

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO OLIVEIRA DE MIRANDA

**CONTRIBUIÇÃO À INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE
ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO NO
INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES**

Santa Maria, RS
2019

Rodrigo Oliveira de Miranda

**CONTRIBUIÇÃO À INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE
ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO NO
INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

Santa Maria, RS
2019

Miranda, Rodrigo Oliveira
CONTRIBUIÇÃO À INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE ENSAIOS
EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO NO INSTITUTO DE REDES
INTELIGENTES / Rodrigo Oliveira Miranda.- 2019.
161 p.; 30 cm

Orientador: Rafael Concatto Beltrame
Coorientador: Mauricio de Campos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Laboratório de Média Tensão 2. Transformadores de
distribuição 3. Revisão normativa 4. Automação
laboratorial I. Beltrame, Rafael Concatto II. de Campos,
Mauricio III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo
autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca
Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Rodrigo Oliveira de Miranda. A reprodução de partes
ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: rodrigoom@mail.ufsm.br

Rodrigo Oliveira de Miranda

**CONTRIBUIÇÃO À INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE
ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO NO
INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 19/07/2019:

Prof. Rafael Concatto Beltrame, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Mauricio de Campos, Dr. (UNIJUI)
(Coorientador)

Prof. Vitor Cristiano Bender, Dr. (UFSM)

Prof. Estácio Tavares Wanderley Neto, Dr. (UNIFEI)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação ao meu avô, Abel Monteiro de Oliveira, ao meu tio, Marcos Luís de Oliveira, os quais eu realmente gostaria que pudessem ver o resultado deste trabalho.

A minha mãe, Socorro Rabbett, pessoa que mais lutou por mim.

A todas as pessoas que enfrentam a graduação e a pós-graduação, afinal, sabemos o quanto é difícil o desafio da pesquisa, ensino e extensão universitária.

E, por fim, dedico esse trabalho a UFSM que me adotou como um verdadeiro filho durante a minha passagem por esta universidade.

AGRADECIMENTOS

Bem, primeiramente eu agradeço ao universo por ter me agraciado com tantos eventos aleatórios (nem sempre agradáveis) de forma que eu, um engenheiro eletricista formado na UFPA, vim parar na cidade de Santa Maria, mais especificamente, na UFSM. Acredito que a Zen Dinha foi uma ferramenta do karma para que eu viesse a fazer mestrado aqui, por isso eu a agradeço por ser a sueca mais amigável que eu poderia conhecer.

Agradeço também a mim por ter aceitado o desafio de mudar do meu local de nascimento, para um local totalmente diferente e no outro extremo do país. Foi um salto de fé, e fico feliz pelo feno ter amortecido meu impacto.

Agradeço a minha família, minha mãe, Socorro Rabbett, meu padrasto, Jimmy Rabbett, minha segunda mãe, Vanda Prestes e meu irmão, Lucas Prestes, pelo apoio que vocês me deram de todas as formas durante esse período. Foi muito mais difícil que eu esperava ficar longe. Eu amo vocês de todo o meu coração.

Ao meu pai, Crispim Miranda, obrigado por ter apoiado da sua forma a minha vinda à Santa Maria. Obrigado por tudo que o senhor fez por mim.

Meu agradecimento também a família Matos que me adotou de forma tão gentil. Nelma, Odin, Nilce, Thais, Thamires, Luã, Nicolas e a mais nova integrante, Isabeli. Peço desculpas por ter sido desnaturado, mas vocês sempre estiveram no meu coração e nos meus pensamentos.

Aos meus amigos e antigos vizinhos, João Trindade, Alexandre Bahia, Wellington Cunha, Natalia Almeida, Alex Lucas, Rafael Campos, Rafaela Campos que estão fortemente presentes em ótimas memórias que eu cultivei na minha antiga casa em Belém. Senti falta dos corujões e das visitas surpresas.

A Julie França, Sandro Queiroz, Dayse Pastana, Victor Freitas e Desirré Jastes que mesmo longe não deixaram de ser presentes, mesmo quando ficávamos muito tempo sem comunicação, sempre voltávamos a nos falar como verdadeiros amigos.

Ao meu trio incrível da UFPA, Thiago Dias, Gabriela Farinha e Nathalia Vilhena. Agradeço a vocês por terem sido uma parte muito importante da minha vida, a qual eu sempre guardarei as melhores lembranças (principalmente aquelas do Tokyo).

Ao meu antigo orientador, Orlando Fonseca Silva, por ter acreditado em mim na graduação e ter me dado um lugar no PET-EE, sendo este grupo uma parte inesquecível durante a minha graduação o qual eu sou muito grato de ter participado.

Aos amigos de Belém que eu fiz logo antes de partir, Rafael (Potter) Nogueira, Mayara (Neko) Xavier, Armando (Tody) Toda, Mateus (Matt) Aguiar, Marcos André e Vanessa Del Caro. Obrigado pela companhia que muitas vezes foi a luz que eu precisava e por terem acompanhado comigo o início, meio e fim dessa jornada.

A Priscila Rodrigues, por ser a melhor amiga imaginária que eu poderia encontrar na vida. Por ter enchido o quadro da minha vida de cor, por dividir o guarda-chuva comigo nos dias tempestuosos, por não ter desistido e por não deixar eu desistir.

A Diego Camelo, Amábile Boessio e Aline Barasuol, por terem me dado a melhor placa de boas-vindas à Santa Maria, aprendi muito com vocês e sou muito grato por terem me tratado tão bem quando fazendo o processo de mudança ocorrer da forma menos dura possível.

A Assis Ecker e Gustavo Toniolo, amigos parceiros que me salvaram muitas vezes do tédio e que me ouviram reclamar de todas as etapas desses dois anos. Obrigado por todas as sessões de cinema e me ouvirem a exaustão, eu sou realmente muito grato.

Aos colegas do PPGEE, em especial Guilherme Frantz e Sebastian Martins que foram grandes parceiros nas cadeiras da pós-graduação e fora da UFSM.

Ao corpo do Instituto de Redes Inteligentes, Ricardo Bortolini, Ana Paula Moccellin, Débora Steinholt, Lucas Gais, Igor Bittencourt, Alexandre Ruschel, Henrique Figueira, Djulia Ziemann, Ellen Debastiani, Paulo Roberto, Paulo do Carmo, Paula Rigo, Valesca Feltrin, Eleonora Lazzari, Leonardo Medeiros, Alexander Dutra, Guilherme Maschio e Juliana Costa. Parabéns por serem extremamente competentes e obrigado por fazerem do INRI o ambiente de trabalho agradável que ele é. As conversas claramente audíveis da hora do almoço salvaram o meu dia muitas vezes.

Aos professores Tiago Marchesan, Leandro Michels, Cassiano Rech, Daniel Bernardon e Maurício Sperandio os quais fizeram da minha pós-graduação um ambiente de extremo aprendizado e conhecimento o qual eu levarei para toda a minha vida acadêmica e para a minha formação como engenheiro.

Aos professores Estácio Tavares e Maurício de Campos por aceitarem fazer parte da comissão avaliadora deste trabalho, agradeço a disponibilidade.

Ao professor Vitor Bender e sua esposa Darlize Bender, pelos conselhos, pela compreensão, pelo bom humor e por demonstrar que se importam.

Ao meu professor Rafael Beltrame, por ser um ótimo orientador. Por ter me ensinado muitas coisas, mas, principalmente pela sua ética, organização e dedicação. Obrigado por ser uma referência muito positiva de profissional na minha vida. Agradeço também à sua noiva, Greyce Storgatto, a qual o bom humor é marcante.

A Milena Trentin por ser uma das companhias mais agradáveis que eu poderia ter ao longo desses dois anos. Obrigado por me deixar levantar essa porta pesada para que pudéssemos tomar um suco juntos enquanto reclamamos da vida.

A Tainá Lersch, por ter dividido tantos momentos comigo, desde um simples supermercado, um barzinho no fim da tarde, uma maratona de série ou outras um milhão de coisas que fizemos juntos. Obrigado por me fazer sorrir de verdade quando olho a estante da minha vida, a qual você está muito presente.

E mais especificamente ao corpo técnico do INRIMT nas pessoas de:

Ana Paula Marchesan. Sua inteligência e dedicação são notórias, mas você é especial por sem quem és, jamais esqueça disso. Obrigado por dividir as suas inseguranças, medos e também por todas as interações, dentro e fora da UFSM, que fizeram muitos dos meus dias normais serem especiais só por estarmos juntos.

Manuella Farias. Obrigado por ter sido meu braço direito no laboratório me ajudando a organizar e conduzir as tarefas. Por sua organização e trabalhos impecáveis. Por dividir seus sonhos comigo, as vezes literalmente, e pelas nossas conversas cheias das suas expressões que nos faziam chorar de rir ou pelas que nos faziam dividir umas lágrimas.

Élen Brodt. Obrigado pelo seu jeito sério quando necessário, mas também pela sua descontração. Trabalhar com você é agradável pela sua competência, evidenciada pela sua contribuição ao laboratório, e musicalidade que alegram o ambiente. Fora isso, eu agradeço muito pelas nossas conversas, pela preocupação, pelos abraços e pelo carinho.

Giuliano Cattani. Pela sua vontade incansável de aprender e ajudar. Pela sua disposição, carisma e perfil. Por ter sido um amigo peculiar e adorável. Por ter se adaptado tão bem a nossa equipe que foi um processo natural a sua permanência no laboratório.

E por fim gostaria de manifestar um agradecimento especial ao projeto do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCTGD) e seus órgãos financiadores, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo número, 465640/2014-1, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo número 23038.000776/2017-54 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), processo número 17/2551-0000517-1 pelo apoio financeiro.

42.

(O Guia do Mochileiro das Galáxias)

RESUMO

CONTRIBUIÇÃO À INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO NO INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES

AUTOR: Rodrigo Oliveira de Miranda

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

Nesta dissertação é apresentada uma contribuição à instalação de um laboratório de média tensão para realização de ensaios em transformadores de potência, no Instituto de Redes Inteligentes da Universidade Federal de Santa Maria – INRIMT com foco no Programa Brasileiro de Etiquetagem. Para tanto, se fez uma revisão das normas técnicas nacionais e internacionais e marcos legais necessários para compreensão da importância e necessidade dos ensaios elencados. Na sequência, é feito um estudo estrutural do laboratório e, a partir dessa análise, são detectadas oportunidades de melhoria através de automação do procedimento, relacionando quais alterações estruturais serão necessárias para a adequação ao sistema automatizado. Seguido da apresentação dos projetos desenvolvidos, compreendendo estrutura, *hardware* e *software* que foram desenvolvidos de acordo com as necessidades de cada teste e do laboratório. Por fim o trabalho é concluído apresentando a síntese do que foi estudado, aplicado, os entraves e os rumos que podem ser tomados para continuação do processo de melhoria laboratorial.

Palavras-chave: Revisão normativa. Ensaios em Transformadores. Sistema de automação.

ABSTRACT

AUTOMATION PROPOSAL FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS TESTS IN THE SMART GRID INSTITUTE

AUTHOR: Rodrigo Oliveira de Miranda
ADVISOR: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

In this dissertation is presented a contribution to the installation of a medium voltage laboratory to perform tests on power transformers in the Smart Grid Institute of Federal University of Santa Maria – INRIMT, focusing in the Brazilian Labeling Program. First, a review of the national and international technical standards and policies necessary to understand the importance and necessity of the tests listed was made. Afterwards, a structural study of the laboratory is made and, using the analysis, improvement opportunities are detected through procedure's automation, relating what structural changes will be necessary to the adequate the automated system. After that, the projects are presented, including structure, hardware and software that were developed according to the needs of each test and the laboratory. Finally, the work is concluded presenting the synthesis of what was studied, applied, the obstacles and evaluates the directions that can be taken to continue the process of laboratory improvement.

Keywords: Normative Review. Tests in transformers. Automation system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Geração de energia elétrica mundial por tipo de combustível	28
Figura 1.2 – Consumo de Energia Mundial.....	28
Figura 1.3 – Estrutura simplificada do SEP	30
Figura 1.4 – Esquemático do princípio de funcionamento de um transformador	31
Figura 1.5 – Modelos de Transformadores aéreos trifásicos.....	32
Figura 1.6 – Esquema de ligação de um TP	34
Figura 1.7 – Esquema de ligação de um TC	34
Figura 2.1 – Estrutura geral da ISO 50001	40
Figura 2.2 – Selo PROCEL	66
Figura 2.3 – Selo CONPET	67
Figura 2.4 – Etiqueta ENCE para transformadores de potência.....	69
Figura 3.1 – Planta baixa do laboratório INRIMT	76
Figura 3.2 – Imagem de sala de controle.....	76
Figura 3.3 – Imagem de área de execução do ensaio	76
Figura 3.4 – Imagem de área onde está localizado o gerador de impulso atmosférico	77
Figura 3.5 – Quadro de comando	78
Figura 3.6 – Fonte trifásica Supplier® FCATQ 1000-60-40-PFC55450	79
Figura 3.7 – Vista frontal com taps de alta tensão do TR001	80
Figura 3.8 – Vista posterior: TR001	81
Figura 3.9 – Dados de placa do TR001	82
Figura 3.10 – Dados de placa do TR002	82
Figura 3.11 – Vista frontal do TR002	83
Figura 3.12 –TP Yokogawa®	84
Figura 3.13 – TC Yokogawa®	85
Figura 3.14 – Multímetro Fluke® (ML001).....	86
Figura 3.15 – Equipamento MONITEK9930 (MT001)	88
Figura 3.16 – Equipamento MONITEK9610 (MT002)	89
Figura 3.17 – Equipamento MONITEK9451® (MT003)	90
Figura 3.18 – Sensores de temperatura Pt100	90
Figura 3.19 – Base dos sensores de temperatura ambiente	91
Figura 3.20 – Osciloscópio Rohde&Schwarz® RTB2004.....	92
Figura 3.21 – Divisor resistivo (DR001).....	92

Figura 3.22 – Divisor capacitivo (DC001).....	93
Figura 3.23 – Diagrama unifilar representativo do conjunto gerador de impulso	94
Figura 3.24 – Megômetro ICEL® (MG001).....	95
Figura 3.25 – Tela inicial do <i>software</i> TRANS4	96
Figura 3.26 – Tela inicial do <i>software</i> RHMED	97
Figura 3.27 – Tela inicial do software RTMED	97
Figura 3.28 – Tela inicial do <i>software</i> Eleva	98
Figura 3.29 – Tela do software FCATQ359	99
Figura 3.30 – Fator de correção de temperatura do MG001	102
Figura 3.31 – Esquema de ligação para o ensaio de tensão aplicada.....	104
Figura 3.32 – Esquema de ligação do ensaio de tensão induzida	106
Figura 3.33 – Forma de onda padronizada para o ensaio de impulso atmosférico (valores em p.u)	107
Figura 3.34 – Forma de onda do ensaio de impulso cortado (valores em p.u)	108
Figura 3.35 – Programa de controle do ensaio de impulso atmosférico	109
Figura 3.36 – Diagrama do equipamento MT001 para medição de resistência.....	110
Figura 3.37 – Esquema de hardware do MT002.....	111
Figura 3.38 – Esquema ilustrativo da ligação para ensaio de perdas a vazio	113
Figura 3.39 – Esquema de ligação do ensaio de perdas em carga	117
Figura 3.40 – Esquema de ligação do ensaio de elevação de temperatura	120
Figura 4.1 – Desenho da chave seccionadora, com medidas em mm.....	125
Figura 4.2 – Chave Seccionadora após inserção das barras de cobre (posição aberta)	125
Figura 4.3 – Proposta de sistema pneumático para rotação da chave seccionadora	126
Figura 4.4 – Unidade de preparação de ar	127
Figura 4.5 – Válvula de controle bidirecional.....	127
Figura 4.6 – Válvula de controle de fluxo unidirecional	128
Figura 4.7 – Atuador pneumático rotativo	128
Figura 4.8 – Projeto de base para chave seccionadora. Medidas em mm.....	129
Figura 4.9 – Projeto de quadro para comutação de taps do TR001, TCs e TPs (medidas em mm)	132
Figura 4.10 – Diagrama de ligação das contatoras	133
Figura 4.11 – Esquema de ligação das chaves seletoras para controle dos taps	134
Figura 4.12 – Exemplo de ligação entre equipamentos e comunicação com o computador. ..	135
Figura 4.13 – Projeto para o canal de tensão: a) sensoriamento, b) isolamento e c) proteção.....	136

Figura 4.14 – Projeto para o canal de corrente: a) sensoriamento, b) isolamento e c) proteção	137
Figura 4.15 – Dispositivo NI USB-6001	138
Figura 4.16 – Diagrama dos estados presentes no programa e suas relações.....	139
Figura 4.17 – Tela de cadastro dos dados de placa transformador	140
Figura 4.18 – Tela de seleção de ensaios e impressão de relatório	141
Figura 4.19 – Formulário de ensaio de medição de resistência de isolamento	142
Figura 4.20 – Tela do ensaio de tensão induzida.....	143
Figura 4.21 – Tela do ensaio de tensão aplicada	144
Figura 4.22 – Supervisório para ensaio de perdas em carga	146
Figura 4.23 – Supervisório para ensaio de perdas a vazio.....	147
Figura 4.24 – Tela de importação dos dados de ensaios dos equipamentos MONITEK	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Características gerais de transformadores de distribuição com derivações	32
Tabela 2.1 – Normas IEC para transformadores de potência	44
Tabela 2.2 – Normas ABNT NBR para transformadores de potência	45
Tabela 2.3 – Temperatura de referência para transformadores imersos em óleo	47
Tabela 2.4 – Requisitos para ensaios dielétricos	49
Tabela 2.5 – Valores de pressão absoluta de ensaio à vácuo	53
Tabela 2.6 – Comparaçao entre normas: condições gerais de ensaio	56
Tabela 2.7 – Comparaçao entre normas: perdas a vazio	56
Tabela 2.8 – Comparaçao entre normas: perdas em carga	57
Tabela 2.9 – Comparaçao entre normas: medição da resistência a frio	58
Tabela 2.10 – Limites de elevação de temperatura	60
Tabela 2.11 – Valores de eficiência para transformadores de distribuição monofásicos	60
Tabela 2.12 – Valores de eficiência para transformadores de distribuição trifásicos	62
Tabela 2.13 – Tolerâncias	63
Tabela 3.1 – Características da fonte FG001	80
Tabela 3.2 – Especificações do TC Yokogawa® 2241	84
Tabela 3.3 – Especificações do TP Yokogawa® 2261	84
Tabela 3.4 – Especificações do multímetro Fluke® (ML001)	86
Tabela 3.5 – Ligações para o ensaio	101
Tabela 3.6 – Tensões suportáveis nominais para transformadores com tensão máxima menor que 170 kV: Série I, baseado na prática europeia e brasileira, conforme ABNT NBR 6939 103	
Tabela 3.7 – Valores da constante k	115
Tabela 4.1 – Objetivos da qualidade e indicadores	122
Tabela 4.2 – Estrutura dos documentos internos do SGLab CT	123
Tabela 4.3 – Custo do projeto para automação da rotação da chave CS001	130
Tabela 4.4 – Custo do quadro de comutação	131
Tabela 4.5 – Parâmetros da instrumentação	136
Tabela 4.6 – Custo para utilização do programa construído em LabVIEW	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
CGCRE	Coordenação Geral de Acreditação
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
CS001	Chave seccionadora
DC001	Divisor Capacitivo
DR001	Divisor Resistivo
DUT	<i>Device Under Test</i>
EAT	Enrolamento de Alta Tensão
EBT	Enrolamento de Baixa Tensão
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
ET	Enrolamento Terciário
FG001	Fonte emuladora de sistema trifásico em corrente alternada
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IG	Instrução de Gestão
IL	Instrução de Laboratório
ILAC	<i>International Laboratory Accreditation Cooperation</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INRI	Instituto de Redes Inteligentes
INRIMT	Laboratório de Média Tensão do INRI

ISO	<i>International Standards Organization</i>
IU	Instrução de uso
MG001	Megômetro digital
ML001	Multímetro
MQ	Manual da Qualidade
MT001	Miliohmímetro Digital MONITEK9930
MT002	TTR Digital MONITEK9610
MT003	Analizador Digital de Qualidade de Energia MONITEK9451
NBR	Norma Brasileira
NR 10	Norma Regulamentadora 10
ONU	Organização das Nações Unidas
OS001	Osciloscópio Rohde&Schwarz®
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PC	Procedimento de Calibração
PE	Procedimento de Ensaio
PG	Procedimento de Gestão
PL	Procedimento de Laboratório
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia
PRODIST	Procedimentos de distribuição de energia elétrica
RC	Formulários de registro de calibração
RE	Formulários de registro de ensaio
REN	Resolução Normativa
RG	Formulários de registro de gestão
RL	Formulários de registro de laboratório
RTD	<i>Resistive Temperature Detector</i>
SBAC	Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade

SEAPs	<i>Sustainable Energy Action Plans</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SGE	Sistema de gestão de energia
SGLab CT	Sistemas de Gestão dos Laboratórios do Centro de Tecnologia
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
ST	Sensores de temperatura
TC	Transformador de Corrente
TDMA	Transformadores de Distribuição de Metal Amorfo
TP	Transformador de Potencial
TR001	Transformador de potência elevador trifásico
TR002	Transformador de potencial monofásico
TTR	<i>Transformer Turn Ratio</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	27
1.2	TRANSFORMADORES	29
1.2.1	Generalidades	30
1.2.2	Aplicação	31
1.3	ENSAIOS EM TRANSFORMADORES PARA ETIQUETAGEM	35
1.3.1	Panorama brasileiro atual	35
1.4	AUTOMAÇÃO LABORATORIAL.....	36
1.5	OBJETIVOS DO TRABALHO	37
1.5.1	Objetivo geral	37
1.5.2	Objetivos Específicos:	37
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	37
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1	NORMAS TÉCNICAS	39
2.1.1	ISO 50001 – Energy management systems	39
2.1.2	Normas IEC E ABNT para ensaios em transformadores de potência	43
2.1.2.1	Ensaios de rotina	47
2.1.2.2	Ensaios de tipo	50
2.1.2.3	Ensaios especiais	51
2.1.3	Normas IEEE.....	54
2.1.4	Comparação entre normas	55
2.1.5	ABNT NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição – Requisitos	59
2.1.5.1	Características dos transformadores de distribuição	59
2.1.6	ISO/IEC 17025:2005 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.....	63
2.1.7	NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade	64
2.2	LEIS BRASILEIRAS.....	65

2.2.1	Programa nacional de conservação de energia elétrica: PROCEL	65
2.2.2	Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e do gás natural – CONPET	66
2.2.3	Programa brasileiro de etiquetagem: PBE.....	66
2.2.4	Lei nº 10.295	68
2.2.5	Portaria INMETRO 378-2010	69
2.2.6	Portaria interministerial 104-2013.....	70
2.2.7	Portaria INMETRO N° 510, de 07 de novembro de 2016.....	70
2.2.8	Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: PRODIST	71
2.2.8.1	Módulo 7 – Cálculo de perdas na distribuição	71
2.2.9	Resoluções normativas nº 482 e nº 687 da ANEEL	73
2.3	SUMÁRIO	74
3	ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E ESTRUTURA LABORATORIAL.....	75
3.1	ESPAÇO FÍSICO	75
3.2	ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	78
3.2.1	Quadro de comando	78
3.2.2	Alimentação da área de execução.....	79
3.2.2.1	Fonte emuladora de sistema trifásico em corrente alternada (FG001)	79
3.2.2.2	Transformador de potência elevador trifásico (TR001)	80
3.2.2.3	Transformador de potencial monofásico (TR002)	81
3.2.3	Equipamentos de medição	83
3.2.3.1	Transformadores de potencial e transformadores de corrente	83
3.2.3.2	Multímetro (ML001)	85
3.2.3.3	MONITEK9930 (MT001)	87
3.2.3.4	MONITEK9610 (MT002)	88
3.2.3.5	MONITEK9451 (MT003)	89
3.2.3.6	Sensores de temperatura	89
3.2.3.7	Conjunto de medição de descargas parciais	91
3.2.3.8	Gerador de impulso atmosférico.....	93

3.2.3.9	Megômetro digital (MG001).....	94
3.2.4	Softwares associados.....	95
3.2.4.1	Softwares JMAN	95
3.2.4.2	Software de controle da FG001.....	98
3.3	ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO	98
3.3.1	Medição da resistência de isolamento.....	100
3.3.2	Ensaio de tensão suportável à frequência industrial (ou tensão aplicada) ...	102
3.3.3	Ensaio de tensão induzida	104
3.3.3.1	Ensaio de tensão induzida de curta duração (CACD)	104
3.3.4	Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico	106
3.3.5	Medição da resistência dos enrolamentos	108
3.3.6	Medição da relação de transformação	110
3.3.7	Medição de perdas em vazio e corrente de excitação.....	112
3.3.8	Medição de impedância de curto-circuito e das perdas em carga	113
3.3.9	Ensaio de elevação de temperatura (temperatura no topo do óleo e temperatura média dos enrolamentos)	118
3.4	SUMÁRIO	120
4	PROCEDIMENTOS PADRÃO E PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO.....	122
4.1	PROCEDIMENTOS DA QUALIDADE	122
4.2	EQUIPAMENTOS PROPOSTOS PARA A AUTOMAÇÃO DOS ENSAIOS..	124
4.2.1	Chave seccionadora (CS001).....	124
4.2.1.1	Estabelecimento do curto-circuito.....	124
4.2.1.2	Rotação da chave.....	125
4.2.1.3	Base para a chave	128
4.2.1.4	Custo do sistema de rotação	129
4.2.2	Quadro para comutação de taps	130
4.2.2.1	Projeto	130
4.2.2.2	Custo do sistema de comutação	131
4.3	SISTEMA SUPERVISÓRIO	134
4.3.1	Instrumentação.....	134

4.3.2	Aquisição de dados	138
4.4	Software de supervisão	139
4.4.1	Tela de cadastro: dados do transformador	140
4.4.2	Tela de seleção de ensaio e impressão de relatório	140
4.4.3	Ensaio de medição de resistência de isolamento	141
4.4.4	Ensaio de tensão induzida de curta duração	142
4.4.5	Ensaio de Tensão suportável a frequência industrial.....	143
4.4.6	Ensaio de medição da relação de transformação.....	144
4.4.7	Ensaio de medição de resistência.....	144
4.4.8	Ensaio de aquecimento	145
4.4.9	Ensaio de medição da impedância de curto circuito e perdas em carga	145
4.4.10	Ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação	147
4.4.11	Importar dados de ensaios (MONITEK).....	148
4.4.12	Gerar PDF	148
4.4.13	Custo associado ao <i>software</i>	149
4.5	SUMÁRIO	149
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	150
5.1	Linhas gerais	150
5.2	Dificuldades enfrentadas	151
5.3	Publicações vinculadas	152
5.4	Proposta para trabalhos futuros	153
	REFERÊNCIAS	154
	ANEXO A – Escopo planejado para o INRIMT	159
	ANEXO B – Documentos elaborados.....	160

1 INTRODUÇÃO

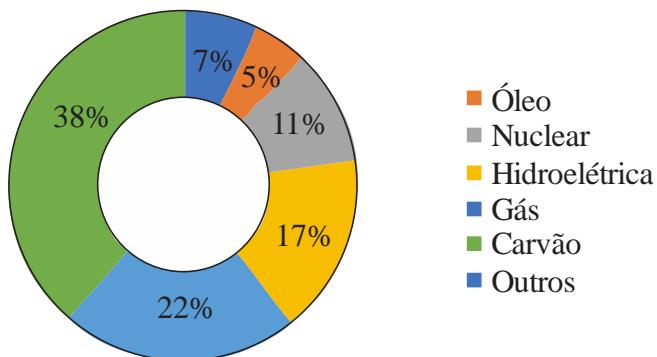
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A melhoria da eficiência energética e o uso racional da energia através cooperação entre agentes econômicos, políticos e da sociedade em geral se torna cada vez mais necessária devido à ainda forte dependência mundial de combustíveis fósseis na geração de energia elétrica (BRANCO, 2011), como mostrado pela Figura 1.1, onde são apresentados dados referentes à produção mundial de energia elétrica no ano de 2016 por tipo de combustível. A Figura 1.2 ilustra o comportamento crescente do consumo de energia elétrica, onde fatores como o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial contribuem para essa realidade. Analisando as informações apresentadas, observa-se o evidente papel da busca pela eficiência energética, onde sistemas eficientes oferecem benefícios que abrangem desde uma maior segurança e menor precariedade do sistema elétrico à melhora da saúde pública através da redução da emissão dos gases do efeito estufa.

Portanto, por uma questão ambiental e econômica, agentes reguladores vêm propondo marcos regulatórios buscando o aumento da eficiência energética dos equipamentos conectados à rede elétrica. Um exemplo de marco regulatório é a norma ISO 50001 de 2011, que estabelece requisitos para um sistema de gestão de energia (SGE) baseada no *plan-do-check-act* que, em linhas gerais, sugere o seguinte fluxo para implementação: (i) planejamento de ações; (ii) implementação do plano; e (iii) verificação da eficácia do método implantado e garantia da melhoria contínua do processo (ABNT, 2011). O debate foi ampliado em 2015, trazendo maiores investimentos e comprometimento a nível global com a gestão de energia, através de planos de metas de eficiência em pelo menos 128 países (REN21, 2016). O resultado deste fenômeno foi evidenciado no fato de que o melhoramento em eficiência energética levou a um decréscimo na demanda nos Estados Unidos, Japão e a uma demanda estável na União Europeia em 2016 (ENERDATA, 2017).

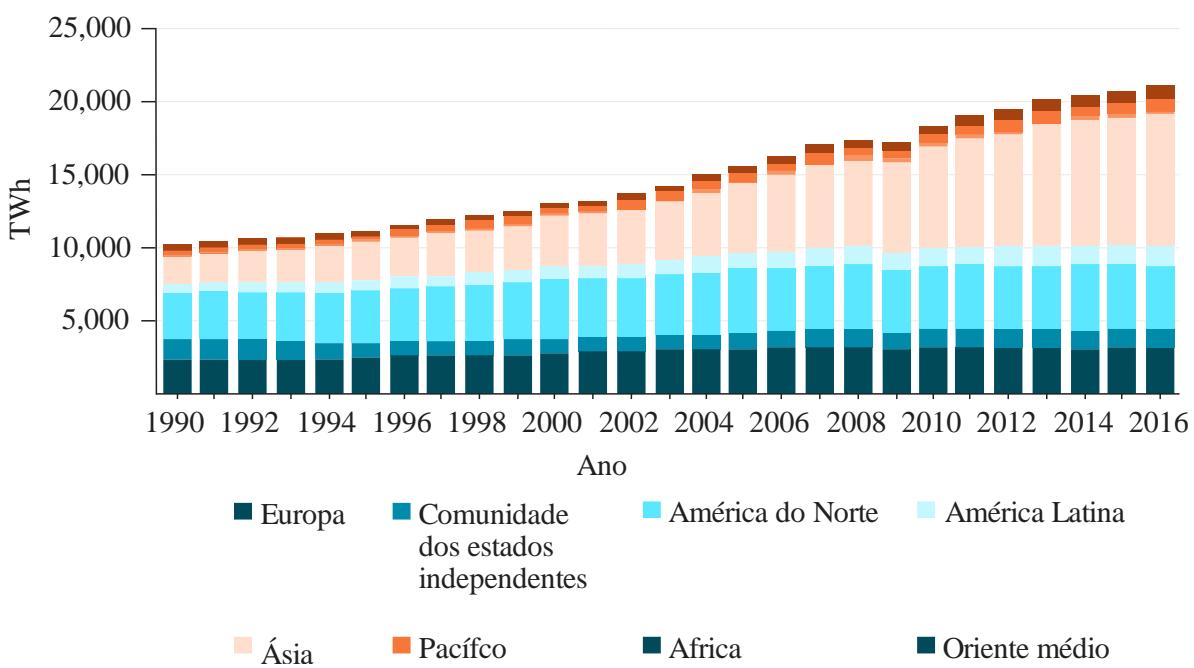
O Brasil não está alheio a esta tendência. Desde o ano de 1984, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) propõe uma discussão com a sociedade com a finalidade de alertar sobre o uso racional da energia.

Figura 1.1 – Geração de energia elétrica mundial por tipo de combustível



Fonte: (TSP, 2016).

Figura 1.2 – Consumo de Energia Mundial



Fonte: (ENERDATA, 2017).

Em 17 de outubro de 2001 foi publicada a Lei nº 10.295, conhecida como a lei de eficiência energética, que passou a estabelecer programas de avaliação da conformidade compulsórios na área de eficiência energética onde antes existiam programas voluntários de etiquetagem. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Contudo, para fazer parte do programa brasileiro de etiquetagem (PBE), o objeto deverá passar por uma série de ensaios em laboratórios acreditados pelo INMETRO (INMETRO, 2017).

A acreditação é o processo que garante que o laboratório de ensaios emprega equipamentos e procedimentos adequados para realizar medições precisas e que sigam padrões de qualidade, assegurando confiança nas medidas realizadas, rastreabilidade, repetitividade, dentre outros requisitos (ABNT, 2005).

Nesse contexto e com o objetivo de atender às metas de eficiência energética no âmbito dos sistemas elétricos, a Portaria Interministerial 104-2013 determinou que a partir de janeiro de 2014 somente poderiam ser comercializados no Brasil transformadores etiquetados com base no PBE, afinal, é de suma importância que os equipamentos utilizados ao longo da estrutura da rede elétrica possuam um alto grau de confiabilidade e eficiência. Os transformadores são os dispositivos em maior número e com um papel fundamental no sistema, uma vez que são utilizados para adequar os níveis de tensão às necessidades de consumo, distribuição, transmissão e geração (MEDEIROS; FEIL; MARCHESAN, 2016).

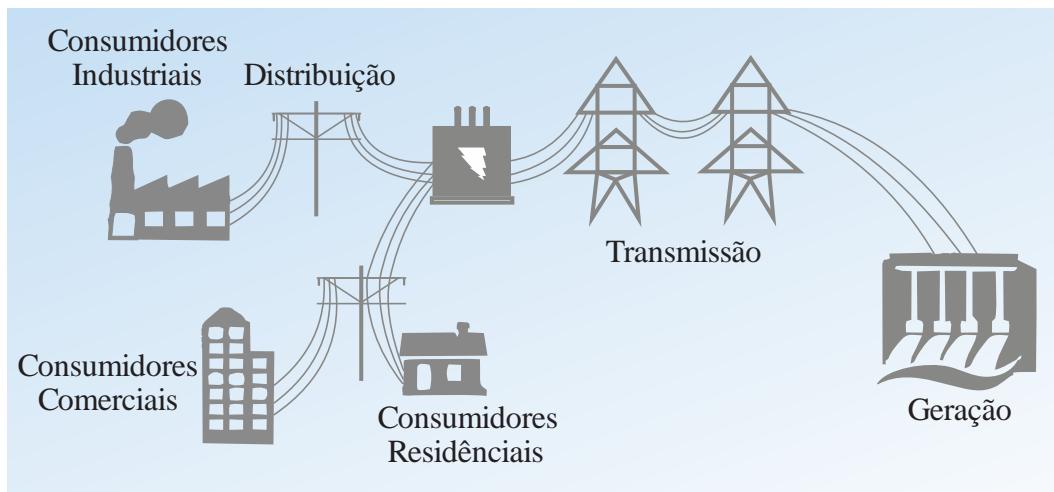
1.2 TRANSFORMADORES

A eletricidade é uma modalidade de energia com grande poder de manipulação e aplicação. Por este motivo, é a forma mais empregada em processos industriais, consumo residencial e comercial (DASGUPTA, 2009). O modelo estrutural do sistema elétrico de potência (SEP) atual é baseado no modelo proposto no final do século XIX. Na geração, as principais fontes de energia não se encontram ou não podem ser alocadas perto dos grandes centros consumidores, o que implica na necessidade de grandes linhas de transmissão para transportar a energia gerada que, por fim, é distribuída aos consumidores finais. É senso comum na engenharia que, quando uma potência é transmitida por uma linha, parte dessa potência é dissipada em forma de calor na razão de I^2R , conhecida como perda Joule, onde I é a corrente eficaz que passa pelo condutor e R é a resistência do condutor. Ainda, não é prático para grandes linhas de transmissão trabalhar somente na redução da resistência dos cabos, pois implicaria em um aumento substancial a área da secção transversal dos condutores, resultando na perda de viabilidade econômica. Portanto, para a redução das perdas por transmissão, se faz necessário o uso de transformadores, que possuem em sua função a opção de mudança nos níveis de tensão de um lado da conexão para o outro conservando da melhor forma a sua potência, logo, pela relação de $P = V \cdot I$, onde P é a potência, I é a corrente e V é a tensão, o aumento no nível de tensão implicará na redução dos níveis de corrente, o que, por consequência, acarretará na redução das perdas Joule na linha (DASGUPTA, 2009; KIRSTEN, 2014).

