

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA INSTALADOS EM  
AMBIENTES FECHADOS

por

Marina Cavalli

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2013

ANÁLISE TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA INSTALADOS EM  
AMBIENTES FECHADOS  
por

Marina Cavalli

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof.

Prof.

Prof.

Porto Alegre, 14 de novembro de 2013

CAVALLI, M. **Análise térmica de transformadores de potência instalados em ambientes fechados**. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## **RESUMO**

Transformadores de potência podem ser fontes de ruído indesejáveis, que devem ser minimizados através de modificações na sua construção ou através do enclausuramento de transformadores. O enclausuramento de um transformador pode comprometer a dissipação do calor gerado por suas perdas e provocar sobreaquecimento. O presente trabalho utiliza a analogia com circuitos elétricos para estudar o comportamento térmico de um transformador instalado ao ar livre, comparando os resultados com medições e validando o método. O passo seguinte é estudar o comportamento do mesmo transformador para uma situação em que seja instalado em um recinto fechado, utilizando também analogia com circuitos elétricos. Esta análise demonstrou ser viável a instalação deste transformador em um recinto fechado.

**PALAVRAS-CHAVE:** transformadores de potência, enclausuramento, circuito térmico

CAVALLI, M. **Thermal analysis of indoor power transformers**. 2013. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Ano.

#### ABSTRACT

Power transformers can be a source of undesirable noise which must be minimized with changes in their construction or installing them indoors. The enclosure of a transformer can jeopardize the dissipation of the heat generated by their losses and cause overheating. This work uses the analogy with electrical circuits to study the thermal behavior of a transformer installed outdoors, comparing the results with measurements and validating the method. The next step is to study the performance of the transformer to a situation in which it is installed indoors, also using analogy with electrical circuits. This analysis has proved to be feasible to install this transformer in an enclosure.

**KEYWORDS:** power transformers, enclosure, thermal circuit.

## ÍNDICE

	Pág.
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
4.1 Ruído em transformadores .....	2
4.2 Geração de calor por perdas nos transformadores .....	3
4.2.1 Perdas em vazio .....	3
4.2.2 Perdas sob carga .....	3
4.2.3 Perdas adicionais .....	4
4.3 Resfriamento de transformadores .....	4
4.4 Tipos de recintos para instalação de transformadores .....	5
4.5 Limites para elevação de temperatura .....	5
4.6 Ensaio de elevação de temperatura para regime permanente pelo método de curto-circuito .....	5
5. ANÁLISE DO PROBLEMA POR CIRCUITOS TÉRMICOS .....	6
5.1 Circuitos térmicos.....	6
5.2 Resultados experimentais.....	8
5.3 Equacionamento do sistema.....	8
5.3.1 Trocas térmicas dentro do transformador .....	8
5.3.2 Trocas térmicas entre as paredes do transformador e o meio externo.....	10
5.3.3 Trocas térmicas através do recinto.....	11
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	11
6.1 Transformador instalado ao ar livre .....	11
6.2 Transformador instalado parcialmente dentro do recinto.....	13
6.3 Comparação entre o transformador instalado ao ar livre e o transformador parcialmente dentro do recinto .....	14
7. CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
APÊNDICE I - Dados cedidos do ensaio do transformador.....	16
APÊNDICE II - Dedução das Equações 5.13 e 5.14.....	17
APÊNDICE III - Código do programa .....	18

## 1. INTRODUÇÃO

Transformadores de potência representam a maior parte do investimento de capital na transmissão de eletricidade e em subestações de distribuição, além disso, a parada de operação de um transformador pode representar perdas milionárias para uma concessionária de energia ou empresa onde esteja instalado. Para garantir o funcionamento adequado de um transformador e para que não haja diminuição de sua vida útil, os parâmetros mais importantes que devem ser precisamente conhecidos são as temperaturas máximas que este pode atingir nas suas bobinas. Essas temperaturas podem chegar a valores muito elevados devido às altas taxas de calor gerado no transformador e por isso exigem sistemas de resfriamento adequados e bem dimensionados.

Por outro lado, os transformadores também representam uma fonte elevada de ruído nas subestações. Para atender à norma NBR 10151 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o Conforto da Comunidade, da Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT, 2000], é necessário o estudo de meios de atenuar o ruído produzido. Além de modificações construtivas no transformador, uma opção é a instalação do transformador em um recinto fechado, o que pode atenuar seu ruído em até 40 dB, mas que por outro lado ocasiona um impacto negativo sobre o resfriamento do transformador.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma formulação, a partir da analogia com circuitos elétricos, para a determinação das temperaturas de operação de um transformador instalado em um recinto fechado, baseada em uma formulação já existente e comparando-se com resultados experimentais de um transformador instalado ao ar livre.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise do problema térmico de transformadores através da analogia entre circuitos térmicos e elétricos tem sido estudada por diversos autores. A maioria dos autores faz a análise do problema transiente, visto que os transformadores apresentam variações na sua carga durante o dia, e por sua vez variação nas perdas térmicas. A análise da maioria dos autores parte de dados de ensaios realizados e busca encontrar constantes que modelem o sistema. Alguns autores tratam do problema envolvendo transformadores instalados em ambientes fechados, com o enfoque no problema transiente.

Lindsay, 1984, apresenta um dos primeiros modelos de analogia elétrica térmica aplicada em transformadores, a partir de resultados experimentais, um sistema é montado e são calculados os valores das resistências e capacitâncias. Tang e Wu, 2004, simplificam o circuito, resultando apenas três resistências e três capacitâncias térmicas, os resultados calculados foram comparados com resultados práticos, foi provado que o sistema pode ser representado de forma simplificada.

Iskender e Mamizadeh, 2009, estudam o comportamento de transformadores instalados em ambientes fechados ou não. O problema foi tratado como transiente e os componentes do circuito térmico foram calculados de acordo com as propriedades do sistema. Para um transformador instalado em um ambiente fechado foi acrescentado no circuito térmico as trocas térmicas através do recinto, pelas paredes ou por circulação de ar através de portas e aberturas. Os resultados calculados foram comparados com medições para as mesmas condições e foram satisfatórios.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os componentes principais de um transformador são as bobinas, enrolamentos de cabos de cobre, que, pela variação do número de espiras fazem variar a corrente e a voltagem elétrica, e o núcleo ferromagnético responsável por induzir corrente entre as bobinas.

Para isolamento elétrico e condução do calor gerado por perdas elétricas, a maioria dos transformadores possui óleo em seu interior, que é resfriado em radiadores. Os principais componentes auxiliares dos transformadores são as buchas - que fazem ligação com a rede elétrica, os comutadores - que mudam a carga elétrica e o conservador de óleo - responsável por regular o volume de óleo devido à variação da temperatura. Na figura 4.1 é possível ver estes componentes.

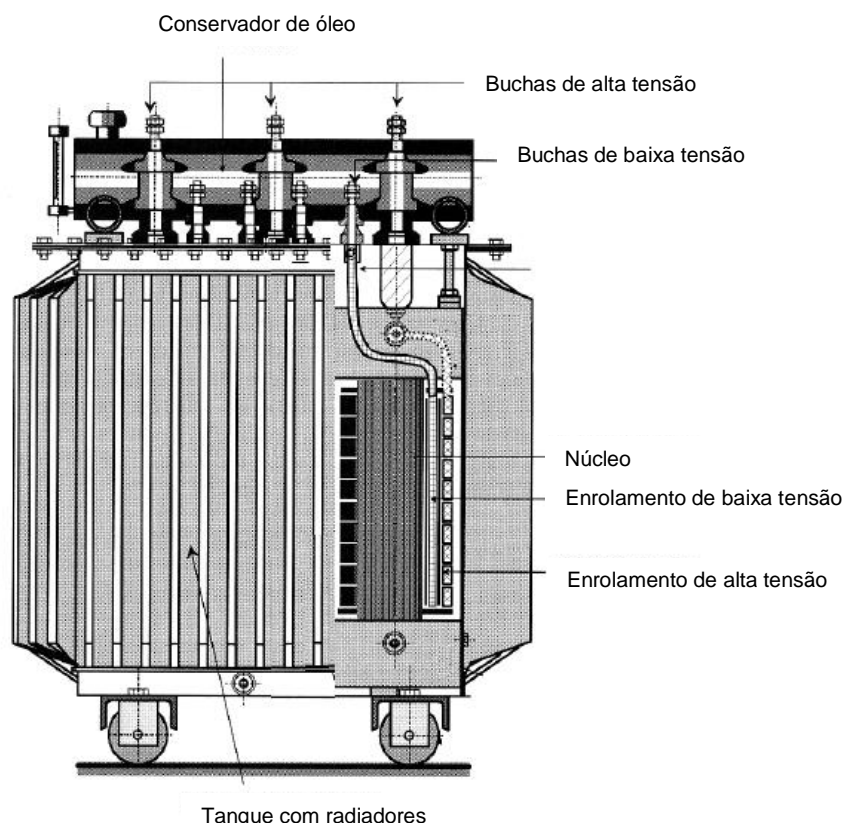


Figura 4.1: Transformador com seus principais componentes. [adaptado de Mora, 2002]

#### 4.1 Ruído em transformadores

O núcleo ferromagnético é responsável pela condução da corrente entre os enrolamentos primário e secundário. É constituído de chapas delgadas de uma liga de ferro-silício, com espessuras de em média 0,30 mm e altura muito maior do que a largura. Esse formato é muito suscetível às vibrações causadas pelo efeito da magnetostricção, que causa o ruído característico de zumbido dos transformadores.

