

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

Pedro de Oliveira Bacin

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE UM
LABORATÓRIO DE ARCOS ELÉTRICOS PARA A
MEDIÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE

Santa Maria, RS, Brasil
2022

Pedro de Oliveira Bacin

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE UM LABORATÓRIO
DE ARCOS ELÉTRICOS PARA A MEDIÇÃO DA ENERGIA
INCIDENTE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Santa Maria, RS, Brasil
2022

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Bacin, Pedro de Oliveira, 1996 -

Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arcos Elétricos para a Medição da Energia Incidente / por Pedro de Oliveira Bacin - 2022.

166 p.; 30 cm.

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan

Coorientador: Daniel Pinheiro Bernardon

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2022.

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas de energia. 3. Arco elétrico. 4. Energia incidente. I. T.B. Marchesan, orient. II. D. P. Bernardon, coorient. Título.

Declaro, PEDRO DE OLIVEIRA BACIN, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

© 2022

Todos os direitos autorais reservados a Pedro de Oliveira Bacin.

Endereço: Av. Roraima, Nº 1000, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, Brasil, CEP: 97105-900, Prédio 09-E, Anexo A.

Fone: +5555999737196

Endereço Eletrônico: pedro.bacin@acad.ufsm.br

Pedro de Oliveira Bacin

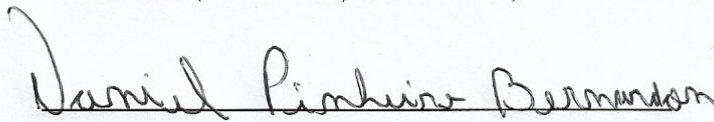
CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE UM LABORATÓRIO
DE ARCOS ELÉTRICOS PARA A MEDIÇÃO DA ENERGIA
INCIDENTE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

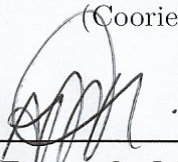
Aprovado em 09 de Agosto de 2022:



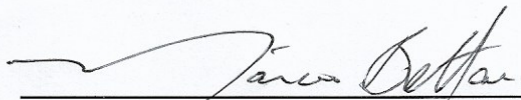
Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)



Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)



Márcio Bottaro, Dr. (USP)

Santa Maria, RS, Brasil
2022

DEDICATÓRIA

Às minhas amadas mãe e avó, Ana Patrícia e Nila, por todo o amor e apoio incondicionais prestados durante toda minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Ana Patrícia e Miguel, além de minha avó Nila, por todo suporte, amor e incentivo sem limites que permitiram que eu chegasse até aqui. Também agradeço ao meu irmão Júlio, por sempre estender a mão e me ajudar a enfrentar qualquer adversidade que atravessasse meu caminho.

Ao meu orientador, Tiago Marchesan, pela confiança depositada em mim, apoio e valiosas contribuições prestadas para que esse trabalho pudesse ser realizado. Ao meu coorientador, Daniel Bernardon, por ter oportunizado minha entrada no projeto que deu origem a este trabalho e por todos os ensinamentos prestados, desde a graduação.

Aos professores Rafael Beltrame, por todas as trocas de ideias, conhecimentos técnicos repassados e contribuições sempre muito pertinentes na elaboração de trabalhos científicos, e Vitor Bender, por ter me recebido da melhor maneira possível no INRI e colaborado muito para o meu desenvolvimento no âmbito prático, profissional e gerencial. Também agradeço ao professor Adriano de Moraes, por todo o conhecimento e tempo disponibilizados no laboratório de proteção de sistemas elétricos do CTISM, até a proteção do laboratório ser definida e ao engenheiro Fernando Borges, por todas as discussões técnicas acerca do projeto e funcionamento do laboratório de arcos elétricos.

Aos meus amigos e companheiros de gerência e de pós-graduação, Alexander, Antônio, Leonardo, Marcelo, Marina, Micael e Richard, pela amizade, conversas técnicas, almoços no RU, risadas e por compartilhar as lamentações que a pesquisa muitas vezes traz consigo. À equipe de ICs do laboratório de arcos elétricos, Ana Paula, Felipe e Gunnar, pelo apoio essencial em prol do funcionamento do laboratório, vocês têm uma contribuição muito valiosa nesse trabalho. Por fim, agradeço a todos os colegas do INRI-MT e LabCAE pelos momentos compartilhados durante estes dois anos.

Aos meus amigos de longa data, de Jaguari, da graduação, e da vida, pois quem tem um amigo tem tudo, e eu a tenho sorte de ter vários. Sozinho o caminho é mais difícil e árduo, e chegar até aqui sozinho seria muito mais difícil.

À CPFL Energia pelo apoio técnico e financeiro referente ao projeto “Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro”, desenvolvido no âmbito do programa de P&D ANEEL PD-00063-3069/2020. Este trabalho também contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por último, à Universidade Federal de Santa Maria e a todos os profissionais dessa instituição de excelência, por proporcionarem todas as condições para que este trabalho fosse elaborado, além do ensino gratuito e de qualidade propiciado a mim durante a graduação e a pós-graduação.

“Preocupando-se com uma única folha... você não verá a árvore.
Preocupando-se com uma única árvore... você não perceberá a floresta.
Não se preocupe com um único ponto. Veja tudo em sua plenitude...
sem se esforçar. Isso é o que verdadeiramente significa “ver”.”
Takehiko Inoue, Vagabond, v. 04, ch. 35, pgs. 19 e 20.

RESUMO

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE UM LABORATÓRIO DE ARCOS ELÉTRICOS PARA A MEDIÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE

AUTOR: PEDRO DE OLIVEIRA BACIN

ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

COORIENTADOR: DANIEL PINHEIRO BERNARDON

O arco elétrico é um evento de comportamento estocástico ocasionado pela ruptura da rigidez dielétrica entre dois ou mais condutores, a partir de condições que favoreçam o seu surgimento. O seu alto potencial destrutivo e a energia incidente decorrente geram elevados riscos elétricos a equipamentos e trabalhadores. Dada a gravidade deste evento, desde 1980, houve um aumento de pesquisas e ensaios laboratoriais no tema, que incidiram em uma melhor compreensão do fenômeno e que permitiram que fossem criados modelos matemáticos para a estimação da energia incidente, que possibilitaram o surgimento de medidas de segurança mais efetivas contra esses eventos. Ademais, foram criadas normas relacionadas ao assunto, como a *IEEE Std 1584-2018* e a *NFPA 70E*, no âmbito internacional, além de uma abordagem superficial em normas nacionais, como as *NR-6*, *NR-10* e a *ABNT NBR 16384:2020*. Apesar disso, devido à grande complexidade técnica e custos de implementação associados, ainda há poucos laboratórios de altas correntes no mundo que realizam pesquisas técnicas relacionadas aos arcos elétricos. Considerando as diversas situações que podem culminar em um arco elétrico, ainda há pontos a serem esclarecidos que não são diretamente abordados nas normas vigentes, como condições ambientais (por exemplo: umidade), além de configurações e espaçamentos entre eletrodos mais diversificadas. Assim, foi construído no Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da UFSM, em parceria com o grupo CPFL Energia, um laboratório com estrutura para gerar elevadas correntes de curto-circuito para ensaios de arcos elétricos. A estrutura do laboratório permite estabelecer o arco elétrico e controlar a sua extinção para tempos de até dois segundos, e dentre seus equipamentos, destacam-se um transformador trifásico de 5 MVA e três reatores monofásicos capazes de controlar os níveis das correntes de curto-circuito, além de um sistema de medição de energia incidente que envolve calorímetros com discos de cobre e uma câmera termográfica de alta velocidade para o registro de aumento de temperatura nos calorímetros. Os resultados encontrados certificam que o laboratório possui a capacidade de realizar ensaios de arcos elétricos de maneira segura através dos procedimentos laboratoriais adotados, e que o sistema de medição implementado consegue estimar a energia incidente de maneira confiável, para que no horizonte seja possível explorar questões que não são abordadas nas principais referências normativas atuais.

Palavras-chave: Arco elétrico. Energia incidente. Laboratório de altas correntes. *IEEE Std 1584-2018*. Procedimentos laboratoriais.

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF AN ARC FLASH LABORATORY FOR INCIDENT ENERGY MEASUREMENT

AUTHOR: PEDRO DE OLIVEIRA BACIN
ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN
COADVISOR: DANIEL PINHEIRO BERNARDON

The arc flash is an event of stochastic behavior caused by the rupture of the dielectric strength between two or more conductors, from conditions that favor its appearance. Its high destructive potential and the resulting incident energy generates a high electrical risks to equipments and workers. Given the severity of this event, since 1980, there has been an increase in research and laboratory tests in the subject, which focused on a better understanding of the phenomenon and which allowed the creation of mathematical models for the estimation of incident energy, which enabled the arising of more effective safety measure against these events. Also, standards related to the subject were created, such as IEEE Std 1584-2018 and NFPA 70E, at the international ambit, and national standards, such as NR-6, NR-10 and ABNT NBR 16384:2020, with a more superficial approach. Despite this, due to the great technical complexity and associated implementation costs, there are still few high-current laboratories in the world that carry out technical research related to electric arcs. Considering the different situations that can culminate in an arc flash, there are still points that need to be clarified and that are not directly addressed in the current regulations, such as weather conditions (for example: humidity), besides more diversified configurations and gaps between electrodes. Thus, a laboratory with a structure to generate high short-circuit currents for arc flash tests was built at the Institute of Intelligent Networks (INRI) of UFSM, in a partnership with CPFL Energy group. The structure of the laboratory makes possible to establish the arc flash and control its extinction for times up to two seconds, and among its equipments, stands out a three-phase transformer of 5 MVA and three single-phase reactors capable of controlling the levels of short-circuit currents, furthermore an incident energy measurement system that involves calorimeters with copper discs and a high-speed thermographic camera to record the temperature increase in the calorimeters. The results found certify that the laboratory succed to perform safely arc flash tests through the adopted laboratory's procedures, and that the implemented measurement system can reliably estimate the incident energy, in order that on the horizon it will be possible to explore issues that are not addressed in the main current normative references.

Keywords: Arc flash. Incident energy. High-current laboratory. IEEE Std 1584-2018. Laboratory procedures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	–	Acidentes ocasionados por arcos elétricos no Brasil de 2000 a 2013..	29
Figura 1.2	–	Acidentes fatais e ocupacionais com origem elétrica nos EUA.....	30
Figura 2.1	–	Exemplo de arranjo utilizado pela norma IEEE <i>Std</i> 1584-2002.	40
Figura 2.2	–	Exemplos de arcos elétricos.	43
Figura 2.3	–	Ilustração dos elementos de um arco elétrico	43
Figura 2.4	–	Propriedades físicas do arco elétrico.	46
Figura 2.5	–	Perigos associados aos arcos elétricos.	46
Figura 2.6	–	Categorias de EPI de proteção contra arcos elétricos da NFPA 70E®.	48
Figura 2.7	–	Representação dos calorímetros utilizados no laboratório.	50
Figura 2.8	–	Arranjo de medição da energia incidente.	52
Figura 2.9	–	Limites de aproximação de acordo com a NFPA.	55
Figura 2.10	–	Configurações entre eletrodos utilizados pela IEEE <i>Std</i> 1584-2018. .	59
Figura 2.11	–	Vista superior da distribuição da EI conforme o ambiente do ensaio.	60
Figura 2.12	–	Resumo da modelagem matemática da norma IEEE <i>Std</i> 1584-2018.	62
Figura 3.1	–	Localização do laboratório de arcos elétricos implementado.	69
Figura 3.2	–	Planta baixa do INRI-AF contendo os principais equipamentos.	70
Figura 3.3	–	Diagrama unifilar da sala de máquinas.	71
Figura 3.4	–	Rede em média tensão que alimenta o laboratório de arcos elétricos.	72
Figura 3.5	–	Chave seccionadora utilizada no laboratório.	73
Figura 3.6	–	Para-raios utilizado no laboratório.	74
Figura 3.7	–	TP utilizado no laboratório.	75
Figura 3.8	–	TCs empregados no laboratório.	76
Figura 3.9	–	Disjuntor a vácuo VBW utilizado no laboratório.	77
Figura 3.10	–	Relé utilizado no laboratório.	78
Figura 3.11	–	Diagrama-resumo do esquema de controle e proteção do laboratório.	81
Figura 3.12	–	Reatores monofásicos conectados ao transformador de potência.	82
Figura 3.13	–	Dados de placa dos reatores monofásicos.	83
Figura 3.14	–	Transformador de potência utilizado no laboratório.	84
Figura 3.15	–	Dados de placa do transformador de potência trifásico.	85
Figura 3.16	–	Quadro de comando da sala de máquinas.	86
Figura 3.17	–	Suporte dos eletrodos.	88
Figura 3.18	–	Suporte metálico com os calorímetros instalados.	89
Figura 3.19	–	Câmera termográfica modelo FLIR A6753sc utilizada no laboratório.	90
Figura 3.20	–	Quadro de comando da sala de controle.	92
Figura 3.21	–	Monitoramento da câmara de ensaios	93
Figura 3.22	–	Circuito modelado para o estudo do AMT.	95
Figura 3.23	–	Imagens panorâmicas internas do laboratório de arcos elétricos.	97

Figura 3.24 – Fluxograma da função dos equipamentos do laboratório.....	98
Figura 4.1 – Principais configurações do relé de BT utilizado nos ensaios.	101
Figura 4.2 – Tela de oscilografia do relé.	102
Figura 4.3 – Exemplo demonstrativo dos valores instantâneos de corrente de arco.	104
Figura 4.4 – Correntes de arco antes e após a aplicação do filtro.	104
Figura 4.5 – Tela principal do <i>software</i> ResearchIR®.	106
Figura 4.6 – Demais opções do <i>software</i> ResearchIR® utilizadas.	106
Figura 4.7 – Registros da temperatura no calorímetro de maior ΔT antes e após o ensaio.	108
Figura 4.8 – Identificação da posição dos calorímetros.	109
Figura 4.9 – Gráfico de elevação de temperatura em cada calorímetro.	109
Figura 4.10 – Visualização da gravação do ensaio de arco elétrico.	111
Figura 4.11 – Fluxograma-resumo dos procedimentos metodológicos do laboratório.	116
Figura 5.1 – Ensaio HOA.	118
Figura 5.2 – Gráfico da ΔT nos calorímetros para o ensaio na configuração HOA.	119
Figura 5.3 – Registros da temperatura no calorímetro de maior ΔT para a configuração HOA.	119
Figura 5.4 – Ensaio VOA.	120
Figura 5.5 – Gráfico da ΔT nos calorímetros para o ensaio da configuração VOA.	121
Figura 5.6 – Registros da temperatura no calorímetro de maior ΔT para a configuração VOA.	122
Figura 5.7 – Medição da energia incidente com a variação das correntes de arco.	124
Figura 5.8 – Aumento da EI com a redução das distâncias de trabalho.	125
Figura 5.9 – Medição da EI com a variação do espaçamento entre eletrodos.	127
Figura 5.10 – Medição da energia incidente com a variação da umidade relativa. ...	129
Figura A.1 – Algumas medidas de proteção coletiva conforme a NR-10.	149
Figura A.2 – Recomendações gerais de proteção individual no trabalho com eletricidade das NRs 6 e 10.	150
Figura B.1 – Características elétricas de um forno a arcos elétricos.	151
Figura D.1 – Modelo de relatório de ensaio.	155
Figura E.1 – <i>Link</i> e <i>QR code</i> exemplificando a gravação termográfica do ensaio. .	157
Figura E.2 – <i>Link</i> e <i>QR code</i> das gravações dos ensaios de arcos elétricos realizados.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificações da chave seccionadora utilizada no laboratório.	73
Tabela 3.2 – Especificações do para-raios utilizado no laboratório.	74
Tabela 3.3 – Especificações do TP utilizado no laboratório.	75
Tabela 3.4 – Especificações dos TCs utilizados no laboratório.	76
Tabela 3.5 – Especificações do disjuntor a vácuo VBW.	78
Tabela 3.6 – I_{bf} estimada na BT do laboratório para cada interligação entre <i>taps</i> . ..	83
Tabela 3.7 – Especificações da câmera termográfica.	90
Tabela 3.8 – Funcionamento do quadro de comando da sala de controle.	92
Tabela 3.9 – Valores de impedâncias considerados no estudo de AMT.	95
Tabela 3.10 – Perturbações estimadas para ensaios de arcos elétricos com 1,1 kV. ..	96
Tabela 4.1 – Ensaio utilizado na apresentação da metodologia de aquisição e tratamento de dados.	100
Tabela 4.2 – Descrição da <i>interface</i> da tela de oscilografia do relé.	102
Tabela 4.3 – Descrição das opções de configuração da tela principal do <i>software</i> ResearchIR [®]	106
Tabela 5.1 – Configurações dos ensaios HOA e VOA comparados.	117
Tabela 5.2 – Comparação das medições da EI nos ensaios HOA e VOA.	123
Tabela 5.3 – Diferença entre a EI medida e a calculada a partir da diminuição da distância de trabalho.	127
Tabela 5.4 – Influência do aumento do espaçamento entre eletrodos nas correntes de arco e na EI.	128
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de curto-circuito trifásico franco realizados. ..	130
Tabela 5.6 – Valores percentuais de I_{arc} em relação à I_{bf} encontrados.	131
Tabela 5.7 – Relação da I_{bf} estimada com a I_{bf} medida nos ensaios de curto-circuito do laboratório.	131
Tabela 5.8 – Sumário dos ensaios de arcos elétricos realizados no laboratório.	133
Tabela C.1 – Massa dos discos de cobre dos calorímetros usados na medição da EI. ..	153
Tabela A.1 – Sumário de ensaios da norma IEEE 1584-2018.	163
Tabela B.1 – Coeficientes para determinação dos valores intermediários de I_{arc} . ..	165
Tabela B.2 – Tabela de coeficientes para a Equação (2.12).	166
Tabela B.3 – Coeficientes para determinar os valores intermediários da EI e da distância segura de aproximação (AFB).	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AFB</i>	<i>Arc Flash Boundary</i>
<i>AMT</i>	Afundamento Momentâneo de Tensão
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>ATPV</i>	<i>Arc Thermal Performance Value</i>
<i>BT</i>	Baixa Tensão
<i>CA</i>	Corrente Alternada
<i>CC</i>	Corrente Contínua
<i>EI</i>	Energia Incidente
<i>EPC</i>	Equipamento de Proteção Coletiva
<i>EPI</i>	Equipamento de Proteção Individual
<i>FP</i>	Fator de Potência
<i>HCB</i>	<i>Horizontal Electrodes Inside a Metal Box</i>
<i>HOA</i>	<i>Horizontal Electrodes in Open Air</i>
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>INRI</i>	Instituto de Redes Inteligentes
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>MT</i>	Média Tensão
<i>NFPA</i>	<i>National Fire Protection Association</i>
<i>NR</i>	Norma Regulamentadora
<i>OSHA</i>	<i>Occupational Safety and Health Standards</i>
<i>UR</i>	Umidade Relativa
<i>VCB</i>	<i>Vertical Electrodes Inside a Metal Box</i>
<i>VCBB</i>	<i>Vertical Electrodes Terminated in an Insulating Barrier Inside a Metal Box</i>
<i>VOA</i>	<i>Vertical Electrodes in Open Air</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔT	Variação de temperatura
CF	<i>Correction factor</i> (fator de correção) do compartimento
d	Distância de trabalho ou dos calorímetros
G	Espaçamento entre eletrodos
I_{arc}	Corrente de arco em rms
I_{arc_min}	Corrente de arco reduzida em rms
I_{bf}	Corrente de curto-circuito trifásico franco
k	Coefficientes do modelo matemático do guia IEEE <i>Std</i> 1584-2018
L_{arc}	Comprimento de arco elétrico
R_{arc}	Resistência de arco elétrico
t_{arc}	Tempo de duração do arco elétrico
V_n	Tensão nominal
V_{oc}	Tensão de circuito aberto entre os eletrodos

LISTA DE APÊNDICES E ANEXOS

APÊNDICE A – MEDIDAS DE SEGURANÇA LABORATORIAL	149
APÊNDICE B – ASPECTOS DE FORNOS A ARCOS ELÉTRICOS ..	151
APÊNDICE C – MASSA DOS CALORÍMETROS UTILIZADOS	153
APÊNDICE D – MODELO DE RELATÓRIO DE ENSAIO	155
APÊNDICE E – GRAVAÇÕES DE ENSAIOS REALIZADOS	157
APÊNDICE F – SEÇÃO DO CONDUTOR DE SACRIFÍCIO	159
ANEXO A – SUMÁRIO DE ENSAIOS REALIZADOS PARA A ELABORAÇÃO DO GUIA IEEE <i>STD</i> 1584-2018	163
ANEXO B – COEFICIENTES UTILIZADOS NO MODELO MATEMÁTICO DO GUIA IEEE <i>STD</i> 1584-2018	165