1.2.1 Generalidades

A Figura 1.3 apresenta resumidamente o sistema elétrico de potência desde a geração até a distribuição e onde podem ser encontrados os transformadores.

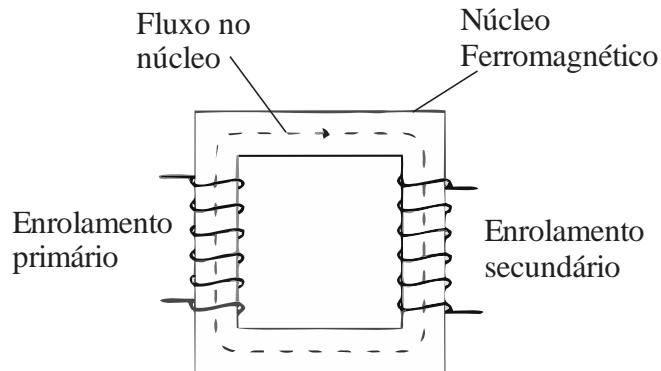
Figura 1.3 – Estrutura simplificada do SEP



Fonte: Adaptado de (KIRSTEN, 2014).

O funcionamento de um transformador baseia-se no princípio da indução eletromagnética, estudados de forma independente por Michael Faraday e Joseph Henry, no ano de 1831. O núcleo do equipamento normalmente é composto de lâminas ferromagnéticas isoladas que portam dois ou mais enrolamentos, geralmente de cobre ou alumínio, que, por sua vez, são isolados entre si. De acordo com a lei de Faraday, se um dos enrolamentos for submetido a uma corrente elétrica variante no tempo, essa corrente irá gerar um campo magnético variante no tempo que será orientado a percorrer o núcleo, pois a reluctância magnética do ar é superior ao do material ferromagnético, passando através do segundo enrolamento, conforme Figura 1.4. O campo magnético variante no tempo irá, então, induzir uma diferença de potencial no segundo enrolamento. A magnitude dos campos gerados irá depender do número de espiras de cada enrolamento e da permeabilidade magnética do núcleo (DASGUPTA, 2009; KIRSTEN, 2014).

Figura 1.4 – Esquemático do princípio de funcionamento de um transformador



Fonte: Adaptado de (DASGUPTA, 2009).

1.2.2 Aplicação

No início da etapa de transmissão se faz necessária a inclusão de um transformador que elevará o nível de tensão e, consequentemente, reduzirá o valor de corrente para o mesmo nível de potência. Essa redução implica em um considerável decréscimo da perda Joule ao longo da linha, observando, como já afirmado, que o fator de perda varia proporcionalmente com o quadrado da corrente. Ao final da transmissão, a tensão é rebaixada em vários níveis até chegar no consumidor. Durante esse percurso, podem ser observados vários tipos de transformadores. Os transformadores de potência são conhecidos pela sua alta capacidade de potência e tensão. Os transformadores de distribuição são rebaixadores de tensão que estão mais próximos aos consumidores (DASGUPTA, 2009) e podem possuir as características apresentadas na Tabela 1.1 em relação ao nível de potência e aos níveis de tensão de transformadores com derivação. Esse modelo de sistema permite certa flexibilidade nas escolhas das tensões de geração, transmissão e distribuição, permitindo que sejam ajustadas para níveis convenientes em cada uma das etapas (MARTIGNONI, 1920). Na Figura 1.5 têm-se exemplos de dois tipos de transformadores aéreos trifásicos de distribuição.

Além disso, existem outros tipos de transformadores. Os retificadores são transformadores que incluem diodos ou tiristores em seu interior, e sua tensão de saída é retificada (corrente contínua), podendo incluir em seu funcionamento um regulador de tensão. São normalmente utilizados em processos industriais que necessitam de uma fonte

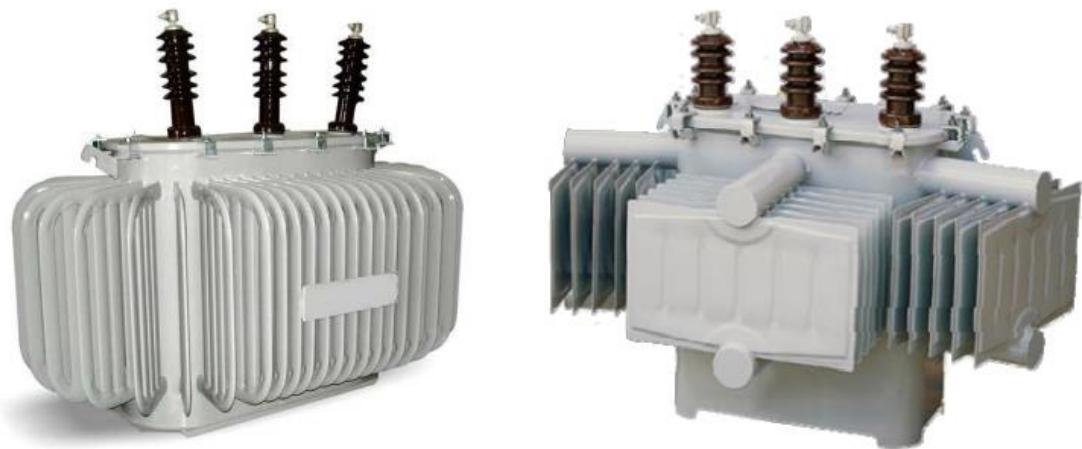
significativa de corrente CC como, por exemplo, equipamentos de tração, eletrólise, fundição, entre outros (MCFADYEN, 2012).

Tabela 1.1 – Características gerais de transformadores de distribuição com derivações

Tensão máxima do equipamento (kV eficaz)	Derivação nº	Tensão (V)			
		Primário		Secundário	
		Trifásico (Linha)	Monofásico	Trifásico	Monofásico
15	1	13800	7967	Dois terminais 220 ou 127	Três terminais 440/220 254/127
	2	13200	7621		
	3	12600	7275		
24,2	1	23100	13337	380/220 ou 220/127	Três terminais 440/220 254/127
	2	22000	12702		
	3	20900	12067		
36,2	1	34500	19919	240/120 ou 230/115	240/120
	2	33000	19053		
	3	31500	18187		

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Figura 1.5 – Modelos de Transformadores aéreos trifásicos



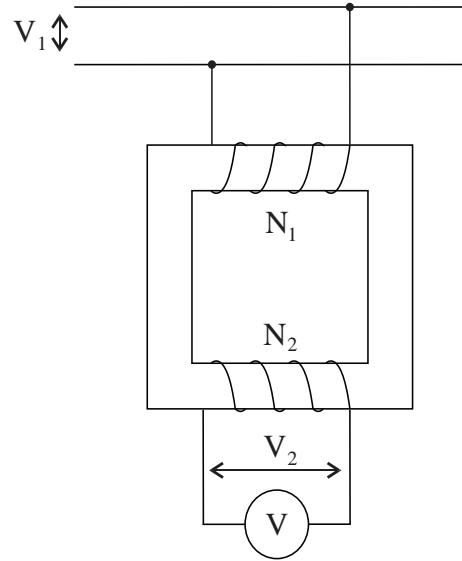
Fonte: (BELTRAME, 2017).

Os reguladores são transformadores utilizados para controlar o fluxo de potência, ativa ou reativa, entre a fonte e a carga. Uma classe desses equipamentos são os “*Phase Angle Regulating*” que se baseiam na defasagem de tensão entre a carga e a fonte para

realizar a regulação com a comutação de taps para diferentes níveis de tensão com a variação da carga (SEVOV; WESTER, 2002).

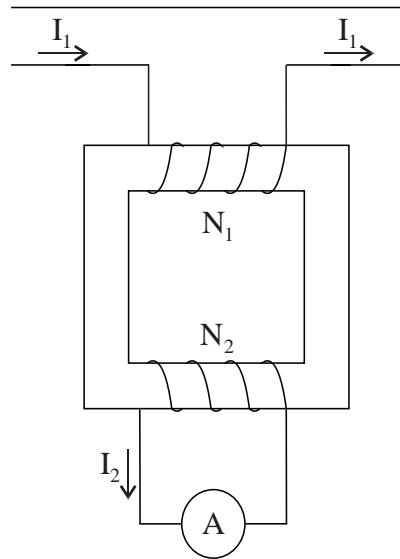
Em redes de média tensão (1 a 50 kV) e alta tensão (acima de 50 kV), onde as grandezas elétricas são elevadas para serem medidas por método direto, são utilizados transformadores de potencial e de corrente para obtenção de medidas de forma indireta. O transformador de potencial (TP) tem como função rebaixar a tensão do circuito para torná-la compatível com os instrumentos de medição e proteção, sendo utilizado para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, para que esses possam funcionar adequadamente (como voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia, etc.). A Figura 1.6 apresenta o esquema de ligação de um TP, onde V_1 é a tensão na rede a qual está ligado o TP, N_1 é o número de espiras do enrolamento primário, N_2 é o número de espiras do enrolamento secundário, V_2 é a tensão obtida para leitura no secundário e V representa o dispositivo leitor de tensão. O enrolamento primário possui um número elevado de espiras adequado à tensão operacional da rede à qual será conectado (média ou alta tensão). Já o enrolamento secundário, possui um número de espiras menor, adaptando-se a tensão do equipamento ou dispositivo que será conectado e consome um nível reduzido de corrente pois possui alta impedância. De forma análoga, um transformador de corrente (TC) tem como função a de reduzir o nível de corrente para níveis compatíveis com a segurança de operadores e instrumentos para medição, controle ou proteção. Mas, neste caso, o enrolamento primário possui poucas espiras e uma bitola apropriada para a corrente do circuito. Já o enrolamento secundário possui várias espiras para reduzir a corrente e se adequar ao equipamento de medição. Devido a sua baixa impedância, o TC interfere minimamente na corrente de saída. A Figura 1.7 ilustra o esquema de ligação de um TC à rede de interesse, onde I_1 é a corrente na rede, N_1 é o número de espiras do enrolamento primário, N_2 é o número de espiras do enrolamento secundário, I_2 é a corrente obtida para medição e A representa o dispositivo leitor de corrente.

Figura 1.6 – Esquema de ligação de um TP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 1.7 – Esquema de ligação de um TC



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.3 ENSAIOS EM TRANSFORMADORES PARA ETIQUETAGEM

1.3.1 Panorama brasileiro atual

No entanto, em quase totalidade, os transformadores utilizados na rede brasileira de energia são do tipo tradicionais. A transição para novas tecnologias no Brasil ainda está sendo estudada em âmbitos acadêmicos. O impacto desses equipamentos no sistema é significativo, já que se estima que das perdas totais da geração de energia 70% estão presentes na distribuição, e dessa porcentagem, um terço é proveniente de transformadores (NUNES, 2011). Enquanto nos Estados Unidos as perdas por transmissão e distribuição giram ao em torno de 5%, no Brasil, as perdas totais chegam a 13% (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2014) e (ANEEL, 2017). O uso de transformadores ineficientes eleva as perdas e o custo da energia elétrica, pois se necessita gerar mais para compensar a energia perdida. No Brasil, existem mais de 62 concessionárias de distribuição, públicas e de capital aberto, nacionais e estrangeiras, cada uma utilizando sua tecnologia para atender a rede de sua responsabilidade. Logo, percebida a heterogeneidade do mercado de distribuição no Brasil, para haver um maior controle dos transformadores que são inseridos na rede, o INMETRO tornou compulsória a inclusão desses equipamentos no Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, demandando que os transformadores passem por ensaios de excelência e etiquetados segundo a norma ABNT NBR 5356-1.

No entanto, vivencia-se o cenário de alta demanda de fabricantes de transformadores *versus* a carência de laboratórios acreditados pelo INMETRO para a realização destes ensaios. Existem no Brasil quatro instalações com este perfil: o Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL) da Eletrobrás, em Nova Iguaçu, RJ, e o Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo, SP, o Laboratório de Alta Tensão dos Institutos LACTEC, em Curitiba, PR e o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI), em Itajubá, MG. Observa-se que nenhum dos laboratórios acima citados se encontram no estado do Rio Grande do Sul, o que torna oneroso para empresas situadas neste estado o processo de envio de modelos de transformadores a serem ensaiados e etiquetados, além de longas filas de espera uma vez que existem poucos laboratórios atendendo o país. Partindo-se deste contexto, o Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da UFSM criou a divisão de média tensão (MT), que tem como

principal objetivo implementar um laboratório habilitado a realizar os ensaios estabelecidos pela Norma ABNT NBR 5356-1, que abrange os transformadores de potência.

Os ensaios são divididos em 3 categorias:

- Rotina: Ensaios mandatórios em todas as unidades de transformadores.
- Tipo: Ensaios realizados em uma amostra de transformador que represente uma série ou modelo de uma linha.
- Especiais: Ensaios que não estão nas categorias acima e podem ser solicitados pelo cliente do laboratório em situações específicas.

Além de atender a norma específica de ensaios de transformadores, o laboratório necessita implementar e seguir o sistema de gestão de qualidade, em conformidade com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, sendo este um item importante da avaliação do INMETRO para acreditação. Como visto, para uma instalação ser autorizada a realizar ensaios para etiquetagem de transformadores, é necessário o alto grau de confiabilidade de seus procedimentos e resultados, refletidos de sua alta precisão e respeito as normas brasileiras vigentes.

1.4 AUTOMAÇÃO LABORATORIAL

A automação é uma técnica amplamente utilizada por proporcionar eficiência operacional, segurança, entrega de resultados consistentes, redução do esforço humano, redução de recursos e energia e precisão (PILLAI; ISHA, 2014). O processo de automação foi inicialmente pensado como uma decomposição de uma tarefa complexa em tarefas menores, sendo tratado com a ausência ou mínima interferência humana em cada tarefa. Isso possibilitaria o desenvolvendo de um sistema autônomo, anulando ou minimizando o erro humano. Contudo, essa opção é inviável em algumas aplicações, pois mesmo em sistemas altamente automatizados, continua sendo necessário o envolvimento de um operador, sua coordenação e comunicação com a máquina para que o sistema continue funcionando corretamente (WOODS; BILLINGS, 1997). Desenvolver um sistema que possua uma interface clara e compreensiva para o operador é um dos maiores desafios da automação moderna. Essa interação, todavia, mesmo que feita de forma simplificada, demanda que o operador possua um nível de instrução suficiente para entender o sistema apresentado, assim como suas possíveis respostas e problemas. Ainda assim, não é possível estimar ou prever todos os cenários da interação entre operador e sistema. Logo, o processo

de aprendizagem se dá com o tempo e a utilização do sistema e da rotina do ambiente de trabalho (WOODS; BILLINGS, 1997).

1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.5.1 Objetivo geral

Fornecer ao laboratório de média tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRIMT) soluções automatizadas para os processos que envolvem os ensaios. Essas soluções visam realizar o balanço de interação entre o ser humano e máquina durante os ensaios para obtenção de maior precisão, qualidade e confiabilidade nos resultados, garantir maior segurança do ambiente de trabalho, por estar se trabalhando em um ambiente de média tensão, e possibilitar a candidatura do laboratório no processo de acreditação do INMETRO junto aos ensaios requeridos pelo PBE, que, caso aprovado, concederá ao INRIMT o status de primeiro laboratório acreditado para ensaios de transformadores de distribuição do estado do Rio Grande do Sul.

1.5.2 Objetivos Específicos:

- a) confecção dos documentos exigidos pela norma de qualidade ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, e pelas portarias interministeriais e do INMETRO as quais têm suas bases nas normas ABNT NBR 5356:2010 e ABNT NBR 5440:2014;
- b) aquisição de material e equipamento para tornar a execução dos ensaios mais rápidos, práticos e com menor interferência humana *in loco*, ou seja, dentro da área de realização dos ensaios;
- c) propor um sistema de supervisão para monitoramento dos ensaios de perdas, além da possibilidade de aquisição de dados de outros ensaios para geração de relatório de acordo com as normas de qualidade do laboratório.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica das normas e leis nacionais e internacionais relativas a transformadores, ensaios de transformadores e qualidade laboratorial, realizando comparações entre o utilizado no Brasil

e outros países. No Capítulo 3 é tratada da estrutura do laboratório de média tensão do instituto de redes inteligentes da UFSM (INRIMT), onde são elencados os equipamentos presentes no laboratório, a infraestrutura e como são realizados os ensaios de transformadores. Também é feita uma análise de oportunidade de melhoria, onde são sugeridas as alterações necessárias para a automação dos ensaios. No Capítulo 4 é apresentada a estrutura dos documentos criados para o laboratório e a proposta montada para o sistema automatizado, com os projetos e os *softwares* desenvolvidos, ambos trabalhados com base na descrição feita no Capítulo 3. No Capítulo 5 é encerrado o trabalho com as considerações finais, onde é mostrado em linhas gerais tudo que foi pensado para o INRIMT como solução de automação, os problemas enfrentados para a implantação da proposta, os documentos criados para o processo de acreditação, os artigos publicados com base na dissertação e, por fim, as possibilidades para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será abordado neste capítulo uma revisão bibliográfica acerca dos marcos legais e normativos que envolvem transformadores e seus ensaios, para servir como base de discussão do trabalho. Dar-se-á uma visão mundial e nacional do contexto o qual essa dissertação está inserida.

2.1 NORMAS TÉCNICAS

2.1.1 ISO 50001 – Energy management systems

A discussão sobre eficiência energética no mundo provocou a formulação de uma norma internacional para gestão de energia, a ISO 50001 – *Energy management systems – Requirements with guidance for use*. Lançada em julho de 2011, a norma é inserida com a proposta de sistemas e procedimentos para a melhoria contínua do desempenho energético. A ideia vem da aplicação bem sucedida de um conjunto de normas anteriores que lidam com a questão ambiental, da série ISO 14001, lançadas na década de 1990 (MARIMON; LLACH; BERNARDO, 2011). A difusão norma ISO 14001 se dá de forma muito similar em diferentes setores da economia, mesmo cada setor tendo suas necessidades específicas (MARIMON; LLACH; BERNARDO, 2011).

Assim, inspirada pela sua predecessora, a ISO 50001 foi desenvolvida para ser aplicável a todos os tipos de organizações e integrável a outros sistemas de gestão, com o objetivo de possibilitar um maior suprimento de energia elétrica e reduzir o impacto nas mudanças climáticas pelo menor consumo e consequente redução da emissão de CO₂ na atmosfera, influenciando em até 60% o consumo de energia a nível mundial. Essa potencialidade de impacto se dá pela abrangência de vários níveis dos setores econômicos, assim como na ISO 14001, promovendo benefícios para organizações de pequeno e grande porte, tanto na esfera pública quanto na privada, em todas as regiões do mundo (BRANCO, 2011). A Figura 2.1 apresenta a estrutura geral e o fluxo de trabalho da norma.

Para concretizar suas metas, a norma estabelece os seguintes objetivos:

- a) auxiliar as organizações a fazerem um melhor uso das unidades consumidoras de energia;

Figura 2.1 – Estrutura geral da ISO 50001



Fonte: Adaptado de (MARIMON; LLACH; BERNARDO, 2011).

- b) criar transparência e facilitar a comunicação no gerenciamento dos recursos energéticos;
- c) promover a melhor prática do gerenciamento de energia e reforçar bons comportamentos no que tange esse gerenciamento;
- d) auxiliar as instalações a avaliar e priorizar a implementação de novas tecnologias eficientes energeticamente;
- e) promover a eficiência energética ao longo de toda a cadeia de abastecimento;
- f) facilitar o melhoramento na gestão de energia para possibilitar projetos de casas verdes de redução de emissão de gases;
- g) viabilizar integração com outros sistemas de gestão organizacional tais como, ambiental, saúde e segurança.

A ISO 50001 se tornou uma norma internacionalmente reconhecida para implementação de estratégias sistemáticas de gerenciamento de energia, trazendo consigo

outros benefícios além do impacto positivo em relação ao consumo de energia, como, por exemplo, a redução de custos, maior produtividade, redução de manutenções, etc (LEONARDO ENERGY, 2015). O estudo ainda mostra que esses resultados podem ser obtidos com investimento mínimo de capital, demonstrando que a ISO 50001 trabalha, entre outros fatores, a cultura do local e o comportamento das pessoas que estão presentes no meio, além de avaliar questões físicas de equipamentos e instalações.

Dados como esse levaram a realização de pesquisas locais para verificar a eficácia da norma em atender seus objetivos dentro de diversas realidades empresariais e industriais. Marimon e Casadesús (2017) avaliam as motivações que levam as organizações a estabelecer a norma em suas instalações, onde conclui-se que os principais benefícios trazidos com a implementação da ISO 50001 se dividem em dois segmentos: ecológicos e operacionais. As dificuldades podem ser vistas como operacionais ou organizacionais e em relação à motivação foram identificadas três fontes: requisitos sociais, fatores ecológicos e vantagem competitiva de mercado.

Outros estudos revelam uma forma de aplicação da norma em conjunto com os planos de ação de energia sustentável, os SEAPs (do inglês *Sustainable Energy Action Plans*), programa difundido em cidades da Europa para o consumo de energia de forma mais eficiente e sustentável, almejando assim a redução de emissão de CO₂. O estudo de caso realizado em Saldus, uma cidade da Letônia, conclui que a comunicação entre os planos e a norma funciona de forma sinérgica e que a utilização da ISO 50001 facilita a implementação dos SEAPs, pois fornece indicadores mensuráveis de gerenciamento de energia, se provando ainda mais efetiva quando os SEAPs são focados na implantação ou melhoramento de um plano de gerenciamento de energia elétrica (DZENE et al., 2015).

Além destas, pesquisas também discutem como as organizações gastam muitos recursos financeiros com o consumo de energia, o que torna a volatilidade do preço da energia um assunto prioritário. O artigo cita o modelo *Lean six Sigma*, que define medições, análises, aprimoramento e controle da gestão de energia. Proposta essa que viria ao encontro da ISO 50001, explicitando o viés econômico, além do ambiental, que a implementação da norma pode impactar (MKHAIMER; ARAFEH; SAKHRIEH, 2017).

Pesquisas em diferentes tipos de tecnologias são resultantes da tendência mundial direcionada a formas mais sustentáveis de consumo de energia elétrica e eficiência energética, tendo como um de seus motivadores a crise do petróleo em 1973. Em

(LUCIANO; CASTRO, 2011), é mostrada a linha do tempo da tecnologia do metal amorfó para transformadores de distribuição, apresentando uma revisão de seu desenvolvimento e aplicações, indicando que a tecnologia de forma aplicável data de 1975, porém, seu emprego em redes de distribuição só se deu um ano depois. O trabalho também apresenta um dos principais fatores da intensificação dos estudos em tecnologia de metal amorfó (TDMA), o aumento do preço da energia vinda de fontes não renováveis. Como citado, a primeira crise do petróleo em 1973 motivou pesquisas em formas alternativas de geração de energia, assim como o consumo mais eficiente da produção já existente, baseada na queima de combustíveis fósseis.

A linha histórica indica que o contexto ambiental pode ter sido um outro fator para a criação de normas como a ISO 50001. Entretanto, pode-se observar que a discussão sobre desenvolvimento sustentável de forma mais internacional tem seus marcos iniciais em vários anos antes, em 1949, com a conferência científica da ONU sobre Conservação e Utilização de Recursos realizada nos EUA (BORGES; TACHIBANA, 2005), e em 1968 com a conferência sobre Biosfera, realizada em Paris, ambas anteriores à crise de 1973.

Um detalhe interessante quando se olha diretamente para esfera nacional é que o Brasil, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi um dos líderes da comissão ISO/PC 242 que desenvolveu a norma ISO 50001, juntamente com a organização estadunidense *American National Standards Institute* (ANSI), em 2008. O comitê ainda contou com a participação de especialistas de 44 países membros da ISO (BORGES; TACHIBANA, 2005). Em território brasileiro, a norma internacional foi adotada como ABNT NBR ISO 50001 – Sistemas de gestão de energia – Requisitos com orientações de uso, tendo essa uma revisão no ano de 2018. O transformador TDMA é sugerido como uma solução para a maximização da eficiência energética dos sistemas de distribuição, pela justificativa já citada no Capítulo 1, que aponta o transformador como a principal fonte de perdas no sistema de distribuição brasileiro. Salienta-se que o TDMA é um possível substituto do transformador tradicional de núcleo composto de aço silício (FINOCCHIO et al., 2015). No entanto, o próprio estudo apresenta a falta de rentabilidade na fabricação de metais amorfos, o que torna sua aplicação no cenário nacional complexa. Ainda assim, outras ações devem ser tomadas para mitigar o efeito negativo dos transformadores na rede, através de projetos que visem um melhor desempenho energético, relacionando o conceito de eficiência à redução de perdas e eliminação de desperdícios, onde a conservação de energia está diretamente ligada à conservação do meio ambiente e, como visto, a questões econômicas.

2.1.2 Normas IEC E ABNT para ensaios em transformadores de potência

As normas europeias são reguladas pelo *European Committee for Standardization* (CEN) (CEN, 2008), entretanto, elas são baseadas nas normas criadas pela *International Electrotechnical Comission* (IEC).

Fundada em 1906, a IEC é uma organização à nível mundial e tem o objetivo de promover cooperação internacional em questões que envolvam a normatização nas áreas elétrica, eletrônica e tecnologias afins. É a referência internacional e principal entidade para a elaboração de normas quando se trata de “eletrotécnologia” (IEC, 2018). Mais especificamente para os transformadores de potência, a comissão elaborou a norma IEC 60076 – 1, no ano de 2000, anteriormente à norma ISO 50001. Este documento é uma consolidação de outros elaborados pelas reuniões do comitê técnico de Transformadores de Potência da IEC, realizadas nos anos de 1993, 1997 e 1999 e das características específicas descritas nos documentos de 1976 e 1980 (IEC, 2000). Cabe ressaltar que a data dos lançamentos vai ao encontro da época onde se iniciaram os debates sobre eficiência energética de forma mais evidente em decorrência da crise do petróleo e outros combustíveis fósseis. Nota-se que o viés econômico exerceu forte influência não somente no foco das pesquisas em engenharia elétrica, mas também em marcos regulatórios. Por fim, a influência do debate da preservação ambiental ganha força em um contexto mais recente, no final do século XX, com a constante e crescente preocupação com o impacto das atividades humanas sobre o meio em que vivemos.

A norma IEC 60076 se aplica a transformadores monofásicos e trifásicos, incluindo autotransformadores, tem o título *Power Transformers* e está dividida em 21 documentos, como mostra a Tabela 2.1.

No Brasil, as normas técnicas envolvendo a área elétrica são desenvolvidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela ABNT. A ANEEL é uma autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia e iniciou suas atividades em dezembro de 1997 tendo como principais atribuições: regular, fiscalizar, estabelecer tarifas, dirimir divergências e promover outorgas de concessão no setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2017).

Já a ABNT é o foro nacional de normatização desde a sua fundação, em 28 de setembro de 1940, por reconhecimento da sociedade brasileira e confirmação pelo governo federal através de diversos instrumentos legais.

Tabela 2.1 – Normas IEC para transformadores de potência

Norma IEC para Transformadores de Potência	Título
IEC 60076 – 1 (2011)	Part 1: General
IEC 60076 – 2 (2011)	Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers
IEC 60076 – 3 (2013)	Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
IEC 60076 – 4 (2002)	Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing - Power transformers and reactors
IEC 60076 – 5 (2006)	Part 5: Ability to withstand short circuit
IEC 60076 – 6 (2007)	Part 6: Reactors
IEC 60076 – 7 (2018)	Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers
IEC 60076 – 8 (1997)	Part 8: Application guide
IEC 60076 – 10 (2016)	Part 10: Determination of sound levels
IEC 60076 – 10-1 (2016)	Part 10: Determination of sound levels - Application guide
IEC 60076 – 11 (2004)	Part 11: Dry-type transformers
IEC 60076 – 12 (2008)	Part 12: Loading guide for dry-type power transformers
IEC 60076 – 13 (2006)	Part 13: Self-protected liquid-filled transformers
IEC 60076 – 14 (2013)	Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials
IEC 60076 – 15 (2015)	Part 15: Gas-filled power transformers
IEC 60076 – 16 (2011)	Part 16: Transformers for wind turbine applications
IEC 60076 – 18 (2012)	Part 18: Measurement of frequency response
IEC 60076 – 19 (2013)	Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors
IEC 60076 – 20 (2017)	Part 20: Energy efficiency
IEC 60076 – 21 (2011)	Part 21: Standard requirements, terminology, and test code for step-voltage regulators
IEC 60076 – 23 (2018)	DC magnetic bias suppression devices

Fonte: Adaptado de (SEAD, 2013).

A associação é responsável pela elaboração das normas brasileiras (ABNT NBR) conduzidas pelos seus comitês brasileiros (ABNT/CB), organismos de normatização setorial (ABNT/ONS) e comissões de estudo especiais (ABNT/CEE). Desde 1950, a ABNT atua na avaliação de conformidade e dispõe de programas para certificação de produtos (ABNT, 2018a). A ANEEL normatiza os sistemas que envolvem a geração, transmissão e distribuição de energia, enquanto a ABNT normatiza a operação dos equipamentos empregados nestes sistemas.

A ABNT NBR 5356 – Transformadores de Potência foi lançada em 2007, possuindo a sua versão corrigida em 2010, e é baseada na IEC 60076. Seu lançamento cancela a norma anterior a ABNT NBR 5380:1993. O catálogo da ABNT relaciona os documentos da Tabela 2.2 como parte da norma, sendo entre parênteses a data da última revisão.

Tabela 2.2 – Normas ABNT NBR para transformadores de potência

Norma ABNT NBR para Transformadores de Potência	Titulo
ABNT NBR 5356 – 1 (2010)	Parte 1: Generalidades
ABNT NBR 5356 – 2 (2007)	Parte 2: Aquecimento
ABNT NBR 5356 – 3 (2014)	Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar
ABNT NBR 5356 – 4 (2007)	Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores
ABNT NBR 5356 – 5 (2015)	Parte 5: Capacidade de resistir a curtos-circuitos
ABNT NBR 5356 – 6 (2014)	Parte 6: Reatores
ABNT NBR 5356 – 7 (2017)	Parte 7: Guia de carregamento para transformadores imersos em líquido isolante
ABNT NBR 5356 – 8 (2017)	Parte 8: Guia de Aplicação
ABNT NBR 5356 – 9 (2016)	Parte 9: Recebimento, armazenagem, instalação e manutenção de transformadores e reatores de potência imersos em líquido isolante
ABNT NBR 5356 – 11 (2016)	Parte 11: Transformadores do tipo seco - Especificação
ABNT NBR 5356 – 16 (2018)	Parte 16: Transformadores para aplicação em geradores eólicos

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2018b).

Tanto a norma europeia quanto a brasileira dividem os ensaios em 3 categorias:

- ensaios de rotina;
- ensaios de tipo;
- ensaios especiais.

As ambas se aplicam a transformadores trifásicos e monofásicos (incluindo autotransformadores), com exceção de certas categorias de transformadores de pequeno porte, como as mencionadas abaixo (ABNT, 2010).

- transformadores monofásicos de potência nominal inferior a 1 kVA e transformadores trifásicos de potência nominal inferior a 5 kVA;
- transformadores para instrumentos;

- c) transformadores para conversores estáticos;
- d) transformadores de tração montados sobre componente rolante;
- e) transformadores de partida;
- f) transformadores de ensaios;
- g) transformadores de solda.

Caso um transformador esteja enquadrado em uma das categorias acima e não possua uma norma específica, ainda assim as IEC ou ABNT NBR para transformadores de potência poderão ser utilizadas, em parte ou na totalidade.

Para a execução de ensaios, são definidas as seguintes condições:

- a) temperatura ambiente entre 10 °C e 40 °C e água de resfriamento com temperatura que não exceda 40 °C, se previsto;
- b) Os ensaios devem ser realizados na fábrica do transformador, a não ser que seja acordado com o comprador algo diferente;
- c) todos os acessórios e equipamentos externos que puderem afetar o desempenho do transformador durante os ensaios devem ser instalados;
- d) os enrolamentos com derivação devem estar conectados à sua derivação principal, salvo casos especificados de outra forma na descrição relativa ao ensaio nesta norma ou em acordo com o comprador;
- e) os ensaios são baseados em condições nominais, excetuando-se as de isolamento, para todas as características. Sendo que esta condição pode mudar caso esteja especificado de outra forma no capítulo relativo ao ensaio citado;
- f) quando solicitado, os resultados devem ser corrigidos a uma temperatura de referência. Para transformadores imersos em óleo, emprega-se a Tabela 2.3 mostrada a seguir e para transformadores à seco, a tabela está presente nos procedimentos gerais da norma ABNT NBR 10295.

Os ensaios definidos na norma brasileira são análogos aos apresentados pela norma europeia. Abaixo ir-se-á elenca-los e referencia-los, constando o respectivo número do item da norma ABNT NBR 5356:2010.

Tabela 2.3 – Temperatura de referência para transformadores imersos em óleo

Limites de elevação de temperatura dos enrolamentos método da variação da resistência (°C)	Temperatura de referência (°C)
55	75
65	85
95	115

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2010).

2.1.2.1 *Ensaios de rotina*

2.1.2.1.1 Medição da resistência dos enrolamentos: item 11.2

O ensaio mede as resistências dos enrolamentos de alta e baixa tensão, quando o transformador estiver desenergizado por, pelo menos, 3 horas. Tem a finalidade de assegurar que os valores medidos são compatíveis com os valores fornecidos, atestando que a estrutura não foi comprometida durante o processo de montagem.

2.1.2.1.2 Medição da relação de transformação e polaridade e verificação do deslocamento angular e sequência de fases: item 11.3

Mede-se a relação de transformação em cada derivação. Deve-se verificar a polaridade de transformadores monofásicos e o esquema de ligação para transformadores trifásicos. O propósito da medição é verificar que os valores medidos estejam compatíveis com os fornecidos, assegurando que não há espiras curto-circuitadas no transformador.

2.1.2.1.3 Medição da impedância de curto-círcuito e das perdas em carga: item 11.4

Este ensaio tem como objetivo realizar a medição das perdas no condutor (em geral, cobre ou alumínio). As perdas em carga são uma componente das perdas totais, que, por sua vez, devem estar dentro das tolerâncias apresentadas na Tabela 13 da norma. Além das perdas, o ensaio permite medir a queda de tensão interna, impedância, resistência e reatância percentuais do transformador.

