

# UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

JONAYLTON MOURA DE SOUSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ENSAIOS DE CARREGAMENTO EM CONDIÇÃO NORMAL DE OPERAÇÃO E EM CONDIÇÕES DE EMERGÊNCIA DE LONGA E CURTA DURAÇÕES UTILIZANDO HARDWARE E SOFTWARE DE BAIXO CUSTO

Niterói, RJ Dezembro de 2019

# JONAYLTON MOURA DE SOUSA

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ENSAIOS DE CARREGAMENTO EM CONDIÇÃO NORMAL DE OPERAÇÃO E EM CONDIÇÕES DE EMERGÊNCIA DE LONGA E CURTA DURAÇÕES UTILIZANDO HARDWARE E SOFTWARE DE BAIXO CUSTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Henrique de Oliveira Henriques, D.Sc.

Niterói, RJ Dezembro de 2019

# JONAYLTON MOURA DE SOUSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ENSAIOS DE CARREGAMENTO EM CONDIÇÃO NORMAL DE OPERAÇÃO E EM CONDIÇÕES DE EMERGÊNCIA DE LONGA E CURTA DURAÇÕES UTILIZANDO HARDWARE E SOFTWARE DE BAIXO CUSTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique de Oliveira Henriques - Orientador

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Heraldo Luis Silveira de Almeida Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Niterói (dezembro/2019)

# **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sua fidelidade e bênçãos concedidas.

Agradeço à minha melhor amiga, minha companheira nessa fase da minha vida e espero que em todas as próximas, Marianna Lopes Monteiro, pelo carinho, companheirismo e paciência, sobretudo diante de dificuldades e incertezas.

Agradeço a toda a minha família pelo amor, apoio e incentivo necessários para a conclusão de mais uma etapa crucial à minha formação acadêmica, em especial aos meus pais Florencio de Sousa e Elenilza Moura de Sousa.

Agradeço ao meu orientador Henrique de Oliveira Henriques pelo auxílio e direcionamento durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à empresa Light, seus colaboradores diretamente envolvidos na execução do projeto e aos engenheiros Carlos Eduardo Vizeu Pontes e João Carlos de Oliveira Aires pelo compartilhamento de informações essenciais para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à Fundação Euclides da Cunha (FEC) por fornecer recursos financeiros para o desenvolvimento deste projeto, contratando a empresa SKM para fabricação das unidades de aquisição de dados de temperatura, à qual estendo os meus agradecimentos.

"Imposto é roubo."

Murray N. Rothbard

"Pois toda a Escritura Sagrada é inspirada por Deus e é útil para ensinar a verdade, condenar o erro, corrigir as faltas e ensinar a maneira certa de viver."

2Timóteo 3:16

# **RESUMO**

O presente trabalho compreende parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da distribuidora Light em parceria com a Universidade Federal Fluminense (UFF). O projeto visa analisar o comportamento térmico de transformadores submetidos a diversas condições de carregamento especificadas em normas (NT 038/2014 da ONS, NBR 5416 e 5356 da ABNT e REN 191-2005 e RES 513-2002 da ANEEL). Através deste trabalho, procurou-se verificar a relação entre a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (ou do topo do óleo) e a temperatura de um ponto escolhido da carcaça do transformador, em diversas condições de carga e de temperatura ambiente, utilizando os métodos de regressão linear múltipla e identificação de sistemas usando equações diferenciais, ambos baseados nos dados observados. Adotou-se uma abordagem de desenvolvimento, tanto do hardware para aquisição de dados quanto do software integrado para processamento e apresentação dos dados, visando o baixo custo, facilidade de manutenção e simplicidade. Acredita-se ter chegado em um produto final que atende às especificações de projeto, resiste às condições de operação e apresenta um baixo custo relativo que justifique a utilização desse equipamento e seu respectivo software como auxílio no planejamento da expansão da capacidade da subestação.

**Palavras-Chave:** Regressão linear múltipla, identificação de sistemas usando equações diferenciais, função de transferência, ensaio de carregamento de transformadores, redes de distribuição, baixo custo, planejamento da expansão, desenvolvimento de produto, P&D, Arduino, XBee, LabVIEW, MATLAB, SPSS IBM Statistics.

# **ABSTRACT**

This work comprehends part of a Research and Development (R&D) project of the Light distribution company in partnership with Fluminense Federal University (UFF). The Project aims to analyze the thermal behavior of transformers under several loading conditions specified by standards (NT 038/2014 from ONS, NBR 5416 and 5356 from ABNT and REN 191-2005 and RES 513-2002 from ANEEL). Through this work, it was aimed to verify the relation between the winding hot spot temperature (or the top-oil temperature) and a chosen point in the oil reservoir external surface, in various load conditions and ambient temperature by using the multiple linear regression analysis and the system identification using differential equations analysis, both based on observed data. It was adopted a development approach, both the hardware for data acquisition and the integrated software for processing and presenting the data, seeking low cost, ease of maintenance and simplicity. It's believed that a final product was achieved which meets the project specifications, resists the conditions of operation and has a low relative cost which justifies the use of this equipment and its software as an assistance in the substation capacity expansion planning.

**Keywords:** Multiple linear regression, system identification using differential equations, transfer functions, transformer loading test, distribution networks, low-cost, expansion planning, product development, R&D, Arduino, XBee, LabVIEW, MATLAB, SPSS IBM Statistics.

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de transformadores	5
Tabela 2: Símbolos literais	6
Tabela 3: Ordem dos símbolos	6
Tabela 4: Valores de referência para o óleo isolante e papel novos	11
Tabela 5: Tempo de vida normal para um sistema de isolação com	
concentrações de oxigênio e umidade, a uma temperatura de referência do	e 110 °C
	14
Tabela 6: Limites normais de elevação de temperatura à potência nom	inal em
regime permanente	14
Tabela 7: Limites de corrente e temperatura aplicáveis para carregamento	15
Tabela 8: Temperaturas-limite (°C)	16
Tabela 9: Especificações de projeto	23
Tabela 10: Consumo de corrente em mA para cada arranjo	30
Tabela 11: Duração da bateria para cada arranjo	31
Tabela 12: Valores típicos dos parâmetros térmicos de transformadores	34
Tabela 13: Valores típicos dos parâmetros térmicos de transformadores	35
Tabela 14: Correspondência entre as identificações dos sensores	40
Tabela 15: Resumo do modelo para a temperatura do topo do óleo $(VF = 0)$	42
Tabela 16: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura do	topo do
óleo (VF = 0)	43
Tabela 17: Resumo do modelo para a temperatura do topo do óleo $(VF = 1)$	43
Tabela 18: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura do	topo do
óleo (VF = 1)	43
Tabela 19: Resumo do modelo para a temperatura do ponto mais qu	iente do
enrolamento (VF = 0)	44
Tabela 20: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura d	lo ponto
mais quente do enrolamento (VF = 0)	44
Tabela 21: Resumo do modelo para a temperatura do ponto mais qu	ente do
enrolamento (VF = 1)	45
Tabela 22: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura d	lo ponto
mais quente do enrolamento (VF = 1)	
Tabela 23: Grau de ajuste dos resultados previstos pelos modelos matemát	icos e os
dados observados	
Tabela 24: Lista de itens adquiridos para o projeto e seus custos	66

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do histórico das normas ABNT	5
Figura 2: Exemplo de curva de carga equivalente	7
Figura 3: Exemplo de curva de carga real	7
Figura 4: Ciclo de carregamento em condição normal de operação - Capac	idade
operativa de longa duração	8
Figura 5: Ciclo de carregamento em condição de emergência de longa dura	ção –
Capacidade operativa de curta duração	9
Figura 6: Ciclo de carregamento em condição de emergência de curta duração	<b>)</b> 10
Figura 7: Fluxograma do sistema de aquisição de dados	26
Figura 8: Foto dos módulos sensores sendo produzidos	27
Figura 9: Hierarquia dos VIs no LabVIEW®	27
Figura 10: Interface gráfica do painel frontal	28
Figura 11: Prompt informando que o usuário deve escolher um arquivo .csv	para
armazenar os dados	28
Figura 12: Matriz 4x5 de temperaturas dos sensores	29
Figura 13: Ring de seleção do sensor	29
Figura 14: Gráfico da temperatura do sensor em função do número da amostr	<b>:a</b> . 30
Figura 15: Representação em diagrama de blocos das equações diferencia	is do
sistema	33
Figura 16: Vista frontal do transformador	37
Figura 17: Vista superior do transformador	38
Figura 18: Vista lateral esquerda do transformador	
Figura 19: Vista lateral direita do transformador	
Figura 20: Vista posterior do transformador	
Figura 21: Comando para executar regressão linear	
Figura 22: Variáveis de entrada e saída para o modelo de regressão linear mú	ltipla
Figura 23: Gráfico da temperatura do topo do óleo prevista pelo modelo e rea	
Figura 24: Gráfico da temperatura do ponto mais quente do enrolamento pro	
pelo modelo e real	
Figura 25: Gráfico da potência ativa do transformador	
Figura 26: Gráfico da temperatura ambiente	
Figura 27: Identificação da função de transferência entre as variáveis de entr	
saída (temperatura do ponto mais quente do enrolamento)	
Figura 28: Gráfico e percentual de ajuste dos diversos modelos em relação aos o	
observados (temperatura do ponto mais quente do enrolamento)	
Figura 29: Identificação da função de transferência entre as variáveis de entr	
saída (temperatura do topo do óleo)	
Figura 30: Gráfico e percentual de ajuste dos diversos modelos em relação aos o	
observados (temperatura do topo do óleo)	49

Figura 31: Gráfico das temperaturas medidas por todos os sensores instala	ı <b>dos</b> 50
Figura 32: Gráfico das curvas de temperatura dos sensores T8 e T14	50
Figura 33: Legenda do VI "daqsys.vi"	59
Figura 34: daqsys.vi: Configurações de usuário	59
Figura 35: daqsys.vi: Rotinas de inicialização	60
Figura 36: daqsys.vi: Loop principal de aquisição de dados	61
Figura 37: Diagrama de blocos do VI "temp_table.vi"	62
Figura 38: Diagrama de blocos do VI "temp_chart.vi"	62
Figura 39: Diagrama de blocos do VI "create_command.vi"	62
Figura 40: Diagrama de blocos do VI "datalogger.vi"	63
Figura 41: Diagrama de blocos do VI "get_sensor_number.vi"	64
Figura 42: Diagrama de blocos do VI "get_sensor_data.vi"	64
Figura 43: Diagrama de blocos do VI "rtd_data_to_temp.vi"	64
Figura 44: Diagrama de blocos do VI "r_to_temp.vi"	65
Figura 45: Diagrama de blocos do MATLAB do modelo de equações dif	erenciais
utilizando os valores típicos	79
Figura 46: Gráfico da resposta ao degrau da temperatura do ponto mais q	juente do
enrolamento	79

# SUMÁRIO

1. IN	TRODUÇÃO	1
2. R	EVISÃO DAS NORMAS TÉCNICAS	4
2.1.	NOTA TÉCNICA NT 038/2014 DO ONS	4
2.2.	NORMAS NBR 5416 E 5356 DA ABNT	4
2.3.	3	
	ANEEL	
3. D	ESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
4. PI	ROPOSTA DE SOLUÇÃO	23
4.1.	ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE	23
4.2.	ESPECIFICAÇÕES DE SOFTWARE	25
5. D	ESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE D	OADOS 26
6. M	ETODOLOGIA	32
6.1.	REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	32
6.2.	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS USANDO	EQUAÇÕES
	ERENCIAIS	
7. PI	ROCEDIMENTO DE ENSAIO	37
8. R	ESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
8.1.	APLICANDO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	41
8.2.	3	
	JAÇÕES DIFERENCIAIS	
	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	
9. C	ONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	52
9.1.	CONCLUSÕES	52
9.2.	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	53
9.2.1	. MELHORIAS DE SOFTWARE	53
9.2.2	MELHORIAS DE HARDWARE	54
REFE	RÊNCIAS	57
APÊN	DICE A	59
APÊN	DICE B	66

APÊNDICE C	69
APÊNDICE D	75
APÊNDICE E	79

# LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT Associação Brasileiro de Normas Técnicas

AF Resfriamento Ar-Forçado

AN Resfriamento Ar-Natural

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

CECD Condição de Emergência de Curta Duração

CELD Condição de Emergência de Longa Duração

CNO Condição Normal de Operação

COCD Capacidade Operativa de Curta Duração

COLD Capacidade Operativa de Longa Duração

CR Controle de Reativos

csv Comma separated value

FT Função Transmissão

GP Grau de Polimerização

IDE Integrated Development Environment

IEC International Electrotechnical Comission

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

KOH Hidróxido de Potássio

LT Linha de Transmissão

MG Módulo Geral

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

NT Nota Técnica

OD Resfriamento Óleo-Direcionado

OF Resfriamento Óleo-Forçado

ON Resfriamento Óleo-Natural

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

P&D Pesquisa e Desenvolvimento

PB Pagamento Base

PC Personal Computer

ppm Partes por milhão

p.u. Por unidade

REN Resolução Normativa

RES Resolução

RLM Regressão Linear Múltipla

RTD Resistance Temperature Detector

Std Standard

TF Função de Transferência

TR Transformador de Potência

VF Ventilação Forçada

VI Virtual Instrument

# LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
g	grama
h	Horas
Н	Fator do ponto mais quente do enrolamento
$k_{11}$	Constante do modelo térmico
$k_{21}$	Constante do modelo térmico
k <sub>22</sub>	Constante do modelo térmico
K	Fator de carga (corrente de carga/corrente nominal) ou
K	Temperatura absoluta em Kelvin
kVA	kilo (10³) Volt-Ampére
L	Envelhecimento total sobre o período considerado
min	Minutos
MVA	Mega (10 <sup>6</sup> ) Volt-Ampére
n	Número de cada intervalo de tempo
N	Número total de intervalos durante o período considerado
P	Perdas fornecidas
R	Relação entre perdas em carga-perdas em vazio na corrente nominal
S	Variável de Laplace
V	Taxa de envelhecimento relativo
W	Watt
X	Expoente de potência da perda total versus topo do óleo (em tanque) da elevação
	de temperatura (expoente do óleo)
y	Expoente de potência da corrente versus elevação de temperatura (expoente do
	enrolamento)
$\theta_{a}$	Temperatura ambiente
$\theta_{h}$	Temperatura do ponto mais quente
$\theta_{o}$	Temperatura do topo do óleo
$ au_{\mathrm{o}}$	Constante de tempo do óleo médio
$\tau_{\rm w}$	Constante de tempo do enrolamento
$\Delta\theta_h$	Gradiente obtido pela diferença entre as temperaturas do ponto mais quente e do
	topo do óleo (no tanque) na carga considerada

- $\Delta\theta_{hr}$  Gradiente obtido pela diferença entre as temperaturas do ponto mais quente e do topo do óleo (no tanque) na corrente nominal
- $\Delta\theta_{o}$  Elevação de temperatura do topo do óleo (no tanque) na carga considerada
- $\Delta\theta_{or}$  Elevação de temperatura do topo do óleo (no tanque) em regime permanente nas perdas nominais (perdas em vazio + perdas em carga)
- $\Omega$  Ohm

# 1. INTRODUÇÃO

A avaliação da vida útil de um transformador é determinada principalmente pelo envelhecimento térmico da isolação. O principal fator acelerador do envelhecimento é a utilização do transformador em sobrecarga. A isolação, por sua vez, sempre envelhecerá mais rápido no ponto mais quente do enrolamento. Nem sempre essa temperatura é medida de forma direta e muitas das vezes utilizam-se modelos para medição indireta. Quanto mais preciso for esse modelo, menos restrita é a operação, pois, quando há incerteza na medição, utiliza-se um fator de segurança maior, o que faz com que se utilize o equipamento muito abaixo da sua capacidade. Cabe mencionar que toda subestação é planejada para um horizonte de operação de modo a atender às normas das agências reguladoras em vigor. Caso seja constatado, na fase de planejamento, que em uma contingência, para uma demanda projetada, algum dos transformadores ultrapasse os limites de temperatura e sobrecarga estabelecidos em norma, deve-se planejar a expansão da capacidade firme do parque (aquisição de novos transformadores), o que envolve altos custos. Portanto, é de interesse da distribuidora o aprimoramento dos modelos utilizados de modo a permitir o adiamento de investimentos.

Este presente trabalho é parte integrante de um projeto de P&D da empresa Light. As etapas anteriores desse projeto de pesquisa foram responsáveis por elaborar um modelo termodinâmico tridimensional do transformador, o qual foi utilizado em simulações executadas no software FLUX3D para determinar as temperaturas do ponto mais quente do enrolamento e do topo do óleo a partir das informações de carregamento, da temperatura ambiente, das temperaturas de pontos externos da carcaça do transformador e de suas dimensões físicas. Este modelo tridimensional não foi considerado no presente trabalho.

Neste contexto foi desenvolvido o presente trabalho que tem como finalidade a avaliação dos efeitos do carregamento de transformadores na temperatura atingida pelos acessórios do transformador, enrolamento, e óleo, utilizando um conjunto de sensores de temperatura do tipo RTD (Resistance Temperature Detector) PT-100 e módulos de comunicação *wireless*, instalados na superfície externa do transformador, além dos sensores de temperatura já presentes no transformador. O conjunto de dados de temperatura coletado em um ciclo de carga será então utilizado para determinação de uma

relação entre as variáveis independentes de entrada escolhidas e a variável dependente de saída de interesse, utilizando dois métodos distintos, a regressão linear múltipla e a identificação de sistemas usando equações diferenciais (função de transferência). Os dados experimentais obtidos neste trabalho serão utilizados pela equipe de P&D para validação do modelo tridimensional desenvolvido por eles, em uma etapa futura do projeto.

