

Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESTIMAÇÃO DE
TEMPERATURA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADA NO
CARREGAMENTO.**

Bruna de Andrade Bastos Fonseca

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

**RIO DE JANEIRO
AGOSTO DE 2012**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESTIMAÇÃO DE
TEMPERATURA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADA NO
CARREGAMENTO.**

Bruna de Andrade Bastos Fonseca

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

RIO DE JANEIRO

AGOSTO DE 2012

Fonseca, Bruna de Andrade Bastos

Desenvolvimento de um Software para Estimação de Temperatura de Transformadores de Potência Baseada no Carregamento/ Bruna de Andrade Bastos Fonseca – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012.

XI, 74 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Elétrica, 2012

Referencias Bibliográficas: p. 73-74.

1. Desenvolvimento de um Software para Estimação de Temperatura de Transformadores de Potência Baseada no Carregamento 2. Modelagem Térmica. I. Oliveira, Sebastião Ércules Melo de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Título

Agradecimentos

A Deus por estar sempre presente em minha vida.

Em especial, agradeço a minha mãe, Eva, e a minha irmã, Bianca, por sempre me apoiarem e muitas vezes acreditarem mais em mim do que eu mesma.

Ao Bernardo Frossard, pelo carinho e compreensão durante toda esta jornada e também pela paciência, principalmente durante as semanas de provas.

A todos os amigos da faculdade, sem vocês ela não teria sido a mesma.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ por todos os ensinamentos.

A todos da equipe DianE: Christian, Clayton, Gustavo, Marcela, Martin, Monique e Juliana. Por toda a ajuda durante a execução deste projeto e pelos bons momentos. Em especial ao meu supervisor no Cepel, Carlos Julio Dupont, pelo apoio, pela confiança e pela oportunidade que me foi dada.

Ao Prof. Sebastião, por ter aceitado orientar este trabalho e por todos os ensinamentos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESTIMAÇÃO DE TEMPERATURA
DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADA NO CARREGAMENTO

Bruna de Andrade Bastos Fonseca

AGOSTO/2012

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Curso: Engenharia Elétrica

O conhecimento da temperatura do ponto mais quente do enrolamento de um transformador é vital para a operação destes equipamentos, uma vez que, ao monitorar-se esta temperatura, é possível avaliar o desgaste do isolamento e, conseqüentemente, a vida útil do transformador.

Neste contexto, a modelagem térmica pode ser considerada um dos mais importantes aspectos no monitoramento das condições dos transformadores de potência. Através da comparação entre os valores medidos e calculados das temperaturas de operação, é possível determinar as condições de operação do equipamento e descobrir possíveis anormalidades.

Este trabalho apresenta algumas das diversas modelagens térmicas existentes na literatura e apresenta, também, simulações de carregamento criadas com o objetivo de permitir o cálculo de parâmetros térmicos; cálculo das temperaturas do enrolamento e do topo do óleo; e estudos para a determinação de cargas e tempos máximos admissíveis em regimes de carregamento constante.

Palavras chave: transformador, carregamento, perda de vida, modelagem térmica, parâmetros térmicos.

Abstract of Undergraduate Project presented to Escola Politécnica/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR ESTIMATION OF POWER TRANSFORMERS
TEMPERATURE BASED ON LOADING

Bruna de Andrade Bastos Fonseca

AUGUST/2012

Advisor: Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Course: Electrical Engineering

Information regarding the hottest-spot temperature is vital for the operation of power transformers because through the monitoring of this temperature is possible to evaluate the deterioration of transformer's insulation and therefore its life expectancy. In this context the thermal model of power transformers can be considered one of the most important aspects in the power transformer conditions monitoring. Through the comparison of calculated and measured temperature values it's possible to evaluate the equipment operational conditions and predict possible anomalies.

In this work a few of the numerous thermal models available in literature are presented as well as loading simulations developed with the objective of allowing calculations of thermal parameters; hottest-spot and top oil temperature calculations and simulations for the determination of the maximum duration and loading allowed in steady state.

Key words: transformer, loading, life expectancy, thermal model, thermal parameters.

Índice

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1. Objetivo	3
1.2. Visão Geral do Texto.....	4
Sobrecarga e Perda de Vida Útil em Transformadores de Potência.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. O Transformador de Potência.....	6
2.3. Limites de Elevação de Temperatura do Transformador	6
2.4. Expectativa de Vida do Transformador.....	7
2.5. Tipos de Carregamento.....	10
2.6. Modelagem Térmica de Transformadores de Potência	12
2.6.1. Modelagem Térmica da ABNT	12
2.6.2. Modelagem Térmica ANSI	20
2.6.3. Modelo IEEE/ANSI Melhorado	25
2.6.4. Modelo ABNT Adaptado	28
Algoritmos Genéticos	30
3.1. Introdução.....	30
3.2. Algoritmos Evolucionários.....	30
3.3. Algoritmos Genéticos	32
3.4. O GA Mais Básico.....	33
3.4.1. Esquema de um GA	33
3.4.2. Representação Cromossomial.....	33
3.4.3. Escolha da População Inicial	34
3.4.4. Função de Avaliação	34
3.4.5. Seleção de Pais	35
3.4.6. Operador de <i>Crossover</i>	35
3.4.7. Operador de Mutação	36
3.5. Algoritmo para Calcular Parâmetros Térmicos do Transformador	37
CAPÍTULO 4	38
O Programa.....	38
4.1. Sistema DianE	38
4.2. Simulações de Carregamento	38
4.2.1. Cálculo de Parâmetros Térmicos do Transformador.....	41
4.2.2. Cálculo de Temperaturas	43
4.2.3. Cargas e Tempos Máximos Admissíveis.....	47
Estudos de Caso.....	50
5.1. Transformador #1	50
5.1.1. Parâmetros Térmicos do Transformador	52
5.1.2. Cálculo das Temperaturas	53
5.1.2.1. Parâmetros Sugeridos pela ABNT NBR 5416/1997	54
5.1.2.2. Parâmetros Calculados	55
5.1.2.3. Comparação dos Modelos e Parâmetros.....	57
5.1.3. Cargas e Tempos Máximos Admissíveis.....	63
5.1.3.1. Tempo Admissível de Sobrecarga.....	64
5.1.3.1. Carregamento Máximo Admissível.....	68
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	71
6.1. Conclusões.....	71

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	72
Referências Bibliográficas.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de expectativa de vida	9
Figura 2 - Ciclo genérico com dois níveis de carga e temperaturas resultantes [2]	19
Figura 3 - Pontos de crossover para um cromossomo composto por 5 genes [10]	35
Figura 4 - Descrição da operação do operador de crossover de um ponto e mutação [10]	36
Figura 5 - Tela principal do Sistema DianE	39
Figura 6 - Tela principal do Sistema DianE - Menu "Simulações de Carregamento"	40
Figura 7 - Menu "Simulações de Carregamento" e seus submenus	40
Figura 8 - Tela "Cálculo de Parâmetros"	41
Figura 9 - Tela "Cálculo de Temperaturas"	44
Figura 10 - Tela "Cálculo de Temperaturas" com uma das variáveis selecionada.....	45
Figura 11 - Exemplo de curvas plotadas na tela "Cálculo de Temperaturas"	45
Figura 12 - Tela "Cargas e Tempos Máximos Admissíveis"	47
Figura 13 - Exemplo de simulação na tela "Cargas e Tempos Máximos Admissíveis"	48
Figura 14- Tensão fase-fase (em kV) medida nos terminais de alta tensão do transformador.	51
Figura 15 - Corrente de linha (em A) medida nos enrolamentos de alta tensão do transformador.....	51
Figura 16 - Temperatura ambiente (em °C) medida no entorno do transformador	51
Figura 17 - Temperatura medida do topo do óleo (em °C) do transformador	52
Figura 18 - Temperatura medida (em °C) do ponto mais quente do enrolamento do transformador.....	52
Figura 19 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o Transformador - Modelo e parâmetros NBR 5416.....	54
Figura 20 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o Transformador - Modelo NBR Adaptado e parâmetros NBR 5416.....	54
Figura 21 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o transformador - Modelo e parâmetros NBR 5416.	55
Figura 22 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o transformador - Modelo NBR Adaptado e parâmetros NBR 5416.	55
Figura 23 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o transformador - Modelo NBR 5416 e parâmetros calculados	56
Figura 24 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o Transformador - Modelo NBR Adaptado e parâmetros calculados	56
Figura 25 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o Transformador– Modelo NBR 5416 e parâmetros calculados.	56
Figura 26 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o Transformador– Modelo NBR Adaptado e parâmetros calculados.....	57
Figura 27 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do óleo do Transformador - parâmetros NBR 5416; Modelos NBR e NBR Melhorado.	58
Figura 28 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do enrolamento do Transformador - Parâmetros NBR 5416; Modelos NBR e NBR Melhorado.....	58
Figura 29 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do óleo do Transformador - Parâmetros Calculados; Modelos NBR e NBR Melhorado.	59
Figura 30 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do enrolamento do Transformador - Parâmetros Calculados; Modelos NBR e NBR Melhorado.	59
Figura 31 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR 5416 para o óleo do Transformador	60
Figura 32 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR Adaptado para o óleo do Transformador	60

Figura 33 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR 5416 para o enrolamento do Transformador	61
Figura 34 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR Adaptado para o enrolamento do Transformador.....	61
Figura 35 - Evolução da temperatura do enrolamento para carregamento de 1 pu e sobrecargas de 30% e 50%	64
Figura 36 - Tempo máximo admissível para sobrecargas de 30% e 50% considerando como condição limite a temperatura máxima do enrolamento.....	65
Figura 37 - Evolução da temperatura do enrolamento para carregamento de 1 pu e sobrecargas de 30% e 50% considerando como condição limite uma perda de vida igual a perda de vida percentual do transformador.....	66
Figura 38 - Tempo máximo admissível para Sobrecargas de 30% e 50% considerando como condição limite perda de vida igual à perda de vida percentual diária.....	66
Figura 39 - Carga máxima admissível considerando como condição limite a temperatura máxima do enrolamento	68
Figura 40 - Carga máxima admissível durante 24h e 1 semana, considerando como condição limite uma perda de vida igual à perda de vida percentual diária	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de elevação de temperatura [3].....	7
Tabela 2 - Valores de referência do óleo e do papel isolantes em operação para	10
Tabela 3 - Limites máximos de temperatura sugeridos para os tipos de carregamento [7]	11
Tabela 4 - Características dos transformadores de 65°C e 55°C sob carga nominal [2].....	18
Tabela 5 - Analogia entre os termos utilizados na área genética e os utilizados pelos algoritmos genéticos	32
Tabela 6- Tipos de representação de cromossomos	34
Tabela 7- Dados do Transformador.....	50
Tabela 8- Parâmetros térmicos do transformador.....	53
Tabela 9 - Erro médio de ajuste por ponto dos parâmetros térmicos do transformador.....	53
Tabela 10 - Perda de vida do transformador.....	53
Tabela 11 - Valores calculados para o tempo máximo admissível de sobrecarga do Transformador	65
Tabela 12 - Valores calculados para o tempo máximo admissível de sobrecarga do Transformador	67
Tabela 13 - Valores calculados para o carregamento máximo admissível do Transformador ..	69
Tabela 14 - Valores calculados para o carregamento máximo admissível do Transformador ..	70

CAPÍTULO 1

Introdução

Transformadores de potência possuem importante papel na transmissão de energia elétrica e, por isso, são considerados elementos chave de um sistema elétrico de potência.

Ao serem levados em consideração os custos de compra, manutenção e da energia que deixa de ser fornecida quando um grande transformador se encontra fora de operação fica clara a importância de tais equipamentos para o sistema de potência assim como a necessidade da elaboração de uma estratégia que garanta o funcionamento sem falhas destes equipamentos.

A capacidade de transformação instalada nas subestações é dimensionada de forma a atender ao mercado consumidor, ao possível crescimento da demanda e ao carregamento proveniente dos sistemas de transmissão interligados. No entanto, caso ocorra falha ou saída programada para manutenção de alguma unidade transformadora, pode ser necessário que estas operem acima de seus valores nominais; Assim, a aplicação de carga em unidades transformadoras sem o devido planejamento pode acarretar na redução da expectativa de vida útil do transformador ou até mesmo na falha do equipamento. É por este motivo que a avaliação dos limites de carregamento em unidades transformadoras vem sendo objeto de estudo e investigações pelas concessionárias brasileiras desde o início da década de 70. Tais avaliações possuem como objetivo básico a otimização do uso das unidades transformadoras e a consequente redução dos custos de investimentos.

Com relação ao carregamento das unidades transformadoras, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, “Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos” [1], afirma que:

As unidades transformadoras devem ser especificadas para operar desde a sua entrada em operação com:

- a) Carregamento não inferior a 120% da potência nominal por período de até 4 horas do seu ciclo diário de carga para a expectativa de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores. A sobrecarga de até 20% deve ser alcançada para qualquer condição de carregamento do transformador no seu ciclo diário de carga;
- b) Carregamento não inferior a 140% da potência nominal por período de 30 minutos do seu ciclo diário de carga para a expectativa de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores. A sobrecarga de até 40% deve ser alcançada para qualquer condição de carregamento do transformador no seu ciclo diário de carga.

As unidades transformadoras submetidas ao regime de carregamento dos itens (a) e (b) devem ser especificadas para a expectativa de vida de 40 anos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) fornece através da norma NBR 5416/1997, “Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência – Procedimento” [2], os procedimentos para a aplicação de carga em transformadores e autotransformadores de potência, fabricados de acordo com a norma ABNT NBR 5356, “Transformadores de Potência - Especificação” [3], e imersos em líquido isolante, com dois ou mais enrolamentos, trifásicos ou bancos de unidades monofásicas. Os procedimentos a serem seguidos dependem do controle disponível ao usuário e das condições operacionais e se baseiam no envelhecimento do isolamento dos enrolamentos.

O monitoramento em tempo real das condições de um transformador ou da condição de seu isolamento envolve a coleta de dados de tensão e corrente, em conjunto com o monitoramento da temperatura do topo do óleo e estimativa da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, o que determina a taxa de deterioração do papel isolante ao qual é submetido em um processo contínuo de degradação por ação da água, oxigênio e ácidos presentes no óleo isolante [2].

Uma das dificuldades encontradas ao se utilizar um determinado modelo térmico para os transformadores de potência se encontra no estabelecimento de valores representativos para seus parâmetros térmicos, já que, ao serem realizados os cálculos do envelhecimento térmico das unidades transformadoras, observa-se que quando ciclos de carga semelhantes são aplicados a unidades transformadoras do mesmo tipo, os resultados obtidos para o envelhecimento são diferentes devido a diferenças nas características térmicas das unidades.

Em [2] podem ser encontrados valores típicos para os parâmetros térmicos dos transformadores. Embora a utilização destes parâmetros gere resultados satisfatórios em boa parte das aplicações, frequentemente conduzem a resultados conservadores quando comparados às reais possibilidades de carregamento dos transformadores, subestimando-se a capacidade de sobrecarga dos mesmos [4].

1.1. Objetivo

O trabalho aqui proposto tem como objetivo apresentar resultados de simulações do carregamento de transformadores de potência utilizando a modelagem térmica disponível e mostrar como tais resultados podem ser inseridos em um sistema de análise e diagnóstico de equipamentos.

1.2. Visão Geral do Texto

Além do capítulo 1, que constitui a presente introdução, este trabalho está estruturado em cinco outros capítulos.

No capítulo 2 são apresentados alguns conceitos básicos referentes a transformadores de potência e alguns dos diversos modelos existentes na literatura para a modelagem térmica de transformadores de potência.

No capítulo 3 são apresentados, brevemente, os conceitos básicos de algoritmos genéticos e é feita uma breve descrição do algoritmo utilizado na implementação do programa de cálculo de desempenho térmico e perda de vida dos transformadores de potência.

No capítulo 4 são apresentados o programa desenvolvido e suas funcionalidades.

No capítulo 5 são apresentados resultados de um estudo de caso.

No capítulo 6 são discutidas as conclusões do trabalho e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Sobrecarga e Perda de Vida Útil em Transformadores de Potência

Neste capítulo é feito um breve descritivo de alguns conceitos básicos, definidos com apoio nas normas técnicas aplicadas a transformadores de potência. Em seguida são detalhados alguns procedimentos de modelagem térmica disponíveis na literatura para realização dos cálculos das temperaturas do óleo e do enrolamento e avaliação da perda de vida.

2.1. Introdução

Uma das principais grandezas de interesse na operação dos transformadores de potência é a temperatura do ponto mais quente (*hotspot*) do enrolamento, que possui grande influência no envelhecimento da isolação do enrolamento e, conseqüentemente, na vida útil do transformador.

O conhecimento da temperatura do ponto mais quente do enrolamento é vital para a operação dos transformadores, uma vez que um aumento nesta temperatura produz uma aceleração exponencial do envelhecimento do equipamento. Portanto, o monitoramento desta temperatura é essencial para avaliar o desgaste do isolamento e para indicar a possível existência de bolhas de gás no óleo durante condições de emergência causadas por mudanças abruptas de carga.

Neste contexto, a modelagem térmica de transformadores de potência pode ser considerada como um dos aspectos mais importantes para apoio ao monitoramento e controle das condições de operação dos transformadores de potência.

A comparação entre os valores medidos e calculados das temperaturas de operação são uma importante ferramenta para a determinação das condições do equipamento, pois podem indicar possíveis anormalidades.

2.2. O Transformador de Potência

Segundo a norma ABNT NBR 5458/1986, “Transformadores de Potência – Terminologia” [5], transformador de potência em líquido isolante é todo equipamento estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois enrolamentos, sem mudança de frequência, transformando energia elétrica entre partes de um sistema de potência e cuja parte ativa é imersa em líquido isolante. O líquido isolante a ser utilizado deve ser o óleo mineral isolante, cujas características e aplicações são estabelecidas pelo Conselho Nacional de Petróleo – CNP. Já a maior parte da isolação sólida do transformador é constituída de papel e, portanto, de natureza celulósica (papel e papelão Kraft, feitos de fibra de madeira; papel manilha, feito de fibras de madeira e cânhamo; *pressboard*, feito de papelão com fibra de algodão) [6].

2.3. Limites de Elevação de Temperatura do Transformador

De acordo com [3], os transformadores são classificados, de acordo com suas características térmicas de operação, nas seguintes categorias:

- Classe 55°: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55°C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65°C.
- Classe 65°C: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65°C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do

enrolamento, acima da ambiente, não excede 80°C.

A mesma norma prescreve os limites de elevação de temperatura das diversas partes componentes do transformador, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de elevação de temperatura [3]

Tipos de Transformadores		Limites de elevação de temperatura (°C) ^(A)					
		Dos enrolamentos			Do óleo	Das partes metálicas	
		Método da variação da resistência		Do ponto mais quente		Em contato com a isolamento sólida ou adjacente a ela	Não em contato com a isolamento e não adjacente a ela
		Circulação natural do óleo ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido				
Em óleo	Sem conservador ou sem gás inerte acima do óleo	55	60	65	50 ^(B)	Não devem atingir temperaturas superiores à máxima e especificada para o ponto mais quente da isolamento adjacente ou em contato com esta	A temperatura não deve atingir, em nenhum caso, valores que venham a danificar estas partes, outras partes ou materiais adjacentes.
	Com conservador ou sem gás inerte acima do óleo	55 65 ^(D)	60 70 ^(D)	65 80 ^(D)	55 ^(C) 65 ^(D)		

- (A) Os materiais isolantes, de acordo com experiência prática e ensaios, devem ser adequados para o limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado.
- (B) Medida próxima à superfície do óleo
- (C) Medida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte.
- (D) Quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado.

2.4. Expectativa de Vida do Transformador

O sistema de papel isolante é submetido a um processo contínuo de degradação por ação da água, oxigênio e ácidos presentes no óleo isolante. Mantendo-se sob controle a ação destes contaminantes, o envelhecimento da celulose é predominantemente térmico e

cumulativo. Assim, o envelhecimento está baseado na vida esperada do transformador, sob efeito da temperatura de operação da isolação ao longo do tempo.

A deterioração da isolação em função do tempo e da temperatura é fundamentada na Teoria de Arrhenius, que estabelece que o logaritmo da vida da isolação é uma função do inverso da temperatura absoluta [2]:

$$\text{Log Vida(horas)} = A + \frac{B}{T} \quad (1)$$

Em que:

T temperatura absoluta em graus Kelvin ($\theta_e + 273^\circ\text{C}$);

θ_e temperatura do ponto mais quente do enrolamento em $^\circ\text{C}$;

A e B constantes da curva de expectativa de vida do isolamento.

Não existe um critério único para a avaliação do fim da vida útil do transformador. Entretanto, é possível fazer-se uma avaliação da velocidade do envelhecimento adicional a que está sendo submetido o equipamento, comparando a perda de vida com uma taxa de perda de vida média de referência. Através da equação (2) calcula-se a perda de vida, ao longo de um período de tempo Δt (horas), em que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (θ_e) permanece constante [2]:

$$\text{PV}\% = 10^{-\left(\frac{B}{273+\theta_e}+A\right)} \times 100\Delta t \quad (2)$$

Em que:

PV= Perda de vida útil do equipamento;

A= -14,133 (transformadores de 55°C);

A= -13,391 (transformadores de 65°C);

B= 6972,15;

Δt = Intervalo de tempo em horas.

O valor obtido representa a taxa de envelhecimento global a que é submetida a isolamento sólido do transformador, no intervalo de tempo Δt . A Figura 1 mostra o gráfico da equação (2), para as duas classes de temperatura.

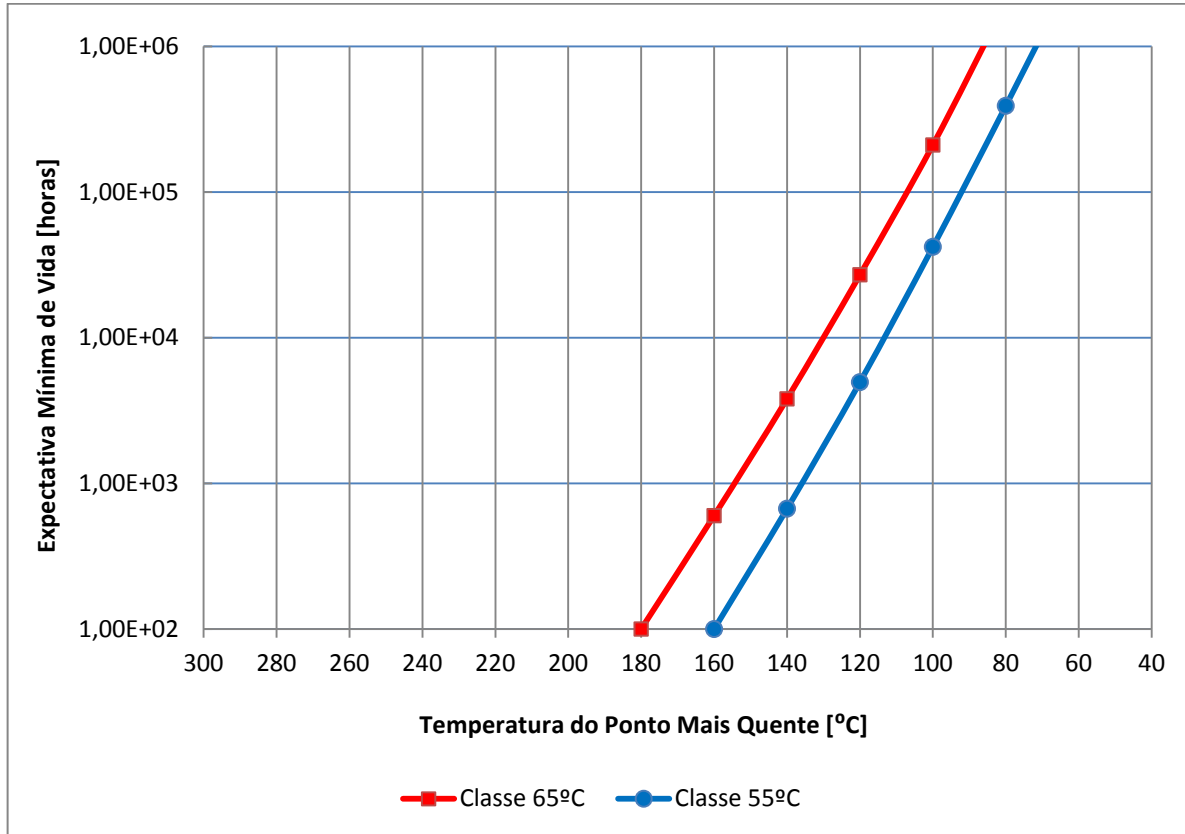


Figura 1 - Curva de expectativa de vida

Deve ser ressaltado que a equação (2), utilizada para realizar o cálculo da perda de vida, somente pode ser aplicada a transformadores cujo óleo esteja dentro das características de óleo novo, segundo [3], em contato com o equipamento.