O efeito da magnetostricção consiste de deformações nas chapas do núcleo em resposta à aplicação de um campo magnético. Sob a ação de um fluxo alternado este fenômeno acontece com o dobro da frequência da rede elétrica, isto é, se a rede tem uma frequência de 60 Hz, a vibração no núcleo terá frequência fundamental de 120 Hz. Segundo Guaraldo et al., 1997, a não linearidade da lei de magnetostricção explica a presença de harmônicos na vibração do núcleo. A vibração complexa resulta assim da superposição de vibrações senoidais cujas frequências são harmônicas, no sistema de 60 Hz essas frequências são 120 Hz, 240 Hz, 480 Hz e assim sucessivamente.

Segundo a publicação Power Transformers Vol. 2 Expertise (conjunto de autores), outras fontes de ruídos em transformadores são devidas às vibrações de origens magnéticas e mecânicas, podendo ser percebidas nas espiras condutores das bobinas e nos demais componentes da parte ativa (núcleo e bobinas) do transformador. Além de ruídos nos comutadores de carga e, se presentes, nos sistemas de bombeamento do óleo isolante e de

ventilação forçada. Entretanto a maior fonte de ruído é devido à magnetostricção do núcleo. O ruído é atenuado em parte pelo óleo. Pode ser reduzido na construção do transformador, com folgas mínimas no núcleo e demais partes, entretanto é impossível de extingui-lo totalmente.

## 4.2 Geração de calor por perdas nos transformadores

As perdas térmicas em um transformador, isto é, a dissipação da energia em forma de calor, podem ser classificadas em três tipos: perdas em vazio (perdas no ferro), perdas sob carga (perdas no cobre), e perdas adicionais devido à magnetização de partes metálicas do transformador (perdas de excitação ou perdas magnéticas).

### 4.2.1 Perdas em vazio

De acordo com Ries, 2007, os transformadores de transmissão e distribuição de energia elétrica ficam energizados mesmo em vazio, sem passagem de corrente, durante as 24 horas do dia. As perdas em vazio dos transformadores são constantes, independente da corrente de carga que normalmente é bastante variável durante o dia. Essas são causadas por dois fenômenos, as correntes parasitas e a histerese do material.

As correntes parasitas são originadas pelas correntes que circulam no material devido às tensões induzidas pela variação do fluxo. Essas perdas dependem da resistividade do material, da indução, da frequência e da espessura das chapas de ferro silício que formam o núcleo do transformador e podem ser calculadas pela equação a seguir:

$$w_f = k_f \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot \frac{B_{ef}^2}{\rho} \text{ [W/kg]} \quad (4.1)$$

em que  $k_f$  é um fator numérico que depende do sistema de unidades utilizado,  $f$  é a frequência,  $t$  é a espessura da chapa de ferro silício (m),  $B_{ef}$  é o valor eficaz da indução (valor máximo dividido pela raiz de 2) e  $\rho$  é a resistividade do material (ohms-metro).

As perdas por histerese acontecem quando, ao se magnetizar um material ferromagnético com valores crescentes de intensidade de campo até um valor máximo obtém-se uma curva de indução. Ao se reduzir a intensidade de campo, os valores das induções não coincidem com os valores obtidos para valores crescentes de intensidade de campo, isto é, as induções são maiores, e para intensidade de campo zero o material ainda apresenta uma magnetização remanescente, denominada laço de histerese. A área do laço de histerese corresponde à perda joule de histerese por ciclo e pode ser calculada por ciclo e por unidade de volume do material através de:

$$w_H = \frac{f}{\gamma} \int_{-B_{max}}^{B_{max}} H \cdot dB \text{ [W/kg]} \quad (4.2)$$

onde  $\gamma$  é o peso específico do material,  $f$  é a frequência,  $H$  é a intensidade de campo magnético,  $B_{max}$  é o valor máximo da indução.

### 4.2.2 Perdas sob carga

As perdas sob carga ocorrem devido à passagem de corrente pelos enrolamentos das bobinas. Estas ainda se dividem em três dependendo dos fenômenos que as causam, perdas ôhmicas, perdas parasitas e perdas por circulação de corrente em condutores paralelos.

Segundo Ries, 2007, as perdas parasitas produzidas por fluxos dispersos gerados pela própria corrente de carga e as perdas por circulação de corrente em condutores paralelos são muito pequenas e difíceis de calcular, sendo assim desprezadas. No caso da segunda, pode ser eliminada com ajustes na construção dos enrolamentos.



As perdas ôhmicas são as maiores do transformador e são aquelas equivalentes às produzidas por uma corrente contínua com valor igual ao valor eficaz da corrente alternada. Também são consideradas perdas ôhmicas aquelas produzidas por correntes parasitas nos enrolamentos (cujo mecanismo é o mesmo das correntes parasitas do núcleo). O cálculo das perdas sob carga resume-se então às perdas ôhmicas, de acordo com:

$$W_0 = I^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{s} \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

em que  $I$  é a corrente,  $\rho$  a resistividade do material condutor em ohm-metro,  $l$  é o comprimento do condutor, e  $s$  a seção do condutor.

#### 4.2.3 Perdas adicionais

As perdas adicionais no tanque do transformador e nas demais partes metálicas ocorrem devido a correntes parasitas geradas pela “fuga” de campos magnéticos do núcleo para essas partes do transformador. Segundo Kralj, 2010, essas perdas são substancialmente mais difíceis de serem estimadas. Para um cálculo preciso, métodos numéricos de soluções das equações que relacionam correntes induzidas por campos magnéticos e calor gerado a partir dessas correntes devem ser utilizados, a exemplo dos trabalhos de Teldetsadik e Saravolac, 1996 e Preis et al, 2006.

#### 4.3 Resfriamento de transformadores

O meio de resfriamento das bobinas de um transformador pode ser o ar (transformadores a seco) ou o óleo. O resfriamento através de óleo é proporcionado através do contato deste com os enrolamentos e com o núcleo. Com o aquecimento, o óleo tende a ficar menos denso e subir até o topo do transformador (onde é registrada a temperatura máxima do óleo), onde tubulações levam o óleo aquecido aos radiadores (que podem ser tubulares ou de placas). Nos radiadores, o óleo é resfriado e retorna ao ponto mais baixo do transformador, consistindo em um sistema de resfriamento do tipo termossifão. Caso a circulação natural do óleo não seja suficiente para prover o resfriamento dos enrolamentos, bombas de óleo, ventilação auxiliar ou circulação de água nos radiadores podem ser incorporadas ao sistema.

Os transformadores costumam ser denominados de acordo com o método de resfriamento utilizado. Um transformador pode ser especificado com diferentes métodos de resfriamento, isto é, para diferentes condições de operação pode-se ter um tipo de resfriamento ou outro. Para os transformadores imersos em óleo isolante, esta designação é estabelecida na norma ABNT NBR 5356, por meio de um código de quatro letras mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - 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 externo		4ª letra: Natureza da circulação do meio de resfriamento externo:	
O	Óleo mineral ou líquido isolante elétrico sintético de ponto de combustão $\leq 300$ °C;	N	Circulação natural por convecção através do sistema de resfriamento e dos enrolamentos;	A	Ar	N	Convecção natural;
K	Líquido isolante elétrico com ponto de combustão $> 300$ °C;	F	Circulação forçada através do sistema de resfriamento, circulação por convecção dentro dos enrolamentos;	W	Água	F	Circulação forçada (ventiladores, bombas).
L	Líquido isolante elétrico com ponto de combustão não mensurável.	D	Circulação forçada através do sistema de resfriamento e dirigida do sistema de resfriamento pelo menos até os enrolamentos principais.				

#### 4.4 Tipos de recintos para instalação de transformadores

De acordo com a publicação Power Transformers Vol. 2 Expertise, existem três tipos básicos de instalações de transformadores enclausurados: i) Recintos sem ventilação são raramente adequados para transformadores que não sejam de pequeno porte, em casos raros, para transformadores de grande porte, estes podem ser instalados em grandes recintos, em que a temperatura interna aumente minimamente. ii) Recintos naturalmente ventilados devem prever entradas e saídas de ar bem dimensionadas e localizadas, de modo a prover o efeito chaminé dentro do recinto com uma vazão de ar suficiente para o resfriamento. iii) Para recintos com ventilação forçada, é estimado que o fluxo de ar seja de no mínimo 3,0 m<sup>3</sup>/min para cada kW de perda em uma situação de carga máxima.