A quantidade e localização de instalação dos sensores na carcaça do transformador foram definidas na etapa de modelagem tridimensional. Foi exigido que o sistema de aquisição de dados fizesse uso de componentes de baixo custo e de plataforma aberta para prototipagem (Open Source), permitindo que alterações possam ser executadas sem dificuldades, dada a extensa documentação disponível de forma gratuita na Internet e a ampla comunidade de desenvolvedores. Outro requisito foi o de permitir a escalabilidade da aplicação, dado o baixo custo final do projeto. Foi exigido também que os equipamentos do sistema resistissem às condições climáticas do ambiente externo às quais estarão sujeitos.

O trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira: no Capítulo 2 são apresentadas as normas técnicas brasileiras em vigor que regem sobre o assunto do trabalho, são definidos os termos técnicos utilizados e apresentadas as principais fórmulas. No Capítulo 3 é descrito o problema de envelhecimento do material isolante de forma mais detalhada que o apresentado aqui no Capítulo 1. No Capítulo 4 são apresentadas as especificações de hardware e software para solução do problema proposto, de modo a permitir a aquisição dos dados de temperatura dos pontos externos do transformador durante o teste de carregamento. O Capítulo 5 trata do software desenvolvido para o microcontrolador, embarcado nos módulos sensores de temperatura, e do software desenvolvido para PC, que apresenta os dados para o usuário. O Capítulo 6 apresenta os métodos matemáticos de modelagem propostos para análise dos dados experimentais e determinação da equação das temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento em função das variáveis de entrada. O Capítulo 7 descreve o procedimento de ensaio de carregamento adotado no dia do teste do Trafo 2 da subestação Frei Caneca. No Capítulo 8 são apresentados os resultados das análises dos dados experimentais utilizando os dois métodos definidos no Capítulo 6. No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões do trabalho e as considerações finais, fazendo um comparativo entre os métodos de análise propostos e sugerindo qual método deve ser utilizado preferencialmente, além de, na seção 9.2, serem apresentadas sugestões de trabalhos futuros, incluindo melhorias que podem ser feitas tanto no equipamento quanto no software desenvolvidos.

# 2. REVISÃO DAS NORMAS TÉCNICAS

# 2.1. NOTA TÉCNICA NT 038/2014 DO ONS

Conforme consta neste documento, todo transformador de potência deve atender os requisitos definidos nos anexos técnicos dos editais de leilão e nos procedimentos de rede. A expectativa de vida útil deve ser de 35 anos para o regime de carregamento pretendido. Esses requisitos são a base para que a transmissora elabore a especificação para fabricação, a ser informada ao fabricante do transformador de potência.

Os requisitos funcionais são regulados pelas Resolução Normativa REN 191-2005 [2] e Resolução 513-2002 [1], ambas da ANEEL, enquanto a especificação para fabricação deve ser feita conforme as normas técnicas brasileiras, mais particularmente as NBR 5416 [5] e 5356 [3] e [4] da ABNT.

Na revisão da norma NBR 5356 [4], que será apresentada no subitem 1.2.2, esta nota técnica foi incorporada como o Anexo H da NBR 5356-7 [4]. Portanto, os aspectos abordados nessa nota técnica serão apresentados no subitem 1.2.2 como parte do Anexo H da NBR 5356-7 [4] e não como NT 038/2014 [14] do ONS, de modo a garantir que este texto esteja de acordo com a revisão mais recente destas normas.

# 2.2. NORMAS NBR 5416 E 5356 DA ABNT

A norma NBR 5416:1997 [5] fornece os procedimentos para a aplicação de cargas em transformadores e autotransformadores de potência, fabricados e ensaiados de acordo com a NBR 5356:1993 [3], e imersos em líquido isolante, com dois ou mais enrolamentos, trifásicos ou bancos com unidades monofásicas. A norma NBR 5416:1997 [5] foi revisada e substituída pela NBR 5356-7 [4]. A norma NBR 5356:1993 [3] foi revisada e desmembrada em diversas partes, constituindo um conjunto de normas ABNT NBR 5356 [4] sob o título geral "Transformadores de Potência" com previsão inicial de conter as Partes 1 a 8, conforme descrito no Prefácio da Parte 1. A Parte 1 dessa norma (NBR 5356-1:2007 (Versão Corrigida 2010)) trata de Generalidades e será utilizada como referência base à norma 5356 [4] em vigor, portanto, a seguir, sempre que se fizer referência à norma, desde que não explícita o ano ou a Parte, trata-se da NBR 5356-1:2007 (Versão

Corrigida 2010) [4]. Esta norma encontra-se em fase de revisão atualmente, com previsão de conclusão em 2020 e englobará outras partes além das 8 previstas inicialmente. Portanto, para efeitos do presente trabalho, serão adotadas as definições dadas pela norma mais recente em vigor. A Figura 1 a seguir apresenta um fluxograma do histórico dessas normas.



Figura 1: Fluxograma do histórico das normas ABNT

Fonte: Próprio autor

A NBR 5356-7 [4] descreve os efeitos da operação de carregamento de transformadores de potência imersos em óleo mineral isolante sob várias temperaturas ambientes e condições de carga na vida do transformador e se aplica a transformadores e autotransformadores das classes:

- Classe 55 °C: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65 °C;
- Classe 65 °C: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 80 °C.

Quanto a potência nominal de operação, são definidos os seguintes tipos de transformadores, conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1: Tipos de transformadores

	Potência Nominal			
Fases Transformador de		Transformador de média	Transformador de grande	
	distribuição	potência	potência	
Trifásico	≤ 2.500 kVA	$2.500 \text{ kVA} \le P_{nom} \le 100 \text{ MVA}$	$P_{nom} \ge 100 \text{ MVA}$	
Monofásico	≤ 833 kVA	$833 \text{ kVA} \leq P_{\text{nom}} \leq 33,3 \text{ MVA}$	$P_{nom} \ge 33,3 \text{ MVA}$	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 (item 3)

Quanto ao método de resfriamento, a norma NBR 5356-2 [4] classifica os transformadores imersos em óleo isolante utilizando um grupo de quatro símbolos, conforme item 3 (Classificação dos Métodos de Resfriamento) desta Norma. As Tabelas 2 e 3 apresentam um resumo de como esses símbolos são utilizados (maiores detalhes podem ser consultados na NBR 5356-2):

Tabela 2: Símbolos literais

Natureza do meio de resfriamento	Símbolo
Óleo	0
Líquido isolante sintético não-inflamável	L
Gás	G
Água	W
Ar	A
Natureza da Circulação	Símbolo
Natural	N
Forçada (no caso de óleo, fluxo não dirigido)	F
Forçada com fluxo de óleo dirigido	D

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-2 [4] (item 3)

Tabela 3: Ordem dos símbolos

Primeira Letra	Segunda Letra	Terceira Letra	Quarta Letra		
Indicativa do meio de resfriamento em contato		Indicativa do meio de resfriamento em contato			
com os eni	com os enrolamentos		com o sistema de resfriamento externo		
Natureza do meio de	Natureza da circulação	Natureza do meio de	Natureza da circulação		
resfriamento		resfriamento			

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-2 [4] (item 3)

Exemplo de designação de transformadores de potência quanto ao resfriamento:

ONAN: Óleo-Natural Ar-Natural

• ONAF: Óleo-Natural Ar-Forçado

A NBR 5356-7 [4], conforme consta em seu Anexo H, define o carregamento de uma unidade transformadora em termos de ciclos de carga, em que um ciclo de carga corresponde ao ciclo de 24h. Apenas para referência, sem efeito prático para aplicação da NBR 5356-7 [4], cabe comentar que a NBR 5416:1993 [5] estabelecia que o ciclo de

carga real pode ser convertido para um ciclo de carga equivalente, de formato retangular. As Figuras 2 e 3 apresentam as curvas de carga equivalente e real, respectivamente.

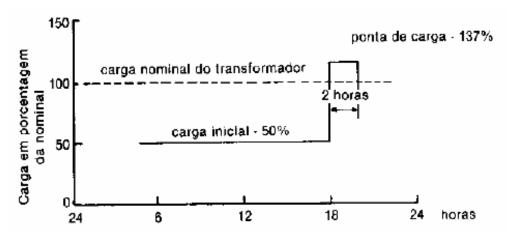


Figura 2: Exemplo de curva de carga equivalente

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5416 [5]

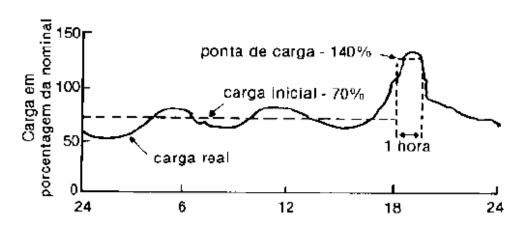


Figura 3: Exemplo de curva de carga real

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5416 [5]

Os ciclos de carga/carregamento são classificados em:

1. Condição Normal de Operação (CNO): É aquela na qual, em nenhum momento, é excedida a temperatura do topo do óleo ou a do ponto mais quente do enrolamento para a condição normal, mesmo que, em parte do ciclo, seja ultrapassada a potência nominal. Corresponde à Capacidade Operativa de Longa Duração (COLD) definida pela ANEEL, utilizada pelo ONS para as condições normais de operação. Este ciclo é utilizado no âmbito do planejamento. A transmissora deve garantir que, em condição normal de

operação, o transformador possa operar continuamente desde sua entrada em operação e ao longo de toda a vida útil de 35 anos com carregamento de 100% da potência nominal, como ilustrado na Figura 4;

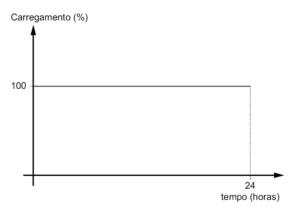


Figura 4: Ciclo de carregamento em condição normal de operação – Capacidade operativa de longa duração

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4]

2. Condição de Emergência de Longa Duração (CELD): Tal carregamento permite que sejam ultrapassados os limites de temperatura do ciclo de carregamento em condição normal de operação, uma vez que são consideradas saídas prolongadas de unidades transformadoras, desligamento de algum elemento de sistema. Corresponde à Capacidade Operativa de Curta Duração (COCD) definida pela ANEEL, utilizada pelo ONS durante contingência decorrente do desligamento prolongado de uma Função Transmissão (FT). Este ciclo de carregamento é utilizado no âmbito do planejamento. A transmissora deve garantir que, em condição de emergência de longa duração, o transformador possa operar, sempre que solicitado pelo ONS, desde sua entrada em operação e ao longo de toda a vida útil de 35 anos, com carregamento de 120 % da potência nominal por um período de 4 h do seu ciclo diário de carga para a expectativa de perda de vida útil estabelecida na ABNT NBR 5356-7 [4]. O referido carregamento de 120 % deve poder ser alcançado em qualquer condição de carregamento do transformador, inclusive com carregamento prévio de 100 % da sua potência nominal, como ilustrado na Figura 5; e

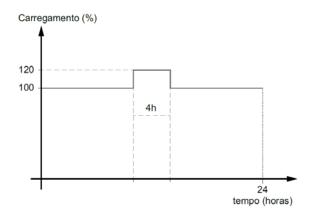


Figura 5: Ciclo de carregamento em condição de emergência de longa duração — Capacidade operativa de curta duração

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] Anexo H

3. Condição de Emergência de Curta Duração (CECD): Este tipo de carregamento envolve condições de maior risco, devendo, portanto, ser utilizado apenas em raras ocasiões. O tempo de operação, nessa condição, deve ser menor do que a constante de tempo térmica do transformador e depende da temperatura em operação antes da contingência, não devendo ser maior que 30 minutos. Durante esse intervalo de tempo, deve-se retornar à condição de carregamento de longa duração; caso contrário, o transformador deve ser desligado, para se evitar o risco de falha. A ANEEL estabelece que que este carregamento deve ser utilizado em situações de contingência no SIN, como último recurso operativo antes do corte de carga, mediante monitoramento da transmissora. Este ciclo de carregamento é utilizado no âmbito da operação. A transmissora deve garantir que, em condição de emergência de curta duração, o transformador possa operar, sempre que solicitado pelo ONS, desde sua entrada em operação e ao longo de toda a vida útil de 35 anos, com carregamento de 140 % da potência nominal por um período de 30 min dentro do seu ciclo diário, mantendo a expectativa de perda de vida útil, conforme critérios estabelecidos nesta parte da ABNT NBR 5356 [4]. O referido carregamento de 140 % deve poder ser alcançado para qualquer condição de carregamento do transformador, inclusive com carregamento prévio de 100 % da sua potência nominal, como ilustrado na Figura 6.

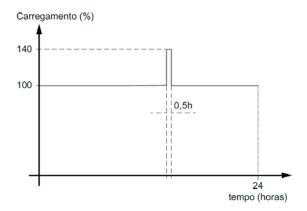


Figura 6: Ciclo de carregamento em condição de emergência de curta duração

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] Anexo H

Alguns desses ciclos de carga recebem classificação diversa nas Resoluções da ANEEL descritas no próximo tópico, no que se refere às capacidades operativas das instalações de transmissão ou das chamadas Funções Transmissão, as quais são: LT-Linha de Transmissão, TR-Transformador de Potência, CR-Controle de Reativos, MG-Módulo Geral.

Os transformadores apresentam diversas características que determinam o seu carregamento máximo. Dentre as Características Básicas listam-se:

- Classe do transformador (55 °C ou 65 °C);
- Corrente nominal;
- Tensão nominal;
- Peso da parte ativa;
- Peso do tanque e acessórios;
- Volume do óleo;
- Perdas em carga (perdas binárias para transformadores com mais de 2 enrolamentos);
- Perdas em vazio;
- Elevação da temperatura do topo do óleo sob carga nominal em relação à ambiente;
- Elevação da temperatura média do enrolamento sob carga nominal em relação à do topo do óleo;
- Constante de tempo térmica do transformador;

- Método de resfriamento:
- Tipo do sistema de preservação do óleo;

Os transformadores de potência devem ser dimensionados considerando:

- 1. Que em 90 % dos dias de operação, o transformador esteja submetido ao ciclo de carga normal (condição normal) e nos 10 % dos dias de operação restantes ao ciclo de sobrecarga (condições de emergência de longa e curta duração);
- A expectativa de vida projetada nesta condição composta deve ser de 35 anos;
   e
- Determinação do fim de vida útil pelo atingimento de grau de polimerização do papel isolante igual ou inferior a 200 (GP200);

A expectativa de vida esperada de um transformador é determinada pela degradação do papel isolante de celulose. O sistema de papel isolante é submetido a um processo contínuo de degradação por ação da água (degradação hidrolítica), oxigênio e ácidos (degradação oxidativa) e pela temperatura (degradação térmica) do óleo isolante. Os limites de teor dos contaminantes são dados pela Tabela 4.

Tabela 4: Valores de referência para o óleo isolante e papel novos

Ensaio	Método de Ensaio	Limites
Umidade no papel (% em massa)	ASTM D1348	< 1
Índice de neutralização (mg KOH/g)	ABNT NBR 14248	< 0,1
Teor de O <sub>2</sub> (ppm)	ABNT NBR 7070	< 3000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] Anexo G

Mantendo-se sob controle a ação dos contaminantes (água, oxigênio e ácidos), o envelhecimento da celulose é predominantemente térmico e cumulativo [4].

Embora o envelhecimento ou deterioração da isolação sejam função temporal da temperatura, nível de umidade, conteúdo de oxigênio e ácidos, o modelo apresentado na Parte 7 da ABNT NBR 5356 [4] é baseado somente na temperatura como o parâmetro de controle. Portanto, a vida esperada do transformador está baseada no envelhecimento da isolação sob efeito da temperatura de operação ao longo do tempo, fundamentada na lei de Dakin-Arrhenius [6]. Como a distribuição da temperatura não é uniforme, a parte que está operando na maior temperatura, normalmente, sofre a maior deterioração. Portanto,

a taxa de envelhecimento se refere ao ponto mais quente do enrolamento (*hottest-spot*) em contato com a isolação. Neste caso, a taxa de envelhecimento relativo (*V*) é definida de acordo com a Equação 1 para papel não termoestabilizado e de acordo com a Equação 2 para papel termoestabilizado, conforme [4]:

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \tag{1}$$

$$V = e^{\left(\frac{15.000}{110+273} - \frac{15.000}{\theta_h + 273}\right)} \tag{2}$$

onde:

 $\theta_h$ : temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em °C;

Quando a taxa de envelhecimento relativo é igual a 1, significa que durante o intervalo de operação, a isolação está envelhecendo o mesmo período, se for inferior a 1, a isolação está envelhecendo mais lentamente que o período de operação (igual a multiplicação da taxa de envelhecimento relativo pelo período considerado) e caso seja superior a 1, envelhecendo mais rapidamente. Isso pode ser resumido pela Equação 3 a seguir, que estabelece a perda de vida L sobre um certo intervalo de tempo:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{ou} \quad L \approx \sum_{n=1}^{N} V_n \times t_n$$
 (3)

onde:

 $V_n$ : é a taxa de envelhecimento relativo durante o intervalo n, conforme a Equação 1 ou 2:

t<sub>n</sub>: é o enésimo intervalo de tempo;

n: é o número de cada intervalo de tempo; e

N: é o número total de intervalos durante o período considerado.

Os transformadores em operação, devido à filosofia no projeto da conservação do óleo isolante ou má manutenção do óleo, possibilitam a penetração de contaminantes, como o oxigênio e a água, acelerando o processo de envelhecimento [5].