Devido à filosofia no projeto da conservação do óleo isolante ou má manutenção do óleo, os transformadores que se encontram em operação possibilitam a penetração de contaminantes, como oxigênio e água, que aceleram o processo de envelhecimento.

À medida que os valores de teor de água e índice de neutralização do óleo isolante de um transformador se afastam de seus valores de referência segundo [3], aumenta-se o desvio

com relação à lei de Arrhenius, uma vez que o envelhecimento do isolamento passa a sofrer influência da ação dos agentes contaminantes.

Caso os limites de referência indicados na Tabela 2 não sejam respeitados a expectativa de vida calculada através da equação de Arrhenius servirá, apenas, para uma análise relativa da influência de um determinado carregamento, já que o grau de envelhecimento obtido não será correspondente à idade cronológica do transformador [2].

Tabela 2 - Valores de referência do óleo e do papel isolantes em operação para cálculo da expectativa de vida [2]

Ensaio	Limites
Umidade do papel (% por massa)	<1
Índice de neutralização (MG KOH/g)	<0,1
Teor de O ₂ (ppm)	<3000

2.5. Tipos de Carregamento

A expectativa de vida de transformadores de potência, operando em diversas temperaturas, não é conhecida com precisão, mas a informação da perda de vida da isolação em temperaturas elevadas é a melhor que pode ser obtida, dado o conhecimento atual relacionado a este assunto. Carregamentos acima do nominal podem submeter a isolação a temperaturas acima das nominais. Para fornecer informação sobre o risco associado à operação com temperaturas elevadas, foram definidos diferentes tipos de condições de carregamento. Os limites máximos de temperatura sugeridos por [7] para estas condições de carregamento encontram-se na tabela 3.

- Ciclo de carregamento em condição normal de operação: É aquele no qual, em nenhum momento, é excedida a temperatura do topo do óleo ou a do ponto mais quente do enrolamento para a condição normal mesmo que, em parte do ciclo, seja ultrapassada a potência nominal.

- Ciclo de carregamento, planejado, em condição de operação acima da nominal: Este tipo de carregamento resulta na temperatura do topo do óleo ou do ponto mais quente do enrolamento ultrapassando os valores sugeridos na tabela 3, mas é um tipo de carregamento considerado normal.
- Ciclo de carregamento em condição de emergência de longa duração: Tal carregamento permite que sejam ultrapassados os limites de temperatura, uma vez que são consideradas saídas prolongadas de unidades transformadoras, por desligamento de algum elemento do sistema.
- Ciclo de carregamento em condição de emergência de curta duração: Este tipo de carregamento envolve condições de maior risco, devendo, portanto, ser utilizado apenas em raras ocasiões.

O tempo de operação, nesta condição, deve ser menor do que a constante de tempo térmica do transformador e depende da temperatura em operação antes da contingência, não devendo ser maior que 30 minutos.

Durante este intervalo de tempo, deve-se retornar à condição de carregamento de longa duração; caso contrário, o transformador deve ser desligado, para evitar risco de falha.

Tabela 3 - Limites máximos de temperatura sugeridos para os tipos de carregamento [7]

	Operação Normal	Operação Planejada Acima da Nominal	Emergência de Longa Duração	Emergência de Curta Duração
Temperatura do ponto mais quente (°C)	120	130	140	180
Temperatura do topo do óleo (°C)	105	110	110	110

2.6. Modelagem Térmica de Transformadores de Potência

2.6.1. Modelagem Térmica da ABNT

Em [2] são propostos dois procedimentos para a aplicação de carga em transformadores e autotransformadores de potência:

- Procedimento 1: Fornece as condições para aplicação de cargas em transformadores com dois ou mais enrolamentos e com potências nominais trifásicas de até 100MVA. Este procedimento deve ser adotado quando não existem disponíveis dados de manutenção e operativos.
- Procedimento 2: Fornece as condições para aplicação de cargas em transformadores, com dois ou mais enrolamentos e sem limitação de potência. Este procedimento deve ser adotado quando o usuário possui o controle das condições operacionais das unidades transformadoras.

Neste trabalho, o procedimento adotado para a aplicação de carga nas unidades transformadores será o Procedimento 2 e serão considerados apenas transformadores de dois enrolamentos e autotransformadores sem terciário.

A aplicação deste modelo pressupõe o conhecimento das temperaturas dos enrolamentos e do óleo, em tempo real. Para isto são necessários:

- Controle da carga em tempo real;
- Comando da carga à distância,
- Leitura remota da temperatura,
- Sistema de medição de temperatura de alta precisão.

Para o cálculo das capacidades de carga dos transformadores de dois enrolamentos devem ser utilizadas as equações básicas de (4) a (18), cuja lista de símbolos é apresentada a seguir. Salvo indicação diferente, todas as temperaturas são em graus Celsius e todos os tempos expressos em horas. A modelagem térmica para transformadores de três enrolamentos e autotransformadores com terciário pode ser encontrada em [2].

θ_a é a temperatura ambiente

θ_o é a temperatura do topo do óleo

θ_e é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento

$\Delta\theta_e$ é a elevação de temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo

$\Delta\theta_{ea}$ é o $\Delta\theta_e$ durante o aquecimento

$\Delta\theta_{er}$ é o $\Delta\theta_e$ durante o resfriamento

$\Delta\theta_{en}$ é a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, sobre a temperatura do topo do óleo, obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento sob carga nominal, em relação à do topo do óleo acrescida de 10°C (15°C) para transformadores de 55°C (65°C)

$\Delta\theta_o$ é a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente

$\Delta\theta_{oa}$ é o $\Delta\theta_o$ durante o aquecimento

$\Delta\theta_{or}$ é o $\Delta\theta_o$ durante o resfriamento

$\Delta\theta_{on}$ é a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob carga nominal

$\Delta\theta_{oi}$ é a elevação inicial de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para $t=0$

- $\Delta\theta_{of}$ é a elevação final de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para a carga de ponta (S_p)
- $\Delta\theta_{ei}$ é a elevação inicial do ponto mais quente sobre o topo do óleo para $t=0$
- $\Delta\theta_{ef}$ é a elevação final do ponto mais quente sobre o topo do óleo para a carga de ponta (S_p)
- $\Delta\theta_{om}$ é a máxima elevação do topo do óleo sobre o ambiente durante o carregamento
- $\Delta\theta_{em}$ é a máxima elevação do ponto mais quente sobre o topo do óleo durante o carregamento
- K_i é a razão entre a carga inicial (S_i) e a carga nominal (S_n)
- K_p é a razão entre a carga de ponta (S_p) e a carga nominal (S_n)
- S_i é a carga inicial ou carga básica
- S_n é a carga nominal
- S_p é a carga da ponta
- R é a relação entre as perdas em carga sob carga nominal e a perda em vazio
- e é igual a 2,71828 (base do logaritmo natural)
- t é o tempo
- t_p é o tempo de duração da ponta
- Δt é o intervalo de tempo genérico
- P_n é a perda total sob carga nominal
- ΔP é a variação da perda total devido à variação da carga
- T_o é a constante de tempo térmica do transformador para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura entre a elevação final e a inicial do topo do óleo, conforme a equação:

$$T_o = C \left(\frac{\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi}}{\Delta P} \right) \quad (3)$$

- T_e é a constante de tempo térmica do ponto mais quente
- T_n é a constante de tempo térmica para a carga nominal, começando com a elevação inicial do topo do óleo de 0°C sobre o ambiente
- PV é a perda de vida
- C é a capacidade térmica do transformador, em Joules por Kelvin
- n é o expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo, que depende do método de resfriamento em funcionamento.
- m é o expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do método de resfriamento em funcionamento.

O método de cálculo que será mostrado a seguir exige a divisão do período em exame em intervalos de pequena duração e o cálculo da temperatura do ponto mais quente, ao fim de cada um desses intervalos. A temperatura do ponto mais quente do enrolamento é suposta constante, ao longo de cada intervalo, e igual ao seu valor final.

Quanto maior for o número de intervalos em que o ciclo de carga for dividido, mais preciso será o cálculo da temperatura do ponto mais quente. Intervalos mais longos levam, normalmente, a resultados mais conservadores.

Em [2] podem ser encontradas tabelas que fornecem o carregamento admissível para cada ciclo de 24h, de acordo com as características do transformador, a carga inicial, a temperatura ambiente e a duração da ponta de carga.

Elevação de temperatura durante o aquecimento:

- Do óleo:

$$\Delta\theta_{oa} = (\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi}) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_o}}\right) + \Delta\theta_{oi} \quad (4)$$

- Do enrolamento:

$$\Delta\theta_{ea} = (\Delta\theta_{ef} - \Delta\theta_{ei}) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_e}}\right) + \Delta\theta_{ei} \quad (5)$$

Elevação de temperatura durante o resfriamento:

- Do óleo:

$$\Delta\theta_{or} = (\Delta\theta_{om} - \Delta\theta_{oi}) e^{\frac{-t'}{T_o}} + \Delta\theta_{oi} \quad (6)$$

- Do enrolamento:

$$\Delta\theta_{er} = (\Delta\theta_{em} - \Delta\theta_{ei}) e^{\frac{-t'}{T_e}} + \Delta\theta_{ei} \quad (7)$$

Em que: $t'=t-t_p$

$$\Delta\theta_{of} = \Delta\theta_{on} \left(\frac{K_p^2 R + 1}{R + 1}\right)^n \quad (8)$$

$$\Delta\theta_{oi} = \Delta\theta_{on} \left(\frac{K_i^2 R + 1}{R + 1}\right)^n \quad (9)$$

$$\Delta\theta_{ef} = \Delta\theta_{en} (K_p^2)^m \quad (10)$$

$$\Delta\theta_{ei} = \Delta\theta_{en} (K_i^2)^m \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{om} = \Delta\theta_{oa} \quad \text{para } t=t_p \quad (12)$$

$$\Delta\theta_{em} = \Delta\theta_{ea} \quad \text{para } t=t_p \quad (13)$$

$$K_p = \frac{S_p}{S_n} \quad (14)$$

$$K_i = \frac{S_i}{S_n} \quad (15)$$

$$T_o = T_n \quad \text{em que } T_o = C \frac{\Delta\theta_{on}}{P_n} \quad (16)$$

Em que, para transformadores com fluxo de óleo não dirigido: C é igual a 0,132x(massa do núcleo e das bobinas, em quilogramas)+0,088x(massa do tanque e dos acessórios, em quilogramas)+0,351x(litros de óleo); e para transformadores com fluxo de óleo dirigido: C é igual a 0,132x(massa do núcleo e das bobinas, em quilogramas)+0,132x(massa do tanque e dos acessórios, em quilogramas)+0,510x(litros de óleo).

As temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente são calculadas, respectivamente, por:

$$\theta_o = \Delta\theta_o + \theta_a \quad (17)$$

$$\theta_e = \Delta\theta_e + \theta_o \quad (18)$$

As principais características que mais influenciam no cálculo da perda de vida do equipamento por envelhecimento térmico são, por ordem de prioridade, as seguintes:

$\Delta\theta_{en}$ = elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, sobre a temperatura do topo do óleo, obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento, sob carga nominal em relação à do topo do óleo, acrescida de 10°C (15°C) para transformadores de 55°C (65°C).

$\Delta\theta_{on}$ = elevação da temperatura no topo do óleo sob carga nominal em relação à ambiente

T_o = constante de tempo térmica do transformador, para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura entre a elevação final e a inicial do topo do óleo

T_e = constante de tempo térmica do ponto mais quente

- R = relação entre as perdas em carga, sob carga nominal, e a perda em vazio
- n = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo, que depende do método de resfriamento em funcionamento
- m = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do método de resfriamento em funcionamento

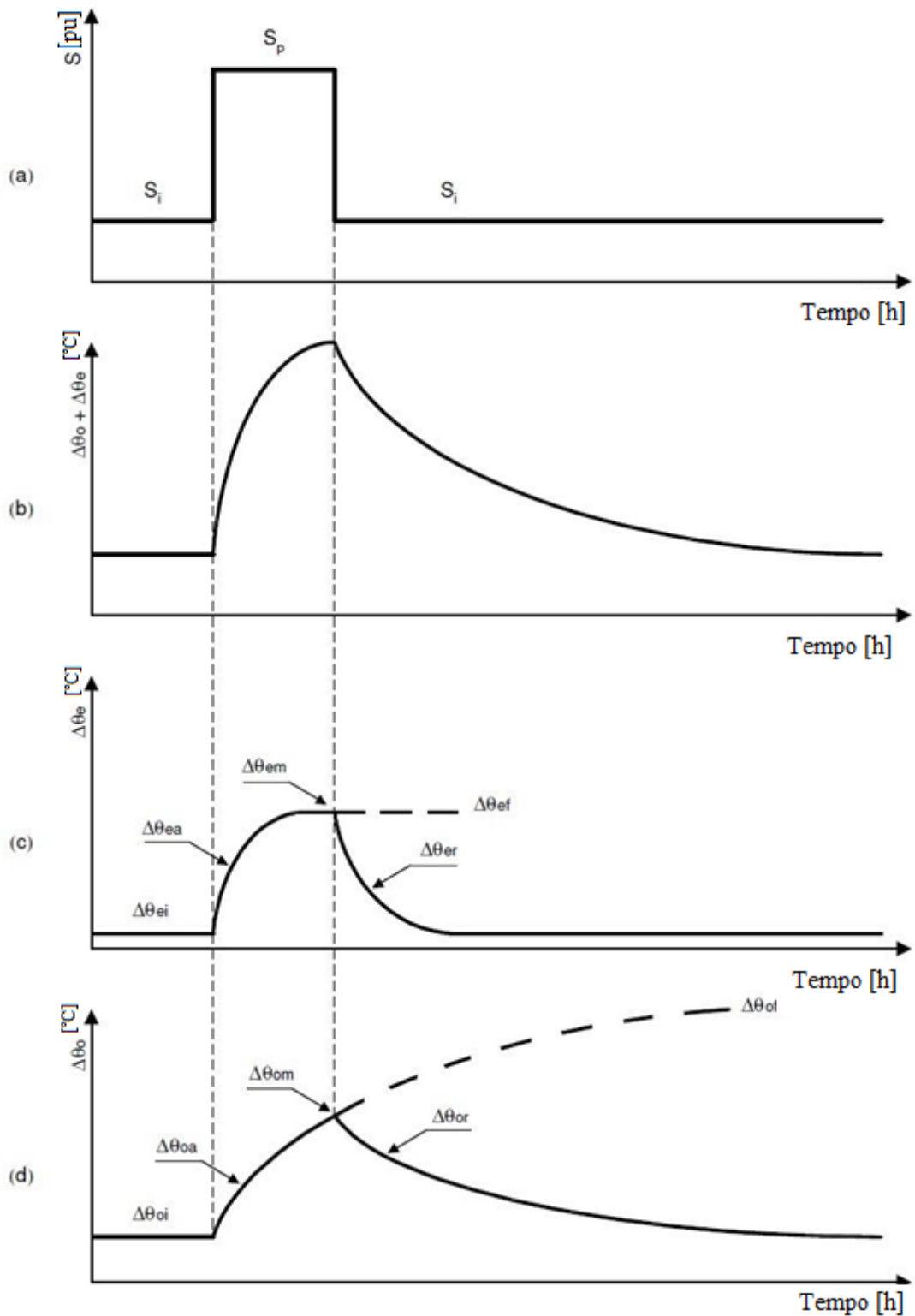
Alguns valores típicos para as características acima podem ser observados na tabela 4, tal como previstos na norma.

Tabela 4 - Características dos transformadores de 65°C e 55°C sob carga nominal [2]

Parâmetro	Método de Resfriamento									
	Classe 65°C					Classe 55°C				
	ONAN	ONAF ≤133%	ONAF >133%	OFAF ou OFW	ODAF ou ODWF	ONAN	ONAF ≤133%	ONAF >133%	OFAF ou OFW	ODAF ou ODWF
$\Delta\theta_{en}$	25	20	35	35	35	25	25	28	28	28
$\Delta\theta_{on}$	55	60	45	45	45	40	40	37	37	37
T_o	3,0	2,0	1,25	1,25	1,25	2,7	1,7	1,25	1,25	1,25
T_e	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
R	3,2	4,5	6,5	6,5	6,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
M	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0
N	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0

- Notas: (1) elevações de temperatura dadas em °C;
 (2) constantes de tempo dadas em horas;
 (3) m= expoente da elevação de temperatura do enrolamento em função das perdas no cobre
 (4) n= expoente da elevação de temperatura do topo do óleo em função das perdas totais.

A figura 2 facilita o entendimento das equações mostradas. A partir da figura, é possível observar como as temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento crescem e decrescem exponencialmente com a aplicação de um ciclo de carga ao transformador.



- (a) ciclo genérico com dois níveis de carga;
 (b) elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre o ambiente;
 (c) elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo;
 (d) elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente

Figura 2 - Ciclo genérico com dois níveis de carga e temperaturas resultantes [2]

2.6.2. Modelagem Térmica ANSI

O *American National Standards Institute* (ANSI) fornece recomendações gerais para o carregamento de unidades transformadores de potência imersas em óleo mineral, através da norma IEEE Std. C57.91-1995 [7].

Neste item será apresentado o método fornecido por [7] para o cálculo das temperaturas do óleo e enrolamento para alterações de carga. Este método é simplificado e não exige processos iterativos.

Um método alternativo, que exige rotinas computacionais de cálculo pode ser encontrado no anexo G de [7].

A seguir serão apresentadas as equações básicas para o cálculo das temperaturas e sua lista de símbolos.

- C é a capacidade térmica do transformador em Watt-horas/°C
- e é igual a 2,71828 (base do logaritmo natural)
- I_R é a corrente nominal
- K é a relação entre a carga L e a carga nominal, em pu
- L é a carga que está sendo considerada, em KVA ou A
- m é um expoente derivado empiricamente utilizado para calcular a variação da elevação da temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo com variações na carga. O valor de m foi selecionado para cada tipo de sistema de resfriamento
- n é um expoente derivado empiricamente utilizado para calcular a variação da elevação da temperatura do óleo com variações na carga. O valor de n foi selecionado para cada tipo de sistema de resfriamento
- $P_{T,R}$ é a perda total em carga sob carga nominal, em watts

- R é a relação entre as perdas sob carga nominal e as perdas a vazio
- t é o tempo de duração da carga, horas
- θ é a temperatura, °C
- θ_A é a temperatura ambiente média durante o ciclo de carga estudado, °C
- $\theta_{A,R}$ é a temperatura ambiente média sob carga nominal, °C
- θ_H é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, °C
- $\theta_{H,R}$ é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, °C
- $\theta_{H,U}$ é a temperatura final do ponto mais quente do enrolamento para carga L, °C
- θ_{TO} é a temperatura do topo do óleo, °C
- $\Delta\theta_H$ é a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do óleo
- $\Delta\theta_{H,i}$ é a elevação inicial da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do óleo para $t=0$, °C
- $\Delta\theta_{H,R}$ é a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do óleo, sob carga nominal, °C
- $\Delta\theta_{H,U}$ é a elevação de temperatura final do ponto mais quente do enrolamento sobre o óleo para carga L, °C
- $\Delta\theta_{H/A,R}$ é a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura ambiente, sob carga nominal, °C
- $\Delta\theta_{TO}$ é a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente, °C
- $\Delta\theta_{TO,R}$ é a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob carga nominal, °C
- $\Delta\theta_{TO,i}$ é a elevação inicial da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para $t=0$, °C

$\Delta\theta_{TO,U}$ é a elevação final da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para carga L, °C

τ_{TO} é a constante de tempo do óleo para qualquer carga L e para qualquer diferença de temperatura entre elevação final da temperatura do topo do óleo e a elevação inicial da temperatura do topo do óleo.

$\tau_{TO,R}$ é a constante de tempo para carga nominal iniciando com a elevação inicial da temperatura do topo do óleo igual a 0°C, horas

τ_W é a constante de tempo do ponto mais quente do enrolamento, horas

Assume-se que a temperatura do ponto mais quente consiste de três componentes, de acordo com a seguinte equação:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad (19)$$

A temperatura do topo do óleo é dada por:

$$\theta_{TO} = \theta_A + \Delta\theta_{TO} \quad (20)$$

No cálculo das temperaturas assume-se que a temperatura ambiente é constante.

- Elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,i}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{TO}}}\right) + \Delta\theta_{TO,i} \quad (21)$$

$$\Delta\theta_{TO,i} = \Delta\theta_{TO,R} \left(\frac{K_t^2 R + 1}{R + 1}\right)^n \quad (22)$$

$$\Delta\theta_{TO,U} = \Delta\theta_{TO,R} \left(\frac{K_u^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \quad (23)$$

A capacidade térmica para os tipos de resfriamento AO e FA é dada de acordo com a seguinte equação: $C=0,0272$ (massa do núcleo e das bobinas, em quilogramas) + $0,01814$ (massa do tanque e dos acessórios, em quilogramas) + $5,034$ (litros de óleo); e para transformadores com fluxo de óleo forçado dirigido ou não dirigido: $C=0,0272$ (massa do núcleo e das bobinas, em quilogramas) + $0,0272$ (massa do tanque e dos acessórios, em quilogramas) + $7,305$ (litros de óleo).

Para o cálculo da constante de tempo, a massa do tanque e dos acessórios a ser utilizada é somente a das porções que se encontram em contato com o óleo aquecido.

A constante de tempo do topo do óleo sob carga nominal (KVA) é dada por:

$$\tau_{TO,R} = \frac{C\Delta\theta_{TO,R}}{P_{T,R}} \quad (24)$$

A constante de tempo do topo do óleo é:

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \frac{\left(\frac{\Delta\theta_{TO,U}}{\Delta\theta_{TO,R}} \right) - \left(\frac{\Delta\theta_{TO,i}}{\Delta\theta_{TO,R}} \right)}{\left(\frac{\Delta\theta_{TO,U}}{\Delta\theta_{TO,R}} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{\Delta\theta_{TO,i}}{\Delta\theta_{TO,R}} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (25)$$

Na derivação da equação (21) assumiu-se que a elevação da temperatura do topo do óleo é diretamente proporcional à perda de calor q , ou, na forma de equação:

$$\Delta\theta_{TO} = kq^n \quad (26)$$

Em que:

$$n=1.0$$

Se o expoente n for igual a 1.0 a constante de tempo dada pela equação (24) e a equação exponencial (21) estão corretas. Caso n seja menor que 1.0, a equação está incorreta e a equação de tempo deve ser modificada de acordo com a equação (25) para diferentes ciclos de sobrecarga.

- Elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento:

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,U} - \Delta\theta_{H,i}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_w}}\right) + \Delta\theta_{H,i} \quad (27)$$

$$\Delta\theta_{H,i} = \Delta\theta_{H,R} K_i^{2m} \quad (28)$$

$$\Delta\theta_{H,U} = \Delta\theta_{H,R} K_u^{2m} \quad (29)$$

$$\Delta\theta_{H,R} = \Delta\theta_{H/A,R} - \Delta\theta_{TO,R} \quad (30)$$

O valor da elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura ambiente, $\Delta\theta_{H/A,R}$, é obtido da seguinte maneira e ordem de preferência:

- Utilizando medidores
- Valor calculado fornecido pelo fabricante do transformador
- Considerar $\Delta\theta_{H/A,R} = 80^\circ\text{C}$ para classe de 65°C e 65°C para classe de 55°C

O valor da elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente, $\Delta\theta_{TO,R}$, é determinado por:

- Teste realizado de acordo com a norma IEEE Std. C57.12.90-1993

- Valor calculado fornecido pelo fabricante do transformador.