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	29
1.2 JUSTIFICATIVA	31
1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA	33
1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO	34
1.4.1 Objetivo Geral	34
1.4.2 Objetivos Específicos	34
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E ESTADO DA ARTE	35
2.1.1 O arco elétrico	42
2.1.1.1 Fatores que propiciam o surgimento do arco elétrico	44
2.1.1.2 Ignição, comportamento e propriedades	45
2.1.1.3 Riscos associados	46
2.1.2 Energia incidente	47
2.1.2.1 Medição da energia incidente através de calorímetros	49
2.2 NORMATIZAÇÕES DE MAIOR RELEVÂNCIA	52
2.2.1 Internacionais	53
2.2.1.1 IEEE Std 1584-2018	53
2.2.1.2 NFPA 70E®	55
2.2.2 Nacionais	56
2.3 PARÂMETROS PARA ENSAIOS DE ARCOS ELÉTRICOS E MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMAR A ENERGIA INCIDENTE	57
2.3.1 Principais parâmetros de entrada	57
2.3.1.1 Tensão de circuito aberto	57
2.3.1.2 Corrente de curto-circuito trifásico franco	58
2.3.1.3 Tempo de duração do arco elétrico	58
2.3.1.4 Configurações e espaçamentos de eletrodos	59
2.3.1.5 Distância de trabalho	61
2.3.2 Principais parâmetros de saída	62
2.3.2.1 Correntes de arco elétrico	63
2.3.2.2 Estimação da energia incidente	65
2.3.2.3 Distância segura de aproximação de arco elétrico	66
2.3.2.4 Potência de arco elétrico e fator de potência	67
3 ESTRUTURA LABORATORIAL	69
3.1 ESPAÇO FÍSICO	69

3.1.1 Laboratório de arcos elétricos (INRI-AF)	69
3.2 ESPECIFICAÇÕES E UTILIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	71
3.2.1 Sala de máquinas	71
3.2.1.1 <i>Entrada de energia em média tensão</i>	72
3.2.1.2 <i>Chave seccionadora tripolar com sistema de aterramento</i>	72
3.2.1.3 <i>Para-raios</i>	73
3.2.1.4 <i>Transformador de potencial</i>	75
3.2.1.5 <i>Transformadores de corrente</i>	76
3.2.1.6 <i>Disjuntores</i>	77
3.2.1.7 <i>Relés de proteção</i>	78
3.2.1.8 <i>Reatores monofásicos</i>	82
3.2.1.9 <i>Transformador de potência</i>	84
3.2.1.10 <i>Quadro de comando da sala de máquinas</i>	86
3.2.1.11 <i>Sistema de aterramento</i>	87
3.2.2 Câmara de ensaios	87
3.2.2.1 <i>Suporte dos eletrodos</i>	88
3.2.2.2 <i>Calorímetros</i>	89
3.2.2.3 <i>Câmara termográfica</i>	90
3.2.3 Sala de controle	91
3.2.3.1 <i>Quadro de comando</i>	92
3.2.3.2 <i>Monitoramento da câmara de ensaios</i>	93
3.3 AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO	94
3.4 SUMÁRIO	96
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE ENSAIO ..	99
4.1 DEFINIÇÕES DE ARRANJOS DOS ENSAIOS	99
4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS E SOFTWARES ASSOCIADOS	100
4.2.1 Definição do tempo de ensaio e aquisição das correntes de arco ...	100
4.2.2 Tratamento das correntes de arco elétrico	102
4.2.3 Aquisição da elevação de temperatura nos calorímetros	105
4.2.4 Tratamento dos dados de energia incidente	108
4.2.5 Visualização e gravação do ensaio	110
4.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	112
4.3.1 Antes do ensaio	112
4.3.1.1 <i>Montagem do arranjo</i>	112
4.3.1.2 <i>Configurações dos equipamentos</i>	113
4.3.2 Durante o ensaio	113
4.3.2.1 <i>Ignição do arco elétrico e cuidados no painel de comando</i>	114
4.3.3 Após o ensaio	114

4.3.3.1 Organização dos dados de ensaio	115
4.4 SUMÁRIO	115
5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS	117
5.1 ESTUDO DE CASO: ENSAIOS HOA E VOA	117
5.1.1 Ensaio HOA	117
5.1.2 Ensaio VOA	120
5.1.3 Análise dos resultados obtidos nos ensaios HOA e VOA	122
5.2 VARIAÇÕES DE CENÁRIOS E DISCUSSÕES	123
5.2.1 Variação das correntes de arco	123
5.2.2 Alteração da distância de trabalho	125
5.2.3 Variação do espaçamento entre eletrodos	127
5.2.4 ANÁLISE DA INCLUSÃO DO FATOR DE UMIDADE RELATIVA	128
5.3 ENSAIOS DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO FRANCO	130
5.4 SUMÁRIO	132
6 CONCLUSÃO	135
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
6.2 DIFICULDADES ENFRENTADAS	136
6.3 PUBLICAÇÕES VINCULADAS	136
6.4 SUGESTÕES DE MELHORIAS PARA O LABORATÓRIO	137
6.5 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	137
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICES	147
ANEXOS	161

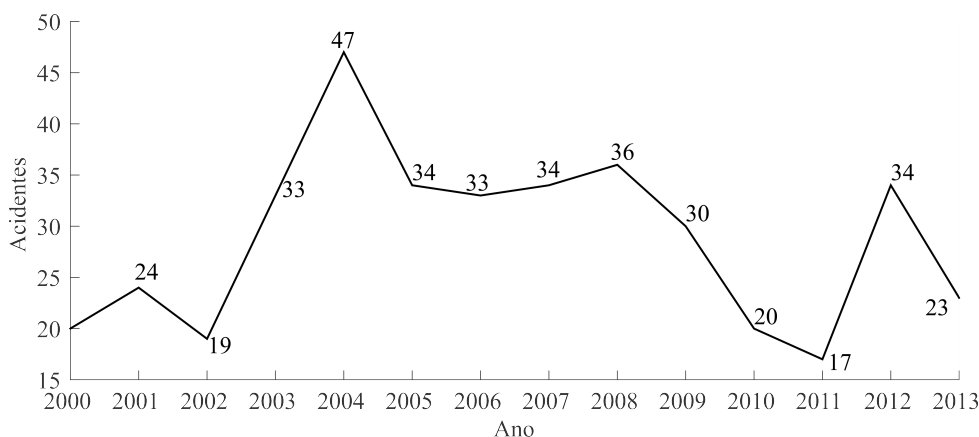
1 INTRODUÇÃO

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

As queimaduras de origem elétrica possuem uma incidência baixa se comparadas às ocasionadas por outras origens, como substâncias inflamáveis, incêndios acidentais e manuseio do fogo, contudo, devido a sua capacidade de causar lesões graves e à alta mortalidade associada, elas são motivo de grande preocupação no setor elétrico (GHAVAMI; MOBAYEN; VAGHARDOOST, 2014). Além da preocupação do setor relacionada à saúde e segurança dos trabalhadores envolvidos nesse tipo acidente, também existe a questão financeira relacionada ao elevado custo devido a hospitalizações, procedimentos cirúrgicos e pensões que podem advir desta categoria de acidente (SAHIN et al., 2014).

Especificamente no que se refere a acidentes causados por arcos elétricos (conhecido como *arc flash* ou AF), os dados estatísticos destas ocorrências são de difícil acesso e contabilização. Entretanto, até o ano de 2013, a Fundação Comitê Gestão Empresarial (COGE) divulgava gratuitamente estes dados, restringindo-os posteriormente apenas para membros (BACIN et al., 2022). A Figura 1.1 lista as ocorrências entre 2000 e 2013.

Figura 1.1 – Acidentes ocasionados por arcos elétricos no Brasil de 2000 a 2013.



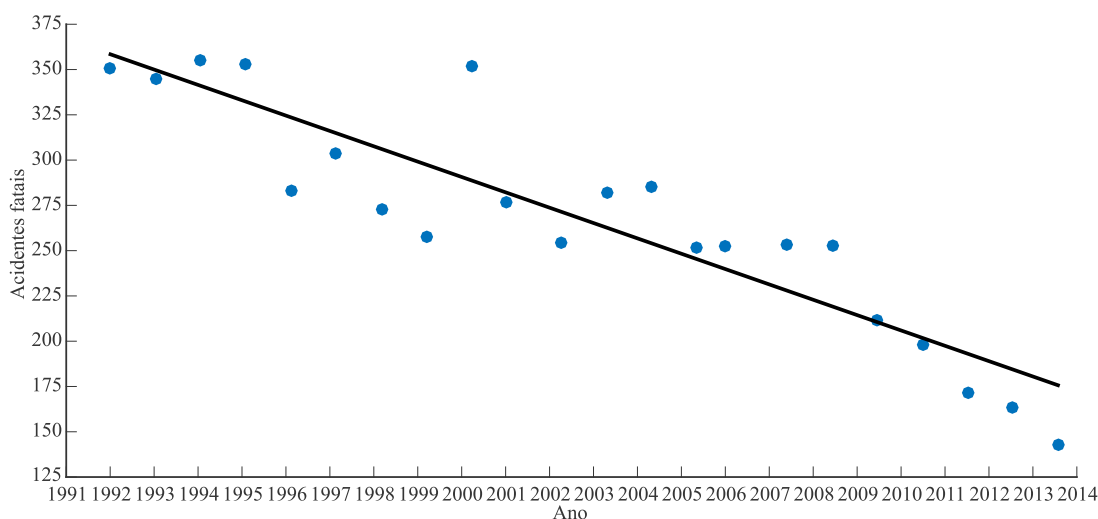
Fonte: Adaptação de Resende (2016).

Destaca-se que há a possibilidade que os dados apresentados na 1.1 mostrem apenas uma parcela dos acidentes, visto que a Fundação COGE contabiliza apenas ocorrências registrados pelas empresas, de modo que os acidentes informais não são contabilizados (RESENDE, 2016). Outro registro relevante quanto a acidentes com eletricidade pode ser obtido a partir de uma avaliação dos dados da Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos com Eletricidade do ano de 2020, onde se destaca que o número total de acidentes de origem elétrica registrados na categoria choque elétrico foram de 765, sendo 592 fatais e 173 não fatais. Salienta-se que os arcos elétricos estão inclusos na categoria

de acidentes por choques elétricos, dado que as outras categorias de acidentes de origem elétrica são incêndios por sobrecarga e descargas atmosféricas (ABRACOPEL, 2021).

No âmbito internacional, foi disponibilizado em 2015 pela *Fire Protection Research Foundation* um relatório de lesões ocupacionais fatais causadas por choques e arcos elétricos nos Estados Unidos da América (EUA), onde há um maior controle estatístico destes acidentes. Apesar de não distinguir os acidentes entre os causados por choques elétricos e por arcos elétricos, o relatório apresenta informações importantes sobre acidentes ocupacionais com eletricidade no país, conforme ilustrado pela Figura 1.2.

Figura 1.2 – Acidentes fatais e ocupacionais com origem elétrica nos EUA.



Fonte: Adaptação de Campbell e Dini (2015).

Com relação aos dados apresentados na Figura 1.2, percebe-se através da linha de tendência a crescente queda no número de acidentes fatais de origem elétrica ao longo dos anos nos EUA, fato que se justifica devido à evolução nos procedimentos de segurança no trabalho com eletricidade, dentre eles os equipamentos de proteção individual (EPI) e equipamentos de proteção coletiva (EPC), e da melhora na segurança de operação dos próprios equipamentos dos sistemas elétricos. A partir da análise destes dados, os autores do relatório chegaram à conclusão que em média cerca de um terço dos acidentes fatais relatados na Figura 1.2 foram causados por arcos elétricos, onde os óbitos ocorrem principalmente devido a queimaduras e quedas bruscas de elevadas alturas (CAMPBELL; DINI, 2015).

Apesar do número decrescente de acidentes e mortes causados por choques e arcos elétricos constatados pelas Figuras 1.1 e 1.2, é importante a ressalva de que quando se trata de acidentes ocupacionais, idealmente este número deve ser o mais próximo de zero possível, apesar disso representar um desafio enorme num setor que envolve riscos de alta periculosidade.

Por outro lado, também existe a preocupação com o conforto dos trabalhadores que operam nos sistemas elétricos, visto que o sobredimensionamento da categoria dos EPIs

utilizados geram, em função das características das vestimentas, limitações de movimento e visibilidade, calor e dificuldades na realização de algumas atividades, principalmente em média e alta tensão (SANTOS, 2020). Desta maneira, apesar da prerrogativa que o subdimensionamento é muito mais grave que o sobredimensionamento, o último também gera problemas importantes, como desconforto dos trabalhadores e custos desnecessários devido aos materiais dos EPIs de categorias superiores possuírem maior custo financeiro.

Além das questões financeiras e de segurança ocupacional relacionadas, também existem as questões técnicas e de pesquisa relacionados aos arcos elétricos e à medição da energia incidente (EI) decorrente deles, visto que estes fenômenos são de alta complexidade e de difícil reprodução laboratorial, o que conseqüentemente envolve altos custos financeiros devido à geração de altas magnitudes de curtos-circuitos de maneira segura para fins de pesquisa. Dessa forma, apesar do avanço no entendimento das características físicas dos arcos elétricos que advém da década de 1980 até a atualidade, e do progresso nas simulações computacionais para a melhor compreensão do fenômeno, são poucos os locais com estruturas físicas capazes de gerar um arco elétrico controlado para um entendimento mais profundo do fenômeno através da medição de suas principais variáveis e, por conseqüência, validar as simulações computacionais do evento.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar da relevância do tema, não existem muitos padrões para a estimação da EI proveniente dos arcos elétricos na literatura, sendo a maior referência nesse contexto o guia IEEE Std 1584-2018 (*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*). Todavia, existem muitas questões importantes para o setor elétrico, especialmente brasileiro, que não são abordadas em seu escopo, como a influência de questões ambientais como umidade, temperatura e chuva na EI, além de espaçamentos e configurações entre eletrodos mais próximas das praticadas no sistema elétrico nacional.

Ademais, existem incertezas acerca da medição da EI por sensoriamento de temperatura através de termopares acoplados a calorímetros, que apesar de ser praticada há mais de 30 anos para este fim, existem discussões quanto à imunidade desses sensores aos ruídos eletromagnéticos produzidos em eventos que geram correntes de curto-circuito elevadas (MARCHESAN, 2022). Segundo Soares, Bottaro e Santos (2019), esta possibilidade de ruído pode causar instabilidades na medição, e uma conseqüente queda na exatidão na estimação da elevação de temperatura nos calorímetros.

Uma das razões para a ausência de mais modelos para estimação da EI de arcos elétricos em diferentes situações é a baixa quantidade de laboratórios com a capacidade de realizar estes ensaios, gerando dificuldades de comprovações científicas relacionadas ao tema. Alguns dos laboratórios que se tem conhecimento são:

- Laboratório AITEX (Espanha);
- Laboratório CEF/DuPont (França e Suíça);
- Laboratório Kinectrics (Estados Unidos e Canadá);
- Laboratório de Ensaio de Vestimentas (LEVe) do IEE-USP (Brasil).

Não foram encontradas nas buscas realizadas outros laboratórios de pesquisa que estudam especificadamente os arcos elétricos. Esse baixo número se justifica, principalmente, por dois motivos: alto custo financeiro e complexidade de implementação. O custo dos equipamentos para gerar com segurança um curto-circuito na faixa de quiloampères (kA) é bastante elevado, considerando equipamentos de energização, medição, proteção e segurança, além dos gastos com a estrutura física desta categoria de laboratório que possui algumas especificidades. A complexidade de implementação se dá justamente por não existirem muitos laboratórios no mundo para embasamento, além da dificuldade de dimensionar equipamentos para gerar elevados valores de curto-circuito de forma controlada e segura, visto que, o curto-circuito é um evento indesejável nos sistemas elétricos.

Outro impedimento é relacionado ao receio das concessionárias de energia quanto a esta categoria de laboratório, visto que elevados curtos-circuitos demandam uma potência elétrica elevada da rede, o que pode gerar afundamentos momentâneos de tensão (AMT) e quedas de energia indesejáveis, que podem acarretar prejuízos significativos para as empresas do setor. Entretanto, ressalta-se que quando dimensionados de maneira adequada, as concessionárias possuem interesse nos produtos que podem se originar desta categoria de laboratório, visto que eles podem colaborar com a evolução nos procedimentos de segurança em subestações e no desenvolvimento de EPIs.

Desta maneira, urge a necessidade de mais laboratórios para aumentar o número de pesquisas e contribuir com mais respostas sobre este tema. Assim, a equipe de trabalho de média e alta tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em parceria e com o apoio financeiro do grupo CPFL Energia, em projeto desenvolvido no âmbito de programa P&D da ANEEL intitulado “Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro”, projetaram e construíram um laboratório de arcos elétricos capaz de gerar elevadas correntes de curto-circuito para medição da EI resultante, também denominado *Arc Flash Laboratory* (INRI-AF).

A principal justificativa para este projeto se refere à avaliação dos impactos que os arcos elétricos impõem aos sistemas elétricos de potência (SEP) e trabalhadores, principalmente no que concerne ao cenário brasileiro. Para isso, busca-se a partir da consolidação do laboratório, a reprodução de diversos cenários de ensaios de arcos elétricos para medição da EI, incluindo particularidade nacionais e realizando análises comparativas com normas internacionais, com a finalidade de propiciar resultados que proporcionem

maior segurança aos trabalhadores e ao SEP. Conseqüentemente, um laboratório desta magnitude também promove mais parcerias e interações da UFSM com empresas e concessionárias do setor elétrico, a partir da realização de ensaios para atender demandas específicas, gerando ganhos mútuos para as instituições e exercendo a função social que compete à universidade. Assim, no que se refere ao escopo prático do projeto, o INRI-AF possui as seguintes diretrizes a curto, médio e longo prazo:

1. Promover pesquisas acerca de condições operacionais e ambientais que possam resultar na geração de arcos elétricos no SEP brasileiro;
2. Promover estudos práticos com o objetivo de reproduzir condições relacionados à energia incidente, como curtos-circuitos e descargas atmosféricas;
3. Gerar arcos elétricos a partir de ensaios laboratoriais e medir sua respectiva energia incidente, incluindo a análise da influência de fatores climáticos;
4. Ofertar cursos de capacitação e treinamentos para os membros do setor elétrico, com foco na segurança no trabalho em atividades com risco de arcos elétricos.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho se delimita em detalhar a constituição de um laboratório para o ensaio de arcos elétricos e a medição de sua EI resultante, a partir do controle dos níveis de corrente de curto-circuito, o que o caracteriza como um laboratório de altas correntes. Os arcos elétricos são fenômenos de grande periculosidade aos trabalhadores e a sua propagação possui uma complexidade elevada, apesar disso, existem poucos laboratórios para ensaios práticos de arcos elétricos no mundo que auxiliem a compreender suas particularidades e que fornecem estudos para contribuir com a melhora na segurança dos trabalhadores e dos sistemas elétricos na ocorrência desses eventos.

Desta forma, devido à extensão de conteúdos relacionados ao tema, este trabalho limita-se em caracterizar o laboratório proposto, detalhando os procedimentos empregados nos ensaios e relatar os resultados obtidos nestes. Há o discernimento das capacidades do laboratório de reproduzir todos os cenários de ensaios de arcos elétricos apresentados neste trabalho, contudo, preza-se em maior grau na apresentação do detalhamento estrutural e das possibilidades do laboratório, bem como nos requisitos que devem ser atentos para a implementação de um laboratório deste tipo. A realização de ensaios com a adição mais cenários diferenciados e a verificação de sua influência na EI do arco elétrico devem ser aprofundadas em trabalhos futuros, referentes a continuidade operativa do laboratório.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é apresentar com detalhes técnicos e estruturais o laboratório de arcos elétricos construído no Instituto de Redes Inteligentes da UFSM, especificando os equipamentos e descrevendo os procedimentos utilizados no local, além de apresentar alguns dos resultados obtidos em ensaios realizados no laboratório.