À medida que os valores de teor de água, índice de neutralização e teor de oxigênio do óleo isolante de um transformador se afastam das especificadas pela Tabela 4, aumenta-se o desvio em relação à lei de Dakin-Arrhenius [6], uma vez que o

envelhecimento da isolação passa a ser influenciado, também, pela ação dos agentes contaminantes.

Caso os referidos limites não sejam respeitados, a expectativa de vida calculada através da lei de Dakin-Arrhenius [6] servirá, apenas, para uma análise relativa da influência de um determinado carregamento, pois o grau de envelhecimento assim obtido não corresponde à idade cronológica do transformador.

É importante observar que transformadores do mesmo tipo/tensão/potência, submetidos a ciclos de cargas semelhantes, podem apresentar diferentes envelhecimentos da isolação devido às suas características. As principais características que mais influenciam no cálculo da perda de vida do equipamento por envelhecimento térmico da isolação são, por ordem de prioridade, as seguintes [5]:

- **e**<sub>n</sub> = elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, sobre a temperatura do topo do óleo, obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento, sob carga nominal em relação à do topo do óleo, acrescida de 10°C (15°C) para transformadores de 55°C (65°C).
- $o_n$  = elevação da temperatura no topo do óleo sob carga nominal em relação à ambiente.
- $T_o$  = constante de tempo térmica do transformador, para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura entre a elevação final e a inicial do topo do óleo.
- **R** = relação entre as perdas em carga, sob carga nominal, e a perda em vazio.
- n = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo,
   que depende do método de resfriamento em funcionamento.
- m = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, que depende do método de resfriamento em funcionamento.
- $T_e$  = constante de tempo térmica do ponto mais quente.

A norma IEEE Std C57.91:1995 [9], na qual se baseia a NBR 5356-7 [4] sugere quatro critérios diferentes para fim de vida útil para o papel termicamente estabilizado, como mostra a Tabela 5:

Tabela 5: Tempo de vida normal para um sistema de isolação com baixas concentrações de oxigênio e umidade, a uma temperatura de referência de  $110\,^{\circ}\mathrm{C}$ 

Critério	Base	Vida normal da isolação	
Criterio	Dase	Horas	Anos
1	50 % da resistência à tração inicial da isolação	65.000	7,42
2	25 % da resistência à tração inicial da isolação	135.000	15,41
3	200 – Valor do grau de polimerização remanescente da isolação	150.000	17,12
4	Interpretação dos dados de ensaio relativos à vida operacional de transformador de distribuição	180.000	20,55

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 (item 6.4)

A norma IEEE Std C57.91:1995 [9] foi revisada e substituída pela IEEE Std C57.91:2011 [10]. O critério a ser adotado para avaliação do fim da vida útil dos equipamentos regidos pela NBR 5356-7 [4] deve ser o do valor do grau de polimerização (GP) remanescente da isolação igual a 200 (150 000 h).

Para fins de aplicação da norma NBR 5356 [4], os valores limites de corrente e temperatura para condições normais de operação e para sobrecarga são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 6 e 7:

Tabela 6: Limites normais de elevação de temperatura à potência nominal em regime permanente

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

Observação: Os limites de elevação de temperatura dados acima são válidos para transformadores de isolação sólida definida como "Classe A", de acordo com a ABNT NBR 7034, e imersos em óleo mineral ou em líquido sintético com ponto de combustão não superior a 300 °C (primeira letra código: O). Legenda:

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> 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.

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup> Medida próxima à superfície do óleo.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-2 [4] (item 4.2)

Tabela 7: Limites de corrente e temperatura aplicáveis para carregamento acima dos valores nominais de placa

Tipo de carregamento	Tipo de transformador			
Ciclo normal de carregamento	Transformadores de distribuição (ver nota)	Transformadores de média potência (ver nota)	Transformadores de grande potência (ver nota)	
Corrente (p.u.)	1,5	1,5	1,3	
Temperatura do ponto mais quente do enrolamento e partes metálicas em contato com material isolante celulósico (°C)	120	120	120	
Temperatura do ponto mais quente de outras partes metálicas (em contato com óleo, papel aramida, materiais de fibra de vidro) (°C)	140	140	140	
Temperatura de topo de óleo	105	105	105	
Carregamento de emergência de longa duração	Transformadores de distribuição (ver nota)	Transformadores de média potência (ver nota)	Transformadores de grande potência (ver nota)	
Corrente (p.u.)	1,8	1,5	1,3	
Temperatura do ponto mais quente do enrolamento e partes metálicas em contato com material isolante celulósico (°C)	140	140	140	
Temperatura do ponto mais quente de outras partes metálicas (em contato com óleo, papel aramida, materiais de fbra de vidro) (°C)	160	160	160	
Temperatura de topo de	115	115	115	
óleo Carregamento de emergência de curta duração	Transformadores de distribuição (ver nota)	Transformadores de média potência (ver nota)	Transformadores de grande potência (ver nota)	

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup> 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 isolação 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

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 isolação 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.

Corrente (p.u.)	2,0	1,8	1,5
Temperatura do ponto			
mais			
quente do enrolamento e			
partes	Ver 7.2.1	160	160
metálicas em contato com			
material isolante			
celulósico (°C)			
Temperatura do ponto			
mais			
quente de outras partes	Ver 7.2.1		
metálicas (em contato		180	180
com			
óleo, papel aramida,			
materiais			
de fibra de vidro) (°C)			
Temperatura de topo de	Ver 7.2.1	115	115
óleo	v 61 7.2.1	113	113

NOTA Os limites de corrente e temperatura não são entendidos como válidos simultaneamente. A corrente pode ser limitada a valores mais baixos do que os apresentados nesta Tabela para atender aos limites de temperatura. Da mesma forma, a temperatura pode ser limitada a valores mais baixos do que os apresentados nesta Tabela para atender aos limites de corrente.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] (item 7.1)

Há uma divergência nos valores informados no Anexo H (item H.4.3.2) e os informados no item 7.1, ambos da NBR 5356-7 [4]. A Tabela 8 apresenta os valores limite de temperatura para os quais o transformador deve ser dimensionado de forma que, na temperatura ambiente média máxima (temperatura máxima conforme NBR 5356-7 [4]), a temperatura do topo do óleo, do ponto mais quente do enrolamento e de outras partes metálicas sem contato com celulose sejam inferiores aos valores apresentados.

Tabela 8: Temperaturas-limite (°C)

	Temperaturas-limite (°C)			
Tipo de carregamento	Topo do óleo	Ponto mais quente do enrolamento	Outras partes metálicas sem contato com celulose	
Ensaio de 1,2 pu por 4 h	110	130	160	
Ensaio de 1,4 pu por 30 min	110	140	180	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] (item H.4.3.2)

# 2.3. RESOLUÇÃO NORMATIVA REN 191-2005 E RESOLUÇÃO RES 513-2002 DA ANEEL

A Resolução Normativa REN 191-2005 [2] da ANEEL, conforme consta em seu Art. 1°, tem por finalidade estabelecer os procedimentos para a determinação da capacidade

operativa das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica e das Demais Instalações de Transmissão, componentes do Sistema Interligado Nacional (SIN), bem como definir as Funções Transmissão e os respectivos Pagamentos Base. Em seu Art. 2º estabelece os seguintes termos e suas definições:

- I. Capacidade Operativa de Longa Duração de LT ("Linha de Transmissão"): valor especificado em projeto, para a corrente de uma linha de transmissão (LT) em condições normais de operação, em conformidade com a Norma Técnica ABNT NBR-5422, de fevereiro de 1985;
- II. Capacidade Operativa de Curta Duração de LT: valor da corrente que uma linha pode transportar em condições de emergência, em conformidade com a Norma Técnica ABNT NBR-5422, de 1985;
- III. Capacidade Operativa Sazonal de LT: valor especificado em projeto, para a corrente de uma linha de transmissão nas condições de operação verão-dia, verão-noite, inverno-dia e inverno-noite;
- IV. Capacidade Operativa de Longa Duração de TR (Transformador de Potência): corresponde ao ciclo de carregamento de um transformador de potência (TR) em condições normais de operação, em conformidade com a Norma Técnica ABNT NBR-5416 [5], de julho de 1997;
- V. Capacidade Operativa de Curta Duração de TR: corresponde ao ciclo de carregamento de um transformador de potência em condições de emergência de longa duração, em conformidade com a Norma Técnica ABNT NBR-5416 [5], de 1997;
- VI. Capacidade Operativa de CR (Controle de Reativo): corresponde ao valor nominal da corrente estabelecida no projeto de um equipamento de controle de reativo (CR);
- VII. **Função Transmissão (FT)**: conjunto de instalações funcionalmente dependentes, considerado de forma solidária para fins de apuração da prestação de serviços de transmissão, compreendendo o equipamento principal e os complementares, conforme disposto no Anexo desta Resolução;
- VIII. Pagamento Base (PB): parcela equivalente ao duodécimo da Receita Anual Permitida (RAP), associada à plena disponibilização das instalações de transmissão que compõem uma Função Transmissão (FT);

IX. Fator Limitante: condição que impede uma Função Transmissão (FT) de garantir plenamente as capacidades operativas estabelecidas nos termos desta Resolução.

Em seu Art. 16 estabelece o limite de atuação do ONS quanto à utilização das capacidades operativas:

"Art. 16. O ONS cumprirá suas atribuições com autonomia para utilizar a capacidade operativa de longa duração e a de curta duração das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica, durante o regime normal de operação e em condições de emergência, observadas as limitações impostas pelos arts. 5° e 12 e o disposto no art. 15, todos desta Resolução"

A Resolução RES 513-2002 [1], também da ANEEL, conforme descrito em seu Art. 1°, visa estabelecer os procedimentos para o cálculo do adicional financeiro ao duodécimo da receita anual permitida (RAP) das concessionárias de transmissão, por sobrecargas que ocasionem perda adicional de vida útil em equipamentos das mesmas, integrantes ou não da Rede Básica, bem como determinar os responsáveis pelo pagamento desse adicional. De acordo com essa resolução, sempre que um transformador for utilizado acima da sua potência nominal (sobrecarga), por motivo alheio à concessionária de transmissão, será devido adicional financeiro, calculado pela Equação 4 de [1].

Adicional Financeiro = 
$$S.P_b - P_b = P_b(S-1)$$
 (4)

onde:

S: fator de carregamento resultante no período de um mês; e

**P**<sub>b</sub>: Pagamento Base correspondente ao transformador em sobrecarga.

O fator de carregamento S é calculado pelo modelo simplificado de reação química baseado na lei de Dakin-Arrhenius [6], conforme disposto na Norma ABNT NBR 5416 [5], de 1997. A Equação 5 expressa o Fator de Carregamento como sendo a média ponderada do produto dos fatores Vs (perda de vida útil do transformador) e V<sub>f</sub> (aumento do risco de falha) pelos intervalos de tempo em que o ciclo de carga de interesse foi estratificado, dentro do mês da ocorrência da sobrecarga.

$$S = \sum_{i=1}^{n} V_{S_i} \cdot V_{f_i} \cdot \Delta t_i / \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n} S_i \cdot \Delta t_i / \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \quad [pu]$$
(5)

onde:

S: fator de carregamento;

 $\mathbf{V}_{Si}$ : fator multiplicador associado à perda de vida útil, em cada um dos intervalos de tempo  $\Delta t_i$  no qual o período do ciclo de carga foi estratificado;

 $V_{fi}$ : fator multiplicador associado ao risco adicional de falha, em cada um dos intervalos de tempo  $\Delta t_i$  no qual o período do ciclo de carga foi estratificado;

 $\Delta t_i$ : intervalo de tempo, de 15 minutos, no qual o período do ciclo de carga foi estratificado; e

 ${f n}$ : número de intervalos de tempo  $\Delta t_i$ , no período de um mês em que houve ocorrência de carregamento do transformador acima da sua potência nominal.

## 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme apresentado na Introdução (Capítulo 1), o que determina o fim de vida útil de um transformador é o envelhecimento da isolação dos enrolamentos. Dakin (1948) assumiu que as mudanças físicas observadas no material isolante são resultado de reações químicas internas que obedecem a leis teóricas bem estabelecidas [6]. Essas reações são influenciadas principalmente pela temperatura em que ocorrem. A temperatura no interior do transformador de potência, em especial a do ponto mais quente do enrolamento em contato com o material isolante, é influenciada principalmente pela carga a que o transformador está submetido e pela temperatura ambiente. Matematicamente, o fenômeno pode ser descrito da seguinte maneira: a propriedade física que se quer medir (Grau de Polimerização ou Resistência à Tração) é função da concentração de determinada substância química, conforme Equação 6.

$$P \sim C \text{ ou } P = f(C)$$
 (6)

Em que:

P: propriedade física de interesse;

C: concentração da substância química resultante da reação.

Em geral, a taxa instantânea de mudança no número de moléculas sendo submetidas à transformação com o tempo é proporcional ao número atual elevado a algum expoente, conforme Equação 7

$$\frac{dC}{dt} = -KC^n \tag{7}$$

Em que:

C: concentração da substância química resultante da reação;

K: constante da taxa de variação da concentração. É dependente da temperatura, da concentração de catalisadores e outras substâncias químicas que entrem na reação, porém para fim de simplificação, esses parâmetros são assumidos constantes durante toda a reação;

*n*: expoente que determina a ordem da reação química e representa o número de moléculas do mesmo tipo reagindo entre si. Usualmente o valor do expoente n é tipicamente igual a 1 e dificilmente maior que 3.

A Equação 7 pode ser resolvida para diferentes valores de n, se isolarmos do lado esquerdo da equação a variável C e sua derivada em relação ao tempo, e do lado direito o fator K, temos:

$$\frac{1}{C^n}\frac{dC}{dt} = -K\tag{8}$$

Integrando em relação ao tempo:

$$P = f(C) = \int \frac{1}{C^n} dC = -Kt \tag{9}$$

Químicos demonstraram que a taxa de velocidade de uma reação química em função da temperatura obedece aproximadamente à uma lei exponencial [6], conforme Equação 8:

$$K = Ae^{\frac{-B}{T}} \tag{10}$$

Em que:

A, B: constantes;

T: temperatura absoluta em Kelvin.

A Equação 9 pode ser resolvida para diferentes valores de n. Ao assumirmos um critério fixo qualquer de fim de vida útil (Resistência à Tração inferior a um dado valor ou Grau de Polimerização inferior a um dado valor) é possível determinar quando o papel de celulose terá atingido o fim de vida útil. Combinando as Equações 9 e 10, obtém-se:

$$\frac{P}{t} = -K = Ae^{-\frac{B}{T}} \tag{11}$$

Considerando que o fim de vida terá sido alcançado quando P (propriedade física de interesse) atingir um certo valor, é possível resolver a Equação 9 para t considerando T (temperatura em Kelvin) constante. Não é o propósito deste presente trabalho apresentar exaustivamente todo o desenvolvimento matemático para determinação do fim de vida útil da isolação e esgotar este assunto, portanto, cabe mencionar que o procedimento para determinar o envelhecimento da isolação para um ciclo de temperatura variável pode ser melhor estudado em [6].

Portanto, é possível perceber, diante do que foi apresentado anteriormente, que a determinação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento (que está em contato com a isolação) e seu comportamento ao longo do tempo (i.e. o ciclo de temperatura) é de essencial importância para determinação da vida útil do transformador.

## 4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Com o propósito de se avaliar empiricamente o efeito térmico do carregamento de transformadores e de determinar uma relação entre as variáveis de entrada e de saída, foi desenvolvido um sistema de aquisição e apresentação de dados baseado em LabVIEW e hardware Open Source (Arduino).

Este capítulo apresenta em detalhes as especificações técnicas de hardware e software que este sistema deve atender (condicionada ao ambiente em que será empregado, precisão na leitura dos dados, período de amostragem, etc.). Assim sendo, será apresentado primeiramente as especificações de hardware, seção 4.1, e posteriormente, na seção 4.2, as especificações de software. Foi atendida a maioria das especificações de projeto, porém devido à limitação de prazo para cumprimento do cronograma do projeto de P&D da Light, haja vista que para poder realizar o ensaio em campo do transformador de potência eram necessárias solicitações de impedimento do equipamento e que diversas manobras de segurança fossem executadas previamente ao ensaio, se tornou inviável a postergação da data do ensaio e ficou-se limitado a utilização do software principal em um PC e não em um hardware dedicado (baseado em Raspberry Pi) como se pretendia inicialmente e conforme descrito em mais detalhes na seção 4.2. Nesse sentido, foi adicionado ao final do presente trabalho, no Capítulo 9, o item 9.2 (Propostas de Trabalhos Futuros). No Capítulo 5 será apresentado em detalhes o desenvolvimento do sistema bem como seus detalhes construtivos e de programação.

## 4.1. ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE

A Tabela 9 apresenta um resumo das especificações gerais de projeto, cada item dessa tabela (itens 1 a 6) será tratado em detalhes nos tópicos que se seguem, justificando a escolha dessas especificações.