A constante de tempo do enrolamento é o tempo que a elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre o óleo leva para alcançar 63.2% da diferença entre a elevação final e a inicial durante mudança de carga. Esta constante de tempo pode ser estimada a partir da curva da resistência de resfriamento durante ensaios térmicos ou calculada pelo fabricante utilizando a massa dos materiais condutores. A constante de tempo do enrolamento varia com a viscosidade do óleo e com o expoente m [7].

2.6.3. Modelo IEEE/ANSI Melhorado

Em *An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in An Online Monitoring and Diagnostic System* [8], é proposta uma modificação do modelo IEEE/ANSI para o cálculo da elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente, que prevê com maior precisão a temperatura do topo do óleo e pode ser implementado em um sistema de monitoramento online.

A variação da temperatura em função do tempo é modelada como uma resposta exponencial de primeira ordem desde a temperatura do estado inicial até a temperatura do estado final, de acordo com a equação (21).

A equação (21) é a solução da equação diferencial de primeira ordem:

$$\tau_{TO} \frac{d\Delta\theta_{TO}}{dt} = \Delta\theta_{TO,u} - \Delta\theta_{TO} \quad , \quad \Delta\theta_{TO}(0) = \Delta\theta_{TO,i} \quad (31)$$

No modelo IEEE/ANSI, a elevação final da temperatura depende do carregamento e é aproximada pela equação (23).

É possível obter uma forma discreta no tempo para as equações (31) e (23) do modelo IEEE/ANSI utilizando a aproximação de Euler para a derivada em função do tempo:

$$\frac{d\Delta\theta_{TO}[j]}{dt} \approx \frac{(\Delta\theta_{TO}[j]-\Delta\theta_{TO}[j-1])}{\Delta t} \quad (32)$$

Uma equação diferencial correspondente é derivada:

$$\Delta\theta_{TO}[j] = \frac{\tau_{TO}}{\tau_{TO}+\Delta t} \Delta\theta_{TO}[j-1] + \frac{\Delta t \Delta\theta_{TO,R}}{\tau_{TO}+\Delta t} \left(\frac{K[j]^2 R+1}{R+1} \right)^n \quad (33)$$

Quando a corrente de carga possuir valor próximo ao nominal, ou, mais precisamente, quando $R>1$ e $K^2R>1$, as seguintes aproximações contínua e discreta podem ser empregadas, respectivamente:

$$\Delta\theta_{TO,u}(t) = \Delta\theta_{TO,R} K(t)^{2n} \quad (34)$$

$$\Delta\theta_{TO,u}[j] = \Delta\theta_{TO,R} K(j)^{2n} \quad (35)$$

Isto resulta no Modelo A.

- Modelo A: Este modelo consiste em uma aproximação do modelo IEEE/ANSI para a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente:

$$\Delta\theta_o[j] = \frac{\tau_{TO}}{\tau_{TO}+\Delta t} \Delta\theta_o[j-1] + \frac{\Delta t \Delta\theta_{TO,R}}{\tau_{TO}+\Delta t} \left(\frac{I[j]}{I_{nominal}} \right)^{2n} \quad (36)$$

Este modelo é utilizado no sistema de monitoramento do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [8] e possui a vantagem de que os parâmetros τ_{TO} e $\Delta\theta_{TO,R}$ podem ser estimados a partir de dados medidos e utilizando o método dos mínimos quadrados já que os dois parâmetros aparecem de forma linear no modelo.

- Modelo B: Modelo IEEE/ANSI para a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura com o expoente n=1

$$\Delta\theta_o[j] = \frac{\tau_{TO}}{\tau_{TO} + \Delta t} \Delta\theta_o[j - 1] + \frac{\Delta t \Delta\theta_{TO,R} R}{(\tau_{TO} + \Delta t)(R+1)} \left(\frac{I[j]}{I_{nominal}} \right)^2 + \frac{\Delta t \Delta\theta_{TO,R}}{(\tau_{TO} + \Delta t)(R+1)} \quad (37)$$

Neste modelo os parâmetros τ_{TO} , $\Delta\theta_{TO,R}$ e R também podem ser estimados através do método dos mínimos quadrados.

No modelo modificado proposto por [8] são incorporadas variações da temperatura ambiente, conforme mostrado a seguir.

$$\tau_{TO} \frac{d\theta_{topo}}{dt} = -\theta_{topo} + \theta_{amb} + \theta_u \quad (40)$$

Seguindo o mesmo raciocínio mostrado anteriormente obtém-se o modelo discreto de primeira ordem correspondente, o Modelo C.

- Modelo C: Modelo modificado que incorpora variações da temperatura ambiente.

$$\Delta\theta_{topo}[k] = \frac{\tau_{TO}}{\tau_{TO}+\Delta t}\Delta\theta_{topo}[k-1] + \frac{\Delta t}{\tau_{TO}+\Delta t}\theta_{amb}[k] + \frac{\Delta t\Delta\theta_{TO,R}}{(\tau_{TO}+\Delta t)(R+1)}\left(\frac{I[k]}{I_{nominal}}\right)^2 + \frac{\Delta t\Delta\theta_{TO,R}}{(\tau_{TO}+\Delta t)(R+1)} \quad (41)$$

2.6.4. Modelo ABNT Adaptado

Em [9] é possível observar uma adaptação do modelo térmico proposto em [2], que incorpora variações da temperatura ambiente.

O modelo adaptado e sua lista de símbolos são mostrados a seguir.

- j =1 até o número de pontos aquisitados;
- e é igual a 2,71828 (base do logaritmo natural)
- $\theta_o(j)$ é a temperatura do topo do óleo medida no instante de tempo j [°C]
- $\theta_o(j-1)$ é a temperatura do topo do óleo medida no instante de tempo $j-1$ [°C]
- $\theta_e(j)$ é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento medida no instante de tempo j [°C]
- $\theta_e(j-1)$ é a temperatura ponto mais quente do enrolamento medida no instante de tempo $j-1$ [°C]
- $\theta_a(j)$ é a temperatura ambiente medida no instante de tempo j [°C]
- $\theta_a(j-1)$ é a temperatura ambiente medida no instante de tempo $j-1$ [°C]
- $S(j-1)$ carregamento do transformador medido no instante $j-1$ [MVA]
- S_{nom} potência nominal do transformador
- Δt intervalo de tempo entre aquisições sucessivas [minutos]
- $\Delta\theta_{on}$ elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob carregamento nominal [°C]

- τ_o constante de tempo térmica do transformador, para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura, entre a elevação final e a inicial do topo do óleo [minutos]
- R relação entre as perdas sob carga nominal e a perda em vazio
- n expoente utilizado para o cálculo da elevação de temperatura
- $\Delta\theta_{en}$ elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo sob carregamento nominal [°C]
- τ_e constante de tempo térmica do enrolamento [minutos]

$$\theta_o(j) = [\delta_o - \theta_o(j-1) + \theta_a(j-1)] \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\tau_o}}\right) + \theta_o(j-1) - \theta_a(j-1) + \theta_a(j) \quad (42)$$

$$\delta_o = \Delta\theta_{on} \left[\frac{RK(j-1)^2 + 1}{R+1} \right]^n \quad (43)$$

$$\theta_e(j) = [\delta_e - \theta_e(j-1) + \theta_o(j-1)] \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\tau_e}}\right) + \theta_e(j-1) - \theta_o(j-1) + \theta_o(j) \quad (44)$$

$$\delta_e = \Delta\theta_{en} K(j-1)^{2n} \quad (45)$$

$$K(j-1) = \frac{S(j-1)}{S_{nom}} \quad (46)$$

CAPÍTULO 3

Algoritmos Genéticos

Neste capítulo será feita uma breve introdução à teoria dos algoritmos genéticos, visando uma melhor compreensão da técnica proposta neste trabalho como alternativa para a obtenção dos parâmetros térmicos do transformador de potência.

Optou-se pela escolha desta técnica pelo fatos dos algoritmos genéticos serem extremamente simples, de fácil implementação e eficientes.

3.1. Introdução

A história dos algoritmos genéticos teve início na década de 1940, quando cientistas utilizaram a natureza como inspiração para criar o ramo da inteligência artificial.

Os algoritmos genéticos foram inventados em 1960 por John Holland, que estudou a evolução das espécies e propôs um modelo heurístico computacional que ofereceria boas soluções para problemas difíceis de serem resolvidos computacionalmente na época.

3.2. Algoritmos Evolucionários

Algoritmos evolucionários são algoritmos que fazem uso de modelos computacionais dos processos naturais de evolução para resolver problemas.

Estes algoritmos funcionam mantendo uma população de estruturas que evoluem de forma semelhante à evolução das espécies. A estas estruturas são aplicados os chamados operadores genéticos, como recombinação e mutação, entre outros. Cada indivíduo recebe uma avaliação, que é uma quantificação da sua qualidade como solução do problema em questão, e baseado nesta avaliação os operadores genéticos são aplicados, de forma a simular a sobrevivência do mais apto [10].

A seguir é mostrado um algoritmo que resume o comportamento básico dos algoritmos evolucionários. Tal comportamento consiste em buscar dentro da população atual as soluções que possuem as melhores características e tentar combinar estas soluções de forma a gerar soluções ainda melhores.

```
t:=0 //Inicializa-se o contador de tempo
Inicializa_População P(0) //A população é iniciada aleatoriamente
Enquanto não terminar faça //Condição de término
    Avalie_População P(t) //Avalia a população neste instante
    P':=Selecione_Pais P(t) //Seleciona-se sub-população que irá
    gerar nova geração
    P':=Recombinação_e_mutação P' //Os operadores genéticos são aplicados
    Avalie_População P(t) //Avalia a nova população
    P(t+1)= Seleccione_sobreviventes P(t),P' // Seleciona sobreviventes desta geração
    t:=t+1
Fim enquanto
```

Após a análise do algoritmo apresentado acima é possível observar que os algoritmos evolucionários são extremamente dependentes de fatores estocásticos, tanto na fase de inicialização da população quanto na fase da evolução. Isto faz com que os resultados obtidos através do uso de tais algoritmos sejam raramente reproduzidos com perfeição. Além disso, os algoritmos evolucionários são heurísticas¹ que não asseguram a obtenção do melhor resultado possível em todas as suas execuções [10].

Recomenda-se a utilização de algoritmos evolucionários para a resolução de problemas que possuam algoritmos muito lentos ou que não sejam capazes de encontrar uma solução.

¹ Heurísticas são algoritmos polinomiais que não possuem garantia nenhuma sobre a qualidade da solução encontrada, mas que frequentemente tendem a encontrar a solução ótima ou ficar bem próximos dela.

3.3. Algoritmos Genéticos

Algoritmos genéticos (do inglês, GAs) são algoritmos de busca inspirados nos mecanismos de seleção natural e genética.

Em GAs um cromossomo é uma estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções do espaço de busca do problema. Os cromossomos são então submetidos a um processo evolucionário [11]. Este processo envolve avaliação, seleção, *crossover* e mutação, de forma que após várias gerações deverá ser formada uma nova população composta pelos indivíduos mais aptos.

Como os GAs são baseados na genética e na teoria da evolução muitas vezes são utilizados termos vindos da biologia para explicar a dinâmica de tais algoritmos. A Tabela 5 apresenta uma analogia entre tais termos e os termos utilizados nos GAs.

Tabela 5 - Analogia entre os termos utilizados na área genética e os utilizados pelos algoritmos genéticos

Linguagem da ciência natural	GAs
Cromossomo	Indivíduo, <i>string</i> , Cromossomo
Gene	Característica
Alelo	Valor
Locus	Posição
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Conjunto de Parâmetros

Os algoritmos genéticos podem ser caracterizados através dos seguintes componentes [12]:

- Problema a ser otimizado;
- Representação das Soluções do Problema;
- Decodificação do Cromossomo;
- Avaliação;
- Seleção;
- Operadores Genéticos;

- Inicialização da População.

3.4. O GA Mais Básico

3.4.1. Esquema de um GA

O esquema de um algoritmo genético pode ser resumido através dos seguintes passos:

- a. Inicializar a população de cromossomos;
- b. Avaliar cada cromossomo na população;
- c. Selecionar os pais para gerar novos cromossomos;
- d. Aplicar os operadores de recombinação e mutação a estes pais de forma a gerar os indivíduos da nova geração;
- e. Apagar os velhos membros da população;
- f. Avaliar todos os novos cromossomos e inseri-los na população;
- g. Caso o tempo tenha se esgotado ou o melhor cromossomo satisfizer os requerimentos e desempenho, retorne-o, caso contrário , deve-se retornar para o passo c.

3.4.2. Representação Cromossomial

A representação do cromossomo depende do tipo de problema e do que se deseja manipular geneticamente. Os principais tipos de representação estão mostrados na tabela 6.

A representação cromossomial é completamente arbitrária, mas recomenda-se que algumas regras gerais sejam seguidas:

- Deve-se utilizar a representação mais simples possível;
- Não representar, de preferência, soluções proibidas ao problema (caso estas existam);

- Caso o problema imponha condições de algum tipo estas condições devem estar implícitas dentro da representação.

Tabela 6- Tipos de representação de cromossomos

Representação	Problemas
Binária	Numéricos, Inteiros
Números Reais	Numéricos
Permutação de Símbolos	Baseados em Ordem
Símbolos Repetidos	Grupamento

A representação binária é a mais simples e mais utilizada, pois é fácil manipular cromossomos utilizando essa representação; é fácil de ser transformada em inteiro ou real; e facilita a prova de alguns teoremas. Contudo, a representação por números reais oferece melhor desempenho [11].

3.4.3. Escolha da População Inicial

A inicialização da população é feita fazendo-se uma escolha aleatória independente para cada indivíduo da população inicial. Isso é feito porque a inicialização aleatória, de forma geral, gera uma boa distribuição das soluções no espaço de busca e o uso do operador de mutação de forma eficaz garante uma boa exploração de todo o espaço de busca.

3.4.4. Função de Avaliação

A avaliação é feita através de uma função que melhor representa o problema e tem por objetivo fornecer uma medida da aptidão de cada indivíduo na população corrente. Esta função deve refletir os objetivos a serem alcançados na resolução de um problema.

A função de avaliação, também chamada de função de custo, calcula um valor numérico que reflete quão bem os parâmetros representados no cromossomo resolvem o problema [10].

3.4.5. Seleção de Pais

O método de seleção de pais deve tentar simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies, ou seja, pais mais capazes geram mais filhos. Porém, pais menos capazes também geram descendentes. Logo, os indivíduos com função de avaliação mais alta devem ser privilegiados, sem que os que possuem função de avaliação baixa sejam desprezados. Deste modo evita-se a convergência genética.

3.4.6. Operador de Cruzamento (*Crossover*)

O operador de *crossover* mais simples é o chamado operador de *crossover* de um ponto. Este operador recebe este nome, pois apenas um ponto de corte é sorteado.

Um ponto de corte constitui uma posição entre dois genes de um cromossomo. Cada indivíduo de n genes possui $n-1$ pontos de corte, conforme mostrado na figura 3.

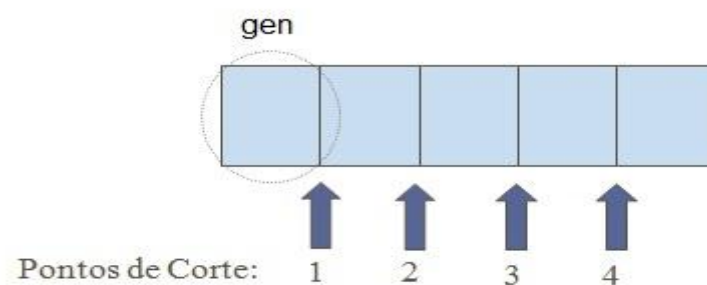


Figura 3 - Pontos de crossover para um cromossomo composto por 5 genes [10]

Uma vez feita a seleção de dois pais, um ponto de corte é selecionado e os pais são separados em duas partes: uma à esquerda do ponto de corte e outra à direita.

O primeiro filho é formado concatenando-se a parte do primeiro pai que se encontra à esquerda do ponto de corte com a parte do segundo pai que está à direita do ponto de corte. O segundo filho é formado a partir da concatenação das partes restantes. Um exemplo desse processo pode ser observado na figura 4.

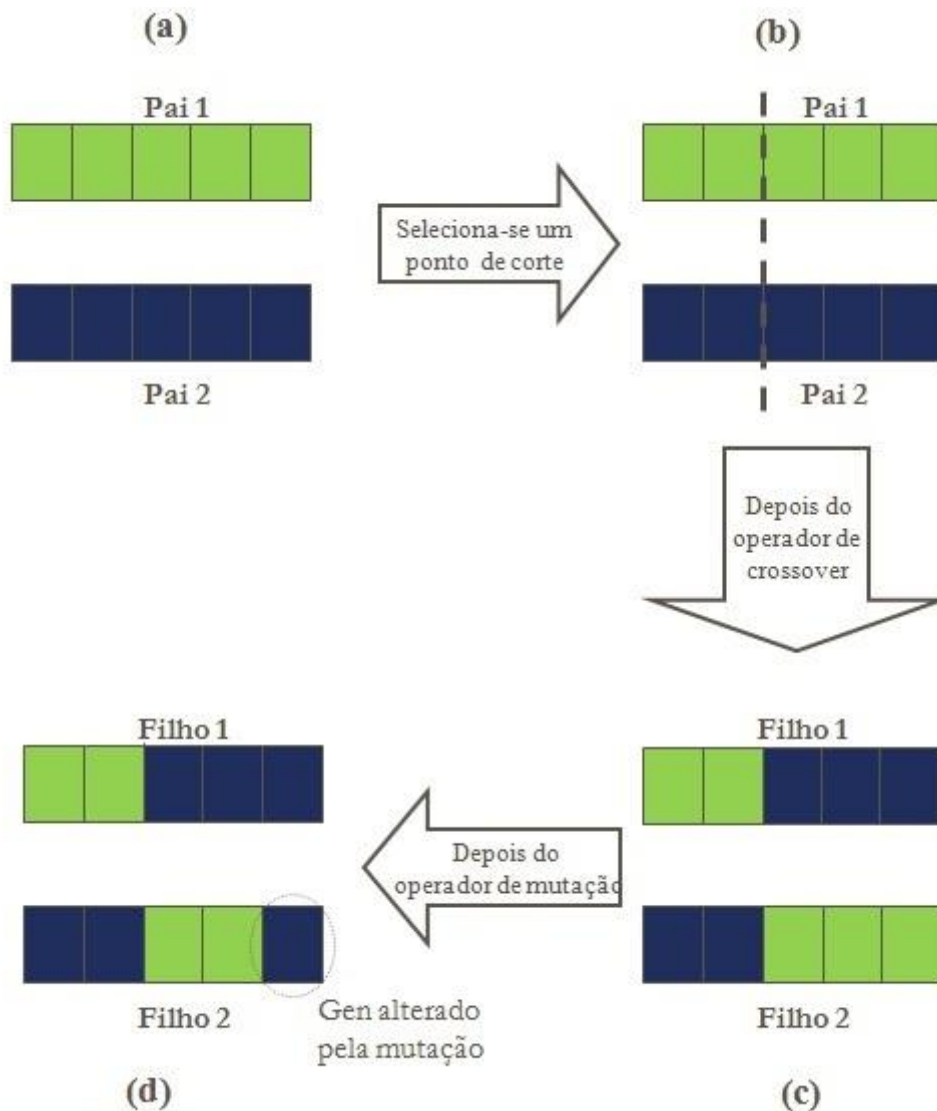


Figura 4 - Descrição da operação do operador de crossover de um ponto e mutação [10]

3.4.7. Operador de Mutação

O operador mutação age após terem sido criados os filhos. Este operador possui uma probabilidade associada da ordem de 0,5%.

Um número entre 0 e 1 é sorteado e caso este número seja menor que a probabilidade predeterminada o operador atua sobre o gene em questão, alterando seu valor de forma aleatória. Este processo é repetido para todos os genes componentes dos filhos.

O valor desta probabilidade deve ser muito baixo, para evitar que a solução seja determinada de forma aleatória.

3.5. Algoritmo para Calcular Parâmetros Térmicos do Transformador

Nesta seção será feita uma breve explicação do algoritmo proposto neste trabalho como alternativa para a obtenção dos parâmetros térmicos do transformador. Deve ser ressaltado que esta metodologia deve ser utilizada somente quando não for possível obter os parâmetros térmicos através dos ensaios tradicionais de elevação de temperatura, de acordo com [2] e [13].

O algoritmo implementado foi baseado no algoritmo existente no programa computacional “TRAPOT versão 1.0”, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), e nos conceitos apresentados neste capítulo.

A função de avaliação escolhida foi o cálculo do erro de ajuste entre as temperaturas medidas e calculadas. As temperaturas foram calculadas de acordo com o modelo ABNT adaptado, cujas equações encontram-se na seção 2.6.4 deste trabalho. Quanto menor for o erro de ajuste melhor será o indivíduo.

O algoritmo pode ser resumido de acordo com os seguintes passos:

- a. Inicializar a população utilizando os parâmetros recomendados por [2];
- b. Calcular o erro para os parâmetros escolhidos em a;
- c. Gerar, de forma aleatória, os elementos da primeira população;
- d. Calcular os erros de ajuste para estes elementos e ordenar os erros calculados;
- e. Selecionar os pais;
- f. Gerar os novos indivíduos através da aplicação dos operadores de *crossover* e *mutação*;
- g. Substituir os antigos membros da população pelos novos;
- h. Calcular os erros de ajuste para os novos elementos e reordena-los;
- i. Retornar para f caso o critério de parada não tenha sido atingido.

CAPÍTULO 4

O Programa

Neste capítulo será feita uma breve descrição do sistema em que foram implementadas as simulações de carregamento desenvolvidas, assim como a descrição destas simulações.

4.1. Sistema DianE

O Sistema DianE, Sistema de Análise e Diagnóstico de Equipamentos, é um aplicativo para uso em análise e diagnóstico do estado de equipamentos de potência utilizados em Subestações de Alta Tensão, desenvolvido a partir de conhecimentos consolidados em projetos de pesquisa realizados pelo Cepel para empresas do setor elétrico.

O objetivo do DianE é integrar técnicas conhecidas de análise em um único sistema, capaz de dar ao usuário o máximo de informações que o auxiliem na tomada de decisões sobre o regime de operação e as necessidades de manutenção de todos os equipamentos cadastrados.

Estruturalmente o DianE constitui-se de um sistema anfitrião (*host*) e de módulos de análise e de impressão. Os módulos permitem a fácil inserção/remoção de metodologias de análise e de geração de laudos.

4.2. Simulações de Carregamento

As simulações foram desenvolvidas com o objetivo de permitir o cálculo de parâmetros térmicos, a partir de dados online, para transformadores de dois enrolamentos e autotransformadores sem enrolamento terciário; calcular as temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento; e realizar um estudo para a determinação de cargas e tempos máximos admissíveis em regimes de carregamento constante.

As simulações foram desenvolvidas em C++ *Builder* em ambiente *Windows XP*.

A tela principal do Sistema DianE e o menu de acesso às simulações podem ser visualizados nas figura 5 e 6.

O menu “Simulações de Carregamento” possui três submenus, que possibilitam ao usuário acessar as telas: Cálculo de Parâmetros, Cálculo de Temperaturas e Cargas e Tempos Máximos Admissíveis. Estes submenus podem ser visualizados na figura 7.

