

Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica



Campina Grande, Paraíba
Julho de 2017

HELEM MONYELLE DE MÉLO ALVES

ANÁLISE ELETROTÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Julho de 2017

HELEM MONYELLE DE MÉLO ALVES

ANÁLISE ELETROTÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em: 27 / 07 / 2017

Professor Antônio Barbosa de Oliveira Neto, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por derramar sobre minha vida sua infinita graça imerecida.

A minha família, em especial a meus pais Matiêne e Edilson, meus queridos avós Pedro e Lourdes e minha irmã Morgana, que sempre fizeram o possível para me fornecer o apoio e auxílio que me permitiram concluir esta etapa da vida.

A meu querido amigo e colega de curso Arthur Francisco que me auxiliou na elaboração das simulações.

A meu orientador, o professor Edson Guedes, pela disponibilidade, assistência e conselhos fornecidos durante a elaboração deste trabalho.

A todos os funcionários do DEE, em especial a Adail, Tchai e José Roberto pela prestatividade e cortesia que sempre demonstraram.

“Em Deus faremos proezas”

Salmo 60:12a

RESUMO

Neste trabalho, a resposta térmica de transformadores de potência foi avaliada por meio da análise de curvas da temperatura de *hot-spot* e da temperatura de topo de óleo. As curvas de temperatura foram obtidas a partir das especificações contidas na norma IEC 60076-7. De posse dos dados, uma análise de sensibilidade foi realizada para três estudos de caso. O Estudo de Caso 1 consistiu na avaliação do comportamento térmico do transformador diante de condições normais de carga; no Estudo de Caso 2 foi simulada uma condição de sobrecarga de 120% por quatro horas e, no Estudo de Caso 3, uma sobrecarga de 140% por 30 minutos. Para a análise de sensibilidade foi escolhido variar os parâmetros do modelo térmico da IEC que tinham relação com as características de projeto do transformador. O *software* MATLAB® foi utilizado para a construção dos gráficos. Com os resultados obtidos das simulações foi possível definir quais parâmetros exercem maior influência no comportamento térmico do transformador e quantificar a influência da variação destes parâmetros.

Palavras-chave: Transformador de potência, curvas de *hot-spot*, temperatura de topo de óleo.

ABSTRACT

In this work, power transformers thermal response was evaluated through the analysis of hot-spot temperature and oil top temperature curves. The temperature curves were obtained from the specifications contained in the IEC 60076-7 standard. From the data, a sensitivity analysis was performed for three case studies. Case Study 1 consisted in evaluating the transformer thermal behavior in the presence of normal load conditions; in Case Study 2 an overload condition of 120% was simulated for four hours and in Case Study 3 an overload of 140% for 30 minutes. For the sensitivity analysis, it was chosen to vary the IEC thermal model parameters related to the transformer design characteristics. The MATLAB® software was used to plot the graphs. With the results obtained from the simulations it was possible to define which parameters exert a greater influence on the transformer thermal behavior and to quantify the influence of these parameters variation.

Keywords: Power Transformer, hot-spot curves, oil-top temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama térmico (IEC 60076-7,2005).....	10
Figura 2 – Curva de carga diária de um transformador.....	11
Figura 3 – Ciclo de carga diário considerando sobrecarga de 120% (ONS,2011, adaptado)....	13
Figura 4 – Ciclo de carga diário considerando sobrecarga de 140% (ONS,2011, adaptado)....	14
Figura 5 – Ciclo de carga diário considerando sobrecarga de 120% e 140%. (ONS,2011, adaptado)	14
Figura 6 – Curva de carga diária de um transformador.....	18
Figura 7 – Curva de carga diária de um transformador com sobrecarga de 120% por 4 horas. 19	
Figura 8 – Curva de carga diária de um transformador com sobrecarga de 140% por 30 minutos.....	19
Figura 9 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> e topo de óleo, considerando valores padrão da norma IEC.....	22
Figura 10 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de H.....	23
Figura 11 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de R.....	24
Figura 12 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de y	25
Figura 13 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de x.	25
Figura 14 – Curvas de temperatura do hot-spot para variação de T_w	26
Figura 15 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de R.....	27
Figura 16 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de T_o	27
Figura 17 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de x	28
Figura 18 – Curvas de temperatura do hot-spot e topo de óleo, considerando valores padrão da norma IEC e sobrecarga de 120% por 4 horas.....	29
Figura 19 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de H (a) e T_w (b).....	29
Figura 20 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de x (a) e y (b).....	30
Figura 21 - Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de R.	30
Figura 22 - Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de x (a) e τ_o (b)..	31
Figura 23 – Curvas de temperatura de topo de óleo para variação de R.....	31
Figura 24 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> e topo de óleo, considerando valores padrão da norma IEC e sobrecarga de 140% por 30 minutos.....	32
Figura 25 - Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de H (a) e τ_w (b)..	32
Figura 26 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de x (a) e y (b).....	33
Figura 27 – Curvas de temperatura do <i>hot-spot</i> para variação de R.....	33
Figura 28 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de x (a) e τ_o (b)..	34
Figura 29 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de R.....	34

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	
ONS	Operador Nacional do Sistema	
c	Calor específico	W·s/(kg·K)
C	Capacidade térmica	W·s/K
g	Gradiente de temperatura do enrolamento para o óleo na carga considerada	K
g_r	Gradiente de temperatura do enrolamento médio	K
m_a	Massa do núcleo e enrolamentos montados	kg
m_t	Massa do tanque e acessórios	kg
m_o	Massa do óleo	kg
m_w	Massa do enrolamento	kg
H	Fator de <i>hot-spot</i>	
k_{11}	Constante do modelo térmico	
k_{21}	Constante do modelo térmico	
k_{22}	Constante do modelo térmico	
K	Carga	pu
P	Perdas fornecidas	W
P_w	Perdas nos enrolamentos	W
R	Relação entre perdas em carga-perdas em vazio	
x	Expoente do óleo	
y	Expoente do enrolamento	
θ_a	Temperatura ambiente	°C
θ_h	Temperatura do <i>hot-spot</i>	°C
θ_o	Temperatura de topo de óleo	°C
τ_o	Constante de tempo do óleo médio	minutos
τ_w	Constante de tempo do enrolamento	minutos
$\Delta\theta_{hi}$	Gradiente do ponto mais quente em relação ao topo de óleo (início)	K

$\Delta\theta_{hr}$	Gradiente do ponto mais quente em relação ao topo de óleo	K
$\Delta\theta_{oi}$	Elevação de temperatura do topo de óleo (início)	K
$\Delta\theta_{or}$	Elevação de temperatura do topo de óleo	K
$\Delta\theta_{om}$	Elevação de temperatura do óleo médio (no tanque) na carga considerada	K

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	2
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1.	PROJETO TÉRMICO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	4
2.1.1.	Perdas em Vazio	5
2.1.2.	Perdas em Carga	5
2.1.3.	Mecanismos de Disipação de Calor	6
2.1.4.	Sistemas de Refrigeração para Transformadores com Óleo Isolante	7
2.2.	CONCEITO E DEFINIÇÃO DAS TEMPERATURAS	8
2.2.1.	Temperatura de Topo de Óleo	8
2.2.2.	Temperatura de <i>Hot-spot</i>	9
2.3.	DIAGRAMA TÉRMICO	9
2.4.	CICLO DE CARGA E CARREGAMENTO	11
3.	METODOLOGIA.....	15
3.1.	MÉTODOS DE CÁLCULO PARA TEMPERATURA DE <i>HOT-SPOT</i> E TOPO DE ÓLEO.....	15
3.1.1	Temperatura de <i>hot-spot</i>	15
3.1.2	Temperatura de Topo de Óleo.....	17
3.2.	CURVAS DE CARGA CONSIDERADAS	18
3.2.	PARÂMETROS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	19
3.2.	MATLAB	21
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	22
4.1.	ESTUDO DE CASO 1	22
4.1.1	Temperatura de <i>hot-spot</i>	23
4.1.2	Temperatura de Topo de Óleo.....	26
4.2.	ESTUDO DE CASO 2.....	28
4.2.1	Temperatura de <i>hot-spot</i>	29
4.2.2	Temperatura de Topo de Óleo.....	31
4.3.	ESTUDO DE CASO 3.....	31
4.3.1	Temperatura de <i>hot-spot</i>	32
4.3.2	Temperatura de Topo de Óleo.....	33
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos que desempenham um importante papel nos sistemas elétricos. Sua principal função é aumentar ou diminuir os níveis de tensão e corrente elétricas, mas mantendo a frequência invariável.

Devido à importância do transformador, é necessária a realização de estudos que determinem os principais fatores que influenciam o desempenho do equipamento. A vida útil dos transformadores é afetada principalmente pela deterioração dos componentes do isolamento, a qual está diretamente relacionada à idade do equipamento e à temperatura a que os materiais são submetidos. Um indicativo do perfil térmico do equipamento são os chamados pontos quentes (*hot-spots*) (SILVA, 2015).

Devido à sua complexidade construtiva e aos mecanismos de condução de calor envolvidos, a determinação do perfil de temperatura do transformador em todos os pontos é um procedimento complexo. Assim, comumente são realizados cálculos baseados em simulações computacionais e/ou aproximações analíticas para a determinação da temperatura nos pontos mais importantes do ponto de vista de esforço térmico.

Desse modo, quando o comportamento térmico de um transformador é estudado, as temperaturas de *hot-spot* e de topo de óleo são geralmente escolhidas para a análise. Temperatura de *hot-spot* é a temperatura do ponto mais quente do transformador, geralmente associada a algum dos enrolamentos. Já a temperatura do topo de óleo é a temperatura na região próxima à tampa do transformador, representando a temperatura média da última camada de óleo, que é uma das regiões de maior temperatura.

A IEC 60076-7 (2005) indica dois métodos de cálculo para a medição das temperaturas de *hot-spot* e de topo de óleo em função do tempo, considerando a variação da temperatura ambiente e da carga:

- Método de solução por equações exponenciais, o qual é aplicado a condições de variação de carga por degraus no ciclo considerado. Portanto é recomendado para determinação de transferência de calor por meio de testes realizados pelos fabricantes.
- Método de solução por equações diferenciais. Este método é mais adequado para os casos em que ocorre uma distribuição arbitrária da carga e de temperatura ambiente no tempo. Por esta característica adequa-se a sistemas de monitoramento *on-line*.

A utilização dos métodos de cálculo propostos pela norma IEC para o levantamento de curvas de temperatura em transformadores é justificada pela complexidade inerente à medição, devido à dificuldade para alocação dos sensores térmicos. Para estimar as curvas da temperatura de *hot-spot* e da temperatura do topo de óleo, a norma IEC utiliza parâmetros inerentes ao projeto do transformador, considerando também o sistema de resfriamento do equipamento. Assim, o conhecimento da influência desses parâmetros sobre o comportamento térmico do transformador é necessário para o emprego adequado do modelo.

Isto posto, neste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica será realizado um estudo eletrotérmico de um transformador de potência avaliando como os parâmetros utilizados pela norma IEC para estimação das curvas da temperatura de *hot-spot* e da temperatura do topo de óleo influenciam o comportamento térmico do transformador. Para tal, será aplicado o método de solução por equações exponenciais indicado pela IEC 60076-7.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise eletrotérmica em um transformador de potência utilizando o modelo térmico proposto pela IEC 60076-7 (2005). Para tanto, as curvas da temperatura de *hot-spot* e da temperatura do topo de óleo serão obtidas. Na sequência, será avaliado como a

variação dos fatores utilizados para o levantamento destas curvas influencia o comportamento térmico do transformador.