2.1.2.1.4 Medição das perdas em vazio e corrente de excitação: item 11.5

Este ensaio tem como objetivos realizar a medição das perdas no núcleo e das perdas suplementares (ambas perdas no ramo de magnetização do transformador).

2.1.2.1.5 Ensaios dielétricos de rotina: ABNT NBR 5356-3

Esses ensaios, por sua vez, determinam os níveis de isolamento do transformador. São divididos em:

- a) impulso de manobra: verifica a suportabilidade a impulso de manobra dos terminais de linha e dos enrolamentos a eles conectados para a terra e para outros enrolamentos, bem como a suportabilidade entre fases e ao longo do enrolamento sob ensaio;
- b) impulso atmosférico: verifica a suportabilidade a impulso atmosférico aplicado aos terminais de linha do transformador sob ensaio;
- c) impulso atmosférico no terminal de neutro: análoga ao anterior, mas com o impulso sendo aplicado ao terminal de neutro;
- d) ensaio de tensão suportável à frequência industrial ou tensão aplicada: verifica a suportabilidade dos terminais a tensões alternadas superiores à nominal do transformador;
- e) tensão induzida de curta duração (CACD): Esse ensaio pretende verificar a suportabilidade a tensões alternadas para a terra e para os outros enrolamentos de cada terminal de linha e de neutro respectivos, e a suportabilidade entre fases ao longo do enrolamento;
- f) tensão induzida de longa duração (CALD): este ensaio não consiste em uma verificação de projeto e sim em um ensaio de controle de qualidade e pretende cobrir sobretensões temporárias e solicitações contínuas durante o serviço.

Na Tabela 2.4 são apresentados os requisitos para definir se o ensaio será classificado como rotina, tipo ou especial.

Tabela 2.4 – Requisitos para ensaios dielétricos

Tensão máxima do equipamento U_m (kV)	Ensaios					
	Impulso atmosférico	Impulso de Manobra	Tensão induzida de longa duração (CALD)	Tensão induzida de curta duração (CACD)	Tensão suportável à frequência industrial	
Onda plena (IA)	Onda cortada (IAC)	(IM)				
$U_m \leq 72,5$	Tipo	Tipo	Não aplicável	Não aplicável	Rotina	Rotina
$72,5 < U_m \leq 170$	Tipo	Tipo	Não aplicável	Especial	Rotina	Rotina
$170 < U_m < 300$	Tipo	Tipo	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina
$U_m \geq 300$	Rotina	Rotina	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina

Nota: Se o ensaio de tensão induzida de curta duração for especificado, o ensaio de impulso de manobra não é necessário, isto deve estar claramente definido nas especificações.

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2010).

2.1.2.1.6 Ensaios de comutador de derivações em carga: item 11.8

Testa as condições de funcionamento do comutador de derivações em carga em 4 situações diferentes, definidos pela norma, realizando o ensaio de tensão aplicada em seus circuitos auxiliares.

2.1.2.1.7 Medição da resistência de isolamento: item 11.9

Este ensaio tem o objetivo de assegurar que o processo de secagem da parte ativa e enchimento de óleo a vácuo são satisfatórios. A resistência de isolamento deve ser medida antes dos ensaios dielétricos. Este ensaio não constitui critério para aprovação ou rejeição.

2.1.2.1.8 Estanqueidade e resistência à pressão: item 11.10

Os transformadores devem suportar as pressões manométricas de ensaio especificadas na Tabela 4 da norma ABNT NBR 5356-1 durante o tempo especificado.

2.1.2.1.9 Verificação do funcionamento dos acessórios: item 11.10.2

Os critérios de aceitação dos acessórios são os constantes nas normas específicas. Os ensaios funcionais devem ser realizados de acordo com o Anexo E da ABNT NBR 5356-1.

2.1.2.1.10 Ensaios de óleo isolante: item 11.11

Este ensaio apresenta na Tabela 5 da norma ABNT NBR 5356-1 os valores limites das seguintes características para o óleo mineral isolante: rigidez dielétrica; teor da água; fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação; e tensão interfacial.

2.1.2.1.11 Verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa e interna: item 11.12

Os métodos e critérios de aceitação desses ensaios estão definidos na norma ABNT NBR 11388.

2.1.2.2 *Ensaios de tipo*

2.1.2.2.1 Ensaio de elevação de temperatura: ABNT NBR 5356-2

O ensaio, realizado em duas etapas, possui os seguintes objetivos: na primeira etapa, se estabelece a elevação de temperatura do topo do óleo em regime permanente com dissipação de perdas totais máximas, ou seja, as perdas a vazio somadas às perdas em carga; no segundo momento, o objetivo é estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos à corrente nominal com a elevação de temperatura do topo do óleo determinada previamente.

2.1.2.2.2 Ensaios dielétricos de tipo: ABNT NBR 5356-3

São os mesmos ensaios listados na Seção 2.1.2.1.5, mas dependendo do nível da tensão o ensaio pode ser classificado como ensaio de rotina, de tipo ou especial. A Tabela 2.4 contém a categorização através da tensão máxima do equipamento (U_m).

2.1.2.2.3 Ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal menor que 72,5 kV

Este ensaio é o mesmo apresentado na Seção 2.1.2.1.10 mas é classificado como ensaio de tipo para transformadores com tensão inferior a 72,5 kV.

2.1.2.3 *Ensaios especiais*

Todos os ensaios a seguir são considerados especiais e devem ser realizados em comum acordo entre comprador e fabricante.

2.1.2.3.1 Ensaios dielétricos especiais: ABNT NBR 5356-3

Ver Tabela 2.4.

2.1.2.3.2 Medição das capacitâncias entre o enrolamento e a terra, e entre os enrolamentos: item 11.16

O método de realização deste ensaio deve ser acordado entre o comprador e o fabricante do transformador.

2.1.2.3.3 Medição das características da tensão transitória transferida: item 11.17

Este ensaio é realizado com base na norma ABNT NBR 5356-3 Anexo B, onde se dividem em dois grupos distintos de transferência de surto: as transferências capacitivas, onde um carregamento dos terminais secundários com equipamentos de manobra, cabos curtos ou capacitores de poucos nanofarads agem como uma capacitância de amortecimento e reduzem o pico da sobretensão; e as transferências indutivas, onde, se nenhuma carga externa for aplicada ao enrolamento secundário, a tensão transitória usualmente tem uma oscilação amortecida e sobreposta com uma frequência determinada pela indutância de dispersão e capacitâncias do enrolamento.

2.1.2.3.4 Medição da (s) impedância (s) de sequência zero em transformadores trifásicos:
item 11.7

A impedância de sequência zero é medida à frequência nominal entre os terminais de linha reunidos conjuntamente e o neutro de um enrolamento estrela ou ziguezague. É expressa em ohms por fase e é dada por $3 \cdot U/I$, onde U é a tensão de ensaio e I a corrente de ensaio.

2.1.2.3.5 Ensaio de suportabilidade a curto-circuito: ABNT NBR 5356-5

Nesta parte da norma ABNT NBR 5356 é especificada a capacidade de transformadores monofásicos e trifásicos, incluindo-se os autotransformadores, a resistir a curtos-circuitos. Além dos transformadores, todos os equipamentos e acessórios devem ser projetados e construídos para resistir, sem danos, aos efeitos térmicos e dinâmicos das correntes de curto-circuito externos.

2.1.2.3.6 Determinação do nível de ruído audível: item 11.18

Os níveis de ruído não devem exceder os especificados nas Tabelas 7, 8 e 9 da norma ABNT NBR 7277 – Transformadores e Reatores – Determinação do nível de ruído. Esta norma descreve os métodos de determinação dos níveis de ruído audível de transformadores, reatores e sistemas de resfriamento associados, de modo a confirmar o atendimento dos requisitos das especificações e determinar as características de ruído emitido em funcionamento.

2.1.2.3.7 Medição de harmônicas da corrente de excitação: item 11.6

As componentes harmônicas da corrente de excitação nas três fases são medidas e as amplitudes das harmônicas são expressas em percentagem da componente fundamental.

2.1.2.3.8 Medição da potência absorvida pelos motores das bombas de óleo e dos ventiladores: item 11.19

As condições para a realização deste ensaio devem ser objeto de acordo entre o cliente e o fabricante do transformador.

2.1.2.3.9 Medição do fator de dissipação da isolação (medição do fator de potência do isolamento): item 11.20

Este ensaio deve preceder os ensaios dielétricos e pode ser repetido após estes, desde que solicitado pelo comprador, para efeito de comparação com os valores obtidos inicialmente.

2.1.2.3.10 Análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante: item 11.13

O ensaio de análise cromatográfica dos gases deve ser realizado em três momentos: antes do início dos ensaios, após os ensaios dielétricos e após o ensaio de elevação de temperatura, caso este último também seja realizado. O critério de aceitação dos valores deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

2.1.2.3.11 Vácuo interno: item 11.14

Somente aplicável em transformadores imersos em líquido isolante, com potência igual ou superior a 750 kVA. O tanque, os radiadores e os demais acessórios, exceto o comutador, devem suportar pleno vácuo. Para transformadores sem líquido isolante, o vácuo interior deve ser colocado de modo que a pressão siga a Tabela 2.5, por um período de 4 horas.

Tabela 2.5 – Valores de pressão absoluta de ensaio à vácuo

Potência Nominal do Transformador (P)	Pressão
$750 \text{ kVA} < P < 10\,000 \text{ kVA}$	268 Pa (2 mmHg)
$P \geq 10\,000 \text{ kVA}$	134 Pa (1 mmHg)

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2010).

2.1.2.3.12 Ensaio para verificação do esquema de pintura das partes interna e externa do transformador: ABNT NBR 11388 e ABNT NBR 5440:2014

Este ensaio é dividido em oito categorias: névoa salina; umidade; impermeabilidade; aderência; brilho; resistência ao óleo isolante; resistência atmosférica úmida saturada na presença de SO_2 ; e resistência marítima. Todas com o objetivo de testar a resistência da pintura nas condições apresentadas.

2.1.2.3.13 Nível de tensão de rádio interferência: item 11.15

Os níveis de tensão de rádio interferência produzidos por transformadores não devem ultrapassar os limites estabelecidos mediante acordo entre fabricante e comprador, quando medidos de acordo com a norma ABNT NBR 7876.

2.1.2.3.14 Medição da resposta em frequência e impedância terminal: item 11.21

Esta medição deve ser realizada no transformador para se obter uma “radiografia” do mesmo ao sair da fábrica. A comparação com medições feitas em campo pode indicar possíveis danos internos ocorridos durante o transporte ou operação. Recomenda-se que este ensaio seja realizado em todas as unidades.

2.1.2.3.15 Ensaio do grau de polimerização do papel: item 11.22

Para este ensaio, o número de amostras e o valor-limite devem ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

2.1.2.3.16 Medição do ponto de orvalho: item 11.23

Os parâmetros de realização deste ensaio devem ser objeto de acordo entre o fabricante do transformador e o comprador.

2.1.2.3.17 Levantamento da curva de saturação e medição da reatância em núcleo em ar do enrolamento: item 11.24

Os parâmetros de realização deste ensaio devem ser objeto de acordo entre o fabricante do transformador e o comprador.

2.1.3 Normas IEEE

Além do órgão IEC, responsável pela norma que serve de base à norma brasileira, nos Estados Unidos e no Canadá são utilizadas normas com base nas desenvolvidas pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – IEEE. A IEEE é a maior sociedade profissional do mundo, tendo mais de 423.000 membros divididos em 160 países. Suas

raízes datam da década de 80, quando as questões envolvendo energia elétrica começaram a gerar maior influência na sociedade (IEEE, 2017).

Para transformadores de distribuição, têm-se um conjunto de mais de oitenta normas da família C57.12.00. Para este trabalho são tomadas as seguintes como referência: *IEEE C57.12.00–2010 – IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers* e *IEEE C57.12.90–2015 – IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers* para transformadores imersos em líquido isolante; e as normas *IEEE C57.12.01–2015 – IEEE Standard for General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers* e *IEEE C57.12.91–2011 – IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers* para transformadores a seco. As normas especificadas acima se dividem em requisitos construtivos para os transformadores e os métodos de ensaio para cada caso. Apesar de utilizar a IEEE como base, os órgãos reguladores de normas são a *American National Standards Institute* (ANSI) nos Estados Unidos (ANSI, 2014) e o *Standards Council of Canada* (SCC) no Canadá (SCC, 2018).

2.1.4 Comparação entre normas

Cada país estabelece seus critérios para a realização dos ensaios em transformadores, contudo, muitos ainda se baseiam nas normas europeias, portanto é natural realizar-se comparações entre os testes referenciando tanto a IEC quanto a IEEE por serem as maiores organizações normatizadoras para transformadores de distribuição.

A definição normativa é decisiva para criar a base dos programas de rotulagem e construção de padrões para os produtos. Portanto, a harmonização nos métodos e a realização de ensaios, assim como o consenso de tolerâncias em diferentes localidades, contribui para o processo de troca de tecnologia, estabelecimento de métodos mais eficientes, intercâmbio de conhecimento e possibilita a comparação da eficiência entre os produtos em uma esfera global, permitindo que o fabricante, o cliente e o órgão regulador de energia recebam os mesmos resultados quando realizados os testes em transformadores de potência, excetuando-se considerações locais que não possam ser generalizadas.

A Tabela 2.6 mostra um comparativo entre as normas IEC, IEEE e ABNT NBR para as condições gerais de ensaio. A Tabela 2.7 mostra diferenças em relação as perdas a vazio, a Tabela 2.8 para as perdas em carga e a Tabela 2.9 para medição da resistência a frio. Ao se realizar a análise

das informações apresentadas, pode-se verificar alguns detalhes que diferenciam a NBR e a norma IEC, a qual a brasileira é inspirada. Um exemplo são as tolerâncias para perdas a vazio, 10%, e totais, 6%, sendo estes valores compatíveis com os apresentados pela norma da IEEE. De todo modo, as condições estabelecidas tanto pela IEC quanto pela IEEE são feitas através de estudos consolidados, levando ao fabricante atentar para qual localização o mesmo estará comercializando o seu produto para poder avaliar quais normas utilizar.

As comparações apresentadas abaixo foram feitas com base na leitura das respectivas normas e em SEAD (2013).

Tabela 2.6 – Comparação entre normas: condições gerais de ensaio

Fonte de alimentação	IEC 60076-1 (2011)	IEEE C57.12.00-2010	ABNT NBR 5356-1 (2010)
Forma de onda da tensão	O total de conteúdo harmônico não pode exceder 5%	Não especificado	Não especificado
Frequência	Deverá ter variação máxima de 1% da frequência nominal do transformador	Deverá estar dentro de 0,5% de tolerância da frequência nominal do transformador	Não especificado
Simetria Trifásica	A tensão máxima em cada enrolamento não poderá diferir da mínima com uma tolerância de 3%.	Não especificado	Não especificado

Fonte: Adaptado de (SEAD, 2013).

Tabela 2.7 – Comparação entre normas: perdas a vazio

(continua)

Aspecto	IEC 60076-1 (2011)	IEEE C57.12.00-2010	ABNT NBR 5356-1 (2010)
Temperatura de Referência	75°C A IEC não possui equação para corrigir as perdas medidas para esta temperatura de referência para o ensaio de perdas a vazio.	A temperatura de referência para as perdas no núcleo é 20°C. A norma oferece uma equação para corrigir as perdas medidas para esta temperatura de referência. A temperatura média do óleo deve estar em $\pm 10\%$ da temperatura de referência. A diferença entre o topo e o fundo do óleo não deverá ser maior que 5°C	75°C A NBR não possui equação para corrigir as perdas a vazio medidas para esta temperatura de referência.

Tabela 2.7 – Comparação entre normas: perdas a vazio

(conclusão)

Aspecto	IEC 60076-1 (2011)	IEEE C57.12.00-2010	ABNT NBR 5356-1 (2010)
Correção da forma de onda	$P_0 = P_m (1+d)$, onde P_m é a perda a vazio medida e $d = (U' - U)/U'$, onde U é o valor médio da tensão e U' é o valor eficaz	$P_c(T_m) = P_m / (P_1 + kP_2)$ $k = (\text{tensão eficaz/tensão média})^2$ T_m é a temperatura média do óleo. P_m é a perda a vazio medida. P_1 é perda por histerese e P_2 é a perda por correntes parasitas. P_c é a perda da forma de onda corrigida a T_m	$P_0 = P_m (1+d)$, onde P_m é a perda a vazio medida e $d = (U' - U)/U'$, onde U é o valor médio da tensão e U' é o valor eficaz
Máxima correção da forma de onda	A maior diferença entre U e U' deve ser de 3%	A equação acima só deverá ser utilizada se a correção da forma de onda for de 5% ou menos. Se a diferença for maior, então a forma de onda deverá ser melhorada	A maior diferença entre U e U' deve ser de 3%
Tolerância de perdas	15% para perdas a vazio, considerando que as perdas totais não excedam 10%	Perdas a vazio não deverão ultrapassar 10% e as perdas totais não poderão ultrapassar mais que 6%	10% para perdas a vazio
Corrente de excitação	30% do valor especificado do transformador.	Não especificado.	+20% do valor especificado

Fonte: Adaptado de (SEAD, 2013).

Tabela 2.8 – Comparação entre normas: perdas em carga

(continua)

Aspecto	IEC 60076-1 (2011)	IEEE C57.12.00-2010	ABNT NBR 5356-1 (2010)
Temperatura de referência	75°C A IEC possui equação para corrigir as perdas medidas para esta temperatura de referência	85°C. A IEEE possui equação para correção das perdas medidas para a temperatura de referência	75°C A NBR possui equação para corrigir as perdas medidas para esta temperatura de referência
Equações da correção de temperatura	$P_r = \sum I^2 R + P_{ar}$ Onde P_r é a perda de carga corrigida para a temperatura de referência. I é a corrente de carga especificada. R é a resistência do enrolamento na temperatura de referência. E P_{ar} é a perda adicional corrigida	$P(T_m) = P_r(T_m) + P_s(T_m)$ Onde $P(T_m)$ é a perda em carga na temperatura de referência, $P_r(T_m)$ é a perda PR calculada à temperatura de referência e $P_s(T_m)$ é a perda por dispersão calculada à temperatura de referência	$P_r = \sum I^2 R_r + P_{ar}$ Onde P_r é a perda de carga corrigida para a temperatura de referência. I é a corrente de carga especificada. R_r é a resistência do enrolamento na temperatura de referência e P_{ar} é a perda adicional corrigida

Tabela 2.8 – Comparaçao entre normas: perdas em carga

(conclusão)

Aspecto	IEC 60076-1 (2011)	IEEE C57.12.00-2010	ABNT NBR 5356-1 (2010)
Tolerâncias	15% para perdas em carga, considerando que as perdas totais não excedam 10%	Não há limite estabelecido para perdas em carga, mas as perdas totais não poderão ultrapassar mais que 6%	Não há limite estabelecido para perdas em carga, mas as perdas totais não poderão ultrapassar 6%
Corrente de ensaio	Permite que o ensaio seja realizado com uma corrente menor que a nominal, até 50%. A corrente deve ser medida de forma direta.	Não informa se uma corrente menor que a nominal pode ser utilizada para a medição das perdas em carga. Vários métodos são oferecidos para medição	Permite que o ensaio seja realizado com uma corrente menor que a nominal, até 50%

Fonte: Adaptado de (SEAD, 2013).

Tabela 2.9 – Comparaçao entre normas: medição da resistência a frio

Aspecto	IEC 60076-1 (2011)	IEEE C57.12.00-2010	ABNT NBR 5356-1 (2010)
Método de medição da resistência	Nenhuma metodologia é especificada.	Método da ponte ou método do voltímetro-amperímetro	Método da ponte ou método da queda de tensão. Quando a corrente for inferior a 1 A deve ser utilizado o método da ponte
Diretrizes para a temperatura dos enrolamentos	A medição da resistência a frio deve acontecer com o transformador desenergizado há, no mínimo, 3 horas. Quando estiver sendo determinada a elevação de temperatura, a diferença entre o topo e o fundo do líquido isolante não deve ultrapassar 5°C. Para facilitar a uniformização da temperatura uma bomba pode ser utilizada	Transformador desenergizado de 3 a 8 horas, dependendo do tamanho. A diferença entre o topo e o fundo do líquido isolante não deve ultrapassar 5°C	A medição da resistência a frio deve acontecer com o transformador desenergizado há, no mínimo, 3 horas. A diferença entre o topo e o fundo do líquido isolante deve ser pequena. Para facilitar a uniformização da temperatura uma bomba pode ser utilizada

Fonte: Adaptado de (SEAD, 2013).

2.1.5 ABNT NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição – Requisitos

Assim como as normas IEEE dividem seus documentos em requisitos e ensaios, além de outras componentes do transformador, a norma brasileira possui a norma de requisitos em transformadores de distribuição separada da ABNT NBR 5356. Em 1979, houve o surgimento da norma PB-99 – Transformadores de Distribuição para Postes e Plataformas, sendo a primeira forma de padronização de valores máximos de perdas em transformadores. Essa norma passou por quatro revisões, a primeira em 1984 quando se tornou NBR 5440, a segunda em 1987, a terceira em 1998 e a última sendo em 2014 (ARAÚJO et al., 2005). A ABNT NBR 5440, de título Transformadores para redes aéreas de distribuição – Requisitos, estabelece os requisitos das características elétricas e mecânicas dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição, nas tensões primárias de até 36,2 kV e nas tensões secundárias usuais dos transformadores monofásicos e trifásicos com enrolamento de cobre ou alumínio, imersos em óleos isolantes com resfriamento natural (ABNT, 2014). A revisão de 2014 desta norma faz referências à ABNT NBR 5356. Abaixo são apresentadas algumas informações.

2.1.5.1 *Características dos transformadores de distribuição*

2.1.5.1.1 Frequência nominal

A frequência nominal dos transformadores é definida em 60 Hz.

2.1.5.1.2 Limites de elevação de temperatura

Para os valores limite de elevação de temperatura, tem-se a Tabela 2.10. As alternativas são baseadas na temperatura de referência adotada.

Tabela 2.10 – Limites de elevação de temperatura

Temperatura	Limites de elevação de temperatura		
	°C		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Média dos enrolamentos	55	65	75
Ponto mais quente dos enrolamentos	65	80	90
Óleo isolante	50	60	70
Temperatura de referência	75	85	95

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

2.1.5.1.3 Perdas a vazio e perdas totais

Os valores médios de perdas devem ser no máximo os apresentados na Tabela 2.11 e Tabela 2.12, onde encontram-se também os níveis de eficiência energética, em relação às perdas do transformador, variando de A até E, sendo A o mais eficiente. Essa divisão será melhor explicada na Seção 2.2.3. Os valores individuais de perdas não poderão ultrapassar os fornecidos pela Tabela 2.13.

Tabela 2.11 – Valores de eficiência para transformadores de distribuição monofásicos

(continua)

Potência do Transformador (kVA)	Eficiência Nível	15 kV		24,2 kV		36,2 kV	
		Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)
5	A	15	85	25	100	30	110
	B	20	100	30	115	35	125
	C	25	110	30	125	35	130
	D	30	125	35	140	40	145
	E	35	140	40	155	45	160
10	A	30	160	35	175	40	185
	B	35	180	40	195	45	205
	C	40	200	45	220	50	225
	D	45	225	50	240	55	250
	E	50	245	55	265	60	270

Tabela 2.11 – Valores de eficiência para transformadores de distribuição monofásicos

(conclusão)

Potência do Transformador (kVA)		Eficiência		15 kV		24,2 kV		36,2 kV	
	Nível	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)
15	A	40	215	45	235	50	255		
	B	45	240	55	270	60	290		
	C	50	270	60	300	65	320		
	D	60	300	70	335	75	350		
	E	65	330	75	365	80	380		
25	A	55	310	60	335	65	370		
	B	65	355	70	385	75	415		
	C	70	395	80	430	85	455		
	D	80	435	90	475	95	500		
	E	90	480	100	520	105	545		
37,5	A	80	425	85	470	95	500		
	B	95	490	100	530	110	565		
	C	110	550	115	595	120	620		
	D	120	605	130	660	135	680		
	E	135	665	145	740	150	740		
50	A	100	505	115	600	125	630		
	B	115	570	135	685	145	710		
	C	130	640	150	760	165	785		
	D	150	710	170	845	180	860		
	E	165	780	190	925	200	935		
75	A	125	720	135	785	150	830		
	B	145	815	160	895	175	930		
	C	165	915	180	1000	195	1025		
	D	185	1010	205	1105	220	1130		
	E	205	1110	225	1210	240	1225		
100	A	155	935	165	960	175	1015		
	B	180	1060	195	1095	230	1255		
	C	205	1190	220	1220	255	1375		
	D	230	1315	250	1355	280	1480		
	E	255	1445	275	1495	280	1480		

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Tabela 2.12 – Valores de eficiência para transformadores de distribuição trifásicos

Potência do Transformador (KVA)	Eficiência Nível	15 kV		24,2 kV		36,2 kV	
		Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)	Perda em Vazio (W)	Perda Total (W)
15	A	45	265	50	280	55	300
	B	50	290	55	305	65	330
	C	60	330	70	350	75	375
	D	75	370	80	390	90	420
	E	85	410	95	470	100	460
30	A	75	445	85	475	90	500
	B	90	495	95	520	105	555
	C	110	560	115	590	125	630
	D	130	630	140	665	145	700
	E	150	695	160	790	165	775
45	A	100	610	110	645	125	695
	B	115	670	130	720	145	770
	C	140	760	155	815	175	875
	D	170	855	185	910	200	970
	E	195	945	215	1055	230	1075
75	A	150	895	160	955	175	1025
	B	175	990	185	1055	200	1135
	C	215	1125	230	1200	240	1285
	D	255	1260	270	1345	280	1430
	E	295	1395	315	1550	320	1580
112,5	A	195	1210	220	1270	240	1335
	B	230	1340	255	1405	275	1470
	C	285	1525	310	1595	330	1665
	D	335	1705	370	1785	385	1860
	E	390	1890	425	2085	440	2055
150	A	245	1500	270	1605	295	1720
	B	285	1655	310	1770	340	1895
	C	350	1880	380	2010	405	2145
	D	420	2110	450	2250	475	2395
	E	485	2335	520	2610	540	2640
225	A	330	2100	370	2200	410	2340
	B	380	2315	430	2435	470	2585
	C	470	2630	530	2770	565	2925
	D	560	2945	625	3095	655	3260
	E	650	3260	725	3605	750	3600
300	A	410	2610	435	2740	495	2900
	B	475	2885	505	3030	565	3195
	C	585	3275	620	3440	675	3615
	D	700	3670	735	3845	790	4035
	E	810	4060	850	4400	900	4450

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

Tabela 2.13 – Tolerâncias

Características especificadas	Tolerância
Impedância de curto-circuito	$\pm 7,5\%$
Perdas em vazio	+10%
Perdas Totais	+6%
Relação de tensão em qualquer derivação	$\pm 0,5\%$
Corrente de excitação	+20%

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

2.1.6 ISO/IEC 17025:2005 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

Para avaliar se os procedimentos de ensaios estão de acordo com condições mínimas de credibilidade e confiabilidade, a ISO criou um comitê para avaliação das condições de ensaio e calibração de laboratórios que prestam esses serviços. O comitê contou com a presença de especialistas laboratoriais de todo o mundo, juntamente com 18 associações como a *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC). A norma especifica os requisitos gerais para a competência de realização de testes e/ou calibrações, incluindo processos de amostragem. É aplicável a todo e qualquer laboratório, independentemente do tamanho do escopo, do pessoal ou número de atividades, incluindo qualquer laboratório que realize testes ou calibrações para inspeção ou certificação de produtos. A norma é utilizada para elaboração do sistema de gerenciamento de qualidade, gestão administrativa e técnica, assim como para avaliação, confirmação ou reconhecimento da competência de laboratórios (ABNT, 2005).

Ao atender a norma, a instalação demonstra que produz resultados válidos, possibilitando a confiança no seu trabalho tanto nacionalmente quanto internacionalmente, de forma a contribuir com a cooperação entre laboratórios, já que os processos são normalizados, gerando uma maior aceitação dos resultados de forma interlaboratorial, em diferentes países e sem testes adicionais, promovendo a troca de informações de forma mais abrangente.

A ISO/IEC 17025 tem a sua versão brasileira na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, que segue as mesmas premissas da versão europeia. Seguir a norma brasileira garante também que o laboratório atende aos princípios da ABNT NBR ISO 9001 – Gestão de qualidade. A norma passou por revisão em 2017, tendo suas mudanças mais significativas nos seguintes itens:

- a) escopo: para abranger todas as atividades do laboratório.
- b) estrutura: para alinhar com outras normas ISO/IEC já existentes, como a série ISO/IEC 1700 – *Conformity Assessment*
- c) abordagem de processo: para combinar com normas ISO mais recentes.
- d) foco em tecnologias da informação: reconhecendo que arquivos manuscritos estão entrando em desuso em detrimento de arquivos digitais.
- e) pensamento baseado em riscos: uma nova sessão foi criada para introduzir esse novo conceito, fazendo referência direta a ISO 9001:2015 – *Quality Management Systems – Requirements*
- f) terminologia: o vocabulário foi atualizado.

Como explicado no Capítulo 1, para um laboratório ser acreditado pelo INMETRO, além de seguir norma específica dos ensaios definidos no escopo do laboratório em questão o mesmo deverá atender aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR ISO/IEC 17025. A acreditação autoriza a instalação a certificar o equipamento e etiquetar pelo PBE.

2.1.7 NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade

Além dos cuidados para garantir que os ensaios sejam realizados de forma confiável, por se tratar de um meio que envolve tensões e correntes que geram risco à vida, deve se atentar para a segurança elétrica dos laboratórios de ensaios. Partindo-se dos perigos que existem ao se trabalhar com energia elétrica, foi publicada em 08 de junho de 1978 a Norma Regulamentadora 10 – NR-10, que estabelece os requisitos e condições mínimas de trabalho objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos de modo a garantir a segurança e saúde de trabalhadores que lidam com instalações elétricas e serviços em eletricidade, de forma direta ou indireta (BRASIL, 2016a).

A NR 10 sofreu uma atualização em 2004, sendo esse o texto utilizado para os cursos de segurança em eletricidade até a presente data. A norma abrange desde a geração, passando pela transmissão, distribuição e finalizando no consumo, englobando as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados em suas imediações (BRASIL, 2016a).

Utilizando essa norma como base, o laboratório de média tensão da UFSM busca minimizar ou eliminar, quando possível, o risco envolvido com o trabalho em ensaios de transformadores de potência, o que faz da automatização dos processos nos testes um fator chave para garantir a segurança do operador e dos demais membros presentes na instalação, minimizando também danos

materiais e ao meio ambiente. Ou seja, adotar procedimentos de segurança eficientes além de ser uma exigência legal garante a integridade física no local de trabalho.

2.2 *LEIS BRASILEIRAS*

Além das resoluções normativas que embasam a necessidade de laboratórios de ensaios em transformadores de potência, o Brasil lançou marcos legais que visam incentivar o país a seguir em um caminho de equipamentos com maior eficiência na rede elétrica. As medidas adotadas ao longo dos anos objetivam melhorar a qualidade desses equipamentos e gerar menos desperdícios, reduzindo assim os gastos com o sistema elétrico de potência. Algumas das leis mais impactantes são apresentadas nessa sessão.

2.2.1 **Programa nacional de conservação de energia elétrica: PROCEL**

INMETRO iniciou no Brasil em 1984 a discussão sobre o uso racional de energia, estimulando os consumidores a fazer compras mais conscientes do ponto de vista do consumo energético, alertando sobre os produtos que estavam à venda no país (INMETRO, 2018). Dessa discussão surge o Programa Nacional de Conservação de Energia – PROCEL. Criado em 1985, inicialmente pelos ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, o programa foi transformado em governamental em 1991 (PROCEL, 2006). Foi conhecido como a primeira tentativa sistematizada de promoção do uso racional de energia elétrica, sendo esse seu principal objetivo, que é combater o desperdício na geração e no consumo, reduzindo os custos e investimentos setoriais.

O selo PROCEL, mostrado na Figura 2.2, foi instaurado pelo decreto presidencial 08/12/1993. O selo, de adesão voluntária, indica ao consumidor que aquele produto possui melhor eficiência energética e é uma forma de estímulo da fabricação e comercialização de produtos mais eficientes do ponto de vista energético. Segundo (ELETROBRAS, 2017), as ações do programa proporcionaram em 2016 uma economia de 15,15 bilhões de kWh, evitando assim que 1,238 milhão de toneladas de CO₂ fossem emitidos na atmosfera, quantidade que equivale à emissão de 425 mil veículos em um ano.

Figura 2.2 – Selo PROCEL



Fonte: (PROCEL, 2006).

2.2.2 Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e do gás natural – CONPET

Predecessor ao PROCEL, mas com as mesmas diretrizes, pelo decreto presidencial em 18/07/1991 foi criado o programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e do gás natural – CONPET. O programa também visava o uso eficiente da energia elétrica, com foco em transportes, residências, comércio, indústria e na agropecuária. O selo mostrado na Figura 2.3, em vigor desde agosto de 2005, é concedido também de forma voluntária e orienta o consumidor que aquele equipamento consome menos combustíveis fósseis em comparação a produtos sem o selo, reduzindo a emissão de gases estufa (CONPET, 2011).

2.2.3 Programa brasileiro de etiquetagem: PBE

Para realizar a avaliação de produtos e equipamentos e verificar se os mesmos seguem os requisitos necessários para atender às especificações de eficiência energética exigidos tanto pelo PROCEL quanto pelo CONPET, foi criado em 1984 o Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE. O programa é coordenado pelo INMETRO e concede a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que contém informações sobre o desempenho do produto em relação à eficiência energética (INMETRO, 2018). Com foco inicial no setor automotivo, o

projeto foi ampliado, sendo incorporado os programas de avaliação de conformidade. A partir da Lei de Eficiência Energética, que será discutida a seguir, o programa se tornou compulsório, baseando-se no estabelecimento de níveis mínimos de eficiência energética pelo Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE), fórum interministerial criado por esta lei (INMETRO, 2018).

Figura 2.3 – Selo CONPET



Fonte: (CONPET, 2011).

O PBE é composto por 38 programas de Avaliação de Conformidade, abrangendo desde produtos da chamada “linha branca” (como fogões, refrigeradores e condicionadores de ar) até demandas na área de recursos renováveis (aquecimento solar e geração de energia fotovoltaica) e de grande potencial de economia de energia para o país (como edificações e veículos).

No caso de transformadores de distribuição imersos em líquido isolante, o PBE, através da portaria INMETRO 378-2010, a qual será explicada na Seção 2.2.5 requere que os seguintes ensaios (os quais estão presentes na norma ABNT NBR 5356, ABNT NBR 5440:2014 e foram relacionados na Seção 2.1.2) sejam executados em sequência:

- Suportabilidade a impulso atmosférico

- b) Resistência dos enrolamentos
- c) Perdas a vazio, corrente de excitação e distorções harmônicas
- d) Perdas em carga e impedância de curto-circuito
- e) Relação de transformação
- f) Elevação de temperatura
- g) Deslocamento angular
- h) Resistência de isolamento
- i) Polaridade
- j) Sequência de fases

Entretanto, em 2016 a portaria INMETRO 510 atualizou a portaria 378 e retirou o ensaio de resistência de isolamento da lista. Os ensaios listados são o foco do laboratório de média tensão a ser estabelecido no Instituto de Redes Inteligentes.