As paredes dos recintos podem ser de vários materiais, sendo comum concreto e painéis metálicos com “sanduíche” de materiais isolantes acústicos no interior que permitem a obtenção de níveis de isolamento elevados.

#### 4.5 Limites para elevação de temperatura

Os limites de elevação de temperatura para as diversas partes de um transformador resfriado a óleo são estabelecidos na norma ABNT NBR 5356-2 Transformadores de potência – Parte 2: Aquecimento. Estes valores são somados à temperatura ambiente, que deve estar entre os limites de -25°C até 40°C, salvo casos especiais. Nenhuma tolerância positiva é permitida sobre os limites de elevação de temperatura. Os valores de elevação de temperatura dos enrolamentos, do óleo, das partes metálicas e de outras partes de transformadores, projetados para funcionamento nas condições normais, são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Limites para elevação de temperatura.

Sistema de preservação de óleo	Limites de elevação de temperatura °C a					
	Dos enrolamentos			Do topo do óleo	Das partes metálicas	
	Média, por medição da variação de resistência	Do ponto mais quente e			Em contato com a isolamento sólida ou adjacente a elas	Não em contato com a isolamento sólida e não adjacente a elas
Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido f					
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão	55 °C 95 °C g	60 °C 100 °C g	65 °C 120 °C g	50 °C b 60 °C g	Não devem atingir temperaturas superiores à classe térmica do material da isolamento adjacente ou em contato com estas	A temperatura não deve atingir valores que venham a danificar componentes ou materiais adjacentes
Com conservador ou com gás inerte sob pressão	55 °C 65 °C d 95 °C g	60 °C 70 °C d 100 °C g	65 °C 80 °C d 120 °C g	55 °C c 65 °C d 65 °C g		

a Os materiais isolantes devem ser adequados, de acordo com a ABNT NBR 7034, ao 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 Para esse limite de temperatura, quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado.  
e A verificação de temperatura do ponto mais quente é feita mediante acordo entre o fabricante e o comprador.  
f O método de verificação do fluxo de óleo forçado dirigido constitui objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.  
g Estes limites de elevação de temperatura são aplicáveis, desde que acordado entre fabricante e comprador. Neste caso, deve ser utilizado o sistema híbrido de isolamento composto por isolantes sólidos à base de aramida ou similares (Classe C), apenas onde necessário (adjacentes aos condutores dos enrolamentos), e isolantes sólidos à base de celulose onde a temperatura máxima não ultrapasse os 120 °C, imersos em óleo mineral isolante, com base na IEEE Std. 1276:1997.

#### 4.6 Ensaio de elevação de temperatura para regime permanente pelo método de curto-circuito

O ensaio que faz a determinação da elevação de temperatura de um transformador causada pelas suas perdas é descrito no item 5.2 da norma ABNT NBR 5356-2 Transformadores de potência – Parte 2: Aquecimento.

Durante este ensaio o transformador não é submetido à tensão nominal e à corrente nominal simultaneamente, mas às perdas totais calculadas. O objetivo do ensaio é duplo: estabelecer a elevação de temperatura do topo do óleo em regime permanente com dissipação das perdas totais e estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos à corrente nominal com a elevação de temperatura do topo do óleo determinada acima. Isto é realizado em duas etapas:

i) aplicação das perdas totais máximas com o objetivo de estabelecer a elevação de temperatura do óleo sobre o meio de resfriamento: As temperaturas do óleo e do meio de resfriamento são monitoradas e o ensaio continuado até que uma elevação de temperatura do óleo em regime estável seja atingida, a taxa de variação da elevação de temperatura do topo do óleo deve ser menor do que  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante um período de 3,0 horas.

ii) aplicação de corrente nominal com o objetivo de estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos sobre o óleo, à corrente nominal: Quando a elevação de temperatura do topo de óleo tiver sido determinada, o ensaio deve continuar com uma corrente reduzida ao valor nominal, durante 1,0 hora com observação contínua das temperaturas. Ao fim desse período, as resistências dos enrolamentos são medidas. Os valores da temperatura média dos dois enrolamentos são determinados a partir das resistências.

## 5. ANÁLISE DO PROBLEMA POR CIRCUITOS TÉRMICOS

### 5.1 Circuitos térmicos

O problema foi analisado para duas situações distintas, cada uma representada por diferentes circuitos térmicos, que são mostrados a seguir.

O circuito da Figura 5.1 é o caso em que o transformador está ao ar livre, para o qual se tem os resultados experimentais. Na Figura 5.2 uma representação esquemática do componentes do circuito.

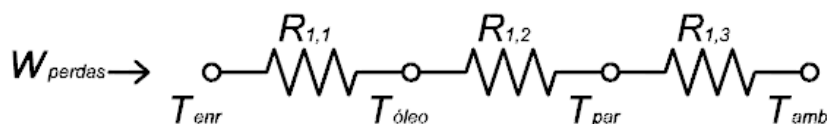


Figura 5.1: Circuito térmico para o transformador instalado ao ar livre

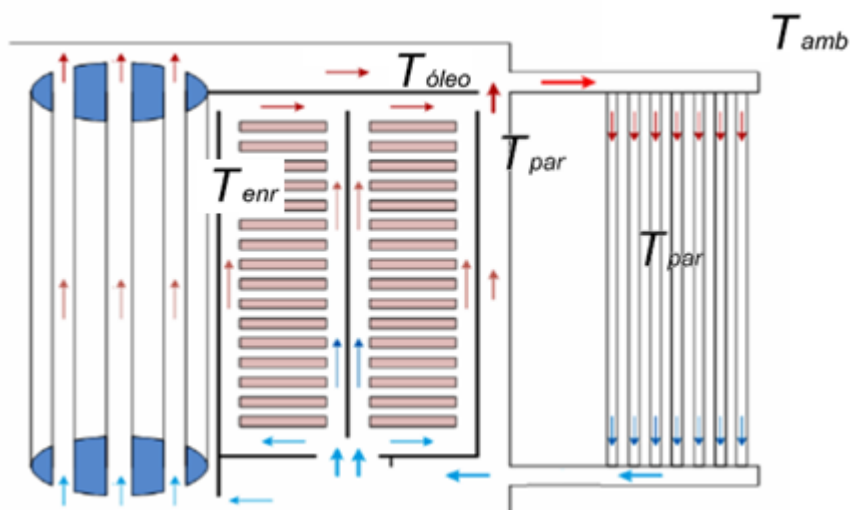


Figura 5.2: Componentes do circuito. [adaptado de Dofan, 2011]

Para este circuito,  $W_{perdas}$  corresponde às perdas térmicas totais do transformador,  $T_{enr}$ , à temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos de cobre das bobinas;  $T_{óleo}$ , à temperatura de topo do óleo (máxima temperatura que o óleo atinge);  $T_{par}$ , à temperatura nas paredes (tanque e radiadores);  $T_{amb}$ , à temperatura ambiente.  $R_{1,1}$  equivale à

resistência de condução e convecção entre o enrolamento e o óleo;  $R_{1,2}$ , à resistência de condução e convecção entre o óleo e as paredes; e  $R_{1,3}$ , à resistência de convecção e radiação entre as paredes e o ambiente.

O circuito da Figura 5.3 é o caso em que o transformador está instalado no recinto com os radiadores para fora do recinto. Na Figura 5.4 representação esquemática do componentes do circuito.

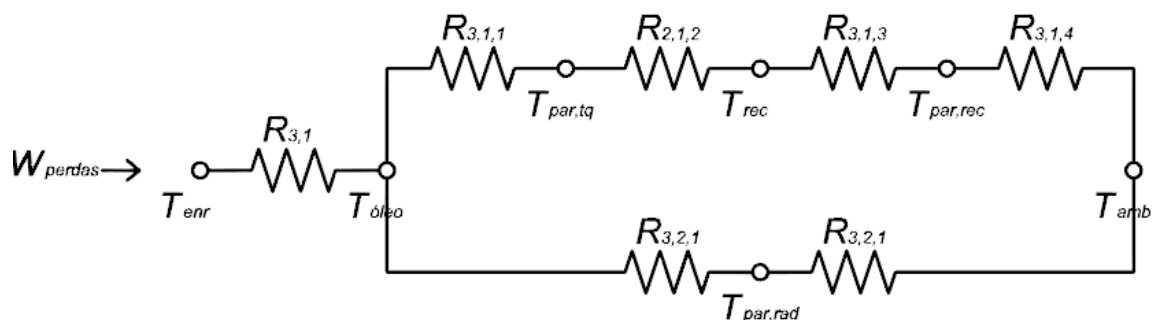


Figura 5.3: Circuito térmico para o transformador instalado no recinto com radiadores ao ar livre.

