ou usando a direção para a qual aponta.

Tais métodos, por trabalharem com a busca do ponto subsequente pelo uso do gradiente da função, só produzem bons resultados para funções contínuas (que não possuam pontos onde as derivadas sejam indeterminadas), convexas e unimodais (funções que possuam somente um mínimo ou máximo).

Os métodos estocásticos utilizam um conjunto de ações probabilísticas que buscam a solução ótima de maneira dita ‘aleatória orientada’, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema. Estratégias estocásticas são usualmente de simples implementação e entendimento. Por trabalharem com regras de probabilidade, têm menos chances de convergirem para mínimos locais se comparadas com os métodos determinísticos.

Dentre os métodos estocásticos, existe um que vem obtendo destaque devido à sua robustez, simplicidade de implementação e por poder funcionar sem a necessidade de qualquer conhecimento do comportamento do problema: os Algoritmos Genéticos (AGs) – apresentado inicialmente por Holland [38] e posteriormente por Goldberg [39] e que será discutido posteriormente no item 3.4.1.

Já nos métodos enumerativos, estipula-se um universo finito de busca, discretiza-se este espaço de modo a representar todas as possíveis soluções, e faz-se uma varredura completa (busca exaustiva) de todas as possíveis soluções.

É evidente que a implementação é muito simples de ser feita, mas esta técnica torna-se inviável para problemas em que o universo de busca é de dimensão elevada. Nestes casos, tem-se um tempo excessivo de cálculo e uma discretização, por mais fina que seja, dificilmente cobrirá todos os pontos possíveis.

Uma estratégia interessante consiste em trabalhar com métodos híbridos: inicialmente utilizam-se métodos estocásticos para determinar a região que contém o extremo (máximo ou mínimo) global e, após, aplica-se uma técnica determinística buscando o ponto ótimo. Assim, extrai-se a melhor característica de cada um dos métodos de otimização: explora-se globalmente com um método estocástico e refina-se a solução alcançada com um método determinístico. Isto foi feito por Vasconcelos et al. [40], e será adotado em algumas simulações neste trabalho no Capítulo 5.

3.4.1 Algoritmo Genético

Pode-se definir genética natural como a diversidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem. Esta diversidade é produzida pela recombinação e pela inserção de material genético novo na população.

A partir dos anos trinta esta definição vem sendo assimilada e utilizada principalmente no desenvolvimento das áreas que envolvem a biologia e a matemática, através de simulações de sistemas genéticos.

Em 1975, o engenheiro eletricitista John H. Holland escreveu o livro intitulado *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [41], em que aborda diretamente os AGs (Algoritmos Genéticos), o que deu origem ao uso desta técnica para a otimização de sistemas.

Posteriormente a metodologia foi desenvolvida com mais detalhes por David E. Goldberg, antigo aluno de Holland. Os estudos de Goldberg foram publicados no seu livro *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning* [39].

3.4.1.1 Algoritmo Genético Mono Objetivo

Em todo problema de otimização existe um objetivo a ser alcançado, que é representado por uma função objetivo. A avaliação desta função permite calcular a aptidão de cada indivíduo. Os AGs procuram sempre melhorar a população, ou seja, buscam os indivíduos de melhor aptidão ou seja em sua forma original os AGs tendem a ser algoritmos de maximização. Quando se trata de um problema de minimização, a função objetivo deve ser ajustada³ e passa a ser denominada equação de mérito.

O fluxograma de um AG simples demonstrando o processo evolutivo pode ser visto na figura 3.2.

³ Ela pode, por exemplo, ser multiplicada por -1 .

Figura 3.2– Fluxograma de um AG simples. [35]

Primeiramente especificam-se os parâmetros iniciais (por exemplo, os limites do universo de busca) e cria-se aleatoriamente uma população inicial de indivíduos dentro destes limites. Em seguida verifica-se através da equação de mérito a aptidão de cada indivíduo. Aplicam-se então os operadores genéticos que modificam a população no intuito de melhorá-la. Este processo é iterativo, e faz com que sucessivas gerações sejam geradas e prossegue até que se obtenha a convergência, baseada em algum critério pré-estabelecido, por exemplo, o número máximo de iterações.

Os operadores genéticos transformam a população através de sucessivas gerações e buscam melhorar a aptidão dos indivíduos. Eles são necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação conseguidas pelas gerações anteriores. Na maioria dos casos, os AGs utilizam os operadores de: seleção, cruzamento e mutação, descritos sucintamente abaixo:

- Seleção: também chamado de reprodução, seleciona indivíduos que sofrerão cruzamento e mutação. Igualmente como ocorre na natureza, os indivíduos mais aptos (de melhor equação de mérito) têm chances maiores de reprodução.

- Cruzamento: é a permutação de material genético entre os pares de indivíduos previamente selecionados. Após a formação de pares, os indivíduos são submetidos ao cruzamento, sendo que este pode ocorrer ou não, dependendo da taxa de probabilidade. A taxa varia de 70 a 100%, tal qual ocorre na natureza;
- Mutação: é a inserção de material genético novo na população. Tal processo pode ocorrer ou não de acordo com uma dada probabilidade de mutação. Ao contrário do cruzamento e como ocorre na natureza, a taxa de mutação é baixa, variando de 0 a 5%.

Além dos operadores básicos citados anteriormente, existem ainda algumas ferramentas para a melhoria da convergência dos AG. Eles têm dois objetivos principais: o primeiro é evitar a convergência prematura do método e o segundo é acelerar a busca pela solução ótima. São eles:

- Nicho: capacidade explorar simultaneamente regiões distintas, descobrindo ótimos locais e/ou globais;
- Reflexão: controle dos valores das variáveis de maneira a respeitar os limites impostos;
- Elitismo: manutenção das 'boas' soluções no processo evolutivo;

3.4.1.2 Algoritmo Genético Multi Objetivo

A maioria dos problemas reais requer a otimização simultânea de múltiplos objetivos. Ao passo que na otimização a um objetivo a solução ótima é facilmente definida, para o caso de mais que um objetivo isto não ocorre. Ao invés de uma única solução, o resultado de uma proposição a múltiplos objetivos é geralmente

um conjunto de soluções que caracteriza o comprometimento entre os objetivos. Tal grupo é conhecido como *Pareto ótimo*, detalhado em [35].

A abordagem mono-objetivo de um problema possibilita o seguinte cenário para o método de otimização: deseja-se minimizar uma função (ou maximizá-la). Dada uma seqüência de soluções é possível, através da função de mérito, ordená-las da melhor até a pior delas.

A abordagem a múltiplos critérios é relevante quando as soluções são ditas conflitantes, ou seja, a melhoria de um dos objetivos acarreta na deterioração do(s) outro(s). Assim, não é razoável agregar os objetivos e realizar uma otimização mono-objetivo. A ordenação que era possível no problema mono-objetivo deixa de existir. O conceito de melhor deve ser repensado. É exatamente neste contexto que a dominância de Pareto surge.

Figura 3.3— Esquema Básico da Dominância de Pareto

Basicamente, a dominância de Pareto pode ser entendida a partir de uma maximização de duas funções. A figura 3.3 representa o conjunto de soluções geradas pelo AG a múltiplos objetivos para duas funções a serem maximizadas simultaneamente.

Percebe-se claramente na figura que existem dois grupos de pontos. O ponto A e outros pontos interligados pela linha tracejada representa o grupo chamado de soluções não dominadas, ou seja, não há qualquer solução que seja melhor do que A. Quaisquer dos pontos sobre a linha pontilhada não são melhores do que A, mas também não são piores: elas são indiferentes. O ponto C faz parte do conjunto dominado. Note que o ponto A possui características superiores a C nos requisitos f_1 e f_2 . Os pontos B, C, D e E representam o grupo de soluções dominadas, porque é sempre possível encontrar sempre ao menos uma solução na linha tracejada que é superior a estas soluções.

As soluções não dominadas são melhores em um ou mais objetivos e as soluções dominadas são soluções piores que as não dominadas. As soluções que compõem o conjunto de Pareto são ótimas no sentido que não existe dentro do intervalo de busca qualquer solução melhor que elas quando *todos* os objetivos são considerados simultaneamente. Assim, o principal alvo da Otimização Multi-objetivo, consiste em obter as soluções Pareto e, em consequência, conhecer o conjunto dos compromissos possíveis entre os objetivos.

A resolução de problemas a múltiplos objetivos é dividida, basicamente, em duas etapas: determinação das soluções eficientes e a etapa de decisão. O primeiro aspecto consiste na busca de soluções Pareto-ótimas dentro do espaço factível. O segundo aspecto, que envolve um procedimento chamado de decisão, diz respeito à seleção da solução que é um 'compromisso' final dentre aquelas de Pareto. Cabe ao projetista realizar com critério esta eleição da melhor solução dentre aquelas de alto desempenho.

De maneira geral, um algoritmo evolucionário é caracterizado pelos seguintes elementos:

- um conjunto de soluções candidatas é submetido a um processo de seleção e

- as soluções escolhidas são manipuladas por operadores genéticos com a intenção de melhorar este conjunto.

Devido ao seu inerente paralelismo, os Algoritmos Evolucionários (AE) têm o potencial de encontrar múltiplas soluções Pareto em uma única iteração.