Tabela 9: Especificações de projeto

Item	Descrição	Especificação	Tipo
1	Faixa de temperatura de trabalho do	0 − 155 °C	Hardware
	sensor		
2	Sensor utilizado	RTD Pt-100 (100 Ω a 0	Hardware
		°C)	

3	Dispositivo de aquisição de dados e	Microcontrolador	Hardware
	protocolo de comunicação	ATMega328 (Arduino	
		UNO) + Módulo	
		MAX31865 (Protocolo	
		SPI)	
4	Dispositivo de transmissão da informação	Módulo Rádio XBee	Hardware
	do sensor para o PC e protocolo de	(Protocolo de	
	comunicação	Comunicação ZigBee)	
5	Linguagens de programação utilizadas e	Microcontrolador:	Software
	IDE de desenvolvimento	Linguagem C (IDE:	
		Arduino IDE)	
		PC: Linguagem gráfica G	
		da National Instruments	
		(IDE: LabVIEW)	
6	Dispositivo em que será executado o	PC com Windows 10	Hardware
	software		

#### 1) Faixa de temperatura de trabalho do sensor

O ponto mais quente do enrolamento, segundo dados fornecidos pelo fabricante para o transformador de 138/13,8kV – 40 MVA pode atingir uma temperatura de 65 °C acima da temperatura ambiente, portanto, considerando uma temperatura ambiente de 40 °C (valor máximo aproximado de temperatura registrado no Rio de Janeiro no verão), corresponde a uma temperatura de 105 °C. Como o transformador irá trabalhar em sobrecarga, foi utilizado uma faixa de temperatura de 1,5x este valor, totalizando aproximadamente 155 °C.

#### 2) Sensor utilizado

Foi escolhido o sensor RTD Pt-100, construído em platina, protegido por um invólucro de aço inox e resistente à água. Este sensor possui uma resistência de  $100~\Omega$  à temperatura de 0 °C e possui uma curva de resposta linear da resistência em função da temperatura, para a faixa de temperatura de trabalho. Conforme [14], o erro médio para a faixa de temperatura de trabalho, utilizando a função de aproximação Callendar-Van Dusen de  $2^a$  ordem é de  $\pm$  0,11 °C.

#### 3) Dispositivo de aquisição de dados e protocolo de comunicação

Para converter o sinal analógico do sensor Pt-100 em um sinal digital sugeriu-se utilizar o módulo MAX31865, o qual possui resolução de 15bits (0-32767) e é capaz de

se comunicar com o microcontrolador do Arduino UNO (ATMega328p) utilizando o protocolo de comunicação serial SPI.

# 4) Dispositivo de transmissão da informação do sensor para o PC e protocolo de comunicação

Optou-se por utilizar o módulo rádio XBee por ser autoconfigurável (bastando programar informações básicas no módulo, como endereço da rede e o modo de operação: *coordinator*, *router*, *end device* e ativando ou não o modo *pin\_hibernate*) e possuir um extenso arquivo para consulta no site do fabricante (www.digi.com) e em diversos fóruns de desenvolvedores.

#### 6) Dispositivo em que será executado o software

Inicialmente sugeriu-se utilizar um PC executando Windows 10 como Sistema Operacional para exibir os dados dos sensores ao usuário. No Capítulo 9 sugere-se como trabalho futuro a migração do software, desenvolvido para PC, para ser executado no Raspberry Pi executando distribuição Linux adaptada para o Hardware do Raspberry Pi. Realizando essa migração é possível ter uma unidade modular dedicada apenas à aquisição dos dados e com consumo muito inferior a um PC comum o que garante maior autonomia na duração da bateria do dispositivo que executa o software principal (que apresenta os dados de temperatura para o usuário).

## 4.2. ESPECIFICAÇÕES DE SOFTWARE

#### 5) Linguagens de programação utilizadas e IDE de desenvolvimento

Para o desenvolvimento do firmware do microcontrolador do Arduino UNO (ATMega328p) utilizou-se a linguagem C na IDE do próprio Arduino e para o desenvolvimento do software de tratamento e apresentação de dados executado no PC utilizou-se a linguagem gráfica G da National Instruments.

## 5. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema desenvolvido segue o fluxograma apresentado na Figura 7.

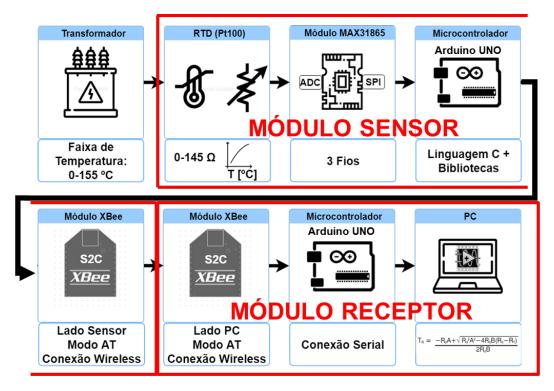


Figura 7: Fluxograma do sistema de aquisição de dados

Fonte: Próprio autor

A Figura 7 apresenta o fluxograma geral do sistema agrupando-o em 2 tipos de módulos, o módulo sensor (1 módulo sensor instalado em cada ponto da carcaça do transformador que se deseja medir a temperatura), que pode ser visualizado na Figura 8, e o módulo receptor (apenas 1 módulo receptor o que é conectado ao PC e recebe todos os dados enviados pelos n módulos sensores). O módulo receptor é fisicamente semelhante ao módulo sensor, com a diferença que ele funciona apenas como receptor e não possui um sensor Pt-100 e transdutor de temperatura.



Figura 8: Foto dos módulos sensores sendo produzidos

Fonte: Próprio autor

O software para PC foi desenvolvido em LabVIEW® e os diferentes módulos (*Virtual Instruments*) são apresentados na Figura 9 de forma hierárquica.

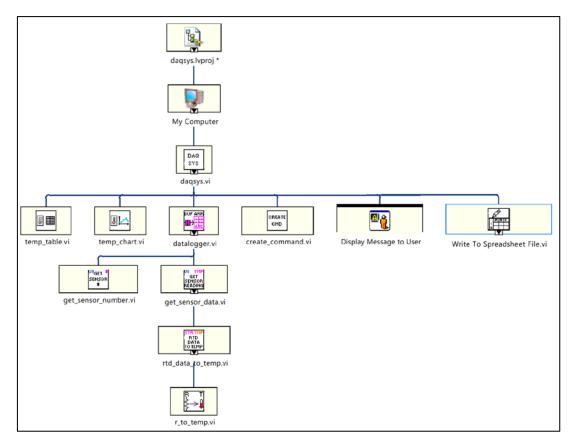


Figura 9: Hierarquia dos VIs no LabVIEW®

Fonte: Próprio autor

A interface principal do programa (Painel Frontal) é exibida na Figura 10.

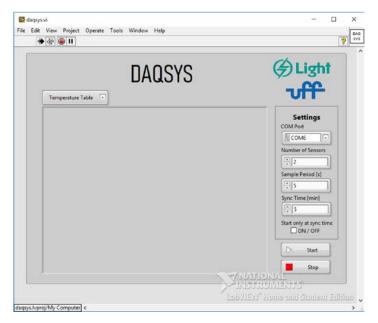


Figura 10: Interface gráfica do painel frontal

Fonte: Próprio autor

Ao pressionar o botão "*Start*" o usuário é notificado a escolher um arquivo de saída do tipo ".csv", conforme Figura 11.



Figura 11: Prompt informando que o usuário deve escolher um arquivo .csv para armazenar os dados

Ao iniciar a aquisição dos dados, o programa apresenta os dados na forma de tabela, como na Figura 12.



Figura 12: Matriz 4x5 de temperaturas dos sensores

Fonte: Próprio autor

O usuário pode alternar para exibição de um gráfico da temperatura pelo número da amostra, para cada sensor individualmente, como apresentado nas Figura 13 e Figura 14.



Figura 13: Ring de seleção do sensor

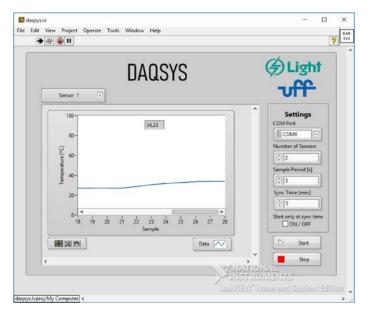


Figura 14: Gráfico da temperatura do sensor em função do número da amostra

Fonte: Próprio autor

Outras figuras do software desenvolvido em LabVIEW encontram-se disponíveis no APÊNDICE A, onde são apresentados em detalhes cada módulo (*Virtual Instrument*) da Figura 9.

A seguir são apresentadas algumas considerações quanto ao hardware desenvolvido. A Tabela 12 abaixo exibe o consumo de corrente para diferentes arranjos de hardware, conforme detalhado nas legendas. O consumo de corrente é um fator de extrema importância devido ao fato de que os módulos operam por bateria. A Tabela 13 mostra a duração estimada da bateria para cada arranjo da Tabela 12.

Tabela 10: Consumo de corrente em mA para cada arranjo

A wwamia	Dogovioão	Estados de Operação			
Arranjo	Descrição	Setup (Idle) <sup>1</sup>	Loop <sup>2</sup>		
1	MAX31865	2,17	4,42		
		Sleep: PWR_DOWN <sup>3</sup>	Running <sup>4</sup>		
2	Arduino UNO (Sem ATMEGA16U2 e sem os shields)	2,6	12,65		
		Idle <sup>5</sup>	Searching <sup>6</sup>		
3	Conjunto Completo <sup>0</sup> (não sincronizado à rede mesh)	31,2	49		
		Setup (Idle)	Delay (Xbee OFF) <sup>7</sup>		
4	Conjunto Completo (sincronizado à rede mesh) (MAX31865 alimentado direto pelo pino 3,3v do Arduino)	31,2	21,2		

		Setup (Idle)	Delay (Xbee OFF)
5	Conjunto Completo (sincronizado à rede mesh) (MAX31865 alimentado pelo pino digital 8 do Arduino [ON-OFF] = [0-5V])	29	16,6
		Setup (Idle)	Sleep <sup>8</sup>
6	Conjunto Completo (sincronizado à rede mesh) (MAX31865 alimentado direto pelo pino 3,3v do Arduino)	30,9	10,36
		Setup (Idle)	Sleep
7	Conjunto Completo (sincronizado à rede mesh) (MAX31865 alimentado pelo pino digital 8 do Arduino [ON-OFF] = [0-5V])	29	5,94

#### Legenda:

Tabela 11: Duração da bateria para cada arranjo

Bateria 9V						
Capacidade/bateria [mAh]	600					
Duração (Arranjo 4) [h]	28,30					
Duração (Arranjo 5) [h]	36,14					
Duração (Arranjo 6) [h]	57,92					
Duração (Arranjo 7) [h]	101,01					

O arranjo utilizado no módulo final para aquisição dos dados experimentais, que serão apresentados no Capítulo 8, foi o arranjo nº 5 com duas baterias de 9V, o que garante uma autonomia estimada de aproximadamente 72h.

Oconjunto Completo: Arduino UNO R3 (sem o módulo Serial ATMEGA16U2) + XBee Shield + XBee S2C + MAX31865 + RTD Pt-100;

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Setup (Idle): Enquanto a rotina setup() do Arduino está sendo executada (ver ANEXO C);

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Loop: Enquanto a rotina loop() do Arduino está sendo executada (ver ANEXO C);

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Sleep: PWR\_DOWN: Ativação do modo PWR\_DOWN do Arduino UNO R3 (Sem ATMEGA16U2 e sem os Shields) (ver ANEXO C);

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Running: Arduino UNO R3 (Sem ATMEGA16U2 e sem os Shields) "acordado", mas sem executar qualquer rotina:

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Idle: Conjunto Completo<sup>0</sup> com o módulo XBee S2C sem estar executando escaneamento da rede Mesh para procurar outros módulos;

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Searching: Conjunto Completo<sup>0</sup> com o módulo XBee S2C executando escaneamento da rede Mesh para

procurar outros módulos; <sup>7</sup> Delay (XBee OFF): O Arduino utiliza a função delay, para aguardar até a próxima amostra, e envia comando para o XBee entrar em modo Sleep;

<sup>§</sup> Sleep: O Arduino entra em modo Sleep (utiliza o Watchdog Timer para acordar) e envia comando para o XBee entrar em modo Sleep também.

#### 6. METODOLOGIA

Dois métodos de análise de dados são propostos, um método simples conhecido com regressão linear múltipla, que pressupõe que o sistema se encontra em regime permanente e a relação entre as variáveis de entrada e a variável de saída escolhida é linear, detalhado no Item 6.1. Um segundo método utilizado é baseado no método definido pela NBR 5356-7, que consiste na identificação de sistemas utilizando equações diferenciais, o qual será explicado em detalhe no Item 6.2.

#### 6.1. REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Chama-se regressão linear múltipla o método matemático que descreve o comportamento de uma variável dependente (variável resposta) pela combinação linear de duas ou mais variáveis explicativas (regressores ou variáveis independentes) da forma mais precisa possível (deve satisfazer os critérios de minimização de erro). Em outras palavras, o valor esperado da variável dependente é dado por:

$$E[y_i|x_{1i}, x_{2i}, ..., x_{ki}] = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + ... + \beta_k x_{ki} \qquad i = 1, 2, ..., n$$
(12)

em que:

E[A]: Valor esperado da variável aleatória A;

 $y_i$ : Variável de saída (ou dependente) correspondente à i-ésima amostra;

 $x_{ii}$ : Variável de entrada (ou independente) j correspondente à i-ésima amostra;

 $\beta_0$ : Intercessão do eixo y (termo constante);

 $\beta_j$ : Coeficiente da variável de entrada j que deverá ser calculado de forma a minimizar o erro quadrático total, conforme descrito a seguir;

*n* : Número total de observações/amostras.

Ou, posto de outra maneira, o valor da variável de saída  $y_i$  é dado pela combinação linear das variáveis de entrada mais um erro  $\varepsilon_i$ :

Utilizando o método de mínimos quadrados de minimização do erro quadrático total é possível obter a equação final que mais se aproxima dos dados observados. Será utilizado para esse propósito a ferramenta computacional do sofware SPSS IBM Statistics® [8].

## 6.2. IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS USANDO EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

O comportamento dinâmico da temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento do transformador pode ser descrito por meio de equações diferenciais de transferência de calor. O diagrama de blocos do sistema, de acordo com o modelo dado pela NBR 5356-7 [4], a qual é baseada na norma IEC 60076-7, pode ser visualizado na Figura 15. Esse modelo é aplicável para um fator de carga K e temperatura ambiente  $\theta_a$  arbitrários e variáveis no tempo.

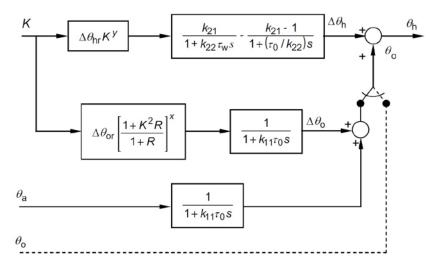


Figura 15: Representação em diagrama de blocos das equações diferenciais do sistema Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] (Item 8.2.3)

Na Figura 15, o segundo bloco na parte superior representa a dinâmica da elevação do ponto mais quente. O primeiro termo (com o numerador  $k_{21}$ ) representa a elevação fundamental da temperatura do ponto mais quente, antes de se considerar a mudança na passagem do fluxo do óleo sobre o ponto mais quente. O segundo termo (com o numerador  $k_{21} - 1$ ) representa a taxa de variação da passagem do óleo sobre o ponto mais quente, um fenômeno que muda muito mais lentamente. O efeito combinado destes dois

termos considera o fato de que uma elevação repentina no carregamento pode causar um elevado pico inesperado na elevação de temperatura do ponto mais quente, logo após a mudança de carregamento repentina.

As constantes  $k_{11}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{22}$  e as constantes de tempo  $\tau_w$  e  $\tau_0$  são específicas do transformador. Elas podem ser determinadas em um ensaio prolongado de elevação de temperatura durante o período de aplicação de "perdas em vazio + perdas em carga", se as perdas supridas e as condições de resfriamento correspondentes, por exemplo AN ou AF, forem mantidas inalteradas desde o início até atingir o regime permanente. Neste caso, é necessário assegurar que o ensaio de elevação de temperatura se inicie quando o transformador estiver aproximadamente à temperatura ambiente. Os parâmetros  $k_{21}$ ,  $k_{22}$  e  $\tau_w$  podem ser definidos apenas se o transformador estiver equipado com sensores de fibra óptica. Se  $\tau_0$  e  $\tau_w$  não forem definidos no ensaio de elevação de temperatura, estas constantes podem ser definidas por meio de cálculos. Na ausência dos valores específicos do transformador, os valores na Tabela 12 são recomendados.

Tabela 12: Valores típicos dos parâmetros térmicos de transformadores

Constante	Transformadores de distribuição	Transformadores de média e grande potência							
	ONAN	ONAN	ONAF	OF	OD				
Expoente do óleo: x	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0				
Expoente do enrolamento:	1,6	1,3	1,3	1,3	2,0				
Constante: $k_{11}$	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0				
Constante: k <sub>21</sub>	1,0	2,0	2,0	1,3	1,0				
Constante: $k_{22}$	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0				
Constante de tempo: $\tau_{\theta}$	180	210	150	90	90				
Constante de tempo: $\tau_w$	4	10	7	7	7				

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] (item 8.2.2)

O parâmetro  $\Delta\theta_{or}$  é a elevação da temperatura do topo do óleo do tanque acima da temperatura ambiente para as perdas nominais, e  $\Delta\theta_{hr}$  é a elevação da temperatura do ponto mais quente acima da temperatura do topo do óleo do tanque à corrente nominal. Por último o parâmetro R corresponde à relação entre perdas em carga-perdas em vazio

na corrente nominal. Valores típicos para esses parâmetros são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores típicos dos parâmetros térmicos de transformadores

Parâmetro	Valor Típico
$\Delta  heta_{ m or}$	45 K
$\Delta  heta_{ m hr}$	35 K
R	8

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-7 [4] (Anexo A)

A chave seletora no lado direito do diagrama de blocos da Figura 15 serve para indicar que, uma vez que se tenha uma medição direta da temperatura do topo do óleo, essa medida pode ser inserida diretamente como entrada no somador para calcular a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, neste caso a chave seletora deve ser posicionada à direita. Caso contrário, a chave seletora deve ser posicionada à esquerda indicando que a temperatura do topo do óleo será obtida indiretamente (calculada) a partir da temperatura ambiente e das funções de transferência correspondentes.