São objetivos específicos:

- Estudar os mecanismos de transferência de calor atuantes no transformador;
- Compreender a modelagem de cálculo proposta para o levantamento das curvas de temperatura;
- Desenvolver uma rotina computacional para implementação do algoritmo proposto pela norma;
- Estudar o comportamento térmico do transformador em condições operativas normal e de sobrecarga;
- Realizar uma análise de sensibilidade do perfil de temperatura em função da variação dos parâmetros do modelo térmico.

Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução sobre transformadores, o comportamento térmico dos mesmos e os métodos de cálculo propostos pela norma IEC para estudo da característica térmica deste equipamento. Na sequência, foram elencados os principais objetivos do trabalho.

No capítulo 2 serão apresentados os conceitos teóricos necessários à compreensão da metodologia utilizada no trabalho e à análise dos resultados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários à compreensão da metodologia utilizada no trabalho e para a análise dos resultados. Assim, são destacados os conceitos fundamentais sobre:

- Projeto térmico de um transformador de potência, destacando as perdas em vazio, perdas em carga, mecanismos de dissipação de calor e os tipos de sistemas de refrigeração para transformadores com óleo isolante (sistemas ONAN, ONAF, OFAF e ODAF).
- Conceito e definição das temperaturas de topo de óleo e *hot-spot*.
- Diagrama térmico abordado na norma IEC 60076-7 (2005) para modelagem do transformador.
- Ciclo de carga e carregamento definido pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) no módulo 2.3 do Procedimento de Rede.

2.1. PROJETO TÉRMICO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O projeto térmico de um transformador deve levar em consideração todas as fontes eletromagnéticas de perdas, as quais se convertem em calor.

As perdas totais geradas por um transformador dependem do seu carregamento, e são constituídas pelas perdas em vazio, acrescidas das perdas em carga, as quais causam elevação da temperatura. A dissipação da energia térmica produzida deve ser realizada pela transferência do calor por condução, convecção e radiação térmica, que geralmente ocorrem simultaneamente. Em alguns projetos, de modo a auxiliar a troca de calor com o ambiente, os transformadores possuem radiadores e ventiladores externos, que compõe o sistema de resfriamento forçado.

2.1.1. Perdas em Vazio

As perdas em vazio são compostas pelas perdas por histerese e as perdas por correntes de Foucault, também conhecidas como perdas parasitas.

As perdas por histerese estão relacionadas à característica não-linear do material ferromagnético do núcleo de um transformador. Elas são dependentes do tipo de material magnético empregado na fabricação e aumentam a medida que o volume do núcleo do transformador aumenta.

As perdas por correntes de Foucault ocorrem devido aos campos magnéticos variáveis no tempo que surgem no núcleo em função das correntes alternadas nos enrolamentos. A variação destes campos induz uma força eletromotriz que provoca o surgimento de correntes parasitas no material condutor do núcleo. Para minimizar as perdas parasitas deve-se diminuir a espessura da chapa e aumentar a resistividade do material que compõe o núcleo do transformador.

As perdas em vazio não dependem da demanda de carga que o transformador precisa suprir, contudo depende da amplitude e frequência da tensão aplicada ao transformador (SANTOS, 2014).

2.1.2. Perdas em Carga

As perdas em carga se devem às perdas ôhmicas nos enrolamentos e às perdas suplementares no material condutor dos enrolamentos.

As perdas ôhmicas também são conhecidas por perdas no cobre, já que os enrolamentos são comumente constituídos por condutores de cobre. Tratam-se, resumidamente, da dissipação de potência na forma de calor por efeito *Joule*. Isto ocorre em função da passagem de uma corrente por um material condutor com determinada resistência.

As perdas parasitas, por sua vez, são produzidas pelas correntes parasitas induzidas nos condutores das bobinas pelo fluxo de dispersão. A corrente, a quantidade de carga suprida e a geometria dos condutores das bobinas influenciam o valor destas perdas.

Para minimizar as perdas em carga deve-se aumentar a área da seção transversal (bitola) dos condutores dos enrolamentos (SANTOS, 2014).

2.1.3. Mecanismos de Dissipação de Calor

Os mecanismos de condução, convecção e radiação devem ser considerados na análise da transferência de calor em transformadores de potência imersos em óleo isolante.

Condução é o processo de transferência de calor em que ocorre a transferência de energia térmica entre moléculas ou átomos vizinhos de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura com o intuito de alcançar um equilíbrio térmico (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

Em transformadores de potência, a condução de calor ocorre na região central dos componentes ativos (núcleo e os enrolamentos) e entre a superfície dos componentes ativos e o óleo que está em contato direto com eles. Também ocorre transferência de calor por condução das paredes dos tanques para o ar.

A convecção se caracteriza pela transmissão de calor através do transporte da matéria, e pode ser natural ou forçada. A convecção natural ocorre no interior de líquidos ou gases e tem como causa a diferença de densidade entre partes do fluido provocada por diferenças de temperatura. Sabe-se que o fluido aquecido é menos denso que o fluido menos quente, portanto esse tende a se deslocar para cima enquanto o segundo adquire uma trajetória descendente. A convecção provoca alterações de temperatura através do movimento dos fluidos a fim de obter o equilíbrio térmico, como exposto por Xavier (2014):

Nos transformadores a transferência de calor desenvolvido pelas perdas Joule no núcleo de ferro e nos enrolamentos de cobre é absorvido e armazenado no óleo por circulação natural ou forçada, sendo dissipado para a atmosfera através das paredes do tanque, onde radiadores aumentam a dispersão de calor. A dispersão é facilitada circulando-se o óleo por trocadores de calor resfriados a água, ou por ventiladores montados diretamente sobre os radiadores. Através da convecção forçada, o óleo pode ser forçado a circular através de vários dutos existentes entre os enrolamentos e, a seguir, através de tubos de resfriamento. (XAVIER, 2014, p.45).

Por fim, tem-se a radiação, que é a transferência de calor que ocorre devido à radiação eletromagnética emitida por um corpo em qualquer temperatura. Por meio deste tipo de radiação ocorre a transferência de calor na forma de ondas eletromagnéticas. A radiação nos transformadores acontece das paredes externas do tanque e radiadores para o ar.

2.1.4. Sistemas de Refrigeração para Transformadores com Óleo Isolante

Os transformadores de potência utilizam majoritariamente o óleo como material do sistema de refrigeração principal. Por possuir baixa viscosidade, quando em contato com os enrolamentos e o núcleo, o óleo contribui para o resfriamento do transformador por meio de processos condutivos e convectivos.

Com o aquecimento, o óleo tende a ficar menos denso e se alocar na superfície superior, conhecida como o topo do transformador (onde é registrada a máxima temperatura do óleo). Em seguida, o óleo aquecido é transportado em tubulações até os radiadores (dispositivos utilizados para dissipação de calor resultante das perdas do transformador). Em sistemas de refrigeração natural ou forçada os radiadores em chapa são muito utilizados, sendo normalmente construídos com chapas dobradas em forma de favos, com estreita espessura dos canais de óleo (10 a 13 mm), pois a espessura da película de óleo que atua na convecção é pequena também (XAVIER, 2014).

Nos radiadores, o óleo é resfriado e retorna à região mais baixa do tanque do transformador. Caso a circulação natural do óleo não seja suficiente para promover o resfriamento adequado dos enrolamentos, uma ventilação auxiliar ou a circulação de água nos radiadores podem ser incorporadas ao sistema (CAVALLI, 2013).

Um transformador pode apresentar mais de um tipo de resfriamento dependendo da condição e operação do equipamento. Os tipos de resfriamento mais comuns são: ONAN, ONAF, OFAF e ODAF. Esta designação é estabelecida por meio de um código de quatro letras resumido na Tabela 1.

No sistema ONAN (óleo natural e ar natural) o calor gerado no núcleo e nos enrolamentos é transferido para outras partes do transformador e para o meio ambiente por meio de convecção natural. É o sistema de resfriamento com menor custo de operação e manutenção.

No sistema ONAF (óleo natural e ar forçado), além da convecção natural do óleo ocorre também a convecção forçada, que se caracteriza pela existência de ventiladores instalados junto aos radiadores com o intuito de forçar a circulação de ar através das aletas dos radiadores.

O sistema OFAF (óleo forçado e ar forçado) se assemelha bastante ao sistema ONAF, porém neste caso são utilizadas bombas para aumentar a movimentação do fluxo do óleo

Por fim, têm-se o sistema ODAF (óleo direcionado e ar forçado) que direciona o óleo que sai dos radiadores a passar pelas tubulações de refrigeração no interior dos enrolamentos.

Tabela 1 – Código de letras para sistema de resfriamento de transformadores.

1ª letra: Natureza do meio de resfriamento interno em contato com os enrolamentos		2ª letra: Natureza da circulação do meio de resfriamento interno	3ª letra: Meio de resfriamento	4ª letra: Natureza do meio de resfriamento externo	
O	Óleo mineral	N	Circulação natural por convecção através do sistema de resfriamento e dos enrolamentos	A Ar	N Convecção natural
		F	Circulação forçada por convecção através do sistema de resfriamento		F Convecção Forçada
		D	Circulação forçada direcionando o óleo pelo sistema refrigeração nos enrolamentos		

Fonte: CAVALLI (2013), adaptado.

2.2. CONCEITO E DEFINIÇÃO DAS TEMPERATURAS

Devido ao modo de construção do transformador, com suas fontes de calor e sistemas de resfriamento, o equipamento apresenta um perfil de aquecimento não uniforme. Desta forma, a análise dos locais com maior temperatura é suficiente para determinar o estado operativo do transformador. Normalmente, as temperaturas medidas na região do topo de óleo e do *hot-spot* são utilizadas para esta finalidade, contudo há que se notar que muitas vezes determinar o local exato do *hot-spot* é um procedimento complexo e na prática é feito após a realização de muitas medições.

2.2.1. Temperatura de Topo de Óleo

Temperatura de topo de óleo é a temperatura medida próximo à tampa do transformador. Representa a temperatura média da última camada de óleo. Na prática, a temperatura medida é uma composição entre a temperatura mais aquecida dos enrolamentos e a temperatura resfriada proveniente do sistema de refrigeração. A medição da temperatura de topo de óleo é realizada por sensores com termorresistência imersos em bolsas localizadas ligeiramente abaixo das tampas (XAVIER, 2014).

2.2.2. Temperatura de *Hot-spot*

Temperatura de *hot-spot* é o termo utilizado para descrever a temperatura do ponto mais quente do transformador. Geralmente é a temperatura medida em algum ponto dos enrolamentos. Para efeito de cálculo, é considerada como sendo a temperatura do topo de óleo, acrescida do gradiente de temperatura do enrolamento em relação ao topo de óleo, utilizando um fator de ajuste chamado fator de *hot-spot*.