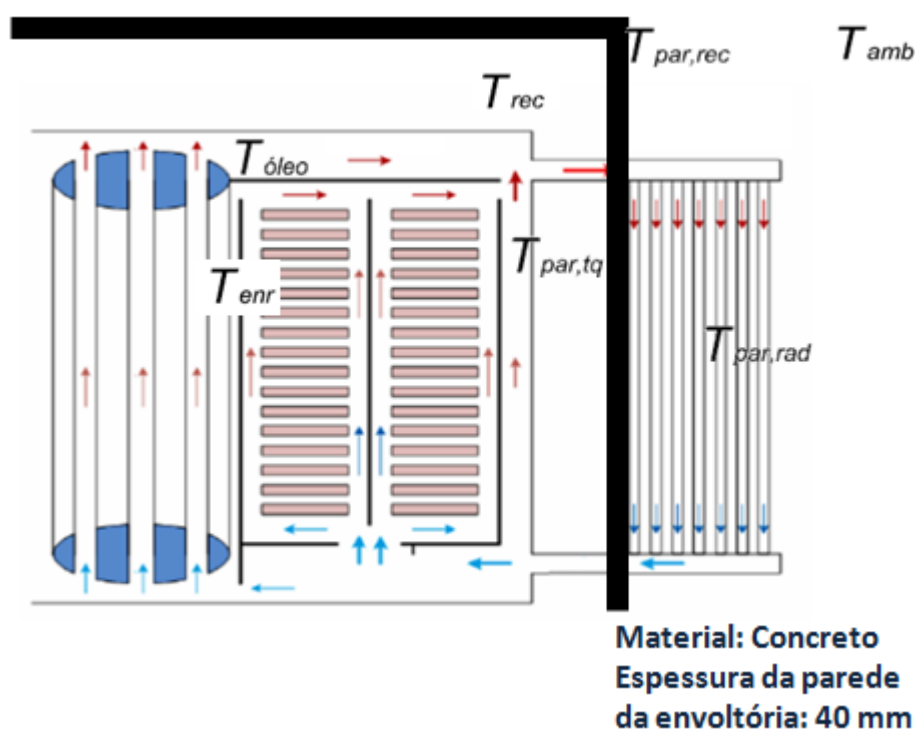


Figura 5.4: Componentes do circuito. [adaptado de Dofan, 2011]

Para este circuito,  $W_{perdas}$ ,  $T_{enr}$ ,  $T_{óleo}$ , e  $T_{amb}$  correspondem às mesmas variáveis do circuito anterior,  $T_{rec}$  corresponde à temperatura do ar dentro do recinto do transformador;  $T_{par,rec}$ , à temperatura da parede do recinto.  $R_{2,1}$  equivale à resistência de condução mais convecção entre o enrolamento e o óleo;  $T_{par,tq}$  à temperatura da parede do tanque (que se encontra dentro do recinto),  $T_{par,rad}$  à temperatura das paredes dos radiadores (que se encontram fora do recinto).  $R_{3,1}$  à resistência de condução mais convecção entre o enrolamento e o óleo,  $R_{3,1,1}$  à resistência de condução e convecção entre o óleo e as paredes do tanque do transformador,  $R_{3,1,2}$  à resistência de convecção e radiação entre a parede do transformador e o ar dentro do recinto,  $R_{3,1,3}$  à resistência de condução e convecção entre o ar

do recinto e suas paredes,  $R_{3,1,4}$  à resistência de convecção e radiação entre as paredes do recinto e o ambiente.  $R_{3,2,1}$  à resistência de condução e convecção entre o óleo e as paredes dos radiadores do transformador,  $R_{3,1,4}$  à resistência de convecção e radiação entre as paredes dos radiadores e o ambiente.

## 5.2 Dados experimentais

A comparação entre os resultados obtidos nos cálculos é feita utilizando-se dados cedidos de medições de perdas e respectivas temperaturas de um transformador monofásico com características a seguir:

Tensão: 500 kV

Potência: 40,33 MVA

Frequência: 60 Hz

Sistema de resfriamento: ONAN com 6 radiadores de 28 favos, 460 mm de largura e 2,5 m de altura.

No Apêndice I estão os valores do ensaio neste transformador. As medições de temperatura do ensaio apresentam uma incerteza de 1% sob fundo de escala. A divulgação de plantas e fotos do transformador não é autorizada pela empresa fabricante.

## 5.3 Equacionamento do sistema

### 5.3.1 Trocas térmicas dentro do transformador

As equações utilizadas no cálculo dos circuitos térmicos foram propostas por Ries, 2007. Os cálculos consideram o sistema em condição estacionária, visto que, diferente de outros transformadores, em que é necessário conhecer o seu comportamento transiente, pois pode haver mudança do sistema de resfriamento a partir de determinadas temperaturas, este transformador é projetado para apenas um sistema de resfriamento que deve ser suficiente para resfriá-lo na sua carga máxima (condição de perdas térmicas máximas).

Por apresentar uma geometria e distribuição de temperaturas muito complexas é difícil determinar os coeficientes de convecção entre o enrolamento e o óleo, o desenvolvimento de uma equação para determinar a diferença de temperatura dos enrolamentos e do óleo no seu ponto mais frio é descrito a seguir para um enrolamento em disco (uma bobina com várias camadas de cabos de cobre).

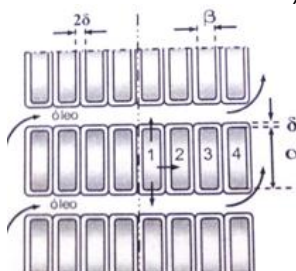


Figura 5.5: Enrolamento em disco com oito espiras [Ries, 2007]

Considerando o enrolamento em disco como mostrado na figura 5.4. As perdas por metro do condutor 1 são, em parte, transmitidas aos canais radiais de óleo entre os discos, e, em parte, ao condutor 2 através do isolamento com espessura  $2\delta$ . Conforme equação (5.1):

$$(1 + k_a) \cdot d^2 \cdot a_1 \cdot \rho = \frac{2(\beta + 1,45\delta)}{\delta/\lambda + 1/a_{co}} (T_1 - T_0) + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} (T_1 - T_2) \quad [\text{W/m}] \quad (5.1)$$

em que  $k_a = \frac{W_p}{W_o}$  é o coeficiente entre as perdas parasitas (e adicionais) e as perdas

ôhmicas,  $d$  é a densidade de corrente no condutor ( $\text{A/mm}^2$ ),  $a_1$  seção do condutor em  $\text{mm}^2$ ,  $\rho$

condutividade do condutor (0,02095 ohms mm<sup>2</sup>/m para cobre a 75°C),  $\alpha$  dimensão axial do condutor (m),  $\delta$  espessura do isolamento do condutor (m),  $\beta$  espessura do condutor,  $\lambda$  coeficiente de condutividade térmica,  $\alpha_{c0}$  coeficiente de convecção,  $T_0$  temperatura média do óleo,  $T_1$  temperatura do condutor 1,  $T_2$  temperatura do condutor 2.

De modo análogo para o condutor 2, que transfere calor ao óleo e ao condutor 3:

$$(1 + k_a) \cdot d^2 \cdot a_1 \cdot \rho + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} (T_1 - T_2) = \frac{2(\beta+1,45\delta)}{\delta/\lambda+1/\alpha_{c0}} (T_2 - T_0) + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} (T_2 - T_3) \text{ [W/m]} \quad (5.2)$$

onde  $T_3$  é a temperatura no condutor 3.

Para o último condutor, de ordem  $n/2$ , sendo  $n$  o número de condutores por disco, tem-se a seguinte equação:

$$(1 + k_a) \cdot d^2 \cdot a_1 \cdot \rho + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} (T_{n/2-1} - T_{n/2}) = \frac{2(\beta+1,45\delta)}{\delta/\lambda+1/\alpha_{c0}} (T_{n/2} - T_0) + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} (T_{n/2} - T_0) \text{ [W/m]} \quad (5.3)$$

Somando membro a membro (5.1), (5.2) e (5.3), resulta em:

$$\frac{n}{2} [(1 + k_a) \cdot d^2 \cdot a_1 \cdot \rho] + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} \Delta T_{1,n/2} = \frac{2(\beta+1,45\delta)}{\delta/\lambda+1/\alpha_{c0}} (\Delta T_{10} + \Delta T_{20} + \dots + \Delta T_{n/2,0}) + \frac{\alpha}{\delta/\lambda+1/\alpha_{c0}} \Delta T_{n/2,0} + \frac{\alpha}{2\delta/\lambda} \Delta T_{1,n/2} \text{ [W/m]} \quad (5.4)$$

O salto da temperatura média dos condutores é dado pela equação (5.5), que, substituída na equação (5.4) conduz a:

$$\Delta T_{C01} = \frac{\Delta T_{10} + \Delta T_{20} + \dots + \Delta T_{n/2,0}}{n/2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.5)$$

$$\frac{n}{2} [(1 + k_a) \cdot d^2 \cdot a_1 \cdot \rho] = \frac{2(\beta+1,45\delta)}{\delta/\lambda+1/\alpha_{c0}} \Delta T_{C01} + \frac{\alpha}{\delta/\lambda+1/\alpha_{c0}} \Delta T_{n/2,0} \text{ [W/m]} \quad (5.6)$$