Esse modelo corresponde ao modelo matemático em uso atualmente que descreve o fenômeno físico em estudo, ele será utilizado apenas a título de comparação com o modelo empírico, pois se trata de um modelo não linear (como é possível identificar pelos termos não lineares da variável de entrada K – Fator de Carga).

No APÊNDICE D é apresentado o código, escrito no programa MAPLE, simplificando a formulação matemática do comportamento da temperatura do ponto mais quente do enrolamento baseado no modelo apresentado pela Figura 15 e utilizando os valores típicos dados nas Tabelas 12 e 13 para transformador de média potência com sistema de resfriamento do tipo ONAF. É calculada a resposta ao impulso.

No APÊNDICE E é apresentado o diagrama de blocos elaborado utilizando o Simulink do MATLAB para simulação do comportamento da temperatura do ponto mais quente baseado no modelo apresentado pela Figura 15 e utilizando os valores típicos dados nas Tabelas 12 e 13 para transformador de média potência com sistema de resfriamento do tipo ONAF. É simulada a resposta ao degrau.

O método adotado para a análise dos dados experimentais, porém, será o de identificação da função de transferência a partir dos dados observados, utilizando a ferramenta computacional "ident" do MATLAB®. Esse procedimento é conhecido como modelagem empírica ou identificação de sistemas baseada nos dados observados. Não

será feita nesse presente trabalho uma correlação entre o modelo empírico e o modelo matemático da Figura 15.

#### 7. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio adotado foi o descrito a seguir:

- Foi escolhido o Trafo 2 (138/13,8 kV 40/30MVA) da Subestação Frei Caneca;
   OBS.: Este transformador possui uma capacidade de 40 MVA quando está com o sistema de resfriamento das placas do radiador (ventiladores) operando normalmente,
- caso haja falha no sistema de resfriamento, sua capacidade é reduzida para 30 MVA.

  2. Os 20 módulos sensores foram numerados e instalados conforme as Figura 16
  - a Figura 20, nos pontos identificados em vermelho;

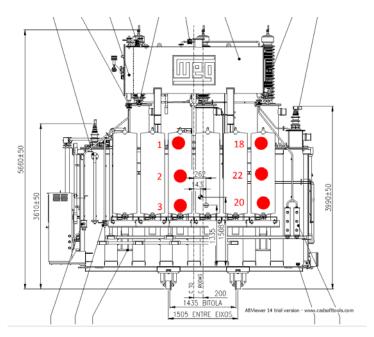


Figura 16: Vista frontal do transformador

Fonte: Manual WEG Transformador 138/13,8 kV 40/30MVA

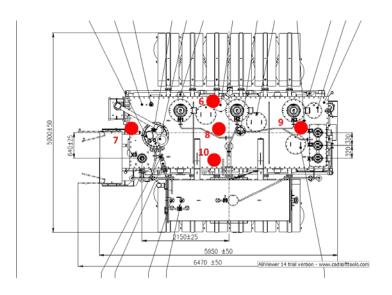


Figura 17: Vista superior do transformador

Fonte: Manual WEG Transformador 138/13,8 kV 40/30MVA

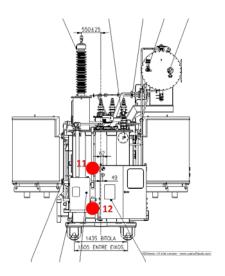


Figura 18: Vista lateral esquerda do transformador

Fonte: Manual WEG Transformador 138/13,8 kV 40/30MVA

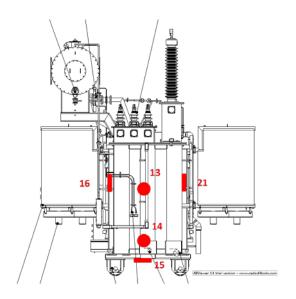


Figura 19: Vista lateral direita do transformador

Fonte: Manual WEG Transformador 138/13,8 kV 40/30MVA

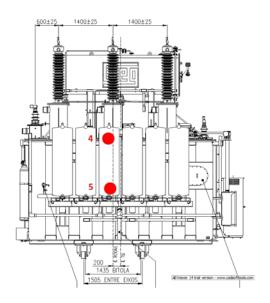


Figura 20: Vista posterior do transformador

Fonte: Manual WEG Transformador 138/13,8 kV 40/30MVA

- A aquisição de dados foi iniciada às 10h30 e concluída às 15h30 do dia 28/08/2019;
- 4. Os dados de temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento foram obtidos dos sensores locais do transformador;
- Os dados de potência ativa foram obtidos do monitor de carga na sala de operações;

- 6. Os dados de temperatura ambiente foram obtidos de sensor instalado na proximidade do trafo;
- O sistema de ventilação forçada foi desligado em dois intervalos distintos para identificar o efeito dessa variável no comportamento térmico do transformador;
- 8. O período de amostragem foi definido como 5 minutos (300 segundos);
- Os funcionários da operação fizeram a manobra de transferência de carga dos outros transformadores da subestação para o transformador 2 de modo a se ter uma maior variação da carga possível no intervalo de tempo pretendido para teste;

Foi adotada, no software desenvolvido, uma sequência de numeração para os sensores, entretanto, o pessoal técnico que conduziu o teste na subestação adotou uma sequência numérica diferente para a identificação dos sensores, conforme as Figura 16 a Figura 20. A Tabela 14 apresenta a correspondência entre as numerações:

Tabela 14: Correspondência entre as identificações dos sensores

		Correspondência de Identificação																
Figura <sup>1</sup>	14 18			15		17	15	16	17		14							
Id. no Trafo <sup>2</sup>	T3	T2	T1	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T13	T10	T12	T21	T14	T16	T22	T20	T18
Id. no Software <sup>3</sup>	1	2	3	4	5	6	8	9	15	18	20	22	23	24	26	27	28	30

Legenda:

A Tabela 14 deve ser interpretada da seguinte maneira:

• Ex.: O sensor 1 do software corresponde ao sensor T3 da Figura 16.

Os resultados serão apresentados no Capítulo 8.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Identificação da figura em que aparece o sensor

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Identificação do sensor no trafo

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Identificação do sensor no software

#### 8. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 8.1. APLICANDO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Para o método de Regressão Linear Múltipla (RLM) utilizou-se o Software SPSS IBM Statistics® [8]. A interface e o comando para realizar este tipo de análise pode ser visto na Figura 21. Nas tabelas a seguir, o Sensor 9 do software corresponde ao Sensor T8 da Figura 17, assim como o Sensor 24 do software corresponde ao Sensor T14 da Figura 19, conforme Tabela 14 do Capítulo 7.

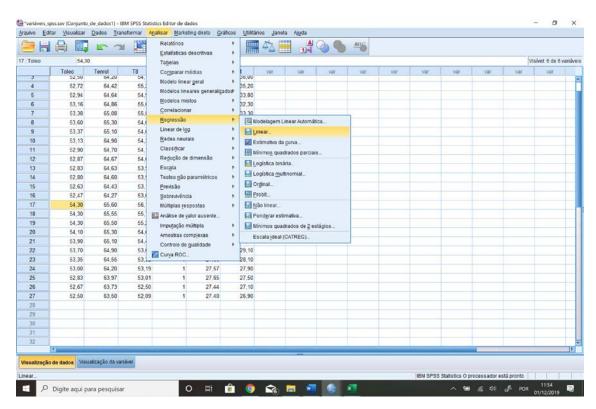


Figura 21: Comando para executar regressão linear

Fonte: Próprio autor

A Figura 22 exibe a seleção de variáveis independentes de entrada e a variável dependente de saída. Em "Estatísticas" e "Diagramas" é possível selecionar quais dados estatísticos o usuário quer que sejam apresentados no resultado de saída. Um dado estatístico importante é o parâmetro R² (coeficiente de determinação ou correlação) que informa o quanto o modelo calculado está próximo dos valores observados. Ele varia de 0 a 1 e, quanto mais próximo de 1, mais preciso é o modelo.

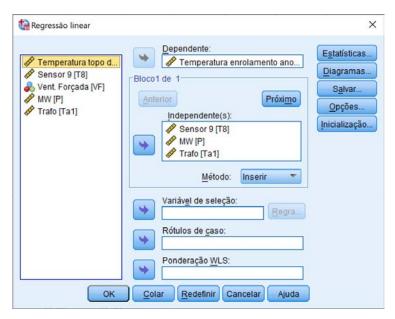


Figura 22: Variáveis de entrada e saída para o modelo de regressão linear múltipla

Fonte: Próprio autor

A variável VF (Ventilação Forçada) é uma variável binária (0 ou 1) e indica a ativação ou não do sistema de ventilação forçada do Trafo (O que na prática faz com que o resfriamento deixe de ser do tipo AN - Ar Natural e passe a ser AF - Ar Forçado). A resposta da troca de calor no radiador é muito diferente nas duas situações, pois na situação AN, a circulação de ar pelo radiador depende da temperatura do ar na região próxima ao radiador, enquanto na situação AF, essa circulação não depende.

Realizando a análise por partes, para VF (Ventilação Forçada) = 0, obteve-se a seguinte saída, mostrada nas Tabelas 15 e 16 para a resposta da temperatura do topo do óleo em função da temperatura da carcaça, medida pelo Sensor T8, potência ativa do trafo e temperatura ambiente próxima ao trafo:

Tabela 15: Resumo do modelo para a temperatura do topo do óleo (VF = 0)

				Erro padrão
			R quadrado	da
Modelo	R	R quadrado	ajustado	estimativa
1	,981ª	,962	,959	,98828

a. Previsores: (Constante), Trafo, MW, Sensor 9

b. Variável dependente: Temperatura topo do óleo anotada

Tabela 16: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura do topo do óleo

$$(VF = 0)$$

				Coeficiente	
				s	
		Coeficie	ntes não	padronizad	
		padror	nizados	os	
Modelo		В	Erro padrão	Beta	
1	(Constante)	26,715	8,993		
	Sensor 9	1,135	,051	1,043	
	MW	-1,033	,374	-,128	
	Trafo	-,181	,060	-,100	

a. Variável dependente: Temperatura topo do óleo anotada (VF=0)

Para VF = 1, obtém-se o seguinte resultado:

Tabela 17: Resumo do modelo para a temperatura do topo do óleo (VF = 1)

				Erro padrão
			R quadrado	da
Modelo	R	R quadrado	ajustado	estimativa
1	,892ª	,796	,769	,30619

a. Previsores: (Constante), Trafo, MW, Sensor 9

Tabela 18: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura do topo do óleo

$$(VF = 1)$$

				Coeficiente	
				s	
		Coeficie	ntes não	padronizad	
		padron	nizados	os	
Modelo		В	Erro padrão	Beta	
1	(Constante)	32,394	7,909		
	Sensor 9	,686,	,105	1,102	
	MW	-,418		-,362	
	Trafo	-,146	,053	-,627	

a. Variável dependente: Temperatura topo do óleo anotada (VF=1)

A Figura 23, a seguir, exibe o gráfico da temperatura do topo do óleo em função do tempo prevista pelo modelo e o gráfico dessa mesma temperatura medida pelo sensor do próprio transformador. É mostrado também o gráfico da Ventilação Forçada para ajudar a identificar os momentos em que ela foi ativada ou desativada:

b. Variável dependente: Temperatura topo do óleo anotada

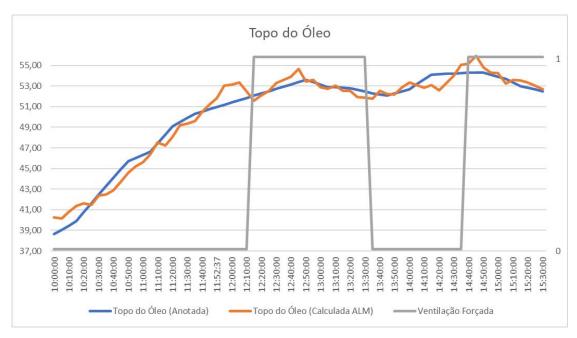


Figura 23: Gráfico da temperatura do topo do óleo prevista pelo modelo e real

Fonte: Próprio autor

Analisando a resposta da temperatura do ponto mais quente do enrolamento da mesma maneira, obtém-se os seguintes resultados.

Para VF = 0:

Tabela 19: Resumo do modelo para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento

(VF = 0)

	т			
				Erro padrão
			R quadrado	da
Modelo	R	R quadrado	ajustado	estimativa
1	.977 <sup>a</sup>	,955	,952	1,16532

a. Previsores: (Constante), Trafo, MW, Sensor 9

Tabela 20: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (VF=0)

				Coeficiente	
				s	
		Coeficientes não		padronizad	
		padronizados		os	
Modelo		В	Erro padrão	Beta	
1	(Constante)	24,231	10,604		
	Sensor 9	1,188	,060	1,003	
	MW	-,623	,441	-,071	
	Trafo	-,197	,071	-,100	

a. Variável dependente: Temperatura enrolamento anotada (VF=0)

b. Variável dependente: Temperatura enrolamento anotada

Para VF = 1:

Tabela 21: Resumo do modelo para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento

a. Previsores: (Constante), Trafo, MW, Sensor 9

b. Variável dependente: Temperatura enrolamento anotada

Tabela 22: Coeficientes da regressão linear múltipla para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (VF=1)

				Coeficiente	
				s	
		Coeficientes não		padronizad	
		padronizados		os	
Modelo		В	Erro padrão	Beta	
1	(Constante)	28,583	·		
-	(**************************************		5,=55		
	Sensor 9	,718	,109	1,279	
	MW	,077	,185	,074	
	Trafo	-,160	,054	-,760	

a. Variável dependente: Temperatura enrolamento anotada (VF=1)

O gráfico da temperatura do ponto mais quente calculada e medida pelo sensor T8 pode ser visto na Figura 24:

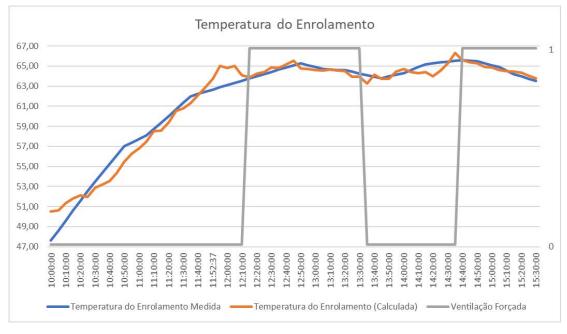


Figura 24: Gráfico da temperatura do ponto mais quente do enrolamento prevista pelo modelo e real

Os gráficos da carga do transformador (potência ativa) e da temperatura ambiente podem ser visualizados nas Figura 25 e



Figura 25: Gráfico da potência ativa do transformador

Fonte: Próprio autor

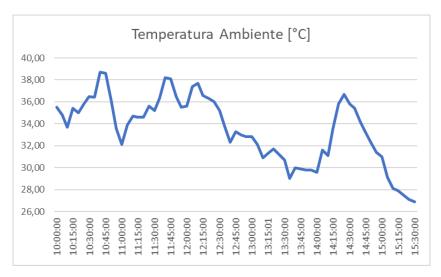


Figura 26: Gráfico da temperatura ambiente

## 8.2. APLICANDO IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS UTILIZANDO EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

Para o método de identificação de sistemas dinâmicos utilizando equações diferenciais (Função de Transferência – TF) foi utilizado o Sofware MATLAB® e a toolbox "ident" para identificação da função de transferência entre as variáveis de entrada e a variável de saída escolhida.

Para a obtenção da função de transferência entre as variáveis de entrada (Temperatura ambiente próxima ao Trafo, Ventilação Forçada, Potência Ativa e Temperatura do Sensor T8) e a variável de saída (Temperatura do ponto mais quente do enrolamento) foi feita a análise a seguir, variando o número de polos da função de transferência e exibindo a resposta do modelo em relação a curva real de temperatura.