2.3. DIAGRAMA TÉRMICO

A norma IEC 60076-7 determina que as temperaturas de *hot-spot* e de topo de óleo podem ser calculadas considerando o diagrama térmico da Figura 1, desde que algumas premissas sejam obedecidas:

- A temperatura ambiente deve ser constante para qualquer altura do enrolamento e considerada a média das temperaturas externas;
- A temperatura do óleo que circula na parte inferior do enrolamento é igual a temperatura do óleo na saída dos radiadores ou trocadores de calor;
- A temperatura do óleo na saída de cada enrolamento é igual à temperatura do topo do óleo, para o caso de transformadores com óleo natural e dirigido, principalmente;
- A temperatura do óleo aumenta ao longo da altura dos enrolamentos, embora isso nem sempre seja correto devido à

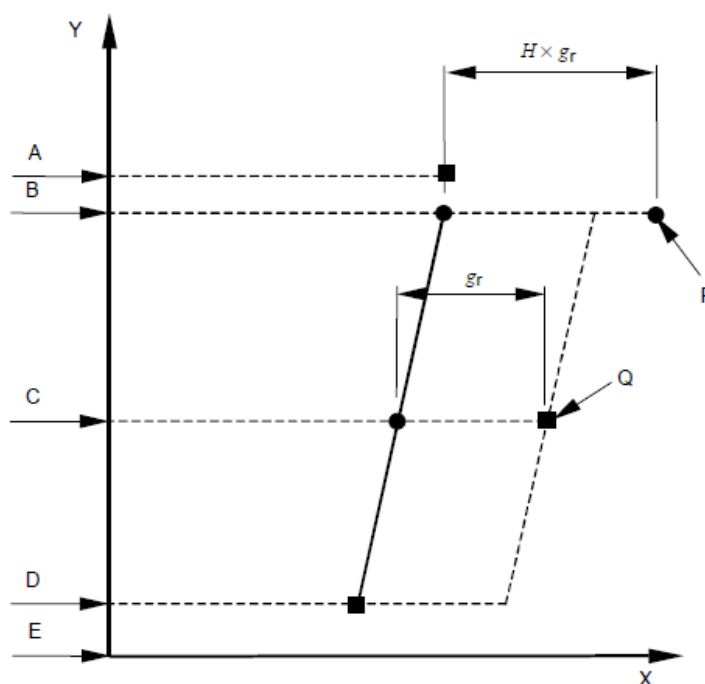
existência de perdas parasitas que podem gerar pontos mais quentes no topo e no final do enrolamento;

- O gradiente do enrolamento é a diferença entre a elevação de temperatura de cada enrolamento (determinado pela medição da resistência elétrica no ensaio de aquecimento) e a elevação de temperatura do óleo.

Desta forma, o gradiente permanece constante ao longo da altura do enrolamento. Assim, um gráfico linear é considerado para a temperatura do condutor e outro gráfico paralelo para a temperatura do óleo.

Na prática, devido aos condutores dos enrolamentos mais internos possuírem temperaturas maiores, além da existência de níveis relativamente altos de perdas parasitas próximas ao final do enrolamento, a temperatura do ponto mais quente do enrolamento é maior do que a soma entre a temperatura do topo de óleo e o gradiente de temperatura. Assim, considera-se um fator de *hot-spot* H , que depende do projeto do transformador, e irá compensar a influência das perdas parasitas e demais inconsistências do modelo, permitindo assim um valor mais realista para temperatura de *hot-spot*. O valor do fator de *hot-spot* pode variar para cada enrolamento, a depender do projeto do enrolamento, impedância de curto-circuito e tamanho do transformador.

Figura 1 – Diagrama térmico.



Fonte: IEC 60076-7 (2005).

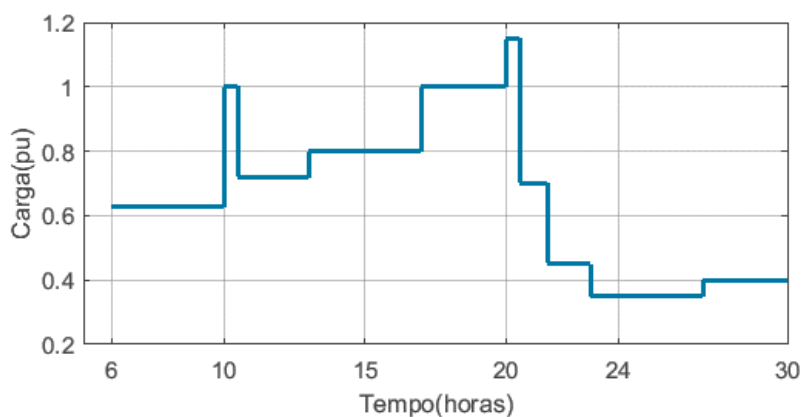
Na Figura 1, tem-se:

- A = Temperatura do topo do óleo (medida);
- B = Temperatura do óleo na parte superior do enrolamento;
- C = Temperatura média do óleo;
- D = Temperatura do óleo na parte inferior do enrolamento;
- E = Fundo do tanque;
- g_r = Gradiente da temperatura do enrolamento média e óleo médio;
- H = Fator de *hot-spot*;
- P = Temperatura de *hot-spot*;
- Q = Temperatura do enrolamento média (medida).

2.4. CICLO DE CARGA E CARREGAMENTO

Nos sistemas elétricos de potência, a demanda de carga apresenta comportamento irregular em relação ao tempo, com uma componente estocástica (SALGADO, 2014). O transformador deve ser projetado de modo a ter capacidade para suprir toda e qualquer variação de carga. Na Figura 2 é mostrada uma aproximação da curva de carga típica diária de um transformador de potência. Há que se notar que o horário de pico correspondente às 20 horas é o que possui maior demanda de carga e, portanto, representa o período no qual o transformador está submetido ao maior esforço térmico.

Figura 2 – Curva de carga diária de um transformador.



Fonte: O próprio autor.

O ONS define no módulo 2.3 do seu Procedimento de Rede (ONS, 2011) que o transformador deve continuar operando em boas condições mesmo diante da ocorrência de sobrecargas. De fato, as condições operativas listadas a seguir são exigidas.

- 1- As unidades transformadoras de potência devem ser capazes de operar com as suas potências nominais, em regime permanente, para toda a faixa operativa de tensão definida na Tabela 2, tanto no primário quanto no secundário. Caso possuam comutadores de derivação, sejam eles em carga ou não, a referida faixa operativa deverá ser atendida para todas as posições desses comutadores.
- 2- As unidades transformadoras de potência devem ser especificadas e dimensionadas para vida útil estabelecida em regulamento da ANEEL.
- 3- A unidade transformadora de potência deve ser dimensionada para três situações distintas: carregamento em condição normal de operação, carregamento em condição de emergência de curta duração e carregamento em condição de emergência de longa duração.
- 4- A transmissora deve garantir que, em condição normal de operação, a unidade transformadora possa operar continuamente desde sua entrada em operação e ao longo de toda a vida útil com carregamento de 100% da potência nominal.
- 5- A transmissora deve garantir que, em condição de emergência de curta duração e de longa duração, a unidade transformadora possa operar sempre que solicitada pelo ONS desde sua entrada em operação e ao longo de toda a vida útil nas condições operativas descritas a seguir:
 - a) Carregamento de 120% da potência nominal por período de 4 (quatro) horas do seu ciclo diário de carga para a expectativa de perda de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores. A referida sobrecarga de 20% deve poder ser alcançada para qualquer condição prévia de carregamento do transformador no seu ciclo diário de carga;
 - b) Carregamento de 140% da potência nominal por período de 30 (trinta) minutos do seu ciclo diário de carga para a expectativa de perda de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores. A referida sobrecarga de 40% deve poder ser alcançada para qualquer condição prévia de carregamento do transformador no seu ciclo diário de carga.
 - c) Os carregamentos de 120% e 140% podem ocorrer dentro do mesmo ciclo diário.

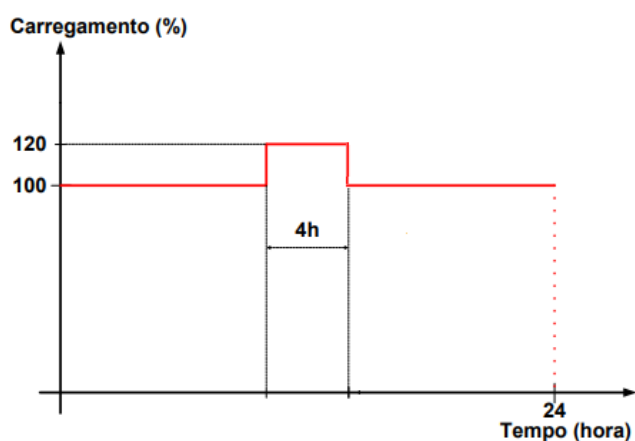
Tabela 2 – Tensão máxima em regime permanente.

Tensão Nominal do Sistema (kV)	Tensão Máxima (kV fase-fase, eficaz)
13,8	14,5
34,5	36,5
69	72,5
88	92,4
138	145
230	242
345	362
440	460
500 ou 525	550
765	800

Fonte: ONS (2011).

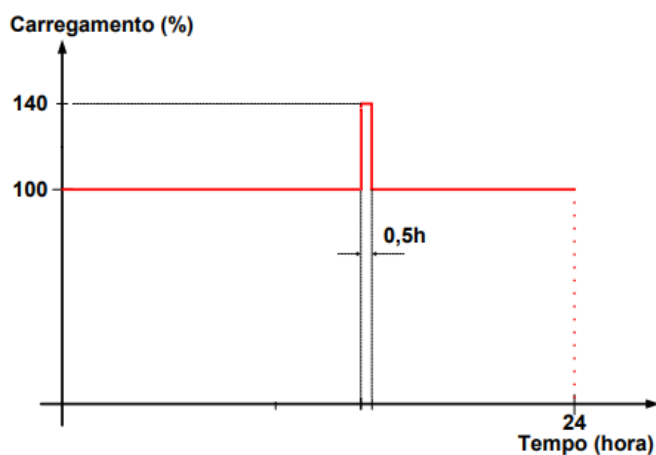
Na Figura 3 é ilustrada a situação em que o transformador deve operar em situação de sobrecarga de 120% por 4 horas. Na Figura 4 é ilustrado o ciclo de carga diário considerando uma sobrecarga de 140% por 30 minutos. Por fim, na Figura 5 é apresentada a situação em que há sobrecargas de 120% e 140% no mesmo ciclo diário. Convém destacar que, segundo o ONS (2011), o transformador deve ser projetado para suportar qualquer destas situações de sobrecarga independente da ordem em que as mesmas apareçam.

Figura 3 – Ciclo de carga diário considerando sobrecarga de 120%.



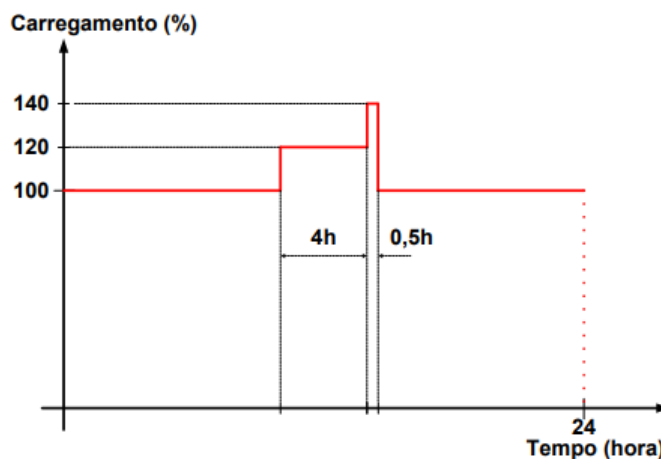
Fonte: ONS (2011), adaptado.