1.4.2 Objetivos Específicos

- (a) Apresentar alguns dos principais estudos relacionados aos arcos elétricos e à medição da EI, bem como as principais normas nacionais e internacionais, metodologias de cálculo e requisitos laboratoriais necessários para a reprodução destes eventos;
- (b) Propor estratégias e procedimentos laboratoriais para a atuação segura dos operadores no laboratório de arcos elétricos, tendo como objetivo tornar a execução dos ensaios simples e eficiente;
- (c) Justificar com clareza acerca dos motivos da escolha de cada um dos equipamentos presentes no laboratório;
- (d) Analisar os resultados de alguns ensaios realizados no laboratório, comparando os valores medidos de EI com os calculados previamente pelo guia IEEE *Std* 1584-2018;
- (e) Debater as potencialidades de pesquisa, ensaios e trabalhos futuros que o laboratório possui, além de possíveis melhorias que podem ser implementadas para diversificar os parâmetros de entrada e a tipificação dos ensaios realizados no local.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi organizado em seis Capítulos. No Capítulo 2 é realizada uma revisão sobre as principais questões relacionadas ao tema, através da abordagem de trabalhos relevantes e referências normativas. O Capítulo 3 apresenta a estrutura do laboratório proposto, e justifica a escolha dos equipamentos utilizados. O Capítulo 4 descreve os processos adotados no laboratório, nos âmbitos de definição do arranjo (ou *setup*), aquisição de dados e procedimentos de ensaio. O Capítulo 5 demonstra e discute os resultados de alguns dos ensaios realizados no laboratório. O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões deste trabalho, bem como as propostas de trabalhos e implementações futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é elaborada uma revisão da literatura acerca de alguns dos principais conceitos relacionados aos arcos elétricos. Em primeiro lugar, é realizada uma abordagem referente ao estado da arte sobre o assunto. Em um segundo momento, são elencadas algumas das normas de maior relevância atualmente sobre o tema, que norteiam a maioria das pesquisas praticadas na atualidade. Posteriormente, é apresentada simplificadamente a metodologia de cálculo da EI pela norma IEEE *Std* 1584-2018 relevantes a este trabalho, considerando os parâmetros de entrada e saída de influência em ensaios de arcos elétricos.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E ESTADO DA ARTE

Primeiramente, ressalta-se que não é o foco principal desta revisão abordar detalhadamente metodologias de cálculo relacionadas aos arcos elétricos, visto que esta dissertação está centrada na análise e construção de um laboratório, com enfoque nos elementos necessários para tal. Entretanto, considera-se importante apresentar algumas das principais pesquisas que contribuíram para o desenvolvimento dos modelos matemáticos existentes para a estimativa da EI, em busca de uma contextualização adequada ao tema.

Os fenômenos relacionados aos arcos elétricos e seu plasma são conhecidos e utilizados desde o início do aproveitamento da eletricidade pelo ser humano, onde pode-se tomar como exemplo as lâmpadas a arco elétrico (as primeiras utilizadas na iluminação pública) e a utilização do fenômeno em atividades de soldagem e fornos industriais de metais (ANDERS, 2003). Contudo, sua capacidade destrutiva e o perigo que ele apresenta aos trabalhadores foi descrito pioneiramente pelo engenheiro Ralph Lee em 1982, em seu trabalho denominado “*The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*” (SPERL; WHITNEY; MILNER, 2009). Esta publicação despertou o viés científico sobre a importância de pesquisas relacionadas ao fenômeno. Um dos trechos iniciais deste trabalho é marcado pela seguinte consideração (LEE, 1982, p. 246),

Quase todos estão cientes que o choque elétrico pode ser perigoso para a vida, embora os choques de menor intensidade que muitos experienciaram sem graves consequências tendam a fazê-los ignorar esse fato. Há outro perigo que poucos avaliam - caso onde o contato não é necessário para causar ferimentos. Esta é a queima de radiação do fogo violento gerado pelos arcos elétricos, devido a um curto-circuito que se desenvolve a partir de um contato elétrico deficiente ou falha de isolamento. Próximo ao raio *laser*, o arco elétrico entre condutores de eletricidade são um dos acontecimentos de maior temperatura possíveis na terra, podendo ter uma intensidade de até quatro vezes mais quente que a superfície do sol.

Na época do lançamento deste trabalho, a grande preocupação em relação à eletricidade era o risco de choque elétrico, e não as queimaduras que podem se originar a partir deste, e com base nisso, é entendível o impacto deste trecho no meio científico. Entretanto, também é importante destacar alguns trabalhos anteriores a este, como os elencados por Jones et al. (2000), em que é possível encontrar uma revisão de alguns artigos científicos relevantes escritos antes de 1982 sobre os arcos elétricos. O foco principal destes trabalhos era de encontrar soluções para a proteção de equipamentos elétricos dos sistemas de distribuição de energia, e não necessariamente das pessoas, todavia eles originaram muitas contribuições no campo. Alguns dos trabalhos publicados nos anos de 1960 nessa linha são dos autores Kaufmann e Page (1960), Peach (1964) e Shields (1967).

Retornando ao estudo de Lee, o caráter inovador deste se deu por procurar identificar os danos potenciais causados pelos arcos elétricos ao corpo humano, e não apenas em equipamentos. O autor observa que além de fatais a uma curta distância, os arcos elétricos podem causar queimaduras debilitantes já em um intervalo de 3 metros, além da possibilidade de ignição das roupas de proteção com a energia térmica liberada pelo arco, que pode acarretar queimaduras gravíssimas ao trabalhador. O autor também ressalta a importância do uso de EPIs de qualidade e corretamente dimensionados, bem como dos EPCs (LEE, 1982). Este trabalho resultou em dois modelos matemáticos muito importantes para a estimação da EI resultante do arco elétrico, um para tensões menores e outro para maiores que 600 V (ZHANG, 2015). Destaca-se que a abordagem de Lee baseou-se nos estudos da biofísica Alice Stoll, realizados durante as décadas de 1960 e 1970, que originaram a conhecida curva de *Stoll* (parâmetro utilizado para caracterização de queimaduras de segundo grau) e influenciaram a maioria dos pesquisadores que surgiram posteriormente relacionados ao tema (STOLL; CHIANTA, 1970).

O modelo teórico de Lee foi utilizado para o cálculo da EI acima de 600 V por muito tempo, tornando-se mais conservador com o aumento de tensão, servindo como alicerce para estudos relacionados à estimação da EI para tensões acima de 15 kV, apesar de não existirem métodos consensuais na literatura para análises da EI acima desta tensão¹. Este método considera para realização de seus cálculos os seguintes parâmetros: a corrente de curto-circuito trifásica, o tempo de atuação da proteção a montante do arco, a distância do indivíduo do ponto de origem do arco e a tensão de linha do sistema (LEE, 1982).

Dando prosseguimento em seus trabalhos, Lee (1987) publicou outro artigo relevante com base em quatro estudos de caso que abordaram diversos outros perigos que se originam a partir do arco elétrico, além do já conhecido risco térmico (GAUNCE, 2019). Alguns dos perigos citados são os impactos da pressão gerada pelo arco em alguém próximo da explosão, que pode repercutir em traumas, a propulsão do plasma que resulta

¹Segundo a OSHA 1910.269, em seu apêndice E, o único método que produz estimativas aceitáveis para o cálculo da EI para sistemas elétricos acima de 15 kV é o *ARCPRO*[®], que é um *software* comercialmente disponível desenvolvido pelo laboratório da *Kinetrics* (OSHA 1910.269, 2014).

em queimaduras, estilhaços de partículas metálicas a temperaturas elevadas, e perdas de audição causadas pelo elevado ruído sonoro provocado pelo fenômeno (LEE, 1987).

Outro importante trabalho relacionado ao evento foi o de Stokes e Oppenlander (1991). Neste estudo, os autores testaram eletrodos configurados de forma serial (um em direção ao outro), procedendo os ensaios de arcos elétricos alterando o espaçamento (*gap*) entre os eletrodos a cada amostra. Um dos pontos relevantes dessa pesquisa se deve ao desenvolvimento de curvas tensão-corrente para cada configuração ensaiada, colaborando com estudos da época que indicavam uma relação inversa entre a tensão e a corrente elétrica no instante inicial do arco elétrica (elevada queda de tensão e crescimento de corrente), atingindo-se quase que instantaneamente um ponto de transição, onde o decaimento de tensão passa a ser constante e a corrente de curto-circuito inicial decai rapidamente, se transformando na corrente de arco, ficando estável até o momento da extinção. Além disso, houve contribuições no uso de câmeras termográficas de alta velocidade para captar registros mais detalhados do comportamento do arco elétrico, algo bastante excêntrico na época do estudo (STOKES; OPPENLANDER, 1991).

Durante a década de 1990, concluiu-se a partir de levantamentos de acidentes ocupacionais relacionados aos arcos elétricos que estes eram responsáveis por um significativo número de lesões e óbitos no setor elétrico, fazendo com que ele fosse abordado em 1995 na norma NFPA 70E® (*Standard for Electrical Safety in the Workplace*) da *National Fire Protection Association* (ZHANG, 2015). Esta questão colaborou com que o número de publicações relacionadas aos arcos elétricos escalonasse, uma década após o trabalho pioneiro de Lee. Desta forma, surgiram estudos com melhores estruturas e recursos disponíveis que permitiram quantificar a EI, e a testar materiais e tecidos para proteger os trabalhadores que atuam em zonas de riscos de arco elétrico, para o desenvolvimento de EPIs mais robustos.

Dentre os autores dos anos 1990, merecem destaque Richard Doughty e Thomas Neal da empresa DuPont, que obtiveram grande reconhecimento pela quantidade de trabalhos publicados de maneira conjunta, principalmente pelo rigor laboratorial dos ensaios e pela profunda abordagem na questão da eficácia de EPIs contra queimaduras (CAM-PONOGARA, 2021). Dentre a série de publicações realizadas pelos autores, merecem destaque as submetidas entre os 1995 e 2000, que resultaram no surgimento do método de Doughty e Neal, para a estimativa da EI de arcos elétricos em sistemas trifásicos com tensões iguais ou inferiores a 600 V (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000).

Em Neal, Bingham e Doughty (1996) é demonstrado um extenso programa de ensaios para determinar a efetividade dos EPIs da época em reduzir os danos causados pela energia radiante produzida pelos arcos elétricos. Os ensaios foram realizados com tensões de circuito aberto (V_{oc}) de 600 V e 2,4 kV, de modo a reproduzir faltas fase-fase e trifásicas em sistemas de distribuição a partir de três arranjos: manequim em uma gaiola de Faraday parcial, painéis em uma gaiola de Faraday parcial e com eletrodos

verticais paralelos em uma caixa metálica de lado aberto (para representar um painel elétrico aberto). Os ensaios mostraram que para os sistemas em 600 V, a EI medida ficou próxima a 80% do máximo teórico da época, já em 2,4 kV, as medições foram cerca de 40% desse valor (RESENDE, 2016). Além disso, foi recomendada uma revisão dos EPIs utilizados naquele momento por parte da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), além da elaboração de tabelas relacionando o arco elétrico à chance de fogo repentino (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996).

Na sequência de suas pesquisas, Doughty et al. (1997) realizam uma rotina de ensaios de arcos elétricos trifásicos utilizando dois arranjos: três eletrodos verticais em ambiente aberto e três eletrodos verticais em uma caixa metálica, produzindo a ignição do arco elétrico curto-circuitando os eletrodos através de um condutor de cobre com espessura muito baixa, conhecido como condutor de sacrifício. As correntes de curto-circuito variavam entre 19 kA a 28 kA e a V_{oc} entre 180 V e 340 V. Além de investigar a diferença de comportamento do arco elétrico resultante dentro e fora da caixa metálica, este trabalhou avaliou categorias de EPIs que não haviam sido considerados em estudos anteriores, como luvas e *face shields* (DOUGHTY et al., 1997). Ao final deste trabalho, Doughty et al. (1997) sumariza algumas observações importantes de seus estudos, a saber:

- Quando a potência de arco atinge seu valor máximo, ela tende a diminuir proporcionalmente de acordo com um maior espaçamento entre os eletrodos;
- A EI atinge seu valor máximo conforme o aumento do espaçamento entre os eletrodos, mas a EI máxima normalmente ocorre quando o espaçamento entre os eletrodos é maior que o espaçamento que produz a máxima potência de arco;
- A EI é diretamente proporcional ao tempo de duração do arco elétrico;
- A EI é afetada pelo ambiente que cerca o arco elétrico. Dependendo das dimensões da caixa metálica, um arco elétrico interno pode produzir uma EI até 3 vezes maior que em ambiente aberto;
- A porção de radiação transferida pelo arco elétrico é a porcentagem da energia total do arco por unidade de área impressa a um corpo qualquer a uma certa distância.

Em 2000, os autores Doughty, Neal e Floyd (2000) publicam seu mais importante trabalho, em que definem uma metodologia de cálculo da EI em arcos elétricos para sistemas trifásicos até 600 V, para correntes de curto-circuito entre 16 e 50 kA. Os autores realizam a seguinte ponderação sobre os principais parâmetros que afetam a EI produzida por um arco elétrico (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000, p. 258),

Qualquer processo de estimativa da energia incidente exigirá conhecimento da tensão de circuito aberto (V_{oc}), da corrente de curto-circuito franco (I_{bf}) no local do arco elétrico, do tempo de duração do arco, da configuração e *gap* entre eletrodos, do invólucro (se houver) ao redor do arco e da distância do arco ao objeto de referência.

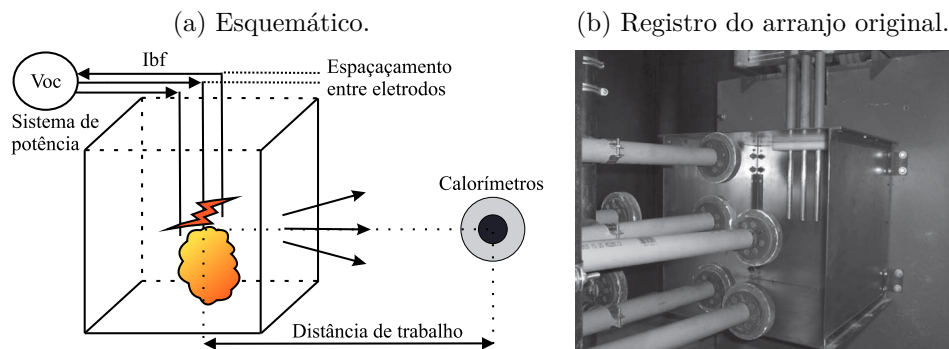
Desta maneira, os autores estipulam as variáveis mais importantes a serem consideradas na estimação o da EI. O arranjo utilizado por Doughty, Neal e Floyd (2000) valia-se de eletrodos verticais de cobre com $\frac{3}{4}$ " de seção, com e sem caixa metálica, uniformemente espaçados em 31,7 mm. As durações dos ensaios eram de 6 ciclos (100 ms) em todas as provas, com uma V_{oc} de 600 V e uma I_{bf} variando entre 16 e 50 kA. As medições da EI foram realizadas a partir de sete calorímetros de cobre, onde sensores indicaram que a energia térmica absorvida pelos calorímetros foi igual ou superior a 90% da produzida pelo arco. O sistema de aquisição de dados do arranjo registrava os seguintes parâmetros: V_{oc} , corrente de arco (I_{arc}), tempo de arco e aumento de temperatura no disco de cobre dos calorímetros (ΔT). O modelo de Doughty e Neal foi responsável por um avanço significativo na determinação da EI produzidas pelos arcos elétricos, com maior precisão em relação a proposta de Lee nas condições em que se propusera (RESENDE, 2016).

No início dos anos 2000, a norma NFPA 70E[®] sofreu avanços significativos e passou a contar com um sistema de classificação de categoria de risco para EPIs. Apesar de conservador, esse sistema introduziu um tabelamento para ajudar a definir as vestimentas resistentes a arco e a chama, além dos demais EPIs que devem ser utilizados conforme os níveis de exposição no local de trabalho. Entretanto, estas instruções possuíam lacunas importantes, pois, dividiam as categorias de risco de EPI apenas em 1, 2 e 3, e poderiam ser adotados de maneira confiável apenas em circunstâncias onde as condições previstas fossem atendidas totalmente (WHITE, 2018). Muitas dessas alterações da norma tiveram a colaboração do trabalho de Jones et al. (2000), que realizou ensaios experimentais a partir de manequins para compreender melhor os efeitos dos arcos elétricos em seres humanos, considerando que estes estivessem utilizando EPIs.

Na sequência, foi publicada a norma IEEE Std 1584-2002, que forneceu um guia para a determinação da EI e da distância segura de aproximação (AFB) a partir de determinadas condições de arco elétrico, sendo esta uma das maiores revoluções já ocorridas neste campo de estudo (IEEE STD 1584, 2002). Os equacionamentos propostos pelo modelo matemático da IEEE Std 1584-2002 foram elaboradas empiricamente a partir do aprimoramento de metodologias anteriores para estimação da EI, como os de Lee (1982) e Doughty, Neal e Floyd (2000), e com a realização de mais de 300 ensaios laboratoriais nos Estados Unidos e no Canadá entre o final dos anos 1990 e o início dos anos 2000, que forneceram as amostras necessárias para a realização de análises estatísticas para o seu desenvolvimento (LANG; NEAL; WILKINS, 2007).

O modelo matemático proposto pela norma IEEE Std 1584-2002 é baseado em arcos elétricos para sistemas trifásicos e com eletrodos na configuração vertical, sendo que para alguns testes foram adotadas caixas metálicas como invólucro e outros foram realizados em ambiente aberto. Foram dispostos sete calorímetros perpendiculares aos eletrodos em diferentes distâncias para medir a EI. A Figura 2.1 ilustra simplificada um dos arranjos utilizados pela norma.

Figura 2.1 – Exemplo de arranjo utilizado pela norma IEEE *Std* 1584-2002.



Fonte: Adaptação de Wilkins, Allison e Lang (2004) e IEEE STD 1584 (2002).

A norma IEEE *Std* 1584-2002 foi um marco relevante, pois, aumentou a abrangência das aplicações de metodologias para estimação EI existentes na época, podendo ser utilizada em sistemas trifásicos e configurações de eletrodos verticais com ou sem invólucro, entre tensões que iam de 208 V a 15 kV (IEEE STD 1584, 2002). Entretanto, as configurações e espaçamentos entre eletrodos adotados pela norma foram bastante limitadas (RESENDE, 2016). A norma IEEE *Std* 1584 é retomada na Seção 2.2, com uma abordagem mais completa e considerando a sua versão subsequente de 2018.

Em 2005, a IEEE e a NFPA se juntam em um projeto colaborativo denominado “*Arc Flash Research Project*”, dividido em duas fases. Este foi um momento importante, pois, reuniu duas das organizações mais relevantes relacionadas aos estudos de arcos elétricos e da EI, e teve em seu escopo a seguinte justificativa (IEEE; NFPA, 2005, p. 2),

É tudo sobre proteger pessoas: mais de 2000 vezes ao ano, trabalhadores são admitidos em centros de queimados para tratamento prolongado de lesões. Embora muitas classes de ferimentos possam resultar da exposição aos arcos elétricos, as empresas relatam que até 80% dos ferimentos causados por ele são queimaduras térmicas.

Com base no trecho supracitado, avalia-se que o foco do projeto foi na segurança dos trabalhadores, combinando esforços para mitigar os riscos associados aos arcos elétricos. O custo estimado do projeto foi entre 6 a 7 milhões de dólares, contando com quatro laboratórios para ensaios e análises de arcos elétricos, visando promover estudos que preenchessem lacunas da norma IEEE *Std* 1584-2002, como (LEE; GAMMON, 2011):

- Calor e efeitos térmicos;
- Danos auditivos devido a ruídos sonoros elevados;
- Intensidade luminosa;
- Novas configurações de eletrodos;
- Pressão ocasionada pela explosão decorrente do arco elétrico.

A primeira bateria de ensaios teve como objetivo padronizar todos os laboratórios de modo a alinhar questões como: instrumentação, precisão da medição, procedimentos de ensaios e consistência dos resultados. Já na segunda fase, que ocorreu a partir de 2010 e com os laboratórios já consolidados, foram procedidos diversos estudos relacionados a medição da EI, e dos efeitos dos ruídos sonoros, luminosidade e pressão, a partir de diferentes distâncias de trabalho, conforme o que era previsto no escopo do projeto (LEE; GAMMON, 2011). Os resultados deste projeto contribuíram com as atualizações do guia IEEE *Std* 1584-2002 e com a melhoria dos padrões de segurança contra os arcos elétricos. Além disso, difundiram-se alguns dos processos laboratoriais utilizados em ensaios de arcos elétricos, que até então não eram conhecidos com detalhes entre os pesquisadores da área, relacionados à medição da EI e à análise de dados (LEE; GAMMON, 2011).

Em 2006, foi publicada uma crítica à norma IEEE *Std* 1584-2002 por Stokes e Sweeting (2006) que ficou bastante conhecida no meio científico. Segundo os autores, foram realizados poucos ensaios para confecção da norma (cerca de 300), além de variações insuficientes nas configurações de eletrodos. Além disso, os autores Stokes e Sweeting (2006) propuseram o arranjo que utiliza eletrodos na configuração horizontal em ambiente aberto e também enclausurados, onde os jatos de plasma são direcionados diretamente aos calorímetros e, em decorrência disso, altos valores de EI foram mensuradas.