Porém, em muitas aplicações, nem sempre é possível obter soluções ótimas, muito menos um conjunto Pareto-ótimo completo (lembrando que a noção de 'ótimo' é uma idealização na maioria dos problemas reais). Conseqüentemente, o principal alvo da otimização de problemas a múltiplos critérios pode ser reformulado e generalizado, consistindo de três objetivos:

- A distância entre a fronteira não-dominada resultante e a fronteira Pareto-ótima deve ser minimizada;
- Uma boa distribuição (uniformidade) das soluções encontradas é bastante desejável porque a ausência de soluções em partes da fronteira pode dificultar a escolha final e
- O espalhamento da fronteira não-dominada deve ser maximizado. Isto é, valores extremos para cada objetivo devem ser alcançados, permitindo assim, um melhor entendimento do compromisso entre os objetivos.

Os operadores genéticos utilizados no AG a múltiplos objetivos se mantêm em relação ao AG mono-objetivo, mas em geral, utilizam-se mais dois operadores:

- Espaçamento: que permite eliminar da fronteira não-dominada as soluções muito próximas umas das outras, ou seja, impõe-se diversidade ao conjunto de Pareto.
- Redução do Espaço de Busca: diminuição do espaço factível dos parâmetros de acordo com informações obtidas da fronteira não-dominada.

O Algoritmo Genético Multi Objetivo utilizado neste trabalho foi o de Avila [35] e será detalhado nos próximos itens. Segundo o autor, este é um algoritmo que concede o mesmo grau de importância ao espaço de objetivos e ao espaço de parâmetros. Este balanceamento acarreta em uma melhor exploração do problema, facilitando por consequência a obtenção das soluções eficientes.

A vantagem principal deste algoritmo é que se faz uma análise de sensibilidade baseada em uma métrica que relaciona objetivos e parâmetros.

A figura 3.4 ilustra a necessidade de buscar soluções robustas. Neste exemplo, a solução S2 é mais estável que S1, pois, quando sujeita aos mesmos valores de perturbações, tem seus objetivos menos alterados.

Figura 3.4 - Análise de Sensibilidade buscando soluções robustas. [35]

A seguir é apresentada uma implementação particular de um Algoritmo Genético Multi objetivo baseado em três populações, [35].

- i. *Soluções iniciais criadas aleatoriamente:* Conhecidas as informações iniciais, o primeiro passo é criar a população inicial de possíveis soluções do problema. Os indivíduos são gerados aleatoriamente dentro dos limites pré-estabelecidos.
- ii. *Avaliações das funções:* As soluções são avaliadas perante o problema e a condição Pareto-ótima é testada.
- iii. *Condição de Pareto:* verificação da condição de Pareto

- iv. *População Dominada e População Não-Dominada (IDOM)*: A verificação (ou a não verificação) da condição de Pareto separa a população em dois grupos de soluções: um formado pelas soluções não-dominadas (denominada POPNDOM); e outro por soluções dominadas (POPDOM). Um índice denominado IDOM que indica por quantas vezes cada solução é dominada por outras é igualmente criado. Isto é importante para que o processo de seleção trabalhe somente com as soluções que estão na região próxima ao conjunto Pareto, o que permite uma convergência mais rápida.
- v. *Redução do espaço de busca*: é realizado eventualmente,
- vi. *Clearing*: o propósito é obter uma repartição regular dos indivíduos sobre a fronteira Pareto.
- vii. *População Real = Soluções Não-Dominadas + Dominadas*: Se similaridades entre os indivíduos são detectadas (no espaço de parâmetros e/ou no espaço de objetivos), algumas destas soluções podem ser punidas, ou seja, retiradas de POPNDOM. Este grupo de tamanho mínimo fixo é chamado de 'população real' (POPREAL), o qual é recriado a cada geração
- viii. *Nicho*: Quando for necessário, a técnica de nicho pode ser executada após a montagem de POPREAL. Esta técnica permite a exploração de regiões distintas contendo ótimos locais
- ix. *Seleção*: A seleção é feita pela ação conjunta de dois procedimentos. Os pais são em parte escolhidos por amostragem (baseada na média dos méritos da população, o que aumenta a possibilidade de seleção de indivíduos da parte central da fronteira não-dominada) e em parte por Torneio (baseado em cada objetivo individualmente, facilitando a escolha de indivíduos dos extremos da fronteira não-dominada).
- x. *Cruzamento e Mutação*: são executados os operadores de cruzamento e mutação
- xi. *Reflexão das Variáveis*: os operadores criam novos indivíduos (filhos) baseados nas informações contidas nos indivíduos correntes (pais), de maneira a explorar eficientemente o espaço de busca

- xii. *Avaliação da Geração:* Os novos indivíduos são avaliados e diretamente inseridos em POPREAL.
- xiii. *Elitismo Global:* o elitismo global é aplicado
- xiv. Então, todas as soluções (correntes e novas) são submetidas à condição de Pareto. Isto resulta em uma POPNDOM modificada, cujo tamanho varia a cada geração (aumenta ou diminui), enquanto que POPDOM pode somente aumentar. Caso não se atinja o critério de parada, volta-se para o passo iii) até que um critério de parada seja alcançado.

4. METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO

4.1 Introdução

A identificação de parâmetros térmicos é entendida no âmbito deste trabalho como o procedimento que permite calcular os melhores valores de parâmetros de um circuito equivalente térmico que permitem descrever um transformador de potência em um determinado ciclo de trabalho.

Podem-se citar os seguintes benefícios práticos do uso da identificação de parâmetros:

- permite uma avaliação mais precisa da temperatura real no óleo e nos enrolamentos;
- provê parâmetros térmicos estimados para a determinação relativamente precisa de temperaturas reais no óleo e enrolamentos;
- Com a identificação de parâmetros e o monitoramento de carga e temperatura ambiente é possível prever o envelhecimento sofrido pelo enrolamento e adequá-lo ao crescimento da carga. Usando esta metodologia em associação ao monitoramento e análise de gás dissolvido, os transformadores podem ser repostos seguramente;
- se a determinação de parâmetros for feita em tempo real, pode-se detectar eventuais falhas no sistema de resfriamento, tais como mau funcionamento de radiadores, trocadores de calor e bombas;

- mesmo em caso de indisponibilidade temporária de um ou mais radiadores ou trocadores de calor é possível realizar previsões de temperaturas do óleo e enrolamento.

No capítulo de Modelagem térmica, foi comentado que muitos modelos térmicos foram desenvolvidos nos últimos anos e um grande esforço tem sido empregado para investigar o comportamento da dinâmica térmica de transformadores de potência. Para esta a obtenção dos parâmetros dos modelos térmicos são utilizados métodos analíticos, empíricos ou numéricos. Ao se utilizar métodos numéricos usualmente as técnicas mais encontradas são: algoritmos genéticos (AG) [3], [22] e [42], redes neurais artificiais [43] e mínimos quadrados [5].

Em [42], faz-se a otimização de parâmetros das equações da norma IEEE C57.91 [8], capítulo 7 por algoritmo genético. O método parte de medidas adquiridas diretamente do ensaio de elevação de temperatura e identifica, por algoritmo genético, um conjunto de parâmetros térmicos que minimiza o erro entre as temperaturas do ponto quente medidas e calculadas em uma curva típica de carga aplicada a um transformador. A identificação aparentemente é bem feita, pois a curva otimizada se aproxima da curva medida. Cabe aqui uma observação: os valores da curva experimental possuem uma constante de tempo muito alta, pouco usual em transformadores de potência.

Outros autores utilizam a técnica de otimização por algoritmo genético [3] e [22]. Nestes artigos, são fornecidas as curvas medidas de temperatura de topo e inferior do óleo e são propostos circuitos térmicos equivalentes como modelos de função para a otimização. Em [22], é proposta uma otimização de um circuito com 5 nós. Em [3], diminui-se o circuito para 3 nós, mantendo-se ainda a precisão do método.

Em [43], redes neurais, com funções de base radial, foram utilizadas e treinadas para estimar as temperaturas de ponto quente no transformador, levando em

conta a influência da temperatura ambiente. Este algoritmo mostra um bom relacionamento entre entradas e saídas. Trata-se de técnica bastante interessante, porque o modelo não se apóia em relações físicas, apenas na descrição entre entrada (perdas do transformador) e saídas (temperaturas do transformador). A abordagem possui uma limitação intrínseca devido ao mapeamento direto, a relação entrada – saída é bem aproximada dentro do alcance coberto pelos dados treinados, ou seja, qualquer tentativa de extrapolar dados é bastante limitada [3].

Outra abordagem, que utiliza uma técnica não linear de otimização por mínimos quadrados para determinar parâmetros térmicos, apresentada em [8], deriva de várias equações diferenciais desenvolvidas em [5]. Tais equações estão em conformidade com as equações empíricas tradicionais e têm sido usadas para prever temperaturas de óleo e enrolamentos em transformadores. No entanto, a capacidade de previsão das temperaturas do transformador durante condições de chaveamento de resfriamento reais é limitada dependendo do estado de resfriamento, (ligados ou desligados)

4.2 Proposta de Identificação de Parâmetros

A figura 4.1 ilustra o que será descrito a seguir:

Figura 4.1 - Diagrama esquemático de otimização de parâmetros para circuito térmico

A determinação de parâmetros térmicos para um transformador de potência inicia-se perante duas situações:

1) No ensaio de elevação de temperatura do transformador para transformadores novos ou reparados. Em fábrica, planeja-se uma curva de carga a se aplicar no

transformador. Ao longo do ensaio, medem-se a curva de carga, as temperaturas de ponto quente do enrolamento, topo do óleo e inferior do óleo.