O salto térmico dos condutores externos  $\Delta T_{n/2,0}$  é menor do que o salto térmico médio  $\Delta T_{C01}$ , pois são melhor refrigerados. Esta diferença será tanto maior quanto maior for o número de condutores  $n$  por disco. A equação abaixo fornece o salto térmico dos condutores externos, sendo  $k$  uma constante que depende do sistema de refrigeração:

$$\Delta T_{n/2,0} = \frac{\Delta T_{C01}}{1+k \cdot n} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.7)$$

Introduzindo a equação (5.7) na equação (5.6), e separando-se o salto  $\Delta T_{C01}$ , resulta a equação abaixo, onde já está igualmente introduzido o fator  $k_s$ , que relaciona a área total com a área disponível para trocas térmicas (que é menor devido a espaçadores e longarinas de material isolante).

$$\Delta T_{C01} = \frac{(1+k_a) \cdot d^2 \cdot a}{(\beta+1,45\delta) + \frac{\alpha}{n(1+k \cdot n)}} \cdot \frac{\rho}{2k_s} \left( \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{c0}} \right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.8)$$

Os valores normais das constantes e dos coeficientes que aparecem na equação (5.8) foram obtidos experimentalmente por Richter, 1963, citado por Ries, 2007:

$k=0,04$  para refrigeração ONAN

$k=0,05$  para refrigeração ONAF

$k=0,07$  para refrigeração OFAF

$\alpha_{c0}=90 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para refrigeração ONAN

$\alpha_{c0}=150 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para refrigeração ONAF

$\alpha_{c0}=300 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$  para refrigeração OFAF

$\lambda= 0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$  para refrigeração ONAN

$k_s=0,75$  a  $0,80$

No interior do transformador, as temperaturas variam em função da altura, em funções cujos coeficientes foram determinados experimentalmente.

As equações abaixo relacionam a variação da temperatura do óleo no seu ponto mais frio com a temperatura ambiente com a variação da temperatura de topo do óleo com a temperatura ambiente:

$$\Delta T_{001} = \Delta T_{op} - \Delta T_{01} \text{ [°C]} \quad (5.9)$$

$$\Delta T_{001} = (0,20\sim 0,25) \cdot \Delta T_{op} \text{ [°C]} \quad (5.10)$$

A equação abaixo relaciona a variação entre a temperatura média do óleo com a temperatura ambiente com a variação entre a temperatura de topo do óleo com a temperatura ambiente:

$$\Delta T_{om} = 0,91 \cdot \Delta T_{op} \text{ [°C]} \quad (5.11)$$

Finalmente, a equação abaixo relaciona a diferença entre a temperatura média das paredes com a temperatura ambiente e a diferença entre a temperatura média do óleo com a temperatura ambiente:

$$\Delta T_{pa} = 0,845 \cdot \Delta T_{om} \text{ [°C]} \quad (5.12)$$

### 5.3.2 Trocas térmicas entre as paredes do transformador e o meio externo

A partir da troca de calor entre a parede do tanque do transformador e o meio externo o sistema passa a ser representado por equações que fazem a analogia entre circuitos térmicos e elétricos.

Entre a parede e o meio externo tem-se troca por convecção e radiação. As trocas por condução não foram consideradas. Os coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação são mostrados a seguir na equação (5.13) e equação (5.14). A dedução destas duas equações se encontra no Apêndice II.

$$\alpha_c \cong 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta T_{pa}} \text{ [W/(m}^2\cdot\text{°C)]} \quad (5.13)$$

$$\alpha_r \cong 2,65 \cdot \sqrt[4]{\Delta T_{pa}} \text{ [W/(m}^2\cdot\text{°C)]} \quad (5.14)$$

Para a parede do tanque do transformador, de área A, a equação abaixo descreve as trocas térmicas:

$$W_{tanque} = W_{C,tanque} + W_{r,tanque} = U \cdot \Delta T_{pa} \cdot A_{tanque} \text{ [W]} \quad (5.15)$$

Em que o coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$U = \alpha_c + \alpha_r \text{ [W/(m}^2\cdot\text{°C)]} \quad (5.16)$$

Para os radiadores, o coeficiente de transferência de calor por radiação é o mesmo do que na parede do tanque, entretanto o coeficiente de troca de calor por convecção, determinado experimentalmente e dependente das dimensões dos radiadores, é dado por:

$$\alpha_{c,radiadores} = K \cdot h_2^{-x} \cdot \Delta T_{pa}^{0,25} \text{ [W/(m}^2\cdot\text{°C)]} \quad (5.17)$$

em que  $h_2$  é a altura dos radiadores,  $x$  e  $K$  são constantes que dependem da largura dos radiadores, para o caso de 460 mm, possuindo valores respectivamente de 0,175 e 2,5.

Para a parede dos radiadores do transformador, a equação abaixo estabelece as trocas térmicas, em que  $A_r$  é a área equivalente de radiação, visto que para radiadores não haverá trocas por radiação entre os favos, somente entre as áreas que “vêm” a vizinhança com temperatura inferior.

$$W_{radiadores} = W_{c,radiadores} + W_{r,radiadores} = U \cdot \Delta T_{pa} \cdot A_{c,radiadores} \quad [W] \quad (5.18)$$

em que o coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$U = \left( \alpha_c + \alpha_r \frac{A_r}{A_c} \right) [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (5.19)$$

A área de convecção do radiador é dada pelas duas equações abaixo, cujos valores são válidos apenas para radiadores de largura de 460 mm. Na equação (5.20),  $E$  é o número de elementos do radiador, neste caso, 28.

$$A_{c,radiadores} = A_1 \cdot E \quad [m] \quad (5.20)$$

$$A_1 \cong 0,97 \cdot h_2 \quad [m] \quad (5.21)$$

A área de radiação,  $A_{r,radiadores}$ , é a soma das seguintes áreas:

Área externa lateral:  $d \cdot h_2$ ;

Área superior e inferior:  $d \cdot [(E - 1) \cdot c + \varepsilon + a]$ ;

Área lateral dos radiadores externos:  $h_2 \cdot [(E - 1) \cdot c + \varepsilon + a] \cdot 2/N$ ;

Em que,  $d$  é a distância entre radiadores,  $c$  distância entre favos,  $\varepsilon$  espessura do favo,  $a$  distância do radiador ao tanque,  $N$  quantidade de radiadores.

### 5.3.3 Trocas térmicas através do recinto

Para a situação estudada de um transformador instalado dentro de um recinto, inicialmente não é prevista circulação de ar dentro do recinto, as trocas térmicas devem acontecer exclusivamente por condução através da parede do recinto. Foi utilizada uma adaptação da equação da condução unidimensional através de um cilindro com geração interna de calor e do coeficiente global de transferência de calor para cilindros, Incropera, 2008::

$$W_{env} = U \cdot A_{env} \cdot \Delta T_{env} \quad [W] \quad (5.22)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{env}} + \frac{r_1}{k_A} \ln \frac{r_2}{r_1}} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (5.23)$$

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Transformador instalado ao ar livre

Para o cálculo das temperaturas do transformador ao ar livre foram utilizadas as equações (5.8) a (5.21).

Os valores utilizados nas equações foram os mesmos do transformador real:  $A_{c,rad} = 67,9 \text{ m}^2$ ,  $A_{tq} = 18,1 \text{ m}^2$ ,  $A_{r,rad} = 9,52 \text{ m}^2$ .

A temperatura ambiente do ensaio foi de 25 °C. As perdas consideradas foram as obtidas no ensaio de perdas do transformador para a temperatura do óleo de 75 °C:



Perdas no cobre: 71500 W  
 Perdas no núcleo: 13960 W  
 Perdas adicionais: 22700 W  
 Perdas totais (soma das anteriores): 108160 W

Para validar o método de cálculo foram comparados os valores medidos de temperatura máxima e média do óleo com os valores calculados para a temperatura ambiente de 25°C. O passo seguinte foi calcular as temperaturas médias e máximas do óleo para temperaturas ambientes acima de 25°C, até os máximos permitidos por norma. Abaixo na Figura 6.1 os resultados obtidos.