Na Figura 2.4 é mostrada a ENCE concedida aos transformadores que passam pela avaliação de um laboratório acreditado pelo INMETRO e apto a realizar os ensaios necessários (INMETRO, 2018).

2.2.4 Lei nº 10.295

Anos mais tarde, para acompanhar as discussões referentes à eficiência energética observadas em outros países, o governo brasileiro, no dia 17 de outubro de 2001, sancionou a Lei nº 10.295, conhecida como “lei da eficiência energética”, na qual se destacam os seguintes artigos (BRASIL, 2001):

Art. 1º. A Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia visa a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente.

Art. 2º. O Poder Executivo estabelecerá níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, com base em indicadores técnicos pertinentes.

Art. 3º. Os fabricantes e os importadores de máquinas e aparelhos consumidores de energia são obrigados a adotar as medidas necessárias para que sejam obedecidos os níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética, constantes da regulamentação específica estabelecida para cada tipo de máquina e aparelho.

Figura 2.4 – Etiqueta ENCE para transformadores de potência

Energia (Elétrica)	TRANSFORMADOR EM LÍQUIDO ISOLANTE PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
Fabricante Modelo	ABCDEF XYZ(Logo)
Tipo Potência (kVA) Classe de Tensão (kV)	ABC 1 2 3 ABC 1 2 3 ABC 1 2 3
Perdas máximas (tap nominal) - Vazio (W) - Totais (W) Relação de Transformação	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
Perdas máximas (tap crítico) - Vazio (W) - Totais (W) Relação de Transformação	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
NBI (kV)	<input type="text"/>
 Requisitos para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE Transformadores de Distribuição - Relatório ____ / ____ - XXX	 INMETRO
IMPORTANTE: NÃO SERÁ PERMITIDA A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA EM DESACORDO COM PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM	

Fonte: (BRASIL, 2016b).

O Decreto 4059 de 19 de dezembro de 2001 regulamenta a lei. Segundo o artigo 9º, o INMETRO será responsável pela fiscalização e pelo acompanhamento dos programas de avaliação da conformidade das máquinas e aparelhos consumidores de energia a serem regulamentados.

2.2.5 Portaria INMETRO Nº 378-2010

Por necessidade de atender as exigências dispostas na Lei nº 10.295, no dia 28 de setembro de 2010, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, juntamente com o INMETRO, lançou a Portaria 378-2010, a qual aprovou os requisitos de avaliação de conformidade para transformadores de distribuição imersos em líquido isolante (BRASIL, 2010). A portaria estabelece como *voluntária* a adesão desses equipamentos ao PBE, no âmbito do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade (SBAC), o qual é um subsistema do INMETRO (INMETRO, 2018). A portaria faz referências as normas ABNT

NBR 5356 e ABNT NBR 5440 e fornece todo o procedimento necessário para todas as etapas do processo de etiquetagem, referenciando também a utilização da etiqueta ENCE apresentada na Figura 2.4. A portaria de 2010 foi um novo passo em direção a legislação que foi lançada em 2013, com vigência a partir de 2014.

2.2.6 Portaria interministerial 104-2013

A Portaria Interministerial 104-2013 foi o marco legal que regulamentou os transformadores de distribuição no que tange a sua qualidade e eficiência energética. A portaria, lançada pelos Ministérios de Minas e Energia, da Ciência, Tecnologia e Inovação, e do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, no dia 22 de março de 2013, estabeleceu as diretrizes para a avaliação da conformidade de transformadores de distribuição imersos em óleo isolante. Nela são definidas a caracterização do produto, indicadores de eficiência energética e procedimentos de ensaio, identificação de valores de perdas no transformador de distribuição, avaliação da conformidade e laboratórios, transformadores importados, fiscalização e penalidades, vigência e programa de metas. Transformadores de distribuição imersos em líquido isolante que não atendam aos requisitos apresentados não podem ser fabricados ou comercializados após 2014 (BRASIL, 2013), ou seja, o caráter voluntário que havia sido tomado em 2010 foi substituído por uma ação compulsória, alinhada às demandas da Lei nº 10.295 de 2010, o que criou uma demanda para a realização de ensaios e certificação de transformadores de distribuição em centros acreditados pelo INMETRO. Afinal, o fabricante não poderia utilizar os próprios ensaios para realizar tal certificação e, desse modo, um agente externo deveria atestar a qualidade de seus produtos. Assim como a portaria lançada em 2010, a de 2014 faz referência às normas ABNT NBR 5356 e ABNT NBR 5440.

2.2.7 Portaria INMETRO N° 510, de 07 de novembro de 2016

Essa portaria foi criada devido à alta demanda de análises laboratoriais, já que a partir de 2014 a etiquetagem se tornou compulsória. Essa portaria fez alterações no mecanismo de conformidade, implementando a “Declaração do Fornecedor com foco em desempenho evidenciado pela etiqueta ENCE”. Após a finalização da etapa de Avaliação Interlaboratorial é enviada 1 amostra de cada potência por classe de tensão e tipo de transformadores para o laboratório de terceira parte. Cada item amostrado deve ser

selecionado pelo laboratório de ensaio, em um lote mínimo de 5 unidades idênticas (identificando prova, contraprova e testemunha).

De forma a verificar a manutenção das características dos modelos produzidos, transcorridos 4 anos, todos os modelos registrados no programa, independente da potência, devem ser avaliados. Essa mudança na portaria assegurou uma melhor flexibilidade no processo de análise no nível de perdas dos transformadores.

2.2.8 Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: PRODIST

Criado pela ANEEL e lançado em 2008, o PRODIST é um conjunto de documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012a). O PRODIST está dividido em oito módulos:

- a) módulo 1 – Introdução;
- b) módulo 2 – Planejamento da expansão do sistema de distribuição;
- c) módulo 3 – Acesso ao sistema de distribuição;
- d) módulo 4 – Procedimentos operativos dos sistemas de distribuição;
- e) módulo 5 – Sistemas de medição;
- f) módulo 6 – Informações requeridas e obrigações;
- g) módulo 7 – Cálculo de perdas na distribuição;
- h) módulo 8 – Qualidade da energia elétrica.

Dentre esses módulos, a seção sobre cálculo de perdas na distribuição (Módulo 7) é a mais relevante no que tange os transformadores de potência.

2.2.8.1 Módulo 7 – Cálculo de perdas na distribuição

A ótica brasileira referente à eficiência energética está diretamente ligada às perdas no equipamento. Deste modo, este módulo do PRODIST traz os cálculos necessários para obtenção dos valores de perdas em transformadores de potência, assim como as tabelas contendo os valores-limite. O papel do transformador fica evidente neste processo quando se observa a estratificação do cálculo de perdas do sistema de distribuição:

- a) redes de distribuição de alta tensão (SDAT);
- b) **transformadores de potência;**
- c) reguladores, redes do sistema de distribuição de média tensão (SDMT);
- d) sistema de distribuição de baixa tensão (SDBT);
- e) ramais de ligação;
- f) medidores de energia das unidades consumidoras do SDBT.

Para calcular as perdas técnicas em transformadores, o PRODIST define a Equação (2.1).

$$P_{TR} = (P_{fe} + P_{cu}) \quad (2.1)$$

onde:

P_{TR} é a perda de potência para a demanda média do transformador (MW);

P_{fe} é a perda no ferro ou em vazio do transformador (MW);

P_{cu} é a perda para a demanda média no cobre do transformador (MW).

O cálculo das perdas para a demanda média no cobre segue a Equação (2.2).

$$P_{cu} = \left(\frac{P_{med}}{P_{nom} \cdot \cos \varphi} \right) \cdot P_{Ncu} \quad (2.2)$$

onde:

P_{Ncu} é a perda no cobre do transformador na condição nominal de carga (MW);

P_{med} é a potência média no transformador (MW);

P_{nom} é a Potência nominal do transformador (MVA);

$\cos \varphi$ fator de potência, estabelecido em 0,92.

Para calcular a perda de energia no transformador, soma-se a perda de energia em vazio pelo período analisado com a perda de energia ocorrida no cobre, calculada pela multiplicação da perda de potência para a demanda média no cobre pelo coeficiente de perdas – CP_T e pelo período de tempo analisado, conforme a Equação (2.3).

$$E_{TR} = \Delta T \cdot (P_{fe} + P_{cu} \cdot CP_T) \quad (2.3)$$

onde:

E_{TR} é a perda de energia no transformador (MWh);

ΔT é o período de tempo analisado (h).

No PRODIST também se encontram tabelas com valores limite de perdas a vazio e totais para transformadores de distribuição. Os valores são os mesmos adotados pela NBR 5440 para a definição do nível de eficiência energética, sendo o nível E o mínimo aceitável. Na revisão de

2014, que entrou em vigor dia 15/04/2015, o PRODIST declarou que, após 4 anos da publicação do módulo, os valores das perdas totais e a vazia dos transformadores de distribuição iriam diminuir, passando dos níveis de eficiência E para D (ANEEL, 2018). Os valores são apresentados na Tabela 2.11, Tabela 2.12 e Tabela 2.13 dessa dissertação.

2.2.9 Resoluções normativas nº 482 e nº 687 da ANEEL

Além das resoluções referentes à eficiência energética, a evolução da tecnologia demandou que o governo estabelecesse normas para a geração distribuída, tendo como destaque a energia solar fotovoltaica e a energia eólica. A REN nº 482 de 2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012b). A resolução é dividida em três capítulos: 1. Das disposições preliminares; 2. Do acesso ao sistema de distribuição; 3. Do sistema de compensação de energia elétrica; 4. Da medição de energia elétrica; 5. Das disposições gerais. A resolução ainda define:

Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Já a REN nº 687 de 2015 altera a REN nº 482 e os módulos 1 e 3 do PRODIST. São feitas as seguintes alterações: Alteração do artigo 2º, 4º, 5º, 6º, 10º, 13º e 15º da REN nº 482 além de inserir o artigo 6A na mesma. Com essa nova resolução, a definição de minigeração distribuída ficou da seguinte forma (ANEEL, 2015):

Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Essas resoluções mostram claramente a necessidade de incorporar essas novas tecnologias ao cenário brasileiro, contudo, a estrutura do sistema elétrico integrado nacional (SIN) permite somente uma aplicação limitada da geração distribuída. Os transformadores, por exemplo, não são otimizados para operar com fluxo reverso de energia (no que tange a

regulação de tensão, por exemplo) e não há tópicos nas normas atuais que falem sobre as condições de operação para esse caso.

2.3 *SUMÁRIO*

O estudo das normas internacionais relacionadas a transformadores de potência permitiu avaliar a origem da necessidade de aumento da eficiência em transformadores de potência.

Partindo-se da normatização sobre eficiência energética, ficou claro como o contexto de crise do petróleo e o avanço das questões ambientais fortaleceu o debate sobre os equipamentos ligados à rede de energia elétrica e seus componentes, além do trabalho na cultura do usuário, buscando gerar consumidores mais conscientes.

Partindo especificamente para as normas de ensaios em transformadores de potência, pode-se avaliar as normas europeia, americana e brasileira. Pode ser notado que o Brasil, apesar de ter sua norma baseada na IEC, possui algumas diferenças, principalmente nas tolerâncias de perdas a vazio e totais, que se assemelham ao padrão IEEE.

Por fim, foram listados os marcos legais que demandam os ensaios em transformadores de potência no Brasil, apontando que no ano de 2019 os valores-limite listados pela ABNT NBR 5440 sofreram ajustes para exigir transformadores cada vez mais eficientes na rede de distribuição brasileira.

Reunir essas informações é algo primordial para a implementação de um laboratório eficiente que esteja de acordo com as resoluções normativas e marcos legais que regem o escopo de trabalho. Os ensaios devem estar alinhados com o referido em norma, as instalações devem seguir os padrões normativos de qualidade e segurança, e o laboratório também deve estar atento às leis que regem os equipamentos a serem testados.

3 ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E ESTRUTURA LABORATORIAL

No Capítulo 1, foi apresentado o problema a ser resolvido, a importância do trabalho e a motivação. No Capítulo 2 foram abordadas as resoluções normativas e marcos legais que interagem com a execução de ensaios de transformadores de potência, tanto em nível nacional quanto internacional. No Capítulo 3, por sua vez, tratar-se-á da estrutura atual do laboratório para realização dos ensaios, considerando além da parte física, os equipamentos envolvidos na execução dos testes.

3.1 ESPAÇO FÍSICO

Situado no Instituto de Redes Inteligentes da UFSM, o INRIMT conta com a área mostrada na Figura 3.1 para execução e controle dos ensaios. A área de controle, apresentada na Figura 3.2, possui 25 m², e é o local onde os metrologistas e auxiliares técnicos monitoram o ensaio através de sistemas supervisórios e onde está localizado o painel de comando geral para o acionamento remoto de equipamentos presentes na área de execução.

Na área de execução, Figura 3.4, cujo tamanho é de 69 m², estão localizados os transformadores de potencial (TP), transformadores de corrente (TC), equipamentos de medição, transformadores elevadores e fonte trifásica CA. Esses equipamentos serão apresentados no item 3.2. Além dos citados, na área de execução também se encontra o “dispositivo sob teste” (ou DUT, do inglês *Device under test*), sendo esse o transformador a ser ensaiado. Ambos espaços possuem pé direito de 4,3 m.

Na área apresentada na Figura 3.4 é o local onde está localizado o gerador de impulso atmosférico, sendo este espaço (8x8x8 m³) projetado especialmente para as necessidades do equipamento em relação à sua utilização na capacidade nominal (800 kV).

A sala de controle é equipada com luz de emergência em caso de interrupção do fornecimento de energia. As áreas do gerador de impulso e de execução de ensaios são equipadas com luzes indicativas de energização e chaves fim de curso para interrupção da energização em caso de entrada não permitida durante o ensaio, além de botões de emergência para interrupção imediata da energização da área que estiver sendo utilizada.

Figura 3.1 – Planta baixa do laboratório INRIMT



Fonte: (INRI, 2018).

Figura 3.2 – Imagem de sala de controle



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.3 – Imagem de área de execução do ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.4 – Imagem de área onde está localizado o gerador de impulso atmosférico



Fonte: Elaborado pelo autor.

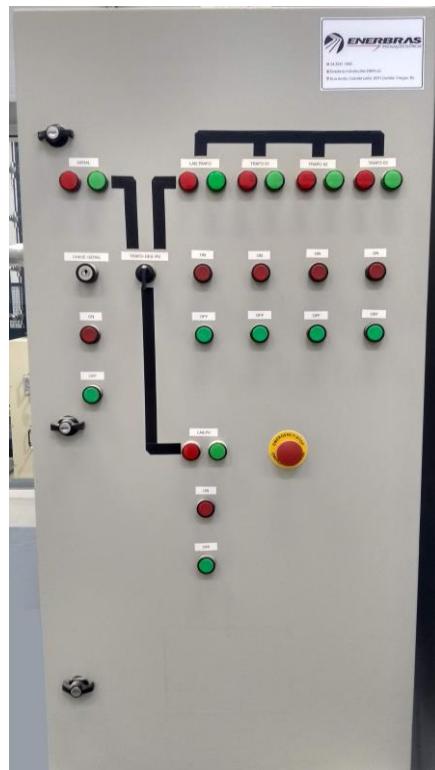
3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

São apresentados a seguir os equipamentos utilizados nas execuções de ensaios em transformadores pelo INRIMT. Em um primeiro momento será realizada uma breve descrição dos *hardwares* envolvidos. Em seguida, serão mostrados como esses itens comunicam-se entre si para a realização de cada ensaio. Vale ressaltar que cada ensaio demanda um tipo diferente de arranjo, o que pode significar a utilização de todos os equipamentos ou de parte deles. No item 3.3 também será apresentado o *software* associado aos ensaios listados. Para facilitar a redação de procedimentos, cada equipamento recebeu um código de identificação, seguindo a lógica de duas letras maiúsculas seguidas de três algarismos.

3.2.1 Quadro de comando

Dentro da sala de controle está situado o quadro de comando geral, responsável por habilitar a fonte emuladora de tensão, selecionar o transformador a ser utilizado e energizar a área de ensaios. A Figura 3.5 apresenta o quadro em questão.

Figura 3.5 – Quadro de comando



3.2.2 Alimentação da área de execução

3.2.2.1 *Fonte emuladora de sistema trifásico em corrente alternada (FG001)*

A área de ensaios é alimentada por uma fonte emuladora de rede CA trifásica desenvolvida pela Supplier®, modelo FCATQ 1000-60-40-PFC55450, apresentada na Figura 3.6. Essa fonte recebeu a nomenclatura no laboratório de **FG001**. Suas especificações são apresentadas na Tabela 3.1. A FG001 possui alimentação proveniente diretamente da subestação do prédio e sua energização é controlada via quadro de comando. O controle dos níveis de corrente, tensão, frequência, entre outros elementos é realizado via *software* próprio.

Figura 3.6 – Fonte trifásica Supplier® FCATQ 1000-60-40-PFC55450



Fonte: (SUPPLIER, [s.d.]).

Tabela 3.1 – Características da fonte FG001

Descrição	Fonte de Alimentação Trifásica
Tensão nominal de alimentação	380 V \pm 10%
Corrente nominal de entrada	179 A
Frequência de alimentação	50/60 Hz
Fator de potência sobre carga nominal	1,00
Potência nominal de saída	100 kVA
Tensão de saída	0 a 600 V (tensão de linha)
Corrente nominal de saída	152 A – 220 V (fase) 96,6 A – 345 V (fase)
Proteção contra sobrecorrente de saída	\leq 215 A (pico) instantâneo
Frequência de saída	40 a 400 Hz

Fonte: (SUPPLIER, 2014).

3.2.2.2 Transformador de potência elevador trifásico (TR001)

Como mostrado na Tabela 3.1, a fonte a fonte FG001 possui tensão de saída máxima de 600 V, o que poderá não ser o suficiente dependendo do ensaio a ser executado e do DUT. Isto posto, o laboratório conta também com um transformador trifásico elevador com 150 kVA de potência. A entrada na baixa tensão é de 380 V e a saída possui 5 TAPs diferentes, variando de 800 V a 2 kV, comutados **de forma manual**. Isso significa que, previamente à realização do ensaio, deve ser estimado o valor da tensão que será fornecida ao DUT. No quadro de comando da sala de controle, o transformador está identificado como **TR001**. A Figura 3.7 e Figura 3.8 mostram as vistas do equipamento e a Figura 3.9 contém os dados de placa do transformador.

Figura 3.7 – Vista frontal com taps de alta tensão do TR001



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.3 *Transformador de potencial monofásico (TR002)*

Além do TR001, o INRIMT possui um transformador monofásico elevador de tensão de 30 kVA de potência. A entrada na baixa tensão é 220 V e saída é de 80 kV. Esse transformador é utilizado para a realização do ensaio de tensão suportável à frequência industrial (descrito adiante, no item 3.3.2) pela necessidade de tensões monofásicas elevadas. No quadro de comando da sala de controle, o transformador está identificado como **TR002**. A Figura 3.10 apresenta os dados de placa do TR002, e a Figura 3.11 mostra a vista frontal do transformador.

Figura 3.8 – Vista posterior: TR001



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.9 – Dados de placa do TR001

Sigma

TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO

Nº Data de Fabricação

Potência kVA Norma

Impedância % Tipo de óleo isolante

ALTA TENSÃO		
v	TERMINAIS	LIG.
800	H1 - H2 - H3	
1.000	H4 - H5 - H6	
1.200	H7 - H8 - H9	
1.600	H10 - H11 - H12	
2.000	H13 - H14 - H15	

Y

BAIXA TENSÃO		
v	TERMINAIS	LIG.
380	X1 - X2 - X3	Δ

DIAGRAMA DE LIGAÇÕES

Volume L Massa Total Kg

Elevação de temperatura óleo/enrolamento °C

Material dos enrolamentos AT/BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.10 – Dados de placa do TR002

Sigma

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Nº Data de Fabricação

Potência kVA Norma

Impedância % Tipo de óleo isolante

DIAGRAMA DE LIGAÇÕES

ALTA TENSÃO		
v	TERMINAIS	
80.000	H1 - H2T	

BAIXA TENSÃO		
v	TERMINAIS	
220	X1 - X2	

Volume L Massa Total Kg

Material dos enrolamentos AT/BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.11 – Vista frontal do TR002



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Equipamentos de medição

3.2.3.1 Transformadores de potencial e transformadores de corrente

O transformador de corrente (**TC001-TC004**) utilizado pelo laboratório é da marca Yokogawa®, modelo 2241. De modo similar, o transformador de potencial (TP001-TP004) também é da marca Yokogawa®, modelo 2261. O INRIMT possui quatro TPs e quatro TCs divididos em dois gabinetes dentro da área de execução de ensaios, um conjunto conectado ao transformador elevador trifásico (TR001) e o outro conectado juntamente ao transformador monofásico (TR002). As Tabela 3.2 e Tabela 3.3 mostram os dados dos TCs e dos TPs respectivamente e a Figura 3.12 contém a ilustração dos equipamentos. Os taps no lado primário dos TCs e TPs são comutados manualmente através de bornes, o que torna necessário estimar o nível de tensão e corrente previamente ao ensaio para que seja realizada a conexão no tap correspondente, já que não há como realizar essa comutação sob carga, assim como acontece no TR001.

Tabela 3.2 – Especificações do TC Yokogawa® 2241

Transformador de Corrente Yokogawa	Modelo 2241
Primário	10-1500 A
Secundário	5 A
Carga	15 VA
Máxima taxa de erro	$\pm 0,2\%$
Máxima tensão de linha	3450 V
Frequência Nominal	60 Hz

Fonte: (YOKOGAWA, 2014).

Tabela 3.3 – Especificações do TP Yokogawa® 2261

Transformador de Potencial Yokogawa	Modelo 2261
Primário	220-3300 V
Secundário	110 V
Carga	15 VA
Máxima taxa de erro	$\pm 0,2\%$
Máxima tensão de linha	3450 V
Frequência Nominal	60 Hz

Fonte: (YOKOGAWA, 2014).

Figura 3.12 –TP Yokogawa®



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.13 – TC Yokogawa®



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.2 Multímetro (ML001)

O multímetro utilizado pelo INRIMT é da marca Fluke® modelo 115 True RMS, apresentado na Figura 3.14. Os dados do equipamento estão na tabela Tabela 3.4. Ele está conectado à saída do TP004 para fornecer os dados de tensão da entrada do TR002.

Figura 3.14 – Multímetro Fluke® (ML001)



Fonte: (FLUKE, [s.d.]).

Tabela 3.4 – Especificações do multímetro Fluke® (ML001)

(continua)

Especificações	
Tensão máxima entre qualquer terminal e a terra	600 V
Proteção contra picos	Pico de 6 kV, de acordo com IEC 61010-1 600 V CAT III, grau de poluição 2
Temperatura de funcionamento	-10 °C a +50 °C

Tabela 3.4 – Especificações do multímetro Fluke® (ML001)

(conclusão)

Especificações		
Temperatura de armazenamento		-40 °C a +60 °C
	Gama:	600,0 mV
Milivolts AC1 True RMS	Resolução:	0,1 mV
	Precisão:	1,0% + 3 (DC, 45 Hz a 500 Hz) 2,0% + 3 (500 Hz a 1 kHz)
	Gama/Resolução:	6,000 V / 0,001 V
	Gama/Resolução:	60,00 V / 0,01 V
Volts AC1 True RMS	Gama/Resolução:	600,0 V / 0,1 V
	Precisão:	1,0% + 3 (DC, 45 Hz a 500 Hz) 2,0% + 3 (500 Hz a 1 kHz)
	Gama/Resolução:	99,99 Hz / 0,01 Hz
Hz (entrada V ou A)2	Gama/Resolução:	999,99 Hz / 0,1 Hz
	Gama/Resolução:	9,999 kHz / 0,001 kHz
	Gama/Resolução:	50 kHz / 0,01 kHz
	Precisão:	0,1% + 2

Fonte: (FLUKE, [s.d.]).

3.2.3.3 MONITEK9930 (MT001)

O equipamento MONITEK9930 da JMAN®, mostrado na Figura 3.15, é um miliohmímetro digital utilizado para a realização do **ensaio de medição de resistência a frio e**

a quente (itens 3.3.5 e 3.3.9 respectivamente). Foi desenvolvido para os limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 5440:1999, com potências variando de 3 kVA a 300 kVA, cuja resistência dos transformadores variam da classe de miliohms a 1 quilo ohms (VICENTE, 2006).

Figura 3.15 – Equipamento MONITEK9930 (MT001)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.4 MONITEK9610 (MT002)

O instrumento MONITEK9610 da JMAN®, Figura 3.16, foi desenvolvido especialmente para realização do **ensaio de relação de transformação** (item 3.3.6), ou do inglês *Transformer Turn Ratio* (TTR). O equipamento, diferentemente de um TTR tradicional, não necessita da troca de conexão com a variação do tipo de ligação do transformador, pois o mesmo foi construído para atender todas as polaridades e desfasamentos angulares. O MONITEK9610 trabalha com as principais classes de tensão (15, 25 e 36 kV) e atende a faixa de medição de uma relação de transformação de 25 para transformadores monofásicos e 300 para transformadores trifásicos (VICENTE, 2006).

Figura 3.16 – Equipamento MONITEK9610 (MT002)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.5 MONITEK9451 (MT003)

O instrumento de medição MONITEK9451®, Figura 3.17 também da JMAN®, é um aparelho digital que permite a medição de tensão, corrente e temperatura instantâneos. Através destas grandezas, o *software* TRANS4, vinculado a este equipamento, calcula os valores desejados conforme o ensaio executado. O equipamento foi desenvolvido para a realização dos ensaios de **perdas a vazio e corrente de excitação, impedância de curto-circuito e perdas em carga e ensaio de elevação de temperatura** (itens 3.3.7, 3.3.8 e 3.3.9 respectivamente). Segundo Vicente (2006) o seu projeto prevê um erro de leitura menor que 0,5%.

3.2.3.6 Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura (**ST001 – ST004**) utilizados no INRIMT são do tipo RTD (*Resistive Temperature Detector*). Comumente, os RTDs de platina a $100\ \Omega$ são chamados de Pt100. São da marca Salcas®, modelo TR 311, e possuem o projeto mostrado na Figura 3.18. Estão montados em uma base com recipiente preenchido com óleo mineral para uma maior constante térmica, como apresentado na Figura 3.19. O laboratório possui 4 unidades similares:

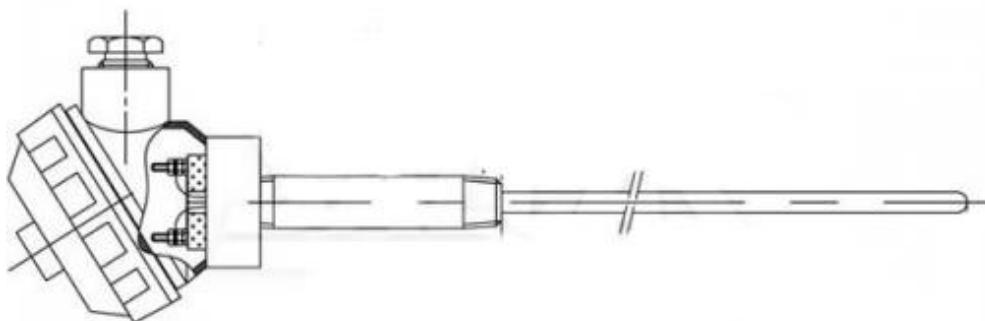
classe B com bulbo de vidro. Três deles são responsáveis pela medição da temperatura ambiente enquanto o último mede a temperatura no topo do óleo do DUT.

Figura 3.17 – Equipamento MONITEK9451® (MT003)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.18 – Sensores de temperatura Pt100



Fonte: Adaptado de (SALCAS, [s.d.]).

Figura 3.19 – Base dos sensores de temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.7 Conjunto de medição de descargas parciais

Este equipamento é utilizado no ensaio de medição de descargas parciais, normalmente realizado em conjunto com o **ensaio de tensão aplicada** (Seção 3.3.2). O sistema de medição empregado é da empresa HVEX®. Fazem parte do conjunto um divisor resistivo isolado (**DR001**), um divisor capacitivo (**DC001**) e um osciloscópio Rohde&Schwarz®, modelo RTB2004 (**OS001**). O conjunto é controlado via *software* próprio. As Figura 3.20, Figura 3.21 e Figura 3.22 mostram os itens descritos acima.

Figura 3.20 – Osciloscópio Rohde&Schwarz® RTB2004



Fonte: (ROHDE&SCHAWARZ, [s.d.]).

Figura 3.21 – Divisor resistivo (DR001)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.22 – Divisor capacitivo (DC001)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.8 Gerador de impulso atmosférico

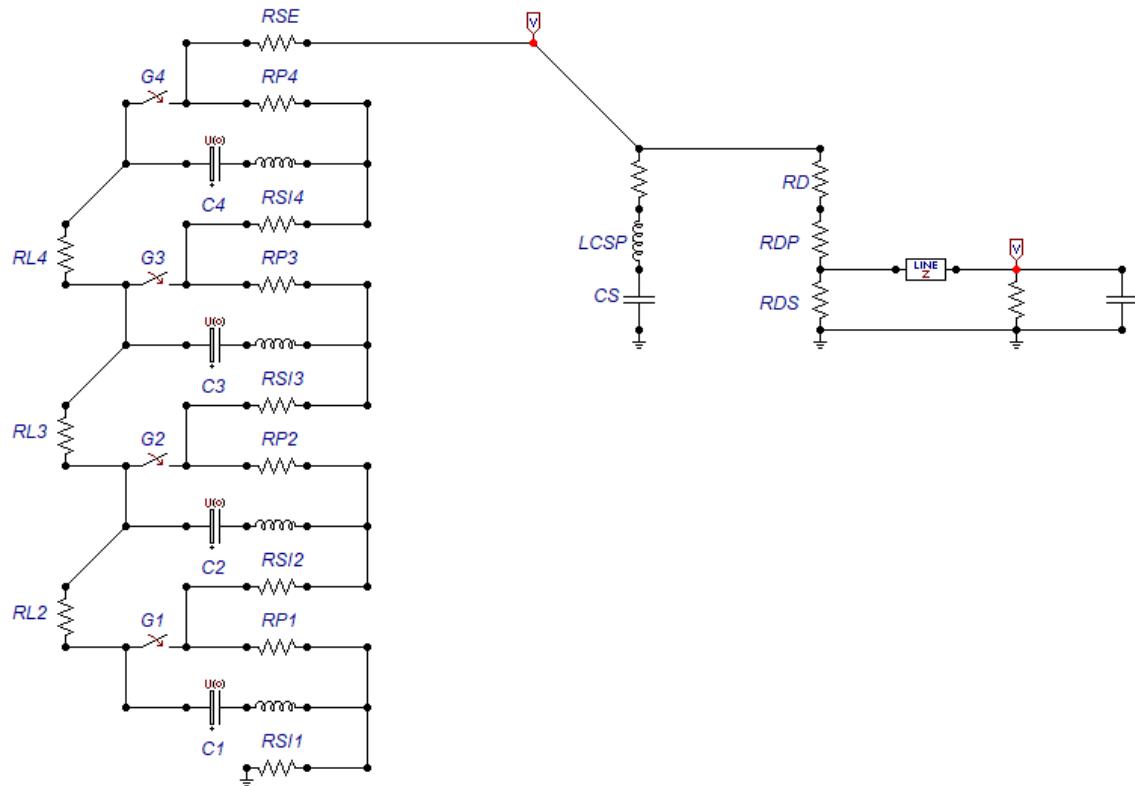
Para a realização do ensaio de **tensão suportável de impulso atmosférico**, explicado na Seção 3.3.4, o INRIMT adquiriu o conjunto gerador de impulso atmosférico do fabricante HVEX®. O conjunto é composto pelos equipamentos apresentados a seguir:

- a) painel de controle;
- b) transformador de isolação;
- c) fonte de alta tensão;
- d) diodo de carregamento;
- e) gerador de impulso;
- f) divisor resistivo;
- g) módulo de corte.

A Figura 3.23 apresenta o diagrama de ligação do conjunto gerador de impulso montado utilizando o *software ATPDraw®*. Nele pode ser visto que a conexão com a fonte de alta tensão foi

suprimida, pode ser vista também a associação de resistores (denominados *RSI*) de carregamento dos capacitores (denominados *C*) de cada estágio, que carregam em paralelo. As chaves (*G*) representam as calotas que, na prática, são posicionadas de forma a estarem próximas da região de disparo espontâneo, definida pela relação de distância versus tensão entre elas. Ao se posicionar as calotas desta forma, o disparo é controlado via centelhadores. Nesse momento ocorre a ruptura do dielétrico (representado pelo fechamento da chave) descarregam os capacitores em série (através dos resistores *RL*), somando as tensões dos estágios. Na parte de cima da imagem têm-se o resistor de topo (*RSE*), e conectado a ele foi representada uma carga RLC (*LSCP* e *CS*), um divisor resistivo (*RD*, *RDP* e *RDS*) e o sistema de medição ligado ao divisor.

Figura 3.23 – Diagrama unifilar representativo do conjunto gerador de impulso



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.9 Megômetro digital (MG001)

Para realizar o ensaio de medição da resistência de isolamento, Seção 3.3.1, o INRIMT conta com um megômetro digital da marca ICEL®, modelo MG-3150, apresentado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Megômetro ICEL® (MG001)



Fonte: (ELETROPEÇAS, [s.d.]).

3.2.4 Softwares associados

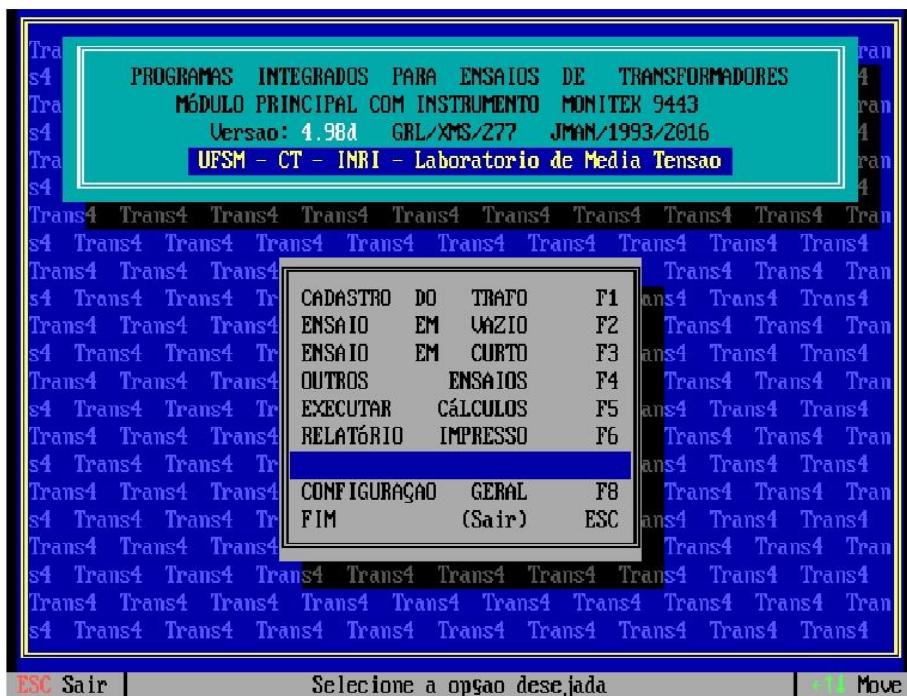
3.2.4.1 Softwares JMAN

A relação de *softwares* apresentadas nesse item descreve os programas que são utilizados pelos equipamentos de medição JMAN® MONITEK. Eles oferecem suporte para a realização dos ensaios, realizam os cálculos, fornecem o resultado e o relatório do ensaio. O conjunto de programas apresentados foram fornecidos juntamente com os equipamentos de medição, sendo relacionados abaixo. Ressalta-se que os *softwares* utilizam emulação através de máquina virtual em DOSBOX para sua execução.