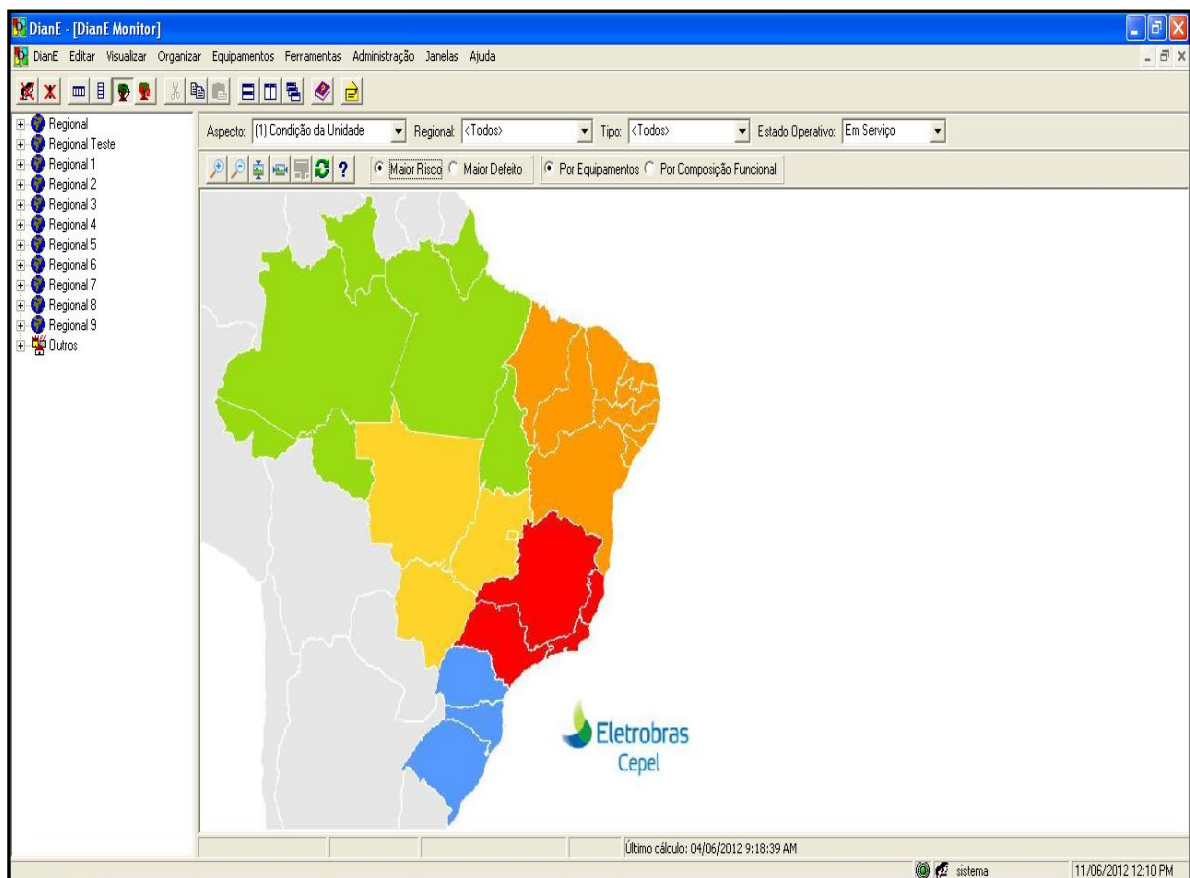


Figura 5 - Tela principal do Sistema DianE

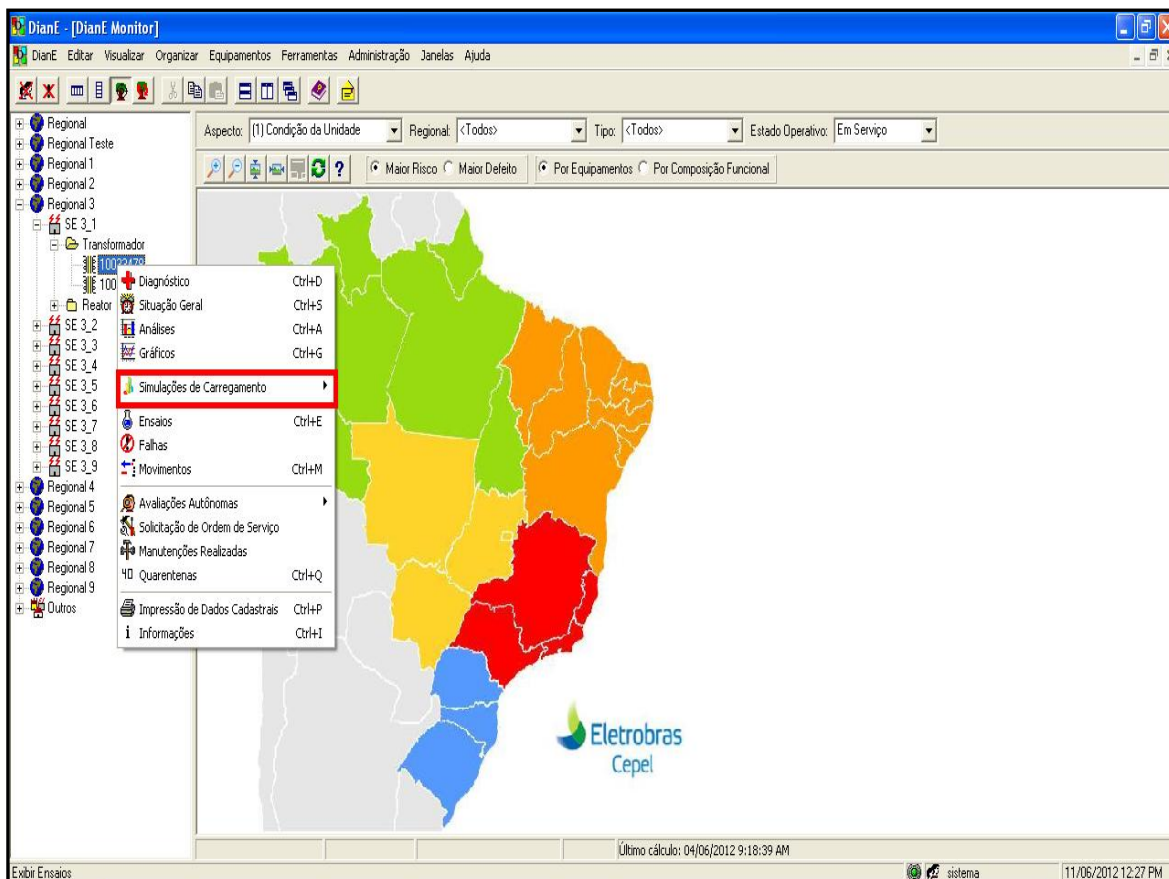


Figura 6 - Tela principal do Sistema DianE - Menu "Simulações de Carregamento"

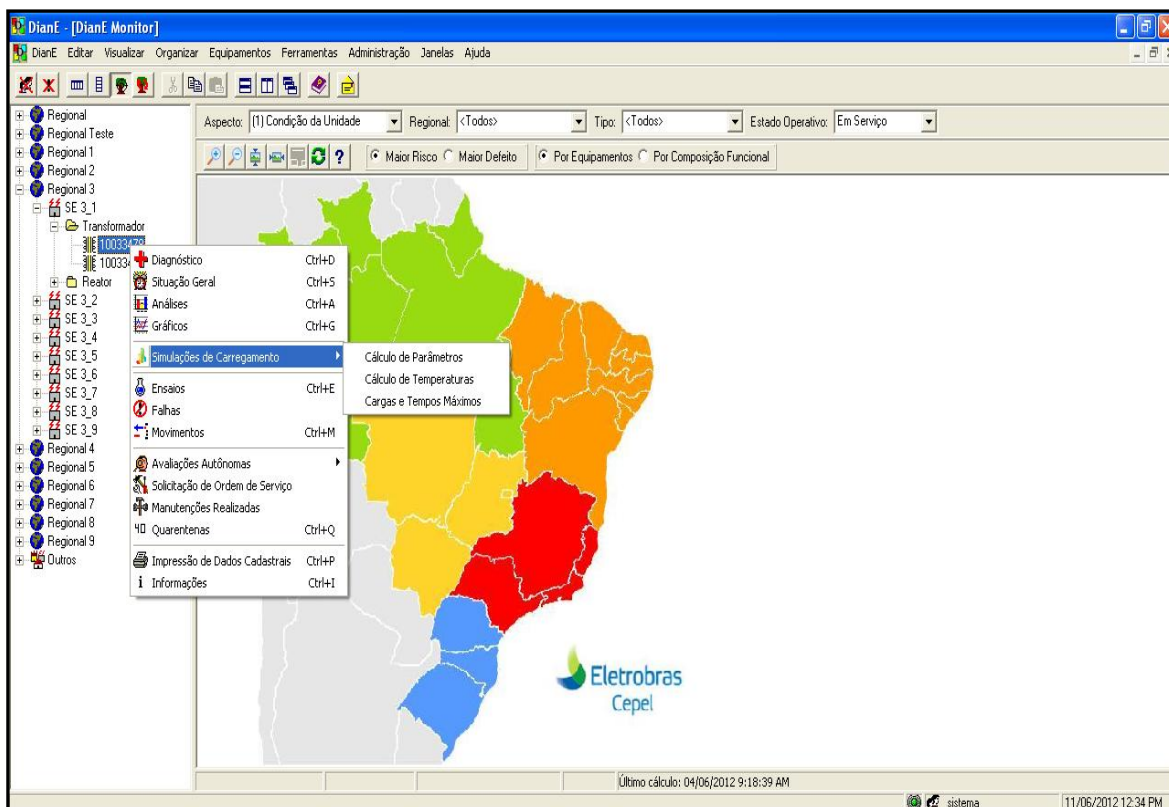


Figura 7 - Menu "Simulações de Carregamento" e seus submenus

4.2.1. Cálculo de Parâmetros Térmicos do Transformador

A figura 8 mostra a tela “Cálculo de Parâmetros”. Nesta tela é possível realizar o cálculo dos parâmetros térmicos do transformador, desde que existam dados online de temperatura ambiente [°C], temperatura do óleo [°C], temperatura do enrolamento [°C], correntes de linha [A] ou de fase [A] e tensões fase-fase [kV] ou fase-neutro [kV] disponíveis para o intervalo de tempo escolhido pelo usuário.

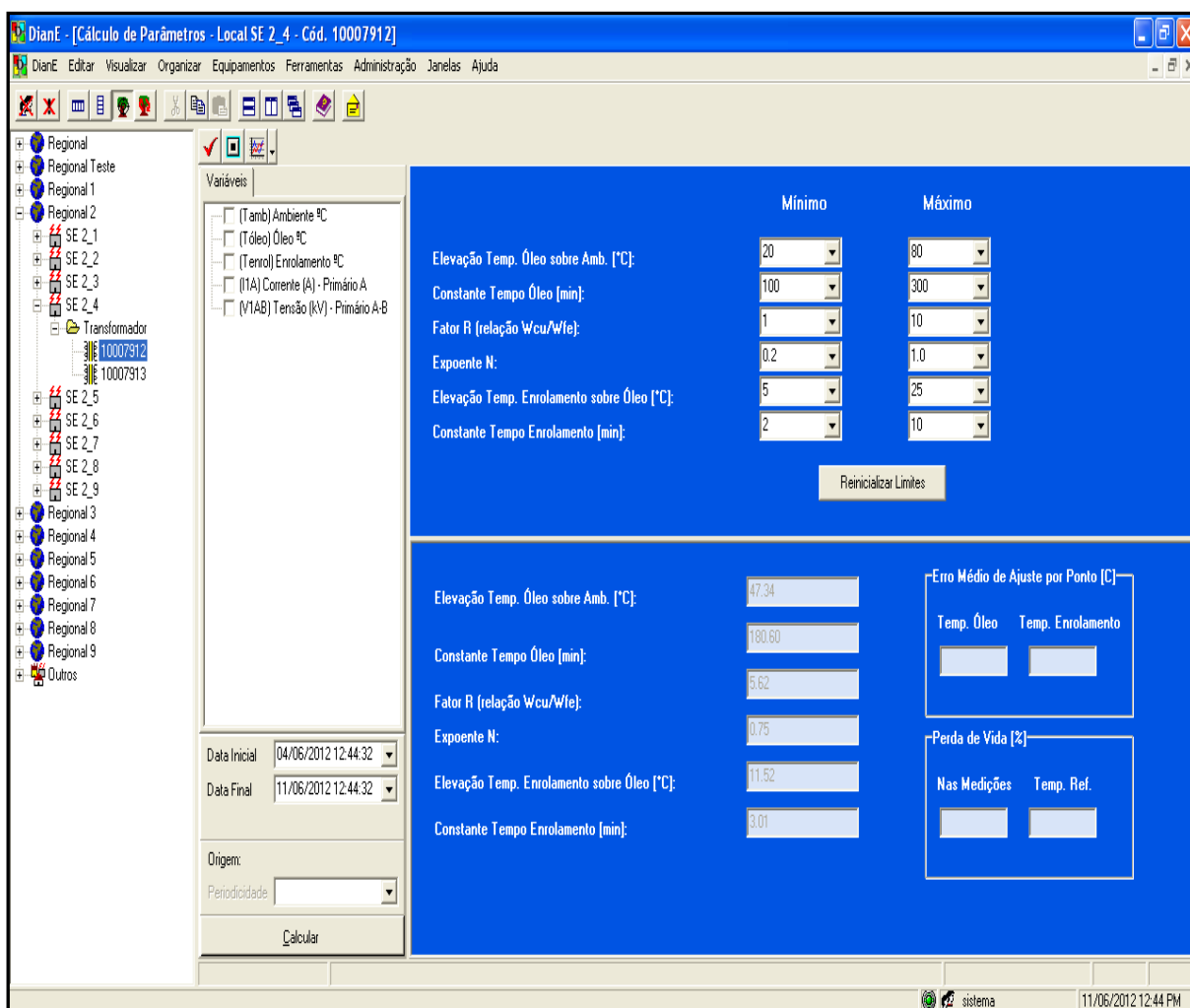





Figura 8 - Tela "Cálculo de Parâmetros"

A tela consiste em uma árvore com as variáveis disponíveis para o transformador selecionado; campos para escolha do intervalo de tempo para o qual o usuário deseja realizar os cálculos (“Data Inicial” e “Data Final”) e periodicidade com que os dados são armazenados

no banco (“Mês”, “Hora” e “Minuto”), neste caso recomenda-se que o usuário escolha o menor intervalo de tempo disponível, visando resultados mais precisos. Na parte superior da tela encontram-se caixas para a seleção dos limites mínimos e máximos a serem utilizados no cálculo dos parâmetros e o botão “Reinicializar Limites”, que retorna os limites escolhidos pelo usuário para a condição “*default*” do programa. Na parte inferior da tela são mostrados, caso existam, os parâmetros cadastrados para o transformador em questão e após a realização do cálculo são mostrados os parâmetros calculados. Ainda na parte inferior da tela são exibidos também os erros de ajuste entre as temperaturas medidas e calculadas do óleo e enrolamento; e uma indicação da perda de vida percentual (equação de Arrhenius) calculada para o intervalo de dados considerados com as temperaturas calculadas, e também, considerando a temperatura de referência da classe de temperatura do transformador.

No menu superior existem botões disponíveis para selecionar todos os itens da árvore de uma vez, ; inverter a seleção dos itens selecionados, ; e um botão de atalho para a tela de gráficos, , onde é possível acessar os gráficos de Temperatura On-Line e Carregamento On-Line, através da aba “Monitoramento On-Line”, caso o usuário deseje analisar os dados de carregamento e temperatura disponíveis, para o intervalo de tempo desejado, antes de realizar o cálculo dos parâmetros.

Uma vez acessada a tela de “Cálculo de Parâmetros” são realizadas consultas no banco de dados da empresa para obter informações a respeito da existência de um enrolamento terciário no transformador e disponibilidade de dados para o cálculo das temperaturas. Caso os resultados da busca impossibilitem o cálculo o sistema emite mensagens de aviso e o botão “Calcular”, na parte inferior esquerda da tela é desativado. Caso contrário, o botão “Calcular” continua habilitado e o usuário pode fazer a seleção de variáveis e limites pra realizar o cálculo.

Porém, antes que o programa inicie o cálculo das temperaturas mais uma consulta ao banco de dados é feita, para verificar a existência de dados que possibilitem a realização dos cálculos, no intervalo de tempo selecionado pelo usuário. Em caso de falta de dados disponíveis para o cálculo o programa encerra sua rotina e emite uma mensagem de aviso para o usuário. É realizada também uma verificação para garantir que não sejam escolhidas mais de uma opção, quando disponíveis, para uma mesma variável e que as variáveis escolhidas pertençam ao mesmo enrolamento e fase do transformador.

Caso não sejam encontradas restrições em nenhuma das consultas realizadas, o programa realiza os cálculos dos parâmetros térmicos, com base nas equações (42) a (46) do modelo térmico adaptado da NBR 5416/1997.

O programa aplica uma metodologia de cálculo baseada em algoritmos genéticos sobre os dados de entrada com limites de pesquisa mínimos e máximos, e exibe os parâmetros calculados, os erros de ajuste entre as temperaturas medidas e simuladas do óleo e do enrolamento e a indicação da perda de vida percentual (equação de Arrhenius).

Sempre que os valores mínimos e máximos forem diferentes, o programa calculará os parâmetros para o modelo de carregamento que levem a um menor erro de ajuste entre as curvas medidas e simuladas de temperatura do óleo e do enrolamento.

4.2.2. Cálculo de Temperaturas

A figura 9 mostra a tela “Cálculo de Temperaturas”. Nesta tela é possível realizar o cálculo das temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento, desde que existam dados online de temperatura ambiente [°C], correntes de linha [A] ou de fase [A] e tensões fase-fase [kV] ou fase-neutro [kV] disponíveis para a data escolhida pelo usuário.

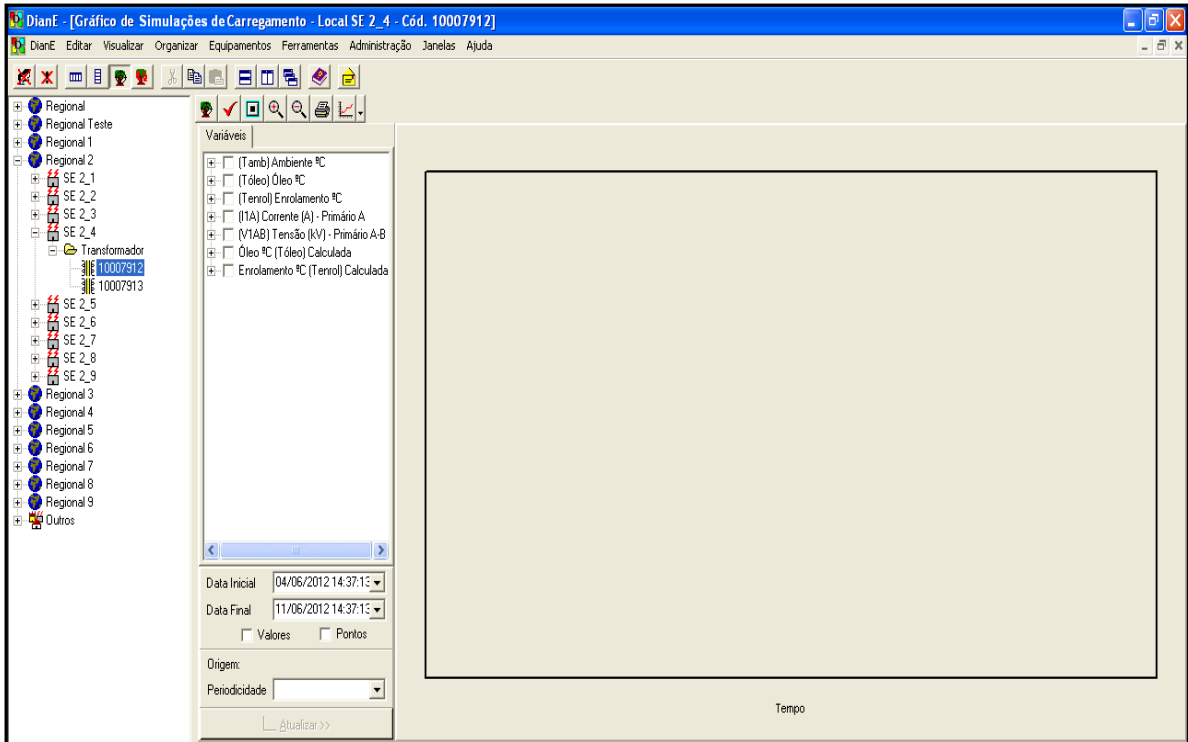













Figura 9 - Tela "Cálculo de Temperaturas"

A tela consiste em uma árvore com as variáveis de temperatura e carregamento disponíveis para o transformador selecionado; campos para escolha do intervalo de tempo para o qual o usuário deseja realizar os cálculos (“Data Inicial” e “Data Final”) e periodicidade com que os dados são armazenados no banco de dados (“Mês”, “Hora” e “Minuto”), neste caso recomenda-se que o usuário escolha o menor intervalo de tempo disponível, visando resultados mais precisos; e espaço onde as curvas serão plotadas.

No menu superior existem botões disponíveis para: Ocultar/visualizar variáveis,  ; selecionar todos os itens da árvore de uma vez,  ; inverter a seleção dos itens selecionados,  ; Selecionar apenas o(s) valor(es),  ; Selecionar apenas a(s) média(s),  ; Selecionar apenas o(s) mínimo(s),  ; Selecionar apenas o(s) máximo(s),  ; Aumentar o zoom,  ; Reduzir o zoom,  ; Visualizar impressão,  ; e ativar estilo pontos,  . Porém, os botões “Selecionar apenas o(s) valor (es)”, “Selecionar apenas a(s) média(s)”, “Selecionar apenas o(s) mínimo(s)” e “Selecionar apenas o(s) máximo(s)” somente

se tornam visíveis quando alguma variável da árvore é selecionada, como mostrado na figura 10.