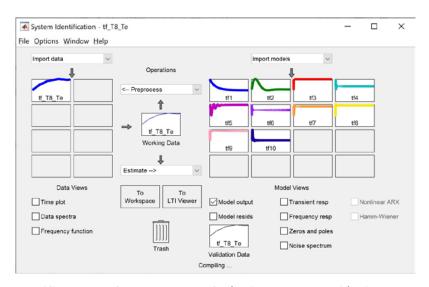


Figura 27: Identificação da função de transferência entre as variáveis de entrada e saída (temperatura do ponto mais quente do enrolamento)

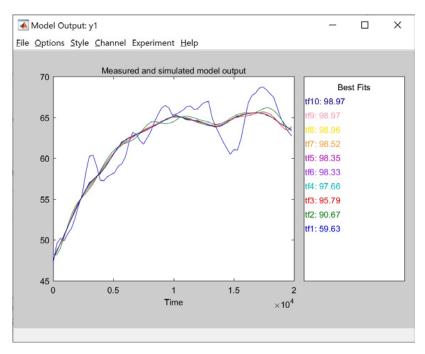


Figura 28: Gráfico e percentual de ajuste dos diversos modelos em relação aos dados observados (temperatura do ponto mais quente do enrolamento)

Fonte: Próprio autor

Para a obtenção da função de transferência entre as variáveis de entrada (Temperatura ambiente próxima ao Trafo, Ventilação Forçada, Potência Ativa e Temperatura do Sensor T8) e a variável de saída (Temperatura do topo do óleo) foi feita a análise a seguir:

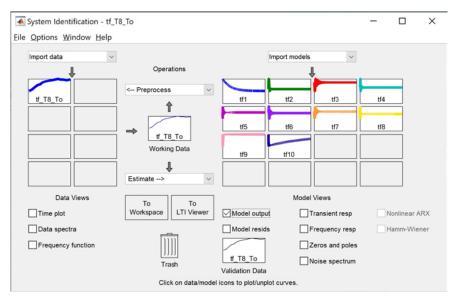


Figura 29: Identificação da função de transferência entre as variáveis de entrada e saída (temperatura do topo do óleo)

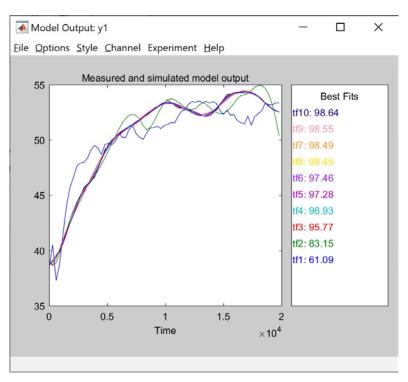


Figura 30: Gráfico e percentual de ajuste dos diversos modelos em relação aos dados observados (temperatura do topo do óleo)

Fonte: Próprio autor

### 8.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A Tabela 23 a seguir apresenta um resumo do grau de ajuste dos modelos em relação aos dados observados (informado pelo parâmetro R²). Para a Regressão Linear Múltipla, foi considerado também o caso em que o sensor de entrada escolhido foi o Sensor T14 (para identificar a localização, ver Figura 19). Este sensor apresenta uma curva mais suave (i.e. com menor variação entre o valores máximo e mínimo dentre todos os sensores) e corresponde ao ponto monitorado com os menores valores de temperatura medidos, além disso, seu formato não corresponde ao formato da curva de temperatura do topo do óleo (ver Figura 23) e do ponto mais quente do enrolamento (ver Figura 24), em contraste ao Sensor T8, que representa o ponto com os maiores valores de temperatura, com a maior variação entre os valores máximo e mínimo e cuja curva se aproxima, em forma, à da temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento. A Figura 30 a seguir apresenta o gráfico das temperaturas medidas por todos os sensores instalados. É possível verificar que a curva superior corresponde ao Sensor T8 e a curva inferior corresponde

ao Sensor T14, por esse motivo esses sensores foram escolhidos, pois todas as curvas são, em maior ou menor grau, correlacionadas a esses dois sensores, quanto mais inferior estão posicionados os sensores, mais a curva se aproxima da curva do Sensor T14, quanto mais acima se encontram, mais a curva se aproxima da curva do Sensor T8:

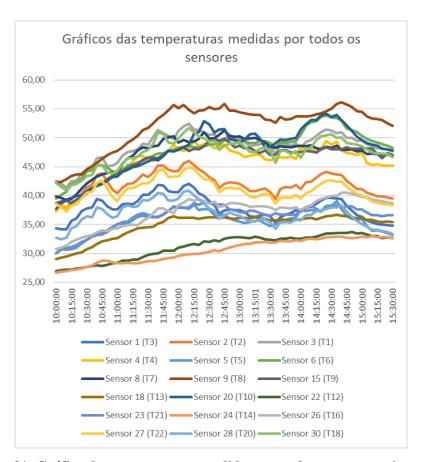


Figura 31: Gráfico das temperaturas medidas por todos os sensores instalados

Fonte: Próprio autor

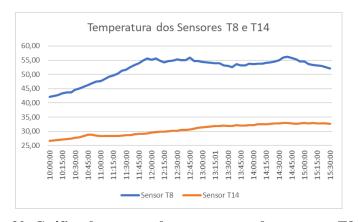


Figura 32: Gráfico das curvas de temperatura dos sensores T8 e T14

Tabela 23: Grau de ajuste dos resultados previstos pelos modelos matemáticos e os dados observados

		R <sup>2</sup> (fit)	
		To	Te
RLM	VF = 0	0,962	0,955
(Sensor T8)	VF = 1	0,796	0,729
RLM	VF = 0	0,952	0,951
(Sensor T14)	<b>VF</b> = 1	0,644	0,455
FT	4 pólos	0,969	0,977

Legenda:

RLM - Regressão Linear Múltipla

TF - Função de Transferência

É possível observar que o modelo utilizando RLM, considerando o sensor T8 como entrada, possui um ajuste acima de 95% (tanto para a temperatura do topo do óleo quanto para o ponto mais quente do enrolamento) para a situação em que a Ventilação Forçada está desativada (VF = 0). Esse ajuste cai para menos de 80% quando a VF entra em operação (VF = 1).

Para o modelo RLM considerando o sensor T14 como entrada, o ajuste é superior a 95% (tanto para a temperatura do topo do óleo quanto para o ponto mais quente do enrolamento), para a situação em que VF = 0 e cai para menos de 65% para a temperatura do topo do óleo e menos de 45% para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, para a situação em que VF = 1.

Por último, observa-se que o modelo obtido pelo método de identificação de sistemas utilizando equações diferenciais é mais preciso que o obtido pelo método RLM (acima de 96% de precisão), considerando que o número de polos da função de transferência é maior ou igual a 4, e não se fez necessário realizar uma análise separada (por partes), para as situações em que VF = 0 e VF = 1. A coluna *Best Fits* das Figura 28 e Figura 30 apresenta o grau de ajuste do modelo para diferentes números de polos, onde tf[n] corresponde ao modelo com *n* polos. Cabe ressaltar, porém, que esse último método exige um esforço computacional maior, porém uma vez identificada a função de transferência entre as variáveis de entrada e saída, é preferível utilizar este modelo por apresentar maior precisão.

#### 9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 9.1. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a avaliação dos efeitos do carregamento de transformadores na temperatura atingida pelos acessórios do transformador, enrolamento, e óleo, utilizando um conjunto de sensores de temperatura do tipo RTD (Resistance Temperature Detector) PT-100 e módulos de comunicação *wireless*, instalados na superfície externa do transformador, além dos sensores de temperatura já presentes no transformador. Um conjunto de dados de temperatura para um ciclo de carga de 5 horas e 30 minutos foi utilizado para determinação de uma relação entre as variáveis independentes de entrada escolhidas e a variável dependente de saída de interesse, utilizando dois métodos distintos, a regressão linear múltipla e a identificação de sistemas usando equações diferenciais (função de transferência). Existe um grande interesse por parte dos fabricantes e dos usuários de transformadores na determinação do modelo térmico do equipamento e dos parâmetros desse modelo, pois isso impacta diretamente no orçamento dessas empresas, assim como existe interesse por parte dos órgãos reguladores brasileiros e dos consumidores de que estes equipamentos possam operar com confiabilidade por todo o tempo de vida esperado do equipamento.

Com o objetivo acima definido, foi especificado e construído um sistema para aquisição dos dados reais de temperatura, utilizando sensores instalados em diversos pontos externos da carcaça do transformador. Foi exigido que esse sistema fizesse uso de componentes de baixo custo e de plataforma aberta para prototipagem (Open Source). Os custos do projeto são apresentados em detalhes no APÊNDICE B.

Os Resultados foram apresentados no Capítulo 8 e após análise foi identificado que o melhor ponto de medição de temperatura da carcaça do transformador para o método RLM é o ponto medido pelo Sensor T8 (centro do topo do tanque), porém, entre os métodos de análise apresentados, o melhor método é o de identificação de sistemas usando equações diferenciais, o qual apresentou precisão acima de 96%.

#### 9.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão apresentadas propostas de melhorias para trabalhos futuros que deem continuidade ao tema apresentado. Durante o desenvolvimento foram identificadas que algumas das especificações de projeto não foram adequadamente dimensionadas de modo a garantir uma maior durabilidade da bateria e um menor custo final do projeto. É possível, como será apresentado a seguir, otimizar o projeto em relação aos aspectos mencionados, mantendo a confiabilidade na informação medida. As melhorias ou propostas de otimização foram separadas em melhorias de hardware e melhorias de software:

#### 9.2.1. MELHORIAS DE SOFTWARE

- a) No programa em LabVIEW deve-se inserir uma etapa de verificação dentro do *loop* de leitura de dados, no arquivo "daqsys.vi", e identificar se o *timeout* foi estourado (i.e. se passou o tempo de se receber todos os dados dos sensores e nenhum dado foi recebido) ou se os dados foram recebidos parcialmente (i.e. apenas alguns sensores enviaram dados e outros não) e, para esta situação em que não foram recebidos todos os pacotes esperados dentro do período de amostragem, adicionar um erro de leitura (e.g. -266) para o(s) sensor(es) que faltar(em) e não abortar o programa, mas apenas alertar o usuário através de algum indicador visual na interface gráfica (que identifique qual sensor apresenta problema) e deixar que o usuário decida ou não abortar.
- b) Foi identificado que alguns códigos hexadecimais utilizados para o endereçamento do sensor na rede *mesh* (identificado no firmware do Arduino como XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(0x00000000, 0x00000000)) são de uso reservado do protocolo de comunicação ZigBee e portanto deve ser evitado numerar os sensores por ordem crescente a partir de 0x00000001, 0x00000002, e assim por diante. Deve-se utilizar o código ASCII correspondente ao número que se deseja atribuir ao sensor na rede.
- c) Sugere-se utilizar o modo *power\_down* do Arduino e enviar os dados a uma taxa de amostragem (f<sub>arduino</sub>) sempre superior a 2x a taxa de amostragem final (f<sub>sistema</sub>)

que se deseja obter (Teorema de Nyquist). Por exemplo, se o usuário final deseja obter dados a cada 5 minutos para serem apresentados na tela do PC, o usuário seleciona o intervalo de 5min (300s), porém, ao enviar o comando ao Arduino, este divide o intervalo por 2 e passa a enviar dados a cada 2min e 30s. Desta forma garante-se que durante um período T<sub>sistema</sub> pelo menos 1 amostra, e no máximo 2 amostras, de cada um dos módulos sensores tenham sido coletadas. Sugere-se utilizar essa técnica pois existe um problema de falta de precisão na contagem de intervalo de tempo ao se utilizar o modo power\_down, pois este modo desabilita todos os timers internos que utilizam como fonte de clock o cristal de 16MHz e passa a utilizar o oscilador RC interno do microcontrolador (que não tem a mesma precisão do *clock* de cristal e foi constatado empiricamente um erro de  $\pm 10\%$  em relação àquele). Este problema pode ser contornado calibrando-se cada microcontrolador individualmente através de ajuste do registrador OSCCAL (Oscillator Calibration)). Ao se utilizar dessa técnica (farduino = 2fsistema) eliminase o problema de durante o período T<sub>sistema</sub> faltar dado de algum dos sensores e um dos sensores esteja repetido, bastando para isso incluir uma rotina no programa em LabVIEW, no arquivo "daqsys.vi", que verifique quantos dados foram recebidos de um determinado sensor no período Tsistema (=2Tarduino) e apresente na tabela da interface gráfica apenas o dado mais recente (eliminando os repetidos).

d) Sugere-se utilizar a biblioteca de desenvolvimento de aplicações LabVIEW com interface gráfica para ser executado no Raspberry Pi, *LabVIEW Compatible Compiler for Raspberry Pi* da TSXperts, o que permitirá reduzir o custo final do projeto utilizando uma estação de trabalho de baixo custo, baseada no Raspberry Pi, e dedicada a receber os dados dos módulos sensores, a qual pode ser conectada a uma bateria externa e ser capaz de durar mais tempo em operação que um notebook desconectado da tomada.

#### 9.2.2. MELHORIAS DE HARDWARE

a) Instalar no Arduino UNO um regulador de tensão mais eficiente: reguladores lineares são pouco eficientes devido a corrente de repouso (quiescente) ser relativamente alta, na ordem de 3 a 4 mA, o que já suficiente para reduzir drasticamente a duração da bateria, pois comparada ao valor de 1 µA, que corresponde à corrente consumida pelo microcontrolador ATMega328PU em modo power\_save com um cristal de 32kHz nos pinos TOSC (necessário para utilizar o *timer*2 em modo assíncrono e manter a precisão de tempo) e operando com tensão de alimentação de 3,3V, representa, em ordem de grandeza, um consumo de 3 a 4 mil vezes superior. Isso significa que para uma bateria de 9V com capacidade típica de 600 mAh, com duração esperada média de 5 anos, devido ao efeito de auto-descarga, a duração esperada em funcionamento é reduzida então de 5 anos para apenas 150 horas, ou 6,25 dias. Esta corrente é dissipada sempre que é conectada uma fonte externa de tensão positiva ao pino VCC do regulador linear, mesmo que o microcontrolador não esteja em funcionamento (i.e. encontra-se em modo sleep, ou tenha sido removido do soquete do Arduino UNO). Além disso no processo de conversão da tensão, conforme pode ser calculado através da fórmula de eficiência de reguladores lineares, ela será menor quanto menor for a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Ou seja, para um Arduino operando com 5V e utilizando uma alimentação de 9V através de um regulador linear, tem-se uma eficiência de apenas 56%. O restante da potência é dissipado na forma de calor no conversor linear. Para se evitar este problema, recomenda-se utilizar um Arduino que trabalhe com tensão menor, e.g. 3.3V, frequência de cristal também mais baixa, compatível com a tensão de operação, e.g. 8MHz, e uma fonte de energia (bateria, etc.) cuja faixa de tensão entre totalmente carregada e totalmente descarregada atenda a todos componentes eletrônicos do projeto de maneira satisfatória.

$$\eta_{Regulador} = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{SAÍDA} + P_{PERDAS}} = \frac{V_{O}.I_{O}}{V_{O}.I_{O} + (V_{IN} - V_{O}).I_{O}} = \frac{V_{O}}{V_{IN}}$$
(14)

b) Substituir o módulo rádio XBee por um outro módulo rádio de menor custo, menor consumo de corrente em funcionamento e cujo raio de alcance do sinal atenda às especificações de projeto. Caso ainda se queira fazer uso do XBee, pode-se utilizar o microcontrolador integrado ao XBee S2C (MC9S08QE32CFT, da fabricante NXP) e programá-lo diretamente através da IDE CodeWarrior, já que esse modelo de XBee possui suporte ao protocolo SPI, evitando assim o custo

- de se adquirir um outro microntrolador (no caso do projeto desenvolvido, o ATMega328PU) para realizar a função de comunicação com o transdutor de temperatura para Pt-100 (MAX31865) e com o módulo XBee S2C.
- c) Recentemente, em junho de 2019, foi lançado um novo modelo de Arduino, denominado Nano 33 IoT, que possui funcionalidade de comunicação wireless e tem um custo inferior à versão mais antiga do modelo Nano (sendo que esta não possui funcionalidade de comunicação wireless). Sugiro utilizar este novo modelo em trabalhos futuros.
- d) Durante o teste na Subestação Frei Caneca foi identificado que alguns dos sensores não conseguiam se comunicar com o módulo Coordenador da rede que estava conectado ao PC devido, provavelmente, ao bloqueio do sinal rádio pela estrutura metálica do Trafo, portanto, sugere-se que se utilize alguns módulo XBee como roteadores, os quais devem estar ligados durante todo o período de teste, para que se consiga uma cobertura completa da comunicação entre os módulos sensores (*end devices*) e o módulo coordenador da rede.
- e) Recomenda-se migrar o software desenvolvido para ser executado no Raspberry Pi, utilizando o módulo de compilação "LabVIEW for Raspberry Pi" desenvolvido pela TSXperts. Dessa maneira será possível utilizar um hardware de menor consumo (Raspberry Pi) em comparação ao PC e, consequentemente, de maior autonomia, que poderá funcionar por pelo menos 1 dia inteiro utilizando uma bateria portátil comum de íons de lítio recarregável de 10.000 mAh. Uma das dificuldades encontradas foi a baixa autonomia da bateria do PC (5h), o que tornou necessário a conexão do PC a uma tomada de forma a permitir a aquisição de dados por um ciclo completo (24h).

### REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução 513/2002**. Brasília, 2002. Disponível em: <a href="http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2005/010/documento/resolucao\_n%c2%ba\_\_513\_2002\_-\_versao\_proposta\_com\_alteracoes.pdf">http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2005/010/documento/resolucao\_n%c2%ba\_\_513\_2002\_-\_versao\_proposta\_com\_alteracoes.pdf</a>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa 191/2005**. Brasília, 2005. Disponível em: <a href="http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pubren2005191.pdf">http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pubren2005191.pdf</a>>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformador de potência. Rio de Janeiro, 1993.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356 Partes 1 a
   7: Transformadores de potência. Rio de Janeiro, 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5416**: Aplicação de cargas em transformadores de potência Procedimento. Rio de Janeiro, 1997.
- [6] DAKIN, T. W. **Electrical Insulation Deterioration**. AIEE Transactions: Winter General Meeting. Pittsburgh, Paper 19, v. 67, p 113-122, 26-30 jan. 1948.
- [7] FONSECA, B. de A. B. Desenvolvimento de um software para estimação de temperatura de transformadores de potência baseada no carregamento. Rio de Janeiro: UFRJ Escola Politécnica, 2012. Disponível em: <a href="http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005051.pdf">http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005051.pdf</a>>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.
- [8] IBM SPSS Statistics. Version 20. [S.I.]: IBM Corporation. Disponível em: <a href="https://www.ibm.com/br-pt/analytics/spss-statistics-software">https://www.ibm.com/br-pt/analytics/spss-statistics-software</a>. Acesso em: 05 de dez, de 2019.
- [9] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C57.91-1995(R2002)**: IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. New York, 2002.