- TRANS4: Além de realizar o cadastro do transformador, o TRANS4 é responsável pelo monitoramento dos ensaios de medição de impedância de curto-circuito e perdas em carga e medição das perdas a vazio e corrente de excitação. O programa também tem um espaço destinado a inserção de informações sobre os seguintes ensaios: medição da resistência de isolamento, tensão aplicável à frequência industrial, ensaio de tensão induzida, ensaio de rigidez dielétrica do óleo, ensaio de pintura e estanqueidade. A Figura 3.25 apresenta a tela inicial do TRANS4.

- b) RHMED: Este *software*, Figura 3.26, por sua vez é responsável por analisar os dados de resistência ôhmica obtidos pelo MT001, portanto, é utilizado nos ensaios de medição de resistência a frio e medição de resistência a quente, este último sendo realizado ao fim do ensaio de elevação de temperatura.
- c) RTMED: Este programa, apresentado na Figura 3.27, analisa os dados de relação de transformação obtidos do MT001.
- d) ELEVA: É utilizado para controle do ensaio de elevação de temperatura, ele utiliza os dados obtidos pelo MT003 e dos sensores de temperatura ST001-ST004, sua tela inicial está apresentada na Figura 3.28.

Figura 3.25 – Tela inicial do *software* TRANS4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.26 – Tela inicial do software RHMED



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.27 – Tela inicial do software RTMED



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.28 – Tela inicial do *software* Eleva

Fonte: Elaborado pelo autor.

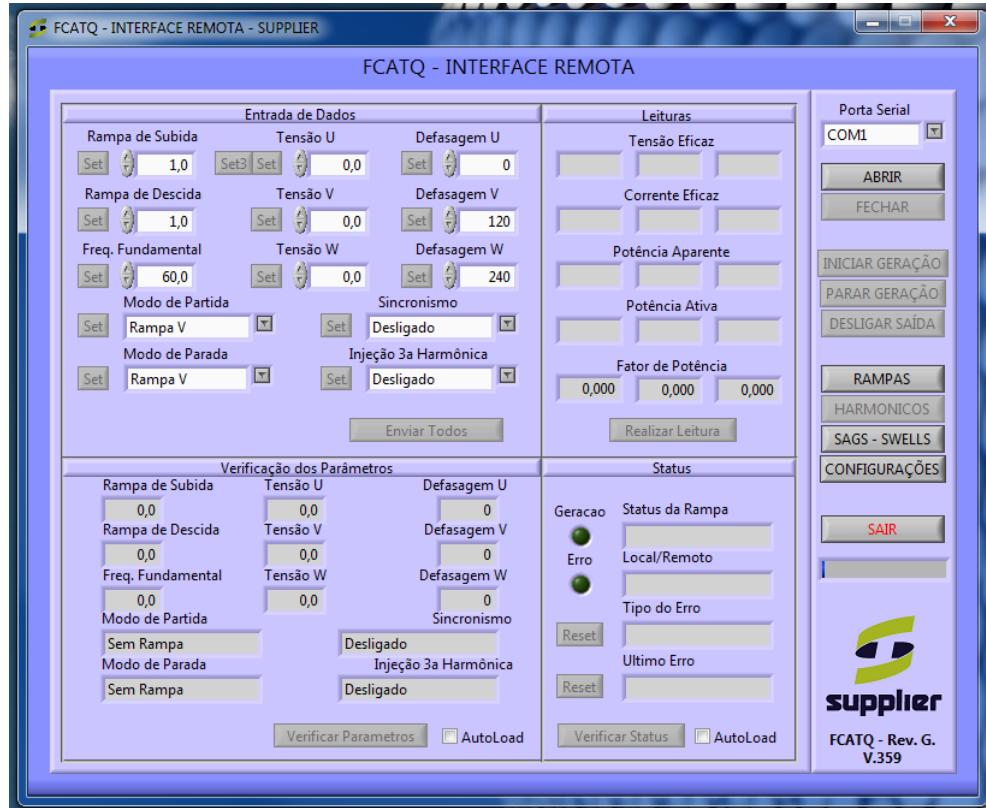
3.2.4.2 Software de controle da FG001

A FG001 tem seu controle via *software*, cuja identificação é FCATQ359, apresentado na Figura 3.29. A janela do programa permite a manipulação dos valores de: rampa de subida, rampa de descida, tensão em cada fase, frequência, modo de partida, modo de parada, defasagem por fase, sincronismo, injeção de 3^a harmônica. Além de visores de monitoramento das informações inseridas, bem como para corrente e potências ativa e reativa por fase.

3.3 ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

O objetivo do INRIMT é ser acreditado pelo INMETRO para realizar ensaios em transformadores de potência de acordo com o PBE, seguindo tanto a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 quanto a ABNT NBR 5356 e a ABNT NBR 5440. Com este foco, os equipamentos adquiridos pela instalação são responsáveis por viabilizar a execução dos referidos ensaios. Mais especificamente, o laboratório oferece 9 ensaios para execução e certificação de transformadores de distribuição.

Figura 3.29 – Tela do software FCATQ359



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de a norma ABNT NBR 5356:2010 não especificar a ordem de execução de ensaios, para o programa de etiquetagem, é necessário seguir a seguinte ordem: Ensaio de impulso, ensaios de rotina e aquecimento.

Os ensaios ofertados pelo INRIMT são executados na ordem apresentada a seguir:

- a) medição da resistência de isolamento;
- b) ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico;
- c) tensão suportável a frequência industrial;
- d) tensão induzida de curta duração (CACD);
- e) medição da resistência dos enrolamentos;
- f) medição da relação de transformação;
- g) medição de perdas a vazio e corrente de excitação;
- h) medição da impedância de curto circuito e perdas em carga;
- i) ensaio de elevação de temperatura;

O ensaio de medição de resistência de isolamento é feito por primeiro para assegurar que as condições de isolação do transformador não estão severamente comprometidas. Apesar de esse ensaio não ser de caráter reprobatório, essa medição pode dar uma ideia geral das condições do objeto sob teste. Na sequência, são realizados os ensaios dielétricos, relacionados de b) a d), por serem de rápida execução e entregarem resultados de reprovação imediatos, afinal, como são ensaios destrutivos (excluindo-se o ensaio de medição da resistência de isolamento), em caso de reprovação, o equipamento fica danificado, o que impossibilita a execução dos demais testes de forma confiável. Seguindo o padrão estabelecido pelo laboratório, o último ensaio a ser executado é o de elevação de temperatura, por ser o mais demorado.

Na Seção 2.1.2 do Capítulo 2, foram apresentados todos os ensaios presentes na norma ABNT NBR 5356:2010. Assim, neste capítulo o foco será nos ensaios realizados pelo INRIMT, com uma descrição mais detalhada de cada, de acordo com a norma, e apresentando os métodos adotados pelo laboratório para a realização dos mesmos.

3.3.1 Medição da resistência de isolamento

A norma ABNT NBR 5356 solicita que esse ensaio seja realizado antes dos ensaios dielétricos, não constituindo critério para aprovação ou rejeição do transformador. Consiste em medir a resistência de isolamento com um megaohmímetro de 1000 V, no mínimo, para enrolamentos de tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 72,5 kV, e um megaohmímetro de 2000 V para enrolamentos de tensão máxima do equipamento superior a previamente citada.

O ensaio é realizado da seguinte forma: primeiro, se curto-circuitam os terminais de cada enrolamento do transformador sob ensaio; em seguida, efetuam-se as medições nas mesmas ligações do ensaio de fator de potência de isolamento, de acordo com a tabela E da norma (ABNT NBR 5356-1, pág. 84), apresentada neste trabalho como Tabela 3.5; o próximo passo é ligar o MG001, aguardando a estabilização da leitura por, no mínimo, um minuto, e fazer a leitura; por fim, anota-se nessa leitura a tensão e a temperatura do enrolamento sob ensaio, estando o transformador em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente.

Tabela 3.5 – Ligações para o ensaio

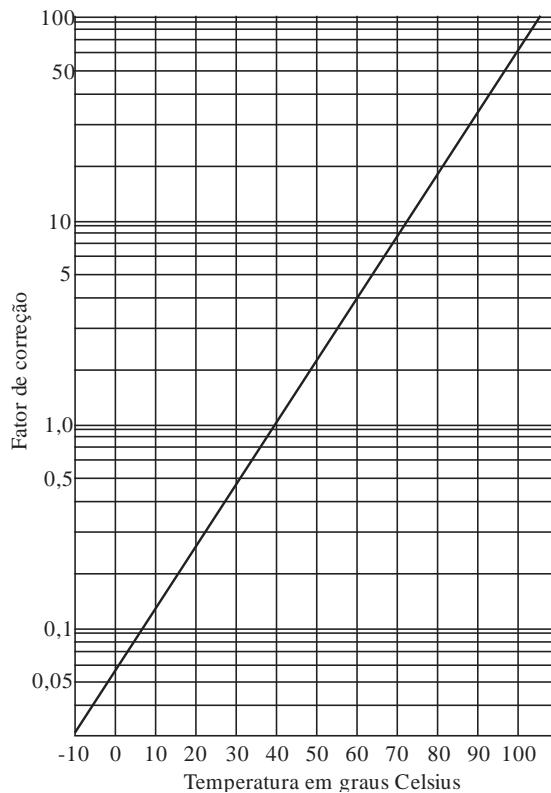
Transformador de dois enrolamentos	
de EAT	para EBT aterrado
de EBT	para EAT aterrado
de EAT e EBT	para terra
Transformador de dois enrolamentos (no caso de ensaios com cabo de blindagem)	
de EAT	para EBT aterrado
de EBT	para EAT aterrado
de EAT e EBT	para terra
de EAT	para terra (EBT ligado à blindagem)
de EBT	para terra (EBT ligado à blindagem)
Transformador de três enrolamentos	
de EAT	para EBT ligado a ET e aterrados
de EBT	para EAT ligado a ET e aterrados
de ET	para EAT ligado a EBT e aterrados
EAT ligado a EBT	para ET aterrado
EBT ligado a ET	para EAT aterrado
EAT ligado a ET	para EBT aterrado
EAT ligado a EBT e ET	para terra
Transformador de três enrolamentos (no caso de ensaios com cabo de blindagem)	
de EAT	para terra (EBT ligado à ET e à blindagem)
de EBT	para terra (EAT ligado à ET e à blindagem)
de ET	para terra (EAT ligado à EBT e à blindagem)
de EAT	para EBT aterrado (ET ligado à blindagem)
de EBT	para ET aterrado (EAT ligado à blindagem)
de ET	para EAT aterrado (EBT ligado à blindagem)
EAT ligado a EBT	para ET aterrado
EBT ligado a ET	para EAT aterrado
EAT ligado a ET	para EBT aterrado

EAT: Enrolamento de alta tensão
EBT: Enrolamento de baixa tensão
ET: Enrolamento terciário

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2010).

Além de realizar essa medição, é preciso corrigir o valor medido, pois o MG001 considera que o equipamento está a uma temperatura de 40 °C, o que pode não ser o caso do INRIMT. Considerando que a resistência de isolamento aumenta em relação a elevação de temperatura. Com a temperatura ambiente e o resultado do ensaio, é feita a multiplicação por um fator de correção, que pode ser obtido na curva em escala logarítmica mostrada na Figura 3.30, onde o fator será um coeficiente multiplicador na temperatura do ensaio, ou seja, a leitura obtida é multiplicada pelo valor onde a linha da temperatura cruza com a curva.

Figura 3.30 – Fator de correção de temperatura do MG001



Fonte: Adaptado de (ICEL, 2012).

3.3.2 Ensaio de tensão suportável à frequência industrial (ou tensão aplicada)

O ensaio deve ser realizado com a tensão monofásica mais próxima da senoidal possível, com uma frequência não menor que 80% da frequência nominal. O valor da tensão de pico deve ser medido, e esse valor dividido por $\sqrt{2}$ deve ser igual ao valor de ensaio, especificado na ABNT NBR 5356-3:2007, Tabelas 2, 3 e 4, páginas 7, 8 e 9, respectivamente. Neste trabalho, os dados da Tabela 2 da norma, referentes aos limites aplicados no Brasil, são apresentados na Tabela 3.6, limitando-se à tensão máxima de 36 kV, para assim abranger as três classes de tensão para transformadores de distribuição de acordo com a ABNT NBR 5440:2014. Vale ressaltar ainda que a tabela apresentada se baseia na norma ABNT NBR 6939. Além das informações sobre tensão aplicada, temos também os valores para tensão induzida de curta duração e ensaio de impulso, que serão vistos nos itens 3.3.3 e 3.3.4 respectivamente.

Tabela 3.6 – Tensões suportáveis nominais para transformadores com tensão máxima menor que 170 kV: Série I, baseado na prática europeia e brasileira, conforme ABNT NBR 6939

Tensão máxima para o equipamento (kV eficaz)	Tensão suportável a impulso atmosférico (kV crista)	Tensão induzida de curta duração ou tensão suportável à frequência industrial (kV eficaz)
0,6	-	4
1,2	30	10
3,6	20 40	10
7,2	40 60	20
12	60 75	28
15	95 110	34
17,5	75 95	38
24	95 125 145	50
36	145 170 200	70

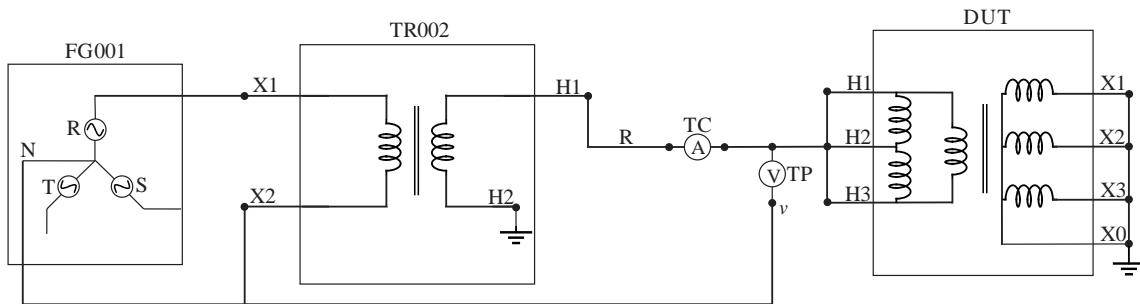
Fonte: Adaptado de (ABNT, 2007).

Para a realização desse ensaio: liga-se ao terminal do TR002 todos os terminais externos do enrolamento sob ensaio, os terminais externos dos demais enrolamentos e partes metálicas (inclusive tanque e núcleo) são aterrados. No início do ensaio aplica-se uma tensão de no máximo um terço da tensão de ensaio especificada, o que é feito através da FG001, no lado de baixa do TR002 está ligado o TP004, que por sua vez está ligado ao ML001 e através da leitura do que está sendo fornecido ao lado de baixa tensão do TR002 e sabendo a relação de transformação, monitora-se o que está sendo fornecido no lado de alta, o esquema descrito pode ser ilustrado pela Figura 3.31.

O próximo passo é elevar a tensão para o valor de ensaio, programando-se uma rampa de 1 s. Para finalizar o ensaio, deve-se reduzir a tensão em uma rampa de 1 s para um valor menor que um terço do valor de ensaio e mais uma rampa de descida para desligar a fonte. A tensão de ensaio deve ser aplicada por 60 s entre todos os terminais do enrolamento sob ensaio interligados

e todos os terminais dos demais enrolamentos, núcleo, tanque e demais partes metálicas interligadas e aterradas. Para que o ensaio seja considerado satisfatório, não deve ocorrer o colapso da tensão aplicada.

Figura 3.31 – Esquema de ligação para o ensaio de tensão aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Ensaio de tensão induzida

Deve-se aplicar uma tensão alternada aos terminais de um enrolamento do transformador, sendo a forma de onda a mais senoidal possível e sua frequência suficientemente acima da nominal, para evitar o aparecimento de uma corrente de excitação excessiva durante o ensaio (devido à saturação do núcleo). O valor de crista da tensão induzida deve ser medido, e esse valor dividido por $\sqrt{2}$ deve ser igual à tensão de ensaio. A duração deve ser de 60 s para qualquer frequência até duas vezes a frequência nominal. Se a frequência de ensaio for maior do que duas vezes a frequência nominal, a duração do ensaio deve ser calculada pela Equação (3.1), em segundos. O tempo de aplicação da tensão nunca deverá ser inferior a 15 s.

$$\text{Tempo do ensaio} = 120 \cdot \frac{f_n}{f_e} \quad (3.1)$$

onde:

f_n é a frequência nominal do transformador;

f_e é a frequência de ensaio.

3.3.3.1 Ensaio de tensão induzida de curta duração (CACD)

Como o foco do INRIMT é obter acreditação para realização de ensaios em transformadores de **distribuição**, serão abordadas nesse ensaio as especificações para

transformadores de $U_m \leq 72,5$ kV, onde U_m é o maior valor de tensão eficaz fase-fase de um sistema trifásico para o qual o enrolamento de um transformador é projetado com respeito a seu isolamento em regime permanente. Este ensaio verifica uma operação livre de descargas parciais durante as condições operacionais. O ensaio pode ser executado de uma das duas formas apresentadas a seguir.

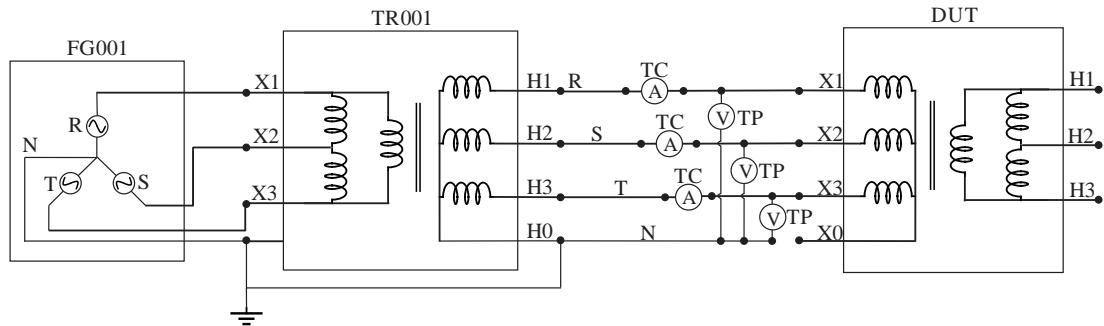
3.3.3.1.1 Transformadores com enrolamento de alta tensão com isolamento uniforme

Aplica-se uma tensão alternada nos enrolamentos do transformador (para transformadores trifásicos, aplica-se tensão trifásica). No caso de isolamento uniforme, serão apenas necessários ensaios fase-fase, pois os ensaios fase-terra já estão cobertos pelo ensaio de tensão aplicada. A tensão de linha não deve exceder o valor apresentado na Tabela 3.6. A norma informa que como regra a tensão de ensaio através de um enrolamento sem derivações de um transformador deve ser a mais próxima do dobro da tensão nominal.

No início do ensaio, aplica-se uma tensão de no máximo um terço da tensão de ensaio definida. Após esta etapa, a tensão deve ser elevada para seu valor total. A rampa de subida pode ser configurada para uma velocidade que não prejudique os equipamentos de medição. A duração da aplicação de tensão deverá ser como descrita pela Equação (3.1). Ao final do ensaio, a tensão deverá ser reduzida rapidamente para um valor menor que um terço da tensão de ensaio e, após, prossegue-se para o desligamento da fonte. Caso não ocorra colapso de tensão, o ensaio é considerado satisfatório.

Para transformadores com $U_m > 36,2$ kV e enrolamentos com terminal aterrado internamente, devem ser ensaiados como se fossem de isolamento progressivo, com frequência superior a 196 Hz e duração de 7200 ciclos. A tensão de excitação do transformador deve ser de tal valor que no lado de alta tensão se obtenha a ordem de $3,46 \cdot U_n + 1$ kV, onde U_n é a tensão nominal do enrolamento correspondente, limitando-se a tensão de ensaio a 50 kV. A Figura 3.32 ilustra o esquema de ligação para o ensaio de tensão induzida em um transformador trifásico com BT em estrela e AT em triângulo.

Figura 3.32 – Esquema de ligação do ensaio de tensão induzida



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.4 Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico

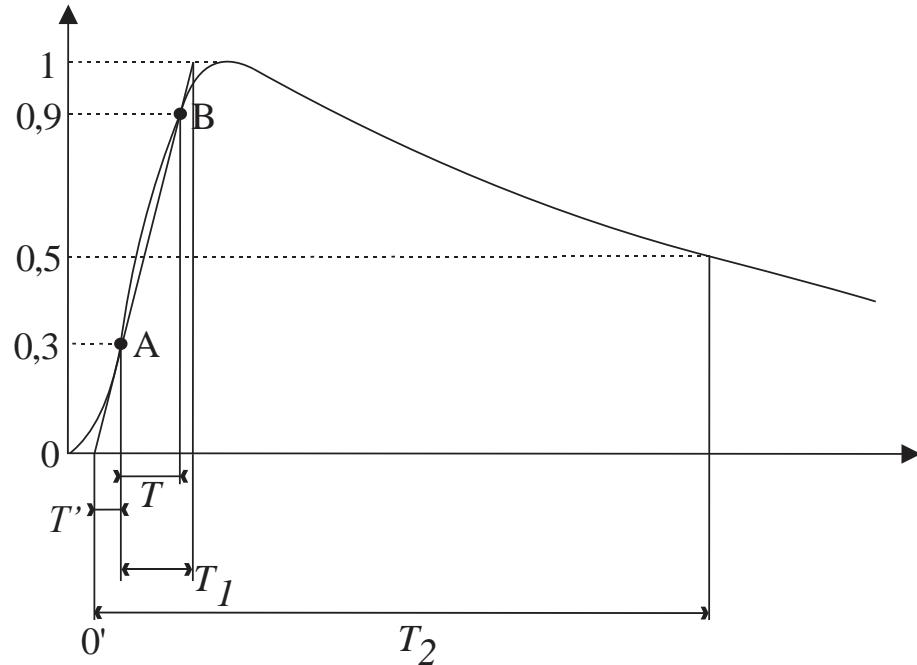
O ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico é um dos ensaios dielétricos mais críticos em relação ao estresse realizado sobre o DUT. O ensaio visa reproduzir o impacto de descargas atmosféricas na rede e analisar o comportamento do equipamento em relação aos efeitos relacionados. Para sua realização, tem-se como normas auxiliares a ABNT NBR IEC 60060-1: 2013, ABNT NBR IEC 60060-2: 2016 e ABNT NBR 5356-4:2007.

A Tabela 3.6 mostra os valores de impulso a serem aplicados dependendo da classe de tensão do transformador. A forma de onda de impulso aplicada é padronizada (Figura 3.33) e possui as seguintes características:

$$\begin{cases} T_1 = 1,2 \mu s \pm 30\% \\ T_2 = 50 \mu s \pm 30\% \end{cases}$$

onde T_1 representa o tempo de frente da onda e T_2 representa o tempo de cauda. Os pontos A e B representam pontos auxiliares de 30% e 90% do valor de pico, respectivamente, e a estimativa do tempo de frente se dá utilizando o segmento de reta definido por A e B (T) e multiplicando o seu valor por 1,67. T' é o tempo compreendido entre o 0 virtual (θ') e o ponto A.

Figura 3.33 – Forma de onda padronizada para o ensaio de impulso atmosférico (valores em p.u)



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010).

Caso seja realizado de forma isolada, o ensaio deve seguir a seguinte ordem de execução:

- aplicação de um impulso reduzido: com valor entre 50% e 75% do valor de ensaio;
- na sequência, aplica-se três impulsos plenos, com valor de ensaio nominal.

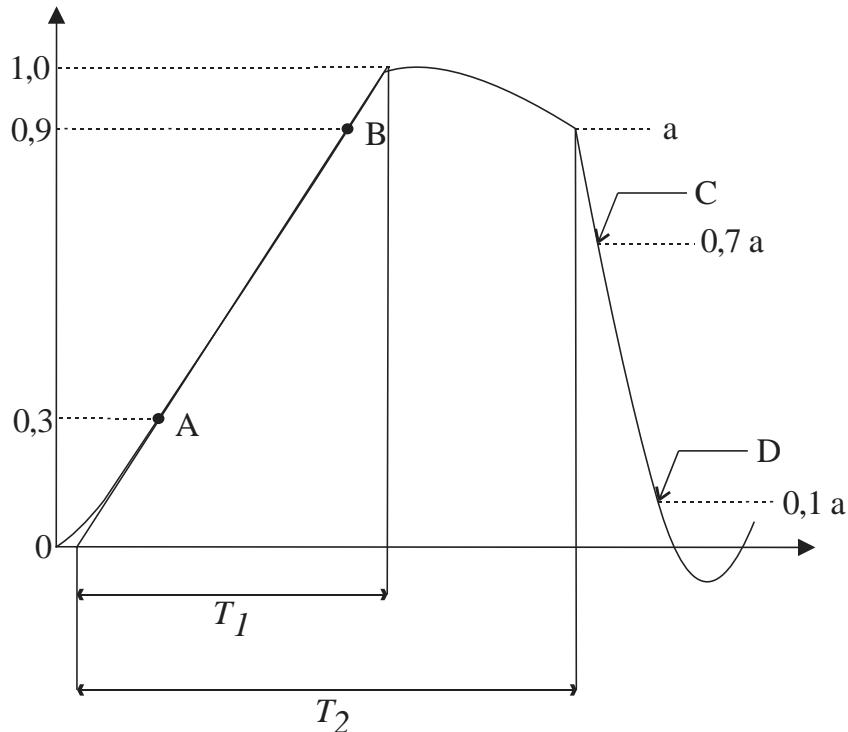
Entretanto, este ensaio pode ser combinado com o ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico com onda cortada, sendo a forma de onda apresentada na Figura 3.34. Nesse caso, o ensaio assume a seguinte configuração:

- um impulso pleno de valor reduzido;
- um impulso pleno de valor 100%;
- um ou mais impulsos cortados com valor reduzidos;
- dois impulsos cortados com valor 110%;
- dois impulsos plenos com valor 100%.

Para a execução, o INRIMT utiliza o conjunto gerador de impulso apresentado na Seção 3.2.3.8. A carcaça o transformador sob ensaio é posicionado em superfície isolante, separada do piso do laboratório, seguindo a recomendação da norma. Configura-se então o gerador de impulso através de *software* próprio a aplicação da sequência de descargas,

considerando as aplicações com impulso cortado. A ABNT NBR 5356-3 define que o intervalo máximo de aplicação dos impulsos não pode ultrapassar 5 minutos.

Figura 3.34 – Forma de onda do ensaio de impulso cortado (valores em p.u)



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010).

Ainda, a ABNT NBR 5356-3 determina que no relatório de ensaio constem os oscilogramas do primeiro impulso com valor reduzido, dos impulsos cortados e do primeiro e último impulso pleno com valor nominal, o que é realizado através do *software* do equipamento.

Caso não sejam detectadas diferenças significativas entre os oscilogramas, conclui-se que o isolamento suportou a aplicação da sequência de ensaio e, portanto, tem-se a aprovação do transformador.

Na Figura 3.35 é apresentada a tela do software de ensaio de impulso atmosférico.

3.3.5 Medição da resistência dos enrolamentos

Com o objetivo de realizar a medição da resistência de cada enrolamento em condições de repouso do transformador, o mesmo deve estar há pelo menos 3 horas desenergizado. Este ensaio deve ser realizado em corrente contínua e, por padrão, a medição deve ser feita na derivação correspondente à tensão mais elevada.

Figura 3.35 – Programa de controle do ensaio de impulso atmosférico



Fonte: Adaptado de (IEC, 2010).

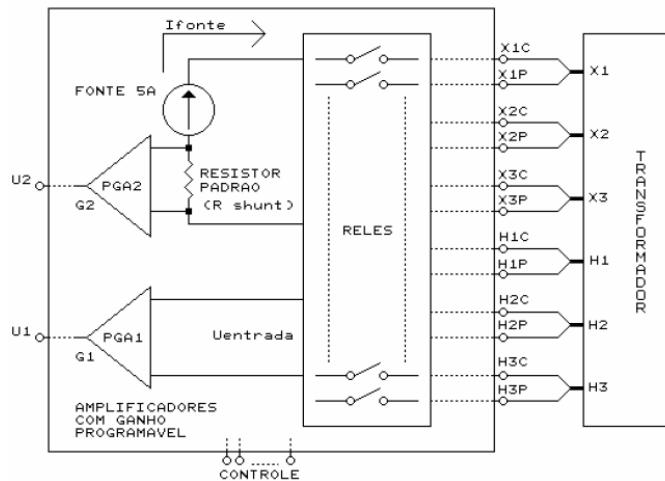
Determina-se a temperatura do óleo através do ST004 e se considera que a temperatura do enrolamento é igual à temperatura média do óleo. Liga-se o MT001 aos terminais do transformador e se inicia o ensaio através do *software* RH MED. Registra-se a resistência de cada enrolamento, os terminais entre os quais ela foi medida e a temperatura dos enrolamentos. A norma informa que a medição pode ser feita utilizando-se o método de ponte ou método de queda de tensão, contudo, quando corrente nominal for inferior a 1 A, deve ser utilizado o método de ponte, o qual é utilizado pelo MT001.

O diagrama da Figura 3.36 apresenta o esquema de medição da resistência pelo equipamento. O resistor *shunt* permite a medição da corrente pela queda de tensão, um conjunto de relés se intercalam de forma sequencial, possibilitando a medição das resistências R_{X1X2} , R_{X1X3} , R_{X2X3} , R_{H1H2} , R_{H1H3} , R_{H2H3} .

A corrente utilizada no ensaio não deve ser superior a 15% da nominal do enrolamento considerado. Em todas as medições de resistência, deve-se tomar cuidado para reduzir ao mínimo os efeitos de autoindutância.

Na medição de resistência a frio, o tempo até a estabilização da corrente de medição deve ser registrado e utilizado para orientação para as medições de resistência a quente, após desligamento da alimentação no ensaio de elevação de temperatura, que será visto na Seção 3.3.9.

Figura 3.36 – Diagrama do equipamento MT001 para medição de resistência



Fonte: (VICENTE, 2006).

3.3.6 Medição da relação de transformação

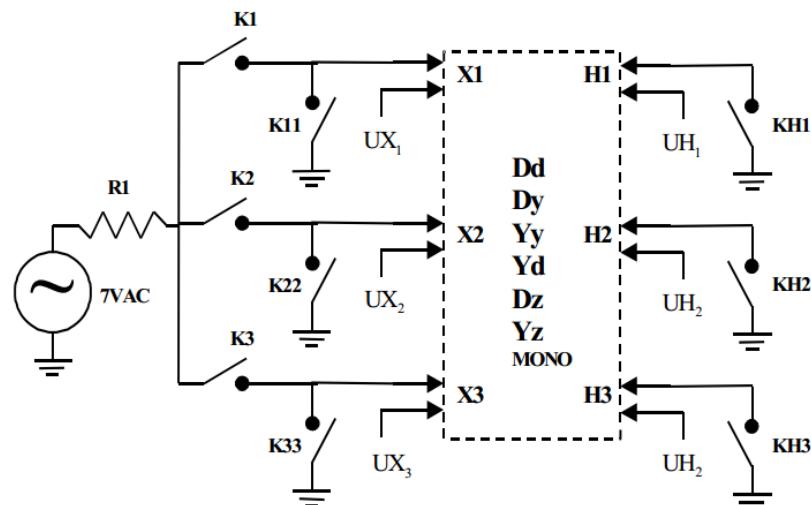
Esse ensaio tem a finalidade de medir a relação de transformação em cada derivação do transformador. A polaridade de transformadores monofásicos e o esquema de ligação para transformadores trifásicos deve ser verificada. Esse ensaio pode ser realizado de quatro formas, a saber: método do voltímetro, método do transformador-padrão, método do transformador de referência de relação variável e método do potenciométrico.

Como no caso do INRIMT faz uso do equipamento MT002, que utiliza o método do voltímetro, a explicação será focada nesse método. Utiliza-se dois voltímetros (com transformadores de potencial, se necessário), onde um deles mede a tensão do enrolamento de alta tensão e o outro mede o de baixa. Os voltímetros devem ser lidos simultaneamente. Em seguida, realiza-se um novo grupo de leituras com os dois voltímetros permutados. O resultado é dado pela média das relações obtidas nos dois grupos de medidas. Para compensar os erros dos voltímetros, esse processo é realizado de forma automática pelo equipamento MT002. O *hardware* utiliza uma fonte de tensão alternada de 60 Hz e 7 V de tensão senoidal que serão

aplicadas às buchas da BT por meio de relés. As tensões aplicadas na BT e induzidas na AT são lidas por um circuito de medição de seis canais (Vicente, 2006).

Para a realização do ensaio, liga-se os terminais do MT002 aos terminais do DUT. Então, aciona-se o programa RT MED e seleciona-se a opção de “Ensaio de relação de transformação”. A Figura 3.37 ilustra o *hardware* e as ligações feitas em um transformador trifásico. Vale ressaltar que o equipamento leva em consideração o esquema de ligação do transformador trifásico (estrela ou triângulo) para a realização das medições, o que deve ser informado no momento do cadastro do transformador no *software* RT MED, essa informação define quais relés de índice *K* serão ligados, sendo *K*1, *K*2 e *K*3 conectados às buchas da BT, *K*11, *K*22 e *K*33 responsáveis por ligar as buchas da BT à referência do equipamento, assim como os relés *KH*1, *KH*2 e *KH*3 são responsáveis por ligar a AT à referência do MONITEK9610. O circuito de medição é composto de seis canais, *UX*₁, *UX*₂, *UX*₃, *UH*₁, *UH*₂ e *UH*₃.

Figura 3.37 – Esquema de hardware do MT002.



Fonte: (VICENTE, 2006).

O ensaio é considerado satisfatório se a diferença entre o valor medido e o valor declarado pelo fabricante não ultrapassar 0,5%.

3.3.7 Medição de perdas em vazio e corrente de excitação

As perdas em vazio – ou perdas no ferro – consistem, principalmente, em perdas por histerese e perdas por correntes parasitas e são dependentes do valor, frequência e forma de onda da tensão de alimentação.

Segundo a norma ABNT NBR 5356-1, as perdas em vazio e corrente de excitação devem ser referidas à tensão senoidal pura com fator de forma 1,11 e medidas em um dos enrolamentos à frequência nominal, com tensão igual à nominal na derivação principal. Para outras derivações, a tensão deve ser igual à tensão de derivação apropriada. Os demais enrolamentos devem ser deixados em circuito aberto e quaisquer enrolamentos que podem ser conectados em triângulo aberto devem ter o triângulo fechado. As ligações podem ser feitas tanto nos enrolamentos de alta tensão quanto nos de baixa, sendo mais viável ligar na baixa tensão para facilitar a medição de tensão. A tensão do ensaio é ajustada por um voltímetro para que ele meça o valor médio da tensão retificada, mas esteja graduado de modo a fornecer o valor eficaz de uma tensão senoidal com o mesmo valor médio. O valor lido por esse voltímetro é U' . Concomitantemente, um segundo voltímetro medindo o valor eficaz da tensão deve estar conectado em paralelo com o voltímetro de valor médio, sendo este valor denominado U . Para que a forma de onda da tensão do ensaio seja satisfatória, U' e U devem ser iguais com desvio máximo de 3%. Caso a diferença entre U' e U seja maior que 3%, é dito que essa é uma tensão com forma de onda distorcida. Caso a forma de onda seja distorcida, uma correção deve ser aplicada conforme descrito na ABNT NBR 5356-1:2010, página 73.