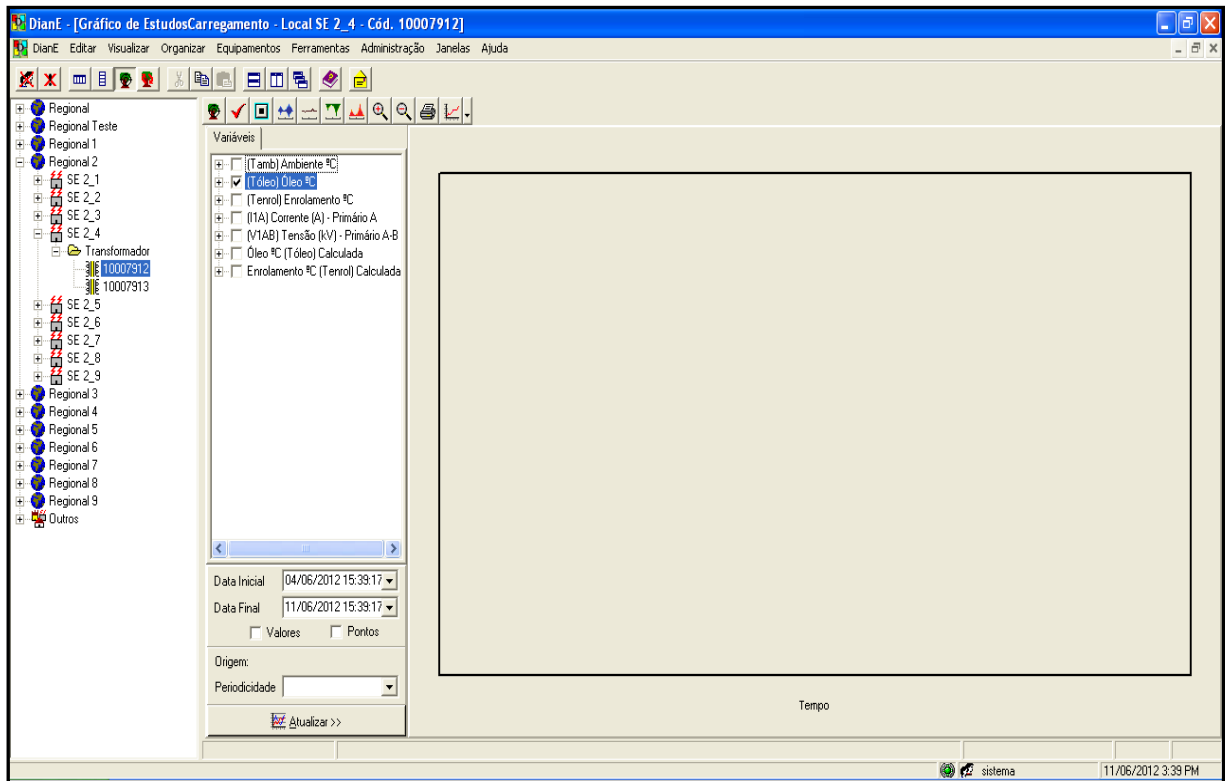


Figura 10 - Tela "Cálculo de Temperaturas" com uma das variáveis selecionada

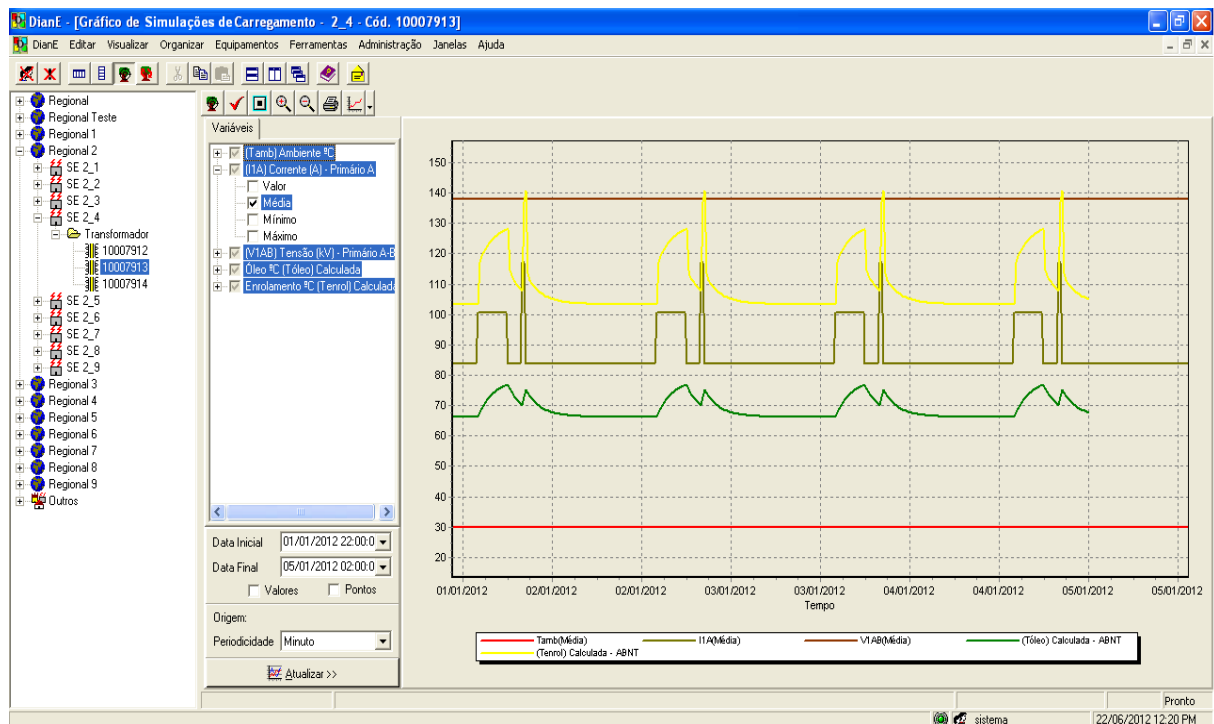


Figura 11 - Exemplo de curvas plotadas na tela "Cálculo de Temperaturas"

Caso o usuário deseje analisar as curvas de carregamento e temperatura online existentes, para o intervalo de tempo escolhido, antes de realizar os cálculos das temperaturas, basta que as variáveis “Óleo °C (Tóleo) Calculada” e “Enrolamento °C (Tenrol) Calculada” da árvore não sejam selecionadas. Deste modo, ao clicar no botão “Atualizar” serão mostradas apenas as curvas correspondentes às variáveis selecionadas na árvore, para o intervalo de tempo escolhido.

Uma vez acessada a tela de “Cálculo de Temperaturas” são realizadas consultas no banco de dados da empresa para obter informações a respeito da existência de um enrolamento terciário no transformador e disponibilidade de dados para o cálculo das temperaturas. Caso os resultados da busca impossibilitem o cálculo o usuário recebe mensagens de aviso e o botão “Atualizar”, na parte inferior esquerda, da tela é desativado. Caso contrário, o botão “Atualizar” permanece habilitado e o usuário pode fazer a seleção de variáveis e realizar o cálculo; Porém, antes que o programa inicie o cálculo das temperaturas mais duas consultas ao banco de dados são feitas. Uma para verificar a existência de parâmetros térmicos cadastrados para o transformador em questão e outra para verificar a existência de dados que possibilitem a realização dos cálculos, no intervalo de tempo selecionado pelo usuário. No caso de parâmetros térmicos não cadastrados o programa emite uma mensagem de aviso para o usuário com instruções de como proceder, dependendo do nível de acesso do mesmo. Em caso de falta de dados disponíveis para o cálculo o programa encerra sua rotina e emite uma mensagem de aviso para o usuário. É realizada também uma verificação para garantir que não seja escolhida mais de uma opção, quando disponível, para uma mesma variável e que as variáveis escolhidas pertençam ao mesmo enrolamento e fase do transformador.

Se não forem encontradas restrições em nenhuma das consultas realizadas o programa realiza os cálculos das temperaturas de acordo com o modelo térmico escolhido pelo usuário e

plota as curvas de temperaturas calculadas. Caso existam dados online de temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento, o usuário pode realizar uma comparação entre as temperaturas medidas e calculadas.

4.2.3. Cargas e Tempos Máximos Admissíveis

A figura 12 mostra a tela “Cargas e Tempos Máximos Admissíveis”. Nesta tela, a partir de parâmetros térmicos e faixas de pesquisa para temperatura ambiente [°C], tempo [h] e carga [pu], calculam-se cargas ou tempos admissíveis de sobrecarga até o limite especificado de temperatura do enrolamento ou perda de vida percentual.

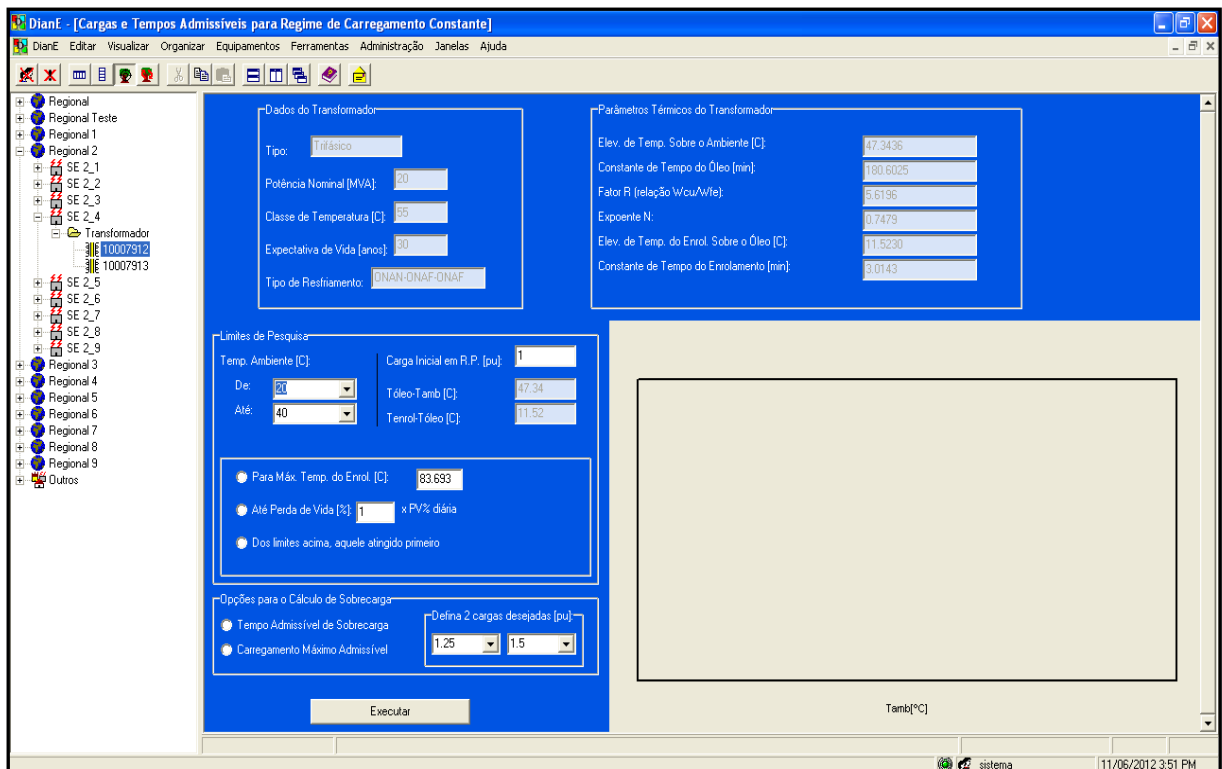


Figura 12 - Tela "Cargas e Tempos Máximos Admissíveis"

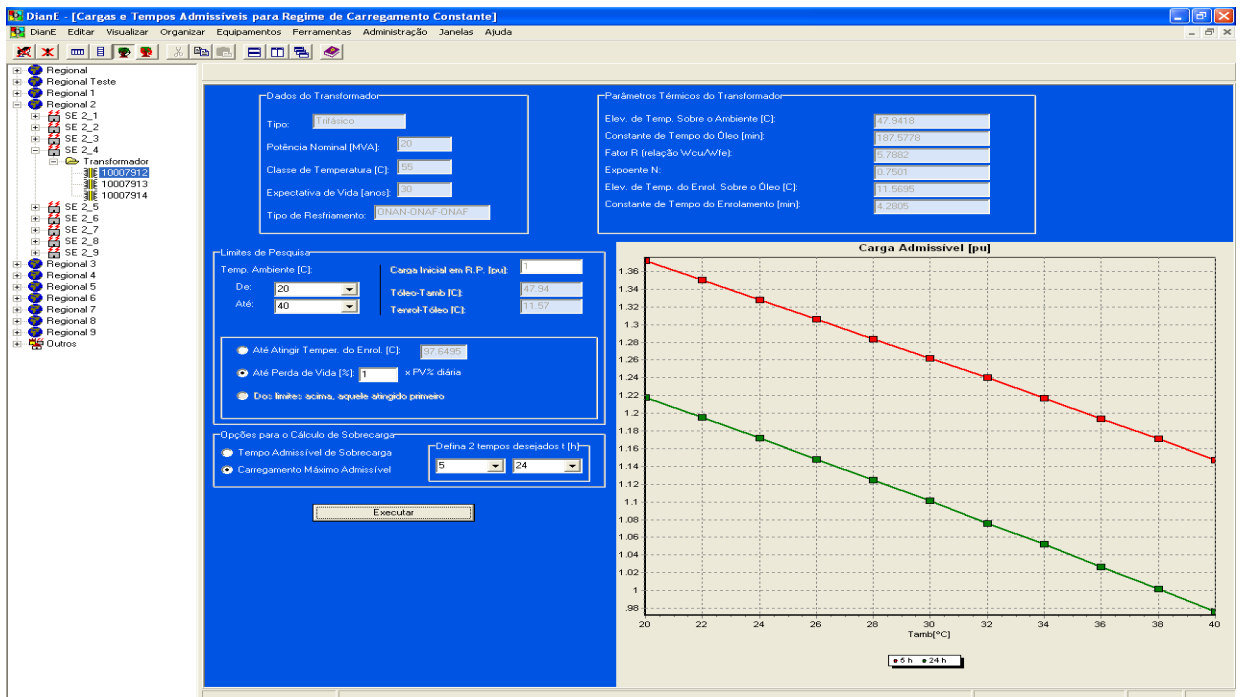


Figura 13 - Exemplo de simulação na tela "Cargas e Tempos Máximos Admissíveis"

Na parte superior da tela encontram-se informações sobre o transformador selecionado, como: tipo do transformador (monofásico ou trifásico); potência nominal em MVA; tipo de resfriamento; classe de temperatura; expectativa de vida em anos; e parâmetros térmicos do transformador.

No meio e à esquerda da tela encontram-se os campos para que sejam configurados os limites de pesquisa. Ainda no meio da tela, à direita, é onde serão plotados os resultados obtidos na simulação.

Na parte inferior encontram-se as opções para o cálculo de sobrecarga.

Uma vez acessada a tela “Cargas e Tempos Máximos Admissíveis” são realizadas consultas no banco de dados da empresa para obter informações a respeito da existência de um enrolamento terciário no transformador e de parâmetros térmicos. Caso o transformador possua enrolamento terciário ou não existam parâmetros térmicos cadastrados o programa encerra sua rotina e emite uma mensagem de aviso para o usuário. Caso contrário o programa realiza cálculos para determinar a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, perda de

vida percentual, cargas e tempos máximos admissíveis de sobrecarga de acordo com os limites de pesquisa escolhidos pelo usuário.

CAPÍTULO 5

Estudos de Caso

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações de carregamento realizadas utilizando-se as telas apresentadas no capítulo 4 e duas das modelagens do capítulo 2.

5.1. Transformador #1

As simulações foram realizadas para um transformador trifásico de 20MVA cujas características encontram-se na tabela 7.

Os dados referentes às grandezas listadas abaixo possuem intervalo de tempo de 30 minutos entre as medições e podem ser observados nas figuras 14 a 18.

- Temperatura ambiente medida no entorno do transformador (°C);
- Temperatura do topo do óleo (°C);
- Temperatura do ponto mais quente do enrolamento (°C);
- Corrente de linha nos enrolamentos de alta tensão (A);
- Tensão fase-fase nos terminais de alta tensão (kV);

Tabela 7- Dados do Transformador

TRANSFORMADOR #1	
Tipo	Trifásico
Potência Nominal	20 MVA
Classe de Temperatura	55 °C
Tipo de Resfriamento	ONAN-ONAF-ONAF
Fabricante	TRAFO
Ano de Fabricação	1989

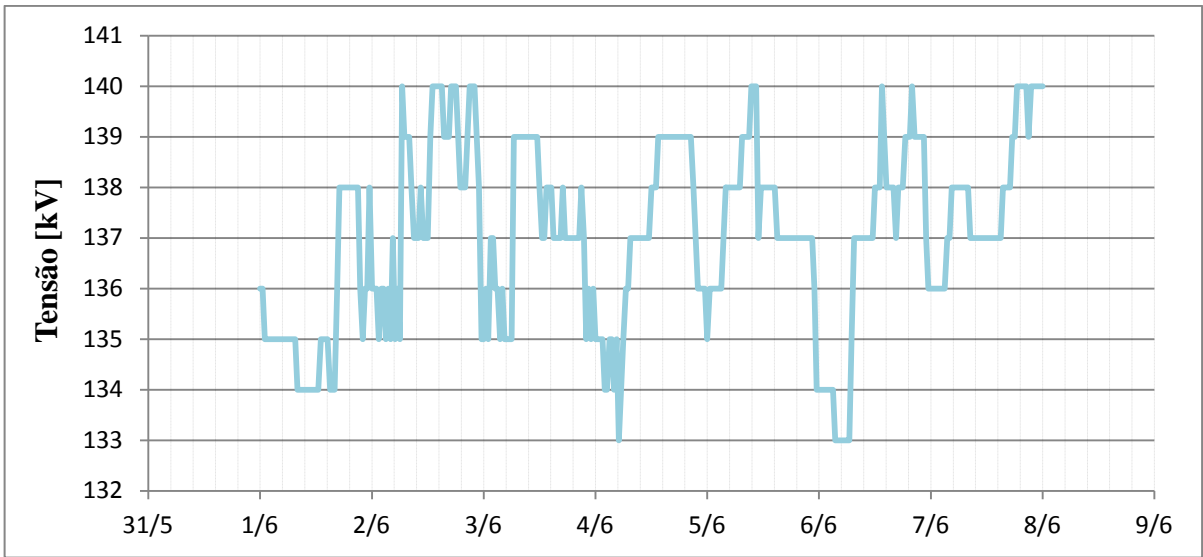


Figura 14- Tensão fase-fase (em kV) medida nos terminais de alta tensão do transformador

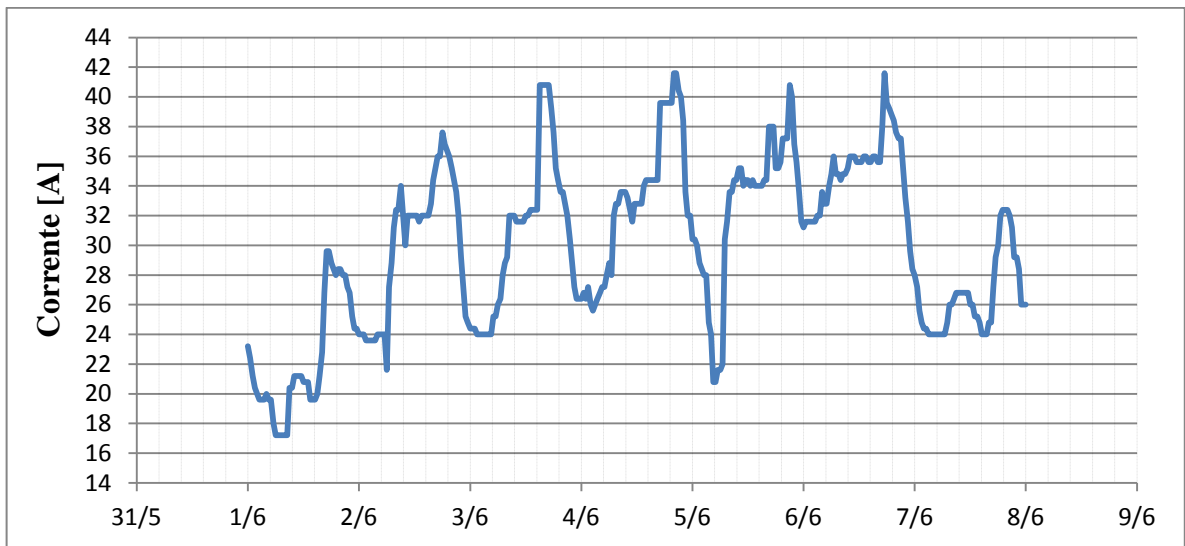


Figura 15 - Corrente de linha (em A) medida nos enrolamentos de alta tensão do transformador

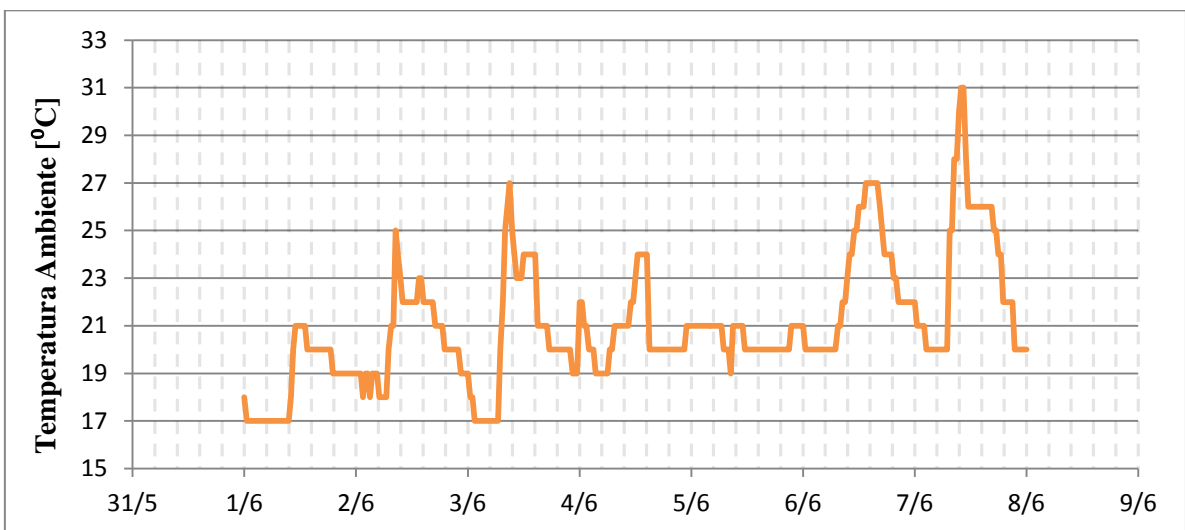


Figura 16 - Temperatura ambiente (em °C) medida no entorno do transformador

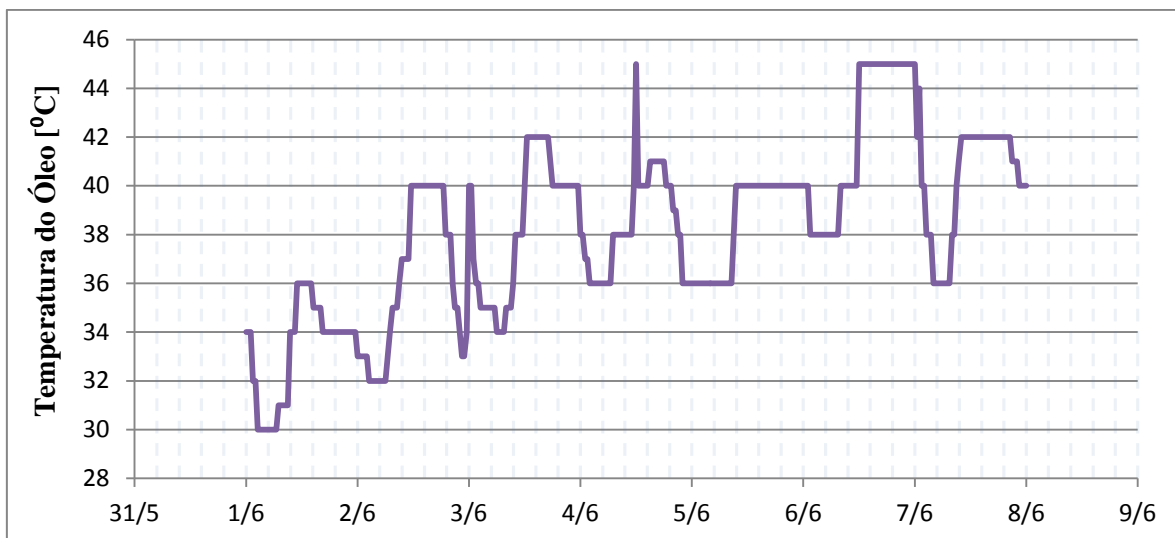


Figura 17 - Temperatura medida do topo do óleo (em °C) do transformador

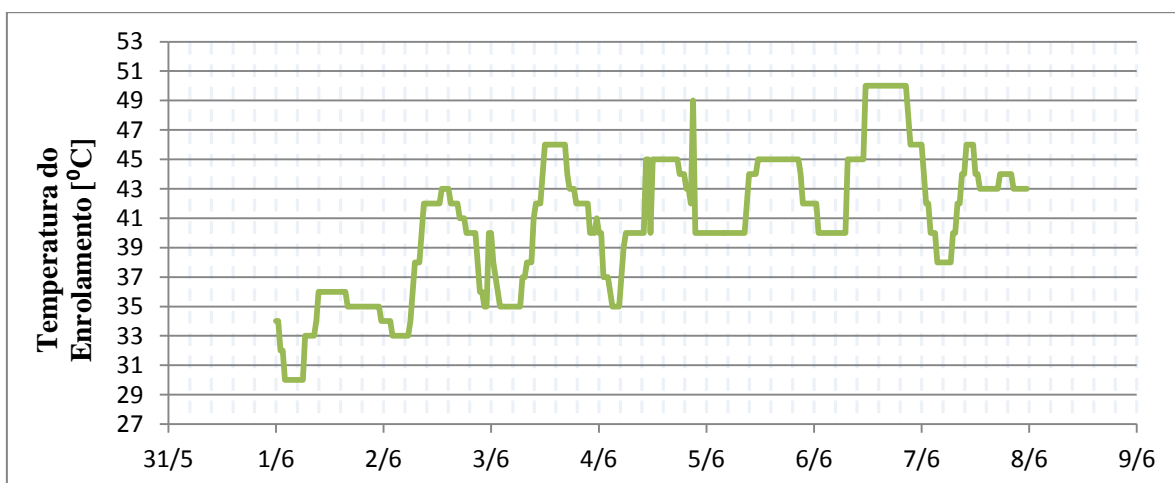


Figura 18 - Temperatura medida (em °C) do ponto mais quente do enrolamento do transformador

5.1.1. Parâmetros Térmicos do Transformador

Os parâmetros térmicos do transformador #1 foram obtidos a partir dos dados coletados, utilizando-se uma metodologia baseada na minimização do erro de ajuste entre valores medidos e calculados das temperaturas do óleo e do enrolamento, de acordo com o algoritmo proposto na seção 3.5 deste trabalho e utilizando a tela “Cálculo de Parâmetros” mostrada na seção 4.2.1.