2) Medidas feitas em campo. Com o transformador em operação, medem-se a curva de carga real aplicada no transformador, as temperaturas de ponto quente do enrolamento, topo do óleo e inferior do óleo.

As temperaturas de ponto quente no enrolamento, de topo e inferior do óleo são as saídas e as perdas elétricas calculadas para o ensaio em fábrica ou medidas em campo servem de referência para o circuito térmico em questão, que podem ser modeladas através dos modelos propostos por Susa [2] ou Tang [3], que são mostrados nas figuras 4.2 e 4.3, respectivamente e são representados por fontes de potência, capacitores térmicos (C_{ns}) e condutâncias térmicas não lineares (G_{ns}).

Figura 4.2 - Modelagem térmica Susa – circuitos para determinação de temperatura de ponto quente do enrolamento baseados nas temperaturas de topo e inferior do óleo

Figura 4.3 - Modelagem térmica Tang – circuito para determinação de temperaturas de ponto quente no enrolamento e temperatura de topo e inferior do óleo

A fim de encontrar uma solução que melhor represente a relação de entradas e saídas para os modelos propostos, ou seja, a determinação de capacitâncias e condutâncias não lineares, define-se uma função erro, que mostra o quão exato o modelo proposto retrata o transformador real. Cabe ao algoritmo de otimização propor, como visto no capítulo anterior, novas soluções a fim de minimizar a função objetivo (função erro) para que os parâmetros do circuito térmico tenham alta precisão.

O processo de otimização pode ser realizado de duas formas. Na primeira, a função erro é definida de tal forma que aglutine os erros na temperatura do topo do óleo, inferior do óleo e do ponto mais quente do enrolamento. Usa-se então de métodos mono-objetivos. Em uma primeira etapa, neste trabalho utiliza-se um algoritmo genético cuja natureza é estocástica, com população relativamente pequena para encontrar uma provável região de baixo erro. Na segunda etapa é feita uma busca local mais detalhada através de um algoritmo determinístico convencional, com o ponto de partida determinado pelo algoritmo genético. A segunda abordagem realizada presume a definição de uma função erro para cada temperatura e torna-se obrigatório o uso de algoritmos a múltiplos objetivos.

Após a otimização, novos parâmetros de capacitâncias e condutâncias são determinados e inseridos no circuito equivalente (Susa ou Tang). Então novos

valores de curvas de temperatura de óleo e enrolamento são calculados e comparados com as temperaturas medidas em ensaio ou campo. O algoritmo de otimização é executado até que um dos critérios de parada seja atingido.

Com os parâmetros de capacitâncias e condutâncias não lineares determinadas, novas curvas de carga, com suas respectivas perdas associadas, podem ser aplicadas ao modelo para que as novas curvas de temperaturas de ponto quente do enrolamento, topo do óleo e inferior do óleo em função do tempo sejam determinadas.

4.3 Identificação de Parâmetros Modelo de Tang

O circuito utilizado é o mesmo da figura 4.3, o sistema a ser resolvido é o da equação (2.57) e as fontes de perdas, capacitâncias e condutâncias estão definidas no item 2.3.2.1.

Basicamente não existe diferença entre o modelo original de Tang [3] e [22] e o modelo utilizado neste capítulo. Porém, no trabalho original o autor trabalha apenas com temperaturas de óleo inferior e superior deixando um nó de temperatura sem funcionalidade, porque provavelmente não havia medições de ponto quente do enrolamento. Neste trabalho, além de se considerar as temperaturas de óleo inferior e superior, o nó anteriormente sem funcionalidade representará o ponto quente do enrolamento.

A não-linearidade das condutâncias térmicas neste modelo sempre terá a forma

$$G_x = a(\Delta\theta)^n \quad (4.1)$$

conforme discutido no Capítulo 2.

4.3.1 Função Objetivo para AG Mono Objetivo

Pode ser também chamada de função erro. Esta função tem o papel de aproximar a curva calculada da curva medida.

Para o problema de otimização mono objetivo, a função é definida como a soma de erros das funções das temperaturas de ponto quente no enrolamento, do topo e da parte inferior do óleo:

$$f = f_{hs} + f_{to} + f_{bo} \quad (4.2)$$

em que:

f_{hs} é a função de erro do ponto quente

f_{to} é a função de erro do topo do óleo

f_{bo} é a função de erro do inferior do óleo

As funções erro do AG mono objetivo são apresentadas individualmente e podem ser vistas nas próximas equações:

$$f_{hs} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{hsc}(k) - \theta_{hsm}(k))^2} \quad (4.3)$$

$$f_{to} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_2} (\theta_{toc}(k) - \theta_{tom}(k))^2} \quad (4.4)$$

$$f_{bo} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_3} (\theta_{boc}(k) - \theta_{bom}(k))^2} \quad (4.5)$$

em que

θ_{hsc} é a temperatura de ponto quente do enrolamento calculado

θ_{hsm} é a temperatura de ponto quente do enrolamento medido

θ_{toc} é a temperatura do topo do óleo calculado

θ_{tom} é a temperatura do topo do óleo medido

θ_{boc} é a temperatura do inferior do óleo calculado

θ_{bom} é a temperatura do inferior do óleo medido

4.3.2 Função Objetivo para AG Multi Objetivo

Ao passo que no AG mono objetivo a função é definida como a soma de erros das funções de ponto quente no enrolamento e topo e inferior do óleo, no AG a múltiplos objetivos cada função erro será tratada de forma separada. Então, a função erro torna-se vetorial:

$$\min \begin{cases} f_{hs} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{hsc}(k) - \theta_{hsm}(k))^2} \\ f_{to} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_2} (\theta_{toc}(k) - \theta_{tom}(k))^2} \\ f_{bo} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_3} (\theta_{boc}(k) - \theta_{bom}(k))^2} \end{cases} \quad (4.6)$$

em que:

f_{hs} é a função de erro do ponto quente

f_{to} é a função de erro do topo do óleo

f_{bo} é a função de erro do inferior do óleo

4.4 Identificação de Parâmetros: Modelo de Susa

Os modelos de identificação de parâmetros do modelo global da temperatura do ponto quente do enrolamento baseados na temperatura do topo do óleo e na temperatura inferior do óleo são os da figura 4.2, os sistemas a serem resolvidos são as das equações (2.39) e (2.49), respectivamente. As fontes e componentes térmicos são definidos no item 2.2.

4.4.1 Função Objetivo para AG Mono Objetivo

Para o problema de otimização de AG mono objetivo, duas funções são definidas: uma é a soma de erros das funções de temperatura do ponto quente no enrolamento e topo do óleo e a outra a é a soma de erros das funções de temperatura do ponto quente no enrolamento e inferior do óleo.

4.4.1.1 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura do topo do óleo

A função objetivo é:

$$f = f_{hs} + f_{to} \quad (4.7)$$

em que:

f_{hs} é a função de erro do ponto quente

f_{to} é a função de erro do topo do óleo

$$f_{hs} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{hsc}(k) - \theta_{hsm}(k))^2} \quad (4.8)$$

$$f_{to} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_2} (\theta_{toc}(k) - \theta_{tom}(k))^2} \quad (4.9)$$

4.4.1.1 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura inferior do óleo

A função objetivo é:

$$f = f_{hs} + f_{bo} \quad (4.10)$$

f_{hs} é definida em (4.8)

$$f_{bo} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_3} (\theta_{boc}(k) - \theta_{bom}(k))^2} \quad (4.11)$$

4.4.2 Função Objetivo para AG Multi Objetivo

Ao passo que no AG mono objetivo a função é definida como a soma de erros das funções de ponto quente no enrolamento e topo e inferior do óleo, a função objetivo no AG multi objetivo trata as funções de ponto quente no enrolamento e topo e inferior do óleo separadamente. Então, a função erro torna-se vetorial.

4.4.2.1 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura do topo do óleo

O problema de otimização a múltiplos objetivos passa a ter a seguinte forma:

$$\min \begin{cases} f_{hs} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{hsc}(k) - \theta_{hsm}(k))^2} \\ f_{to} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_2} (\theta_{toc}(k) - \theta_{tom}(k))^2} \end{cases} \quad (4.12)$$

em que:

f_{hs} é a função de erro do ponto quente

f_{to} é a função de erro do topo do óleo

4.4.2.2 Temperatura do ponto quente do enrolamento baseado na temperatura inferior do óleo

O problema de otimização a múltiplos objetivos passa a ter a seguinte forma:

$$\min \begin{cases} f_{hs} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{hsc}(k) - \theta_{hsm}(k))^2} \\ f_{bo} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_2} (\theta_{boc}(k) - \theta_{bom}(k))^2} \end{cases} \quad (4.13)$$

em que:

f_{hs} é a função de erro do ponto quente

f_{bo} é a função de erro do inferior do óleo

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 Introdução

Os modelos térmicos utilizados são os de Susa [2] e Tang [3] apresentados no Capítulo 2. A identificação de parâmetros discorrida no Capítulo 4 utiliza métodos de otimização por algoritmo genético (AG) mono objetivo e multi objetivo discutidos no Capítulo 3. Neste capítulo, todos os conceitos abordados e detalhados nos capítulos 2, 3 e 4 serão aplicados em conjunto.