As Equações (3.2) e (3.3) mostram a relação entre a perda medida e a perda corrigida durante o ensaio de perdas a vazio.

$$P_0 = P_m(1+d) \quad (3.2)$$

$$d = \frac{U' - U}{U'} \quad (3.3)$$

onde:

P_m são as perdas em vazio medidas;

P_o são as perdas em vazio corrigidas;

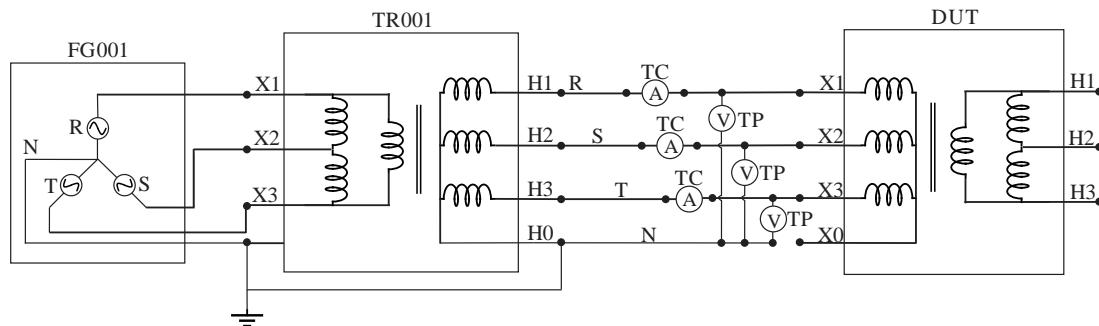
d é o fator de correção.

O valor eficaz da corrente de excitação e o valor das perdas são medidos simultaneamente. Deve-se, em seguida, ajustar a frequência e a tensão do ensaio para o valor nominal, pelo voltímetro de valor médio. É necessário tomar nota, simultaneamente, dos valores

de frequência, tensão eficaz, potência, tensão média e corrente. Após o desligamento do transformador, deve-se fazer uma nova leitura do wattímetro, que deve ser subtraída da anterior e o resultado é o valor correspondente somente às perdas no transformador sob ensaio.

No INRIMT a realização deste ensaio ocorre da seguinte forma: liga-se a fonte FG001 ao DUT através de garras nomeadas A, B e C, cada uma correspondente a uma bucha, X1, X2 e X3, respectivamente (considerando ensaio pela BT). Após, configura-se a fonte com o valor tensão nominal de baixa, esquema apresentado na Figura 3.38. O ensaio é monitorado pelo MT003 através do programa TRANS4, que monitora a tensão fornecida. Para realizar uma medição mais precisa, o programa registra oito pontos próximos à tensão nominal de ensaio: 4 pontos distribuídos em 2% abaixo da tensão nominal e mais 4 pontos distribuídos acima. Uma vez com os pontos registrados, o programa executa a interpolação desses pontos para obter o valor nominal de ensaio.

Figura 3.38 – Esquema ilustrativo da ligação para ensaio de perdas a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor

Como resultado de ensaio, o DUT não poderá apresentar perdas a vazio com valor superior a 10% do declarado pelo fabricante e também não podem ultrapassar os valores definidos na ABNT NBR 5440:2014 e no PRODIST.

3.3.8 Medição de impedância de curto-circuito e das perdas em carga

Esse ensaio tem como objetivos determinar as perdas ôhmicas nos condutores (cobre ou alumínio) que compõe as bobinas de alta e baixa tensão do transformador, bem como a impedância de curto-circuito. A ABNT NBR 5356:2010 determina que o teste deve ser

realizado à frequência nominal, aplicando-se uma forma de onda de tensão senoidal de valor suficiente para circular a corrente nominal nos terminais da bobina sob teste, normalmente o lado de alta tensão, mantendo os terminais outra bobina, normalmente o lado de baixa tensão, curto-circuitados. Recomenda-se o lado de alta tensão para alimentação por apresentar menor nível de corrente. Usualmente, o nível de tensão aplicado neste ensaio é inferior a 10% do valor nominal do transformador (Oliveira, Cogo, Policarpo, 1983).

Deve-se anotar, simultaneamente, os níveis de corrente e tensão aplicados ao enrolamento, bem como a potência absorvida pelo transformador. Além disso, deve-se realizar a correção de potência devido às perdas nos instrumentos de medição, podendo-se obter essas perdas de duas formas: (i) desconectando-se o transformador sob ensaio e medindo-se apenas as perdas devido aos circuitos de instrumentação ou (ii) calculando-se as perdas através dos parâmetros dos instrumentos de medição. Após obtida a perda nos instrumentos, utiliza-se a Equação (3.4), sendo essa a relação entre as perdas nos instrumentos, perdas medidas e a perda medida no transformador.

$$P_{trafo,Ta} = P_{medida} - P_{instrum} \quad (3.4)$$

onde:

$P_{trafo,Ta}$ são as perdas que realmente foram absorvidas pelo transformador (W);

P_{medida} são as perdas medidas durante o ensaio (W);

$P_{instrum}$ são as perdas nos instrumentos de medição (W).

Como forma de padronizar os resultados, a ABNT NBR 5356 exige que se convertam as perdas medidas à temperatura ambiente para um valor de perdas a uma temperatura de referência. Todavia, essa conversão não é direta, visto que as perdas são divididas em perdas Joule e perdas suplementares, ambas possuindo comportamentos diferentes em relação à variação de temperatura.

A Equação (3.5) apresenta o cálculo das perdas Joule à temperatura ambiente, para tanto, é necessário conhecer o valor da resistência a frio, medida quando o transformador esteve por, pelo menos, 3 horas desenergizado.

$$P_{Joule,Ta} = I_N^2 \cdot R \quad (3.5)$$

onde:

$P_{Joule,Ta}$ são as perdas Joule à temperatura ambiente (W);

I_N é a corrente eficaz nominal do transformador (A);

R é a resistência do enrolamento (Ω).

Em seguida, aplica-se a Equação (3.6):

$$P_{suplemen,Ta} = P_{trafo,Ta} - P_{Joule,Ta} \quad (3.6)$$

onde:

$P_{suplemen,Ta}$ são as perdas suplementares à temperatura ambiente.

Como as perdas Joule variam com a temperatura, é necessário que haja uma correção para uma temperatura de referência. A Equação (3.7) traz essa correção.

$$P_{Joule,Tref} = P_{Joule,Ta} \cdot \frac{k + T_{ref}}{k + T_a} \quad (3.7)$$

onde:

$P_{Joule,Tref}$ são as perdas Joule à temperatura de referência (W);

k é uma constante que pode assumir os valores descritos na Tabela 3.7, dependendo do tipo de material do condutor;

T_{ref} é a temperatura de referência adotada (°C).

Tabela 3.7 – Valores da constante k

Condutor		
	Alumínio	Cobre
k	225	235

Fonte: (ABNT NBR 5356-1, 2010).

Similarmente, para as perdas suplementares, temos a Equação (3.8).

$$P_{suplemen,Tref} = P_{suplemen,Ta} \cdot \frac{k + T_a}{k + T_{ref}} \quad (3.8)$$

onde:

$P_{suplemen,Tref}$ são as perdas suplementares corrigidas à temperatura de referência.

Finalizando, tem-se a Equação (3.9).

$$P_{trafo,Tref} = P_{Joule,Tref} + P_{suplemen,Tref} \quad (3.9)$$

onde:

$P_{trafo,Tref}$ são as perdas totais do ensaio corrigidas à temperatura de referência.

Além das perdas, este ensaio também permite a obtenção da impedância de curto-círcuito do transformador referida ao enrolamento sob ensaio, conforme as Equações (3.10), (3.11) e (3.12).

$$z = \frac{V_z}{I_N} \quad (3.10)$$

$$r = \frac{P_{trafo,Ta}}{I_N^2} \quad (3.11)$$

$$x = \sqrt{z^2 - r^2} \quad (3.12)$$

onde:

z é a impedância de curto-círcuito;

V_z é a tensão eficaz aplicada ao enrolamento sob ensaio;

r é a componente resistiva da impedância;

x é a componente reativa da impedância.

Como a impedância de curto-círcuito é usualmente expressa em porcentagem, as grandezas são normalizadas a uma base (Equações (3.13), (3.14) e (3.15)).

$$z\% = \frac{V_z}{V_{base}} \cdot 100 \quad (3.13)$$

$$r\% = \frac{P_{trafo,Ta}}{S_{base}} \cdot 100 \quad (3.14)$$

$$x\% = \sqrt{z\%^2 - r\%^2} \quad (3.15)$$

onde:

$z\%$ é a impedância expressa em porcentagem;

V_{base} é a tensão eficaz nominal do enrolamento sob ensaio;

S_{base} é a potência nominal do transformador;

$r\%$ é a componente resistiva expressa em porcentagem;

$x\%$ é a componente reativa expressa em porcentagem.

Entretanto, a componente resistiva da impedância varia com a temperatura e precisa ser corrigida à temperatura de referência (Equações (3.16) e (3.17)), enquanto que a componente reativa permanece constante.

$$r_{Tref} = \frac{P_{trafo,Tref}}{I_N^2} \quad (3.16)$$

$$r_{\%,Tref} = \frac{P_{trafo,Tref}}{S_{base}} \cdot 100 \quad (3.17)$$

onde:

r_{Tref} é a componente resistiva corrigida à temperatura de referência;

$r_{\%,Tref}$ é a componente resistiva corrigida à temperatura de referência e expressa em porcentagem;

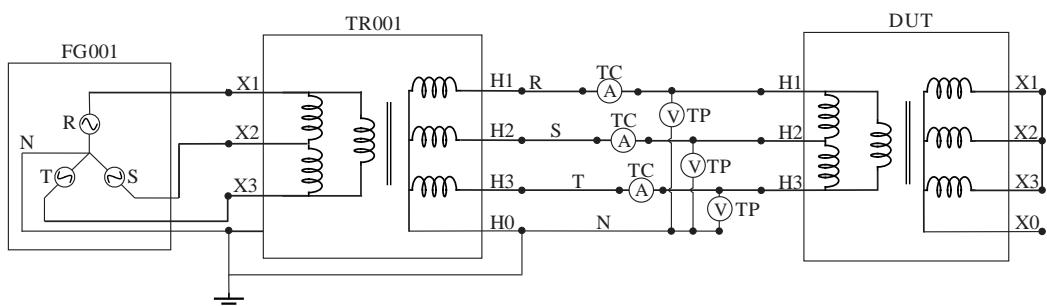
Assim, têm-se a impedância de curto-circuito corrigida à temperatura de referência e expressa em valor percentual apresentadas nas Equações (3.18) e (3.19), respectivamente.

$$z_{Tref} = \sqrt{r_{Tref}^2 + x^2} \quad (3.18)$$

$$z_{\%,Tref} = \sqrt{r_{\%,Tref}^2 - x_{\%,Tref}^2} \quad (3.19)$$

No INRIMT o ensaio é realizado pelo MT003, que realiza todos os cálculos citados nesse tópico. O MT003 é ligado aos terminais de AT do DUT e o ensaio é monitorado pelo *software* TRANS4. Entretanto, além do MT003, é necessário fornecer ao transformador sob ensaio a corrente nominal, o que é feito pela FG001, controlada pelo *software* FCATQ359. A Figura 3.39 mostra o esquema de ligação do ensaio.

Figura 3.39 – Esquema de ligação do ensaio de perdas em carga



Fonte: Elaborado pelo autor

Este ensaio por si só não tem caráter reprobatório, entretanto, as perdas totais no transformador ensaiado (perdas a vazio somadas às perdas em carga) não podem ultrapassar 6% do declarado pelo fabricante, e as perdas totais também não podem ultrapassar os valores definidos na ABNT NBR 5440:2014 e no PRODIST.

3.3.9 Ensaio de elevação de temperatura (temperatura no topo do óleo e temperatura média dos enrolamentos)

É importante ressaltar que durante o ensaio de elevação de temperatura, o transformador deve ser equipado com seus dispositivos de proteção e toda indicação durante o ensaio deve ser anotada.

Segundo a norma, o método da determinação da elevação de temperatura em regime permanente de transformadores imersos em óleo é o método de curto-círcuito. Existem outras opções, em casos especiais, como transformadores de pequena potência nominal. Nesse caso, executa-se o ensaio com aproximadamente a tensão e a corrente nominal, pela conexão de uma carga adequada. Um terceiro método também pode ser acordado, utilizando-se dois transformadores.

No método de curto-círcuito, o transformador não é submetido à tensão e corrente nominal ao mesmo tempo, mas às perdas totais calculadas, previamente obtidas pela determinação das perdas em carga à temperatura de referência e das perdas em vazio. O objetivo do ensaio é estabelecer a elevação da temperatura no topo do óleo em regime permanente com dissipação das perdas totais e estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos à corrente nominal com elevação de temperatura no topo do óleo determinada anteriormente.

Esse procedimento é realizado em duas etapas:

a) Aplicação das perdas totais máximas:

O objetivo desta etapa é estabelecer a elevação de temperatura do óleo sobre o meio de resfriamento. Primeiramente, as elevações de temperatura do topo do óleo e do óleo médio são determinadas quando o transformador é submetido a uma corrente de ensaio tal que a potência ativa medida seja igual às perdas totais do transformador (perdas a vazio somadas às perdas em carga). As temperaturas do óleo e do meio de resfriamento são monitoradas e os ensaios continuados até que uma elevação de temperatura do óleo em regime estável seja atingida, o que pode levar um tempo considerável. O ensaio é encerrado assim que a taxa de variação da elevação de temperatura no topo do óleo seja menor que 1°C durante um período de três horas. Se um registrador automático contínuo for utilizado, o valor médio da temperatura durante a última hora é tomado como resultado.

b) Aplicação da corrente nominal:

Esta etapa tem o objetivo de estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos sobre o óleo, à corrente nominal. Após o término da primeira etapa, o ensaio deve continuar imediatamente com uma corrente de ensaio reduzida ao valor nominal para a combinação de enrolamentos utilizada e essa condição deve ser mantida por uma hora com observação contínua

das temperaturas do óleo e do meio de resfriamento. Ao fim desse período, as resistências dos enrolamentos devem ser medidas, após uma desconexão rápida da alimentação e do curto-círcuito. A fim de determinar a elevação da temperatura dos enrolamentos na derivação máxima de corrente, o valor da elevação de temperatura do óleo a ser utilizado deve corresponder às perdas totais desta derivação. Durante essa etapa, a temperatura do óleo decresce. Portanto, os valores medidos da temperatura dos enrolamentos devem ser aumentados do mesmo valor da queda da temperatura do óleo médio, a partir do valor exato determinado na primeira etapa desse procedimento. A temperatura do topo do óleo é determinada por um ou mais sensores imersos no óleo na tampa do tanque, dentro dos poços para instalação dos sensores térmicos ou dentro das tubulações superiores que ligam o tanque aos radiadores ou trocadores de calor. Para o caso de transformadores de grande potência, é interessante empregar múltiplos sensores e o valor representativo deve ser a média das leituras. A medição da resistência dos enrolamentos é o que determina a temperatura média dos mesmos. No caso de um transformador trifásico, a medição é preferencialmente efetuada sobre a coluna central.

A relação entre um valor de resistência e às temperaturas de é dada pela Equação (3.20). A Equação (3.21) é uma derivação da anterior, com a temperatura de interesse isolada. Os valores de k estão presentes na Tabela 3.7 e dependem do tipo de material do enrolamento.

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k + T_q}{k + T_a} \quad (3.20)$$

$$T_q = \frac{r_2}{r_1} (k + T_a) - k \quad (3.21)$$

Onde:

- r_1 é a resistência obtida no ensaio de medição de resistência (Seção 3.3.5);
- r_2 é a resistência medida no ao final do período de uma hora da aplicação da corrente nominal (resistência à quente);
- T_q é a temperatura na qual r_2 foi medida.

Por fim, têm-se a Equação (3.22) que define a elevação de temperatura:

$$\Delta T = T_q - T_e \quad (3.22)$$

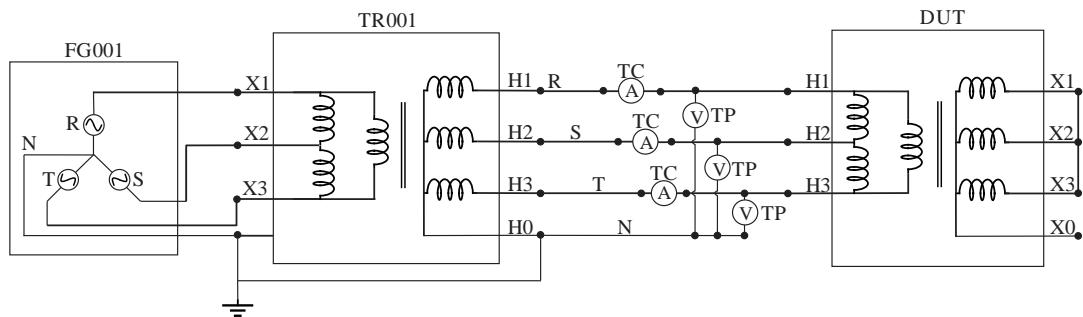
Onde:

- ΔT é a variação de temperatura do enrolamento sob ensaio;

b) T_e é a temperatura externa nas imediações do transformador.

Quando a resistência do enrolamento é medida após o desligamento da alimentação e da conexão de curto-circuito, o valor da resistência r_2 , imediatamente antes do desligamento deve ser determinado. De acordo com a norma, imediatamente após o corte da fonte de alimentação e da desconexão do curto-circuito, um circuito de medida em corrente contínua deve ser ligado aos terminais de cada enrolamento a ser medido. A resistência do enrolamento varia com o tempo, pois ele se resfria, por isso, ela deve ser medida durante um tempo suficiente para permitir a extração para o instante de corte. A fim de obter resultados precisos, as condições de resfriamento devem ser perturbadas o mínimo quando as medidas de resistência forem efetuadas. O esquema de ligação para o ensaio está apresentado na Figura 3.40, sendo o mesmo esquema do ensaio de perdas em carga.

Figura 3.40 – Esquema de ligação do ensaio de elevação de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 SUMÁRIO

Pode ser observado que o INRIMT possui estrutura para executar os ensaios propostos, contudo, ainda requer interferência humana em alguns processos, tais como:

- Fechamento de curto nos transformadores;
- Alteração dos TAPs do TR001, TCs e TP;
- Necessidade de se acessar os programas para realização dos ensaios de forma individual;
- Necessidade de elaboração dos documentos referentes à qualidade do laboratório.

A partir destes pontos, percebeu-se a necessidade de adaptação do laboratório a fim de se tornar um prestador de serviços apto a ser acreditado pelo INMETRO e ser um laboratório funcional e fonte de recursos para o Instituto de Redes Inteligentes bem como todo o Centro de Tecnologia da UFSM. Com isso, se deu o foco em automatizar os processos e aplicar o sistema de qualidade no

INRIMT. O próximo capítulo aborda como aprimorar os ensaios de modo a reduzir a interferência humana no processo, na supervisão de alguns ensaios e na elaboração de procedimentos que facilitem o trabalho da equipe técnica do INRIMT.

4 PROCEDIMENTOS PADRÃO E PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO

Este capítulo irá abordar a parte de procedimentos a serem implementados no laboratório, equipamentos, bem como o *hardware* e o *software* propostos para o sistema automatizado. Ressalta-se que cada ensaio tem sua necessidade específica, apesar de haver similaridades nas etapas realizadas e equipamentos de uso comum.

4.1 PROCEDIMENTOS DA QUALIDADE

O setor de qualidade do INRIMT é coordenado pelo Sistema de Gestão de Laboratórios do Centro de Tecnologia (SGLab CT), que busca implementar soluções em conformidade com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 e suas respectivas normas de referência. A implantação desses documentos é fundamental para a aplicação ao processo de acreditação do INRIMT no INMETRO. Segundo o Manual da Qualidade (MQ) do SGLab CT, a política possui os objetivos listados e indicadores descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Objetivos da qualidade e indicadores

Objetivos da qualidade	Indicadores
Atender os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025	Taxa de ações corretivas e/ou preventivas implantadas de não conformidades registradas em auditorias internas.
Buscar melhoria contínua e eficácia do sistema de gestão	
Garantir capacitação e competência técnica do pessoal	Taxa de eficácia das capacitações
Operar os laboratórios de forma consistente e imparcial para satisfazer os clientes	Avaliação da satisfação dos clientes Número de reclamações procedentes Resultado dos ensaios de proficiência Total de ensaios e/ou calibrações realizados

Fonte: Adaptado de (SGLAB CT, 2018).

Além do MQ, o sistema de gestão da qualidade (SGQ) prevê procedimentos, instruções, formulários de registro, atas, *e-mails*, entre outros documentos que auxiliam na implantação e manutenção do sistema (Manual da Qualidade, 2018). A Tabela 4.2 traz informações, em linhas gerais, sobre cada tipo de documento, nível de atuação e objetivo.

Tabela 4.2 – Estrutura dos documentos internos do SGLab CT

Tipo de documento	Nível	Objetivo
Manual da qualidade (MQ)	Estratégico	Estabelecer o Sistema de Gestão, políticas, diretrizes e estratégias de acordo com os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025
Procedimento de gestão (PG)	Tático	Descrever e estabelecer os processos pertinentes ao SGQ relacionado aos requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025
Procedimento de laboratório (PL)		
Procedimento de ensaio (PE)		
Procedimento de calibração (PC)		Descrever e detalhar atividades específicas dos processos de ensaio e calibração dos laboratórios. Os PEs e PCs são reservados para macroprocessos operacionais e as IGs, ILs e IUs para detalhamentos pontuais destes processos
Instrução de gestão (IG)	Operacional	
Instrução de laboratório (IL)		
Instrução de uso (IU)		
Formulários de registro de gestão (RG)		
Formulários de registro de laboratório (RL)	Registro das evidências objetivas do SGQ	Registrar as atividades conforme definidas nos PG, PL, PE, PC, IG, IL e IU
Formulários de registro de ensaio (RE)		
Formulários de registro de calibração (RC)		

Fonte: Adaptado de (SGLAB CT, 2018).

Entretanto, apesar de haver a gestão pelo SGLab CT, é responsabilidade do corpo técnico dos laboratórios elaborar os procedimentos, instruções e formulários referentes às suas respectivas atividades. Vale ressaltar que os PLs são elaborados pelo SGLab CT, pois são procedimentos gerais relativos a todos os laboratórios que estão sobre a sua gestão. No caso do INRIMT, trata-se de um laboratório que irá ofertar **ensaios** em transformadores de distribuição. Isto posto, a presente dissertação irá focar nos documentos voltados à realização e registro desses ensaios e atividades do laboratório (em negrito na Tabela 4.2) que estão relacionados a seguir:

- a) PEs: procedimentos para execução de ensaios. Devem ser elaborados como um “passo a passo” claro e detalhado do ensaio a ser executado.
- b) ILs: instruções de rotina do laboratório. Abrangem situações que não estão diretamente relacionadas aos ensaios, como limpeza, *backup* de arquivos, verificação de equipamentos, etc.
- c) IUs: instruções de uso de equipamentos. Têm o objetivo de orientar o uso de equipamentos presentes no laboratório, como um manual de instruções, mas voltado para as atividades do laboratório.
- d) RLs: formulários de registro das atividades de rotina do laboratório que não envolvem dados de ensaios, como, por exemplo, controle de limpeza do laboratório.
- e) REs: formulários onde são registradas informações referentes a ensaios.

4.2 EQUIPAMENTOS PROPOSTOS PARA A AUTOMAÇÃO DOS ENSAIOS

Considerando a estrutura atual do laboratório e os equipamentos disponíveis, buscou-se utilizá-los de modo a reduzir o custo de implantação da proposta de automação.

4.2.1 Chave seccionadora (CS001)

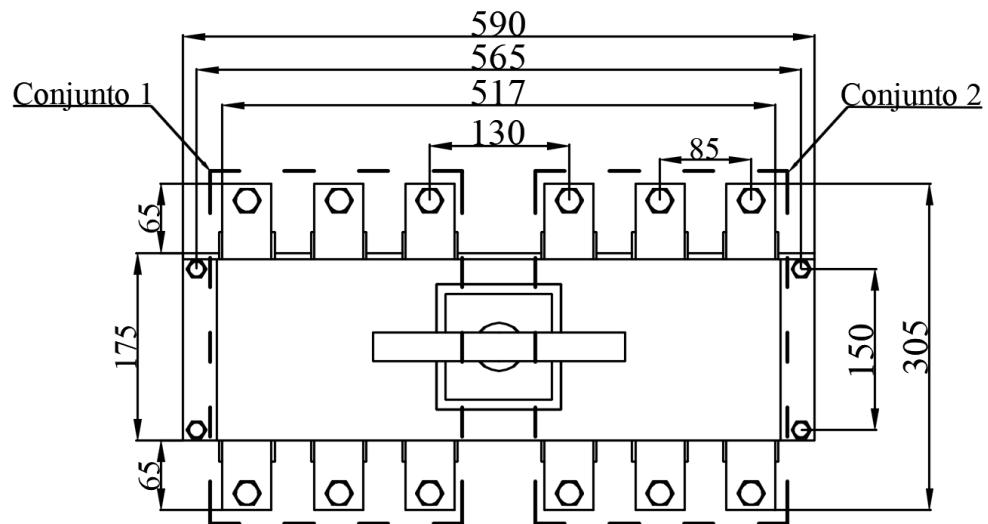
A chave seccionadora adquirida pelo INRIMT é do fabricante SCHAK®, modelo S3624, com capacidade para condução de corrente de até 2400 A para tensões alternadas de até 600 V. Seu esquema é ilustrado na Figura 4.1, onde pode ser observado nos quadros que há dois conjuntos para conexões trifásicas. A chave foi adquirida com o objetivo de facilitar a realização do curto-circuito em ensaios de medição de impedância de curto-circuito e perdas em carga e no ensaio de elevação de temperatura. Para que a CS001 pudesse atuar neste fim, foram necessárias as adaptações explicadas nas Seções 4.2.1.1 à 4.2.1.4.

4.2.1.1 Estabelecimento do curto-circuito

Para estabelecer o curto-circuito, em um dos lados de um dos conjuntos da chave foram inseridas barras de cobre, com dimensões de 220x50x5 mm, como é mostrado na Figura 4.2. Quando a alavanca é girada em sentido horário, a chave entra na posição “fechado” e, com isso,

o curto é estabelecido. Para a conexão com o transformador, foram indicadas cordoalhas de cobre com terminais para conexão nas buchas.

Figura 4.1 – Desenho da chave seccionadora, com medidas em mm.



Fonte: (SHACK, 2016).

Figura 4.2 – Chave Seccionadora após inserção das barras de cobre (posição aberta)



Fonte: Elaborado pelo autor.

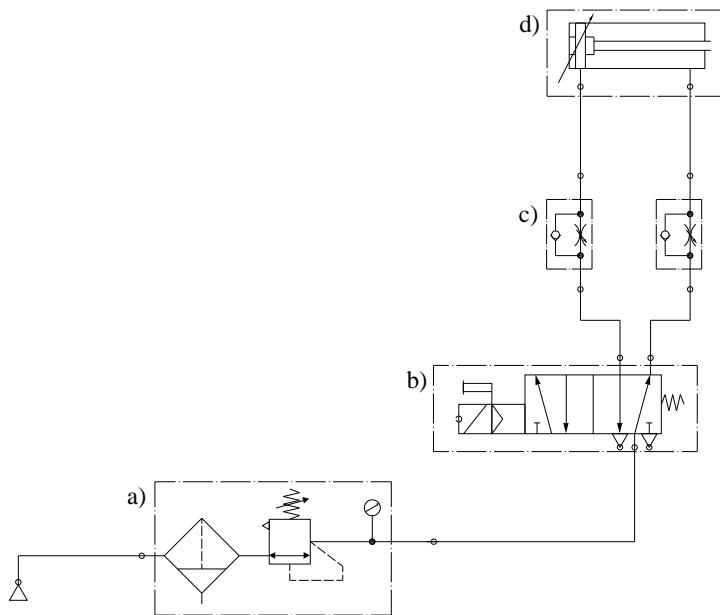
4.2.1.2 Rotação da chave

No entanto, o torque para realizar a rotação da chave e alternar as posições “fechado” e “aberto” é de 65 Nm, o que dificulta executar o processo de forma puramente manual. Destaca-

se que a velocidade de abertura do curto-circuito é um parâmetro muito importante durante a medição de resistência a quente. Para que a execução de um ensaio não dependa da força do metrologista ou responsável que estiver o executando, foi projetado um sistema para atuar na rotação da chave seccionadora, de modo a se obter uma maior praticidade e velocidade durante as comutações.

Inicialmente, foram estudadas possíveis soluções para a rotação da chave, sendo elas reduzidas a duas mais viáveis para o laboratório: uma solução utilizando motor de passo e a outra utilizando um sistema pneumático. Por interesse estratégico do prédio do INRI como um todo, optou-se por utilizar um sistema pneumático. O projeto é apresentado na Figura 4.3 e consiste no acionamento de um cilindro de dupla ação, comandado por válvula de controle direcional.

Figura 4.3 – Proposta de sistema pneumático para rotação da chave seccionadora



Fonte: Adaptado de (KAMINSKI JÚNIOR, 2018).

Os componentes do sistema são os seguintes:

- unidade de preparação de ar do tipo FR+L: este componente regula a pressão do sistema, filtra e lubrifica o ar comprimido, o que melhora a qualidade do ar inserido no sistema e ajuda na manutenção da vida útil dos componentes envolvidos. É apresentado na Figura 4.4. Para este projeto foi utilizado um componente com vazão mínima nominal de 1000 L/min, pressão de operação de 7 bar, e variação de pressão máxima de 1 bar;

Figura 4.4 – Unidade de preparação de ar



Fonte: (BOZZA, 2014).

- b) válvula de controle bidirecional: Como o próprio nome sugere, esta válvula irá controlar a direção do fluxo de ar, para realizar as operações de abertura e fechamento da chave. Foi escolhida para este projeto uma válvula solenoide de 220 V em corrente alternada, com 5/2 vias, tipo construtivo *spool*, vazão nominal de 1500 L/min, vazão mínima de 1000 L/min, e pressão de operação em 7 bar. O componente é apresentado na Figura 4.5;

Figura 4.5 – Válvula de controle bidirecional



Fonte: (CADIRIRI, [s.d.]).

- c) Válvula de controle de fluxo unidirecional: Este componente controla a velocidade de deslocamento do atuador rotativo (alínea d)). É apresentado na Figura 4.6;

Figura 4.6 – Válvula de controle de fluxo unidirecional



Fonte: (FLUIR PNEUMÁTICA, 2016).

- d) Atuador pneumático rotativo: Para realizar o trabalho do cilindro de dupla ação que consta no projeto, foi escolhido um atuador pneumático rotativo. Este dispositivo que irá atuar diretamente na rotação da chave, realizando o torque necessário para este fim. O componente escolhido é do tipo pinhão-cremalheira, atuação de 90 graus, dupla ação, com pressão de operação de 8 bar (devendo suportar até 10 bar), com amortecimento e torque suficiente para atuar na chave (acima de 65 Nm). É apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Atuador pneumático rotativo



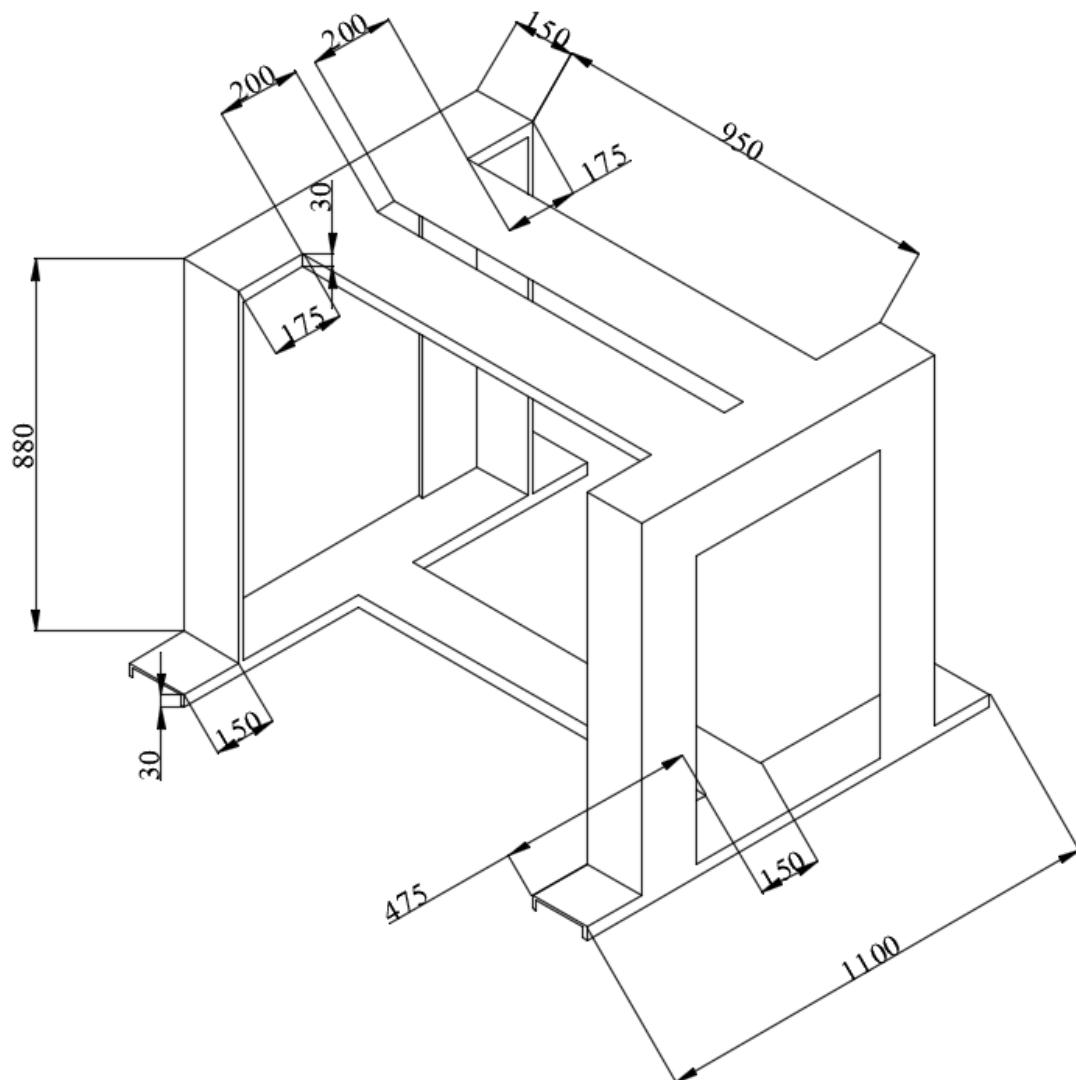
Fonte: (DUPLAÇÃO, [s.d.]).

4.2.1.3 Base para a chave

Para acomodar a chave CS001 e o sistema de rotação e facilitar sua utilização nos ensaios, foi projetada uma base para o equipamento. Para o projeto, apresentado na Figura 4.8, foi utilizado o *software* SolidWorks®. O *design* foi pensado de modo a atender da melhor forma

as necessidades do laboratório, bem como evitar possíveis deformações na estrutura pela sua utilização considerando o peso total do sistema.

Figura 4.8 – Projeto de base para chave seccionadora. Medidas em mm.



Fonte: Adaptado de (KAMINSKI JÚNIOR, 2018).