Figura 4 – Ciclo de carga diário considerando sobrecarga de 140%.



Fonte: ONS (2011), adaptado.

Figura 5 – Ciclo de carga diário considerando sobrecarga de 120% e 140%.



Fonte: ONS (2011), adaptado.

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos necessários para o bom entendimento do trabalho. As principais fontes de perdas no transformador foram descritas, bem como os mecanismos de dissipação de calor e os principais sistemas de refrigeração adotados. As definições do ONS para as situações de sobrecarga que o transformador deve suportar foram apresentadas.

No capítulo seguinte será feita uma descrição da metodologia utilizada para a obtenção dos resultados propostos.

3. METODOLOGIA

A norma IEC 60076-7 (2005) apresenta em seu escopo diretrizes para obtenção das curvas de temperatura de *hot-spot* e de topo de óleo de um transformador considerando-se uma carga variável. De posse destas diretrizes, o comportamento térmico do transformador pode ser determinado. Para tanto, os procedimentos ou métodos descritos na IEC devem ser obedecidos.

A seguir são apresentados os métodos da determinação de temperatura de acordo com a IEC, bem como as curvas de carga consideradas para os três estudos de caso, os parâmetros escolhidos para a análise de sensibilidade e uma breve descrição do software MATLAB®, plataforma computacional em que as temperaturas foram calculadas e os gráficos construídos.

3.1. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE *HOT-SPOT* E DE TOPO DE ÓLEO

O método de solução por equações exponenciais apresentado pela IEC 60076-7 (2005) é aplicado a condições de variação de carga por degraus no ciclo considerado, portanto é recomendado para determinação de transferência de calor por testes pelos fabricantes.

3.1.1. Temperatura de *hot-spot*

Para o cálculo da temperatura de *hot-spot*, as informações de projeto do transformador, a temperatura ambiente e a variação de carga devem ser consideradas. Para um fator de carga K são definidas as equações de aquecimento Equação 1, e de resfriamento Equação 2:

$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{oi} + \left\{ \Delta\theta_{or} \left[\frac{1+RK^{21}}{1+R} \right]^x - \Delta\theta_{oi} \right\} f_1(t) + \Delta\theta_{hi} + \{ \Delta\theta_{hr} K^y - \Delta\theta_{hi} \} f_2(t) \quad (1)$$

e

$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{or} + \left\{ \Delta\theta_{oi} - \Delta\theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x \right\} f_3(t) + \Delta\theta_{hr} K^y \quad (2)$$

Em que:

$$f_1(t) = (1 - e^{-(t)/(k_{11}\tau_o)}), \quad (3)$$

$$f_2(t) = k_{21} (1 - e^{-(t)/(k_{22}\tau_w)}) - (k_{21} - 1) (1 - e^{-(t)/(\tau_o/k_{22})}) \quad (4)$$

e

$$f_3(t) = (e^{-(t)/(k_{11}\tau_o)}). \quad (5)$$

A função $f_1(t)$ está relacionada ao aumento da temperatura de topo de óleo. A função $f_2(t)$ determina o gradiente de temperatura de *hot-spot* sobre a temperatura do topo de óleo no regime permanente, e a função $f_3(t)$ representa a forma e contribuição do decaimento da temperatura do topo de óleo.

De acordo com a IEC, $\Delta\theta_{hr}$ pode ser escrito como o produto entre o fator de *hot-spot* H e uma constante fixa que representa o gradiente de temperatura do enrolamento médio – óleo médio (no tanque).

Na Tabela 3, os significados físicos das constantes utilizadas nas expressões acima são resumidos.

Tabela 3 – Constantes utilizadas na modelagem térmica.

Constante	Significado	Unidade
θ_h	Temperatura de <i>hot-spot</i>	°C
θ_a	Temperatura ambiente	°C
$\Delta\theta_{oi}$	Elevação de temperatura do topo do óleo (no tanque) no início	K
$\Delta\theta_{or}$	Elevação de temperatura do topo do óleo (no tanque) em regime permanente	K
R	Relação entre perdas em carga-perdas em vazio	-
K	Carga	pu
x	Expoente do óleo	-

$\Delta\theta_{hi}$	Gradiente do ponto mais quente em relação ao topo de óleo (início)	K
$\Delta\theta_{hr}$	Gradiente do ponto mais quente em relação ao topo de óleo	K
y	Expoente do enrolamento	-
$\Delta\theta_{or}$	Elevação de temperatura do topo de óleo	K
k_{11}, k_{21}, k_{22}	Constantes do modelo térmico	-
T_o	Constante de tempo de óleo médio	minutos
T_w	Constante de tempo de óleo médio	minutos

Fonte: IEC 60076-7 (2005).

3.1.2. Temperatura de Topo de Óleo

Analogamente, para o cálculo da temperatura de topo de óleo e para um fator de carga K são definidas as equações de aquecimento Equação 6, e de resfriamento Equação 7:

$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{oi} + \left\{ \Delta\theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x - \Delta\theta_{oi} \right\} f_1(t) \quad (6)$$

e

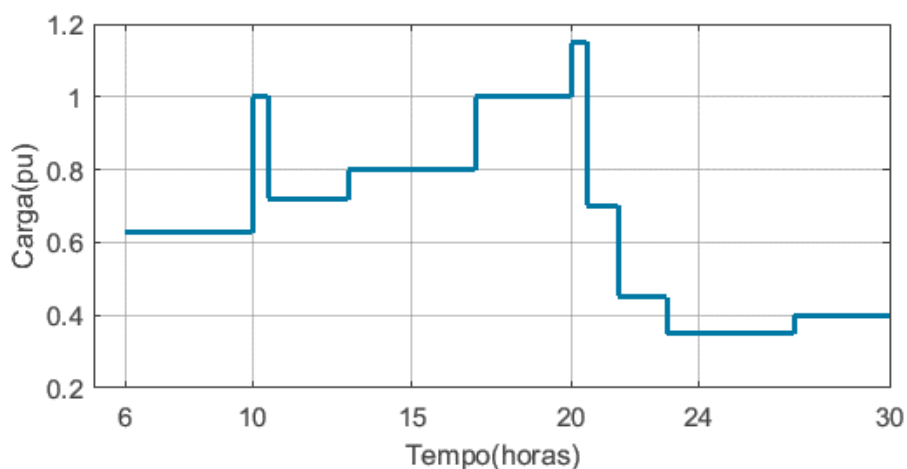
$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{or} + \left\{ \Delta\theta_{oi} - \Delta\theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x \right\} f_3(t) \quad (7)$$

Convém destacar que, no caso da determinação da temperatura de topo de óleo, algumas constantes não são utilizadas. São estas o fator de *hot-spot* H, incluso no valor de $\Delta\theta_{hr}$, e a constante de enrolamento y.

3.2. CURVAS DE CARGA CONSIDERADAS

Para a análise do comportamento térmico do transformador foram considerados três estudos de caso. No Estudo de Caso 1 foi definida uma curva simulando a operação do transformador em condições normais de carregamento, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Curva de carga diária de um transformador.

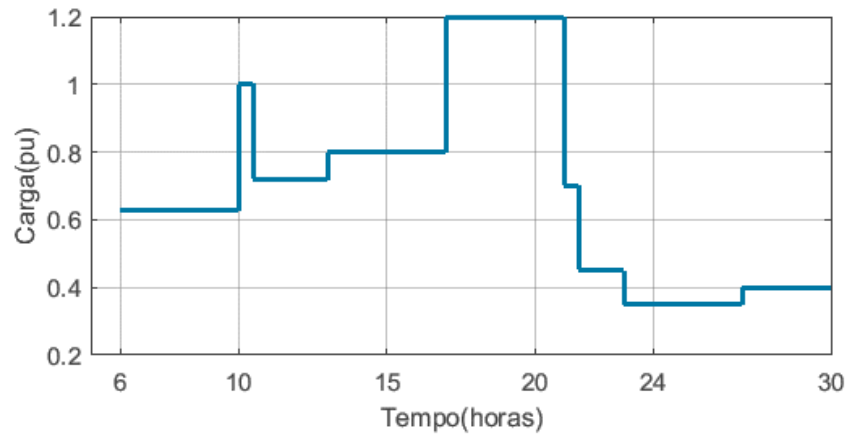


Fonte: O próprio autor.

No Estudo de Caso 2, é simulada uma condição de sobrecarga de 120% de acordo com a orientação do ONS, como apresentado na Figura 7. Foi escolhido o horário de pico entre 17 horas e 21 horas para a sobrecarga de modo que o estudo fosse o mais próximo possível da realidade. Por fim, no Estudo de Caso 3 é considerada uma sobrecarga de 140% com duração de 30 minutos também de acordo com a orientação feita pelo ONS, na Figura 8 é mostrada a representação deste caso.

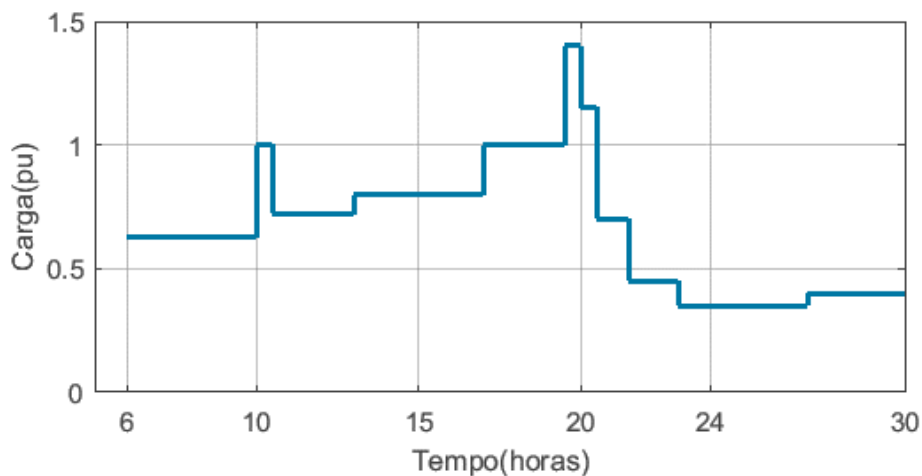
Nas simulações, o transformador foi considerado operando normalmente em regime de resfriamento ONAN e, durante o horário de pico, o regime de resfriamento foi alterado para ONAF.

Figura 7 – Curva de carga diária de um transformador com sobrecarga de 120% por 4 horas.



Fonte: O próprio autor.

Figura 8 – Curva de carga diária de um transformador com sobrecarga de 140% por 30 minutos.



Fonte: O próprio autor.

3.3. PARÂMETROS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Alguns dos parâmetros utilizados para o levantamento das curvas de temperatura possuem uma faixa de variação indicada na norma IEC, a qual depende das características de projeto do transformador. Esses parâmetros foram escolhidos para o estudo de sensibilidade e são descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Constantes utilizadas na análise de sensibilidade.

Constante	Limite Inferior	Valor padrão	Limite Superior
R	6	6	6
x	0,8	0,8	1,3
y	1,3	1,3	2,0
τ_o	90	210 (ONAN) - 150 (ONAF)	210
τ_w	7	10 (ONAN) - 7 (ONAF)	10
H	1,0	1,3	2,1

Fonte: IEC 60076-7 (2005), adaptado.