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 8, assim como os parâmetros sugeridos pela norma ABNT NBR 5416/1997 para transformadores de potência de classe 55°C.

Tabela 8- Parâmetros térmicos do transformador

Parâmetro	NBR 5416	Calculados
Elevação da Temperatura do Óleo sobre o Ambiente [°C]	40	47,9418
Constante de Tempo do Óleo [min]	162	187,5778
Fator R	5	5,7882
Expoente N	0,8	0,7501
Elevação da Temperatura do Enrolamento sobre o Óleo [°C]	25	11,5695
Constante de Tempo do Enrolamento [min]	4,8	4,2805

Tabela 9 - Erro médio de ajuste por ponto dos parâmetros térmicos do transformador.

Erro Médio de Ajuste por Ponto [°C]	
Temperatura do Óleo	1,6113
Temperatura do Enrolamento	1,7734

Tabela 10 - Perda de vida do transformador

Perda de Vida [%]	
Nas Medições	0,00003072
Temperatura de Referência	0,25915039

Na próxima seção serão feitas comparações entre os resultados obtidos para o cálculo das temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento, utilizando-se os dois conjuntos de parâmetros mostrados na tabela 8, demonstrando, assim, a influência destes parâmetros no cálculo das temperaturas.

As tabelas 9 e 10 mostram o erro médio de ajuste entre as temperaturas medidas e simuladas do óleo e do enrolamento, e uma indicação da perda de vida percentual calculada para o intervalo de dados considerados e considerando-se a temperatura de referência da classe de temperatura do transformador, respectivamente.

5.1.2. Cálculo das Temperaturas

Utilizando-se a tela “Cálculo de Temperaturas” foram calculadas as temperaturas do topo do óleo e do enrolamento. Estes cálculos foram realizados utilizando-se os parâmetros propostos por [2] e os calculados no item 5.1.1.

Para a realização dos cálculos utilizou-se a modelagem térmica da ABNT NBR 5416/1997 e o modelo ABNT adaptado. Os resultados obtidos são mostrados a seguir.

5.1.2.1. Parâmetros Sugeridos pela ABNT NBR 5416/1997

As figuras 19 a 22 representam os resultados obtidos para o cálculo das temperaturas do topo do óleo e do enrolamento utilizando o conjunto de parâmetros sugeridos por [2] para um transformador com classe de temperatura igual a 55°C.

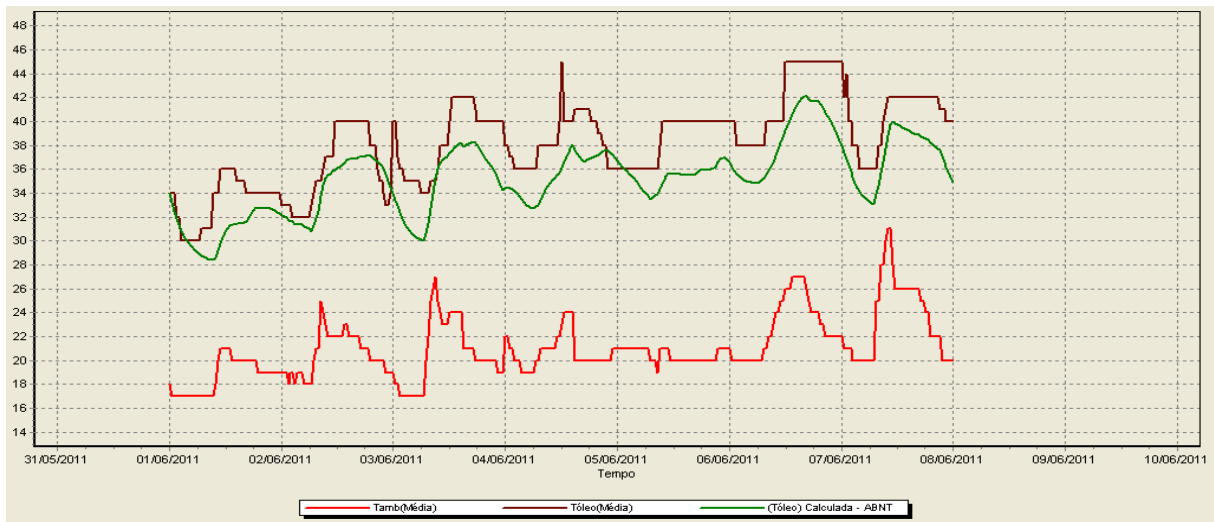


Figura 19 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o Transformador - Modelo e parâmetros NBR 5416

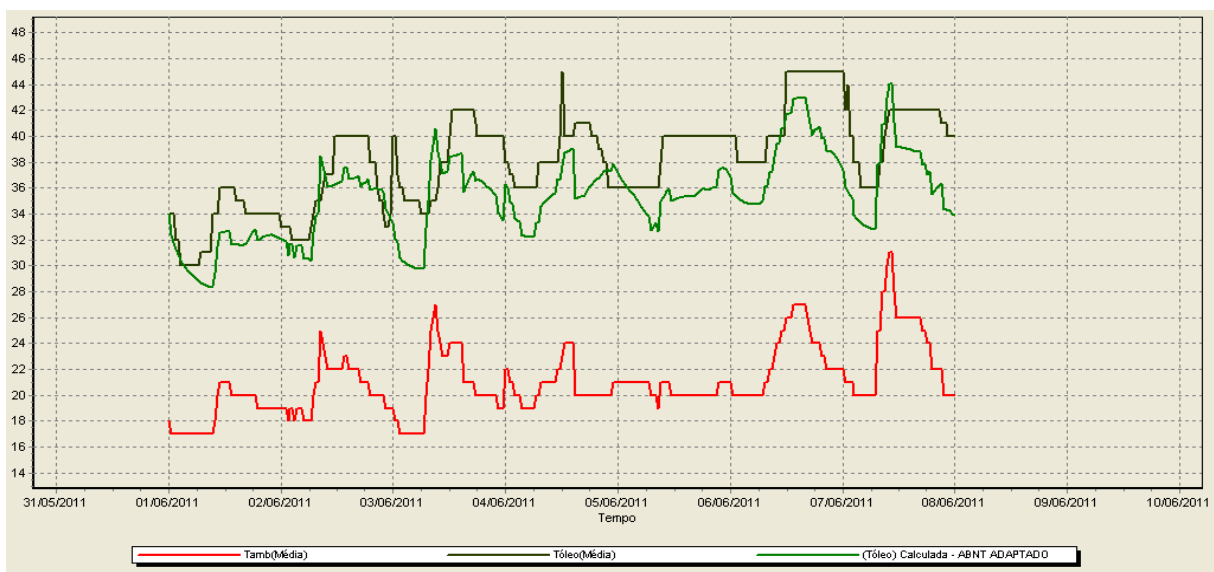


Figura 20 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o Transformador - Modelo NBR Adaptado e parâmetros NBR 5416

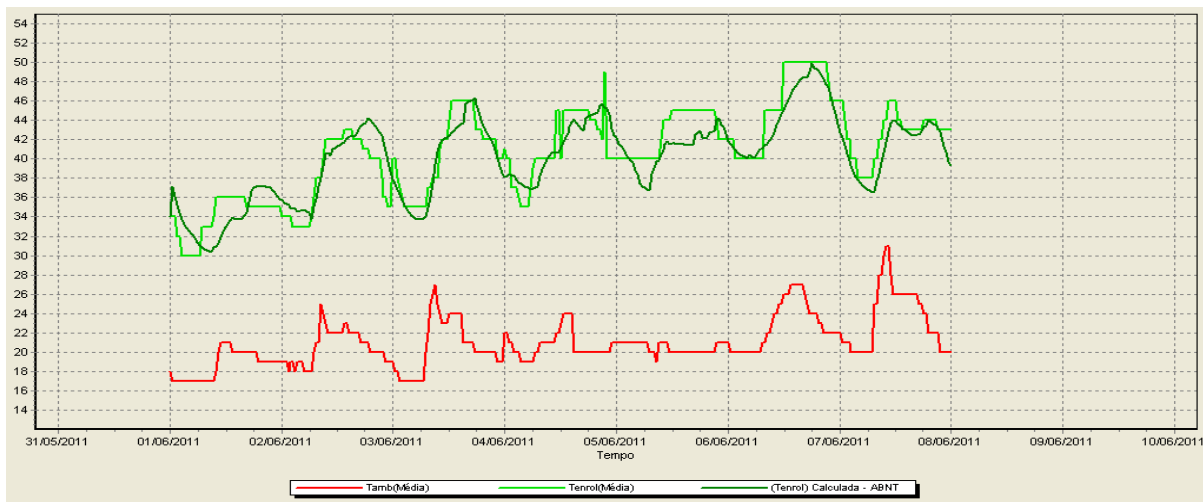


Figura 21 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o transformador - Modelo e parâmetros NBR 5416.

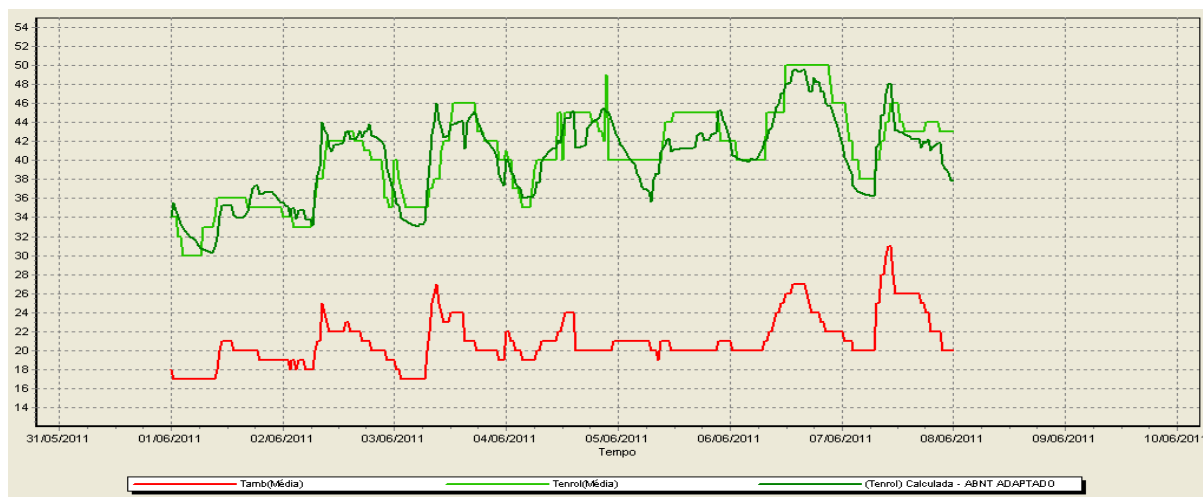


Figura 22 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o transformador - Modelo NBR Adaptado e parâmetros NBR 5416.

5.1.2.2. Parâmetros Calculados

As figuras 23 a 26 representam os resultados obtidos para o cálculo das temperaturas do topo do óleo e do enrolamento utilizando o conjunto de parâmetros calculados através da aplicação da técnica dos Algoritmos Genéticos.

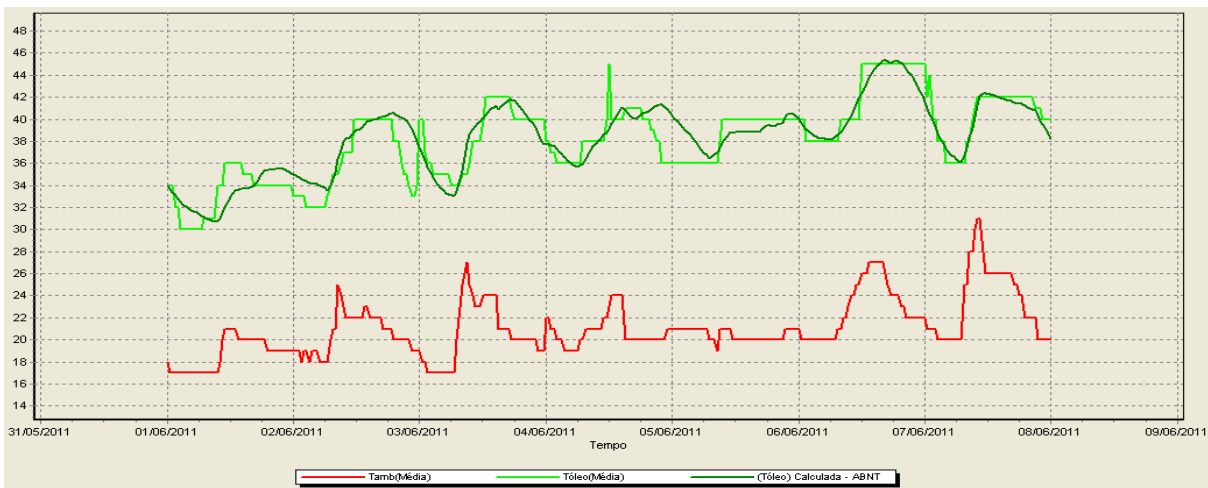


Figura 23 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o transformador - Modelo NBR 5416 e parâmetros calculados

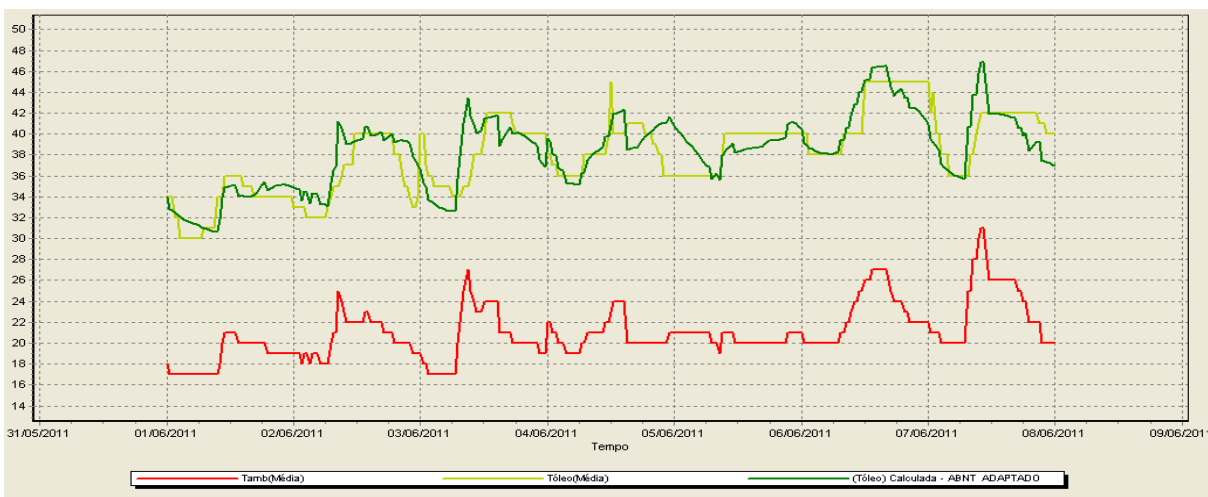


Figura 24 - Temperaturas ambiente e do óleo medidas e temperatura do óleo calculada para o Transformador - Modelo NBR Adaptado e parâmetros calculados

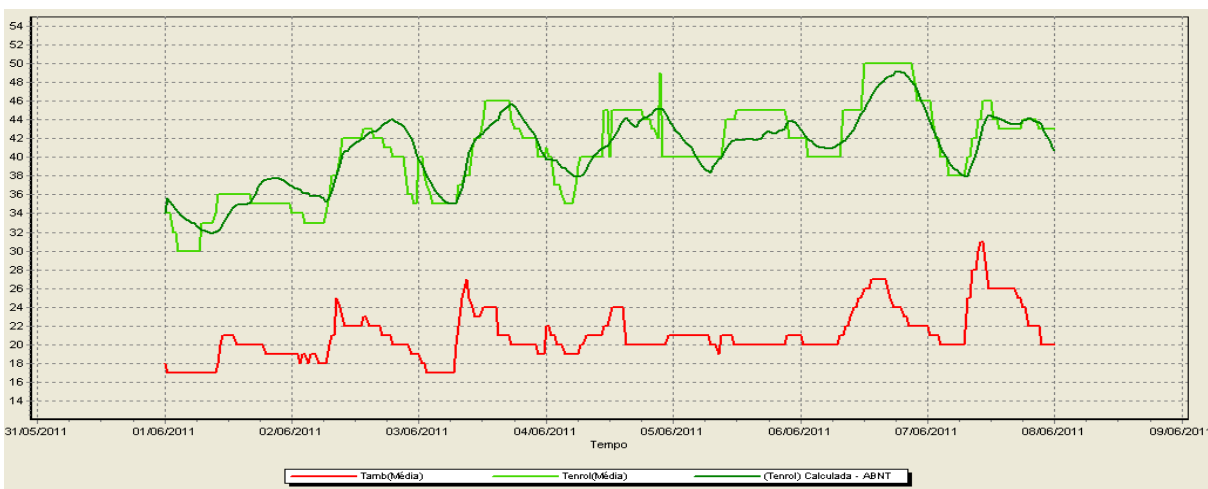


Figura 25 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o Transformador- Modelo NBR 5416 e parâmetros calculados.

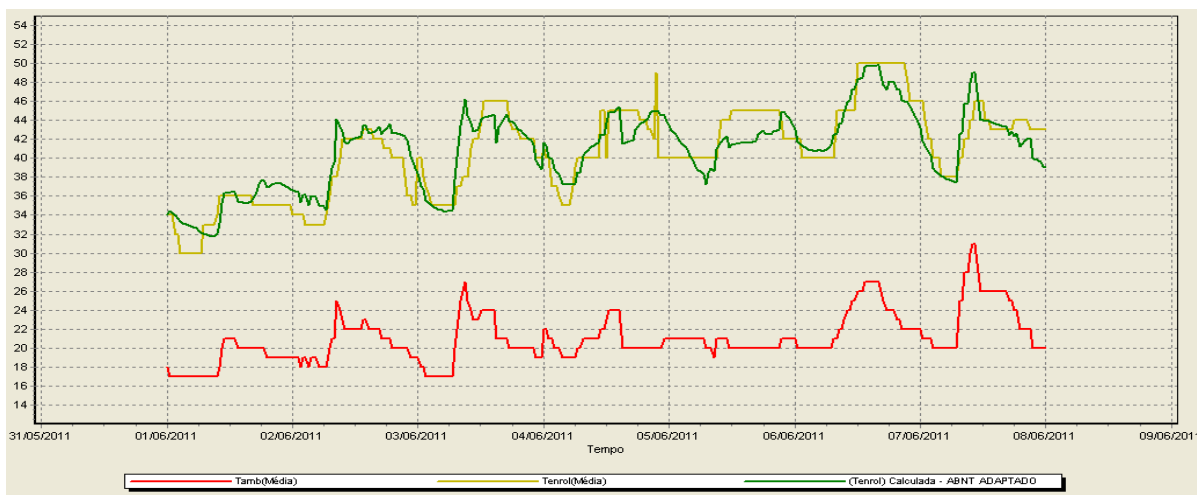


Figura 26 - Temperaturas ambiente e do enrolamento medidas e temperatura do enrolamento calculada para o Transformador- Modelo NBR Adaptado e parâmetros calculados.

5.1.2.3. Comparação dos Modelos e Parâmetros

Após a análise dos resultados apresentados é possível observar os diferentes resultados obtidos para as modelagens térmicas estudadas e para os conjuntos de parâmetros térmicos escolhidos. Devido a estas diferenças são feitas comparações dos resultados utilizando-se cada um dos modelos escolhidos no cálculo das temperaturas e também dos resultados obtidos utilizando-se os dois conjuntos de parâmetros térmicos. Os resultados das comparações podem ser observados nas figuras 27 a 34.

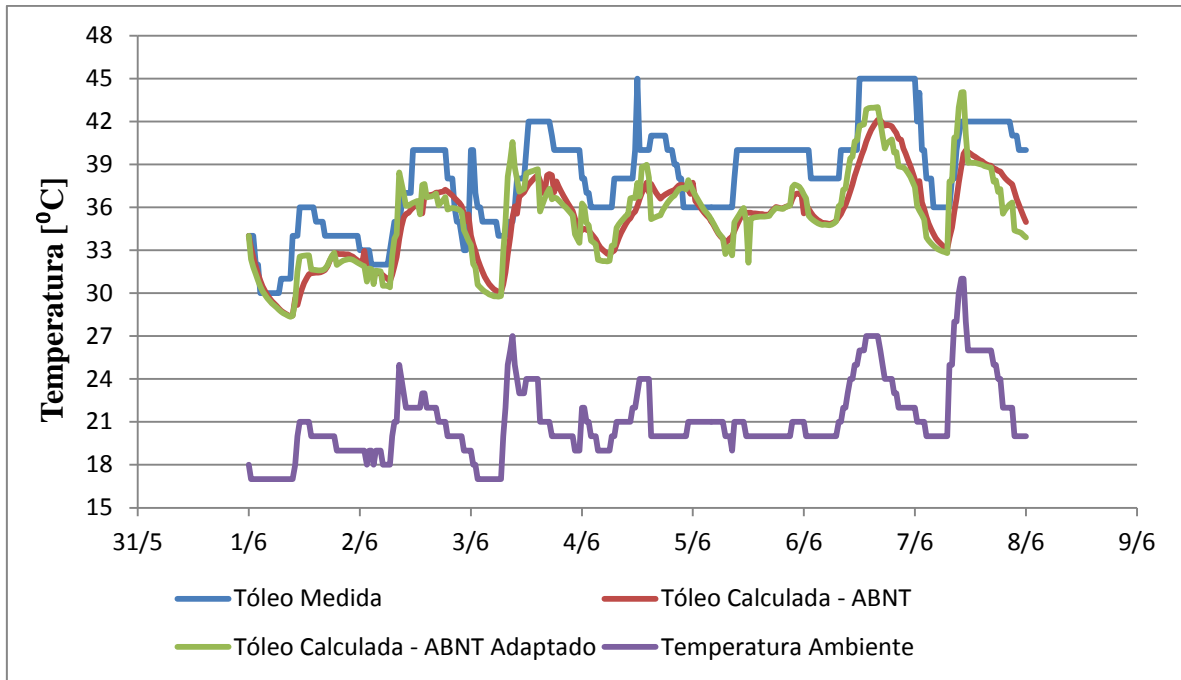


Figura 27 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do óleo do Transformador - parâmetros NBR 5416; Modelos NBR e NBR Melhorado.

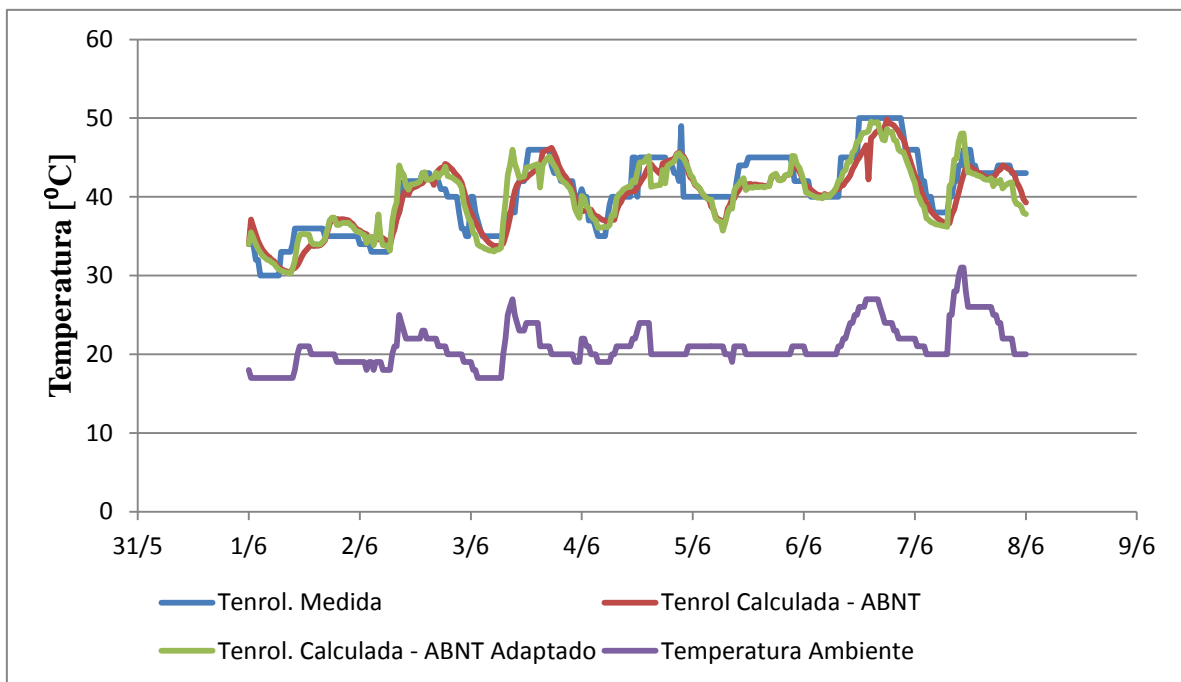


Figura 28 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do enrolamento do Transformador - Parâmetros NBR 5416; Modelos NBR e NBR Melhorado.