Toda a programação de códigos e utilização pacotes de programas para otimização são implementados em ambiente Matlab. Para o AG mono objetivo é utilizado o pacote optimtool e gatool. Já para o AG multi objetivo é utilizado o código proposto em [35]

As curvas de temperatura de óleo superior e inferior e ponto quente do enrolamento foram extraídas de ensaios de elevação de temperatura realizados em fábrica. As recomendações gerais, tais como localização dos sensores e quantidade de sensores para medida direta nos enrolamentos, são comentados com mais detalhes no Anexo F.

A norma IEEE C57.91-1995 [8] é utilizada para referência e comparação com os valores medidos no ensaio de elevação de temperatura e valores calculados pelos parâmetros térmicos identificados para os modelos de Susa, itens 2.2.6 e 2.2.8 e Tang, item 2.3.2, tanto para a identificação por AG mono objetivo, como para identificação por AG multi objetivo.

As simulações são divididas em 4 partes:

- Tang mono objetivo;
- Tang multi objetivo;
- Susa mono objetivo;
- Susa multi objetivo.

Para as simulações mono objetivo de Tang e Susa primeiramente são identificados parâmetros térmicos para as curvas de medições originais. Após a determinação dos parâmetros térmicos, são aplicadas duas outras cargas que são igualmente simuladas conforme norma IEEE. A primeira carga tem perfil similar à curva original e a segunda de perfil completamente distinto da primeira.

Já para as simulações multi objetivo de Tang e Susa são feitas análises de sensibilidade para os parâmetros térmicos encontrados nas simulações mono objetivo. A análise a múltiplos objetivos permite verificar a sensibilidade de cada parâmetro individualmente, uma vez que fornece diversas soluções.

Em todas as simulações os parâmetros térmicos Iniciais utilizados no GA mono objetivo são utilizados os valores da tabela 5.1 sempre lembrando que a condutância térmica vale $G_i = a_i(\Delta\theta)^{b_i}$.

Tabela 5.1 - Limites inferiores e superiores de parâmetros térmicos utilizados em todas as simulações AG mono objetivo.

Parâmetros	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	C_1	C_2	C_3
Limite Inferior	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^6	1×10^6	1×10^6
Limite Superior	1×10^5	1×10^5	1×10^5	1	1	1	1×10^9	1×10^9	1×10^9

Para as simulações multi objetivo, os limites são dados nos itens específicos. As nomenclaturas utilizadas para as temperaturas neste capítulo são:

HS: temperatura no ponto quente do enrolamento

TO: temperatura do topo do óleo

BO: temperatura inferior do óleo

No texto deste capítulo, erro médio absoluto significa:

$$\text{erro_médio_absoluto} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (\theta_{medida}(k) - \theta_{calculada}(k))^2}}{N} \quad (5.1)$$

em que

θ_{medida} é a temperatura absoluta medida

$\theta_{calculado}$ é a temperatura absoluta calculada

k é a numeração da medida ou do cálculo

N é o número total de elementos

O transformador trifásico simulado tem potência de 250/250/75 MVA e resfriamento ONAF (Óleo Natural, Ar Forçado).

5.2 Comentários Sobre as Resoluções dos AG Mono e Multi Objetivos

5.2.1 Resolução do AG Mono Objetivo

Várias tentativas foram feitas para resolver o problema da identificação de parâmetros térmicos em transformadores de potência. A ferramenta *gatoool*, ferramenta para identificação de parâmetros por AG mono objetivo, do Matlab 7.4 consegue encontrar parâmetros de identificação precisos para a determinação de temperaturas do óleo e enrolamento. Porém, necessita-se de uma população com

número grande de indivíduos (acima de 50), o que faz com que demore um tempo muito longo para a simulação atingir o resultado final.

Na tentativa de diminuir o tempo de simulação dois métodos híbridos foram testados: o AG mono objetivo em associação com seleção de padrões (*pattern seach*) e o AG mono objetivo em associação método determinístico (*optimtool*).

O primeiro método foi mal sucedido, pois além de demorar um tempo excessivo para a simulação, os parâmetros encontrados não obtiveram resultados de temperaturas precisos.

Já o segundo método obteve sucesso, pois além de ser mais rápido que o AG mono objetivo puro, trouxe resultados de temperaturas bastante precisos. A associação do AG mono objetivo com o *optimtool* é rápida devido ao fato de o AG mono objetivo utilizar uma pequena população de 5 indivíduos.

A única desvantagem do método de otimização determinístico é que ele necessita de um bom conjunto inicial de parâmetros e, caso não haja um conjunto determinado, o algoritmo pode não convergir. Porém, este ponto fraco acaba sendo corrigido com o primeiro estágio de varredura de parâmetros, que é feito pelo AG mono objetivo e determina um conjunto inicial de parâmetros de qualidade regular.

A grande vantagem da associação AG mono objetivo e método determinístico é que primeiramente o AG mono objetivo faz uma busca de conjunto de parâmetros global e encontra um conjunto de parâmetros inicial para o método de otimização determinístico (*optimtool*). Então, o *optimtool* faz uma busca local e encontra os parâmetros ótimos.

5.2.2 Comentários sobre a resolução do AG Multi Objetivo

A resolução do problema de AG a múltiplos objetivos é feita para obter a sensibilidade dos parâmetros. A análise de sensibilidade é feita individualmente para cada parâmetro e serve para indicar quais parâmetros são mais sensíveis à curva a se ajustar. Observa-se assim a incerteza associada a cada parâmetro.

No problema analisado, o AG a Múltiplos Objetivos tem bom funcionamento se o intervalo de definição dos parâmetros é bem definido. Uma estratégia utilizada é definir o intervalo de busca de tal forma que o ponto ótimo do AG mono-objetivo seja um ponto interno a este intervalo.

A diferença básica entre os AG mono e multi objetivos está no fato de que os erros de temperatura entre curvas medidas e calculadas no AG mono são tratadas todas simultaneamente, enquanto que o AG multi os erros são tratadas separadamente. Esta afirmação ficará mais clara no decorrer do capítulo.

5.3. Transformador Trifásico 250 MVA, Resfriamento ONAF

Os dados principais desse transformador trifásico são:

Potência: 250/250/75⁴ MVA

Tensão: 230±8x1.5%/118/21 kV

Ligação: YNyn0d11

Resfriamento: ONAF (Óleo Natural, Ar Forçado)

Fluxo de óleo nos enrolamentos de Alta tensão e Baixa Tensão: zig-zag

⁴ Potência da Alta Tensão, Baixa Tensão e Terciário, respectivamente. Para a tensão, segue-se o mesmo raciocínio.

O número de pontos de medição da curva no eixo do tempo de HS é 305, de TO é 53 e BO é 53.

5.3.1 Tang Mono Objetivo

5.3.1.1 Identificação de Parâmetros para as curvas de medições originais

A carga original, denominada de Carga 1, aplicada no transformador de 250 MVA pode ser vista na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Carga 1 aplicada no transformador de 250 MVA

Período de Tempo (min)	Carga (pu)
0.0-187.4	1.0
187.4-364.9	0.6
364.9-503.4	1.5
503.4-710.0	0.3
710.0-735.0	2.1
735.0-750.0	0.0

Partindo dos limites superiores e inferiores da Tabela 5.1 e uma população de 5 indivíduos, GA mono objetivo em associação ao *optimtool*, resulta nos parâmetros térmicos da Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Identificação de parâmetros térmicos para o AG mono objetivo do transformador de 250 MVA

Parâmetros	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	C_1	C_2	C_3
Resultado final	2.3×10^4	1.8×10^3	3.3×10^3	7.4×10^{-2}	8.9×10^{-1}	5.3×10^{-2}	6.5×10^6	1.1×10^8	1.1×10^7

Os valores de parâmetros térmicos foram determinados para a carga original (Carga 1) e não são mais alterados.

O gráfico 5.1 ilustra a carga original aplicada, as perdas totais dissipadas, a temperatura do ponto quente do enrolamento e as temperaturas de topo e inferior de óleo. Essas temperaturas são determinadas pelos parâmetros térmicos encontrados na Tabela 5.3.

Visualmente todas as temperaturas calculadas geradas a partir da identificação de parâmetros térmicos seguiram muito bem às temperaturas medidas.

Gráfico 5.1 - Carga 1 e perdas aplicadas e HS, TO e BO para valores de parâmetros térmicos encontrados com otimização de AG mono objetivo para modelo Tang

5.3.1.2 Teste com a Carga 2

Para verificar a validade do método, primeiramente é aplicada uma curva semelhante, Carga 2, ao modelo, que pode ser visto no Gráfico 5.2, no canto superior esquerdo. A diferença entre a Carga 1 e a Carga 2 está na adição de 3 intervalos de 60 minutos com valores de carga adicionais em relação à Carga 1, de 0.2, 0.3 e 0.4 pu, respectivamente.