- [10] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C57.91-2011**: IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. New York, 2011.
- [11] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C57.115-1991**: IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA (65 °C Winding Rise). New York, 1991.
- [12] LESIEUTRE, B. C. HAGMAN, W. H and KIRTLEY JR., J. L. An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in An On-Line Monitoring and Diagnostic System. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, v. 12, n. 1, p. 249-256, jan. 1997.
- [13] NAJAR, S. et al. Soft sensor for distribution transformers: thermal and electrical models. CIRED: 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, Paper 0419, 15-18 jun. 2015. Disponível em <a href="http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015">http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015</a> 0419\_final.pdf>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.
- [14] NANDHINI, C., JAGADEESWARI, M. Measurement of temperature using RTD and software signal conditioning using LabVIEW. IJETCSE: International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics. Coimbatore, India, v. 20, issue 2, feb. 2016. Disponível em: < http://www.ijetcse.com/wp-content/plugins/ijetcse/file/upload/docx/997ICAEECI-198-pdf.pdf>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.
- [15] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Nota Técnica 038/2014: Ensaio de Elevação de Temperatura de Transformadores em Sobrecarga. Disponível em: <a href="http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONSNT038-2014\_ElevacaoTemperatura\_transformadoresemsobrecarga.pdf">http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONSNT038-2014\_ElevacaoTemperatura\_transformadoresemsobrecarga.pdf</a>>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.
- [16] ZHANG, Henry J. **Application Note 140**: Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies. Analog Devices, 2013. Disponível em: <a href="https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN140.pdf">https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN140.pdf</a>>. Acesso em: 05 de dez. de 2019.

#### APÊNDICE A

Figuras dos módulos (Virtual Instruments) do programa em LabVIEW:

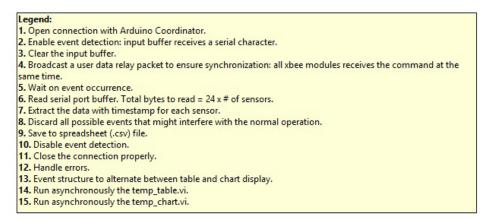


Figura 33: Legenda do VI "daqsys.vi"

Fonte: Próprio autor

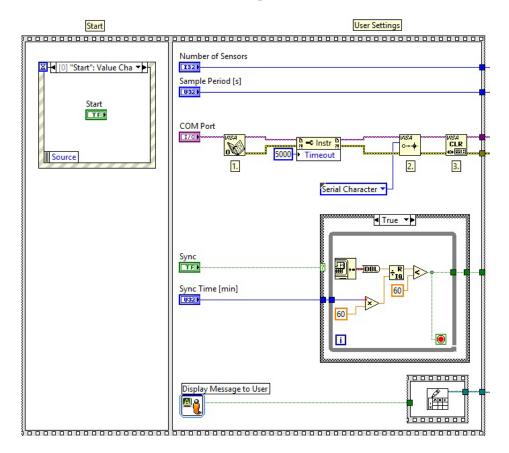


Figura 34: daqsys.vi: Configurações de usuário

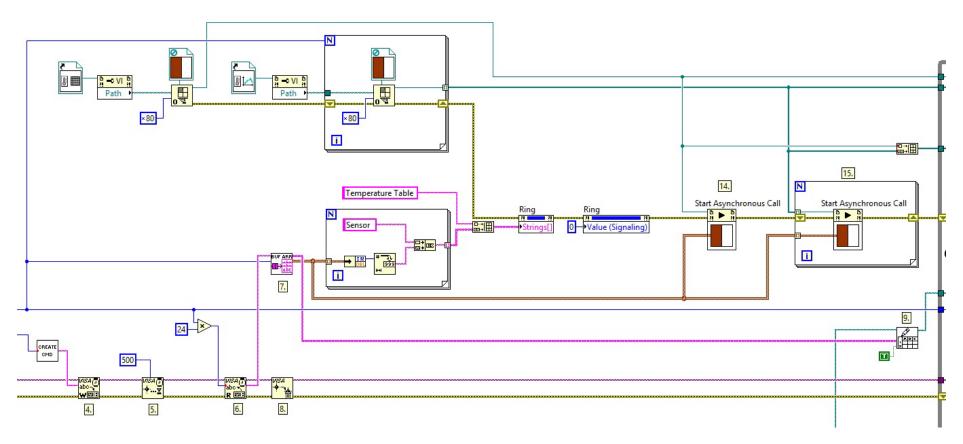


Figura 35: daqsys.vi: Rotinas de inicialização

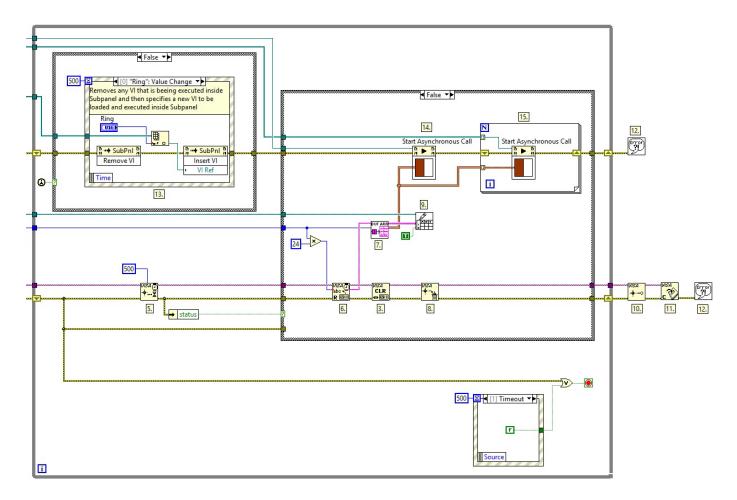


Figura 36: daqsys.vi: Loop principal de aquisição de dados

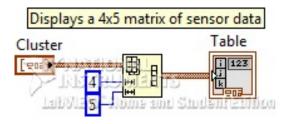


Figura 37: Diagrama de blocos do VI "temp\_table.vi"

Fonte: Próprio autor

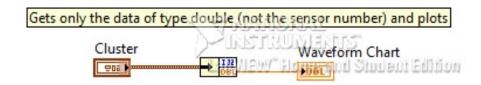


Figura 38: Diagrama de blocos do VI "temp\_chart.vi"

Fonte: Próprio autor

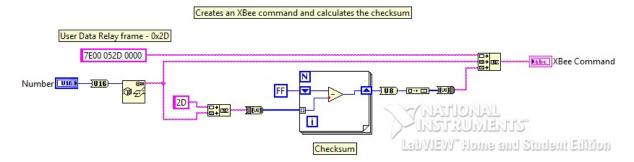
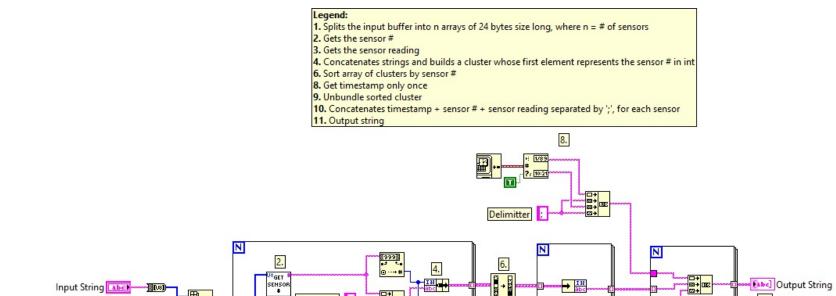


Figura 39: Diagrama de blocos do VI "create\_command.vi"



Delimitter ;

US TMP GET SENSOR READING

i

Number of Sensors 1321

Figura 40: Diagrama de blocos do VI "datalogger.vi"

Fonte: Próprio autor

11.

CHARLONAL Feel Output Cluster

LabVIEVY" Home and Student Edition

i

i

9.

# Legend: 1. Input array of unsigned integers (8 bits) 2. Gets the 13th element of the array 3. Converts the unsigned integer into decimal character (string) 4. Output decimal string

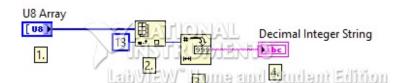


Figura 41: Diagrama de blocos do VI "get\_sensor\_number.vi"

Fonte: Próprio autor

Legenda:

1. Extract RTD data from input buffer array

2. Converts RTD data to float type temperature [°C]

3. Converts float type temperature [°C] to temperature string with 2 decimal places

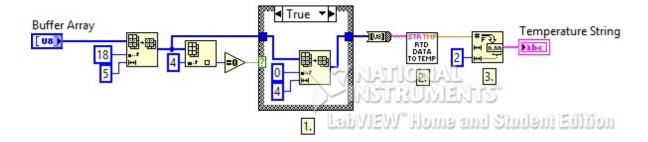


Figura 42: Diagrama de blocos do VI "get\_sensor\_data.vi"

Fonte: Próprio autor

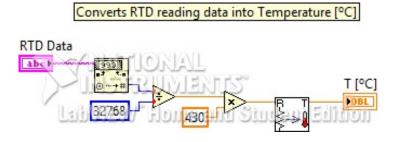


Figura 43: Diagrama de blocos do VI "rtd\_data\_to\_temp.vi"

#### Converts R [ohm] to T [°C] using the Pt-100 Callendar-Van Dusen equation for positive temperatures

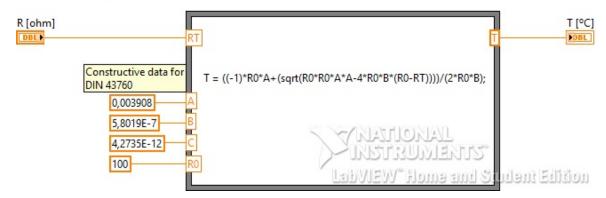


Figura 44: Diagrama de blocos do VI "r\_to\_temp.vi"

# APÊNDICE B

# Tabelas referenciadas no texto:

Tabela 24: Lista de itens adquiridos para o projeto e seus custos

Nome	Jonaylton Moura de Sousa
Telefone	(21) 99955-1495
I. Valor total estimado de todos os itens	R\$ 8.282,99
II. Valor total (retirando o Raspberry Pi e acessórios)	R\$ 7.737,64
Número de Sensores	17
Custo médio (I)	R\$ 487,23
Custo médio (II)	R\$ 455,16

Item	Descrição ***	Detalhes **	Data da compra	Onde	Preço na compra 🐷	Preço atual	Quantidade	Anotações	Foto
1	Raspberry Pi 3	Model B Quadcore 1,2 GHz	11/04/2017	Mercado Livre	R\$ 199,90	R\$ 259,90	1	A princípio o programa será executado em um PC. Posteriormente poderá ser impementado no Raspberry	→Arraste para visualizar
2	Arduino Uno	R3 ATMega328p com cabo USB	17/11/2018	Mercado Livre	R\$ 39,90	R\$ 39,90	18	Serão utilizados 18 para atender cada um dos 17 sensores mais 1 para se conectar ao computador	→Arraste para visualizar
3	Sensor de Temperatura Pt100	À prova d'água e cabo 0,5m	23/02/2019	Mercado Livre	R\$ 41,80	R\$ 41,80	17	Foram assumidos os dados de construção padrão DIN 43760	→Arraste para visualizar
4	Módulo Xbee S2C	Série 2, com antena, 2mW e possui interface SPI	28/01/2019	Mercado Livre	R\$ 155,45	R\$ 155,45	18	Essa versão do módulo (S2C) foi escolhida por permitir que futuramente seja possível eliminar o Arduino e o sensor comunique diretamente com o microcontrolador do Xbee	→Arraste para visualizar

	Case para Bateria 9V	Com chave ON-OFF		Mercado Livre				Serão utilizados 17 para atender cada um dos 17	→Arraste para visualizar
5	·		28/01/2019		R\$ 29,90	R\$ 29,90	17	sensores	
6	XBee Shield para Arduino	Com chave XBee-USB e botão RESET	28/01/2019	Mercado Livre	R\$ 19,99	R\$ 19,99	18	Idem item 2	→Arraste para visualizar
7	lmã de Neodímio	Ø10 mm x 4 mm	28/01/2019	Mercado Livre	R\$ 19,80	R\$ 19,80	7	Serão utilizados 4 imãs por caixa. Este é o valor para o kit de 10 imãs, pode ser que fique mais barato se for adquirido o kit com mais imãs	→Arraste para visualizar
8	Módulo MAX31865	Para Pt-100, comunicação SPI	27/01/2019	Mercado Livre	R\$ 69,90	R\$ 69,90	17	Idem item 5. O módulo deve ser configurado para sensor PT-100 de 3 fios, por meio de solda de algumas conexões	→Arraste para visualizar
9	Licença LabVIEW	2014 Home Bundle	14/11/2018	Digilent	R\$ 180,47	R\$ 180,47	1	Para poder utilizar o LINX no LabVIEW foi necessário adquirir a licença do LabVIEW 2014	→Arraste para visualizar
10	Licença LabVIEW for Raspberry Pi	Compilador da TSXperts Home Edition	15/11/2018	TSXperts	R\$ 200,11	R\$ 200,11	1	Para poder implementar programas do LabVIEW com interface gráfica no Raspberry	→Arraste para visualizar
11	Fonte Raspberry Pi 3	Original	18/04/2017	Mercado Livre	R\$ 35,00	R\$ 35,00	1	Atende a demanda de corrente do Raspberry, portanto, não entra no modo Power Saver	→Arraste para visualizar
12	Caixa hermética	10 cm x 10 cm x 6 cm, de plástico	07/02/2019	Mercado Livre	R\$ 13,20	R\$ 13,20	17	Idem item 5. A montagem de todos os componentes no interior da caixa será feita por uma empresa e o custo deste serviço não está incluso nessa tabela	→Arraste para visualizar
13	Cartão MicroSD 32GB	Samsung Class 10 Full HD 80 MB/s	11/04/2017	Mercado Livre	R\$ 63,79	R\$ 50,34	1	Para gravar a imagem do SO do Raspberry	→Arraste para visualizar
14	Tubo termo retrátil	Ø6mm branco, comprimento total 5m	NÃO COMPRADO	Mercado Livre		R\$ 15,00	2	Para proteger a malha da blindagem do cabo do sensor PT-100	→Arraste para visualizar
15	Chave de Alavanca	Unipolar Margirius 6A	10/03/2019	Mercado Livre	R\$ 14,90	R\$ 14,90	17	Liga-Desliga	→Arraste para visualizar
16	Jumpers	Macho-Fêmea	27/01/2019	Mercado Livre	R\$ 15,49	R\$ 15,49	5	Para as conexões entre os diversos módulos no interior da caixa hermética	→Arraste para visualizar

17	Prensa cabo	PG9, kit 10 peças	NÃO COMPRADO	Mercado Livre		R\$ 33,38	2	Permite a passagem do cabo do sensor e garante a vedação	→Arraste para visualizar
18	Bateria 9V	Kit 10 baterias	NÃO COMPRADO	Mercado Livre		R\$ 135,99	2	Capacidade de aprox. 600 mAh	→Arraste para visualizar
19	Fita Adesiva	Scotch 3M dupla face, transparente, 19mm x 2m	11/03/2019	Comércio	R\$ 27,00	R\$ 27,00	1	Foi utilizada in loco, sofrendo todo tipo de intempéries (chuva, sol, vento, calor (80°C)) e resistiu adequadamente	→Arraste para visualizar
20	Pasta Térmica	Pote com 50g Implastec	06/05/2019	Mercado Livre	R\$ 6,89	R\$ 6,89	4	Para melhorar a condução de calor do ponto onde está sendo medida a temperatura para o elemento sensor (PT-100)	→Arraste para visualizar
21	Conversor de Nível Lógico	Bidirecional 4 canais	11/04/2019	Mercado Livre	R\$ 9,80	R\$ 9,80	16	Permite a troca de informações entre o Arduino (que trabalha com nível lógico de 5V) e o Xbee (que trabalha com nível de 3,3V)	→Arraste para visualizar