O parâmetro R depende da relação entre as perdas em carga e as perdas em vazio, e quantifica as perdas no núcleo magnético. Um menor valor de R indica um aumento nas perdas no núcleo.

As constantes x e y variam de acordo com o tipo de sistema de resfriamento do transformador. Quanto mais forçado for o sistema de resfriamento maiores serão os valores de x e y .

O fator de *hot-spot* H depende do porte do transformador, portanto quanto maior a potência do transformador maior será o valor de H .

A constante de tempo τ_o é obtida a partir da Equação 8 para sistemas com resfriamento ONAN e ONAF e da Equação 9 para sistemas com resfriamento ODAF e OFAF.

$$\tau_o = \frac{60 \cdot (0,132m_a + 0,0882m_t + 0,400m_o) \Delta\theta_{om}}{P} \quad (8)$$

$$\tau_o = \frac{60 \cdot [0,132(m_a + m_t) + 0,580m_o] \Delta\theta_{om}}{P} \quad (9)$$

Em que:

m_a = massa do cobre;

m_t = massa do tanque;

m_o = massa do óleo;

P = perdas fornecidas.

Por fim, a constante de tempo τ_w relacionada à temperatura de *hot-spot* é obtida a partir da Equação 10.

$$\tau_w = \frac{m_w c g}{60 P_w} \quad (10)$$

Em que:

m_w = massa dos enrolamentos;

c = calor específico;

P_w = perdas nos enrolamentos.

3.4. MATLAB

MATLAB^{®1} (MATrix LABoratory) é uma plataforma interativa para cálculo numérico e programação, sendo também considerado como uma linguagem de *script* de alto nível. O MATLAB[®] integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em um ambiente em que problemas e soluções são expressos utilizando linguagem mais voltada para a matemática do que a programação tradicional.

Pode-se utilizar o MATLAB[®] como calculadora ou como linguagem de programação, com uma lógica similar ao C/C++, porém voltado à linguagem matemática. O *software* conta com ferramentas para a criação e manipulação de matrizes, como seu próprio nome indica, e tem como principais funções: construção de gráficos e compilação de funções, manipulação de funções específicas de cálculo e variáveis simbólicas (ANDRADE, 2016).

Neste trabalho, foram realizadas rotinas no *software* para cálculo das temperaturas de acordo com o método proposto pela IEC 60076-7 e em seguida os gráficos das curvas de temperatura foram gerados.

¹MATLAB é marca registrada da *TheMathWorks*.

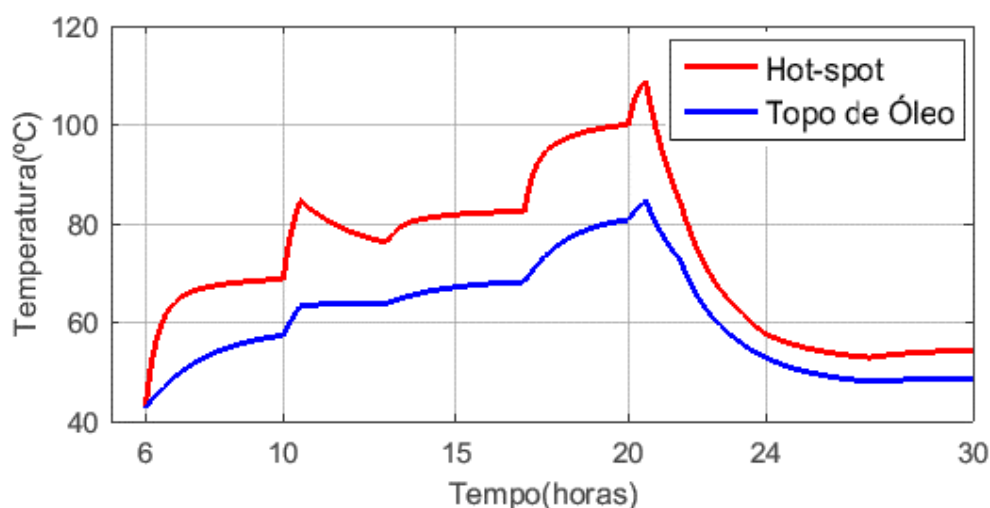
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentadas as curvas de temperatura obtidas utilizando o método de cálculo proposto pela norma IEC 60076-7. As curvas de temperatura foram obtidas para três Estudos de Caso, que consideraram diferentes curvas de carga.

4.1. ESTUDO DE CASO 1

Para o Estudo de Caso 1 foi considerada a curva de carga típica de um transformador de potência representada na Figura 6. Foi considerado que, das 17 horas até as 23 horas (horário de pico), o transformador funcionava de acordo com o sistema de resfriamento ONAF. No restante do período em análise, o sistema ONAN foi adotado. Na Figura 9 são mostradas as curvas de temperatura do *hot-spot* (curva em vermelho) e do topo de óleo (curva em azul) utilizando os valores padrão determinados pela norma IEC (Tabela 4).

Figura 9 – Curvas de temperatura do *hot-spot* e topo de óleo, considerando valores padrão da norma IEC.



Fonte: O próprio autor.

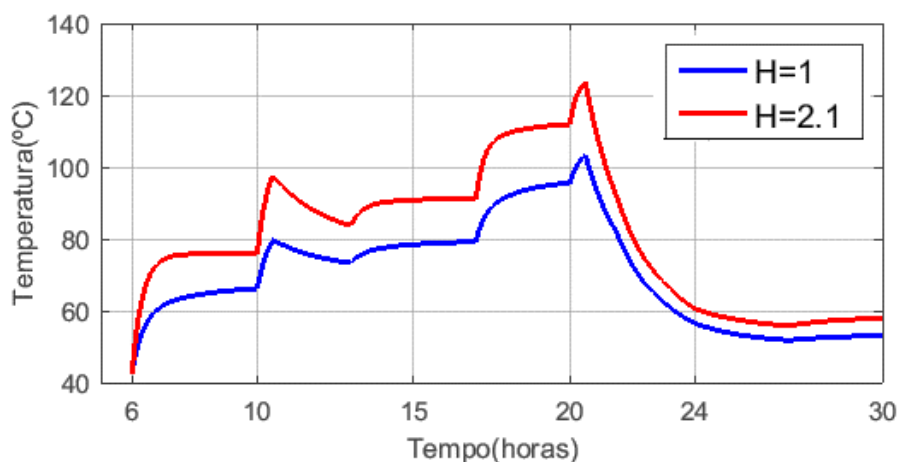
Da análise da curva percebe-se que a temperatura máxima no *hot-spot* atingiu aproximadamente 110°C, enquanto que no topo de óleo o valor máximo foi próximo de 85°C. Durante a madrugada, quando a exigência de carga é menor, constata-se que tanto o *hot-spot* quanto o topo de óleo resfriam e apresentam valores de temperatura próximos de 50°C.

4.1.1. Temperatura de *hot-spot*

Considerando a curva de carga da Figura 6, deu-se início à análise de sensibilidade. O objetivo é determinar a influência das variações dos parâmetros da Tabela 4 nas curvas de temperatura do *hot-spot*. No tópico seguinte as curvas de temperatura do topo de óleo são analisadas.

Na Figura 10 são apresentadas as curvas de temperatura do *hot-spot* obtidas por meio da variação do fator H.

Figura 10 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de H.



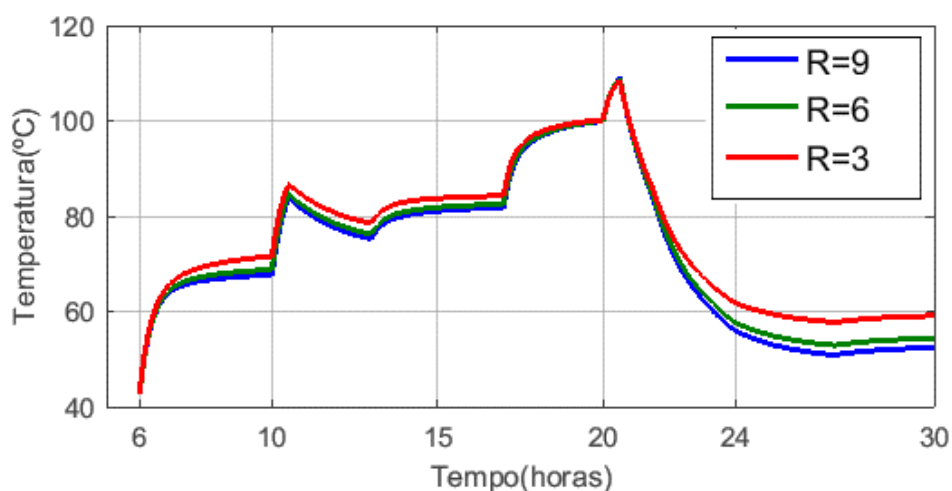
Fonte: O próprio autor.

Da análise da Figura 10 constata-se que, quanto maior o valor de H, menor a taxa de transferência de calor e maior a temperatura do *hot-spot*. O aumento de H provocou um aumento de temperatura de aproximadamente 20°C entre os dois casos simulados. Como o fator H está relacionado ao porte do transformador, um aumento em seu valor significa um aumento no volume dos materiais e maior capacidade térmica do transformador.

Na Figura 11 é mostrado o comportamento da temperatura de *hot-spot* diante da variação do parâmetro R, o qual é a relação entre as perdas em carga

e as perdas em vazio. Como a norma IEC não definia valores mínimos e máximos para R, o valor padrão foi variado em 50% para mais e para menos, ou seja, foi feita a análise considerando R = 6 (padrão), R = 3 (50% menos) e R = 9 (50% mais).

Figura 11 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de R.

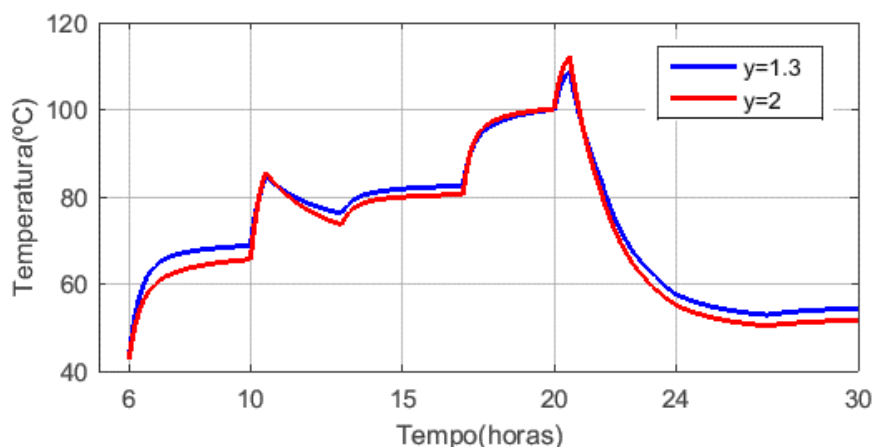


Fonte: O próprio autor.

Da análise das curvas da Figura 11, é possível constatar que a diminuição da relação R representa um aumento das perdas em vazio, que são essencialmente as perdas no núcleo. Assim, ocorre uma elevação da temperatura do transformador. Entretanto, mesmo com uma variação de $\pm 50\%$ na relação, a máxima temperatura atingida no ciclo diário simulado foi semelhante para os três casos. A maior diferença de temperatura foi registrada na etapa final de resfriamento. Para R = 3 a temperatura registrada foi de $59,1^{\circ}\text{C}$, para R = 6, $54,3^{\circ}\text{C}$ e para R = 9 uma temperatura de $52,4^{\circ}\text{C}$.