Gráfico 5.2 -. HS, TO e BO calculados para a Carga 2 com parâmetros térmicos determinados na tabela 5.3

Verifica-se que a diferença entre a temperatura de hotspot (HS) calculada e simulada pela norma IEEE é muito pequena, aumentando apenas no intervalo em que há uma grande mudança de carga. Porém, tal intervalo é muito pequeno, o que provavelmente justifica os desvios encontrados.

Para as temperaturas de topo de óleo (TO) e inferior do óleo (BO), trechos em que pequenas diferenças de temperatura máxima, por volta de 3°C, são detectadas. Os desvios ocorreram devido ao número de amostras coletadas para TO e BO, que são da ordem de 6 vezes menor que as amostras coletadas por HS. No período de transição, a amostragem de temperatura no hotspot é muito maior que a do óleo o que aumenta a precisão da temperatura do ponto quente.

5.3.1.3 Teste com a Carga 3

Uma terceira curva, Carga 3, é inserida ao modelo para verificação da mesma. A Carga 3, diferentemente da Carga 2 que era semelhante à Carga 1, apresenta uma curva absolutamente diferente da Carga 1. Ver Gráfico 5.3, esquerda superior.

Gráfico 5. 3 - HS, TO e BO calculados para a Carga 3 com parâmetros térmicos determinados na Tabela 5.3

Com exceção de pequenos trechos, as curvas de HS calculadas e simuladas pela norma IEEE praticamente não apresentam diferenças significativas. Já para as temperaturas de óleo há diferenças de até 4°C entre temperaturas medidas e calculadas, que acontecem nas curvas de BO.

Novamente os desvios ocorreram, provavelmente, devido ao número de amostras coletadas para TO e BO, que é cerca de seis vezes menor que o número de amostras coletadas para HS.

5.3.2 Parâmetros do Modelo de Tang e a Otimização a Múltiplos Objetivo

5.3.2.1 Análise de sensibilidade

Para limitar o espaço de busca, define-se como condições iniciais (CI) do método AG multi objetivo os parâmetros determinados pelo método AG mono objetivo. Os limites superiores são considerados como o dobro de CI e os limites inferiores são considerados como metade de CI.

A minimização dos três erros definidos no Capítulo 4 resulta na fronteira de Pareto com 460 soluções mostradas no Gráfico 5.4. Nele é possível ver que os erros médios entre valores calculados e medidos, considerando os erros separadamente, são pequenos. No mesmo gráfico é indicado o ponto ótimo encontrado no AG mono objetivo. Percebe-se que o AG mono objetivo resultou em uma das soluções do AG multi objetivo, ou seja, o resultado do AG mono objetivo está bem próximo à fronteira de pareto do AG multi objetivo. Os erros médios absolutos de HS, TO e BO são, respectivamente, 0.32, 0.23 e 0.07 °C.

Gráfico 5.4 - Dominância de Pareto para erros médios absolutos de HS, TO e BO

As 460 soluções têm parâmetros térmicos associados e podem ser vistas num histograma, parâmetro a parâmetro, no Gráfico 5.5. Neste gráfico são apresentadas os três parâmetros a_i e b_i que permitem definir as condutâncias térmicas não-lineares G_i da forma $a_i(\Delta\theta)^{b_i}$, e as três capacidades térmicas C_i

Gráfico 5.5 - Número de ocorrências de cada parâmetro térmico.

Pode-se observar do Gráfico 5.5 e da Tabela 5.4 que alguns parâmetros apresentam baixa dispersão (principalmente as capacitâncias C_2 e C_3) ao passo que os parâmetros associados ao expoente b_i são mais suscetíveis a variações.

Tabela 5.4- Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos determinados.

Parâmetros	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
média	25.9×10^4	2.33×10^3	4.04×10^3	4.65×10^{-2}	8.00×10^{-1}	4.67×10^{-1}
desvio padrão	2.04×10^3	1.30×10^2	4.00×10^2	4.6×10^{-3}	9.9×10^{-3}	3.93×10^{-2}
desvio padrão/média (%)	7.87	5.67	9.83	9.92	12.4	8.42

Tabela 5.4 – (continuação) Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos.

Parâmetros	C_1	C_2	C_3
média	7.18×10^6	1.08×10^8	8.23×10^6
desvio padrão	9.1×10^{-5}	1.41×10^6	2×10^4
desvio padrão/média (%)	12.3	1.30	0.26

5.3.3 Susa Mono Objetivo

5.3.3.1 Identificação de Parâmetros para as curvas de medições originais – HS a partir de TO

Partindo dos limites superiores e inferiores da tabela 5.1 e uma população de 5 indivíduos, GA mono objetivo em associação ao *optimtool*, resulta nos parâmetros térmicos da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Identificação de parâmetros térmicos para o AG mono objetivo Susa HS baseado em TO do transformador de 250 MVA

Parâmetros	a_1	a_2	b_1	b_2	C_1	C_2
Resultado final	7.6×10^3	7.8×10^3	3.1×10^{-1}	1.9×10^{-1}	6.3×10^6	1.3×10^8

Analogamente ao modelo de Tang, uma vez encontrados os parâmetros térmicos, esses valores permanecem fixos.

O gráfico 5.6 ilustra a carga original aplicada, as perdas totais dissipadas, a temperatura do ponto quente do enrolamento e as temperaturas de topo do óleo.

O modelo de Susa HS a partir de TO apresentou temperaturas calculadas geradas pela identificação de parâmetros térmicos semelhantes às temperaturas medidas.

Gráfico 5.6 - Carga 1 e perdas aplicadas e HS e TO para valores de parâmetros térmicos encontrados com otimização de AG mono objetivo para Modelo Susa

5.3.3.2 Identificação de Parâmetros para as curvas de medições originais – HS a partir de BO

Partindo dos limites superiores e inferiores da tabela 5.1 e uma população de 5 indivíduos, GA mono objetivo em associação ao *optimtool*, resulta nos parâmetros térmicos da tabela 5.6:

Tabela 5.6 - Identificação de parâmetros térmicos para o AG mono objetivo Susa de HS baseado em BO do transformador de 250 MVA

Parâmetros	a_1	a_2	b_1	b_2	C_1	C_2
Resultado final	5.4×10^2	3.4×10^4	8.0×10^{-1}	1.0×10^{-2}	8.5×10^6	2.5×10^8

Como pode ser visto no Gráfico 5.7, o modelo de Susa HS a partir de BO apresentou temperaturas calculadas de HS semelhantes às temperaturas medidas. Porém, a BO teve uma pequena diferença entre valores calculados e medidos principalmente nos intervalos em que a carga decresce.

Gráfico 5.7 - Carga 1 e perdas aplicadas e HS e BO para valores de parâmetros térmicos encontrados com otimização de AG mono objetivo para Modelo Susa

5.3.3.3 Teste com a Carga 2 – HS a partir de TO

Analogamente à validação feita no modelo de Tang AG mono objetivo, é aplicada a Carga 2, semelhante à Carga 1, para verificar qual o desempenho das HS e TO. A Carga 2 aplicada neste modelo é a mesma aplicada no item 5.3.1.2. Ver Gráfico 5.8.

Gráfico 5.8- Carga 2 aplicada e HS e TO pelo modelo de Susa

Verifica-se que a diferença entre a temperatura de hotspot (HS) calculada e simulada pela norma IEEE é muito pequena, aumentando apenas no intervalo em que há uma grande mudança de carga. Porém, tal intervalo é muito pequeno, o que provavelmente justifica os desvios encontrados. Para a TO existem intervalos em que a diferenças entre calculado e simulado por IEEE chegam a 4 °C. Atribuem-se também as disparidades de erros entre HS e TO ao número de

tomada de dados. Para HS foram 305 medidas, enquanto que para TO foram 53 medidas, o que pode ter comprometido a qualidade dos parâmetros associados ao topo de óleo.

5.3.3.4 Teste com a Carga 2 – HS a partir de BO

No caso do modelo de Susa HS a partir de BO, verifica-se, pelo Gráfico 5.9, que HS calculado não se adequa tão bem ao HS simulado por IEEE quanto os modelos de Tang AG mono objetivo e Susa AG mono objetivo HS a partir de TO.

Gráfico 5.9 - Carga 2 aplicada e HS e BO pelo modelo Susa

A curva de BO medida apresenta desvios que chegam a 4°C. Porém, comparado com TO, que também tem 53 pontos de amostragem, BO calculado fica intervalos maiores com diferença de temperatura maiores em relação à IEEE.

Os desvios podem ser decorrentes da otimização de parâmetros térmicos não muito precisos. Para verificar se os parâmetros térmicos foram bem dimensionados, no item 5.3.4 será determinada a fronteira de Pareto. Com isso, os parâmetros encontrados no AG mono poderão ser comparados com os parâmetros encontrados com o AG multi.

5.3.3.5 Teste com a Carga 3 – HS a partir de TO

A Carga 3, aplicada também no item 5.3.1.3, tem valores bem diferentes da Carga 1 e pode ser vista no Gráfico 5.10.

Gráfico 5.10 - Carga 3 aplicada e HS e TO pelo modelo Susa

HS calculado se adaptou muito bem com HS simulado por IEEE e TO apresentou diferenças de temperatura máxima de 4°C.