Em acréscimo ao conjunto de trabalhos importantes dos anos 2000, destacam-se dois publicados pelos autores Ammerman, Sen e Nelson. O primeiro, forneceu uma importante revisão da evolução das normas existentes em relação ao tema até aquele momento, enaltecendo as principais condições que influenciam os níveis de EI, além de propor uma metodologia para sua estimativa de maneira rápida e eficaz (AMMERMAN; SEN; NELSON, 2007). Já o segundo, forneceu um estudo comparativo entre os modelos de estimativa da EI existentes na época, além de fazer uma abordagem detalhada das propriedades do arco elétrico e dos riscos que ele expõe o ambiente que o cerca (AMMERMAN; SEN; NELSON, 2008).

Em relação à ocorrência de arcos elétricos em ambiente aberto para sistemas em média tensão (MT), o trabalho de Short (2011) sugere a necessidade de considerar maiores comprimentos de arco, além de averiguar o quão rapidamente os arcos elétricos podem se expandir e envolver outras fases no curto-circuito, procedendo seus testes com um arranjo que compreendia uma V_{oc} de 4160 V e eletrodos na configuração horizontal. Posteriormente, os autores Short e Eblen (2012) desenvolvem um modelo matemático para contribuir com a definição dos EPIs a serem utilizados por trabalhadores expostos a condições de perigos de arcos elétricos em MT, para ambientes abertos e confinados.

Nos anos subsequentes, surgiram algumas pesquisas relacionadas a ensaios de arcos elétricos em laboratórios, principalmente no que se refere a ensaios da efetividade de EPIs para aprimoramento destes e dos materiais que os compõem, sendo possível destacar as de Hoagland (2013) e Lasica et al. (2017). Já o trabalho de Golovkov et al. (2015)

se destaca pelo detalhamento técnico e laboratorial fornecido em ensaios para testes de EPIs, principalmente em MT, onde os autores destacam que apesar dos cálculos da IEEE *Std* 1584-2002 e da NFPA 70E[®] serem conservadores, deve-se ter precaução no uso das tabelas de classificação de EPIs da NFPA 70E[®] quanto a AFB, pois, considerando EPIs de algodão é possível que os métodos de escolha de EPIs sejam menos conservadores.

Outro trabalho relevante ao tema foi o de Zhang (2015) que propôs alguns aprimoramentos no modelo matemático do guia IEEE *Std* 1584-2002, baseado em um número significativo de ensaios para sistemas trifásicos entre 208 V e 15 kV, preenchendo algumas lacunas deixadas por pesquisas anteriores através de análises físicas e estatísticas dos ensaios, apresentando um alto detalhamento técnico dos arranjos utilizados. Já Zhang et al. (2020), propôs equacionamentos de correção para o método de cálculo da AFB da IEEE *Std* 1584-2018, a partir da análise do comportamento térmico da EI observado em ensaios realizados conforme as configurações de eletrodos utilizadas pela norma.

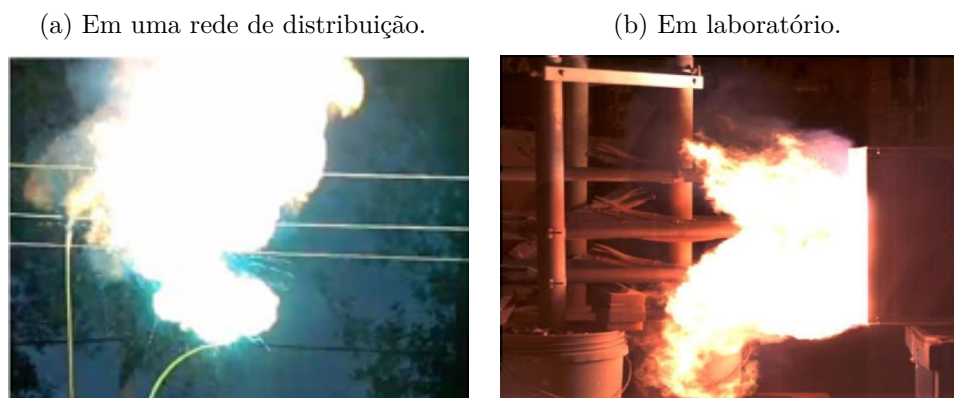
Em 2018, foi publicado o guia IEEE *Std* 1584-2018, uma importante atualização da sua predecessora de 2002. As mudanças propostas foram baseadas em dados estatísticos obtidos a partir de 1700 ensaios, um número cerca de seis vezes mais que a de sua predecessora (IEEE STD 1584, 2018). Este trabalho não descreve sucintamente as alterações promovidas na atualização da norma, entretanto, devido à relevância da norma de 2018 para o tema deste trabalho, ela é retomada em duas seções posteriores, na Seção 2.2 com uma abordagem mais teórica e contextual, delimitando a sua aplicabilidade, e posteriormente na Seção 2.3 com foco na determinação dos parâmetros relevantes para ensaios de arcos elétricos e nos modelos matemáticos de estimação da EI.

A partir deste ponto do trabalho, considera-se importante para a sequência do mesmo abordar definições e detalhamentos dos arcos elétricos e de sua respectiva EI, continuamente com ponderações existentes em trabalhos relevantes, para ser promovida uma maior compreensão do fenômeno.

2.1.1 O arco elétrico

O guia IEEE *Std* 1584-2018 define o arco elétrico como uma nuvem de plasma gerada em uma lacuna entre dois eletrodos com uma diferença de potencial suficiente para romper a rigidez dielétrica de um material não condutivo (como o ar, por exemplo) (IEEE STD 1584, 2018). O fenômeno é iniciado por um *flashover* (ou faísca), ou com a introdução de algum material condutor entre eletrodos energizados, e a passagem da corrente de arco ocorre através da poeira e da ionização do ar gerado pelos materiais derretido e rejeitos dos eletrodos, que criam um caminho resistivo para propagação de corrente (DAS, 2021). Na Figura 2.2 são apresentadas duas ocorrências de arcos elétricos, uma em um sistema de distribuição de energia elétrica e outra em laboratório.

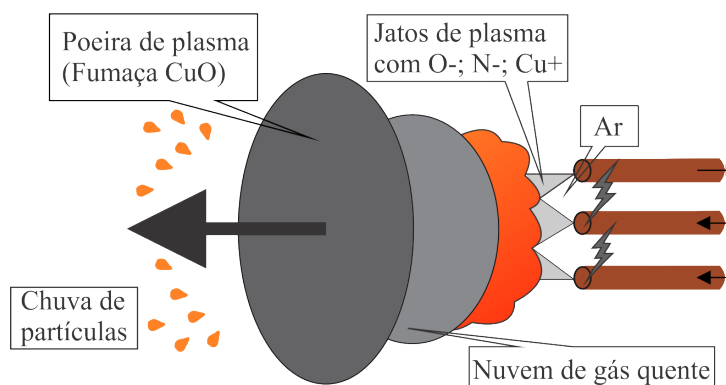
Figura 2.2 – Exemplos de arcos elétricos.



Fonte: Short (2011) e Rewitzer (2019).

Na maioria das vezes, o arco elétrico se origina a partir da ocorrência de um curto-circuito (entre fases ou fase-terra), sendo que ele pode iniciar através de um curto-circuito monofásico e evoluir para um curto-circuito bifásico ou trifásico rapidamente (SENGER; QUEIROZ, 2012). A Figura 2.3 apresenta o arco elétrico detalhadamente e alguns dos elementos que o compõe. As elevadas correntes que fluem alternadamente entre os eletrodos dão origem a forças eletromagnéticas que impulsionam o arco para longe da fonte (no sentido fonte-carga), em direção a ponta dos eletrodos, as danificando.

Figura 2.3 – Ilustração dos elementos de um arco elétrico



Fonte: Adaptação de Lang e Jones (2015).

O comportamento do arco elétrico é considerado estocástico, pois envolve rápidas mudanças em sua projeção devido às trocas de calor por convecção, jatos de plasma e forças eletromagnéticas, além das constantes extinções e reignições. Isso faz com que seja difícil criar modelos matemáticos precisos para prever as suas propriedades (LANG; NEAL; WILKINS, 2007). A Figura 2.3 demonstra a nuvem de plasma sendo empurrada para longe dos eletrodos, à medida que as moléculas de plasma se resfriam e se recombinam em partículas metálicas utilizando como insumos o material fundido dos eletrodos, pois, o curto-circuito cria forças magnéticas atrativas e repulsivas, fazendo com que os jatos de plasma retroalimentem a nuvem em expansão.

A resistência da nuvem de plasma gerada pelo arco elétrico é elevada, provocando uma alta queda de tensão interna (entre 30 e 40 V/cm) (LEE, 1982). Para circuitos em baixa tensão (BT), isso faz com que boa parte da tensão disponível entre os eletrodos seja extinta rapidamente, restando apenas a diferença de potencial entre a fonte e o arco para manter a corrente de falta através da impedância do sistema, e assim, são observados comprimentos de arco menores (QUEIROZ, 2011). Já na MT, os comprimentos podem ser até de 2,54 cm a cada 100 V, e com isso, podem ser atingidos outros equipamentos e se originarem novos curtos-circuitos nas redondezas (LEE, 1982).

A duração natural do arco elétrico depende principalmente da V_{oc} e do espaçamento entre os eletrodos, e quanto maior for sua duração, maior é a EI. O tempo de arco elétrico varia muito, e depende principalmente do tempo de atuação do sistema de proteção, onde na hipótese da falha desta, a extinção ocorre naturalmente ou através da destruição dos condutores que o sustentam. A IEEE *Std* 1584 trata, em ambas as edições, dois segundos como um valor razoável para que uma pessoa tenha tempo de reagir e se afastar da origem do arco elétrico, sendo este tempo considerado quando dimensionados os tempos de atuação da proteção. Todavia, destaca-se que um arco elétrico pode durar cerca de 3 a 5 segundos, ou até mais, apesar da raridade destes casos (PHILLIPS, 2020).

2.1.1.1 Fatores que propiciam o surgimento do arco elétrico

Existem dois cenários para a origem de um arco elétrico: por mecanismos graduais ou imediatos (GOODMAN, 2007). Cada equipamento possui um determinado ciclo operacional, onde sua degradação ocorre a partir dos diversos distúrbios de caráter ambiental e físico em que é submetido. Algumas das degradações que podem levar a um arco elétrico com o passar do tempo são: enfraquecimento de conexões, degradação da isolação e manutenções inadequadas na rede elétrica (HUSSAIN, 2015).

As falhas que podem levar gradualmente ao surgimento do arco elétrico são consideradas menos perigosas ao ser humano, pois, a probabilidade de não haver ninguém próximo ao local é maior. Já as que levam imediatamente ao arco elétrico, como contatos acidentais (exemplo: ferramentas fechando caminho para o curto-circuito) e objetos ou condições externas (exemplo: animais e condições ambientais adversas) podem levar a uma ignição imediata do arco, onde pouco pode ser feito no que se refere à previsão do evento (HUSSAIN, 2015). Algumas situações que podem desencadeá-lo são (DAS, 2021):

- Falhas no isolamento que geram faltas fase-fase e fase-terra devido desgaste progressivo em isoladores e acúmulo de poeira;
- Manutenção insuficiente e problemas com terminações de cabos, como *design* inadequado e instalações defeituosas;

- Poluição atmosférica, alta umidade, gases corrosivos, ventos salinos e superaquecimento da área de contato devido à presença de agentes corrosivos e conexões soltas;
- Sobretensões de origem atmosférica ou devido a transientes que ocorrem na comutação de equipamentos;
- Treinamento inadequado dos trabalhadores envolvidos na instalação, operação e manutenção de sistemas elétricos, onde equívocos podem levar ao arco elétrico.

A maioria dos acidentes com arcos elétricos são internos, ou seja, em serviços com comutadores, centro de comando de motores e painéis de subestações, devido à existência de mais condições que podem desencadeá-lo do que nas redes de distribuição, e mais riscos associados devido o trabalhador estar mais próximo de sua origem (DAS, 2021).

2.1.1.2 *Ignição, comportamento e propriedades*

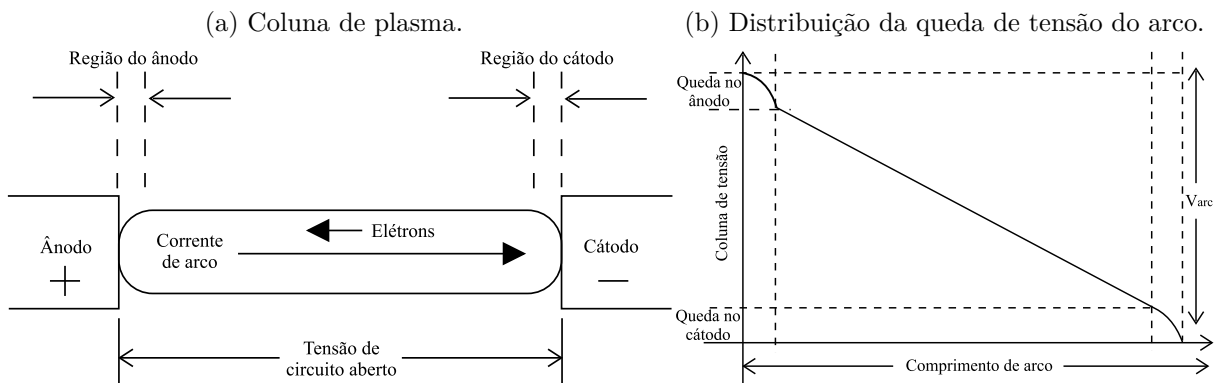
A ignição do arco elétrico depende da ruptura da rigidez dielétrica entre eletrodos de material condutor, e para causar essa ruptura, os laboratórios normalmente utilizam condutores de sacrifício de cobre de baixa espessura entre os eletrodos. Simplificadamente, a fenômeno físico consiste nos seguintes componentes (SWEETING; STOKES, 2007):

- **Cátodo:** eletrodo negativo por onde os elétrons são emitidos do condutor em direção ao plasma;
- **Ânodo:** eletrodo positivo por onde os elétrons retornam do plasma ao condutor;
- **Coluna de arco:** formada por rejeitos de materiais ionizados, é onde a nuvem de plasma se sustenta e ocorrem as reignições para sustentação do arco.

Não é objeto de estudo deste trabalho demonstrar o fenômeno ao nível elementar, entretanto, é importante uma abordagem sobre tal. Na Figura 2.4 são apresentadas as regiões do arco elétrico e a distribuição dos níveis de tensão em sua composição.

O campo magnético na coluna de plasma próximo ao eletrodo apresentada na Figura 2.4 interage com a corrente de curto-circuito para ionizar o ar próximo ao cátodo, criando um caminho para passagem de corrente e conduzindo o plasma resultante axialmente para longe do eletrodo. O cátodo e o ânodo possuem uma elevada queda de tensão (um pouco maior no cátodo), sendo que grande parte da energia liberada através da queda de tensão é submetida ao material que compõem os eletrodos. Naqueles de cobre e alumínio, isso causa o derretimento do metal e a partir da pressão gerada faz com que os metais derretidos sejam lançados em diversas direções. A ponta dos eletrodos se aquece até a incandescência, adquirindo características refratárias e a partir disso emitindo elétrons livres que colaboram com a manutenção do arco (SWEETING; STOKES, 2007).

Figura 2.4 – Propriedades físicas do arco elétrico.



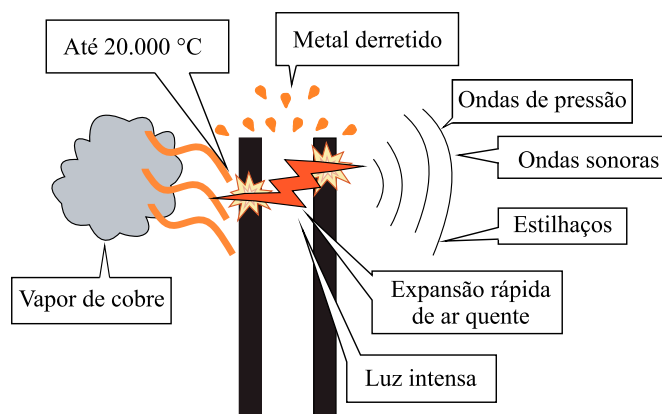
Fonte: Adaptação de Johnson, Bower e Quintana (2012).

Cada vez que a corrente de arco alterna de sinal, o cátodo transforma-se em ânodo e o contrário é recíproco. Dadas as condições necessárias, o arco elétrico continua a conduzir corrente elétrica até que o dispositivo de proteção extinga o curto-circuito ou a impedância entre os dois pontos se torne muito grande para sustentação. Portanto, quando iniciado, o arco pode se autossustentar por poucos segundos (DUGDALE, 2014).

2.1.1.3 Riscos associados

Os riscos associados aos arcos elétricos são elevados devido sua capacidade de culminar em fatalidades ou quadros de injúrias irreversíveis, além de causar graves danos em equipamentos, em virtude da abundante quantidade de energia liberada rapidamente (QUEIROZ, 2011). Conforme descrito na Seção 2.1, os arcos elétricos podem alcançar temperaturas muito elevadas, onde poucos materiais conhecidos conseguem sair ilesos quando expostos diretamente. A Figura 2.5 ilustra alguns dos principais riscos que o arco elétrico expõem os corpos que o cercam.

Figura 2.5 – Perigos associados aos arcos elétricos.



Fonte: Adaptação de COOPER BUSSMANN (2005).

Desta forma, Zhang (2015) caracteriza alguns dos perigos associados aos arcos elétricos, destacados na Figura 2.5:

- **Queimaduras:** Podem ser de 1º, 2º ou 3º grau. As elevadas temperaturas da expansão de ar quente, do plasma e do vapor produzido podem causar queimaduras graves, bem como os fragmentos sólidos derretidos ejetados. Há também a chance do incendiamento dos EPIs. Embora existam diversos riscos associados aos arcos elétricos, as queimaduras são as mais perigosas e preocupantes, pois, levam a maioria das invalidezes e óbitos;
- **Materiais ejetados:** A ejeção de partículas de metal ou peças soltas do próprio equipamento, causada pela explosão gerada pelo arco, pode resultar em ferimentos graves em partes do corpo humano, como olhos, cabeça e tórax (ABB, 2011);
- **Explosão e ondas de pressão:** A pressão gerada pela explosão do arco também é perigosa. Pode derrubar os trabalhadores do local de trabalho e feri-los com partes de objetos arremessados pela explosão;
- **Luz intensa:** É muito comum a cegueira temporária devido a elevada luminosidade repentina causada por um arco elétrico. Além da possibilidade de provocar acidentes, a luz intensa pode causar danos a tecidos importantes dos olhos;
- **Ondas sonoras:** O intenso ruído sonoro causado por um arco elétrico pode causar danos temporários e permanentes à audição de pessoas próximas ao evento;
- **Gases e vapores tóxicos:** Metais e materiais isolantes queimados ou vaporizados produzem gases tóxicos, e sua inalação pode causar queimaduras no trato respiratório e problemas de intoxicação.

Considerando os perigos supracitados, Louro (2008) sumariza as avarias mais comuns em centros de queimados causadas pelos arcos elétricos em humanos, como: queimaduras, traumatismos cranianos, esmagamento dos pulmões, perda de membro, surdez, ferimentos através de estilhaços, fraturas ósseas, cegueira, catarata, óbito, entre outras.

2.1.2 Energia incidente

A EI é a quantidade de energia térmica desencadeada pelo arco elétrico impressa em uma superfície, a uma certa distância da fonte, gerada durante um arco elétrico (IEEE STD 1584, 2018). As unidades utilizadas para expressar a quantidade de energia térmica em dada unidade de área são: calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2) e quilojoules por metro quadrado (kJ/m^2). São definidos $1,2 cal/cm^2$ e $50 kJ/m^2$ como os valores de

energia térmica capazes de causar queimaduras de segundo grau na pele humana (limiar curável), sendo que a partir da exposição para valores iguais ou maiores que estes, é necessária a utilização de EPIs conforme o grau de exposição.

Algumas questões relacionadas ao comportamento da EI foram abordadas na Seção 2.1. A sua estimativa, conforme a norma IEEE *Std* 1584-2018, é abordada ao decorrer deste trabalho. Assim, esta seção possui enfoque em apresentar brevemente algumas questões relacionadas aos EPIs utilizados, à mitigação e a medição da mesma.