Os resultados referentes ao estudo da variação da constante y são mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Curvas de temperatura do hot-spot para variação de y .

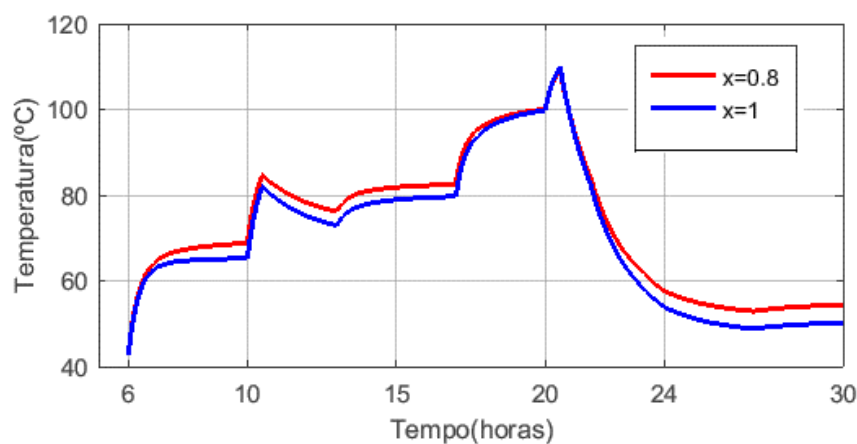


Fonte: O próprio autor.

Por meio da análise da Figura 12, foi constatado que a curva obtida com o maior valor de y ($y = 2$) apresentou uma faixa de variação de temperatura maior, com maior valor de temperatura máxima (112°C) e menor valor de temperatura no final da simulação ($51,7^{\circ}\text{C}$) se comparado ao menor valor de y ($y = 1,3$). Isso é compreensível, dado que quanto mais artificial o sistema de convecção, mais eficiente é o resfriamento, embora sistemas de convecção forçada sejam mais caros do ponto de vista da instalação e manutenção. A constante y é relacionada ao tipo de sistema de resfriamento. Quanto maior o valor de y , mais artificial é o sistema de convecção.

Analogamente ao estudo feito com o valor de y , os efeitos da variação do expoente x são mostrados na Figura 13.

Figura 13 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de x .

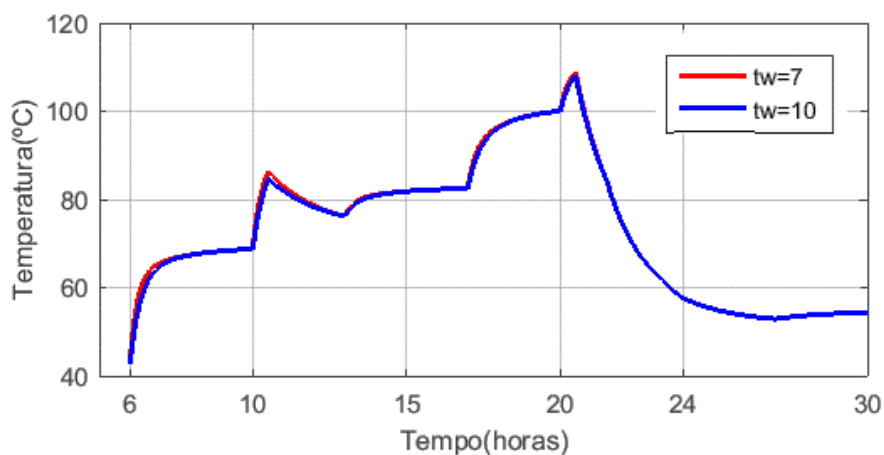


Fonte: O próprio autor.

A análise da Figura 13 mostrou que, quanto maior o valor de x , menor o perfil de temperatura em regime. Entretanto, a diferença da temperatura no final da simulação foi pequena, sendo de apenas 4,2°C. Além disso, o valor de pico da temperatura foi praticamente igual para ambos os valores de x empregados. A constante x , assim como y , está relacionada ao tipo de sistema de resfriamento. Quanto maior o valor de x , mais forçado é o sistema de resfriamento do transformador.

Na Figura 14 os resultados referentes à variação do parâmetro τ_w são apresentados.

Figura 14 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de τ_w .



Fonte: O próprio autor.

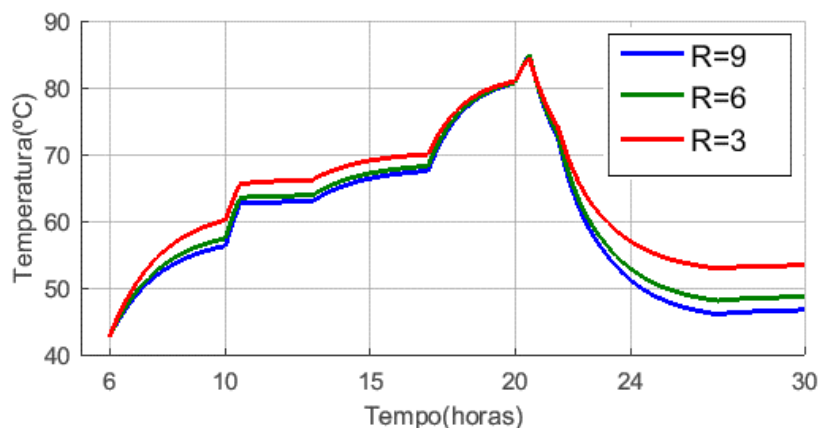
Na norma IEC, o máximo valor admissível para τ_w é 10 e o mínimo valor é 7. Como pode ser visto na Figura 14, a variação deste parâmetro dentro dos limites estabelecidos pela norma não provocou alteração mensurável na curva de temperatura do *hot-spot*. A curva azul para $\tau_w = 10$ se sobrepôs à curva vermelha para $\tau_w = 7$. É importante destacar que τ_w é uma constante de tempo que depende das características físicas do enrolamento do transformador.

4.1.2. Temperatura de Topo de Óleo

Dentre as constantes escolhidas da Tabela 4, as únicas cuja variação modifica a curva da temperatura de topo de óleo são: R , τ_o e x . Os resultados da variação destes parâmetros são analisados nesta seção. As curvas de

temperatura obtidas no estudo de sensibilidade com a relação R são mostradas na Figura 15.

Figura 15 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de R.

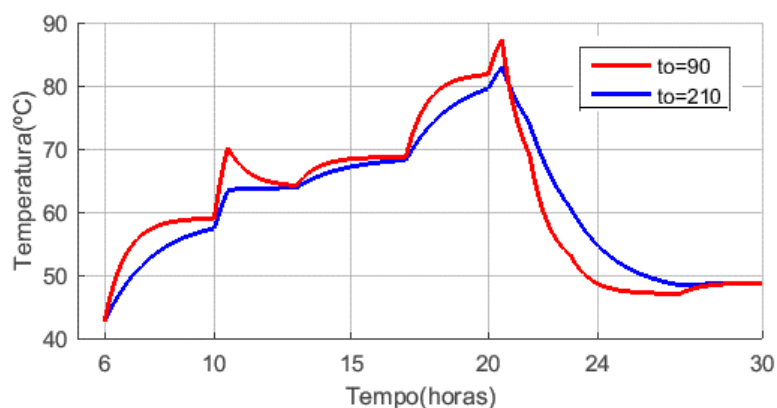


Fonte: O próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 15, e analogamente ao que aconteceu com a curva de temperatura do *hot-spot*, quanto menor o valor de R e, conseqüentemente, maior o valor das perdas em vazio, maiores foram os valores de temperatura registrados. Para os três valores de R considerados o valor de temperatura máximo foi semelhante, contudo na etapa final do resfriamento a maior diferença de temperatura entre as curvas foi registrada. De fato, para R = 3 a temperatura alcançou 53,36°C, enquanto que para R = 6 a temperatura foi de 48,64°C e de 46,68°C para R = 9.

Na Figura 16 é mostrada a influência da variação do parâmetro τ_0 nas curvas de temperatura do topo de óleo do transformador.

Figura 16 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de τ_0 .

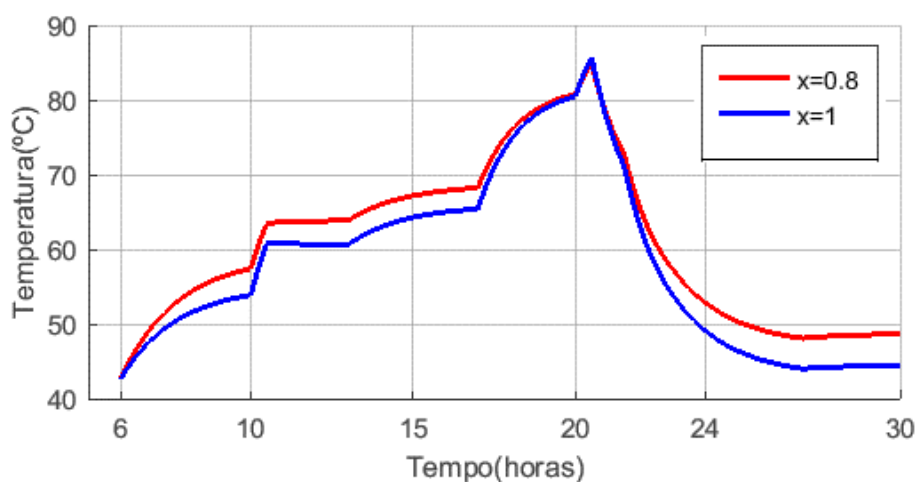


Fonte: O próprio autor.

Observa-se que um valor menor de τ_0 acarretou em um aumento na velocidade de propagação de calor, de modo que a temperatura máxima obtida na simulação foi maior e tanto os aquecimentos quanto os resfriamentos ocorreram mais rapidamente. Deve-se destacar que a constante τ_0 depende das características físicas do óleo.

Na Figura 17 são mostradas curvas de temperatura para o topo de óleo considerando a variação do parâmetro x .

Figura 17 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de x .



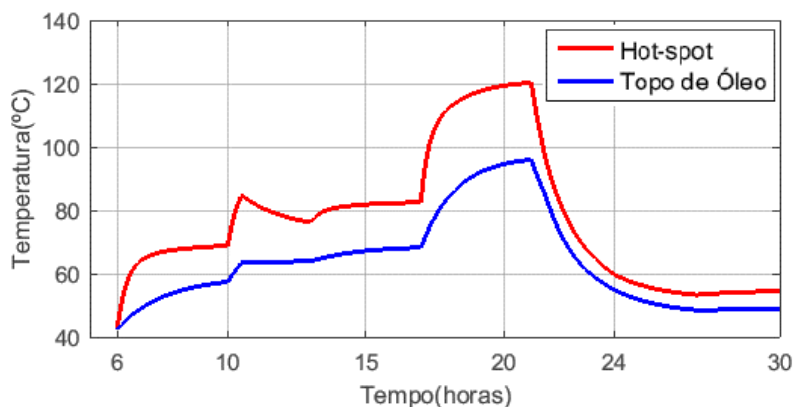
Fonte: O próprio autor.

Como exposto anteriormente, este parâmetro é relacionado ao tipo de sistema de resfriamento. Como era esperado, o aumento do valor de x provoca uma queda de temperatura maior na etapa final da simulação, pois quanto maior o valor de x mais forçado é o sistema de resfriamento.