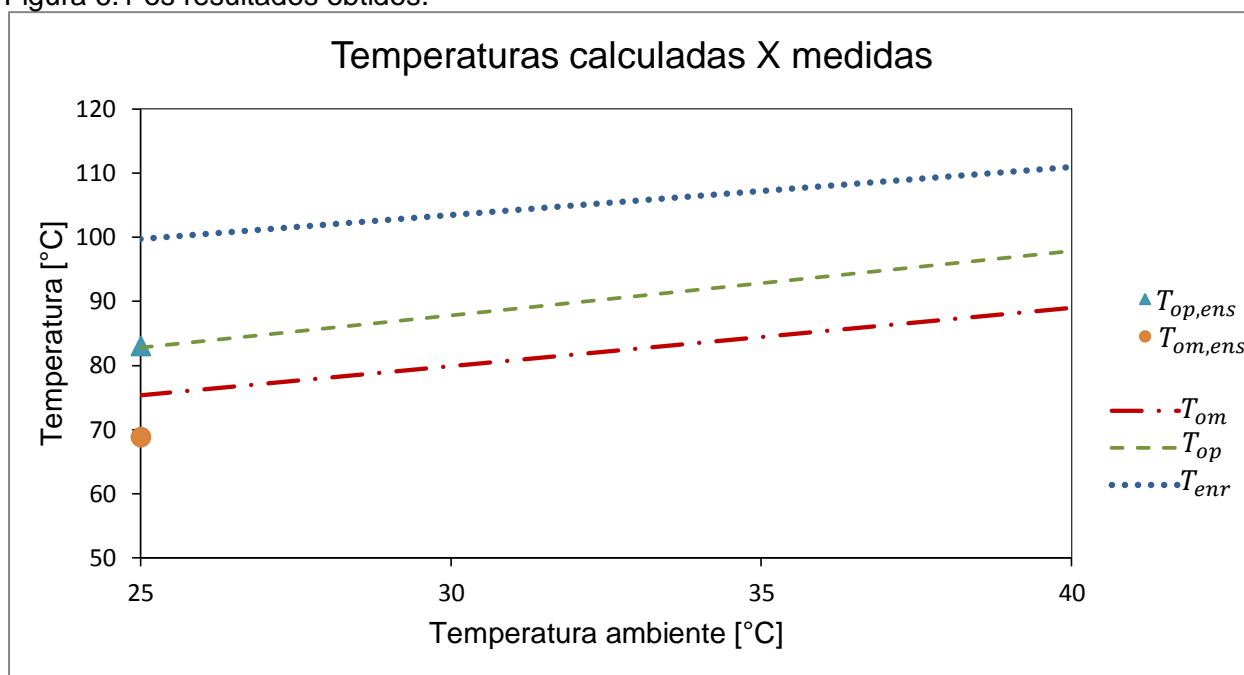


Figura 6.1: Resultados obtidos através do modelo utilizado comparando-se com resultado experimental.

O modelo utilizado para os cálculos, na temperatura de 25°C, obteve a maioria dos valores muito próximos dos experimentais, conforme pode ser visto na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Comparação entre resultados medidos e calculados.

	Ensaio	Calculado	Diferença
$T_{op}$	83°C	82,8 °C	0,02%
$\Delta T_{op}$	57,8°C	57,8 °C	0,3%
$T_{om}$	68,8°C	75,4°C	9,5%

As diferenças nos valores de temperatura média do óleo podem ser devida a dois fatores: i) deficiência na medição, visto que é feita através da média de temperaturas registradas por sondas dentro do transformador. ii) aproximações e simplificações utilizadas ao longo do cálculo de transferência de calor.

A elevação de temperatura do topo do óleo está dentro do valor limite, que, para um transformador com conservador de óleo e que utiliza isolamento de papel termoestabilizado, é de 65 °C.

Não há no ensaio medição da temperatura dos enrolamentos. A equação (5.8) faz cálculo da diferença de temperatura entre o óleo no seu ponto mais frio e os enrolamentos,  $\Delta\theta_{c01}$ . Os valores utilizados para cálculo da equação foram os seguintes:

$$k_a = \frac{W_p}{W_o} = 22700/71500 = 0,3174 \text{ coeficiente de perdas parasitas}$$

$d = 5,57 \text{ A/mm}^2$  densidade de corrente

$a = 22,4 \text{ mm}^2$  área da seção

$\alpha = 11,2 \text{ mm} = 0,0112 \text{ m}$  largura do fio de cobre

$\beta = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$  espessura do fio de cobre

$\delta = 1,90 \text{ mm} = 0,0019 \text{ m}$  espessura do isolamento

$\rho = 0,02095 \text{ ohms mm}^2/\text{m}$  condutividade do cobre a  $75^\circ \text{C}$

$k = 0,04$  para refrigeração ONAN

$\alpha_{c0} = 90 \text{ W/m}^2$  para refrigeração ONAN

$\lambda = 0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  do isolante

$k_s = 0,75$

O valor encontrado para  $\Delta\theta_{c01}$  foi de  $37,59^\circ\text{C}$ , isto é, o enrolamento vai apresentar este gradiente de temperatura em relação ao ponto mais frio do óleo.

## 6.2 Transformador instalado parcialmente dentro do recinto

Para o cálculo desta condição foram utilizadas as mesmas equações da primeira condição, além das equações (5.22) e (5.23) para o cálculo do fluxo de calor através das paredes do recinto. O material das paredes do recinto é concreto, que possui uma condutividade térmica de  $1,4 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ . Na Figura 6.2, apresentam-se as temperaturas calculadas para o sistema.

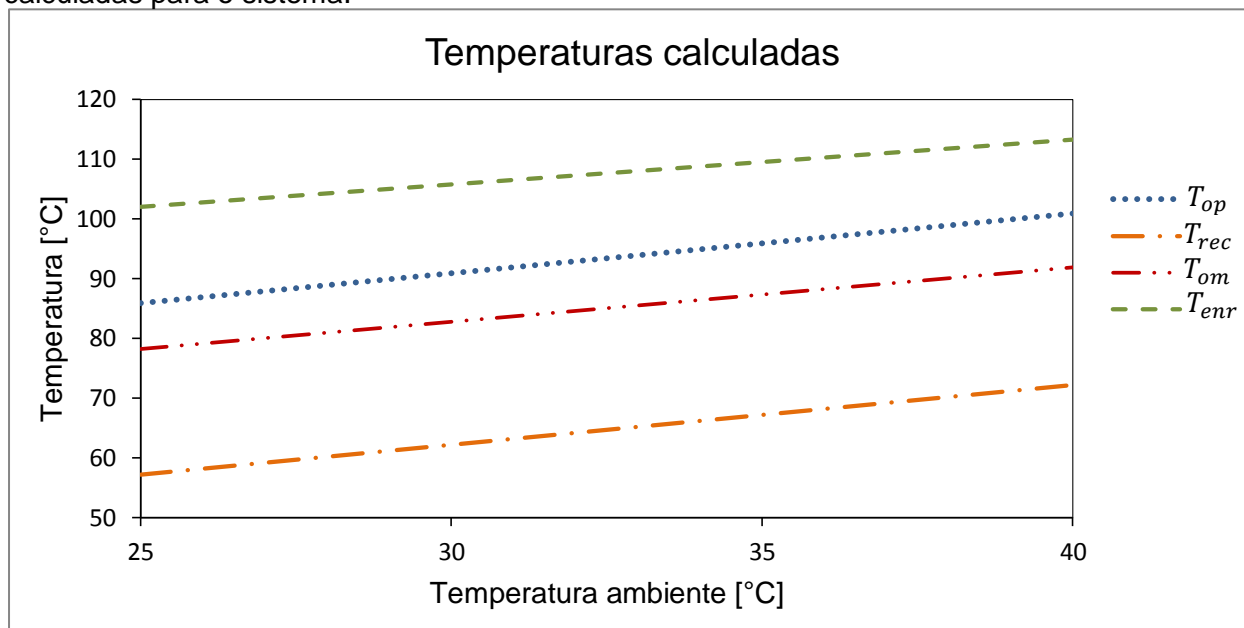


Figura 6.2: Temperaturas calculadas para o transformador instalado parte dentro do recinto.

Há um aumento em todas as temperaturas, entretanto, a diferença entre a temperatura de topo de óleo e do ambiente é de  $60,9^\circ\text{C}$ , o que está dentro do limite. A elevação de temperatura nos enrolamentos varia entre  $73,3^\circ\text{C}$  até  $76,6^\circ\text{C}$ , valores dentro do limite. Uma constatação interessante é relativa à temperatura média do óleo, que fica entre a temperatura de parede dos radiadores  $T_{pa,rad}$  e a temperatura da parede do tanque  $T_{pa,tq}$ . A temperatura do ar dentro do recinto varia de  $58,7^\circ\text{C}$  a  $72,2^\circ\text{C}$ .

### 6.3 Comparação entre o transformador instalado ao ar livre e o transformador parcialmente dentro do recinto

Na Figura 6.3, apresenta-se um gráfico comparativo entre as temperaturas de topo de óleo e dos enrolamentos para o transformador instalado ao ar livre e o transformador instalado parcialmente dentro do recinto.