4.2.1.4 Custo do sistema de rotação

O processo de compra no INRI, assim como em qualquer instituição pública, deve seguir um conjunto de etapas, que são definidas pelo órgão que faz a gestão do recurso, e delimitam a possibilidade de fornecedores dos produtos. Logo, a pesquisa foi realizada com fornecedores

que estavam aptos a participar do processo de compra dos componentes. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores que corresponderam aos menores orçamentos válidos. Vale ressaltar que as barras de cobre não estão nesta tabela, pois o laboratório já as possuía, sendo somente necessária a realização da adaptação.

Tabela 4.3 – Custo do projeto para automação da rotação da chave CS001

Item	Quantidade	Unidade	Valor
Conjunto de preparação de ar FR+L	1	peça	R\$ 159,23
Válvula esfera	1	peça	R\$ 15,84
Tubo de poliuretano	20	metros	R\$ 50,00
Conector reto macho	9	peça	R\$ 19,94
Bucha de redução em latão	2	peça	R\$ 11,47
Válvula reguladora de fluxo	2	peça	R\$ 15,60
Válvula solenoide de controle direcional	1	peça	R\$ 66,00
Atuador pneumático rotativo	1	peça	R\$ 1.690,00
Compressor de ar	1	unidade	R\$ 1.649,00
Confecção da base da chave seccionadora	1	serviço	R\$ 694,00
Total			R\$ 4.371,00

Fonte: Elaborado pelo autor. Valores coletados em 2018 e 2019.

4.2.2 Quadro para comutação de taps

4.2.2.1 Projeto

Uma das ações que requerem interferência humana *in loco* é a comutação de *taps* tanto do TR001 quanto dos TCs e TP_s de medição para a adequação dos níveis de tensão e corrente requeridas nos ensaios. Para eliminar a necessidade da troca manual e tornar o andamento do ensaio mais fluido, foi projetado um sistema para a troca desses *taps* de forma automática.

O sistema tem como base a utilização de contatoras tripolares organizadas em um quadro em conjunto com os TCs e TP_s (Figura 4.9). O processo é ilustrado na Figura 4.10: as saídas de todos os taps do TR001 seriam conectadas em paralelo nas contatoras, nomeadas *k7* a *k11*, correspondentes aos níveis de tensão do transformador elevador (800 V, 1000 V, 1200 V, 1600 V e 2000 V). A saída das contatoras são ligadas a barramentos, e nesses são conectadas as entradas da contatoras *k12* a *k15*, que por sua vez são correspondentes aos níveis de corrente

dos TCs (10 A, 15 A, 30 A e 50 A). As saídas dos TCs são as fases “A”, “B” e “C” que são conectadas ao DUT. Os cabos nomeados “N” e “T” vêm direto do TR001. Em paralelo às fases “A”, “B” e “C” são conectadas as contatoras *k16* a *k18*, relativas às tensões de entrada dos TPs (220 V, 440 V e 2200 V).

O projeto foi idealizado para a utilização dos componentes sem comutação em carga. As contatoras foram dimensionadas de modo a suportar uma tensão de 2 kV, tensão correspondente ao maior *tap* do TR001. O controle da habilitação das saídas das contatoras é feito através de chaves seletoras, onde a posição da chave determina qual contadora estará habilitada (Figura 4.11) o que, por consequência, determinará qual *tap* estará habilitado. Para isso, são necessárias três chaves, uma para o TR001 com 5 posições, outra para os TPs, com 4 posições e outra para os TCs, com 3 posições. Ainda, podem ser utilizadas chaves que possuam uma posição a mais que o solicitado para criar um estado onde nenhum dos *taps* esteja habilitado.

4.2.2.2 Custo do sistema de comutação

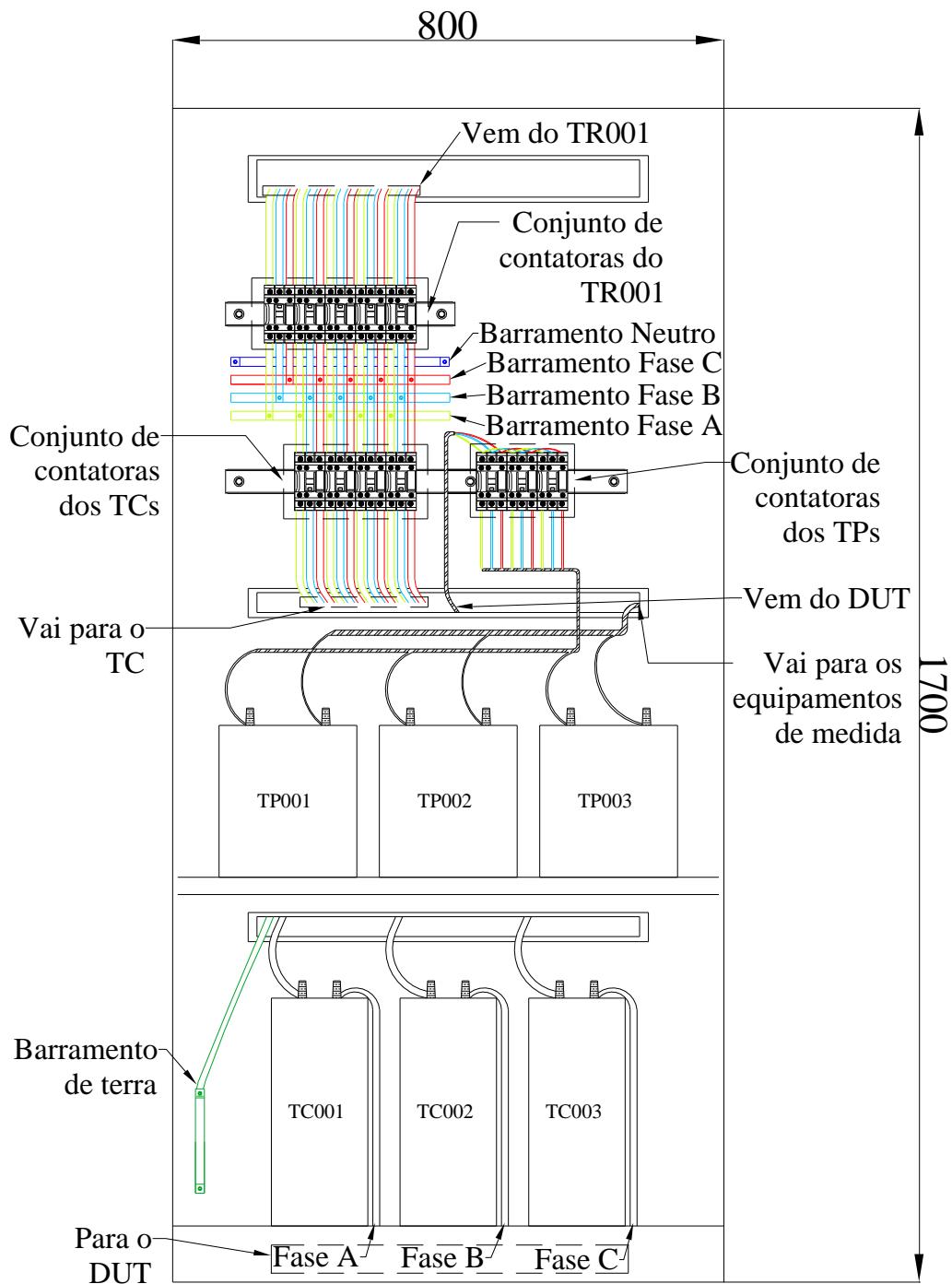
O mesmo processo para a aquisição de componentes do sistema de rotação da chave foi aplicado à aquisição dos componentes necessários para o quadro de comutação. Segue na Tabela 4.4 os valores de orçamentos válidos.

Tabela 4.4 – Custo do quadro de comutação

Item	Quantidade	Unidade	Valor
Contatoras	12	peça	R\$ 2.736,00
Componentes do quadro	1	peça	R\$ 8.807,00
Montagem do quadro	1	serviço	R\$ 4.193,00
Total			R\$ 15.736,00

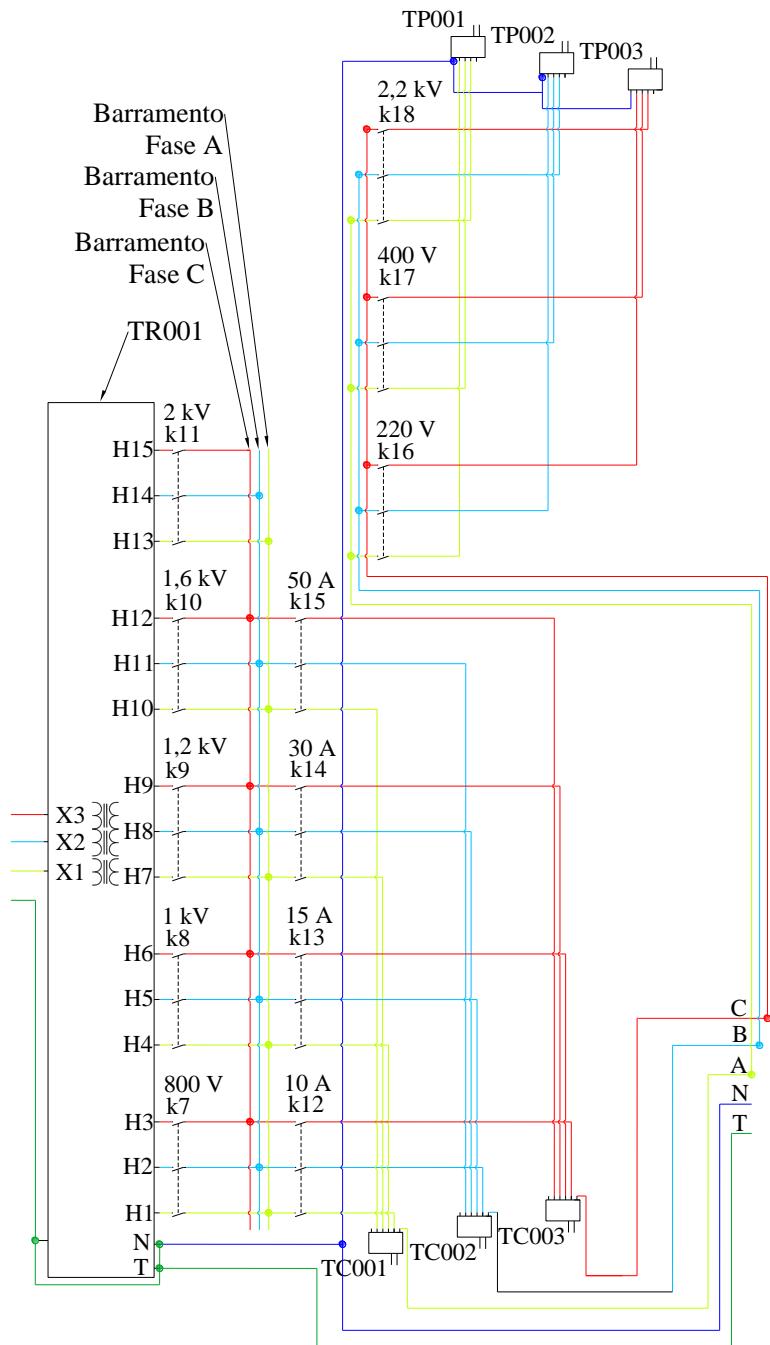
Fonte: Elaborado pelo autor. Valores coletados em 2018 e 2019.

Figura 4.9 – Projeto de quadro para comutação de taps do TR001, TCs e TPs (medidas em mm)



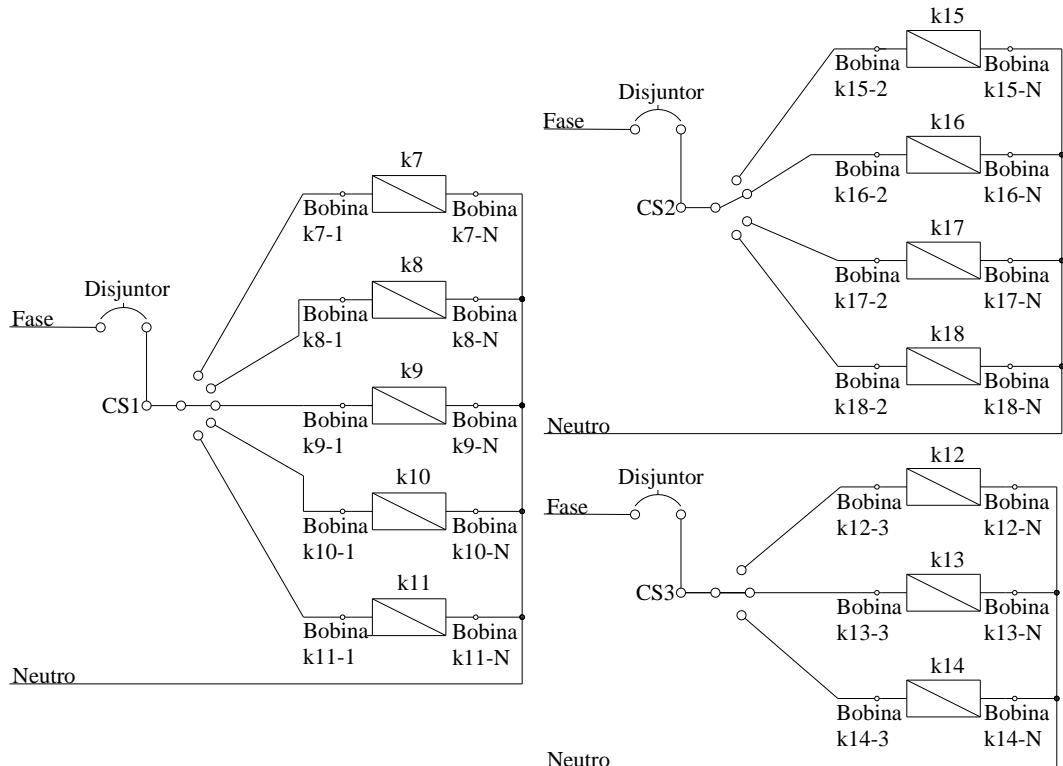
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.10 – Diagrama de ligação das contatoras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.11 – Esquema de ligação das chaves seletoras para controle dos taps



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO

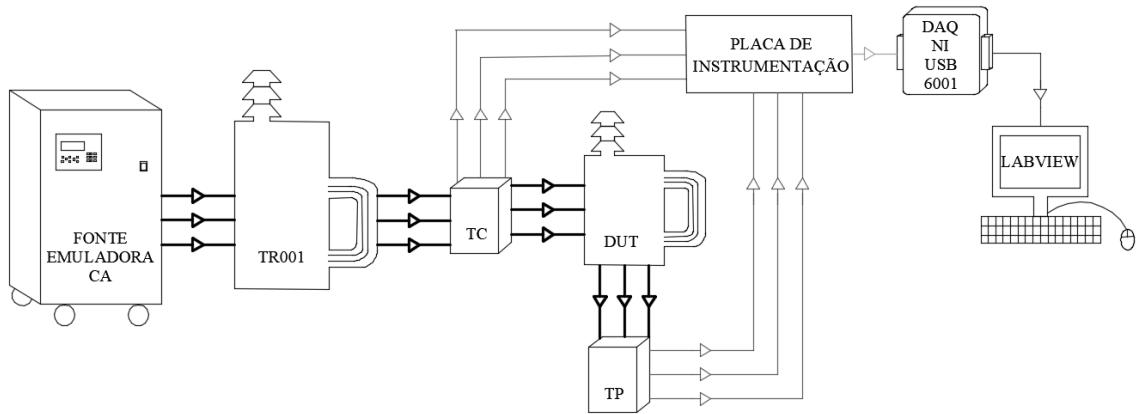
A Figura 4.12 apresenta a proposta do sistema supervisório para os ensaios. Pode ser vista a parte já existente no INRIMT, onde a FG001 alimenta o transformador elevador, seja ele o TR001 ou o TR002, em série com os TCs e o DUT. Paralelamente, têm-se a medição dos TPs.

À estrutura existente foram adicionados três itens: a instrumentação dos sinais vindos dos equipamentos de medição; um dispositivo de aquisição de dados (DAQ); e um *software* para interpretar os sinais e passar as informações necessárias ao operador.

4.3.1 Instrumentação

O sistema de medição do laboratório é composto de TCs e TPs, que recebem os sinais de tensão e corrente instantâneas que são fornecidos ao DUT. Como explicado na Seção 4.2.2, os TCs e TPs possuem *taps* na entrada, entretanto suas saídas têm *tap* fixo, sendo o sinal máximo no secundário do TP de 110 V e o no secundário do TC de 5 A (valores eficazes). As saídas são conectadas ao *MONITEK9451*[®] que faz o cálculo das grandezas envolvidas no ensaio.

Figura 4.12 – Exemplo de ligação entre equipamentos e comunicação com o computador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar a aquisição dos sinais de forma paralela ao *MONITEK9451*[®], foi idealizada uma placa de instrumentação que condiciona os níveis dos sinais de saída dos equipamentos de medição para valores suportados pelo DAQ utilizado no laboratório.

Na placa de instrumentação, o estágio de sensoriamento de tensão recebe o sinal vindo do secundário do TP, que é rebaixado e filtrado, através de um divisor resistivo e capacitores respectivamente. O sensoriamento de corrente recebe o sinal do secundário do TC e converte em tensão através de resistores *shunt* de precisão. A medida é feita através de uma conexão Kelvin, para evitar a influência do sistema de medição do sinal lido. As entradas dos canais de leitura de tensão e corrente foram projetadas considerando uma margem de segurança de 20% em relação ao valor de pico da saída dos TCs e TPs. A Tabela 4.5 mostra valores utilizados para o projeto, que foram estipulados considerando-se a operação do DAQ. Para o canal de corrente, um estágio adicional foi necessário para amplificar e filtrar o sinal vindo do resistor *shunt*, de modo a estar dentro alcance máximo de leitura o qual DAQ opera.

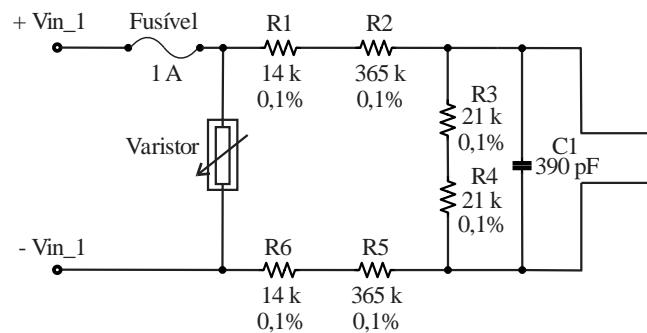
O projeto da placa de instrumentação ainda prevê um estágio de proteção para ambos canais de leitura, composto por diodos Schottky e amplificador *rail-to-rail*, sendo este tipo escolhido para se evitar perdas no amplificador operacional. A Figura 4.13 e a Figura 4.14 mostram os projetos montados no *software Eagle*[®] para os canais de tensão e corrente. Maiores detalhes sobre o projeto da placa de instrumentação podem ser vistos em (Konzen, 2019).

Tabela 4.5 – Parâmetros da instrumentação

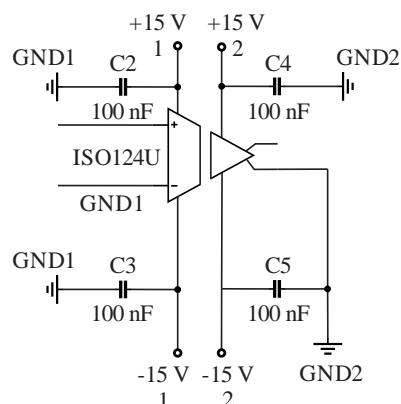
Parâmetro	Valor
Tensão máxima de entrada (pico)	190 V
Corrente máxima de entrada (pico)	8,5 A
Tensão nominal de entrada (eficaz)	110 V
Corrente nominal de entrada (eficaz)	5 A
Tensão máxima de saída de ambos canais (pico)	10 V
Frequência de amostragem	20 kHz
Número de canais	3 para tensão e 3 para corrente

Fonte: (Konzen, 2019).

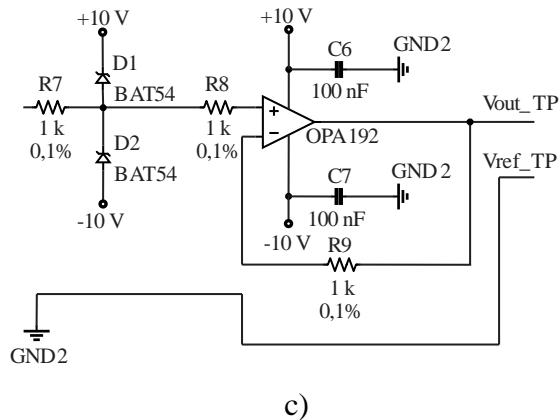
Figura 4.13 – Projeto para o canal de tensão: a) sensoriamento, b) isolamento e c) proteção



a)



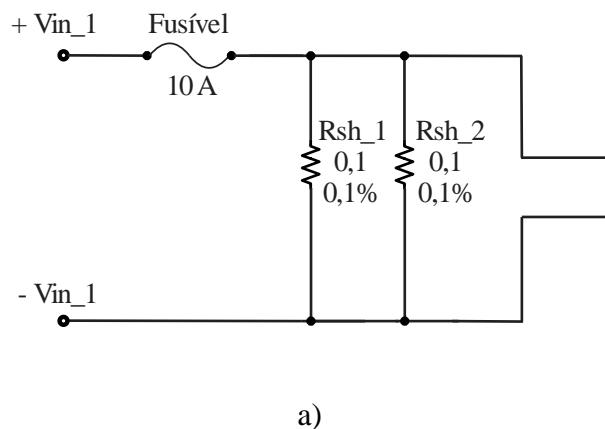
b)



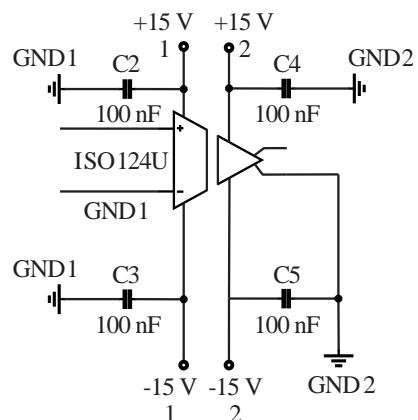
c)

Fonte: Adaptado de (KONZEN, 2019).

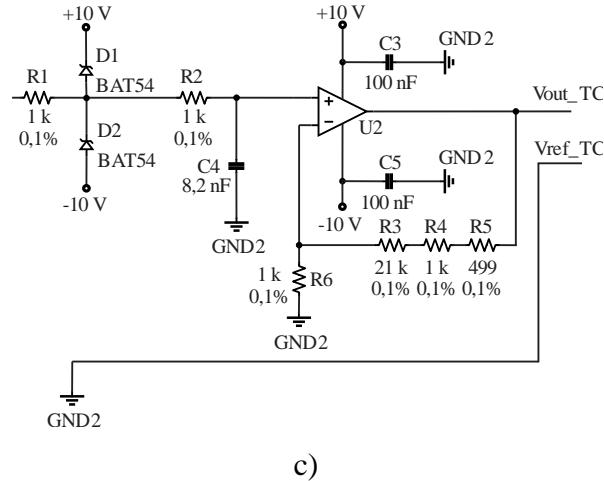
Figura 4.14 – Projeto para o canal de corrente: a) sensoriamento, b) isolamento e c) proteção



a)



b)



Fonte: Adaptado de (KONZEN, 2019).

4.3.2 Aquisição de dados

O DAQ presente no laboratório é o NI USB-6001 (Figura 4.15 da *National Instruments*®). O dispositivo possui 7 canais de leitura para sinais analógicos, com uma faixa de -10 V a 10 V (valores de pico), resolução de 14 bit e taxa de amostragem de 20 kS/s dividida entre os canais. Ou seja, quanto mais canais em operação, menor a taxa de amostragem.

Figura 4.15 – Dispositivo NI USB-6001



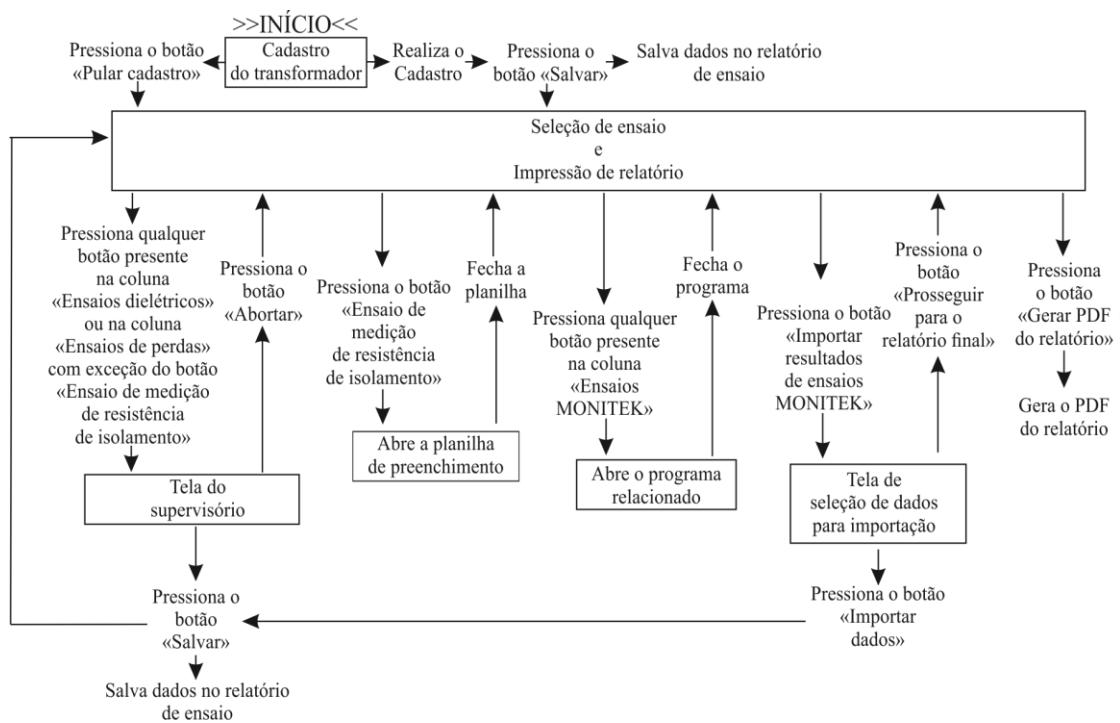
Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, [s.d.]).

4.4 Software de supervisão

Como informado no Capítulo 3, a proposta de automação buscou utilizar os equipamentos já existentes no laboratório e tornar o funcionamento ou manipulação deles mais eficiente, possibilitando processos mais rápidos durante a execução, ou reduzindo a interferência humana, com o objetivo de minimizar o erro associado. Isto posto, foi desenvolvido um *software* que utiliza os dados obtidos através dos equipamentos MT001, MT002 e MT003 (referenciados por equipamentos MONITEK abaixo, para facilitar a leitura) e os dados registrados manualmente em formulários preenchidos durante ensaios. Buscou-se também criar uma plataforma de visualização, quando fosse o caso, em especial para os ensaios que não possuíam um controle automático de sua execução. Entretanto, o sistema supervisório foi estendido aos ensaios de perdas. Ao final, todos os dados são exportados para um relatório, que está no modelo requerido pela gestão de qualidade.

O programa em questão foi desenvolvido utilizando-se o conceito de máquina de estados. Quando um estado estiver ativo os demais não estarão, o que reduz a ocupação da memória. A Figura 4.16 apresenta de forma resumida o fluxograma do *software*.

Figura 4.16 – Diagrama dos estados presentes no programa e suas relações



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.1 Tela de cadastro: dados do transformador

Na tela de cadastro do transformador, Figura 4.17, devem ser inseridas as informações contidas na placa de identificação do equipamento. As informações são salvas em um arquivo no formato Excel onde será montado o relatório de ensaio.

4.4.2 Tela de seleção de ensaio e impressão de relatório

O cliente que solicitar os serviços do INRIMT poderá optar por não realizar todos os 9 ensaios que o laboratório oferece. Isso posto, foi criada uma tela para seleção do ensaio de interesse (Figura 4.18) buscando-se aplicar a sequência de ensaios pré-estabelecida pelo laboratório na lógica de disposição da tela. Entretanto, o metrologista do INRIMT é treinado para saber quais ensaios são dependentes de outros e quais dados são necessários para a execução de cada teste.

Figura 4.17 – Tela de cadastro dos dados de placa transformador

Fonte: Elaborado pelo autor.

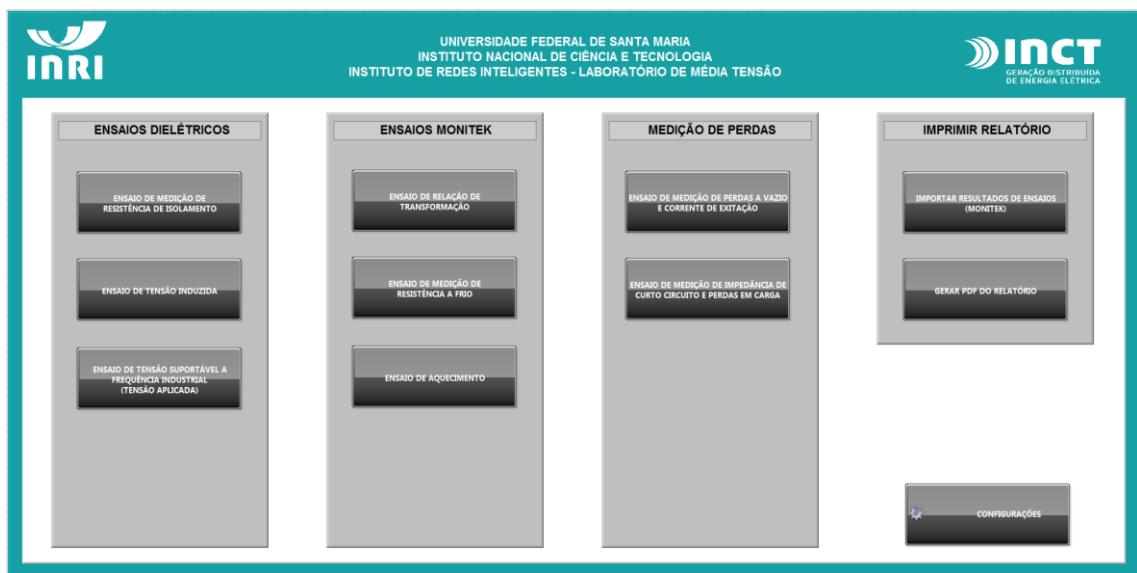
A área de seleção está dividida nas seguintes categorias:

- ensaios dielétricos: área destinada aos ensaios de medição da resistência de isolamento, ensaio de tensão induzida e ensaio de tensão suportável à frequência industrial (tensão aplicada);

- b) ensaios MONITEK: nesta coluna estão inclusos os ensaios que são realizados através dos equipamentos MONITEK, como o ensaio de medição de resistência, ensaio de relação de transformação e ensaio de aquecimento. Este último somente pode ser realizado após os ensaios de perdas e o ensaio de medição de resistência;
- c) ensaios de perdas: estão incluídos aqui o sistema supervisório dos ensaios de medição de perdas a vazio e corrente de excitação e ensaio de medição de perdas em carga e impedância de curto-circuito;
- d) imprimir relatório: a última coluna possui a opção de importação de dados dos ensaios realizados pelos equipamentos MONITEK e a opção para gerar o PDF do relatório de ensaio.

Ressalta-se que abrir qualquer opção de ensaio irá abrir também o PE e o RE associado, este último quando houver. Como esse detalhe é comum a todas as telas, excetuando-se a coluna de impressão de relatório, ele não será repetido na explicação a seguir.

Figura 4.18 – Tela de seleção de ensaios e impressão de relatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Ensaio de medição de resistência de isolamento

Ao selecionar-se a opção para a medição de resistência de isolamento, o *software* abre o “RE.INRIMT.01 Ensaio de medição de resistência de isolamento”, apresentado na Figura

4.19, para preenchimento dos valores medidos com o megômetro MG001. Ao se salvar os dados, os mesmos já estarão disponíveis para exportação para o relatório de ensaio.

4.4.4 Ensaio de tensão induzida de curta duração

Quando o usuário seleciona o ensaio de tensão induzida, é apresentada a tela da Figura 4.20. Os valores de tensão e de frequência de ensaio é informado ao usuário, sendo esses obtidos automaticamente através das informações inseridas no cadastro do transformador. No caso da frequência, o INRIMT adotou como padrão de ensaio um valor duas vezes maior que o nominal do transformador sobre ensaio.

Figura 4.19 – Formulário de ensaio de medição de resistência de isolamento

	A	B	C	D	E	F
1		Ensaio de Medição da Resistência de Isolamento				
2		RE.INRIMT.08				
3		Revisão 00 - 19/03/2019				
4						
5	Laboratório/Setor	INRIMT				
6	Código do cliente					
7	Data do ensaio					
8						
9						
10	Conexões	Resistência (Ω)				
11	AT - BT aterrado					
12	BT - AT aterrado					
13	AT e BT - terra					
14						
15	Observações:					
16						

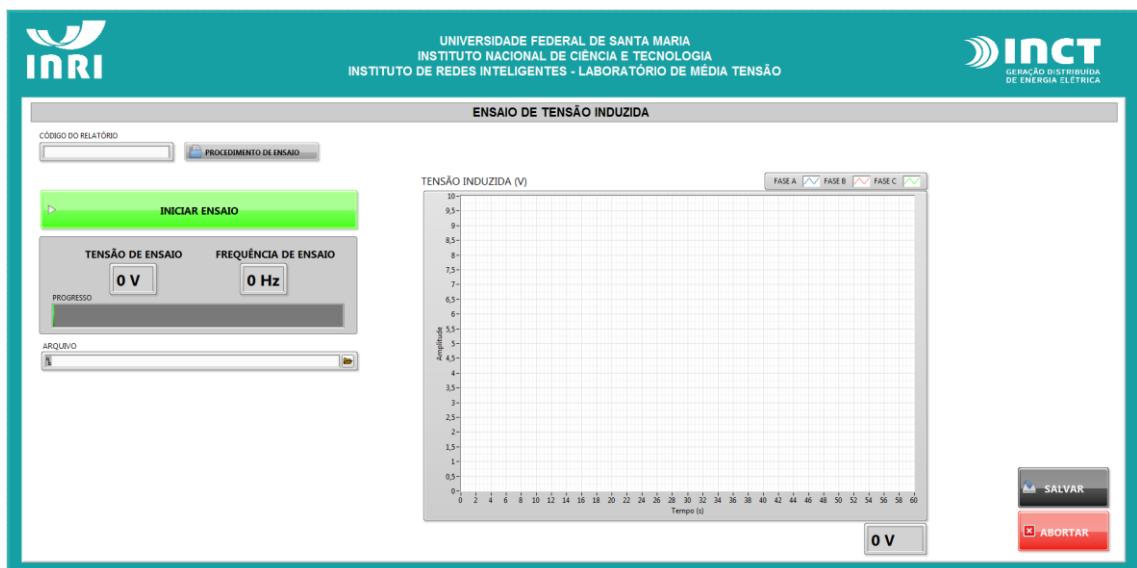
Fonte: Elaborado pelo autor.