4.2. ESTUDO DE CASO 2

Nesta seção são apresentados os resultados do Estudo de Caso 2, no qual foi simulada a curva de carga de um transformador de potência submetido a uma sobrecarga de 120% durante 4 horas representada na Figura 7. Na Figura 18 é mostrado o comportamento térmico do transformador utilizando os valores padrão determinados pela norma IEC (Tabela 4).

Figura 18 – Curvas de temperatura do *hot-spot* e topo de óleo, considerando valores padrão da norma IEC e sobrecarga de 120% por 4 horas.



Fonte: O próprio autor.

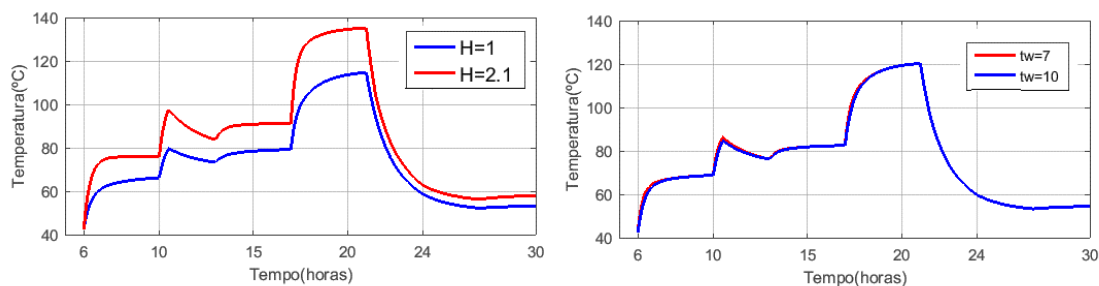
Da análise da Figura 18, observa-se que houve um aumento de temperatura tanto do *hot-spot* (valor máximo de 120°C) quanto do topo de óleo (valor máximo de 95°C) em comparação com as curvas de temperatura obtidas usando um ciclo de carga típico (Figura 9). Entretanto, no regime do final da simulação, os valores de temperatura tanto do *hot-spot* (54,4°C) quanto do topo de óleo (48,7°C) foram semelhantes aos valores obtidos para o Estudo de Caso 1 (Figura 9).

4.2.1. Temperatura de *hot-spot*

Analogamente ao Estudo de caso 1, foi realizada uma análise de sensibilidade com o intuito de determinar a influência das variações dos parâmetros da Tabela 4 nas curvas de temperatura do *hot-spot*.

O efeito da variação dos parâmetros H e τ_w na resposta térmica do transformador é mostrado nos gráficos da Figura 19.

Figura 19 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de H (a) e τ_w (b).



(a)

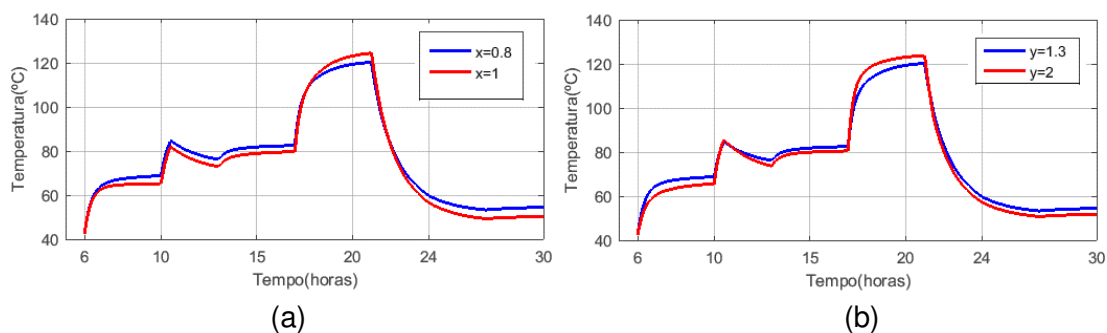
(b)

Fonte: O próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 19, as variações das constantes H e τ_w influenciaram as curvas de temperatura do mesmo modo observado no Estudo de Caso 1, ou seja, o valor maior de H contribuiu para que a temperatura atingisse um valor elevado em comparação com o menor valor de H . O gradiente de temperatura entre os dois casos simulados foi de 20°C . Contudo, devido à sobrecarga de 120%, os valores máximos de temperatura foram maiores do que os verificados no Estudo de Caso 1, (135°C para $H = 2,1$ e 114°C para $H = 1$).

O efeito da variação dos parâmetros x e y na resposta térmica do transformador é mostrado nos gráficos da Figura 20.

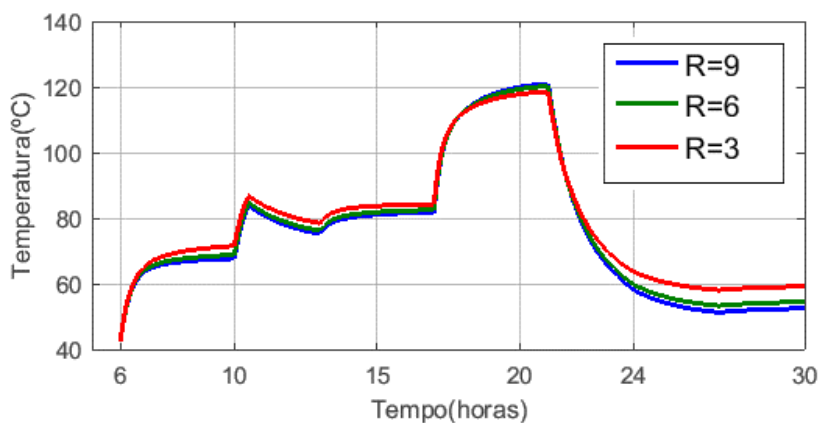
Figura 20 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de x (a) e y (b).



Fonte: O próprio autor.

Como é possível observar na Figura 20, o aumento das constantes x e y modificou a curva de resfriamento do transformador da mesma forma como ocorreu no Estudo de Caso 1. Por fim, na Figura 21 são mostradas as curvas de temperatura do *hot-spot* obtidas em função da variação do parâmetro R .

Figura 21 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de R .

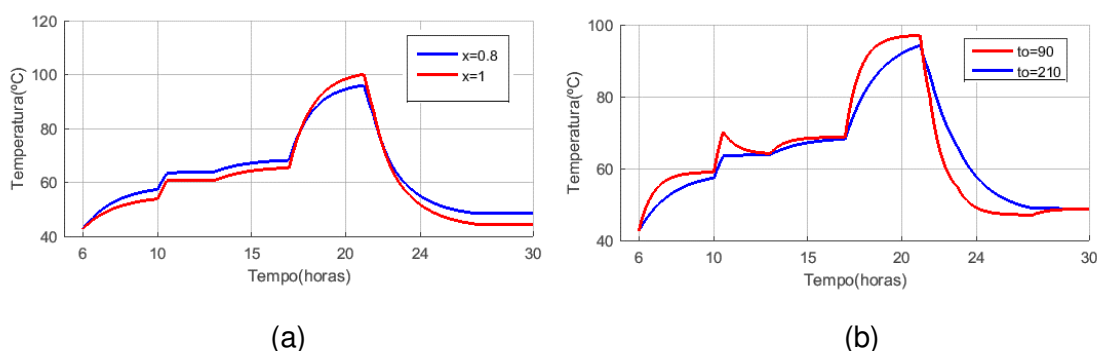


Fonte: O próprio autor.

4.2.2. Temperatura de Topo de Óleo

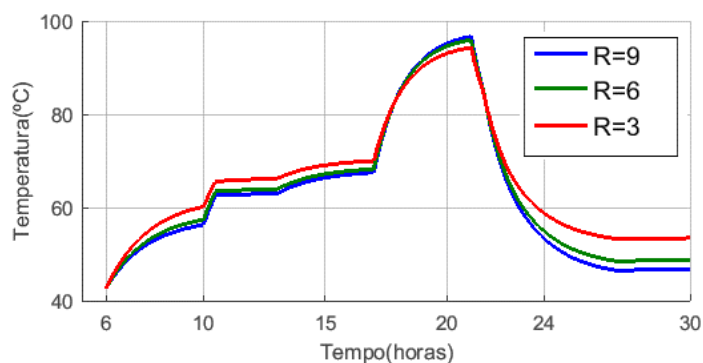
Da mesma forma do Estudo de Caso 1, as constantes escolhidas da Tabela 4 para variação foram: R , τ_0 e x . As análises do Estudo de Caso 1 continuam válidas para este modelo. Os resultados são mostrados nas Figuras 22 e 23. Mais uma vez, destaca-se que a diferença consiste no aumento dos valores máximos de temperatura em função da sobrecarga de 120%.

Figura 22 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de x (a) e T_0 (b).



Fonte: O próprio autor.

Figura 23 – Curvas de temperatura de topo de óleo para variação de R .

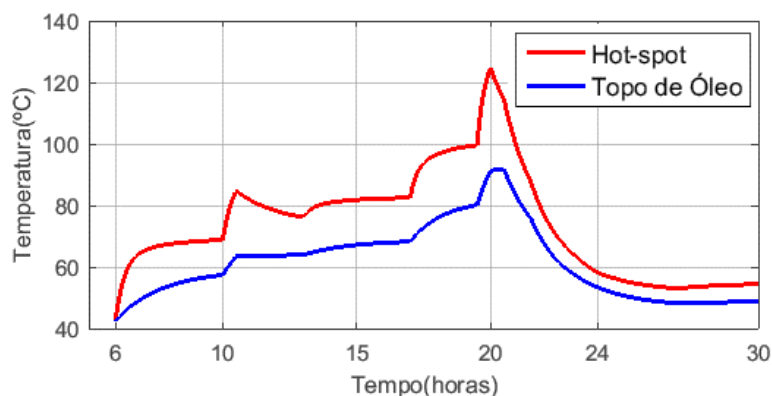


Fonte: O próprio autor.

4.3. ESTUDO DE CASO 3

Por fim, são apresentados os resultados para o Estudo de Caso 3, no qual foi considerada a curva de carga de um transformador de potência submetido a uma sobrecarga de 140% durante 30 minutos, representada na Figura 8. A resposta térmica do transformador utilizando os valores padrão determinados pela norma IEC (Tabela 4) é mostrada nos gráficos da Figura 24.

Figura 24 – Curvas de temperatura do *hot-spot* e topo de óleo, considerando valores padrão da norma IEC e sobrecarga de 140% por 30 minutos.



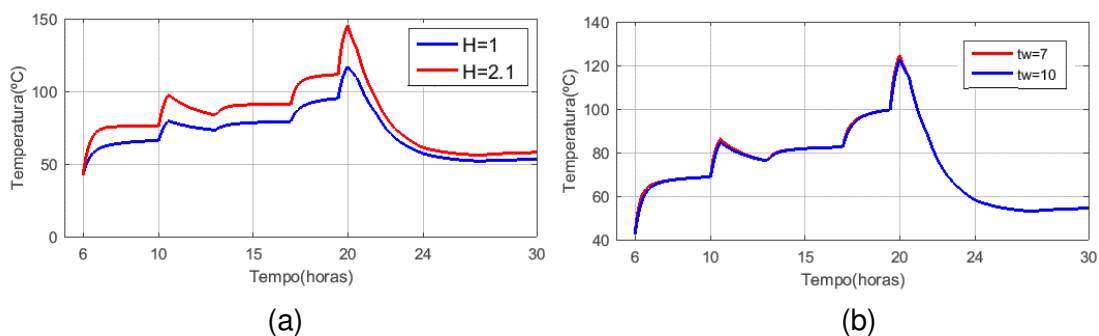
Fonte: O próprio autor.