Quanto aos EPIs, as vestimentas resistentes a arcos elétricos ou *arc resistant* (AR) têm classificações conforme o valor de desempenho térmico denominado *arc thermal performance value* (ATPV) ou *breakopen threshold energy* (E_{BT}), com base nos padrões de teste da ASTM (SHORT, 2011). O ATPV e o E_{BT} representam o valor máximo de EI sobre o EPI que resulta em uma energia térmica no lado protegido com 50% de probabilidade de causar queimaduras de segundo grau baseado na curva de Stoll (ASTM, 2014). Outro conceito importante é o *incident energy limit* (ELIM) introduzido pela IEC 61482-2 em 2014, que se refere a um valor numérico da EI atribuída a material ou vestimenta, onde aquém deste valor todas as respostas do produto estão abaixo da curva de *Stoll*, sem a ocorrência de ruptura térmica e elétrica (IEC, 2019).

Como os estudos relacionados aos arcos elétricos muitas vezes têm como proposta aumentar o conforto e a proteção do trabalhador através de um melhor dimensionamento de EPIs, considera-se importante abordar brevemente a tabela de dimensionamento mais conhecida na área. Desta forma, é apresentado na Figura 2.6 o dimensionamento de EPIs conforme a magnitude da EI que o trabalhador está exposto segundo a NFPA 70E[®], onde são previstas quatro categorias de EPIs AR para proteção contra os arcos elétricos conforme a energia incidente potencial do local. Muitas empresas e instituições que exercem funções atreladas ao risco de arco elétrico valem-se das orientações da NFPA 70E[®] para dimensionar os EPIs que os trabalhadores devem utilizar.

Figura 2.6 – Categorias de EPI de proteção contra arcos elétricos da NFPA 70E[®].

Categoria de EPI 1	Categoria de EPI 2	Categoria de EPI 3	Categoria de EPI 4
<p>Classificação de risco mínima: 4 cal/cm²</p> <p>Vestimentas AR:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camisetas de mangas longas e calças, ou macacão; • Escudo facial ou capuz; • Jaqueta, parca, roupa refletida e capa de chuva; <p>Equipamentos de proteção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacete; • Óculos de de proteção; • Protetor auricular (tipo inserção); • Luvas de couro para trabalho pesado; • Luvas de borracha isolante; • Calçado de couro (opcional). 	<p>Classificação de risco mínima: 8 cal/cm²</p> <p>Vestimentas AR:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camisetas de mangas longas e calças, ou macacão; • Escudo facial ou capuz e balacrava; • Jaqueta, parca, roupa refletida e capa de chuva; <p>Equipamentos de proteção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacete; • Óculos de de proteção; • Protetor auricular (tipo inserção); • Luvas de couro para trabalho pesado; • Luvas de borracha isolante; • Calçado de couro. 	<p>Classificação de risco mínima: 25 cal/cm²</p> <p>Vestimentas AR:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conforme requerido: Camiseta manga longa calças, macacão, Jaquetas e calças do traje para arco; • Capuz e luvas de borracha com proteção de couro; • Roupas refletivas, jaqueta, parca (conforme requerido). <p>Equipamentos de proteção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacete; • Óculos de de proteção; • Protetor auricular (tipo inserção); • Luvas de couro para trabalho pesado; • Calçado de couro. 	<p>Classificação de risco mínima: 40 cal/cm²</p> <p>Vestimentas AR:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conforme requerido: Camiseta manga longa calças, macacão, Jaquetas e calças do traje para arco; • Capuz e luvas de borracha com proteção de couro; • Roupas refletivas, jaqueta, parca (conforme requerido). <p>Equipamentos de proteção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacete; • Óculos de de proteção; • Protetor auricular (tipo inserção); • Luvas de couro para trabalho pesado; • Calçado de couro. 

Fonte: Adaptação de Herbst (2015).

É importante que se destaque que a escolha de EPIs por categoria é somente um dos caminhos propostos pela NFPA 70E®, sendo que a metodologia de escolha de EPI através da estimação da EI também pode ser avaliada, conforme proposto pela IEEE Std 1584-2018. As premissas entre as duas normas diferem, visto que a seleção por categoria não requer o cálculo da EI, e a seleção por estimação necessita deste estudo. Este é um motivo comum de equívocos existente no Brasil, mas não é o que preconiza a NFPA 70E®.

Em relação à magnitude da EI, conforme a IEEE Std 1584-2018, pode-se afirmar que ela é influenciada principalmente pelos seguintes parâmetros: I_{bf} , V_{oc} , tempo de duração do arco elétrico, distância de trabalho, e configuração, espaçamento e ambiente dos eletrodos. Contudo, pode-se considerar que a distância de trabalho, a V_{oc} e a configuração dos eletrodos são parâmetros constantes. Desta forma, as duas abordagens de mitigação normalmente utilizadas são a limitação da corrente de curto-circuito ou a redução do tempo de duração do arco pela ação da proteção, onde a segunda opção é adotada em maior escala (HUSSAIN, 2015).

Para a limitação do tempo de arco, são normalmente utilizados ajustes nos dispositivos de proteção, como coordenações nas curvas de atuação para que a falta seja extinta mais rapidamente, reduzindo assim a EI (CAMPONOGARA, 2021). Já para limitação de corrente de falta, podem ser utilizados reatores para aumento da impedância de curto-circuito, além da possibilidade de se modificar as características internas do transformador relacionadas aos curtos-circuitos, alterando-se suas propriedades (SHIPP et al., 2011).

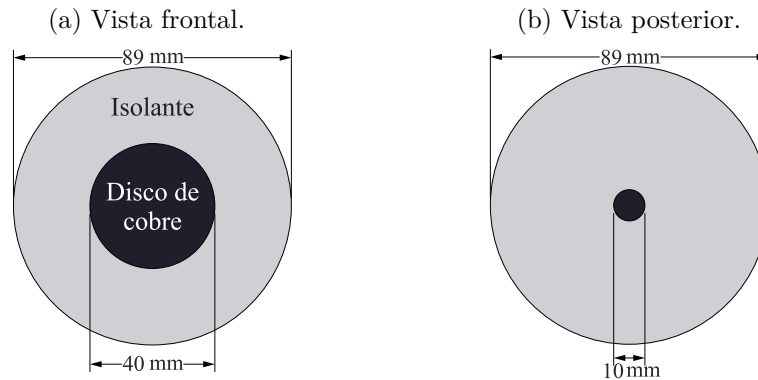
2.1.2.1 Medição da energia incidente através de calorímetros

Os calorímetros são dispositivos utilizados para medir a elevação de temperatura (ΔT) decorrente de um arco elétrico. Segundo descrito pela ASTM (2014) e observado por Bottaro e Eichinger (2018), é admitida uma variação de $\pm 10\%$ na medição da ΔT pelos calorímetros. Conforme as características construtivas recomendadas pela norma IEC 61482-1-1 (2019), estes dispositivos devem ser constituídos de um disco de cobre condutor térmico com diâmetro aproximado de $40 \pm 0,1$ mm, espessura de $1,6 \pm 0,1$ mm, e uma massa de 18 ± 1 g envolto por um isolante térmico composto pelo material Marinite®, que reduz a troca de calor do disco de cobre com o ambiente circundante (MARCHESAN, 2022). Uma alta emissividade do material é necessária para se ter uma elevada absorção de calor, por isso o disco de cobre é tingido por uma tinta *spray* preta, aumentando a emissividade do disco de cobre para cerca de 0,9.

Nos calorímetros utilizados, são empregados orifícios de 10 mm de diâmetro na parte posterior e central do Marinite®, para ser possível visualizar o disco de cobre através câmera termográfica e captar a ΔT . Destaca-se, que a norma ABNT NBR IEC 61482-1-1 recomenda a utilização de um orifício de 3 mm de diâmetro no Marinite®, tendo em vista

apenas a passagem dos condutores do termopar para comunicação com a instrumentação, visto que o ar ali acumulado é essencial para a isolamento térmica, fazendo com que a adoção de 10 mm de orifício invalide o emprego de termopares para este calorímetro. Os calorímetros em questão são apresentados pela Figura 2.7.

Figura 2.7 – Representação dos calorímetros utilizados no laboratório.



Fonte: Autor.

Na representação da Figura 2.7, o círculo central em cor preta representa o disco de cobre, e o círculo externo acinzentado o Marinite[®]. A medição da ΔT e a estimação da EI nos calorímetros é importante para a análise dos resultados obtidos no laboratório. O dimensionamento de um conjunto de calorímetros para a medição da EI é realizado no trabalho de Marchesan (2022), onde são detalhadas as características construtivas necessárias para o dimensionamento dos dispositivos utilizados neste trabalho. A energia térmica absorvida pelos calorímetros em um evento de arco elétrico é igual ou superior a 90% da EI, sendo os valores reais e medidos muito próximos, em concordância com o princípio geral da calorimetria (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996). Segundo este princípio, o calor absorvido por um objeto é o resultado do produto entre a massa, o calor específico do objeto e da ΔT observada, conforme indicado pela Equação (2.1).

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (2.1)$$

onde:

m é a massa do objeto em gramas;

c é o calor específico do material que compõem o objeto em cal/g°C;

ΔT é a diferença entre as temperaturas final e inicial no objeto em Celsius (°C).

O calor específico é a constante de proporcionalidade entre o calor transferido e a variação de temperatura em um material, neste caso o cobre, dado que ele é o material condutor térmico utilizado nos calorímetros. O calor específico não se altera com a massa do objeto, diferentemente da capacidade térmica, que é a quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura do corpo em uma unidade de variação de tempe-

ratura. A capacidade térmica de um material pode ser estimada a partir das Equações (2.2) e (2.3) para temperaturas entre 15,85 e 1084,85 °C, segundo o método padrão de cálculo da norma *Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*, denominada ASTM F1959/F1959M (ASTM, 2014).

$$T = \frac{T_m + 273,15}{1000} \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{(A + B \times T) + C \times T^2 + D \times T^3 + \frac{E}{T^2}}{63,546 \frac{g}{mol}} \quad (2.3)$$

onde:

T_m é a temperatura medida em Celsius (°C);

C_p é a capacidade térmica em cal/g°C;

$A = 4,237312$;

$B = 6,715751$;

$C = -7,46962$;

$D = 3,339491$;

$E = 0,016398$.

Os coeficientes da Equação (2.3) são definidos pela equação de Shomate e disponibilizados pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), onde calorias é a sua unidade de medida (NIST, 2021). Para se obter o comportamento de C_p temporalmente, a ASTM F1959/F1959M recomenda a estimação de seu valor para as temperaturas inicial e final a cada passo (ou instante) de tempo, conforme Equação (2.4).

$$\overline{C_p} = \frac{C_p@T_{inicial} + C_p@T_{final}}{2} \quad (2.4)$$

Apesar dessa análise permitir verificar o comportamento da ΔT em cada calorímetro ao longo do tempo, para a estimação da EI, são consideradas apenas as temperaturas final e inicial em cada dispositivo, e a EI considerada é a do calorímetro de maior ΔT (máxima). Desta forma, a EI pode ser determinada através da Equação (2.5).

$$EI = \frac{m \times \overline{C_p} \times \Delta T}{A} \quad (2.5)$$

onde:

EI é a energia incidente em cal/cm²;

$\overline{C_p}$ é a capacidade térmica a cada passo de tempo em cal/g°C;

m é a massa do objeto em gramas (g);

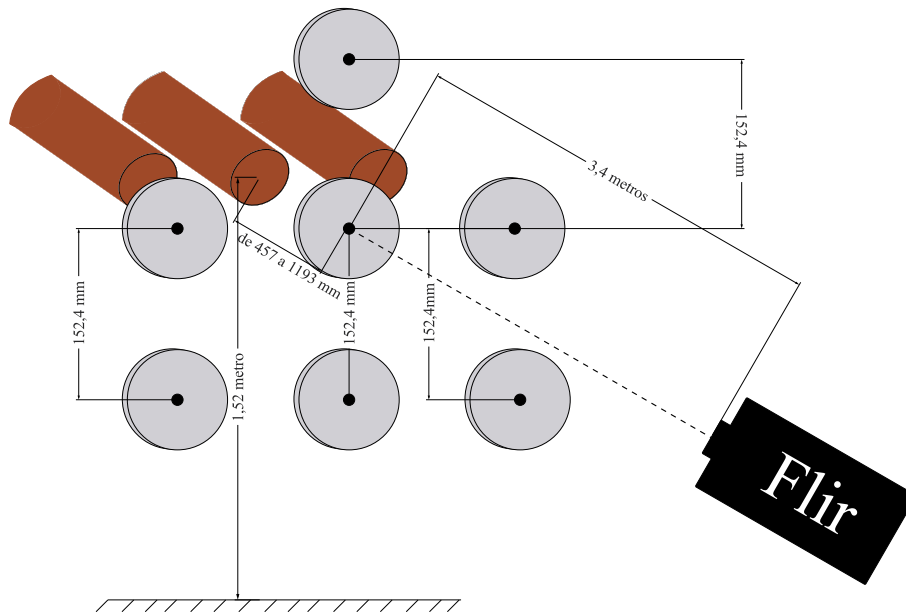
ΔT é a diferença entre as temperaturas final e inicial no objeto em Celsius (°C);

A é a área exposta do disco de cobre em cm².

Quanto às Equações (2.4) e (2.5), estas sofreram ligeiras alterações referenciadas na norma IEC 26482-1-1 (2019), que devem ser implementadas em futuras atualizações da ASTM F1959/1959M. Entretanto, como o intuito deste trabalho é reproduzir as condições da IEEE *Std* 1584-2018, é considerada a versão de 2014 da norma ASTM F1959/F1959M.

No que se refere à distribuição dos calorímetros para a medição da EI, a IEEE *Std* 1584-2018 recomenda que sejam utilizados sete calorímetros, com três alinhados perpendicularmente à ponta dos eletrodos, três calorímetros inferiores e um calorímetro superior, com espaçamentos verticais de 152,4 mm em relação aos calorímetros centrais, emulando o torso de um ser humano. Não existem recomendações específicas quanto aos espaçamentos horizontais internos entre os calorímetros, todavia, considerando o torso humano, o espaçamento horizontal de 152,4 mm entre cada calorímetro configura uma boa estimativa inicial. A ponta dos eletrodos deve ficar a 5 pés (ou 152,4 cm) do chão, e a distância dos calorímetros para os eletrodos deve ser entre 457 e 1193 mm (IEEE STD 1584, 2018). Além disso, para que a câmera termográfica consiga registrar a ΔT em todos os calorímetros a partir da lente de 50 mm, ela deve ficar há uma distância mínima de 3,4 m dos calorímetros. Este arranjo é apresentado pela Figura 2.8.

Figura 2.8 – Arranjo de medição da energia incidente.



Fonte: Autor.

2.2 NORMATIZAÇÕES DE MAIOR RELEVÂNCIA

Nesta seção, são apresentadas breves descrições das normas de maior relevância nos contextos internacional e nacional com relação aos arcos elétricos, seja quanto a metodologia de estimação, medidas de segurança e demais aspectos relevantes.

2.2.1 Internacionais

Existem algumas normas internacionais conhecidas que possuem orientações relacionadas a ensaios e proteção contra arcos elétricos. As descritas neste trabalho são a IEEE *Std* 1584-2018, e a NFPA 70E, pois são mais conhecidas e referenciadas em estudos relacionados ao tema, além de serem frequentemente citadas nas demais normas nacionais e internacionais existentes. Todavia, destaca-se que existem outras normas relevantes ao tema, como: ASTM F1959/F1959M, IEC 61482-1-1, OSHA 1910.269 e a NESC C2.

2.2.1.1 IEEE *Std* 1584-2018

O guia IEEE *Std* 1584-2018 apresenta dois modelos matemáticos que permitem a determinação da distância de aproximação segura (AFB) em mm e da EI em j/cm^2 , conforme a exposição do objeto a um arco elétrico sob determinadas circunstâncias (IEEE STD 1584, 2018). A elaboração do guia foi realizado com base em análises estatísticas e interpolativas de ensaios, considerando a compreensão física que se tem sobre arco elétrico.

A versão de 2018 da norma trouxe importantes mudanças frente a sua predecessora de 2002, principalmente no que se refere ao número de situações em que pode ser aplicada. Foram ensaiadas uma quantidade maior de configurações, elaborados novos equacionamentos para o cálculo da corrente de arco, da EI e da AFB, além da implementação do fator de enclausuramento nos cálculos. Foi na versão de 2018 da norma que começaram ser consideradas as configurações de eletrodos HCB, HOA e VCBB, onde foram incluídas as configurações horizontais em seu escopo. A abrangência de aplicação do guia em sistemas de energia corresponde à seguinte (IEEE STD 1584, 2018):

- Tensões de circuito aberto entre 208 V a 15 kV;
- Uma metodologia de estimativa da EI e da AFB para a faixa de tensão entre 208 V e 600 V, e outra para a faixa de tensão entre 601 V e 15000 V;
- Frequências de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente trifásica de falta franca de 500 A a 106 kA (sistemas de 208 V a 600 V) e de 200 A a 65 kA (sistemas de 601 V a 15 kV);
- Espaçamento entre condutores de 6,35 mm a 76,2 mm (208 V a 600 V) e de 19,05 mm a 254 mm (601 V a 15 kV);
- Distâncias de trabalho entre 381 mm a 914,4 mm (sistemas de 208 V a 600 V) e 457,2 mm a 1193,8 mm (sistemas de 601 V a 15 kV);

- Sem limite de tempo definido para extinção do curto-circuito;
- Limite dos dimensionamentos dos sistemas confinados de 1244,6 mm (altura ou largura máxima) e 1549 m² (máxima área de abertura);
- Configurações de eletrodos: VCB, VCBB, HCB, VOA e HOA.

A norma não apresenta modelos matemáticos ou propostas para estimação da EI para curtos-circuitos monofásicos em CA ou com relação a arcos elétricos em sistemas em CC, e não abrange a questão do dimensionamento de EPIs (CAMPONOGARA, 2021).

Para a aplicação do método da IEEE *Std* 1584-2018, pode ser utilizado uma rotina de 11 passos para a realização dos cálculos necessários (REWITZER, 2019):

1. Coletar dados do sistema e da instalação;
2. Determinar os modos de operação do sistema (V_{oc} , ajuste da proteção...);
3. Determinar a corrente de curto-circuito trifásico franco (I_{bf});
4. Determinar o espaçamento entre eletrodos e as dimensões do compartimento (se houver), com base nas tensões e classes de equipamentos;
5. Determinar a configuração dos eletrodos;
6. Determinar as distâncias de trabalho;
7. Calcular as correntes de arco e corrente de arco reduzida conforme metodologia;
8. Estimar a duração do arco conforme metodologia descrita;
9. Calcular a energia do incidente (EI) conforme metodologia descrita;
10. Calcular o limite seguro de aproximação do arco elétrico (AFB);
11. Escolher o maior valor encontrado para EI e AFB dentre as duas correntes de arco (cenário mais conservador).

É importante ressaltar que neste trabalho não é realizado um estudo demonstrativo utilizando os equacionamentos da norma IEEE *Std* 1584-2018, visto que as estimativas dos valores de EI conforme o modelo matemático da norma são realizados através da modelagem dos equacionamentos no *software* Excel[®]. Para a conferência prática da aplicação dos parâmetros de entrada nos equacionamentos da norma sugere-se a conferência do trabalho de Camponogara (2021).

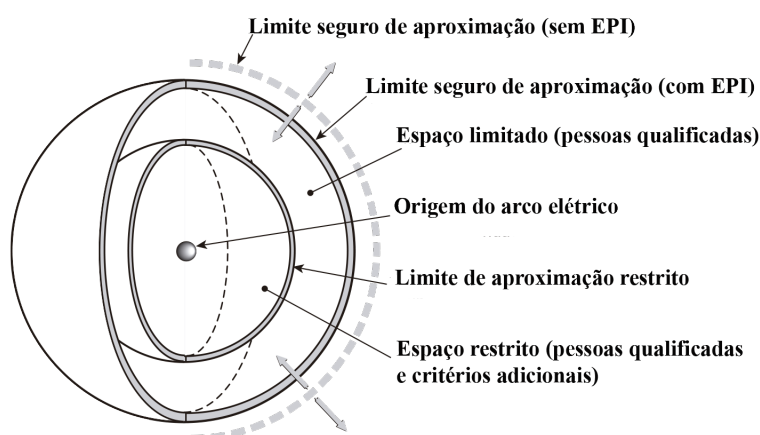
2.2.1.2 NFPA 70E[®]

A norma NFPA 70E[®] é bastante utilizada internacionalmente, sendo o guia mais completo relacionado às distâncias de segurança a serem adotadas, e no dimensionamento de EPIs contra arcos elétricos, visando fornecer práticas seguras no trabalho em áreas que contém riscos elétricos (NFPA, 2021). É atualizada trienalmente e dividida em três capítulos e anexos informativos. Os capítulos são:

1. **Práticas de trabalho relacionadas à segurança:** Aplica-se genericamente para medidas de segurança em locais de trabalho com eletricidade;
2. **Requisitos de segurança relacionada à manutenção de equipamentos:** Direciona as discussões para requerimentos de segurança para práticas seguras no que se refere a manutenção de equipamentos e instalações;
3. **Requisitos de segurança para equipamentos especiais:** Complementa o capítulo 1 da norma com requisitos de segurança para equipamentos especiais (baterias, células eletrolíticas, laboratórios de pesquisa e desenvolvimento, etc.).