# APÊNDICE C

#### Código fonte do Arduino:

```
/**************
 Author: Jonaylton Moura de Sousa
 WTS: Wireless Temperature Sensor
 OBS: This is part of a program for substation transformers
 heating test that the author has developed for his
 Master Thesis in Electrical Enginnering
 *************
// Observations about power saving:
// During sleep, power can be saved by:
// - Disabling ADC with ADCSRA.
  - Enabling BOD with sleep_bod_disable (should happen inside
//
    Adafruit_SleepyDog).
//
// While running, power can be saved by:
// - Disabling ADC with ADCSRA.
   - Disabling clock to various parts using PPR or the
   power_disable_foo() functions.
// - Giving unused pins a defined value (using a pullup or setting
them
   as outputs), to prevent the input state from alternating between
//
    LOW and HIGH all the time.
// - Disabling digital input logic on analog pins using DIDRO and
DIDR1
    (not used in this sketch).
//
// - Not using the UART
/* ---- Compiling Macros ---- */
without using XBee
#define SEND_RAW_RTD true
                                  // Send raw RTD read if true;
Send calculated temperature if false (Callendar-Van-Dusen equation)
resistance of the sensor (Pt-100 = 100 ohms / Pt-1000 = 1000 ohms
#define USE_SOFTWARE_SPI true
                               // Use software user defined
pins for SPI communication
/* ---- Libraries ---- */
#include<Adafruit_MAX31865.h>
#include<XBee.h>
#include<Adafruit_SleepyDog.h>
#include<avr/power.h>
/* ---- Functions ---- */
bool waitForPin(uint8_t pin, uint8_t value, uint16_t timeout);
void doSleep(uint32_t time);
/* ---- SPI Config ---- */
#if USE SOFTWARE SPI == true
// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
#define CS_PIN 12
```

```
#define DI PIN 11
#define DO_PIN 10
#define CLK PIN 9
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(CS_PIN, DI_PIN, DO_PIN,
CLK_PIN);
#else // USE_SOFTWARE_SPI = false
// Use hardware SPI, just pass in the CS pin
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(10);
#endif /* USE_SOFTWARE_SPI */
// The value of the Rref resistor. Use 430.0 for PT100 and 4300.0 for
PT1000
#define RREF
                  430.0
// The 'nominal' 0-degrees-C resistance of the sensor
// 100.0 for PT100, 1000.0 for PT1000
#if USE_NOMINAL_ZERO_DEG_RES == true
#define RNOMINAL 100.0 // Nominal 0-degrees-C resistance
#else // USE_NOMINAL_ZERO_DEG_RES = false
#define RNOMINAL 99.5 // Experimental adjusted 0-degrees-C resistance
#endif /* USE NOMINAL ZERO DEG RES */
/* ---- XBee Config ---- */
#if SEND RAW RTD == true
char payload[] = \{0,0,0,0,0,0\};
#else // SEND_RAW_RTD = false
char payload[] = \{0,0,0,0,0,0,0\};
#endif /* SEND_RAW_RTD */
String str;
#if SERIAL_MONITOR_TEST == false
XBeeWithCallbacks xbee;
XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(0x00000000, 0x00000001);
ZBTxRequest tx = ZBTxRequest(addr64, payload, sizeof(payload));
uint8_t frame_data[2];
#endif /* SERIAL_MONITOR_TEST */
/* ---- MAX31865 Pins Config ---- */
#define MAX31865_VCC_PIN 8
/* ---- Sleep Pins Config ---- */
#define XBEE_SLEEPRQ_PIN 7
#define XBEE_CTS_PIN 6
uint32_t sleep_time;
/* ---- Signal Converter Pins Config ---- */
#define CONV GND PIN 5
#define CONV VCC PIN 4
/* ---- Execution Time Control ---- */
uint32 t time now = 0;
uint32_t period = 2000; // ms
void setup()
  OSCCAL = 164;
  // Disable ADC to save power. Must happen before power_adc_disable()
  // If you need the ADC, you can also disable it only during sleep to
  // save a bit of power (check the datasheet for proper startup
timing
```

```
// of the ADC).
  ADCSRA &= \sim (1 << ADEN);
  // Enable pullups on all pins we are not using
  for (uint8_t i = 0; i < NUM_DIGITAL_PINS; i++)</pre>
    switch (i)
      default:
       pinMode(i, INPUT_PULLUP);
        break;
                              // 13
      case LED_BUILTIN:
                              // 12
      case CS_PIN:
      case DI_PIN:
                              // 11
                              // 10
      case DO_PIN:
                              // 9
      case CLK_PIN:
      case MAX31865_VCC_PIN: // 8
      case XBEE_SLEEPRQ_PIN: // 7
                              // 6
      case XBEE_CTS_PIN:
      case CONV GND PIN:
                              // 5
                              // 4
      case CONV_VCC_PIN:
        break;
  }
  // Set the LED pin as OUTPUT LOW, since the pullup will actually
turn
  // it on dimly
 pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  // Disable as much as possible in the PRR, power reduction register,
  // disabling the clock in all these parts. This saves power when
  // running only, in powerdown mode the clock is globally disabled
  // anyway.
  // The list below assumes a 328p microcontroller. Other
  // microcontrollers might have different toggles available (or none
at
  // all, PRR is limited to PicoPower parts).
  power_adc_disable();
  power_spi_disable();
  power_twi_disable();
 // You can also disable these if you do not need them. millis()
needs
  // timer0
  //power_timer0_disable();
  power_timer1_disable();
 power timer2 disable();
  //power usart0 disable();
  // Configure pins modes
  pinMode(MAX31865 VCC PIN, OUTPUT);
  pinMode(XBEE_SLEEPRQ_PIN, OUTPUT);
 pinMode(XBEE_CTS_PIN, INPUT);
  pinMode(CONV_GND_PIN, OUTPUT);
  pinMode(CONV_VCC_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(MAX31865_VCC_PIN, LOW);
  digitalWrite(XBEE SLEEPRQ PIN, LOW);
  digitalWrite(CONV_GND_PIN, LOW);
  digitalWrite(CONV_VCC_PIN, HIGH);
```

```
// Setup serial communcation
  Serial.begin(9600);
#if SERIAL MONITOR TEST == true
  Serial.println("DAQSys Pt100 XBee Sensor");
#else // SERIAL_MONITOR_TEST = false
 xbee.setSerial(Serial);
#endif /* SERIAL_MONITOR_TEST */
  // Setup MAX31865
 max.begin(MAX31865_3WIRE); // set to 2WIRE, 3WIRE or 4WIRE as
necessary
#if SERIAL_MONITOR_TEST == false
  // Make the first reading that will get the sampling period
  xbee.readPacketUntilAvailable();
  if(xbee.getResponse().isAvailable())
   xbee.readPacket();
   frame data[0] = xbee.getResponse().getFrameData()[2];
    frame_data[1] = xbee.getResponse().getFrameData()[3];
  sleep_time = ((frame_data[0]<<8) | frame_data[1])*(uint32_t)1000; //</pre>
Sampling period
// sleep_time = (90*sleep_time)/100; // It was detected that under
actual environmental conditions,
                                      // the watchdog timer delays
aprox. 11% above intended sleep time.
                                      // So in order to achieve
intended sleep_time, it's necessary to
                                      // multiply by aprox. 90%
#endif /* SERIAL_MONITOR_TEST */
void loop()
{
    time_now = (uint32_t)millis();
   uint16_t rtd;
    float ratio, r, temp;
   digitalWrite(MAX31865_VCC_PIN, HIGH);
    delay(100);
    rtd = max.readRTD();
    digitalWrite(MAX31865 VCC PIN, LOW);
#if SEND RAW RTD == false
   ratio = (float)rtd/32768;
    r = RREF*ratio;
    temp = max.temperature(RNOMINAL, RREF);
    str = String(temp, 2); // 2 decimal places
    str.toCharArray(payload, 7); // 7 = sizeof(payload) + 1
(toCharArray always insert a 0 in the last element)
#else // SEND_RAW_RTD = true
   str = String(rtd);
   str.toCharArray(payload, 6);
#endif /* SEND_RAW_RTD */
```

```
#if SERIAL MONITOR TEST == true
    Serial.print("RTD value: "); Serial.println(rtd);
#if SEND_RAW_RTD == false
    Serial.print("Ratio = "); Serial.println(ratio,8);
    Serial.print("Resistance = "); Serial.println(r,8);
    Serial.print("Temperature = "); Serial.println(temp);
#endif
    // Check and print any faults
    uint8_t fault = max.readFault();
    if (fault)
      Serial.print("Fault 0x"); Serial.println(fault, HEX);
      if (fault & MAX31865_FAULT_HIGHTHRESH) {
       Serial.println("RTD High Threshold");
      if (fault & MAX31865_FAULT_LOWTHRESH) {
       Serial.println("RTD Low Threshold");
      if (fault & MAX31865 FAULT REFINLOW) {
        Serial.println("REFIN- > 0.85 x Bias");
      if (fault & MAX31865_FAULT_REFINHIGH) {
       Serial.println("REFIN- < 0.85 x Bias - FORCE- open");</pre>
      if (fault & MAX31865_FAULT_RTDINLOW) {
       Serial.println("RTDIN- < 0.85 x Bias - FORCE- open");</pre>
      if (fault & MAX31865_FAULT_OVUV) {
       Serial.println("Under/Over voltage");
      max.clearFault();
    else
      for(int i=0; i<sizeof(payload); i++)</pre>
        Serial.println(payload[i]);
#else // SERIAL_MONITOR_TEST = false
   digitalWrite(XBEE_SLEEPRQ_PIN, LOW);
    waitForPin(XBEE_CTS_PIN, LOW, 100);
    xbee.send(tx);
    digitalWrite(XBEE_SLEEPRQ_PIN,HIGH);
    //doSleep(sleep time - ((uint32 t)millis() - time now)); // Add
functionality in the future using power save mode
    delay(sleep time - ((uint32 t)millis() - time now));
#endif /* SERIAL MONITOR TEST */
#if SERIAL_MONITOR_TEST == true
    delay(period - (millis() - time_now));
#endif /* SERIAL_MONITOR_TEST */
// Wait for the given pin to become the given value. Returns true when
// that happened, or false when timeout ms passed
bool waitForPin(uint8_t pin, uint8_t value, uint16_t timeout)
```

```
unsigned long start = millis();
 while(true)
   if (digitalRead(pin) == value)
     return true;
    if (millis() - start > timeout)
     return false;
  }
}
// This sleeps in powerdown mode for about the specified number of ms.
// If an interrupt occurs during sleep, it will be handled and sleep
// will continue (but up to 8 seconds of sleep might be "lost").
void doSleep(uint32_t time)
 while (time > 0) {
    // This sleeps for at most time ms, or the minimum sleep time if
    // that's more than time ms. Only some sleep times are available,
    // multiple sleeps might be needed.
    int slept;
    if (time < 8000)
      slept = Watchdog.sleep(time);
    else
      slept = Watchdog.sleep(8000);
    if (slept >= time)
     return;
    time -= slept;
  }
}
```

# **APÊNDICE D**

# Código fonte do Maple:

- $> unassign \left( \ 'k_{11} \ ', k_{21} \ ', k_{22} \ ', \tau_{\theta} \ ', \tau_{w} \ ', R', x', y', \Delta\theta_{hr} \ ', \Delta\theta_{\theta r} \ ', K', \theta_{h} \ ', \theta_{\theta} \ ', \theta_{a} \ ', \Delta\theta_{h}', \Delta\theta_{\theta} \ ' \right)$
- > k<sub>11</sub>

*k*<sub>11</sub>

> k<sub>21</sub>

k<sub>21</sub>

> k<sub>22</sub>

 $k_{22}$ 

 $\tau_{o}$ 

> τ<sub>w</sub>

> R

 $\tau_{w}$ 

R

 $\boldsymbol{x}$ 

y

>  $\Delta\theta_{hr}$ 

 $\Delta \theta_{hr}$ 

 $> \Delta \theta_{\rm or}$ 

 $\Delta \theta_{or}$ 

> K(s)

 $> \theta_h(s)$ 

K(s)

 $> \theta_o(s)$ 

 $\theta_h(s)$ 

 $\theta_o(s)$ 

 $\theta_a(s)$ 

 $\theta_a(s)$ 

 $> \Delta \theta_h(s)$ 

 $\Delta\theta_h(s)$ 

 $> \Delta \theta_o(s)$ 

 $\Delta\theta_o(s)$ 

$$> G1(s) := \Delta \theta_{hr} \cdot K(s)^y$$

$$G1 := s \mapsto \Delta \theta_{hr} K(s)^{y}$$

> 
$$G2(s) := \frac{k_{21}}{1 + k_{22} \cdot \tau_w \cdot s} - \frac{k_{21} - 1}{1 + \left(\frac{\tau_0}{k_{22}}\right) \cdot s}$$

$$G2 := s \mapsto \frac{k_{21}}{1 + k_{22} \cdot \tau_w s} - \frac{k_{21} - 1}{1 + \frac{\tau_0 s}{k_{22}}}$$

> 
$$G3(s) := \Delta\theta_{or} \cdot \left(\frac{1 + K(s)^2 \cdot R}{1 + R}\right)^x$$

$$G3 := s \mapsto \Delta \theta_{or} \left( \frac{1 + K(s)^2 R}{1 + R} \right)^x$$

> 
$$G4(s) := \frac{1}{1 + k_{11} \cdot \tau_0 \cdot s}$$

$$G4 := s \mapsto \frac{1}{1 + k_{II} \tau_0 s}$$

> 
$$G5(s) := \frac{1}{1 + k_{11} \cdot \tau_0 \cdot s}$$

$$G5 := s \mapsto \frac{1}{1 + k_{II} \tau_0 s}$$

$$> \Delta \theta_o(s) := G3(s) \cdot G4(s)$$

$$\Delta\theta_o := s \mapsto G3(s) \ G4(s)$$

$$> \Delta \theta_h(s) := G1(s) \cdot G2(s)$$

$$\Delta\theta_h := s \mapsto G1(s) \ G2(s)$$

$$\theta_o(s) := \Delta \theta_o(s) + \theta_o(s) \cdot G5(s)$$

$$\theta_o := s \mapsto \Delta \theta_o(s) + \theta_a(s) G5(s)$$

$$\theta_h(s) := \Delta \theta_h(s) + \Delta \theta_o(s) + \theta_a(s) \cdot G5(s)$$

$$\theta_h := s \mapsto \Delta \theta_h(s) + \Delta \theta_o(s) + \theta_a(s) G5(s)$$

$$x := 0.8$$

$$x := 0.8$$

> 
$$y := 1.3$$

$$y := 1.3$$

> 
$$k_{11} := 0.5$$

$$k_{11} := 0.5$$

> 
$$k_{21} := 2$$

$$k_{21} := 2$$

> 
$$k_{22} := 2$$

$$k_{22} := 2$$

> 
$$\tau_0 := 150$$

$$\tau_0 := 150$$

> 
$$\tau_w := 7$$

$$\tau_w := 7$$

$$> \Delta\theta_{or} := 45$$

$$\Delta\theta_{or} := 45$$

$$> \Delta \theta_{hr} := 35$$

$$\Delta\theta_{hr} := 35$$

> 
$$R := 8$$

$$R := 8$$

$$> \theta_h(s)$$

$$35 K(s)^{1.3} \left( \frac{2}{1+14s} - \frac{1}{1+75s} \right) + \frac{45 \left( \frac{1}{9} + \frac{8 K(s)^2}{9} \right)^{0.8}}{1+75.0s} + \frac{\theta_a(s)}{1+75.0s}$$

 $> simplify(\theta_h(s), K, \theta_a)$ 

$$\frac{(35 + 4760 s) K(s)^{1.3}}{1050 s^2 + 89 s + 1} + \frac{45 \left(\frac{1}{9} + \frac{8 K(s)^2}{9}\right)^{0.8}}{1 + 75.0 s} + \frac{\theta_a(s)}{1 + 75.0 s}$$

$$35 K(s)^{1.3}$$

$$\frac{2}{1+14s} - \frac{1}{1+75s}$$

$$45\left(\frac{1}{9} + \frac{8K(s)^2}{9}\right)^{0.8}$$

$$\frac{1}{1+75.0\,s}$$

$$\frac{1}{1+75.0\,s}$$

> 
$$K(s) := 1$$

$$K := s \mapsto 1$$

$$\theta_a(s) := \frac{35}{s}$$

$$\theta_a := s \mapsto \frac{35}{s}$$

$$> simplify(\theta_h(s))$$

$$\frac{5390.s^2 + 570.s + 35.}{1050.s^3 + 89.s^2 + s}$$

```
> with(inttrans):
> f(t) := invlaplace(\theta_h(s), s, t)
```

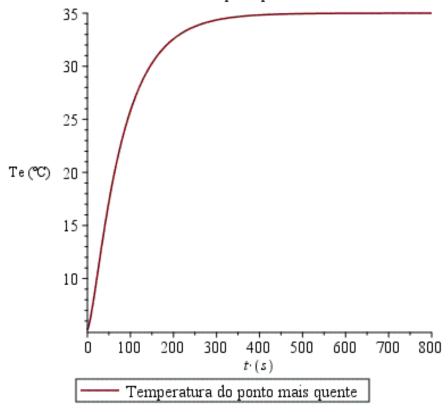
$$f := t \mapsto invlaplace(\theta_h(s), s, t)$$

> f(t)

5. 
$$e^{-0.07142857143 t}$$
 - 34.86666667  $e^{-0.013333333333 t}$  + 35.

> plot(f(t), t = 0..800)

Gráfico da resposta da temperatura do ponto mais quente para entrada do tipo impulso



> f(200)

32.57734679

# APÊNDICE E

# Diagrama de blocos do Simulink:

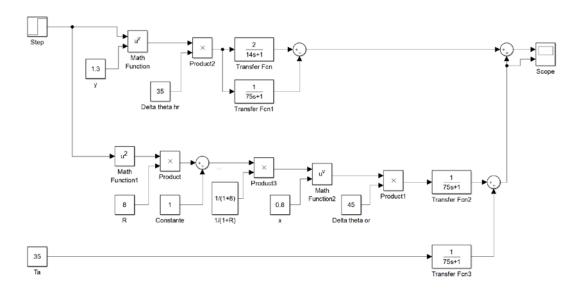


Figura 45: Diagrama de blocos do MATLAB do modelo de equações diferenciais utilizando os valores típicos

Fonte: Próprio autor

# Resposta ao degrau:

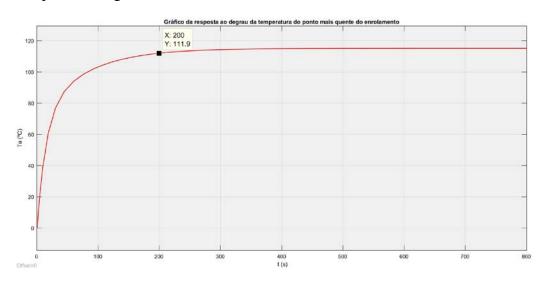


Figura 46: Gráfico da resposta ao degrau da temperatura do ponto mais quente do enrolamento