Da análise da Figura 24, observa-se que houve um aumento de temperatura tanto do *hot-spot* quanto do topo de óleo em comparação com as curvas de temperatura obtidas usando um ciclo de carga típico (Estudo de Caso 1). Porém, em relação a um ciclo de carga com sobrecarga de 120% (Estudo de Caso 2) não houveram diferenças significativas. Isto se deve ao fato de a sobrecarga de 140% ser aplicada durante um intervalo de tempo pequeno. Ademais, no regime ao final da simulação, os valores de temperatura tanto do *hot-spot* quanto do topo de óleo foram semelhantes aos valores obtidos para o Estudo de Caso 1.

4.3.1. Temperatura de *hot-spot*

Analogamente ao Estudo de Caso 1, foi realizada uma análise de sensibilidade com o intuito de determinar a influência das variações dos parâmetros da Tabela 4 nas curvas de temperatura do *hot-spot*. Os resultados obtidos para H e τ_w são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de H (a) e τ_w (b).

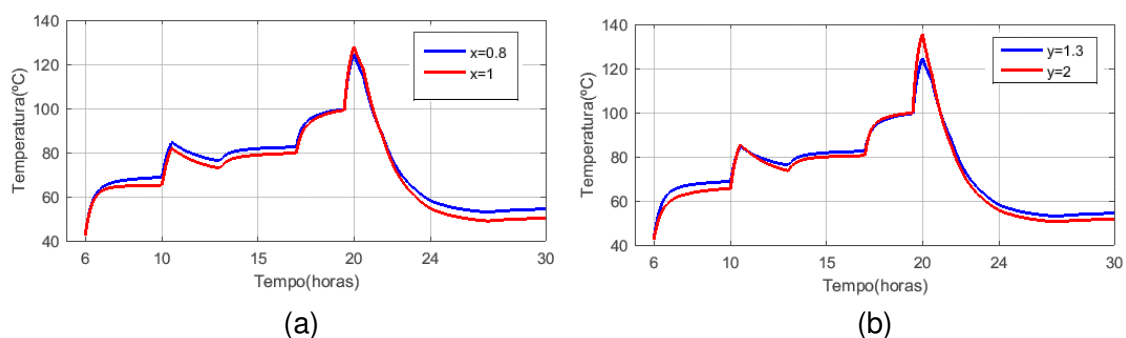


Fonte: O próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 25, as variações das constantes H e τ_w influenciaram as curvas de temperatura do mesmo modo observado no Estudo de Caso 1. Todavia, por causa da sobrecarga de 140 % os valores máximos de temperatura foram maiores.

Na Figura 26, mostrada a seguir, em conformidade com o observado no Estudo de Caso 1 o aumento das constantes x e y modificou a curva de resfriamento do transformador.

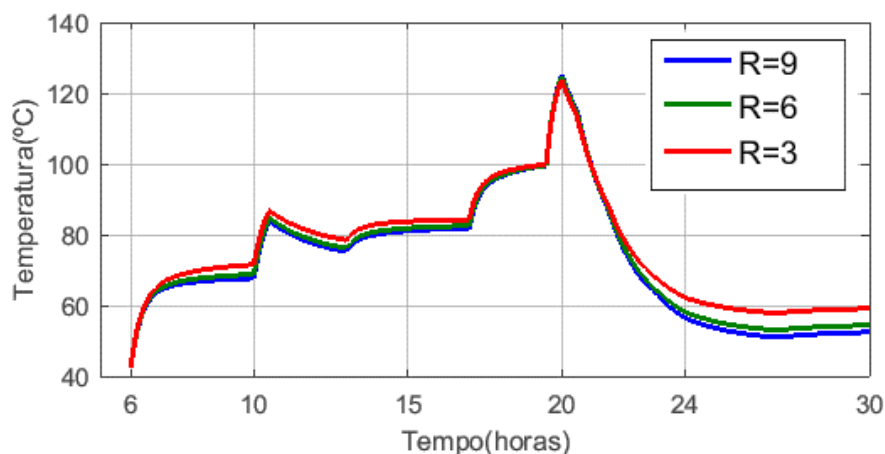
Figura 26 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de x (a) e y (b).



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 27, as curvas de temperatura do *hot-spot* referentes à variação do parâmetro R são mostradas.

Figura 27 – Curvas de temperatura do *hot-spot* para variação de R .



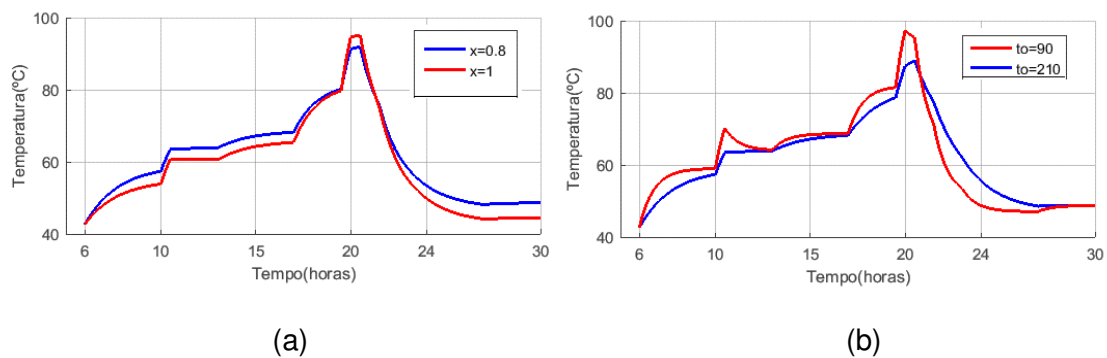
Fonte: O próprio autor.

4.3.2. Temperatura de Topo de Óleo

Da mesma forma do Estudo de Caso 1, as constantes escolhidas da Tabela 5 para variação foram: R , τ_o e x . As análises do Estudo de Caso 1

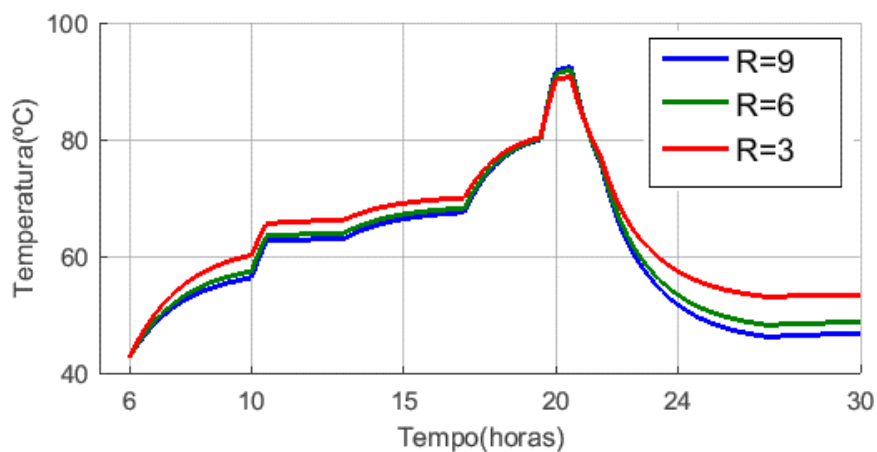
continuam válidas para este modelo. Os resultados são mostrados nas Figuras 28 e 29. Dentre os parâmetros considerados, consta-se que foi a modificação da constante de tempo τ_0 que provocou maior variação de temperatura.

Figura 28 – Curvas de temperatura do topo de óleo para variação de x (a) e T_0 (b).



Fonte: O próprio autor.

Figura 29 – Curvas de temperatura de topo de óleo para variação de R .



Fonte: O próprio autor.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho, o algoritmo proposto pela norma IEC 60076-7 para a obtenção de curvas de temperatura de *hot-spot* e de topo de óleo de um transformador de potência foi estudado. Os valores de alguns parâmetros provenientes do modelo físico necessários à obtenção das curvas foram variados de modo a realizar uma análise de sensibilidade da influência dos parâmetros do modelo sobre o comportamento térmico do transformador.

Três estudos de caso foram realizados. O Estudo de Caso 1 consistiu na simulação do transformador operando de acordo com uma curva típica de carga diária; no Estudo de Caso 2 foi simulada uma sobrecarga de 120% por quatro horas. Em seguida, no Estudo de Caso 3 foi considerada uma sobrecarga de 140% ocorrendo por 30 minutos.

Com os resultados obtidos das simulações foi possível observar e quantificar quais parâmetros exercem maior influência sobre o comportamento térmico do transformador. De fato, em relação as curvas de temperatura do *hot-spot*, foi a variação do valor do fator de *hot-spot* H que mais modificou a característica da curva térmica. No que diz respeito ao topo de óleo, as curvas de temperatura sofreram maior impacto com a variação da constante de tempo do óleo τ_o .

O modelo térmico proposto pela norma IEC 60076-7 é de implementação intuitiva, embora o cálculo para obtenção da temperatura de topo de óleo não seja explicado de maneira direta, sendo necessária a dedução a partir do cálculo para obtenção da temperatura de *hot-spot*.

Por fim, são sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar a análise da vida útil de um transformador com base no modelo térmico proposto pela norma IEC 60076-7 (2005),
- Realizar a comparação entre as curvas de temperatura obtidas por meio de medições e as curvas de temperatura obtidas através do modelo térmico da IEC 60076-7 (2005).

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, Arthur Francisco. **METODOLOGIA PARA PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO DE MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO EMPREGANDO TÉCNICAS ESTATÍSTICAS**. 2016. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

BARBOSA, Sérgio Ricardo. **ESTUDO DOS EFEITOS DA SOBRETENSÃO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ALIADA A CARREGAMENTOS ACIMA DA POTÊNCIA NOMINAL**. 2005. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CAVALLI, Marina. **ANÁLISE TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA INSTALADOS EM AMBIENTES FECHADOS**. 2013. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ÇENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA: UMA ABORDAGEM PRÁTICA**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

IEC STANDARD 60076-7. **International Electrothechnical Comission** (2005).

Operador Nacional do Sistema Elétrico (NOS), **SUB-MÓDULO 2.3 PROCEDIMENTO DE REDE, REQUISITOS MÍNIMOS PARA TRANSFORMADORES E PARA SUBESTAÇÕES E SEUS EQUIPAMENTOS**, Revisão 2, 11 nov. 2011.

SALGADO, Ricardo Menezes. **UM MODELO DE PREVISÃO DE CARGA POR BARRAMENTO**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SANTOS, Adriano Machado dos. **ESTIMAÇÃO RELATIVA DE TEMPO DE VIDA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO, CONSIDERANDO CARGAS NÃO LINEARES**. 2014. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2014.

SILVA, Danielle Crisitunny Leite e. **CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO TERMICO EM TRANSFORMADOR A SECO NA PRESENÇA DE SUB E INTER-HARMÔNICOS**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

XAVIER, Cinthia Souza dos Santos. **ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM CICLO DIÁRIO DE SOBRECARGA PLANEJADA**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.