5.3.3.6 Teste com a Carga 3 – HS a partir de BO

Como pode ser visto no Gráfico 5.11, no intervalo de 360 a 480 minutos, a curva HS calculada difere bastante da simulada pelo IEEE. BO calculada fica intervalos grandes com diferenças entre 3 e 4°C.

Gráfico 5.11 - Carga 3 aplicada e HS e BO pelo modelo Susa

Mais uma vez, atribui-se à identificação não muito precisa de parâmetros como causa das diferenças encontradas entre temperaturas HS e BO calculadas e simuladas por IEEE.

5.3.4 Parâmetros do Modelo de Susa e a Otimização a Múltiplos Objetivo

5.3.4.1.a *Análise de sensibilidade – HS baseado na TO*

Como condições iniciais (CI) do método AG multi objetivo são considerados os parâmetros determinados pelo método AG mono objetivo. Os limites superiores são considerados como $1.5 \cdot CI$ e os limites inferiores são considerados como $0.5 \cdot CI$.

A minimização dos dois erros definidos no Capítulo 4 resulta na fronteira de Pareto com 169 soluções mostradas no Gráfico 5.12. Nele é possível ver que os erros médios entre valores calculados e medidos, considerando os erros separadamente, são pequenos. No mesmo gráfico é indicado com 'X' o ponto ótimo encontrado no AG mono objetivo. Percebe-se que o AG mono objetivo resultou em uma das soluções do AG multi objetivo, ou seja, o resultado do AG mono objetivo está bem próximo à fronteira de pareto do AG multi objetivo. Os erros médios absolutos de HS e TO são, respectivamente, 0.32 e 0.23 °C.

Gráfico 5.12 - Fronteira de Pareto para Modelo de Susa – AG multi objetivo – HS a partir de TO

As 169 soluções têm parâmetros térmicos associados e podem ser vistas num histograma, parâmetro a parâmetro, no Gráfico 5.13. Neste gráfico são apresentadas os dois parâmetros a_i e b_i que permitem definir as condutâncias térmicas não-lineares G_i da forma $a_i(\Delta\theta)^{b_i}$, e as duas capacitâncias térmicas C_i

Gráfico 5.13 - Análise de Sensibilidade Modelo de Susa – HS baseado em TO

Pode-se observar do Gráfico 5.13 e Tabela 5.7 que as dispersões para os parâmetros **a** e **b** são grandes, enquanto que para os **C** as dispersões são baixas.

Tabela 5.7 - Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos determinados.

Modelo HS a partir de TO

Parâmetros	a_1	a_2	b_1	b_2	C_1	C_2
média	7.3×10^{-3}	8.4×10^{-3}	3.1×10^{-1}	1.8×10^{-1}	6.8×10^6	1.4×10^8
desvio padrão	1.3×10^{-3}	9.6×10^{-2}	5.2×10^{-2}	3.2×10^{-2}	4.0×10^5	1.2×10^7
desvio padrão/média (%)	18.4	11.4	16.9	17.7	5.89	8.23

5.3.4.1.b Análise de sensibilidade– HS baseado na BO

Os limites são considerados os mesmos que no item 5.3.4.1.a.

A minimização dos dois erros definidos no Capítulo 4 resulta na fronteira de Pareto com 529 soluções mostradas no Gráfico 5.14. Nele é possível ver que os erros médios entre valores calculados e medidos, considerando os erros separadamente, são pequenos. No mesmo gráfico é indicado com 'X' o ponto ótimo encontrado no AG mono objetivo. Neste caso, percebe-se que o ponto ótimo encontrado no AG mono objetivo distancia-se um pouco da fronteira de Pareto encontrada pelo AG multi objetivo, ou seja, os parâmetros encontrados estão com baixa precisão.

No contexto de AG multi objetivo, o ponto ótimo encontrado no AG mono objetivo seria considerado um ponto dominado, ou seja, não seria um ponto de ótimo para o AG multi objetivo. Possivelmente essa tenha sido a causa da má previsão de temperatura das figuras 5.11 e 5.9. Os erros médios absolutos de HS e TO são, respectivamente, 0.38 e 0.23°C.

Gráfico 5.14 - Fronteira de Pareto para Modelo de Susa – AG multi objetivo – HS a partir de BO

Gráfico 5.15 - Análise de Sensibilidade Modelo de Susa – HS baseado em BO

Pode-se observar do Gráfico 5.15 e Tabela 5.8 que as dispersões para todos os parâmetros, com exceção de a_1 e a_2 , são relativamente baixas. É possível que alta dispersão no parâmetro a_1 tenha causado a imprecisão na determinação das temperaturas HS e TO para este modelo.

Tabela 5.8 - Verificação da dispersão de valores para os parâmetros térmicos determinados.

Modelo HS a partir de BO

Parâmetros	a_1	a_2	b_1	b_2	C_1	C_2
média	3.2×10^{-2}	3.0×10^{-4}	9.6×10^{-1}	1.3×10^{-2}	8.5×10^6	2.6×10^8
desvio padrão	1.1×10^{-2}	0.38×10^{-4}	0.76×10^{-1}	0.1×10^{-2}	0.47×10^6	0.076×10^8
desvio padrão/média (%)	33.9	13.0	8.02	8.31	5.54	2.97

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 Considerações Finais

Os modelos de Susa e Tang apresentam precisões de temperatura praticamente iguais. Para os dois modelos simulados a temperatura do ponto quente do enrolamento foi bem mais precisa que as temperaturas de topo e inferior de óleo. O melhor ajuste da primeira temperatura se deve à amostragem de dados da temperatura do ponto quente do enrolamento que foi muito maior que a amostragem de topo e inferior de óleo principalmente nos períodos de mudanças de carga.

O modelo que teve desempenho abaixo do esperado para temperatura de ponto quente no enrolamento foi o modelo de Susa HS a partir de BO para AG mono objetivo. Porém, o baixo desempenho da temperatura do ponto quente do enrolamento foi devida à baixa precisão na identificação de parâmetros térmicos que conseqüentemente levaram à curvas de temperaturas calculadas a se distanciarem das curvas simuladas pela norma IEEE.

O AG multi objetivo tem como ponto forte a análise de dados e se mostrou uma ferramenta muito útil para detectar a causa do distanciamento da curva calculada com parâmetros identificados e simulados pela norma IEEE. Porém, seu tempo de processamento é bem maior se comparado com a solução AG mono objetivo em associação à otimização determinística.

Pode-se dizer que a solução AG mono objetivo em associação à otimização determinística pode ser utilizada quando há pouco tempo para a resolução do problema, porque soluções rápidas são determinadas com uma boa aproximação.

Já a solução AG multi objetivo pode ser utilizada para duas finalidades: a primeira é detectar possíveis erros na identificação de parâmetros e a segunda é refinar os resultados encontrados com a solução AG mono objetivo em associação à otimização determinística.

Apesar das respostas de temperatura terem sido relativamente precisas, não se pode afirmar que a estratégia de identificação adotada realmente é válida, porque as comparações de curva de temperaturas calculadas com parâmetros identificados que foram feitas com as Cargas 2 e 3 levaram em conta a norma IEEE como base de comparação. O cenário ideal seria haver duas curvas de carga medidas distintas para o mesmo transformador. Com a primeira curva obter-se-ia os parâmetros e com os dados da segunda curva seria feita a validação.

6.2 Propostas de Continuidade

Algumas propostas podem ser vislumbradas:

- a mais natural seria conseguir dados de ponto quente do enrolamento e topo e inferior do óleo de pelo menos duas cargas do mesmo transformador para verificar a plena a funcionalidade da identificação desenvolvida neste trabalho;
- verificar a possibilidade de se prever temperaturas para tensões diferentes da nominal para casos em que se utiliza comutação de tensão;
- Conseguir dados de temperatura de óleo e enrolamentos para condições ONAN/ ONAF (Óleo Natural, Ar Natural)/ (Óleo Forçado, Ar Forçado) para implementar a identificação em estágios diferentes de refrigeração, já que esta é uma das condições mais comuns encontradas em transformadores de potência.

- Acoplar os algoritmos de AG mono objetivo, otimização determinística e AG multi objetivo, pois atualmente as três simulações são independentes e dependem da intervenção manual a cada final de processo de otimização;
- Fazer busca local a cada iteração da fronteira de Pareto, pois se pode alcançar uma otimização ainda melhor com a busca local sobre a fronteira de Pareto.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Assunção, T.C.B.N., **Contribuição à Modelagem e Análise do Envelhecimento de Transformadores de Potência**. 2007. 207p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais.
- [2] Susa, D., Lehtonen, M. and Nordman, H. “Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers”, **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol. 20, pp. 197– 204, 2005.
- [3] Tang, W.H. and Wu, Q. H. “A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy”, **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol. 19, pp.1112–1119, 2004.
- [4] **IEC60354-Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers**, International Electrotechnical Commission Standard, Genève, Suisse, 1991.
- [5] Swift, G., Molinski, T. S. and Lehn, W. “A fundamental approach to transformer thermal modeling, part I—theory and equivalent circuit”, **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol. 16, pp. 171–175, 2001.
- [6] Nordman, H., Råfsbäck, N. and Susa, D. “Temperature responses to step changes in the load current of power transformers”, **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol. 18, pp. 1110–1117, 2003.
- [7] Nordman, H and Lahtinen, M. “Thermal Overload Tests on a 400-MVA Power Transformer with a Special 2.5-p.u. Short Time Loading Capability”, **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol. 19, pp.107–112, 2003.
- [8] **IEEE Guide to Loading Mineral Oil-Immersed Transformer**, IEEE Std. C57.91-1995, 1991.
- [9] Pierce, L.W. “An Investigation Of The Thermal Performance Of An Oil Filled Transformer Winding”, **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol.7, pp.1347–1358, 1992.
- [10] Pierce, L.W. “Predicting Liquid Filled Transformer Loading Capability”, **IEEE Trans. Industry Application**, Vol. 30, pp. 170–178, 1994.
- [11] Tylavsky, D. J. et al., “The effect of quantization and sampling time on transformers thermal performance and parameters calculation,” **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**, Oct. 3–7, 1999.