A NFPA 70E[®] determina que análises de risco de arco elétrico são necessárias para definir a AFB, e caracteriza os limites de aproximação conforme os apresentados pela Figura 2.9.

Figura 2.9 – Limites de aproximação de acordo com a NFPA.



Fonte: Adaptação da NFPA (2021).

Cada limite (ou zona) de aproximação da Figura 2.9 possui suas peculiaridades, segundo a qualificação do indivíduo, necessidade de EPIs, equipamentos isolantes, níveis de tensão, entre outros. O dimensionamento dos dispositivos de proteção e seccionamento do circuito devem ser considerados para ser possível estimar a EI produzida por um arco elétrico no local e assim determinar a AFB e os EPIs a serem utilizados pelo trabalhador

(SENGER; QUEIROZ, 2012). A NFPA 70E[®] vale-se das definições de materiais resistentes a arcos propostos na ASTM F1959/F1959M, e fornece instruções dos EPIs a serem adotados, conforme abordado brevemente na Figura 2.6.

A NFPA 70E[®] também discute questões relacionadas a áreas com equipamentos elétricos customizados ou especiais, como laboratórios para ensaios, pesquisa e desenvolvimento. A norma não detalha as medidas a serem adotadas, apenas recomenda discussões sobre determinados assuntos, como: medidas específicas de proteção para os trabalhadores, procedimentos de desligamentos, riscos específicos, equipamentos, treinamento e manutenção, responsabilidades e qualificações necessárias (NFPA, 2021).

Em seu anexo D, a NFPA 70E[®] apresenta algumas metodologias de cálculo para determinar a EI utilizados para elaboração da norma e recomendações de aplicações em estudos com arcos elétricos. Os métodos destacados são: Lee, Doughty, IEEE *Std* 1584-2018 e o proposto pela IEEE em 2020 para sistemas CC até 1000 V (NFPA, 2021).

2.2.2 Nacionais

As normas nacionais relacionadas aos arcos elétricos, mesmo que indiretamente, são as normas regulamentadoras (NR) 6 e 10 (Equipamento de Proteção Individual e Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade) e a ABNT NBR 16384:2020 (Recomendações e Orientações para Trabalho Seguro em Serviços de Eletricidade), que têm como foco o dimensionamento de EPIs e o provimento de orientações operacionais. Algumas questões de segurança apontadas nas NRs 6 e 10 são descritas no Apêndice A.

A NR-6 não fornece instruções tocantes especificadamente à proteção contra arcos elétricos, apresentando apenas quais são os EPIs recomendados em situações onde o risco dele é presente. Por este motivo, são necessárias consultas em outras normas para o dimensionamento de EPIs para estas situações.

Já a NR-10, possui a sua última revisão significativa datada de 2004 e está em processo de atualização. Ela aborda mais profundamente a questão da segurança em serviços com eletricidade do que a NR-6, entretanto, também não contempla diretamente a proteção contra arcos elétricos. Algumas questões de destaque abordadas na NR-10 são a inflamabilidade, condutibilidade e influências magnéticas em vestimentas de trabalho com eletricidade. Outro tópico importante abordado é a delimitação das zonas de risco, que são áreas controladas e livres em torno de um ponto energizado da instalação. As zonas de riscos são instituídas por um raio que compreende o ponto energizado até a fronteira da zona existente, e assim sucessivamente, conforme a faixa de tensão nominal da instalação elétrica em kV (BRASIL, 1978).

A norma nacional que possui mais detalhamentos relativos à proteção individual e coletiva contra os arcos elétricos, atuando como um complemento importante à NR-10, é

a ABNT NBR 16384:2020 (CAMPONOGARA, 2021). A norma cita em suas referências normativas a IEEE *Std* 1584-2018, e ao longo de seu texto há diversas menções relacionadas aos arcos elétricos e seus riscos associados (ABNT, 2020). Em seu anexo A, a NBR 16384:2020 procede orientações relacionadas às distâncias para o trabalho em redes energizadas, similarmente às zonas de risco da NR-10, onde uma zona é de risco quando a EI de um arco elétrico nesta é maior que $1,2 \text{ cal/cm}^2$ ou 50 kJ/m^2 . Já em seu anexo E, são fornecidas orientações para a adoção de EPIs contra os efeitos térmicos dos arcos elétricos, dividindo-os em quatro os níveis de proteção (AE-1, AE-2, AE-3 e AE-4), seguindo as recomendações de ATPVs mínimos de 4, 8, 25 e 40 cal/cm^2 , conforme é descrito na NFPA 70E® e observado na Figura 2.6 (ABNT, 2020). Para mais informações relacionadas a esta norma, deve ser feita a sua conferência integral.

2.3 PARÂMETROS PARA ENSAIOS DE ARCOS ELÉTRICOS E MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMAR A ENERGIA INCIDENTE

Para os estudos relacionados aos arcos elétricos, deve-se definir os parâmetros de entrada (ou conhecidos), para ser possível estimar a EI e a AFB através do modelo matemático proposto pela norma IEEE *Std* 1584-2018. A norma possui dois modelos matemáticos para estas estimações, um para V_{oc} entre 208 e 600 V e outro para V_{oc} entre 601 e 15000 V, sendo que para o propósito deste trabalho, apenas o segundo é considerado. Desta forma, esta seção justifica a importância de cada um dos parâmetros utilizados na metodologia da norma para o cálculo da EI e da AFB.

2.3.1 Principais parâmetros de entrada

Em um primeiro momento, são descritos os parâmetros de entrada utilizados no modelo matemático da norma IEEE *Std* 1584-2018 (descrita na Seção 2.3.2) para compreender melhor seus equacionamentos. No Anexo A deste trabalho, é apresentado o sumário dos parâmetros de entrada utilizados nos ensaios da norma.

2.3.1.1 Tensão de circuito aberto

A V_{oc} é o primeiro parâmetro de entrada a ser definido, pois, norteia a escolha do espaçamento entre os eletrodos e a metodologia de cálculo para a estimativa de I_{arc} , da EI e da AFB. A importância da V_{oc} em ensaios laboratoriais se relaciona à ignição, comprimento, e sustentação do arco, além da influência na I_{arc} , e assim, na EI e na AFB.

A escolha do espaçamento entre eletrodos possui relação com a V_{oc} , pois, um dos

motivos dos condutores elétricos serem espaçados é evitar a ocorrência de um arco elétrico, e por este motivo, é necessário um condutor de sacrifício para a sua ignição. Quanto à sustentação, os arcos são extintos antes do fim de seu ciclo natural (através dos sistemas de proteção), então a V_{oc} deve sustentar o arco apenas durante o tempo estipulado pelo sistema de proteção em questão, que normalmente é menor que o do ciclo natural do arco.

Quanto à EI, são observados pequenos aumentos de seu valores com o crescimento de V_{oc} , devido a maiores espaçamentos adotados para tensões mais elevadas, aumentando a área de abrangência do arco elétrico. Entretanto, se o espaçamento é muito grande, o arco possui maiores dificuldades de sustentação, principalmente pelo consequente aumento da resistência de arco (R_{arc}), então a relação entre o espaçamento e a EI não é trivial.

2.3.1.2 Corrente de curto-circuito trifásico franco

A I_{bf} , assim como a V_{oc} , é definida antes do ensaio, porém, é mais incerta em razão de depender de diversas questões relacionadas às impedâncias do circuito do laboratório, diferentemente da V_{oc} . A I_{bf} corresponde a um curto-circuito que assume a impedância de arco como zero no ponto de falta, sendo esta a corrente de ignição do arco elétrico.

Todas as impedâncias existentes até o ponto do arco elétrico devem ser consideradas para a estimação do valor mais preciso de I_{bf} para aplicação no modelo matemático, como de linhas, fonte, transformadores, reatores, entre outros, o que não é uma tarefa simples. O valor de I_{bf} influencia bastantes nos cálculos da I_{arc} , EI e AFB através do modelo matemático da norma.

2.3.1.3 Tempo de duração do arco elétrico

É definido pela IEEE *Std* 1584-2018 como o tempo entre o início e a interrupção do curto-circuito no local de aplicação. Visto que a EI é diretamente proporcional ao tempo de duração do arco, esse parâmetro é fundamental no modelo matemático da norma.

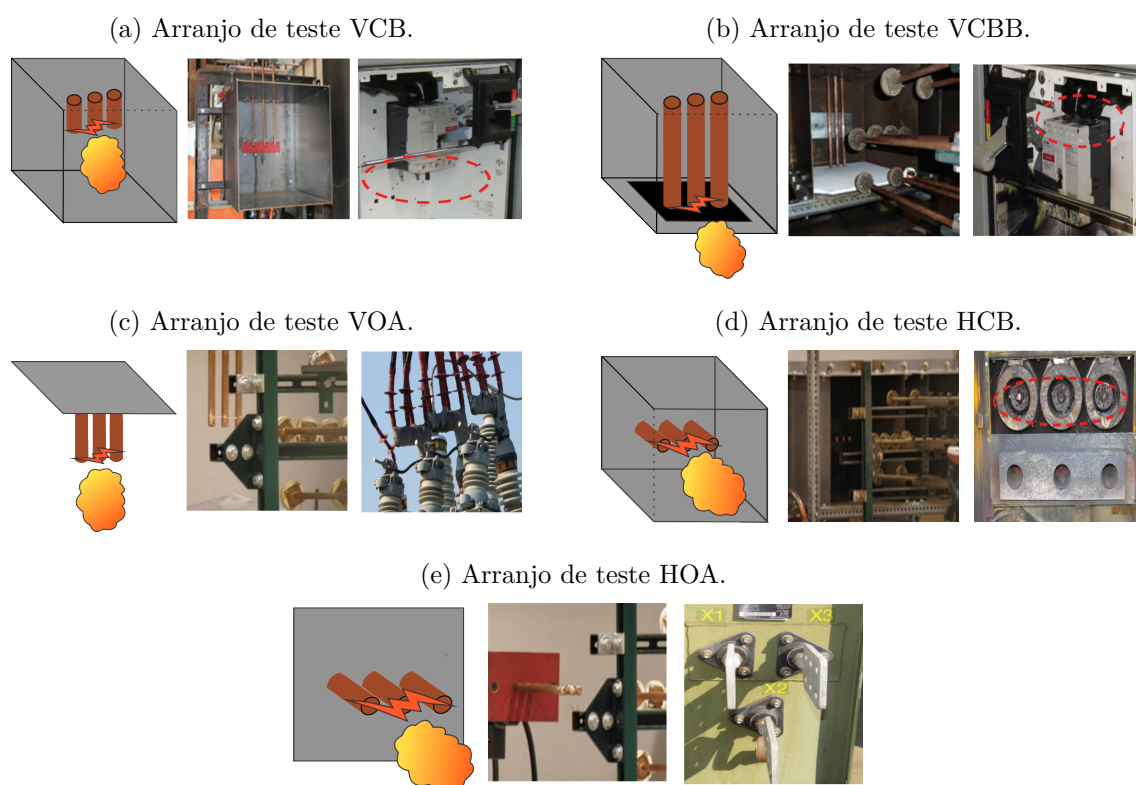
O tempo total do arco elétrico deve considerar o tempo de atuação do dispositivo de proteção associado, que pode envolver diversos fatores, como: tempo de detecção, tempo de abertura do disjuntor, margens de segurança, tempos dos dispositivos auxiliares, e tempo total de fusão (fusíveis), que podem influenciar no tempo de extinção do arco a partir do seccionamento circuito (SANTOS, 2020). Em ensaios laboratoriais, normalmente esse tempo é definido pelo relé de proteção em curvas de tempo definido, com tempos entre 6 e 30 ciclos nos ensaios. A norma IEEE *Std* 1584-2018 realiza a maioria dos ensaios com 6 ciclos, para conservação dos equipamentos, mas sugere ensaios de até 120 ciclos em sistemas elétricos CA de 60 Hz.

2.3.1.4 Configurações e espaçamentos de eletrodos

O modelo matemático do guia IEEE *Std* 1584-2018 é fortemente influenciado pela configuração entre os eletrodos e pelo seu respectivo espaçamento, relação obtida empiricamente pela norma através da realização de diversos ensaios. Os ensaios realizados pelo guia resultaram em coeficientes com valores específicos para serem utilizados nos equacionamentos, conforme a escolha de uma das cinco configurações de eletrodos disponíveis. Os coeficientes “ k ” são disponibilizados no Anexo B deste trabalho, e a sua influência no modelo matemático é apresentada na Seção 2.3.2.

Devido ao grande número de ensaios necessários para a validação de estudos empíricos, a norma valeu-se das configurações usuais com maior risco da ocorrência do arco no setor elétrico, presentes em painéis elétricos e redes de distribuição, como: VCB, VCBB, VOA, HCB e HOA. A Figura 2.10 apresenta as configurações utilizadas pela norma na seguinte ordem: esquemático, arranjo e equipamento associado.

Figura 2.10 – Configurações entre eletrodos utilizadas pela IEEE *Std* 1584-2018.



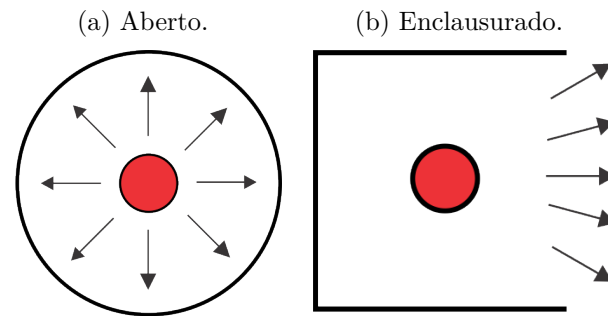
Fonte: Adaptação da IEEE STD 1584 (2018) e de Zhang et al. (2020).

Dadas as configurações apresentadas na Figura 2.10, aquelas com eletrodos horizontais apresentam uma EI maior em relação as com eletrodos verticais para os mesmos parâmetros de entrada, devido a energia térmica produzida pelo arco ser direcionada frontalmente aos calorímetros (IEEE STD 1584, 2018). A energia produzida pelo arco é

transferida através do plasma aos seus arredores pelas diversas formas de transferência de calor, como condução, convecção e radiação (WILKINS; ALLISON; LANG, 2004).

Quanto ao ambiente empregado pelo arranjo, nas configurações enclausuradas ou horizontal os calorímetros absorvem diretamente grande parte da EI do arco devido o direcionamento frontal de energia térmica em direção a eles, diferentemente da configuração VOA, pois, nesta a energia se espalha radialmente, conforme observado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Vista superior da distribuição da EI conforme o ambiente do ensaio.



Fonte: Adaptação de Wilkins, Allison e Lang (2004).

Infere-se da Figura 2.11, que o rebatimento da energia térmica devido às partes posteriores e laterais da caixa metálica a partir do ponto de arco (círculo vermelho) acarreta uma maior energia térmica concentrada nos calorímetros, e conseqüentemente, faz com que seja observado neles uma ΔT maior nas configurações enclausuradas e horizontais.

A Figura 2.10 também permite analisar o direcionamento da nuvem de plasma nos ensaios de arcos elétricos para cada arranjo, e a partir disso, podem ser feitas as seguintes ponderações (ZHANG et al., 2020):

- Nas configurações verticais, o plasma é direcionado para baixo fazendo com que as pontas dos eletrodos se desgastem mais;
- Na configuração VCB, a nuvem de plasma se move para baixo em direção ao fundo do invólucro, causando uma elevada expansão térmica nas laterais e fundo da caixa, que geram uma expansão de energia térmica para fora da caixa metálica em temperaturas mais elevadas em relação às configurações abertas;
- Em VOA, a nuvem de elevadas temperaturas direcionada para baixo é rapidamente resfriada pela convecção de ar;
- As configurações horizontais tendem a resultar medições maiores de temperatura que as verticais equivalentes, pois direcionam mais energia convectiva em direção aos eletrodos (ao invés de radiante). A configuração HCB normalmente produz os maiores aumentos de temperatura nos calorímetros entre todas as configurações;
- O invólucro metálico também influencia nas configurações horizontais, onde o aumento de temperatura nos calorímetros em HCB é maior que em HOA;

- Em VCBB, os jatos de plasma exercem um forte fluxo horizontal em direção aos calorímetros em virtude da reflexão na barreira isolante, aproximando-se do valor de EI produzida por HCB e com valores maiores que em VCB.

Em relação aos espaçamentos entre eletrodos utilizados pelo guia IEEE *Std* 1584-2018 para tensões entre 601 V e 15 kV, foram adotados valores que variam entre 19,05 mm até 254 mm, com a justificativa de que muitos equipamentos de MT possuem espaçamentos superiores a 152,4 mm (espaçamento máximo utilizado na IEEE *Std* 1584-2002). Neste ponto pode-se verificar uma das possíveis lacunas da norma IEEE *Std* 1584-2018, pois, ela não prevê em seu modelo matemático a estimativa da EI para arcos elétricos entre eletrodos com espaçamentos superiores a 254 mm, valor comum nos sistemas elétricos de potência, principalmente de distribuição e transmissão. Para viés comparativo, pode-se observar os espaçamentos definidos para condutores em linhas aéreas (em maior parte na configuração horizontal para redes em MT) vigentes na norma brasileira ABNT NBR 15688, conforme as categorias de condutores (ABNT, 2012):

- Menores que 1 kV: 200 mm entre condutores nus do mesmo circuito;
- Até 15 kV: entre 140 a 170 mm, com condutores no topo do isolador e cobertos;
- De 1 kV até 15 kV: 500 mm para condutores nus do mesmo circuito.

2.3.1.5 Distância de trabalho

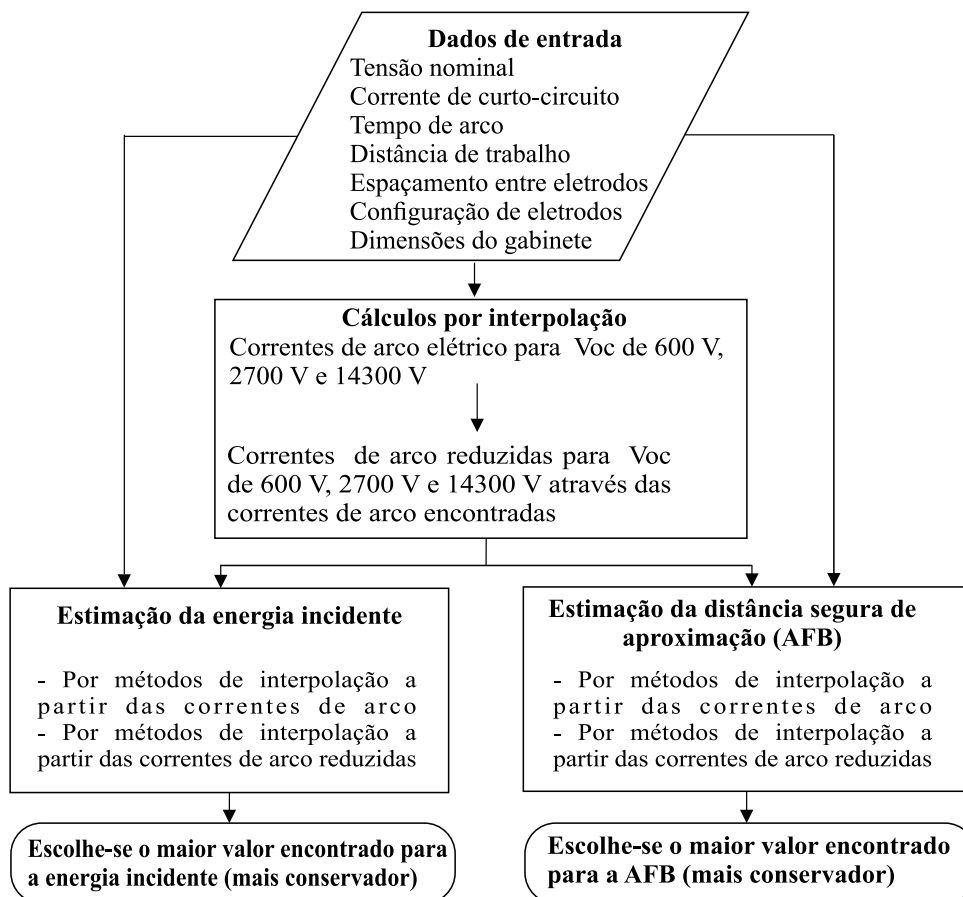
É a distância entre o ponto de origem do arco elétrico e a posição do indivíduo ou do sistema de medição. Pode ser exemplificada como a distância do torso de um trabalhador exposto ao risco de um arco elétrico, ou no caso de ensaios laboratoriais, como a distância do ponto de arco até a posição dos calorímetros em milímetros, conforme representado na Figura 2.1a.