A tensão será aplicada em forma de rampa, com o tempo de 1 s, sendo rápido o suficiente para a leitura dos instrumentos de medição, como solicita a norma ABNT NBR 5356 (Seção 3.3.2). Além do controle, a tela de supervisão possui um gráfico para mostrar o comportamento da tensão, um contador de tempo e uma barra de progresso. Ao final da aplicação da tensão de ensaio, a grandeza é decrescida para até menos de 1/3 do seu valor e, após isto, desligada. Caso haja colapso de tensão, a proteção da fonte atuará interrompendo o ensaio. Alternativamente, o metrologista poderá apertar o botão “ABORTAR” caso ocorra algum problema durante o teste.

4.4.5 Ensaio de Tensão suportável a frequência industrial

A tela apresentada na Figura 4.21 mostra a área do ensaio de tensão aplicada. Nela é informado ao metrologista o valor de tensão de ensaio, extraído da Tabela 2 da norma ABNT NBR 5356-3 (apresentada como Tabela 3.6 neste trabalho). Os dados são lidos da saída do TP004, em seguida é multiplicada a relação de transformação do TR002 e assim têm-se o valor de tensão que está sendo aplicado pela bucha de AT. Assim como no ensaio de tensão induzida, as rampas foram configuradas para obedecer aos critérios da norma, com tempo de subida e descida de 2 s.

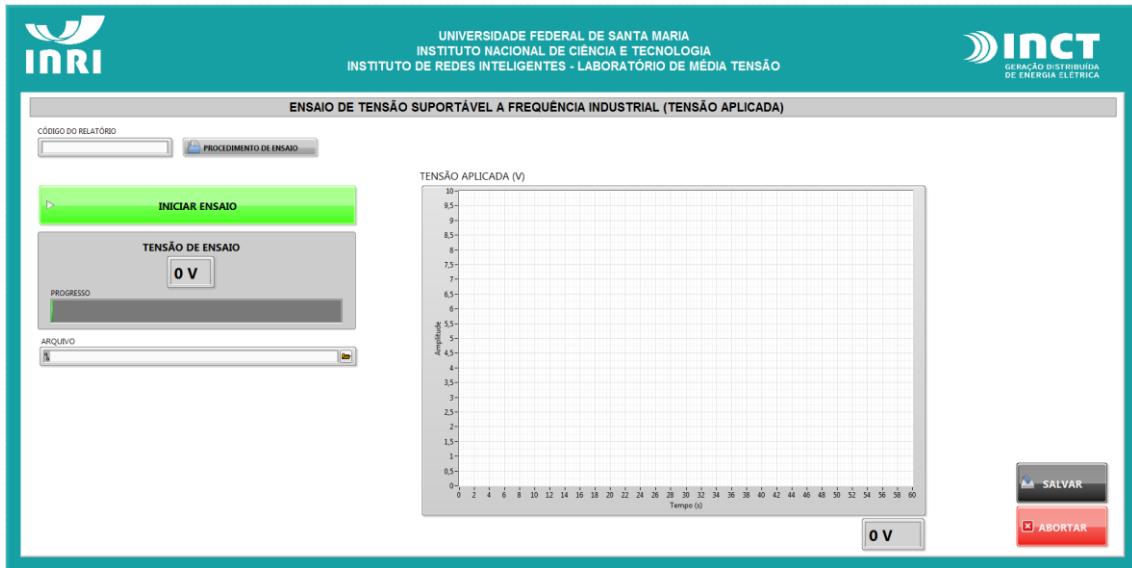
Figura 4.20 – Tela do ensaio de tensão induzida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao pressionar o botão “INICIAR ENSAIO” o *software* aplicará na fonte a sequência de rampas definida na norma ABNT NBR 5356-3. São observadas a tensão e a contagem do tempo de aplicação.

Figura 4.21 – Tela do ensaio de tensão aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em caso de colapso da tensão, a proteção da fonte irá atuar e a FG001 desligará a sua saída. Alternativamente, o metrologista poderá apertar o botão “ABORTAR” caso ocorra algum problema durante o teste.

4.4.6 Ensaio de medição da relação de transformação

De forma análoga ao ensaio de medição de resistência, a tela do ensaio de medição de relação de transformação possui o recurso de abrir o *software* RTMED® associado ao TTR MT002. Ao fim do ensaio, o *software* coleta os dados obtidos pelo MT002 e salva no relatório. O passo a passo de utilização do *software* é explicado na IU referente a esse equipamento.

4.4.7 Ensaio de medição de resistência

A tela de medição da resistência possui o recurso de abrir o *software* RHMED® associado ao miliohmímetro MT001. O passo a passo de utilização do *software* é explicado na IU referente a esse equipamento.

4.4.8 Ensaio de aquecimento

Esta tela funciona de maneira análoga às de ensaio de medição de relação de transformação, ou seja, nela está contido um botão que quando pressionado abre o *software* ELEVA®. O passo a passo de utilização do *software* é explicado na IU referente ao MT003.

Contudo, este ensaio apenas pode ser executado **após a realização dos ensaios de medição da resistência, perdas a vazio e perdas em carga, pois os dados desses são fundamentais para os parâmetros do ensaio de aquecimento.** Por convenção e praticidade, o INRIMT estabeleceu que este é o último a ser realizado, pela necessidade de dados de outros ensaios e pela demora em sua execução, em torno de 12 h.

4.4.9 Ensaio de medição da impedância de curto circuito e perdas em carga

Na Figura 4.22 é apresentado o controle do ensaio de perdas em carga, no qual é possível observar um gráfico onde estarão desenhadas as formas de onda de corrente e de tensão instantâneas, mostradores para os valores eficazes, perdas e impedância corrigidas, relação de transformação indicada para TCs e TPs e um mostrador com seta para acompanhamento do aumento da corrente fornecida ao DUT.

A corrente de ensaio, a relação de TCs e a relação TPs são definidos a partir dos dados inseridos no cadastro. Além dos mostradores, têm-se também o controle das variáveis de tensão e frequência fornecidos pela fonte FG001.

A aquisição da informação para este ensaio é feita através da instrumentação e do DAQ, explicados na Seção 4.3.1 e na Seção 4.3.2, respectivamente. No *software* são pré-estabelecidos os ganhos dos sensores de tensão e corrente da instrumentação e os valores do TC e TP

Para o tratamento dos dados enviados pelo DAQ ao programa, o LabVIEW® utiliza o bloco DAQmx®, onde são configuradas a taxa de amostragem e o número de amostras armazenado no *buffer*. O cálculo da potência medida se dá através da Equação (4.1). São empregadas 166 amostras em um ciclo de 60 Hz, considerando que são utilizadas duas entradas do DAQ, uma para tensão e outra para corrente, permitindo uma taxa de amostragem máxima de 10 kS/s.

$$P_{medida} = \frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k) \cdot i(k) \quad (4.1)$$

Onde:

- a) $v(k)$ é a tensão instantânea na amostra k ;
- b) $i(k)$ é a corrente instantânea na amostra k .

A potência realmente absorvida pelo transformador (P_{Traf}) é calculada a partir da subtração das perdas associadas ao circuito de instrumentação que, neste caso, é facilmente obtida a partir do conhecimento do nível de tensão aplicado no ensaio e da resistência interna do circuito de sensoriamento. O valor de P_{Traf} é, então, enviado aos blocos que realizam os cálculos apresentados nas Equações (3.4) à (3.9) , resultando assim nas perdas corrigidas à temperatura de referência (usualmente 75 °C). Para o cálculo da impedância de curto circuito são necessários os valores de tensão eficaz de ensaio e corrente nominal eficaz. Essas grandezas são calculadas através do bloco RMS, do LabVIEW®, que executa os cálculos conforme as Equações (4.2) e (4.3). Com esses valores, os demais blocos inseridos no programa executam sequencialmente as Equações (3.10) a (3.19), fornecendo como resultado a impedância percentual corrigida à temperatura de referência.

$$V_z = \sqrt{\frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k)^2} \quad (4.2)$$

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} i(k)^2} \quad (4.3)$$

Figura 4.22 – Supervisório para ensaio de perdas em carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

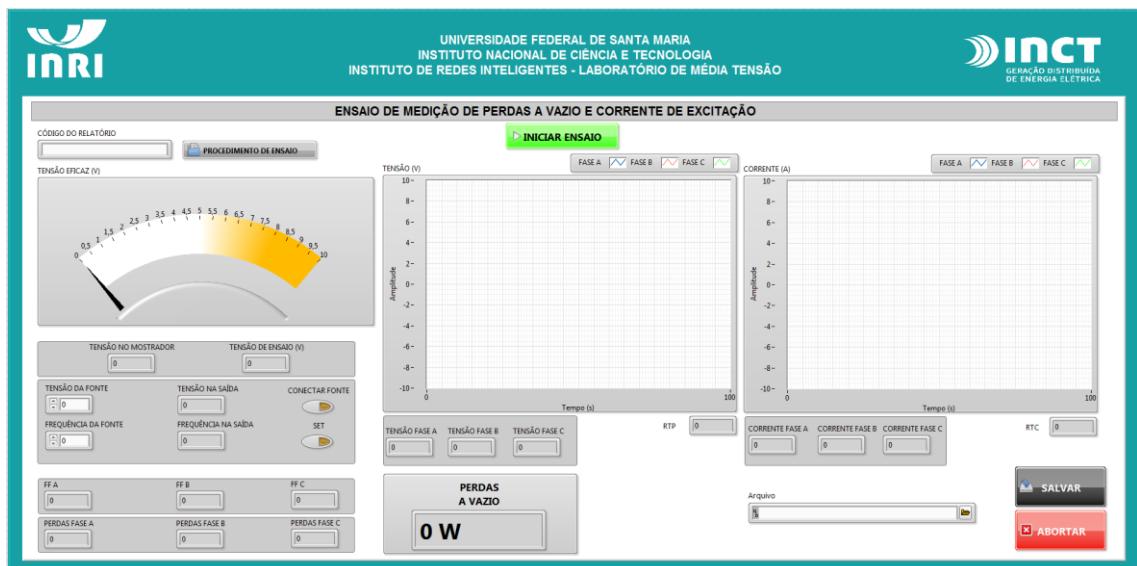
4.4.10 Ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação

Na tela da Figura 4.23 é apresentado o controle de ensaio de perdas a vazio. Sua apresentação é análoga ao ensaio de perdas em carga, com os gráficos de tensão e corrente instantâneas, mostradores com a tensão de ensaio, tensão atual, corrente atual, perdas e um mostrador com ponteiro para acompanhamento do aumento na tensão.

O método de aquisição é idêntico ao utilizado no ensaio de perdas em carga, empregando os componentes explicados nas Seções 4.3.1, 4.3.2.

O método de cálculo das perdas segue o apresentado na Equação (4.1). Entretanto, para uma maior precisão, pela alta dificuldade de se ter o valor exato da tensão nominal de baixa do transformador durante o ensaio, é realizada uma interpolação para o valor desejado. Primeiramente, são medidos dois pontos abaixo do valor nominal, em torno de 4% e 2%. Em seguida é medido um valor em torno ao valor nominal. Por fim, são medidos dois valores acima do valor nominal, 2% e 4%. Com essas medidas, o programa, através do bloco *fit*, traça uma curva e estima as perdas para o valor nominal de tensão.

Figura 4.23 – Supervisório para ensaio de perdas a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.11 Importar dados de ensaios (MONITEK)

Esta tela (Figura 4.24) faz a comunicação entre os ensaios realizados através dos equipamentos MONITEK e a *interface* em LabVIEW® para a geração do relatório de ensaio. É inserido o número de série do equipamento para localizar o arquivo referente ao ensaio que se deseja importar. O metrologista deve executar essa etapa antes de “Gerar PDF”.

4.4.12 Gerar PDF

Ao se pressionar este botão, o metrologista ou pessoa responsável pela execução do ensaio gera o PDF do relatório. Nele irá constar os dados de cadastro e as informações dos 8 testes listados acima. Caso algum dos ensaios não seja executado, o campo referente ao resultado do será preenchido com “--”, pois é orientado pelo CGCRE (INMETRO), órgão que realiza o processo de acreditação, que haja somente um modelo de relatório de ensaio. Quando solicitado, o nono ensaio ofertado pelo INRIMT, tensão suportável de impulso atmosférico, possui um relatório específico que é anexado ao relatório geral.

Figura 4.24 – Tela de importação dos dados de ensaios dos equipamentos MONITEK

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
INSTITUTO NACIONAL DE CIÉNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES - LABORATÓRIO DE MÉDIA TENSÃO

INCT
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA

IMPORTAR RESULTADOS DE ENSAIOS (MONITEK)

ENSAIO DE MEDIDA DE RESISTENCIA A FRIO

ENSAIO DE MEDIDA DA RELACAO DE TRANSFORMACAO

ENSAIO DE AQUECIMENTO

NÚMERO DE SÉRIE DO TRANSFORMADOR

NÚMERO DE SÉRIE DO TRANSFORMADOR

NÚMERO DE SÉRIE DO TRANSFORMADOR

IMPORTAR DADOS

IMPORTAR DADOS

IMPORTAR DADOS

PROSEGUIR PARA O RELATÓRIO FINAL

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.13 Custo associado ao *software*

Para a utilização do programa construído em LabVIEW® é necessária a aquisição da licença do *software*. A Tabela 4.6 traz o valor da licença LabVIEW® 2018. A desenvolvedora, *National Instruments*, fornece uma avaliação gratuita do produto.

Tabela 4.6 – Custo para utilização do programa construído em LabVIEW

Item	Quantidade	Unidade	Valor
Licença	1	und	R\$ 28.080,00

Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018).

4.5 SUMÁRIO

Este capítulo apresentou a proposta de automação dos ensaios, levando em consideração as oportunidades de melhoria levantadas no Capítulo 3. Com este foco, as ações buscaram reduzir do tempo de execução dos ensaios, reduzir a interferência humana na área de ensaios, reduzir o tempo de procura dos *softwares* e procedimentos correspondentes, criar um ambiente de monitoramento para ensaios, organizar as informações e imprimir relatório de ensaio de forma eficiente, tudo isso alinhado às exigências do SGQ. Os orçamentos foram inclusos como referência ao custo na época do desenvolvimento desta dissertação para a implantação da solução proposta, levando em consideração a realidade do laboratório, sua infraestrutura atual, equipamentos e contexto que o INRIMT está inserido, o que pode ser referência futura para a implantação de melhorias e automação em uma escala ainda maior dos serviços executados no laboratório.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 *Linhos gerais*

No presente trabalho foi apresentada uma contribuição à implantação de um Laboratório de Média Tensão para ensaios em transformadores de distribuição no Instituto de Redes Inteligentes. Para o desenvolvimento de tal sistema, primeiramente foi necessário revisar os conceitos técnicos que abrangem os ensaios, bem como os marcos legais e normativos que regem o trabalho laboratorial. Destacam-se aqui a norma ABNT NBR 5356 que versa sobre a realização dos ensaios, a ABNT NBR 5440 que, assim como o PRODIST, possui valores limites para os ensaios que envolvem perdas (ensaio de perdas a vazio e perdas em carga), a ABNT NBR ISO/IEC 17025 que trata do serviço de ensaios e calibração, referindo-se a todo o processo de qualidade que o laboratório deve implantar antes estar apto a solicitar uma acreditação pelo INMETRO e poder oferecer seus serviços de acordo com os marcos legais brasileiros. Como foi explicado, o processo de acreditação é o que dá ao laboratório a autoridade perante ao Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e à certificação de conformidade dos equipamentos.

Como visto durante a dissertação, o processo para tornar o INRIMT apto foi trabalhado desde a base, com a orientação vinda do corpo técnico do SGLab CT em relação aos procedimentos da qualidade, elaboração de procedimentos de ensaios, instruções de uso, formulário de registro e outros documentos pertinentes. Os referidos documentos estão sobre constante revisão, lembrando que o de controle de qualidade é feito de forma contínua. Além disso, foi necessária a realização de treinamentos em relação à própria norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 para que o corpo técnico do laboratório pudesse elaborar e implantar os documentos em questão.

Também foi necessária uma extensa revisão teórica sobre a realização dos ensaios que serão ofertados pelo INRIMT. O conjunto dos 9 ensaios está relacionado no Anexo A deste trabalho. Como visto no Capítulo 2 a norma trata de uma grande quantidade de testes que podem ser aplicados a transformadores de potência, entretanto os mais comuns são os ensaios de rotina e de elevação de temperatura, e o de impulso atmosférico no que tange os ensaios de tipo, todos estes presentes no escopo do INRIMT.

Cada teste realizado tem uma necessidade estrutural e peculiaridade na sua execução. Foram trabalhados aqui alguns pontos que podem ser melhorados a fim de tornar a execução dos serviços mais rápida e prática, diminuindo a interferência humana e promovendo mais segurança para os membros do laboratório, além de proporcionar maior confiabilidade nos

resultados dos ensaios. A estrutura existente no laboratório foi estudada e esquematizada para haver a detecção das oportunidades de melhoria, priorizando manter os equipamentos já existentes no INRIMT, quando fosse possível, para evitar maiores gastos.

Ressalta-se aqui alguns pontos levantados durante o desenvolvimento do trabalho:

- a) Comutação remota dos taps dos TCs, TPs e do Transformador Elevador: processo que facilita a comutação manual e reduz o tempo de preparo e execução dos ensaios de perdas, tensão induzida e elevação de temperatura;
- b) Fechamento de curto-círcuito de forma remota e automática: através desse recurso, o curto circuito durante os ensaios de perdas em carga e de elevação de temperatura poderá ser feito quase que instantaneamente. No caso do ensaio de elevação isso faz com que o ponto de medição da resistência a quente seja mais próximo do instante 0 s, onde a alimentação é retirada do DUT para a medição da resistência, o que torna a medição da resistência a quente mais precisa;
- c) Desenvolvimento de placa de instrumentação para leitura dos instrumentos de medida (TC e TP): a placa habilita a medição das grandezas de tensão e corrente através de outros instrumentos além dos MONITEK JMAN®, o que possibilita a criação de outro sistema de medição;
- d) Criação de sistema supervisório: O *software* desenvolvido associa os *softwares* já existentes, apresenta uma interface de controle para ensaios que não possuíam (ensaio de tensão induzida e ensaio de tensão aplicada), abre os procedimentos que devem ser seguidos durante cada ensaio, abre os documentos a serem preenchidos, quando existe a necessidade, e combina os resultados obtidos gerando um relatório nos moldes exigidos pelo sistema de gestão de qualidade.

5.2 Dificuldades enfrentadas

Os projetos foram elaborados e testados na medida do possível. Infelizmente o laboratório não possui ainda o recurso necessário para aplicar em sua totalidade o que foi idealizado. Além disto, o laboratório ainda trabalha na aquisição dos equipamentos para a realização dos ensaios de polaridade, sequência de fases, deslocamento angular e distorções harmônicas.

Outro obstáculo é o limite do que pode ser adquirido através da universidade, afinal, como falado no Capítulo 4, toda a compra no setor público necessita passar por uma série de regras para

assegurar que o órgão não seja lesado financeiramente, o que é perfeitamente justificável, mas torna a aquisição de qualquer item mais demorada e restringe os locais onde tal item pode ser adquirido.

Entretanto, vale ressaltar que a automação não é um requisito obrigatório para a acreditação, e sim estar de acordo com as normas citadas durante o trabalho. Isto posto, o INRIMT ao finalizar a implantação dos documentos elaborados e a aquisição dos equipamentos restantes poderá se submeter ao processo de acreditação realizado pelo CGCRE (INMETRO). Ao se conseguir os recursos necessários, o laboratório pode prosseguir com a implantação do projeto de automação proposto e melhorar a qualidade dos seus serviços.

5.3 Publicações vinculadas

O estudo desenvolvido durante a elaboração dessa dissertação proporcionou a publicação dos seguintes artigos:

Rodrigo O. de Miranda, Manuella L. Farias, Ana Paula G. Marchesan, Tiago B. Marchesan, Rafael C. Beltrame. Proposta de sistema de automação para aquisição de dados de ensaio de medição da impedância de curto circuito e perdas em carga em transformadores de distribuição. **XXII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2018**, João Pessoa, p. 6, 2018.

Rodrigo O. de Miranda, Ana Paula G. Marchesan, Élen S. Brodt, Manuella L. Farias, Rafael C. Beltrame, Tiago B. Marchesan. Revisão normativa de ensaios em transformadores de distribuição na América Latina. **International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2018**, São Paulo, p. 7, 2018.

Ana Paula G. Marchesan, Élen S. Brodt, Manuella L. Farias, Rodrigo O. de Miranda, Dionathan Zancan, Rafael C. Beltrame, Tiago B. Marchesan, Vitor C. Bender. Proposta de sistema supervisório de aquisição de dados para realização de ensaio de medição de perdas a vazio e corrente de excitação. **11th Seminar on Power Electronics and Control – SEPOC 2018**, Santa Maria, p. 5, 2018.

Rodrigo O. de Miranda, Ana Paula G. Marchesan, Manuella L. Farias, Giuliano F. F. Cattani, Vitor C. Bender, Rafael C. Beltrame. *Automation System Proposal for Measurment of Short Circuit Impedance and Load Loss in Distribution Transformers. Innovative Smart Grid Technologies – ISGT 2019*, Gramado, 2019.

5.4 Proposta para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, o autor sugere:

- a implantação dos projetos desenvolvidos;
- criação de um banco de dados para futuras comparações entre equipamentos, quando o cliente acordar com tal estudo;
- oferecimento de serviços de P&D para fabricantes em busca do desenvolvimento de novas tecnologias para transformadores de distribuição, algo que já acontece na UFSM e que pode ser expandido com o INRIMT. Claro, sempre tendo em mente que o Laboratório de Média Tensão enquanto prestador de serviço deve sempre manter a imparcialidade e a confidencialidade de seus resultados e operações.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005. p. 31.
- ABNT. NBR 5356-3: Transformadores de Potência. Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar. Rio de Janeiro, 2007. p. 44.
- ABNT. NBR 5356: Transformadores de Potência — Requisitos. Rio de Janeiro, 2010. p. 95.
- ABNT. Sistemas de gestão da energia — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2011. p. 31.
- ABNT. NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. p. 52.
- ABNT. **Conheça a ABNT**. 2018a. Disponível em: <<http://abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>>. Acesso em: 7 ago. 2018.
- ABNT. **Catalogo de normas**. 2018b. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br>>. Acesso em: 7 ago. 2018.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional — PRODIST. Módulo 3 — Acesso ao Sistema de Distribuição. 2012a. p. 86.
- ANEEL. Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012b. p. 1–4.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição — PRODIST. 2015. p. 24.
- ANEEL. **Conheça a Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/a-aneel>>. Acesso em: 7 ago. 2018.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional — PRODIST. Módulo 7 — Cálculo de Perdas na Distribuição. 2018. p. 27.
- ANSI. **About**. 2014. Disponível em: <https://www.ansi.org/about_ansi>. Acesso em: 27 ago. 2018.
- ARAÚJO, A. N. et al. Histórico da evolução de perdas em transformadores de distribuição no brasil e uma visão de futuro. **V CIERTEC — Seminário internacional sobre gestão de perdas, eficientização energética e proteção da receita no setor elétrico**, Maceió, p. 10, 2005.
- BELTRAME, R. (UFSM). Implantação de um laboratório para o ensaio de transformadores

- visando à confiabilidade e eficiência. Santa Maria, p. 27, 2017.
- BORGES, T. H.; TACHIBANA, W. K. A evolução da preocupação ambiental e seus reflexos no ambiente dos negócios: uma abordagem histórica. **XXV ENEGEP — Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, [s. l.], p. 5235–5242, 2005.
- BOZZA. **Catálogo de produtos**. São Bernardo do Campo, 2014. p. 47.
- BRANCO, P. ISO 50001: Norma mundial para a eficiência energética. **ABB**, [s. l.], p. 61–66, 2011.
- BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasil, 2001. p. 1.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Portaria nº 378 de 28 de setembro de 2010. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Transformadores de Distribuição em Líquido Isolante. 2010. p. 21.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria interministerial nº 104, de 22 de março de 2013. Aprova a Regulamentação Específica de Transformadores de Distribuição em Líquido Isolante e o seu respectivo Programa de Metas na forma constante dos Anexos I e II à presente Portaria. 2013. p. 7.
- BRASIL. NR 10 — Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade. 2016a. p. 14.
- BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Portaria nº 510, de 07 de novembro de 2016. Aprova os ajustes e esclarecimentos à Portaria Inmetro nº 378/2010. 2016b. p. 15.
- CADIRIRI. **Valvula pneumática**. [s.d.]. Disponível em: <<https://cadiriri.net.br/sobras-industriais/produto/marca/199-valvula-pneumatica.htm>>. Acesso em: 2 maio. 2019.
- CEN. **European standards**. 2008. Disponível em: <<http://www.cen.eu/cenorm/homepage.htm>>. Acesso em: 27 ago. 2018.
- CONPET. **Selo de Eficiência Energética Veicular**. 2011. Disponível em: <<http://www.conpet.gov.br>>. Acesso em: 30 ago. 2018.
- DASGUPTA, I. **Power transformers: Quality Assurance**. 1. ed. Nova Delhi: New Age International Publishers, 2009.
- DUPLAÇÃO. **Cilindro Pneumático Rotativo — Série R**. [s.d.]. Disponível em:

<<https://duplacao.com.br/produto/cilindro-pneumatico-rotativo-serie-r/>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

DZENE, I. et al. Application of ISO 50001 for Implementation of Sustainable Energy Action Plans. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 72, p. 111–118, 2015.

ELETROBRAS. **Relatório PROCEL 2017**, 2017. Disponível em: <www.procelinfo.com.br> ELETROPEÇAS. **Megômetro Digital Icel MG-3150 — Eletropeças Comercial Eletrônica Ltda.** [s.d.]. Disponível em: <www.eletropecas.com/Produto/megometro-digital-icel-mg-3150>. Acesso em: 22 abr. 2019.

ENERDATA. **World Power consumption | Electricity consumption**. 2017. Disponível em: <[https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html](http://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html)>. Acesso em: 3 maio. 2018.

FINOCCHIO, M. A. F. et al. Análise da Eficiência Energética do Transformador de Distribuição com Metal Amorfo. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, [s. l.], p. 10, 2015.

FLUIR PNEUMÁTICA. **Catalogo de produtos**, 2016.

FLUKE. **Multímetro Digital True-RMS Fluke 115**. [s.d.]. Disponível em: <www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/multimetros-digitais/fluke-115>. Acesso em: 22 abr. 2019.

ICEL. **Manual De Instruções Do Luxímetro Digital Modelo Ld-590**, 2012.

IEC. IEC 60076-1: Power transformers — Part 1: General. Genebra, 2000. p. 91.

IEC. IEC 60060-1: High-voltage test techniques — Part 1: General definitions and test requirements. Genebra, 2010. p. 152.

IEC. **About**. 2018. Disponível em: <<http://www.iec.ch/about/>>. Acesso em: 18 maio. 2018.

IEEE. **About**. 2017. Disponível em: <<https://www.ieee.org/about>>. Acesso em: 18 maio. 2018.

INMETRO. **PBE: Programa Brasileiro de Etiquetagem**. 2017. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

INMETRO. **Avaliação da Conformidade**. 2018. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/ac.asp?iacao=imprimir>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

KAMINSKI JÚNIOR, A. M. **Relatório de estágio curricular obrigatório**, 2018.

KIRSTEN, A. **Metodologia De Projeto E Otimização Do Conversor Dab Aplicado a Transformadores De Estado Sólido**. 2014. UFSM, [s. l.], 2014.

KONZEN, J. A. **Unidade de condicionamento de sinais como elemento de interface entre transformadores de instrumentação e dispositivo de aquisição de dados**. 2019. UFSM, [s.

l.], 2019.

- LEONARDO ENERGY. **What are the benefits of energy management and ISO 50001?** 2015. Disponível em: <<https://help.leonardo-energy.org/hc/en-us/articles/201941411-What-are-the-benefits-of-energy-management-and-ISO-50001->>. Acesso em: 18 jul. 2018.
- LUCIANO, B. A.; CASTRO, W. B. De. Transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de metal amorfó. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 6.1, p. 5, 2011.
- MARIMON, F.; LLACH, J.; BERNARDO, M. Comparative analysis of diffusion of the ISO 14001 standard by sector of activity. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 15, p. 1734–1744, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.003>>
- MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1920.
- MCFADYEN, S. **What is a rectifier transformer?** 2012. Disponível em: <<http://myelectrical.com/notes/entryid/121/what-is-a-rectifier-transformer>>. Acesso em: 6 jun. 2018.
- MEDEIROS, L. H.; FEIL, D. L. P.; MARCHESAN, T. B. Desenvolvimento de Transformadores de Distribuição de Elevada Eficiência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante Development of High Efficiency Distribution Transformers Employing Amorphous Core and Insulating Vegetable Oil. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, n. 3, p. 125–139, 2016.
- MKHAIMER, L. G.; ARAFEH, M.; SAKHRIEH, A. H. Effective implementation of ISO 50001 energy management system: Applying Lean Six Sigma approach. **International Journal of Engineering Business Management**, [s. l.], v. 9, p. 12, 2017.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Produtos**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/shop.html>>. Acesso em: 22 abr. 2019.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW 2018**. 2018. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/shop/labview/labview-details.html>>. Acesso em: 22 abr. 2019.
- NUNES, A. A. **Uma contribuição para projetos de transformadores monofásicos de média tensão**. 2011. UNIFEI, Itajubá, 2011.
- PILLAI, A. S.; ISHA, T. B. A Power-aware Multiprocessor Based Laboratory Automation and Resource Management System. **IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research**, [s. l.], p. 4, 2014.
- PROCEL. **Selo Procel**. 2006. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em: 30

ago. 2018.

REN21. Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial. **Ren21**, [s. l.], p. 31, 2016.
ROHDE&SCHAWARZ. RTM20xx Digital Oscilloscope User Manual. Munique, v. 1, p. 484, [s.d.].

SALCAS. **Termoresistência PT100 Salcas TR311.** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.salcas.com.br>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

SCC. **About.** 2018. Disponível em: <<https://www.scc.ca/en/about-scc>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

SEAD. Distribution Transformers Report Part 4 : Country Profiles SEAD Standards & Labelling Working Group Distribution Transformers Collaboration Part 4 : Country Profiles for Internationally-Comparable Test Methods and Efficiency Class Definitions for Distribu. [s. l.], p. 79, 2013.

SEVOV, L.; WESTER, C. Protection of Phase Angle Regulating Transformer Using Digital Relays. [s. l.], 2002.

SGLAB CT. Manual da qualidade. Santa Maria, p. 15, 2018.

SUPPLIER. **Fonte CA Trifásica.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.supplier.ind.br//produto/fontes-ca-trifasicas/8/fonte-ca-trifasica/213>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

TSP. **Breakdown of Electricity Generation by Energy Source | The Shift Project Data Portal.** 2016. Disponível em: <<http://www.tsp-data-portal.org>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

U.S. ENERGY INFROMATION ADMINISTRATION. **How much electricity is lost in transmission and distribution in the United States?** 2014. Disponível em: <<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=105&t=3>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

VICENTE, J. M. E. **Uma Contribuição à Automação de Ensaios em Transformadores de Potência em Média Tensão.** 2006. UNIFEI, Itajubá, 2006.

WOODS, D. D.; BILLINGS, C. E. Automation surprises. **Handbook of human factors and ergonomics**, [s. l.], v. 2, p. 1926–1943, 1997.

YOKOGAWA. **Instrument transformers – Product Guide**, 2014.

ANEXO A – Escopo planejado para o INRIMT

DESIGNAÇÃO DO LABORATÓRIO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA/INRI – INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES

ÁREA DE ATIVIDADE / PRODUTO	CLASSE DE ENSAIO / DESCRIÇÃO DO ENSAIO	NORMA E /OU PROCEDIMENTO
<u>MOTORES, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS ELÉTRICOS</u>	<u>ENSAIOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS</u>	
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO EM LÍQUIDO ISOLANTE	Resistência de Enrolamentos	ABNT NBR 5356-1:2010
	Relação de Transformação para Transformadores Trifásicos	
	Impedância de Curto-Círcuito e Perdas em Carga	
	Perdas em Vazio e Corrente de Excitação	
	Resistência de Isolamento	
	Elevação de Temperatura	ABNT NBR 5356-2:2010
	Tensão Suportável à Frequência Industrial	ABNT NBR 5356-3:2010
	Tensão Induzida de Curta Duração	
	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico	

ANEXO B – Documentos elaborados

(continua)

Nome
PE.INRIMT.01 R01 Ensaio de Medição de Resistência de Enrolamentos para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.02 R00 Ensaio de Medição de Resistência de Enrolamentos para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.03 R01 Ensaio de Medição da Relação de Transformação para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.04 R00 Ensaio de Medição da Relação de Transformação para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.05 R00 Ensaio de Medição de Impedância de Curto-Círcuito e Perdas em Carga para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.06 R00 Ensaio de Medição de Impedância de Curto-Círcuito e Perdas em Carga para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.07 R00 Ensaio de Medição de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.08 R00 Ensaio de Medição de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.09 R00 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.10 R00 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.11 R00 Ensaio de Tensão Induzida de Curta Duração para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.12 R00 Ensaio de Tensão Induzida de Curta Duração para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.13 R00 Ensaio de Elevação de Temperatura para Transformadores Trifásicos
PE.INRIMT.14 R00 Ensaio de Elevação de Temperatura para Transformadores Monofásicos
PE.INRIMT.15 R00 Ensaio de Medição da Resistência de Isolamento
PE.INRIMT.16 R00 Ensaio de Tensão Suportável de Impulso Atmosférico
IG.INRIMT.01.01 R01 Descrição das funções do pessoal do laboratório
IL.INRIMT.01.01 R00 Limpeza do Laboratório
IL.INRIMT.02.01 R00 Checagem do aterramento
IL.INRIMT.02.02 R00 Checagem intermediária
IL.INRIMT.08.01 R00 Fontes de incertezas para ensaios
IL.INRIMT.10.01 R00 Elaboração do relatório de ensaio
IL.INRIMT.10.02 R00 Critérios de aceitação dos ensaios
IU.INRIMT.02 R00 Configuração da Fonte Geral – FG001
IU.INRIMT.03 R00 Quadro de Comando Geral - QCG
IU.INRIMT.04 R00 Configuração do equipamento MONITEK 9930 JMAN e operação dos softwares compatíveis

ANEXO B – DOCUMENTOS ELABORADOS

(conclusão)

Nome
IU.INRIMT.05 R00 Configuração do equipamento MONITEK 9451 JMAN e operação dos softwares compatíveis
IU.INRIMT.06 R00 Configuração do equipamento MONITEK 9610 JMAN e operação dos softwares compatíveis
IU.INRIMT.07 R00 Instrução para cadastro de transformador
IU.INRIMT.08 R00 Mudança da Relação de Transformação de TCs e TPs
IU.INRIMT.09 R00 Mudança da Relação de Transformação do TR001
IU.INRIMT.10 R00 Captura de tela nos ensaios
IU.INRIMT.11 R00 Configuração de porta serial dos aparelhos MONITEK
RL.INRIMT.02 Acompanhamento das atividades de limpeza
RL.INRIMT.01 Cadastro de Clientes
RG.01.12 R00 Monitoramento da competência de pessoal INRIMT
RE.INRIMT.08 Ensaio de Medição Resistência de Isolamento
RE.INRIMT.06 Ensaio de Tensão Induzida de Curta Duração
RE.INRIMT.05 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial
RE.INRIMT.04 Ensaio de Medição de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação
RE.INRIMT.03 Ensaio de Medição de impedância de Curto-Círcuito e Perdas em Carga
RE.INRIMT.02 Ensaio de Medição da Relação de Transformação
RE.INRIMT.01 Ensaio de Medição de Resistência de Enrolamentos
RE.INRIMT.0 Ensaio de Elevação de Temperatura