- [12] Zodeh, O. M. and Whearty, R. J. "Thermal characteristics of a metaaramid and cellulose insulated transformer at loads beyond nameplate, **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 12, no. 1, pp. 234–248, Jan. 1997.
- [13] Tylavsky, D. J., He, Q., McCulla, G. A. and Hunt, J. R. "Sources of Error in Substation Distribution-Transformer Dynamic Thermal Modeling," **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 15, no. 1, pp. 178–185, Jan. 2000.
- [14] Lesieutre, B. C., Hagman, W. H. and Kirtley, J. L. Jr, "An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system," **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 12, no. 1, pp. 249–256, Jan. 1997.
- [15] Mao, X., Tylavsky, D. J. and McCulla, G. A. "Assessing the reliability of linear dynamic transformer thermal modeling," **Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.**, vol. 153, no. 4, pp. 414–422, Jul. 2006.
- [16] Rivera L. J. and Tylavsky, D. J. "Acceptability of four transformer top-oil thermal models—Part I: Defining models and metrics for system identification purposes," **IEEE Trans. Power Del.**, vol. 23, no. 1, Jan. 2008.
- [17] Wu, G.N. and Zhou, L.J. "Calculating Temperature Rise of Traction Transformer Using Thermal Circuit Model", **Intern. Conf. Condition Monitoring and Diagnosis**, Changwon, Korea, pp. 913-917, 2006.
- [18] Swift, G., Molinski, T. S. and Bray, R. "A fundamental approach to transformer thermal modeling, part II—field verification," **IEEE Trans. Power Delivery**, Vol. 16, pp. 176–180, 2001.
- [19] Radakovic, Z. and Kalic, D. J. "Results of a novel algorithm for the calculation of the characteristic temperatures in power oil transformers," **Elect. Eng.** 80, pp. 205–214, 1997.
- [20] Radakovic, Z. "Numerical determination of characteristic temperatures in directly loaded power oil transformer," **Eur. Trans. Elect. Power**, vol. 13, pp. 47–54, Jan./Feb. 2003.
- [21] Radakovic, Z. and Kalic, D. "Results of a novel algorithm for the calculation of the characteristic temperatures in power oil transformers," **Elect. Eng.**, vol. 80, pp. 205–214, June 1997.

- [22] Tang, W.H., Wu, Q.H. and Richardson, Z.J. "Equivalent heat circuit based power transformer thermal model", **IEE Pros-Electr. Powr Appl.**, Vol. 149, pp.87-92, 2002.
- [23] **IEC 60076-7 - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers**, 2005
- [24] Rivera L. J. and Tylavsky, D. J. "Acceptability of Four Transformer Top-Oil Thermal Models—Part II: Comparing Metrics", **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 23, no. 2, Apr. 2008.
- [25] Tylavsky, D. J., Mao, X. and McCulla, G. A. "Transformer thermal modeling: Improving reliability using data quality control," **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 21, no. 3, pp. 1357–1366, Jul. 2006.
- [26] Susa, D., Palola, J., Lehtonen, M., and Hyvarinen, M., " Temperature Rises in an OFAF Transformer at OFAN Cooling Mode in Service", **IEEE Transactions on Power Delivery**
- [27] Susa, D., Lehtonen, M., and Nordman, H.," Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 20, Iss. 1, January 2005, pp. 197 – 204
- [28] Grubb, R.L., Hudis, M., and Traut, A. R.,"A Transformer Thermal Duct Study of Various Insulating Fluids", Power Apparatus and Systems, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** ,Vol. PAS-100 , No. 2 , February 1981, pp. 466 - 473.
- [29] Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996, pp. 886.
- [30] Karsai, K., Kerenyi, D., and Kiss, L.,Large **Power Transformers**, Elsevier Science Publishers, 1987, pp 607.
- [31] **IEC 72-2 Power Transformers; Part 2: Temperature rise**,1994-04 second edition
- [32] Thaden, M. V. et al., "Temperature rise tests on a forced-oil-air cooled (FOA) (FAF) core-form transformer, including loading beyond nameplate," **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 10, no. 2, pp. 913–923, Apr. 1995.

- [33] Lesieutre, B. C. et al., “An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system,” **IEEE Trans. On Power Delivery**, vol. 12, no. 1, pp. 249–256, Jan. 1997.
- [34] Deb, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [35] Avila, S. L., **Otimização multiobjetivo e análise de sensibilidade para concepção de dispositivos**, Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [36] Bazaraa, M. S., Sherali, H. D. and Shetty, C. M. **Nonlinear Programming – Theory and Algorithms**, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [37] Luenberger, D. G. **Linear and Nonlinear programming**, 2a ed., Addison-Wesley, New York, 1990.
- [38] Holland, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**, MIT Press, Cambridge, 1992.
- [39] Goldberg, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**, Addison Wesley Longman Inc., New York, 1989.
- [40] Vasconcelos, J. A., Saldanha, R. R., Krähenbühl, L. et al., “Genetic Algorithm Coupled with a Deterministic Method for Optimization in Electromagnetics,” **IEEE - Transactions on Magnetics**, v. 33, n. 2, pp. 1860–1963, Mar. 1997.
- [41] Holland, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, Ann Arbor. University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- [42] Galdi, V., Ippolito, L., Piccolo, A, Vaccaro, A – Parameter identification of power transformers thermal model via genetic algorithms - **Electric Power Systems Research** 60 (2001), pp. 107–113
- [43] Galdi, V., Ippolito, L., Piccolo, A. and Vaccaro, A. “Neural diagnosis system for transformer thermal overload protection,” **Proc. Inst. Elect. Eng., Elect. Power Applicat.**, vol. 147, no. 5, pp. 415–421, Sept. 2000.
- [44] Saralovac, M. P. , “ The use of optic fibres for temperature monitoring in power transformers” , **Colloquium on Condition Monitoring and Remanent Life Assessment in Power Transformers**, 1994

ANEXO A – Descrição dos diferentes tipos de óleo

Os óleos isolantes dos transformadores são caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- μ é a viscosidade do óleo
- c_{oil} é o calor específico do óleo
- ρ_{oil} é a densidade do óleo
- k é a condutividade térmica do óleo
- β é o coeficiente de expansão térmica do óleo

A dependência desses parâmetros, [7] e [10], são dadas por:

$$\mu = A_1 \cdot e^{\left[\frac{A_2}{\theta_{oil} + 273} \right]} \quad (A.1)$$

$$c_{oil} = A_3 + A_4 \theta_{oil} \quad (A.2)$$

$$\rho_{oil} = A_5 + A_6 \theta_{oil} \quad (A.3)$$

$$k = A_7 + A_8 \theta_{oil} \quad (A.4)$$

$$\beta = A_9 \quad (A.5)$$

As constantes para os dois tipos básicos de óleo de transformadores mais comuns são listados abaixo:

Tabela A.1. Constantes de óleo isolante,[7], e [10]

Constante	Óleo de transformador	Silicone
A1	0.13573×10^{-5}	0.12127×10^{-3}
A2	2797.3	1782.3
A3	1960	1424
A4	4.005	2.513
A5	887	989
A6	-0.659	-0.87
A7	0.124	0.138
A8	-1.525×10^{-4}	-9.621×10^{-5}
A9	8.6×10^{-4}	9.5×10^{-4}

Estes números são geralmente válidos para todos os óleos isolantes de transformador em que a variação de viscosidade com a temperatura é muito maior que a variação de outros parâmetros do óleo.

ANEXO B – Partida do transformador a frio

Partida do transformador a frio refere-se à condição de operação em que o óleo do transformador está inicialmente em repouso, assim como não há circulação de óleo prioritária quando o transformador é energizado.

Observações feitas durante vários ensaios térmicos em transformadores com refrigeração externa [14-15] mostraram que os gradientes de temperatura de ponto-quente ao topo do óleo, topo do óleo para o ar e inferior do óleo para o ar são diretamente afetados pelas condições do transformador a frio, isto é, os gradientes obtidos durante este particular estado atingirá valores mais altos do que aqueles obtidos quando a circulação de óleo dentro do transformador é estabelecida.

Adicionalmente, a falta de movimento de óleo criará artificialmente um efeito similar à condição de alta viscosidade no óleo que poderia, por exemplo, ocorrer em temperaturas de ambientes menores que 0 °C. Portanto, expoentes especiais para a partida à frio são sugeridas para que se leve em conta este fenômeno, conforme se mostrou nas Tabelas 2.4 e 2.5.