Para a elaboração da norma IEEE *Std* 1584-2018, foram realizadas medições da EI em diversas distâncias de trabalho para ser possível correlacionar precisamente a relação entre ela e a EI para cada configuração de eletrodos, conforme os demais parâmetros de entrada. As distâncias de trabalho adotadas pela IEEE *Std* 1584-2018 consideradas neste trabalho foram entre 457,2 mm e 1193,8 mm para ensaios entre 601 V e 15 kV, visto que esse é o intervalo de tensão que se adequa a faixa de operação do laboratório. É válido ressaltar que a distância considerada é em relação à cabeça e ao torso do indivíduo, desprezando a EI em braços, mãos e instrumentos de trabalho que possam estar mais próximos da origem do arco elétrico.

2.3.2 Principais parâmetros de saída

A partir dos parâmetros de entrada abordados na Seção 2.3.1, são estimados os dois principais elementos resultantes relacionados aos estudos de arcos elétricos: o valor da EI e da AFB. Frisa-se que para determinar esses valores, é necessária a estimação de outros parâmetros, como a I_{arc} e a I_{arc_min} , que também são abordados nesta seção. A Figura 2.12 sumariza a relação existente entre as variáveis de entrada e de saída no modelo matemático da norma IEEE *Std* 1584-2018. Em um primeiro momento, não são realizados ensaios no laboratório que envolvem caixas metálicas, e assim, a parcela da modelagem matemática que envolve a correção por fator de enclausuramento através das dimensões de invólucros metálicos é desprezada nesta seção.

Figura 2.12 – Resumo da modelagem matemática da norma IEEE *Std* 1584-2018.



Fonte: Autor.

Conforme destacado pelo anexo G.8 da norma IEEE *Std* 1584-2018, a aplicação de seu modelo matemático se resume nas seguintes etapas:

1. Levantamento dos parâmetros de entrada do ensaio;
2. Determinação das correntes de arco elétrico (I_{arc}) e de arco reduzida (I_{arc_min});

3. Determinação do tempo exato de duração do arco elétrico através da medição ou das curvas de tempo do dispositivo de proteção associado;
4. Calcular a EI para ambas correntes de arco através do modelo matemático;
5. Calcular a AFB para ambas as correntes de arco através do modelo matemático;
6. Escolha dos maiores valores encontrados para a EI e AFB (escolha conservadora).

2.3.2.1 Correntes de arco elétrico

A I_{arc} depende, principalmente, dos seguintes parâmetros: I_{bf} , espaçamento e configuração dos eletrodos e V_{oc} , sendo seu valor sempre menor em relação à I_{bf} , devido o surgimento da R_{arc} . O dispositivo de proteção deve ser parametrizado para atuar de acordo com esta corrente, pois é ela que sustenta o arco elétrico, circulando através da nuvem de plasma após a fusão do condutor de sacrifício.

O modelo de cálculo da I_{arc} adotado neste trabalho é para tensões entre 601 e 15000 V. O primeiro passo para determinar I_{arc} é estimando seus valores intermediários para 600 V, 2,7 kV e 14,3 kV, conforme a Equação (2.6) e a Tabela B.1.

$$I_{arcV_{oc}} = (10^{k_1+k_2 \times (\lg I_{bf}) + k_3 \times (\lg G)}) \times (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (2.6)$$

onde:

I_{arc_600} é a corrente de arco intermediária em rms para $V_{oc} = 600 V$ (kA);

I_{arc_2700} é a corrente de arco intermediária em rms para $V_{oc} = 2700 V$ (kA);

I_{arc_14300} é a corrente de arco intermediária em rms para $V_{oc} = 14300 V$ (kA);

G é o espaçamento entre eletrodos;

k_1 a k_{10} são os coeficientes de aplicação da Tabela B.1;

\lg é \log_{10} .

Através dos valores encontrados para I_{arc} nas V_{oc} intermediárias, utilizam-se as Equações (2.7), (2.8) e (2.9) para determinar as correntes de interpolação para uma V_{oc} qualquer.

$$I_{arc_1} = \frac{I_{arc_{2700}} - I_{arc_{600}}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + I_{arc_{2700}} \quad (2.7)$$

$$I_{arc_2} = \frac{I_{arc_{14300}} - I_{arc_{2700}}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + I_{arc_{14300}} \quad (2.8)$$

$$I_{arc_3} = \frac{I_{arc_1} \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_2} \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (2.9)$$

onde:

I_{arc_1} é a primeira I_{arc} de interpolação entre 600 V e 2,7 kV (kA);

I_{arc_2} é a segunda I_{arc} de interpolação utilizada quando $V_{oc} > 2,7$ kV (kA);

I_{arc_3} é a terceira I_{arc} de interpolação utilizada quando $V_{oc} \leq 2,7$ kV (kA);

V_{oc} é a tensão de circuito aberto do sistema (kV).

Nota-se que a I_{arc_1} é calculada apenas para ser aplicada na Equação (2.9). Já I_{arc_2} e I_{arc_3} tornam-se a I_{arc} estipulada para o sistema dependendo dos níveis de V_{oc} , conforme descrito pelas Equações (2.10) e (2.11).

$$I_{arc} = I_{arc_3}, \text{ se } 0,6 \text{ kV} < V_{oc} \leq 2,7 \text{ kV} \quad (2.10)$$

$$I_{arc} = I_{arc_2}, \text{ se } V_{oc} > 2,7 \text{ kV} \quad (2.11)$$

A I_{arc} resultante é utilizada para o cálculo da EI e da AFB. No entanto, a norma recomenda que após a sua definição, sejam repetidas as rotinas de cálculo para encontrar os valores da corrente de arco reduzida (I_{arc_min}), para investigar os efeitos da variação da corrente de arco na operação dos dispositivos de proteção e nos demais parâmetros de saída (IEEE STD 1584, 2018). Como uma I_{arc_min} pode fazer com que o tempo de operação da proteção seja maior, podem-se encontrar valores superiores nos novos cálculos da EI e AFB em relação aos previamente estimados. Para determinar I_{arc_min} , em primeiro lugar, é necessário descobrir o fator de correção de variação da corrente de arco ($VarC_f$), que pode ser obtido através da Equação (2.12) em conjunto com a Tabela B.2. Com posse desses valores, I_{arc_min} pode ser calculada pela Equação (2.13).

$$VarC_f = k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7 \quad (2.12)$$

$$I_{arcmin} = I_{arcV_{oc}} \times (1 - 0,5 \times VarC_f) \quad (2.13)$$

onde:

é o fator de correção da corrente de arco;

I_{arc} é a corrente de arco intermediária final em rms (kA);

I_{arc_min} é a corrente de arco reduzida de acordo com $VarC_f$ (kA);

V_{oc} é a tensão de circuito aberto em (kV) (de 601 V a 15 kV nesta situação);

k_1 a k_7 são os coeficientes da Tabela B.2.

O procedimento de cálculo da EI e da AFB sempre deve ser feito para I_{arc} e I_{arc_min} , e ao final, sempre deve ser escolhido o maior valor encontrado para a EI e a AFB, como é abordado no decorrer dessa seção (IEEE STD 1584, 2018).

2.3.2.2 Estimação da energia incidente

De maneira similar ao que ocorre na definição da I_{arc} , para o cálculo da EI a priori devem ser encontrados os valores intermediários para uma V_{oc} de 600 V, 2700 V e 14300 V, e a posteriori devem ser utilizadas as equações de interpolação da norma IEEE Std 1584-2018 para determinar os valores finais da EI. Os valores intermediários da EI podem ser determinados através das Equações (2.14), (2.15) e (2.16).

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10 \left(k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc600}}{k4I_{bf}^7+k51I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \lg I_{bf} + k12 \lg D + k13 \lg I_{arc600} + \lg \frac{1}{CF} \right) \quad (2.14)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10 \left(k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc2700}}{k4I_{bf}^7+k51I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \lg I_{bf} + k12 \lg D + k13 \lg I_{arc2700} + \lg \frac{1}{CF} \right) \quad (2.15)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10 \left(k1+k2 \lg G + \frac{k3I_{arc14300}}{k4I_{bf}^7+k51I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \lg I_{bf} + k12 \lg D + k13 \lg I_{arc14300} + \lg \frac{1}{CF} \right) \quad (2.16)$$

onde:

$E_{600,2700,14300}$ é a EI para uma V_{oc} igual a 600 V, 2,7 kV, e 14,3 kV (J/cm^2);

I_{bf} é a corrente de curto-circuito trifásico franco;

$I_{arc600,2700,14300}$ é a corrente de arco para uma V_{oc} de 600 V, 2700 V e 14,3 kV (kA);

T é o tempo de duração do arco elétrico em milissegundos (ms);

G é o espaçamento entre os eletrodos;

D é a distância de trabalho (mm);

CF é o fator de correção de enclausuramento (1 para VOA e HOA);

$k1$ a $k13$ são os coeficientes da Tabela B.3.

Com os valores obtidos para E_{600} , E_{2700} e E_{14300} , determinam-se os três primeiros termos de interpolação para a V_{oc} de interesse pelas Equações (2.17), (2.18) e (2.19),

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (2.17)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (2.18)$$

$$E_3 = \frac{E_1 \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (2.19)$$

onde valor final da EI em J/cm^2 é fornecido pelas Equações (2.20) e (2.21). O resultado em cal/cm^2 , é o quociente da divisão por 4,184 (IEEE STD 1584, 2018).

$$EI = E_3, \text{ se } 0,6 \text{ kV} < V_{oc} \leq 2,7 \text{ kV} \quad (2.20)$$

$$EI = E_2, \text{ se } V_{oc} > 2,7 \text{ kV} \quad (2.21)$$

A rotina de cálculos para estimar a EI deve ser realizada novamente para a corrente de arco reduzida e então deve ser escolhido o maior valor encontrado.

2.3.2.3 Distância segura de aproximação de arco elétrico

Para estimar a AFB são utilizados métodos de interpolação similares aos empregados para o cálculo de I_{arc} e da EI. Os equacionamentos partem do pressuposto que a distância segura de aproximação é um afastamento em que, a partir da origem do arco elétrico, a EI decorrente é de $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Os valores intermediários de aproximação segura para AFB, são estimados através das Equações (2.22), (2.23) e (2.24).

$$AFB_{600} = 10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc14300}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \lg I_{bf} + k13 \lg I_{arc600} + \lg \left(\frac{1}{CF} \right) - \lg \left(\frac{20}{T} \right)}{-k12} \right) \quad (2.22)$$

$$AFB_{2700} = 10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc2700}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \lg I_{bf} + k13 \lg I_{arc2700} + \lg \left(\frac{1}{CF} \right) - \lg \left(\frac{20}{T} \right)}{-k12} \right) \quad (2.23)$$

$$AFB_{14300} = 10 \left(\frac{k1+k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc14300}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + k11 \lg I_{bf} + k13 \lg I_{arc14300} + \lg \left(\frac{1}{CF} \right) - \lg \left(\frac{20}{T} \right)}{-k12} \right) \quad (2.24)$$

onde:

AFB_{600} é a distância segura de aproximação para $V_{oc} = 600 \text{ V}(mm)$;

AFB_{2700} é a distância segura de aproximação para $V_{oc} = 2,7 \text{ kV}(mm)$;

AFB_{14300} é a distância segura de aproximação para $V_{oc} = 14,3 \text{ kV}(mm)$;

$k1$ a $k13$ são os coeficientes da Tabela B.3.

Dessa forma, os três primeiros termos de interpolação para a AFB podem ser encontrados através das Equações (2.25), (2.26) e (2.27),

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + AFB_{600} \quad (2.25)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + AFB_{2700} \quad (2.26)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (2.27)$$

onde o valor final da AFB em milímetros é fornecido pelas Equações (2.28) e (2.29).

$$AFB = AFB_3, \text{ se } 0,6 \text{ kV} < V_{oc} \leq 2,7 \text{ kV} \quad (2.28)$$

$$AFB = AFB_2, \text{ se } V_{oc} > 2,7 \text{ kV} \quad (2.29)$$

A rotina de cálculos para estimar a AFB deve ser realizada novamente para a corrente de arco reduzida e então escolhido o maior valor encontrado.

2.3.2.4 Potência de arco elétrico e fator de potência

O guia IEEE *Std* 1584-2018 não fornece informações específicas sobre o cálculo da potência do arco elétrico e do fator de potência (FP), até porque esses dois parâmetros não são utilizados no modelo matemático de estimação da EI e da AFB. Todavia, tratando-se de ensaios laboratoriais, é importante que se tenha ciência desses valores para se respeitarem os limites técnicos dos equipamentos do laboratório, e para evitar a extinção ou instabilidade do arco elétrico antes do final do tempo estipulado para o ensaio.

O FP do arco elétrico depende diretamente da resistência do arco elétrico (R_{arc}), que por sua vez, não possui consenso na literatura quanto a sua estimação. Algumas relações, como as de Warrington e Blackburn, inicialmente modeladas visando uma melhor parametrização de relés de proteção de sistemas elétricos, contribuem para se ter aproximações do valor de R_{arc} (JACCARD, 2011).

Utiliza-se como exemplo de aplicação as relações utilizadas nos fornos industriais a arcos elétricos para fusão de metais, análogas as de Blackburn, para o cálculo de R_{arc} . Nessas aplicações, busca-se um FP entre 0,85 e 0,6 pelo seguinte motivo: um FP acima de 0,85 deixa o arco instável e um FP abaixo de 0,6 faz com que as perdas de energia sejam muito elevadas (CUNDEVA; DIGALOVSKI, 2016). Para a aplicação laboratorial, as perdas são irrelevantes se comparadas a possibilidade de extinção do arco antes do tempo de ensaio, dessa forma, preza-se por um FP que esteja sempre abaixo de 0,65 para que o arco seja estável durante o ensaio. A R_{arc} aproximada utilizada em fornos de arco elétrico pode ser estimada através da Equação (2.30) (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

$$R_{arc} = \frac{1443 \times L_{arc}}{I_{arc}} \quad (2.30)$$

onde:

R_{arc} é a resistência de arco elétrico em Ω ;

L_{arc} é o comprimento de arco elétrico em cm (espaçamento entre eletrodos);

I_{arc} é a corrente de arco elétrico em A.

A partir do valor encontrado para R_{arc} , e da identificação das demais impedâncias do circuito (exemplo: linha, fonte, reator, transformador, etc.), é possível definir de forma prática e com precisão considerável o FP e a potência de curto-circuito para um arco elétrico trifásico, conforme as Equações (2.31) e (2.32).

$$FP = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{oc}}{\sqrt{3} \times I_{arc}}\right)^2 - X_{eq}^2}}{\frac{V_{oc}}{\sqrt{3} \times I_{arc}}} \quad (2.31)$$

$$S_{arc} = \sqrt{3} \times V_{oc} \times I_{arc} \quad (2.32)$$

onde:

X_{eq} é a reatância equivalente dos equipamentos do circuito;

S_{arc} é a potência de curto-circuito trifásica do arco.

Os equipamentos do circuito compreendem, de maneira geral, a fonte de potência, o transformador, os reatores, o alimentador e qualquer estrutura que forneça impedância. Como a I_{bf} é controlada pela diminuição da reatância fornecida pelos reatores, e a diminuição da reatância aumenta o FP, pode-se concluir que a elevação da corrente de ensaio, aumenta o FP do arco elétrico. Porém, analogamente, uma I_{arc} maior também implica em uma menor R_{arc} , conforme descrito na Equação (2.30). Entretanto, R_{arc} é diretamente proporcional ao FP, o que faz com que a estimação do FP não seja uma tarefa simples. O L_{arc} também possui uma função importante nesse aspecto, visto que o percurso da I_{arc} é substancialmente de natureza resistiva conforme afirmado por Lee (1982), logo, implica-se que um maior L_{arc} (ou espaçamento) incide em uma maior R_{arc} , e conseqüentemente, aumenta o FP e deixa o arco mais instável. Desta forma, pondera-se que o cálculo do FP de um arco elétrico não é exato, mas é possível ter uma estimativa de seu valor, o que reitera-se, não é uma tarefa simples, devido muitos dos parâmetros considerados para o cálculo do FP serem voláteis em um arco elétrico.

Desta forma, pode-se ponderar que o cálculo do FP de um arco elétrico não é trivial e exato, mas é possível que estimativas sejam encontradas. Para sustentar um arco elétrico pelo tempo desejado, há a necessidade do equilíbrio de diversos parâmetros, como impedância do sistema, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e comprimento de arco, o que nem sempre é uma tarefa simples, pois em algumas situações, alguns desses parâmetros não podem ser ajustados conforme o desejado na instalação. Mais questões relacionadas às características dos fornos a arcos elétricos são descritas no Apêndice B.

3 ESTRUTURA LABORATORIAL

3.1 ESPAÇO FÍSICO

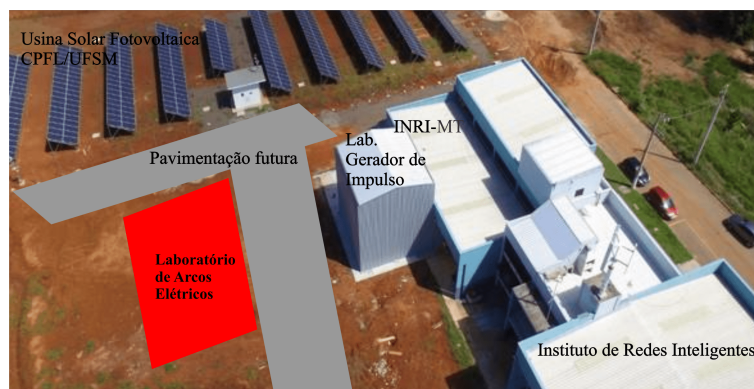
No Capítulo 1 foi apresentado o problema a ser resolvido, bem como a justificativa e a motivação para a constituição deste trabalho. No Capítulo 2 foram discutidos alguns dos principais trabalhos científicos, referências normativas e modelos matemáticos existentes na literatura no que se refere a temática deste trabalho. O presente capítulo, aborda com detalhamentos técnicos, os aspectos relacionados ao espaço físico, equipamentos e implementação do laboratório de arcos elétricos.

3.1.1 Laboratório de arcos elétricos (INRI-AF)

O laboratório de arcos elétricos está localizado no Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da UFSM, e é um anexo do laboratório de média tensão do mesmo instituto (INRI-MT). A Figura 3.1 apresenta a localização exata do laboratório.

Figura 3.1 – Localização do laboratório de arcos elétricos implementado.

(a) Imagem aérea do INRI com destaque para o INRI-AF.



(b) Imagem em perspectiva da localização do INRI-AF.

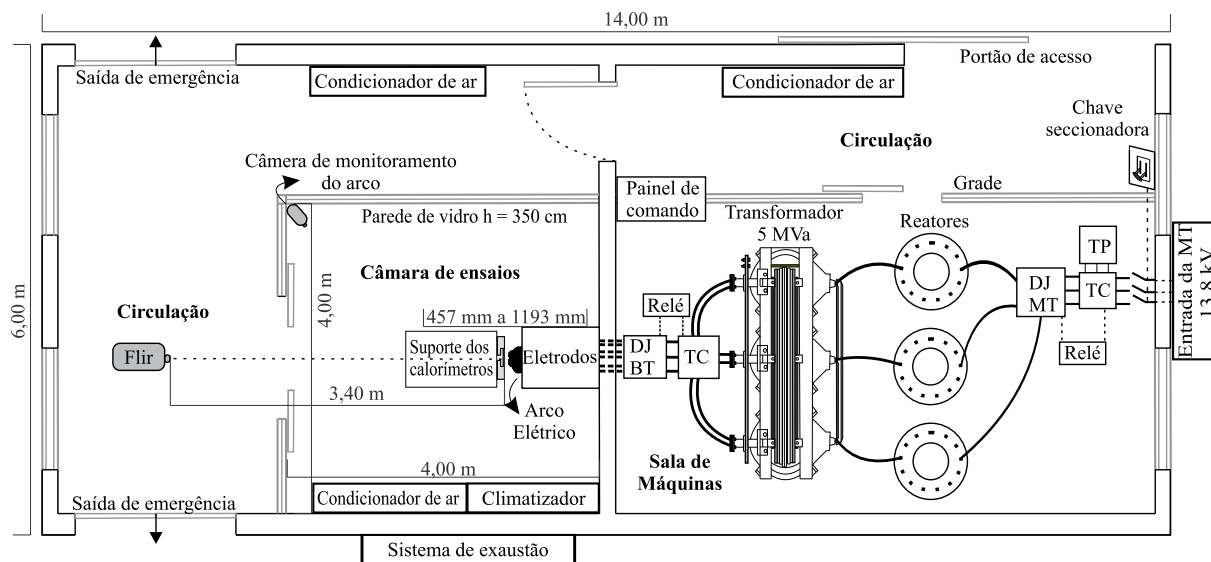


Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 3.1, o laboratório de arcos elétricos está localizado próximo ao INRI-MT, onde está situada a sala de controle, monitoramento e acionamento do INRI-AF, além de ser o ponto de derivação da alimentação em BT para o mesmo. A alimentação em MT do INRI-AF provém de um alimentador de uso exclusivo do laboratório, advindo da subestação Santa Maria 2, onde é feita uma derivação do ramal de entrada de energia da UFSM até o ramal de entrada do laboratório.