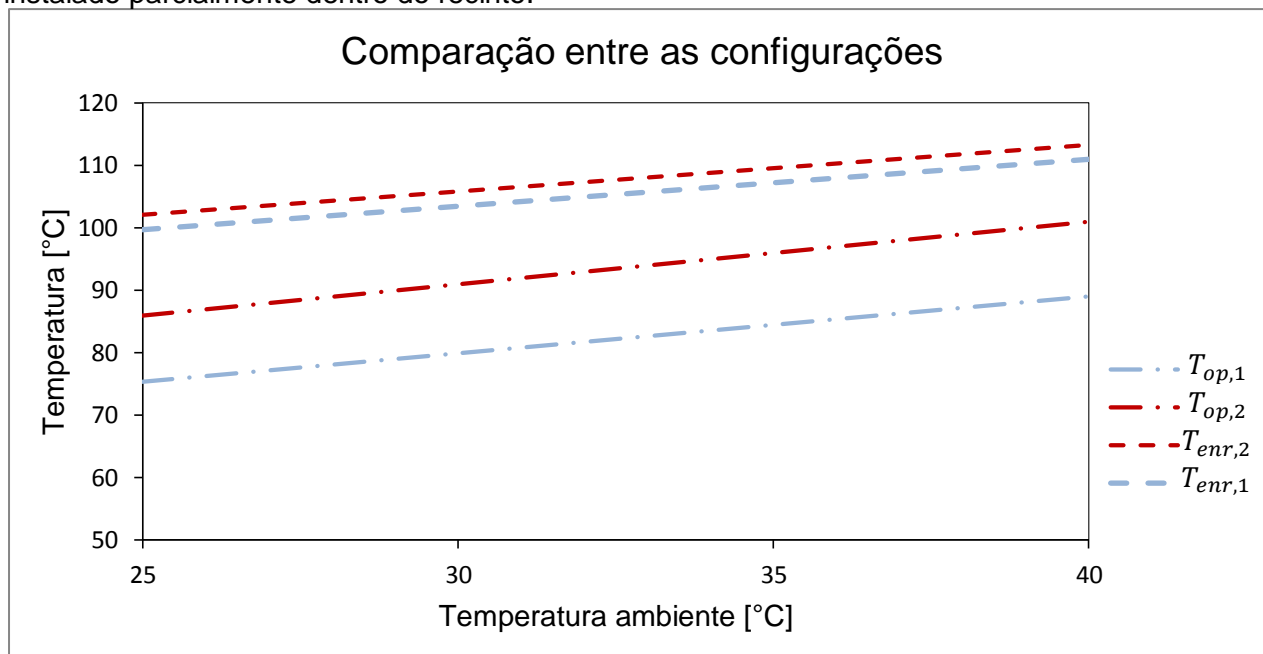


Figura 6.3: Comparação entre o transformador ao ar livre e o enclausurado

A variação entre as temperaturas dos enrolamentos entre os dois casos é em torno de 2,1% até 2,3%. A variação entre as temperaturas de topo de óleo entre os dois casos é em torno de 3,1% até 3,7%.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados pelo modelo utilizado para cálculo das trocas térmicas de um transformador proposto por Ries, 2007, quando comparado com resultados de um ensaio foram satisfatórios, obtendo diferenças de 0,3 % entre os valores de temperatura de topo de óleo, 0,02 % entre os valores de gradiente de temperatura de topo de óleo e 9,50 % entre os valores de temperatura média do óleo. Este último valor é elevado, entretanto, pode ser devido ao sistema de medição do ensaio.

Os cálculos propostos para as trocas através do recinto mostraram-se coerentes, apresentando resultados em que as temperaturas do sistema aumentaram, mas ainda assim dentro dos seus respectivos limites. Este comportamento também evidencia o fato de as trocas térmicas de um transformador serem principalmente pelos radiadores, tanto no caso ao ar livre, tanto no recinto, as trocas no tanque não foram maiores do que 10 % e 4,5 %, respectivamente. Sendo assim, o presente trabalho atingiu seu objetivo de propor um método de cálculo para ser aplicado em diferentes transformadores (mas que possuam o mesmo sistema de resfriamento) instalados em ambientes fechados.

O problema térmico de transformadores é um assunto muito vasto dentro do campo da transferência de calor. A seguir, sugestões de assuntos para estudos futuros: i) Criação de formulação para outros tipos de transformadores. ii) Melhoramento do modelo atual, incluindo fenômenos como convecção causada pelo vento, por exemplo. iii) Simulação numérica do problema. iv) Realização de estudos experimentais para comprovação da formulação proposta para os transformadores instalados em ambientes fechados

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dofan, J. A. R. **“Study on thermal model for calculating transformer hot spot.”**, Faculty of Electrical & Electronic Engineering - University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM), 41 p., 2011.

Guaraldo, N. J.; Monteiro, C. L.; Grimoni, J. A. B.; Kiatake, L. G. G.; Saidel, M.A.; Bistafa, S. R. **“Avaliação do Ruído de Transformadores no Entorno de SE's – Aplicativo e Simulação.”**, XIV SNPTEE – XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 7 p., 1997.

Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S **“Fundamentos de transferência de calor e de massa.”**, LTC, 6.ed, 643p, 2008.

Iskender, I.; Mamizadeh, A. **“Nonlinear thermal modeling of indoor and outdoor oil-immersed power transformers”**, Journal of Electrical Engineering, vol. 60, no. 6, p 321-327, 2009.

Kralj, L.; Miljavec, D., **“Stray losses in power transformer tank walls and construction parts”**, Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on , vol., no., pp.1,4, 2010.

Lindsay, J. F., **“Temperature rise of an oil-filled transformer with varying load”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 9, 1984.

Mora, J. F., **“Máquina Eléctricas”**, Colégio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, vol. 4, 2002.

NBR 10151, **“Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o Conforto da Comunidade”**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.

NBR 5356-1, **“Transformadores de potência – Parte 1: Generalidades”**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

NBR 5356-2, **“Transformadores de potência – Parte 2: Aquecimento”**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

Preis, K.; Bíró, O.; Buchgraber, G.; Ticar, I., **“Thermal-Electromagnetic Coupling in the Finite-Element Simulation of Power Transformers”**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, 2006.

Ries, W. **“Transformadores - Fundamentos para o Projeto e Cálculo”**, EDIPUCRS, 2007.

Tang, W. H.; Wu, Q. H., **“A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 3, 2004.

Teldetsadik, K.; Saravolac, M., **“Calculation of Losses in Structural Parts of Transformers by FE Method”**, The Institution of Electrical Engineers, 1996.

## APÊNDICE I - Dados cedidos do ensaio do transformador.

## Valores de perdas

Perdas medidas na temperatura de	25.0	°C	kW	112.5
Perdas ( $I^2 * R$ ) na temperatura de	25.0	°C	kW	58.1
Perdas calculadas no núcleo			kW	13.96
Perdas adicionais na temperatura de	25.0	°C	kW	27.9
Perdas ( $I^2 * R$ ) na temperatura de referência de	85	°C	kW	71.5
Perdas adicionais na temperatura de referência de	85	°C	kW	22.7
Perdas totais ( $I^2 * R$ + adicionais ) na temperatura de referência de	85	°C	kW	<b>108.1</b>

## Valores do ensaio de elevação de temperatura

Tempo	Tensão	Corrente	Temperaturas ( °C )												
			Ambiente				Sistema Refrigeração					Óleo			
hora	kV	A	t1	t2	t3	média	Sup 1	Inf 1	Sup 2	Inf 2	Dif m	topo	D ot	médio	D om
21:30	317.05	126.86	25.5	25.7	25.4	25.5	32.4	25.5	31.6	25.9	6.3	33.2	<b>7.7</b>	30.1	4.5
22:30	317.70	126.78	25.2	25.4	25.2	25.3	32.3	25.3	30.5	25.5	6.0	49.8	<b>24.5</b>	46.8	21.5
23:30	317.16	126.62	24.9	25.2	25.0	25.0	64.4	31.6	56.0	31.5	28.7	62.6	<b>37.6</b>	48.3	23.2
0:30	317.68	126.82	24.9	25.1	24.9	25.0	70.6	39.5	68.8	40.4	29.8	68.1	<b>43.1</b>	53.2	28.3
1:30	317.40	126.63	24.6	24.9	24.8	24.8	73.5	43.2	72.6	43.7	29.6	71.0	<b>46.2</b>	56.2	31.4
2:30	317.85	126.92	24.3	24.6	24.7	24.5	76.5	46.1	76.0	46.3	30.1	73.9	<b>49.4</b>	58.9	34.3
3:30	317.53	126.82	24.1	24.2	24.4	24.2	78.8	48.1	78.6	48.0	30.7	76.1	<b>51.9</b>	60.8	36.5
4:30	317.67	126.83	23.8	23.8	24.2	23.9	80.9	49.3	80.6	49.6	31.3	78.2	<b>54.3</b>	62.6	38.6
5:30	317.65	126.87	23.4	23.4	24.1	23.6	81.4	49.6	81.3	50.6	31.3	79.1	<b>55.5</b>	63.5	39.8
6:30	317.28	126.64	23.0	23.0	23.7	23.2	82.5	50.9	82.3	51.7	31.1	80.0	<b>56.8</b>	64.5	41.2
7:30	317.02	126.48	23.1	23.2	23.8	23.4	83.1	52.9	83.1	52.9	30.2	80.6	<b>57.2</b>	65.5	42.1
8:30	317.83	127.02	23.8	24.3	24.8	24.3	84.2	53.4	83.9	54.9	29.9	81.6	<b>57.3</b>	66.7	42.4
9:30	317.55	126.74	24.7	25.0	25.3	25.0	85.0	56.4	85.0	56.1	28.8	82.4	<b>57.4</b>	68.0	43.0
10:00	317.02	126.59	24.9	25.1	25.6	25.2	85.6	56.8	85.3	57.1	28.5	83.0	<b>57.8</b>	68.8	43.6