Em contrapartida, é observado que o gradiente do ponto-quente para o inferior do óleo na partida de transformadores não difere do estado em que a circulação de óleo já foi estabilizada. Isto pode ser explicado pela localização do gradiente em relação aos enrolamentos, que são as fontes primárias de calor no transformador.

Por exemplo, quando a posição do gradiente do ponto-quente para o inferior do óleo é considerada, é óbvio que o calor será transferido para o óleo ao longo de quase toda distância entre os gradientes, isto é, o óleo será esquentado em cada ponto sem qualquer atraso, ao passo que o gradiente do ponto-quente ao topo do

óleo é diretamente esquentado apenas no ponto no topo do enrolamento do transformador.

Este fenômeno pode ser observado com a inserção apropriada de sensores de temperatura, em ensaios de aquecimento de acordo com a norma IEC 76-2 [13].

Adicionalmente, este comportamento pode ser esperado quando novas unidades de transformadores forem instaladas e energizadas pela primeira vez ou quando transformadores usados são trazidos de volta à operação após terem sofrido algum tipo de serviço de revitalização.

Uma vez que o transformador foi energizado, os expoentes de partida a frio, que são dados nas Tabelas 2.4 e 2.5, podem ser substituídos pelos expoentes “em carga” do transformador na primeira mudança de carga.

ANEXO C – Constante de tempo do Enrolamento

A constante de tempo do enrolamento, [9] é o seguinte:

$$\tau_{wdn} = 2.75 \cdot \frac{\Delta\theta_{hs, rated}}{(1 + P_e) \cdot s^2} \quad \text{para Cu} \quad (C.1)$$

$$\tau_{wdn} = 1.15 \cdot \frac{\Delta\theta_{hs, rated}}{(1 + P_e) \cdot s^2} \quad \text{para Al} \quad (C.2)$$

em que:

τ_{wdn} é a constante de tempo na carga nominal, em minutos,

$\Delta\theta_{hs}$ é o gradiente de temperatura do ponto-quente do enrolamento ao topo do óleo, °C,

P_e é a perda adicional do enrolamento, por unidade de perda em corrente contínua, corrigida para a temperatura do ponto-quente,

s é a densidade de corrente em carga nominal, A/mm².

ANEXO D – Constante de tempo do óleo

A constante de topo de óleo em uma considerada carga é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_{oil, rated} = \frac{C_{th-oil} \cdot \Delta\theta_{oil, rated}}{q_{tot, rated}} \cdot 60 \quad (E.1)$$

em que:

$\tau_{oil, rated}$ é a constante de tempo do topo do óleo nominal, minutos,

$\Delta\theta_{oil, rated}$ é a elevação de temperatura do topo do óleo em relação à temperatura ambiente, K,

$q_{tot, rated}$ são as perdas totais na carga nominal, W,

C_{th-oil} é a capacitância térmica equivalente do óleo do transformador, W.h/°C.

A capacitância térmica equivalente do óleo do transformador é dada pela seguinte equação:

$$C_{th-oil} = 0.48 \cdot m_{oil} \quad (E.2)$$

em que: m_{oil} é a massa do óleo, kg.

A equação (E.2) é uma fórmula empírica baseada na modelagem que já foi testada e validada em [4]. Esta equação é baseada nas observações de ensaios de aquecimento e leva implicitamente em conta os efeitos das partes metálicas. Sugere-se usar esta equação quando a massa do fluido do transformador é a única informação disponível.

ANEXO E – Modelo de distribuição de temperatura no óleo e enrolamento da Norma IEC 6007-7 - 2005

- A Temperatura do topo do óleo (média da saída do tanque e poço de óleo)
- B Temperatura mesclada no topo do enrolamento
- C Temperatura média no tanque
- D Temperatura inferior do enrolamento
- E Temperatura inferior do tanque
- g_r Diferença entre temperatura média do óleo e temperatura média do enrolamento em corrente nominal
- P Temperatura de ponto quente
- Q Temperatura média do enrolamento determinada por medida de resistência
- Eixo X Temperatura
- Eixo Y Posições relativas
- Pontos medidos
 - Pontos calculados

ANEXO F - Medição Direta de Temperatura nos Enrolamentos

Devido às medidas experimentais apresentadas no Capítulo 5, faz-se necessária uma rápida explicação do histórico e qual foi o procedimento utilizado para se efetuar a medição de temperatura direta nos enrolamentos. O texto que vem a seguir foi extraído de [F1]

Histórico

Desde que sondas de fibra ótica para medições de temperaturas de ponto quente em enrolamentos de transformadores foram introduzidas no início da década de 80, o questionamento principal tem sido de quantos sensores deveriam ser usados e como eles deveriam ser localizados para medir o ponto mais quente em um enrolamento.

O grupo de trabalho CIGRÉ WG 12.09 [F2] enviou a seguinte pergunta para diferentes países: “Quais recomendações podem ser feitas para a localização e número de sensores para que se possa encontrar o ponto quente real?” De acordo com as respostas recebidas, de dois a 8 sensores seriam suficientes para transformadores padrão e de 20 a 30 sensores seriam suficientes para transformadores protótipo.

Com relação à localização dos sensores, chegou-se à seguinte proposição: “É recomendado colocar os sensores no disco ou espira mais superior entre condutores e calços e com posições circunferências variadas”.

Recomendações Gerais

Desde 1986, sondas de fibra ótica tem sido regularmente instalada em transformadores na Finlândia. A maioria destes transformadores têm sido testados com sobrecarga. Experiências obtidas com tais testes resultaram nas seguintes práticas:

- 1) Sensores devem ser instalados em cada enrolamento, pois o ponto quente real pode “pular” de um enrolamento para outro quando a corrente de carga é alterada. Esta última observação também foi feita por Pierce [F3]
- 2) Ao menos oito sensores devem ser instalados, e destes, pelo menos seis devem trabalhar em cada enrolamento principal
- 3) Quando as dimensões dos fios são adequadamente selecionadas, isto é, quando as perdas adicionais nos discos ou espiras finais estão bem controladas, o ponto quente real normalmente não está localizado no primeiro disco ou espira superior devido ao fato de não haver discos ou espiras esquentando acima destes. Este efeito prevalecerá sobre o efeito de perdas adicionais. Portanto, sensores devem ser instalados ao menos no segundo ou terceiro disco ou espiras superiores.
- 4) Se os enrolamentos são resfriados em um perfil de fluxo de óleo zig-zag, os sensores devem ser localizados acima do radial construído perto da saída de óleo ao invés de perto da entrada de óleo.
- 5) Calibrações mostraram que uma razoável precisão é obtida quando os sensores são inseridos nos espaçadores radiais [F4] de forma que eles não estejam em contato com o disco/espira a ser medido (ver figura F1)

Figura F1 Dois sensores ópticos instalados em um calço antes do calço ser instalado em um enrolamento de 120 kV

É certo que o sistema de medição distribuída ao longo de todos os condutores [F5] é o único meio de identificar o ponto quente real. A filosofia básica atrás do uso de seis a oito sensores discretos é que a máxima temperatura mostrada por eles pode ser considerada o ponto quente real sem reduzir a capacidade de serviço ou tempo de vida do enrolamento considerado.

Em alguns casos, 15 sensores foram instalados nos discos superiores de um enrolamento e nenhuma temperatura inesperada foi encontrada. Assim, considera-se que oito sensores são suficientes, uma vez que os sensores são instalados em pontos onde, por cálculo analítico, são esperados se encontrar os pontos mais quentes.

Medições feitas para o transformador de 400/400/125 MVA

No total, 20 sondas de fibra óptica foram instaladas no transformador de 400/400/125 MVA. Em ambos os enrolamentos principais, oito sensores foram

instalados nos três discos/espiras superiores e duas no canal de óleo para os colares superiores. O tipo de sensor utilizado foi o Nortech.

Como um exemplo de medições de fibra ótica, elevações de temperaturas locais acima da temperatura ambiente de 25.6 °C para um teste de sobrecarga com 1.6 pu são mostradas na Figura F2.

Figura F2 – Elevações de temperaturas acima da temperatura ambiente em carga de 1.6 pu.
Esquerda - enrolamento de 120 kV. Direita – enrolamento de 410 kV

Bibliografia

- [F1] (Nordman, 2003) Nordman H., and Lahtinen M., "Thermal overload tests on a 400-MVA power transformer with a special 2.5-p.u. Short time loading capability", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18 , Iss. 1 , Jan 2003, pp.107 - 112
- [F2] "Direct measurement of the hot-spot temperature of transformers," Electra, CIGRÉ WG 12-09, vol. 129, 1990.
- [F3] L. W. Pierce, "An investigation of the thermal performance of an oilfilled transformer winding," IEEE Trans. Power Delivery., vol. 7, pp. 1347-1358, July 1992.
- [F4] W. Lampe, L. Pettersson, C. Ovren, and B. Wahlstrom, "Hot-spot measurements in power transformers," CIGRÉ, Rep. 12-02, 1984.
- [F5] H. P. Schad and P. Boss, "Faseroptische messung des temperaturprofils

einer transformatormodellspule,” Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins SEV/VSE, vol. 80, pp. 377–379, Apr. 1989.