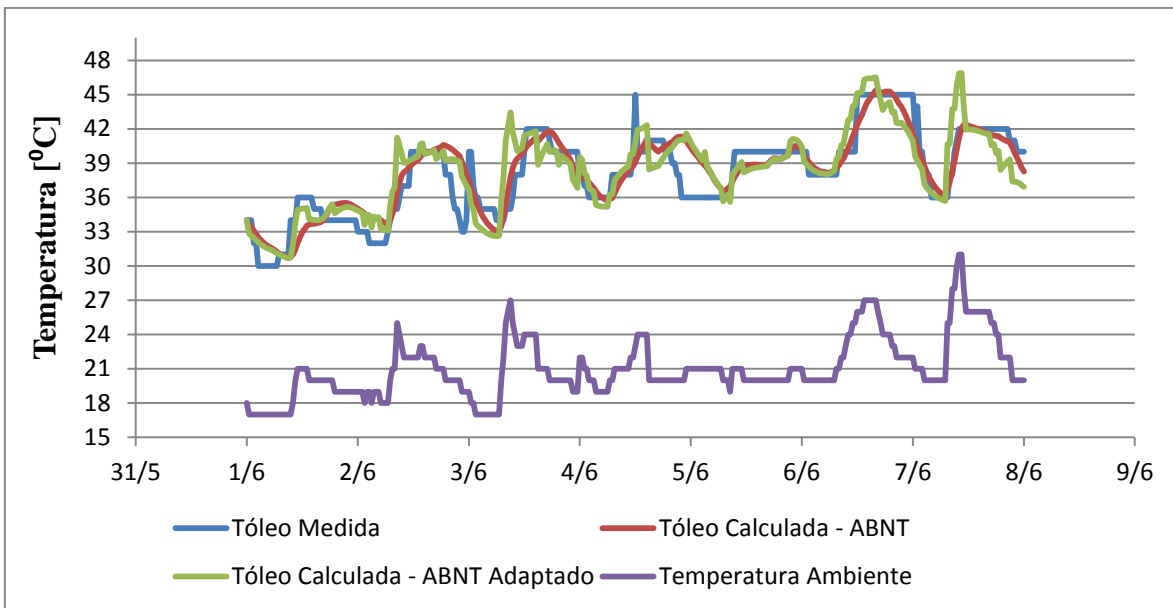


Figura 29 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do óleo do Transformador - Parâmetros Calculados; Modelos NBR e NBR Melhorado.

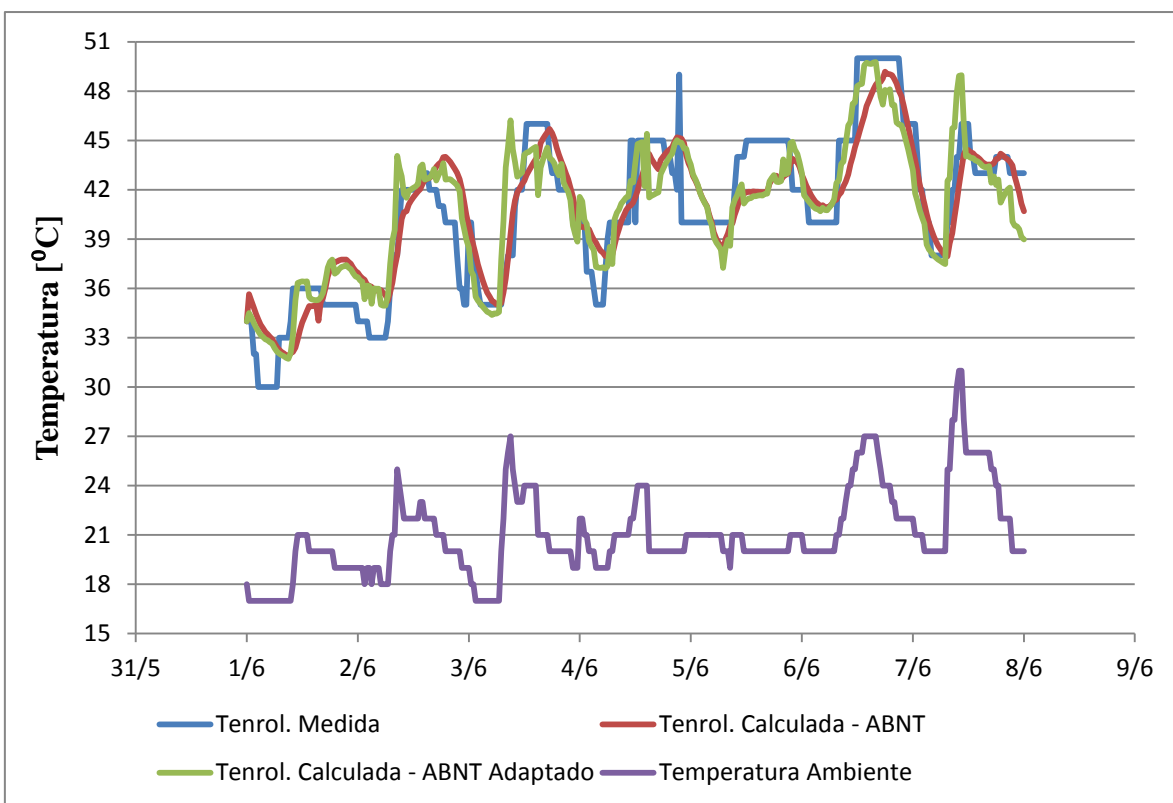


Figura 30 - Comparação entre as temperaturas calculadas e medida do enrolamento do Transformador - Parâmetros Calculados; Modelos NBR e NBR Melhorado.

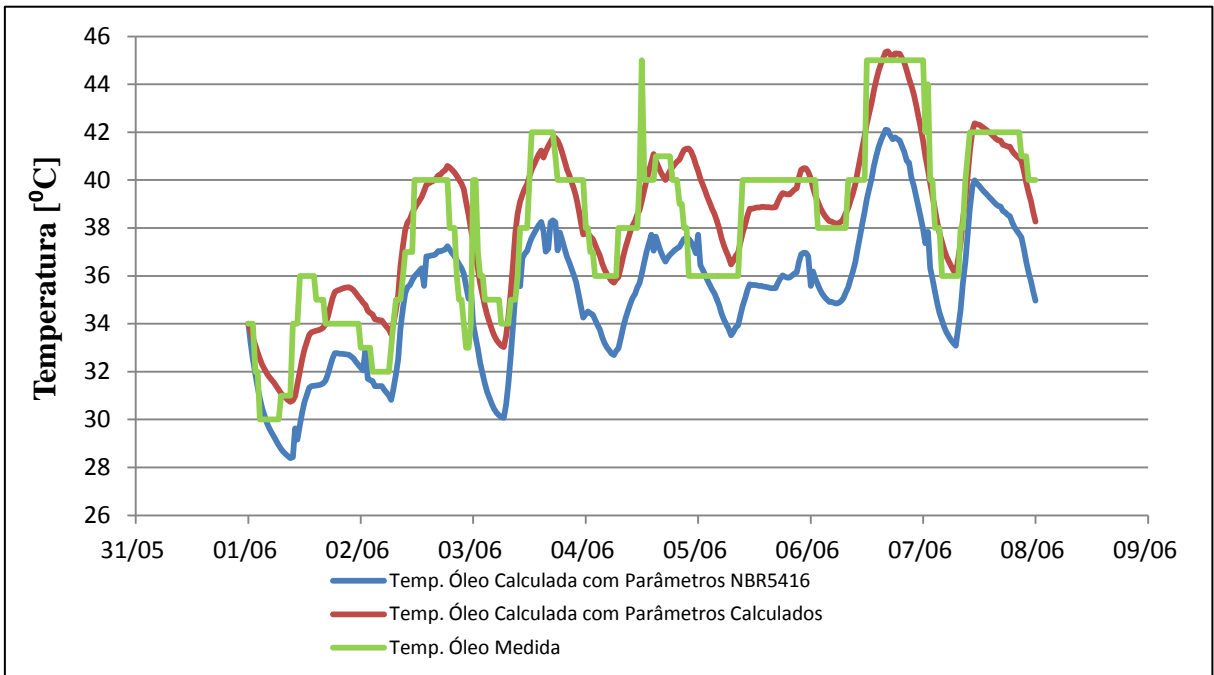


Figura 31 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR 5416 para o óleo do Transformador

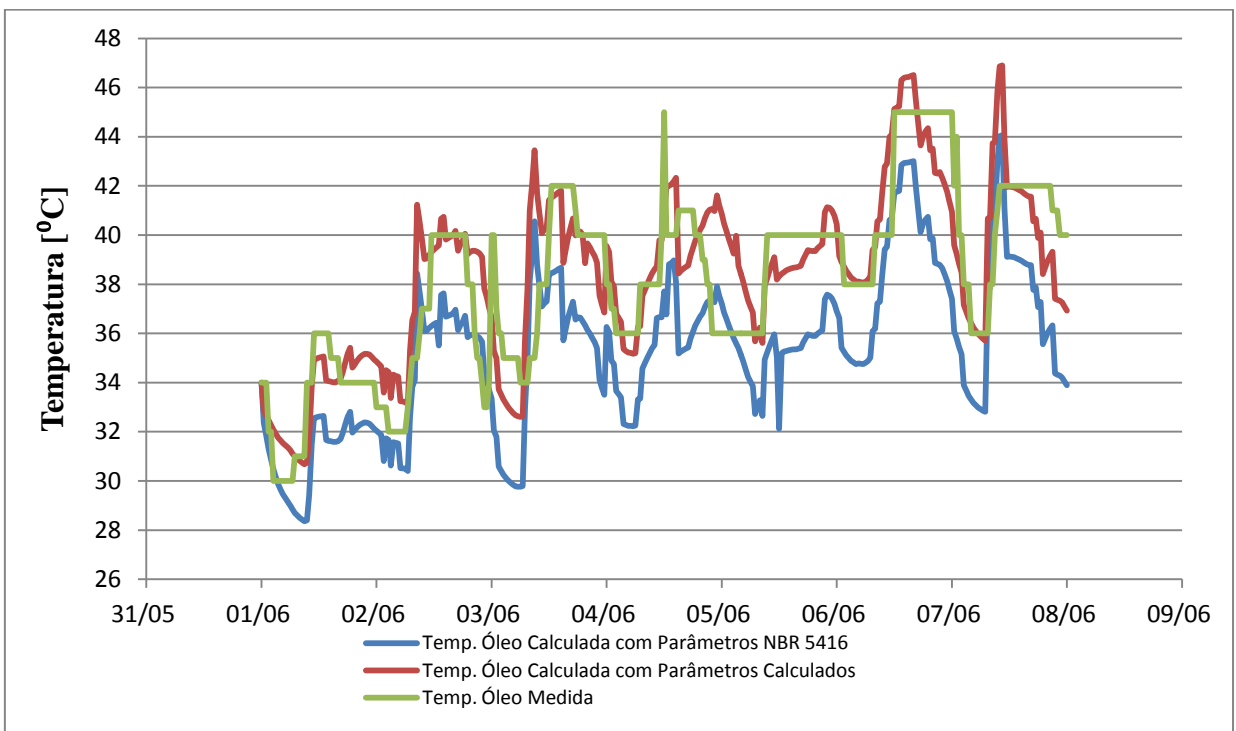


Figura 32 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR Adaptado para o óleo do Transformador

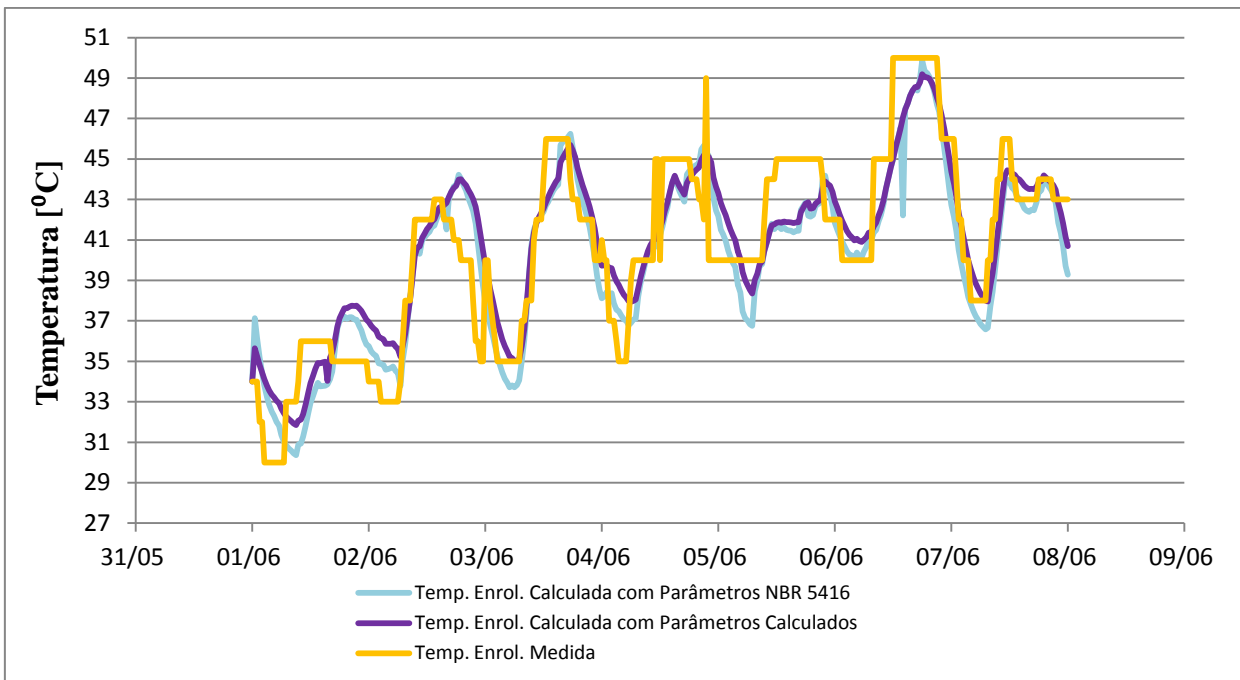


Figura 33 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR 5416 para o enrolamento do Transformador

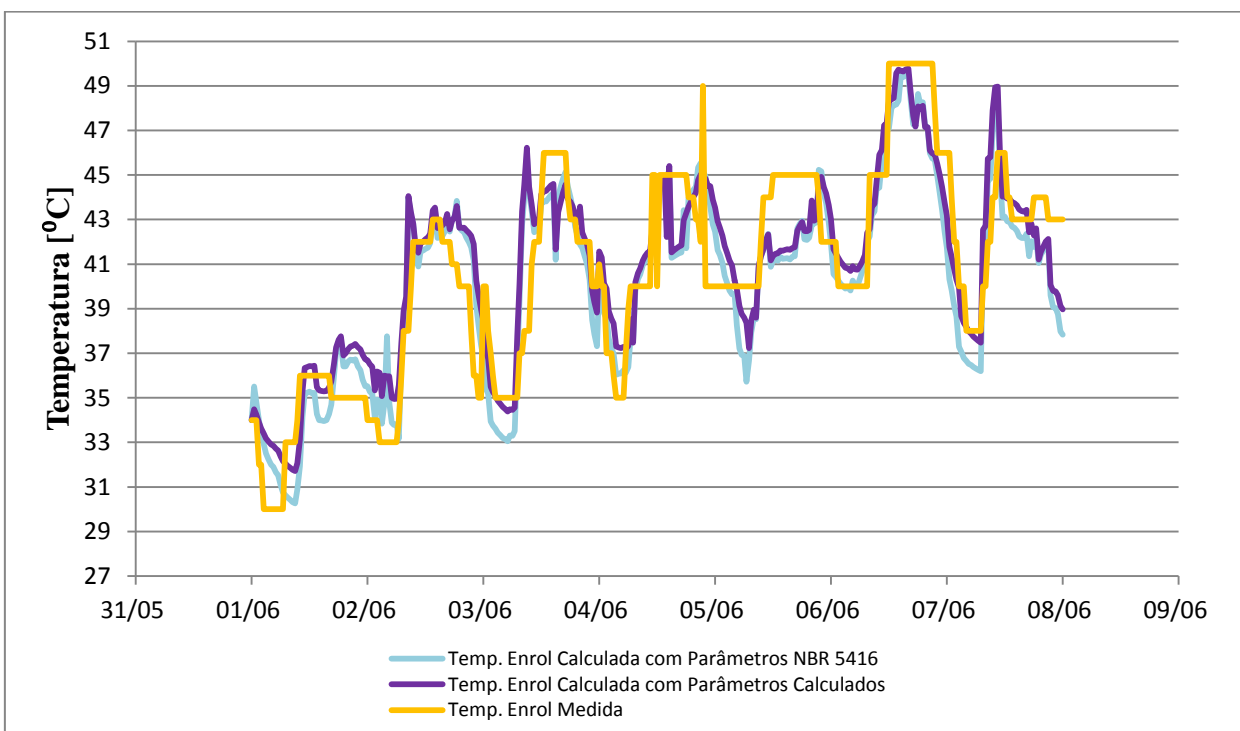


Figura 34 - Comparação entre temperaturas medida e calculadas utilizando o modelo NBR Adaptado para o enrolamento do Transformador

Ao comparar-se os resultados obtidos para o cálculo da temperatura do topo do óleo utilizando os modelos ABNT e ABNT adaptado e os dois conjuntos de parâmetros térmicos, figuras 27, 29, 31 e 32, é possível observar que para os dois conjuntos de parâmetros o modelo que apresentou melhores resultados foi o modelo ABNT adaptado. Em relação ao conjunto de parâmetros foi constatado que os melhores resultados são obtidos quando os parâmetros calculados através da técnica dos Algoritmos Genéticos são utilizados.

Realizando-se a mesma comparação feita acima para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, figuras 28, 30, 33 e 34, observou-se que ambos os modelos fornecem resultados satisfatórios para o cálculo da temperatura do ponto mais quente do enrolamento assim como ambos os conjuntos de parâmetros térmicos. Porém, o conjunto de parâmetros obtido através da aplicação dos Algoritmos Genéticos continua oferecendo os melhores resultados. Essa discrepância entre os resultados obtidos para os dois conjuntos de parâmetros mostra que os parâmetros propostos por [2] conduzem a resultados insatisfatórios e seu uso pode fazer com que a capacidade de sobrecarga do transformador seja tratada de forma errada, reforçando a necessidade de se utilizar parâmetros obtidos a partir dos ensaios tradicionais de elevação de temperatura, ou através do algoritmo apresentado na seção 3.5 deste trabalho, quando não for possível obter tais parâmetros através dos ensaios.

A diferença entre os resultados obtidos, independentemente do conjunto de parâmetros escolhidos para os dois modelos, pode ser explicada pelo fato de que o modelo térmico proposto por [2] é um modelo desenvolvido com o objetivo de capturar a dinâmica térmica básica associada ao carregamento de transformadores de potência. Neste modelo, está implícito que qualquer variação da elevação da temperatura do topo do óleo está relacionada apenas a mudanças no carregamento do transformador. Isto pode ser observado nas equações (4) e (8) do modelo térmico da ABNT. Caso a temperatura se mantenha constante a elevação final da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente, $\Delta\theta_{of}$, será igual à inicial, $\Delta\theta_{oi}$.

Logo, $\Delta\theta_o$ permanece constante, indicando que a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente é constante.

Este modelo captura as alterações causadas na temperatura pelo carregamento. No entanto, o carregamento não é o único fator que influencia as variações de temperatura. A temperatura ambiente varia naturalmente durante o dia e também ao longo do ano. Como a constante de tempo térmica de um grande transformador pode ser da ordem de horas, a temperatura do transformador será, naturalmente, defasada em relação ao ciclo diário de variações da temperatura ambiente. Mesmo que o carregamento fosse constante a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente não seria. Este efeito não é levado em consideração pelo modelo térmico da ABNT, mas é significativo para um transformador que se encontre em um local sujeito a variações na temperatura ambiente que sejam da mesma ordem de magnitude que as elevações da temperatura do óleo devido ao carregamento. O tratamento deste fenômeno torna-se fundamental para os objetivos de monitoramento e diagnóstico.

A partir da comparação dos resultados obtidos utilizando-se o modelo ABNT com os obtidos a partir do modelo ABNT adaptado, figuras 27 a 30, é possível observar a influência da temperatura ambiente no cálculo da temperatura do óleo, mostrando assim, que o modelo adaptado captura fenômenos que não são capturados pelo modelo ABNT.

5.1.3. Cargas e Tempos Máximos Admissíveis

Neste item são apresentados os resultados obtidos para as simulações realizadas com o objetivo de determinar as cargas e tempos máximos admissíveis de sobrecarga até os limites especificados para temperatura máxima do enrolamento ou perda de vida percentual. As simulações foram realizadas através da tela “Cargas e Tempos Máximos Admissíveis”, mostrada no item 4.2.3 deste trabalho.

Os parâmetros escolhidos para a realização das simulações foram os obtidos através da aplicação da técnica dos Algoritmos Genéticos, visto que estes forneceram melhores resultados para o cálculo das temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento que os propostos por [2], conforme mostrado anteriormente.

5.1.3.1. Tempo Admissível de Sobrecarga

Considerando a temperatura de 105°C no enrolamento como a máxima admissível, as figuras 35 e 36 mostram, respectivamente, a evolução da temperatura do enrolamento e a duração máxima da sobrecarga que pode ser aplicada ao transformador até que seja atingida a temperatura máxima definida, em função da variação da temperatura ambiente. Na tabela 11 são mostrados os valores calculados do tempo máximo admissível (em horas), perda de vida percentual atingida e temperatura do enrolamento atingida (em °C). Tais resultados foram obtidos considerando-se que o transformador estava operando, inicialmente, em regime permanente com 1 pu de carga, sendo submetido a sobrecargas de 30% e 50%.

A temperatura de 105°C no enrolamento foi escolhida com base nas tabelas de carregamento para transformadores de 55°C com sistema de resfriamento ONAN/ONAF/ONAF, que se encontram no anexo B de [2].