## APÊNDICE II - Dedução das Equações 5.13 e 5.14

A partir da troca de calor entre a parede do tanque do transformador e o meio externo o sistema passa a ser representado por equações que fazem a analogia entre circuitos térmicos e elétricos. Entre a parede e o meio externo tem-se troca por convecção e radiação. As trocas por condução não foram consideradas. O coeficiente de transferência de calor por convecção depende do salto de temperatura das paredes  $\Delta T_{par}$ , da temperatura ambiente do fluido  $T_f$  da pressão barométrica (mmHg) para os gases e da viscosidade para os líquidos. Assim, para o ar como meio fluido e simplificando para um caso de convecção natural em paredes verticais, tem-se a equação:

$$\alpha_c \cong 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta T_{par}} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_f}} \cdot \sqrt{\frac{B}{760}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$$

Para condições normais de  $T_f = 20 \text{ °C}$  e  $B = 790 \text{ mmHg}$ , ou muito próximas, pode ser utilizada a simplificação:

$$\alpha_c \cong 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta T_{pa}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$$

Para a determinação do coeficiente de transferência de calor por radiação é necessária a seguinte análise. Seja o transformador um corpo sólido com uma temperatura  $T_c$ , envolvido por outro a uma temperatura  $T_v < T_c$ , ambos irradiam calor, mas a resultante terá o sentido da temperatura maior para a temperatura menor e o calor transmitido é:

$$W_r = \sigma \cdot F_A \cdot F_E \cdot A_1 \cdot [(T_{pa})^4 - (T_a)^4] \text{ [W]}$$

Em que  $F_A$  é o fator de visão e  $F_E$  é o fator que depende das emissividades individuais  $\varepsilon$  e da relação de áreas das superfícies irradiante e receptora. Para este caso tem-se:

$$F_A = 1$$

$$F_E \cong \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{A_c}{A_v} \left( \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right)}$$

Se  $A_v \gg A_c$ ,  $F_E \approx \varepsilon_c$ . Se  $A_v = A_c$  e as paredes são paralelas, então:

$$F_E \cong \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \left( \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right)}$$

Para todos os demais casos,  $F_E \cong \varepsilon_c \cdot \varepsilon_v$  sempre que as emissividades não sejam muito menores do que 1.

Segundo Ries, 2007, para as superfícies pintadas de transformadores, normalmente a emissividade  $\varepsilon_c$  é de cerca de 0,93 e para os ambientes envolventes,  $\varepsilon_v$  é de cerca de 0,95. Com uma relação de áreas entre 0 e 1, o valor médio de  $F_E$  será 0,915. Como a constante de radiação do corpo negro é de  $5,67\text{E-}8$ , tem-se:

$$W_r = 5,3 \cdot 10^{-8} \cdot A_1 \cdot [(T_{pa})^4 - (T_a)^4] \text{ [W]}$$

A partir desta equação, define-se o coeficiente de radiação, para temperatura ambiente em torno de  $20 \text{ °C}$  e saltos de temperatura de  $20 \text{ °C}$  a  $100 \text{ °C}$ :

$$\alpha_r \cong 2,65 \cdot \sqrt[4]{\Delta T_{pa}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$$

### APÊNDICE III - Código do programa

A seguir, é apresentado o código do programa utilizado para cálculo das temperaturas do transformador instalado em um recinto. O algoritmo foi desenvolvido nas dependências do software *Engineering Equation Solver*, EES (2012-2013).

#### "Temperatura de referência"

$$\text{DELTAT\_op\_1} = T_{\text{op}} - T_{\text{a}}$$

$$\text{DELTAT\_op\_2} = T_{\text{op}} - T_{\text{recinto}}$$

$$T_{\text{oleo\_médio}} = T_{\text{op}} * 0.91$$

$$\text{DELTAT\_pa\_1} = 0.845 * \text{DELTAT\_op\_1} * 0.91$$

$$\text{DELTAT\_pa\_2} = 0.845 * \text{DELTAT\_op\_2} * 0.91$$

$$\text{DELTAT\_pa\_1} = T_{\text{pa\_1}} - T_{\text{a}}$$

$$\text{DELTAT\_pa\_2} = T_{\text{pa\_2}} - T_{\text{recinto}}$$

$$\text{DELTAT\_recinto} = T_{\text{recinto}} - T_{\text{a}}$$

#### "Dissipação nos radiadores"

$$\alpha_{\text{c\_rad}} = K * (h_2)^{-x} * \text{DELTAT\_pa\_1}^{0.25}$$

experimentalmente"

"Constantes k e x determinadas

$$K = 2.5$$

$$x = 0.175$$

$$A_1 = 0.97 * 2.5$$

"Para b=460mm"

$$E_1 = 25$$

"Número de elementos"

$$A_2 = 0.97 * 2$$

"Para b=460mm"

$$E_2 = 3$$

"Número de elementos"

$$A_{\text{r\_c}} = A_1 * E_1 + A_2 * E_2$$

"Área de convecção do radiador"

$$\alpha_{\text{r}} = 2.65 * ((\text{DELTAT\_pa\_1})^{0.25})$$

$$\epsilon = 0.012$$

"Espessura do favo"

$$c = 0.045$$

"Distância entre favos"

$$a = 0.2$$

"Distância desde o transformador"

$$h_2 = 2.500$$

"Altura dos radiadores"

$$N = 5$$

"Número de radiadores"

$$d = 0.77185$$

"Distância entre radiadores"

$$A_{\text{r\_rad}} = (d * h_2) + (d * (((E_1 + E_2) - 1) * c + \epsilon + a)) + ((h_2 * (((E_1 + E_2) - 1) * c + \epsilon + a) * 2))$$

$$W_{\text{rad}} = (\alpha_{\text{c\_rad}} + (\alpha_{\text{r}} * (A_{\text{r\_rad}} / A_{\text{r\_c}}))) * \text{DELTAT}_{\text{pa\_1}} * A_{\text{r\_c}} * N$$

"Dissipação no tanque e na envoltória"

$$\alpha_{\text{c\_tanque}} = 2.5 * ((\text{DELTAT}_{\text{pa\_2}})^{0.25})$$

$$W_{\text{tanque}} = (\alpha_{\text{c\_tanque}} + \alpha_{\text{r}}) * \text{DELTAT}_{\text{pa\_2}} * A_{\text{tanque}}$$

$$\text{diametro} = 2.600$$

$$\text{altura} = 3.219$$

$$A_{\text{tanque}} = 1.377 * \pi * (\text{diametro} / 2) * \text{altura}$$

$$\alpha_{\text{c\_env}} = 2.5 * ((\text{DELTAT}_{\text{recinto}})^{0.25})$$

$$W_{\text{tanque}} = U * \text{DELTAT}_{\text{recinto}} * A_{\text{envoltória}}$$

$$A_{\text{envoltória}} = \pi * \text{diâmetro}_{\text{env}} * \text{altura}_{\text{env}}$$

$$\text{diâmetro}_{\text{env}} = 2.800$$

$$\text{altura}_{\text{env}} = 3.419$$

$$U = 1 / (((1 / \alpha_{\text{c\_env}}) + (1.3905 / k_{\text{concreto}}) * (\ln(1.4305 / 1.3905))))$$

$$k_{\text{concreto}} = 1.4$$

"Dissipação total"

$$W_{\text{perdas}} = 108160$$

$$W_{\text{perdas}} = W_{\text{rad}} + W_{\text{tanque}}$$

"Temperatura nos enrolamentos"

$$\text{DELTAT}_{\text{C01}} = (((1 + k_{\text{a}}) * d^2 * a) / (((\beta + 1.45 * \text{esp}) + (\alpha) / (n * (1 + k * n)))) * (p / (2 * k_{\text{s}})) * ((\text{esp} / x) + (1 / \alpha_{\text{C01}})))$$

$$\text{DELTAT}_{\text{001}} = T_{\text{op}} - T_{\text{01}}$$

$$\text{DELTAT}_{\text{001}} = T_{\text{op}} * 0.25$$

$$T_{\text{enr}} = T_{\text{01}} + \text{DELTAT}_{\text{C01}}$$

$$\text{DELTAT}_{\text{enr}} = T_{\text{enr}} - T_{\text{a}}$$