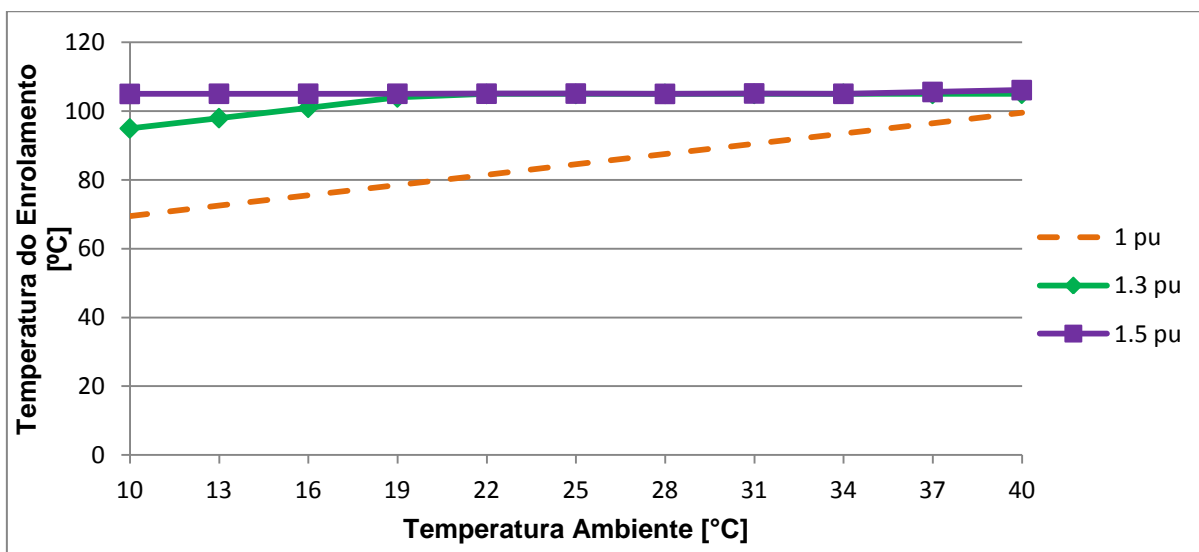


Figura 35 - Evolução da temperatura do enrolamento para carregamento de 1 pu e sobrecargas de 30% e 50%

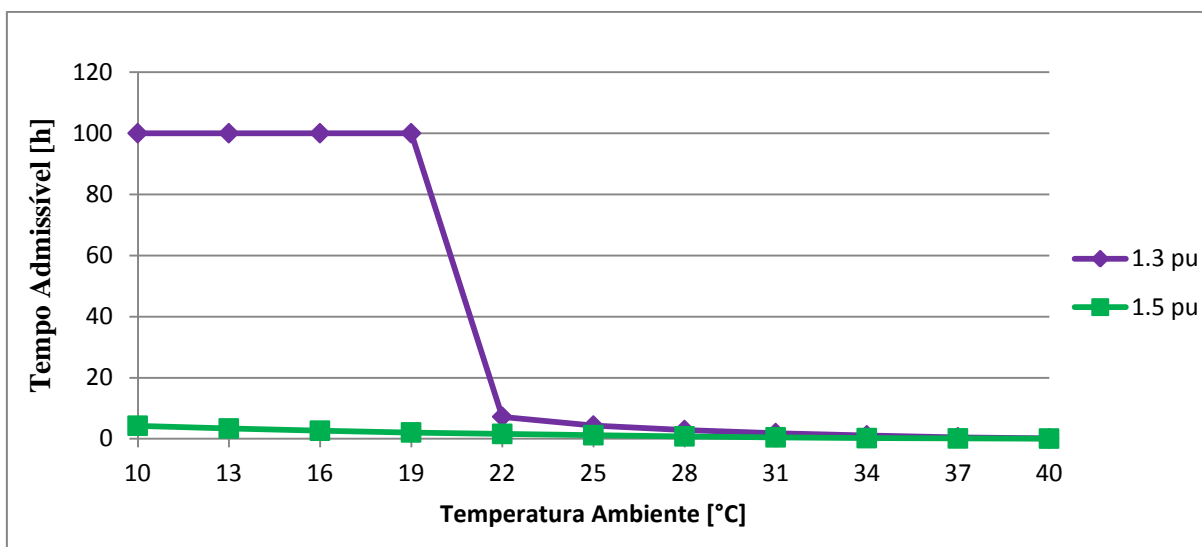


Figura 36 - Tempo máximo admissível para sobrecargas de 30% e 50% considerando como condição limite a temperatura máxima do enrolamento

Tabela 11 - Valores calculados para o tempo máximo admissível de sobrecarga do Transformador

	Carga 1.3 pu	Carga 1.5 pu	Carga 1.3 pu	Carga 1.5 pu	Carga 1.3 pu	Carga 1.5 pu
Tamb. [°C]	Tempo Admissível [h]		PV% Atingida		Temp. do Enr. Atingida [°C]	
10	100	4.267	0.1464	0.008	94.9824	105.0160
13	100	3.367	0.2084	0.0072	97.9824	105.0612
16	100	2.65	0.295	0.0059	100.9824	105.0718
19	100	2.083	0.4154	0.005	103.9824	105.0656
22	7.217	1.6	0.0208	0.0042	105.0054	105.0882
25	4.333	1.183	0.0121	0.0034	105.0091	105.1249
28	2.867	0.8	0.0084	0.0025	105.0317	105.0268
31	1.867	0.483	0.006	0.0017	105.0344	105.1541
34	1.117	0.217	0.004	0.0008	105.066	105.0551
37	0.5	0.117	0.002	0.0005	105.0263	105.5804
40	0.133	0.067	0.0005	0.0003	105.0609	106.125

A mesma simulação foi realizada utilizando um novo limite de pesquisa. Dessa vez foi considerada como condição limite uma perda de vida percentual igual à perda de vida percentual diária. Os seguintes resultados foram obtidos:

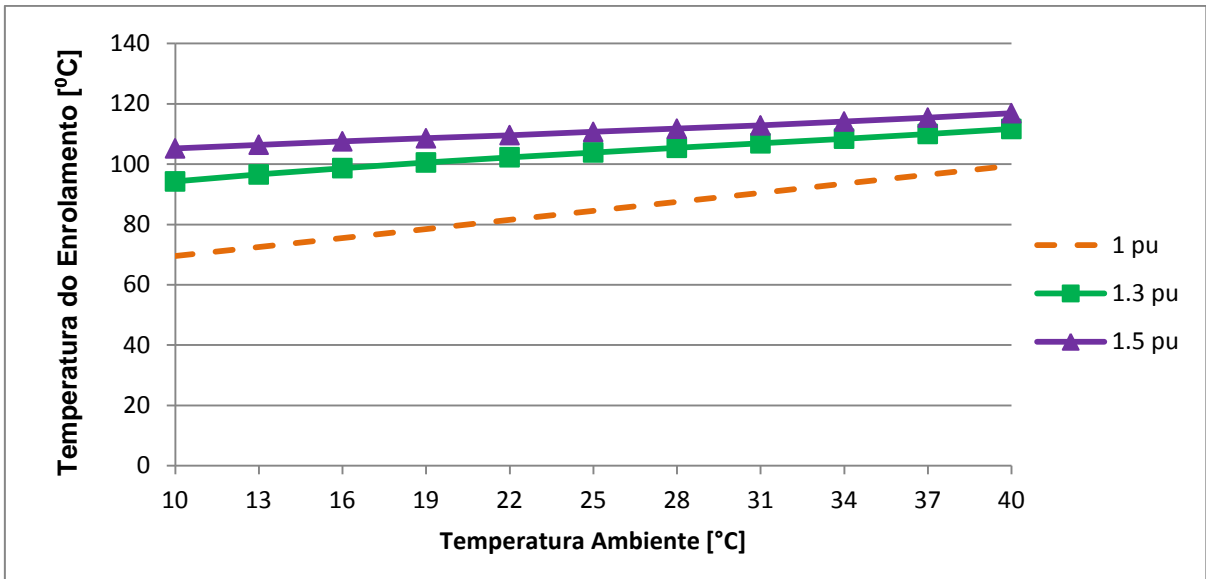


Figura 37 - Evolução da temperatura do enrolamento para carregamento de 1 pu e sobrecargas de 30% e 50% considerando como condição limite uma perda de vida igual a perda de vida percentual do transformador

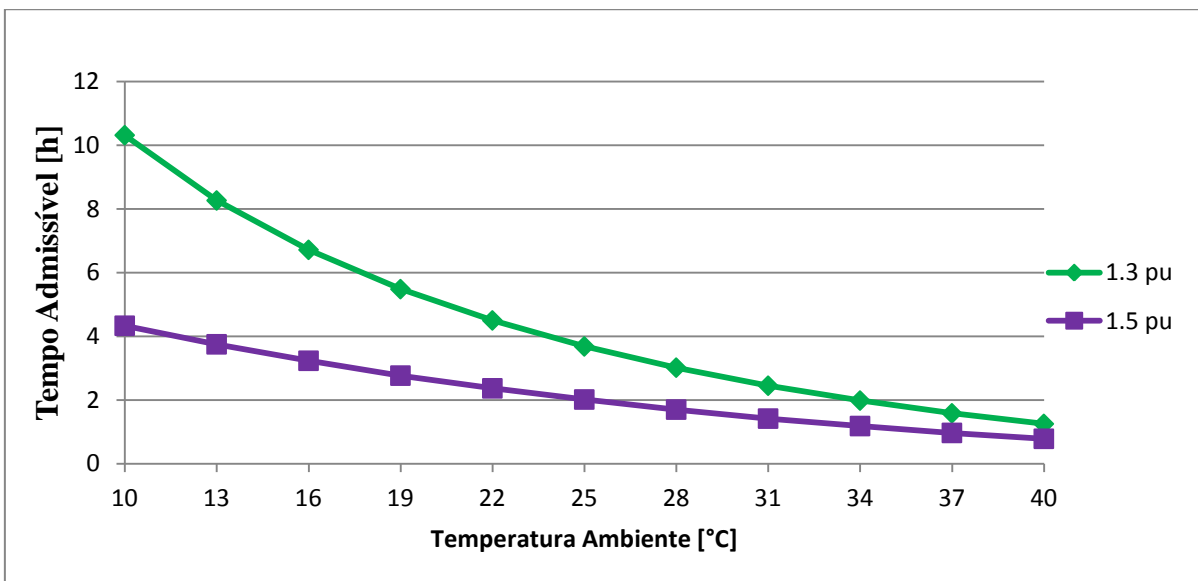


Figura 38 - Tempo máximo admissível para Sobrecargas de 30% e 50% considerando como condição limite perda de vida igual à perda de vida percentual diária

Tabela 12 - Valores calculados para o tempo máximo admissível de sobrecarga do Transformador

	Carga 1.3 pu	Carga 1.5 pu	Carga 1.3 pu	Carga 1.5 pu	Carga 1.3 pu	Carga 1.5 pu
Tamb. [°C]	Tempo Admissível [h]		PV% Atingida		Temp. do Enr. Atingida [°C]	
10	10.317	4.333	0.0091	0.0092	94.249	105.203
13	8.267	3.75	0.0091	0.0092	96.57	106.424
16	6.717	3.233	0.0092	0.0092	98.662	107.547
19	5.483	2.767	0.0091	0.0091	100.54	108.562
22	4.5	2.367	0.0092	0.0092	102.267	109.609
25	3.683	2.017	0.0091	0.0092	103.86	110.682
28	3.017	1.7	0.0092	0.0092	105.404	111.743
31	2.45	1.417	0.0092	0.0092	106.898	112.833
34	1.983	1.183	0.0092	0.0094	108.435	114.125
37	1.583	0.967	0.0092	0.0093	109.996	115.421
40	1.25	0.783	0.0091	0.0093	111.647	116.883

Nesta parte do estudo fica clara não só a influencia do carregamento, mas também a da temperatura ambiente nas variações de temperatura. A figura 35 mostra esse fenômeno com clareza. Observa-se, nesta figura, que para um carregamento constante, em regime permanente, de 1 pu, a temperatura do enrolamento aumenta, linearmente, junto com a temperatura ambiente. Para carregamentos superiores a 1 pu a temperatura limite é atingida mais rapidamente e experimenta pequenas variações com o aumento da temperatura ambiente, levando-se em consideração que existe um limite de 105°C para esta temperatura.

Na figura 36 e nas colunas 2 e 3 da tabela 11 encontram-se os valores obtidos, em horas, para o tempo máximo admissível durante o qual o transformador pode ser submetido ao regimes de carregamento propostos, até que a condição limite de temperatura seja atingida. Observa-se que quanto maiores forem a sobrecarga e a temperatura ambiente, menor será este tempo.

Ao considerar-se como limite de pesquisa uma perda de vida percentual igual à perda de vida percentual diária os resultados obtidos são diferentes.

Na figura 37 mais uma vez observa-se a influencia da temperatura ambiente e do carregamento na temperatura do enrolamento do transformador.

Analisando-se o gráfico da figura 37 e os valores da tabela 12 observa-se que houve uma redução do tempo máximo admissível de carregamento nos primeiros pontos para sobrecarga de 30%. Porém, ocorreu um aumento neste tempo para sobrecarga de 50%. Isso ocorreu, porque o limite de pesquisa definido foi a perda de vida percentual do transformador e não a temperatura do enrolamento.

5.1.3.1. Carregamento Máximo Admissível

Considerando a temperatura de 105°C no enrolamento como a máxima admissível, a figura 39 mostra o carregamento máximo que pode ser aplicado continuamente ao transformador, em função da temperatura ambiente. Na tabela 13 são apresentados os valores calculados.

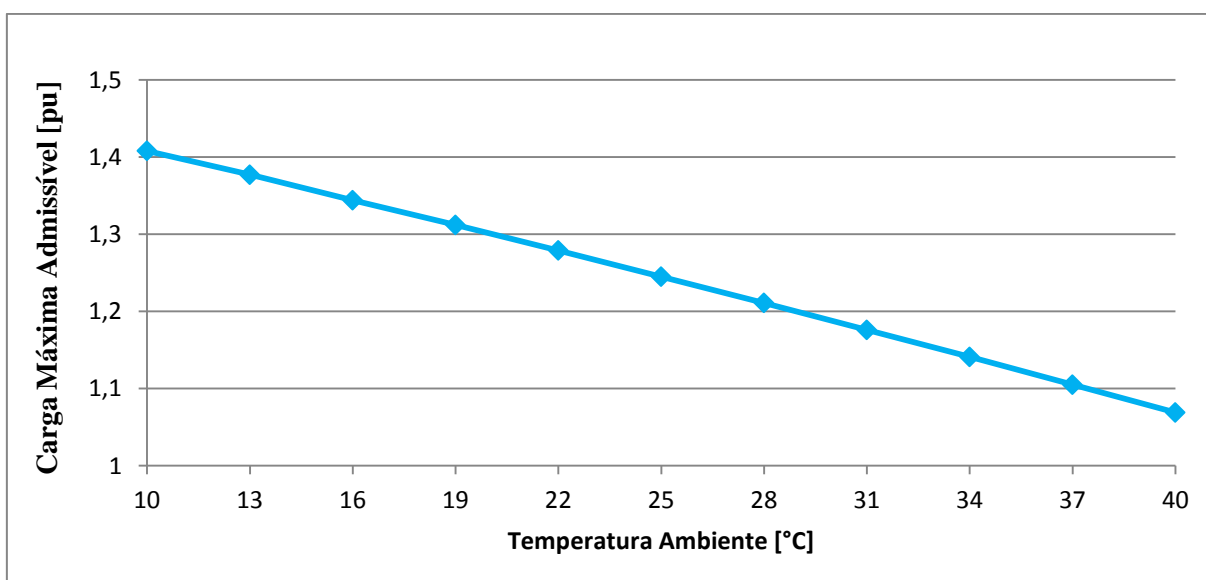


Figura 39 - Carga máxima admissível considerando como condição limite a temperatura máxima do enrolamento

Tabela 13 - Valores calculados para o carregamento máximo admissível do Transformador

	RP	Tempo 24horas	Tempo 1 semana	RP
Tamb. [°C]	Carga Admissível [pu]	PV% Atingida		Temp. do Enr. Atingida [°C]
10	1.408	0.117	0.8188	104.994
13	1.377	0.1159	0.8115	104.915
16	1.344	0.1169	0.818	104.985
19	1.312	0.1161	0.8124	104.924
22	1.279	0.1159	0.8116	104.916
25	1.245	0.1164	0.8151	104.954
28	1.211	0.1164	0.8146	104.949
31	1.176	0.1168	0.8178	104.984
34	1.141	0.1167	0.8166	104.97
37	1.105	0.1169	0.8184	104.99
40	1.069	0.1165	0.8154	104.957

A mesma simulação foi realizada para tempos de 24 horas e 1 semana e considerando-se como condição limite uma perda de vida percentual igual à perda de vida percentual diária. Os seguintes resultados foram obtidos:

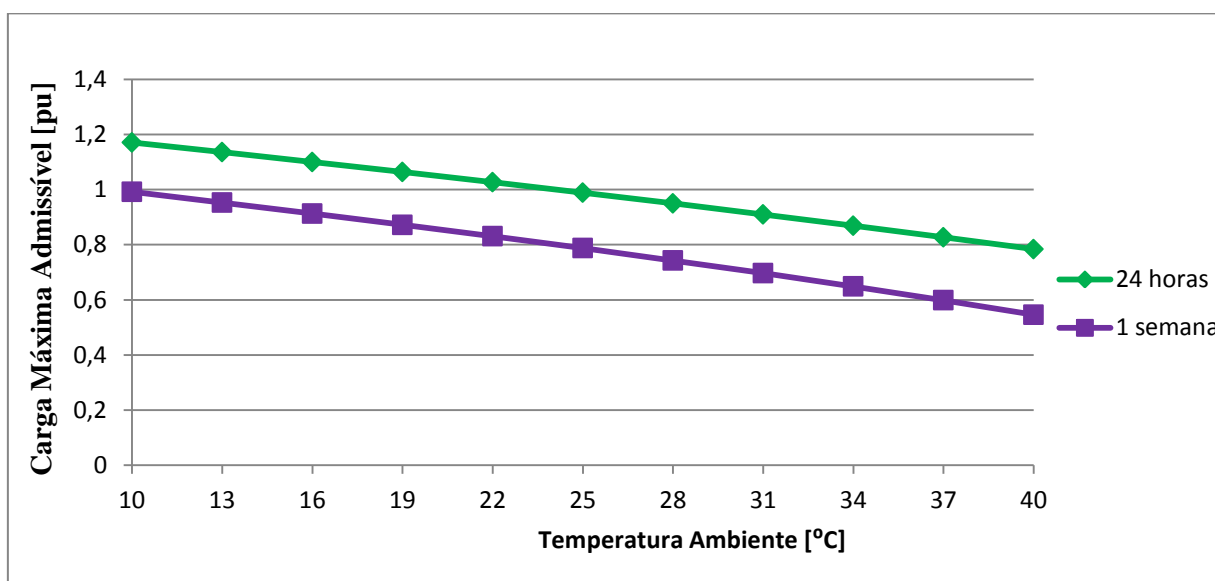


Figura 40 - Carga máxima admissível durante 24h e 1 semana, considerando como condição limite uma perda de vida igual à perda de vida percentual diária

Tabela 14 - Valores calculados para o carregamento máximo admissível do Transformador

	Tempo 24 h	Tempo 1 semana	Tempo 24 h	Tempo 1 semana	Tempo 24 h	Tempo 1 semana
Tamb. [°C]	Carga Admissível [h]		PV% Atingida		Temp. do Enr. Atingida [°C]	
10	1.171	0.992	0.0091	0.009	83.581	68.737
13	1.136	0.953	0.0091	0.0091	83.56	68.758
16	1.1	0.913	0.0091	0.0091	83.573	68.785
19	1.064	0.872	0.0091	0.0091	83.532	68.811
22	1.027	0.831	0.0091	0.0091	83.516	68.757
25	0.989	0.788	0.0091	0.0091	83.519	68.757
28	0.95	0.743	0.0091	0.0091	83.535	68.795
31	0.91	0.697	0.0091	0.0091	83.557	68.79
34	0.869	0.649	0.0091	0.0091	83.557	68.791
37	0.827	0.599	0.0091	0.0091	83.587	68.776
40	0.784	0.546	0.0091	0.0091	83.578	68.774

A partir da análise da figura 39 e da tabela 13 observa-se que para a condição limite escolhida é possível aplicar carregamentos superiores a 1pu, ao transformador, durante todo o intervalo escolhido para a variação da temperatura ambiente, sem que a limite de temperatura de 105°C para o enrolamento seja atingido.

No caso em que a condição limite é uma perda de vida percentual igual à perda de vida percentual diária obteve-se o carregamento máximo admissível que pode ser aplicado ao transformador durante 24 horas e uma semana. Analisando-se a figura 40 e a tabela 14 verifica-se que só é possível aplicar carregamentos superiores a 1 pu durante 24 horas quando a temperatura ambiente possuir valores baixos. Para o caso de uma semana o carregamento permitido ficou abaixo de 1pu dentro de todo o intervalo escolhido para a temperatura ambiente.

CAPÍTULO 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a aplicação da telas desenvolvidas e, em seguida, são feitas recomendações para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar a modelagem térmica de transformadores de potência e desenvolver simulações de carregamento para serem inseridas em um sistema de análise e diagnóstico de equipamentos. Foram apresentadas algumas modelagens térmicas existentes na literatura, dentre as quais duas foram selecionadas para a realização das simulações.

A partir da realização do estudo de caso foi possível observar os resultados obtidos para cada uma das modelagens utilizadas e, também, para cada conjunto de parâmetros térmicos selecionados. Constatou-se que o modelo térmico proposto pela ABNT NBR 5416/1997 é um modelo que não leva em consideração os efeitos da variação da temperatura ambiente no carregamento de transformadores. Já o modelo ABNT Adaptado trata estes fenômenos, fornecendo resultados mais condizentes com os resultados reais.

Em relação aos parâmetros térmicos do transformador observou-se que os parâmetros propostos pela ABNT NBR 5416 levaram a resultados insatisfatórios. O uso de tais parâmetros pode fazer com que a capacidade de sobrecarga do transformador sob análise seja tratada de maneira incorreta. Os resultados obtidos a partir da utilização do conjunto de parâmetros calculados através da aplicação da técnica dos algoritmos genéticos foram condizentes com os valores medidos, mostrando que a utilização destes parâmetros é válida,

quando não for possível obter os parâmetros térmicos a partir dos ensaios tradicionais de elevação de temperatura.

As simulações “Cargas e Tempos Máximos Admissíveis” mostraram ser ferramentas com grande potencial para ajudar na criação de estratégias para a operação de transformadores, pois possibilitam determinar o carregamento máximo que o transformador pode suportar e o tempo máximo durante o qual um certo carregamento pode ser aplicado ao transformador, levando em consideração limites determinados pelo usuário.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados obtidos com a utilização das modelagens apresentadas neste trabalho serem satisfatórios, os mesmos estão limitados a transformadores e autotransformadores monofásicos ou trifásicos com dois enrolamentos. Assim, propõe-se para trabalhos futuros:

1. Utilização de modelos que possam ser aplicados a transformadores com três enrolamentos;
2. Levar em consideração as perdas no enrolamento e as perdas a vazio;
3. Criação de um estudo que permita, a partir de dados iniciais sobre a “história” do transformador, parâmetros térmicos e condições de carregamento, realizar o cálculo da perda de vida, o balanço de vida e a produtividade do transformador.

Referências Bibliográficas

- [1] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2011, Procedimentos de Rede, Módulo 2, Submódulo 2.3, “Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos”.
- [2] Norma ABNT NBR 5416/1997 – Aplicação de Carga em Transformadores de Potência – Procedimento.
- [3] Norma ABNT NBR 5356/1993 – Transformadores de Potência - Especificação.
- [4] DUPONT, C.J.; FANTINATTI, J.R.; AIRES, J.C.; ZAIDEN, J.A. – “Ensaio de Carregamento / Aquecimento no Campo em Transformadores de Potência”. *ERLAC*, 1997.
- [5] Norma ABNT NBR 5458/1986 – Transformadores de Potência - Terminologia.
- [6] MILASCH, M. – *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*. Ed. Edgar Blücher, 1ª ed., 1984.
- [7] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers, IEEE Std. C57.91-1995
- [8] LESIEUTRE, B.C., HANGMAN, W.H., KIRTLEY Jr. J.L. “An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in an On-Line Monitoring and Diagnostic System”, *IEEE-Trans. Power Delivery*, vol 12, No1, pp.249-256, January (1997) USA.
- [9] DUPONT, C.J.; CHAVES, J.A.M.- *Metodologia para Avaliação das Condições Admissíveis de Sobrecarregamento e da Perda de Vida Útil de Transformadores*.
- [10] LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos*, Ed. Ciência Moderna Ltda, 3ª ed., 2012
- [11] PACHECO, M.A., *Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações*, 1999
- [12] PACHECO, M.A., *Notas de Aula em Computação Evolucionária*.

[13] IEEE Recommended Practice for Performing Temperature Rise Tests on Oil-Immersed Power Transformers at Loads Beyond Nameplate Ratings, IEEE Std. C57.119-2001