Radicada a localização do laboratório, é pertinente a caracterização de algumas de suas características construtivas. Desta forma, a planta baixa exibida na Figura 3.2 apresenta as dimensões do laboratório bem como alguns de seus principais equipamentos, abordados na Seção 3.2.

Figura 3.2 – Planta baixa do INRI-AF contendo os principais equipamentos.



Fonte: Autor.

O INRI-AF, cuja as dimensões são apresentadas na Figura 3.2, possui um pé direito de $3,5 \text{ m}^2$ e uma área total de 84 m^2 que compreendem a sala de máquinas e a câmara de ensaios do prédio, sendo que ambas possuem áreas de circulação associadas.

A sala de máquinas possui uma área útil de $26,8 \text{ m}^2$, e é separada da área de circulação por uma grade metálica de proteção. Os equipamentos da sala de máquinas são especificados na Seção 3.2.1. O acesso ao local é realizado através do portão de acesso metálico indicado na Figura 3.3, ou através da área de circulação pela câmara de ensaios.

A câmara de ensaios é compreendida por equipamentos relacionados a ignição, medição e controle ambiental para os ensaios de arcos elétricos, especificados na Seção 3.2.2. A câmara de ensaios possui paredes de vidro com espessura de 8 mm e conta com uma área útil de 16 m^2 , formando uma espécie de “aquário”, além de uma porta corredeira com divisórias que possuem aberturas para ambos os lados, permitindo o acesso à câmara de ensaios e a utilização da câmera termográfica no monitoramento do ensaio. Além disso, dispõe de duas saídas de emergência sinalizadas e dois extintores de incêndio classe C.

A sala de controle externa é localizada no laboratório de média tensão do INRI, onde é realizada a ignição e o monitoramento do arco elétrico através do painel de comando e de computadores. Esta sala possui em torno de 25 m² e também é responsável pelo controle de outras categorias de ensaios, como de impulsos atmosféricos e aquecimento de transformadores. Os computadores associados ao monitoramento visual do arco elétrico e à medição térmica dos calorímetros são interligados aos seus respectivos equipamentos através de cabos RJ45 advindos da câmara de ensaios.

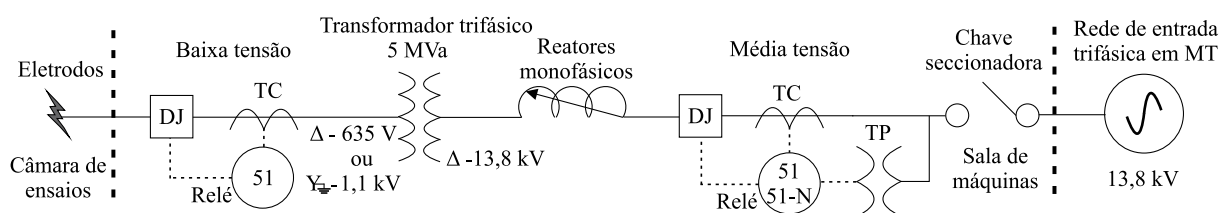
3.2 ESPECIFICAÇÕES E UTILIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados em cada um dos setores do INRI-AF para viabilização dos ensaios de arcos elétricos são apresentados no decorrer desta seção, na seguinte ordem: descrição dos equipamentos, especificações e aplicações nos ensaios de arcos elétricos. Os procedimentos de realização do ensaio e as funções dos equipamentos descritos nestes são detalhadas no Capítulo 4.

3.2.1 Sala de máquinas

A sala de máquinas é local onde estão os equipamentos responsáveis pela geração, controle e interrupção do arco elétrico, por equipamentos de potência que limitam e medem as correntes de arco elétrico, além de realizarem o seccionamento da instalação após o ensaio. A Figura 3.2 apresentou alguns dos equipamentos presentes no local, e a Figura 3.3 apresenta a interação entre eles através de um diagrama unifilar.

Figura 3.3 – Diagrama unifilar da sala de máquinas.



Fonte: Autor.

Ao decorrer desta seção, são detalhados os equipamentos da sala de máquinas elencados na Figura 3.3, bem como alguns elementos adicionais que não foram representados nela. Como há equipamentos utilizados tanto nos trechos de MT e de BT do circuito, alguns deles são detalhados apenas uma vez, porém, sua aplicação é descrita para ambos os trechos do circuito.

3.2.1.1 Entrada de energia em média tensão

A rede em MT que alimenta o laboratório de arcos elétricos possui cerca de 420 metros, e o seu trecho final pode ser observado na Figura 3.1b. A tensão de operação dessa linha é de 13,8 kV, e a entrada de energia do laboratório é realizada por três cabos subterrâneos de 90 mm². Para seccionar o laboratório de seu ramal de ligação, existem três chaves-faca, manuseadas em casos eventuais de manutenção em equipamentos relacionados à entrada de energia. A Figura 3.4 apresenta o percurso da rede de distribuição que alimenta o laboratório, a partir da entrada da UFSM.

Figura 3.4 – Rede em média tensão que alimenta o laboratório de arcos elétricos.



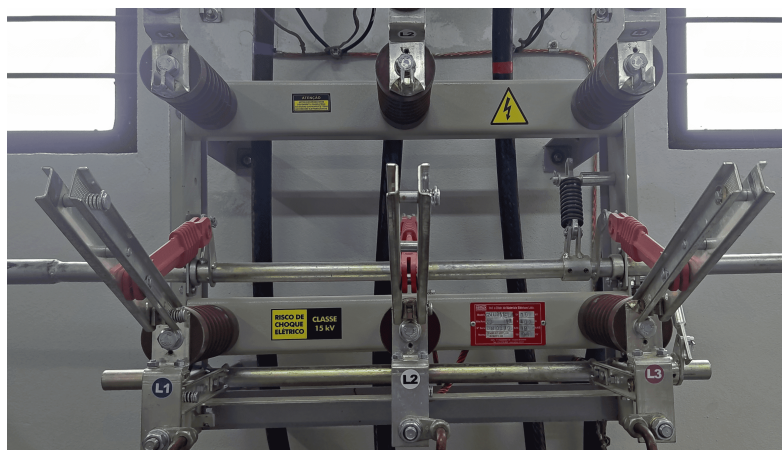
Fonte: Google (2022).

O alimentador em MT do laboratório é sinalizado pela linha amarela da Figura 3.4. Esta rede foi remanejada para uso exclusivo do laboratório a partir de um dos ramos de entrada de energia da UFSM, de modo a diminuir as oscilações nos demais alimentadores da universidade devido os ensaios. Todavia, isso não impede que ocorram oscilações na rede da UFSM a depender dos níveis de corrente de curto-circuito empregados, porém, com as magnitudes destas perturbações distribuídas entre seus diversos alimentadores.

3.2.1.2 Chave seccionadora tripolar com sistema de aterramento

A chave seccionadora empregada no laboratório possui duas funções: a de seccionar e isolar o circuito de MT a partir de sua abertura e de energizar o circuito de MT a partir de seu fechamento. A chave utilizada no laboratório dispõe de um sistema com lâmina de aterramento temporário acoplada quando aberta, eliminando possíveis correntes de fuga do circuito. A chave seccionadora tripolar para uso interno em subestação empregada é apresentada pela Figura 3.5, e suas especificações são descritas na Tabela 3.1.

Figura 3.5 – Chave seccionadora utilizada no laboratório.



Fonte: Autor.

Tabela 3.1 – Especificações da chave seccionadora utilizada no laboratório.

Descrição	Especificação
Modelo	GV-0115
Tensão nominal	15 kV
Nível básico de isolamento	95 kV
Corrente nominal	0,4 até 4 kA
Corrente de curta duração simétrica (1 s)	16/25/31,5/40 kA
Corrente dinâmica (crista)	40/62,5 kA

Fonte: Sellux (2017).

Como procedimento de laboratório, a chave deve permanecer sempre na posição normalmente aberta (NA), alterando-se sua posição para normalmente fechada (NF) apenas quando for prevista a realização de um ensaio. O seu manuseio sempre é realizado com a utilização de EPIs de categoria de proteção 2 e classe de isolação de 15 kV pelo operador, conforme indicado na Figura 2.6, para proteção adicional do indivíduo contra quaisquer eventualidades no processo de fechamento da chave. O operador deve manusear a chave sob um tapete isolante elétrico com classe mínima de isolação de 17 kV.

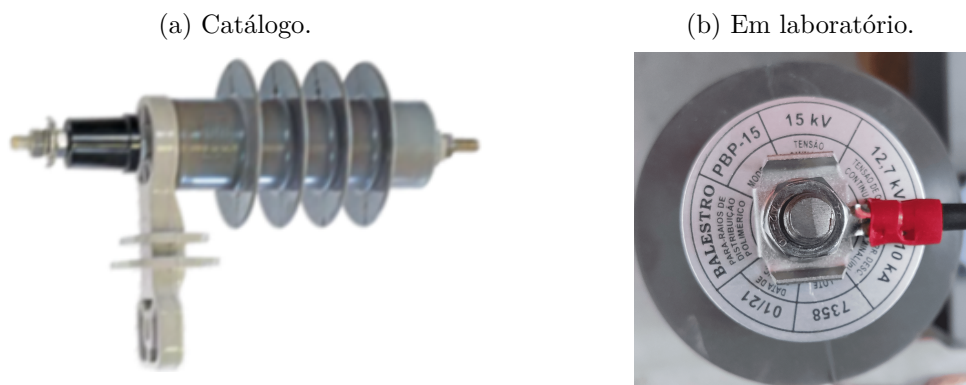
3.2.1.3 Para-raios

Os para-raios são dispositivos fundamentais para a proteção dos equipamentos elétricos em subestações, pois, protegem estes contra sobretensões originadas por curtos-circuitos e transitórios de tensão que se originam após a extinção de arcos elétricos, descargas atmosféricas e operações de manobra. Como a sala de máquinas possui uma estrutura análoga a de uma subestação de energia, e o laboratório realiza ensaios originados por curtos-circuitos, é fundamental que os equipamentos do local estejam sob a proteção destes dispositivos. Quando há o rompimento da tensão nominal (V_n) do para-raios por sobre-

tensão, o resistor não-linear deste dispositivo tem sua resistência reduzida drasticamente, fechando um circuito com a malha de terra e escoando a energia transitória, voltando às condições normais de operação após a normalização da tensão em seus terminais.

No laboratório são utilizados nove para-raios de óxido de zinco polimérico (ZnO), associados aos seguintes equipamentos: três no TP da entrada, três nos reatores monofásicos e três no primário do transformador de potência. O modelo de para-raios utilizados é apresentado pela Figura 3.6 e suas especificações são descritas na Tabela 3.2.

Figura 3.6 – Para-raios utilizado no laboratório.



Fonte: Balestro (2020) e Autor.

Tabela 3.2 – Especificações do para-raios utilizado no laboratório.

Descrição		Especificação
Modelo		PBP 15/10
Tensão nominal (rms)		15 kV
Máxima tensão de operação contínua (rms)		12,7 kV
Máxima tensão residual para impulso de corrente íngreme (pico)		54,9 kV
Máxima tensão residual para corrente de impulso de manobra 500 A (pico)		40 kV
Máximas tensões residuais (pico)	5 kA	46,7 kV
	10 kA	49,5 kV
	20 kA	56 kV

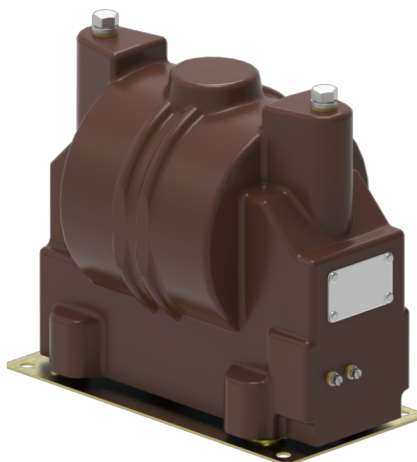
Fonte: Balestro (2020).

Como a V_n no circuito de entrada em MT é de 13,8 kV, os para-raios estão corretamente dimensionados para os equipamentos do circuito. Especificadamente com relação aos para-raios empregados nos reatores, a maior tensão residual possível entre os *taps* destes é entre H0-H12, visto que esta configuração injeta a maior reatância possível no circuito. Conforme testes realizados em laboratório, através de um gerador de impulsos, pode-se ter até 12 kV rms entre esses *taps*, e uma tensão de pico 16,9 kV, valor abaixo das máximas tensões apresentadas na Tabela 3.2. Destaca-se que o para-raios não deve atuar com frequência, apenas quando realmente houver necessidade, então seus valores de máxima tensão de pico devem ser consideravelmente acima do pico de tensão entre os terminais protegidos.

3.2.1.4 Transformador de potencial

O transformador de potencial (TP) utilizado no laboratório, bem como suas especificações, são apresentados respectivamente pelas Figura 3.7 e Tabela 3.3.

Figura 3.7 – TP utilizado no laboratório.



Fonte: Isolet (2021b).

Tabela 3.3 – Especificações do TP utilizado no laboratório.

Descrição	Especificação
Modelo	BDE - FF9A
NBI	95 kV
Tensão máxima	15 kV
V_n primária	13,8 kV
V_n secundária	115 V
RTP	120:1
Fator de sobretensão	1,2
Exatidão	50 VA 0,6 (60 Hz)

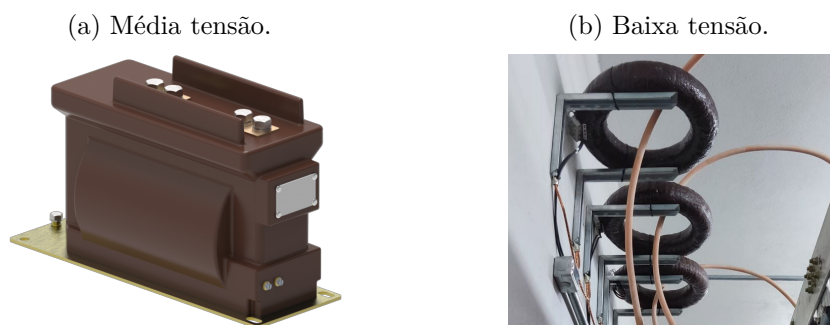
Fonte: Isolet (2021b).

A função primordial do TP empregado no laboratório, além de comunicar a existência ou não da tensão de alimentação e medir o seu valor através de um voltímetro associado no painel de comando, é de proteção do circuito, através da abertura da bobina de abertura (BA) do disjuntor de MT. Em caso de ausência de tensão nos painéis de comando no momento de ensaio, seria inviabilizada a abertura remota dos disjuntores do laboratório, conforme é descrito na Seção 3.2.1.7, o que colocaria em risco os operadores do laboratório. Desta forma, caso não seja detectada tensão entre os terminais da bobina auxiliar de abertura principal (BA1), mas seja detectada tensão nos terminais da BA, o disjuntor abre automaticamente e secciona o circuito com auxílio de uma chave contatora e um transformador auxiliar elevador de 115 V para 220 V.

3.2.1.5 Transformadores de corrente

Os transformadores de corrente (TCs) possuem papel fundamental no laboratório, pois, medem as correntes de ensaio na MT e na BT e as enviam aos relés, que a partir dos valores medidos, tomam a decisão conforme sua parametrização prévia. A Figura 3.8 e a Tabela 3.4 apresentam e descrevem os TCs empregados na MT e na BT do laboratório.

Figura 3.8 – TCs empregados no laboratório.



Fonte: Isolet (2021a) e Autor.

Tabela 3.4 – Especificações dos TCs utilizados no laboratório.

Descrição	Especificação	
	MT	BT
Aplicação	MT	BT
Modelo	BDE-2700A	Equipamento customizado
Marca	Isolet	Monarca
Unidades	3	3
Tipo	Barra	Janela
V_n máxima	15 kV	7,2 kV
I_n primário	1,2/0,6/0,3 kA	25/15/10/5 kA
I_n secundário	5 A	5 A
RTCs	240/100/60	5000/3000/2000/1000
Classe	10B200	10B200
Fator térmico	1,2	1,2

Fonte: Isolet (2021a) e Autor.

Inicialmente, são utilizadas as menores relações de transformações de correntes nominais (RTCs) existentes nos TCs de MT e BT do laboratório, sendo seus valores de 60 (300:5) e 1000 (5000:5), respectivamente. Um dos maiores problemas que podem ocorrer em relação aos TCs é a saturação, que ocasiona erros na medição e na conversão de correntes primárias para secundárias, entretanto, a saturação ocorre apenas caso a corrente que chega ao TC seja 20 vezes maior que a sua corrente nominal primária. A saturação é uma condição preocupante, contudo, como as correntes dos ensaios são relativamente conhecidas, e a ocorrência de correntes 20 vezes maiores que a corrente nominal primária de ambos os TCs não devem ser observadas, esta questão não é preocupante.

A escolha do RTC utilizado também deve considerar o RTC máximo dos relés associados aos TCs. Os relés utilizados no laboratório possuem um RTC máximo de 1250, o que não seria um problema para o TC de MT. Entretanto, como pode ser observado na Tabela 3.4, na BT pode-se ter RTCs maiores que 1250, e em caso da escolha destes, pode-se ter problemas na proteção do laboratório e na medição das correntes de ensaio. Em termos práticos, é possível adotar um RTC maior que 1250, desde que o relé seja parametrizado cuidadosamente para atuar, por exemplo, com níveis de correntes bem abaixo do que as esperadas. Contudo, é mais prudente utilizar um RTC que esteja no escopo operativo do relé associado ao TC, para que este atue corretamente e as medições extraídas das oscilografias do relés sejam precisas. Desta forma, a escolha do RTC 1000 para o TC de BT é a mais prudente, considerando os relés disponíveis no laboratório.

3.2.1.6 Disjuntores

Os disjuntores a vácuo da linha VBW utilizados na proteção da MT e da BT do laboratório são apresentados pela Figura 3.9, e as suas principais especificações, considerando a aplicação proposta, são descritas pela Tabela 3.5.

Figura 3.9 – Disjuntor a vácuo VBW utilizado no laboratório.



Fonte: WEG (2021).

Dentre as características descritas pela Tabela 3.5, destaca-se a possibilidade de abertura e fechamento remoto do disjuntor, e o seu tempo de abertura de cerca de 35 milissegundos, sendo este um parâmetro importante, pois, interfere diretamente no tempo de duração do arco elétrico. No laboratório, os disjuntores servem tanto para o seccionamento do circuito como para a ignição do arco elétrico, dado que ele é o equipamento que energiza o transformador e os eletrodos para iniciar o curto-circuito, e o extingue a partir da abertura do circuito, operando conjuntamente aos relés e aos painéis de comando do laboratório. As suas bobinas de fechamento (BF), e de abertura principal (BA) e auxiliar (BA1), atuam perante um pulso 220 V, que é a tensão de operação da rede trifásica em BT na região de instalação do laboratório.

Tabela 3.5 – Especificações do disjuntor a vácuo VBW.

Descrição	Especificação
Tipo	Vácuo
Modelo	VBWC - 17P25A1313M4C4T4SA2U0A2
Classe de tensão (kV)	17,5
Corrente nominal de curto-circuito (kA)	25
Motorização	200~250 Vca/Vcc
Bobina de fechamento	200~250 Vca/Vcc Permite ligar o disjuntor através de comando elétrico
Bobinas de abertura	200~250 Vca/Vcc Permite desligar o disjuntor através de comando elétrico
Tempo de abertura (instantâneo) (ms)	> 35
Chave de bloqueio e botões de liga e desliga	Sim

Fonte: WEG (2021).

3.2.1.7 Relés de proteção

São utilizados dois relés de proteção no laboratório, um no lado de MT e outro no de BT. Os equipamentos são da marca Pextron, das linhas URP6000-5 e 6001-5, e ambos possuem funcionalidades análogas. O modelo de relé utilizado é mostrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Relé utilizado no laboratório.



Fonte: Pextron (2021).

Dentre as funções deste relé pertinentes ao laboratório, destacam-se:

- **Software URP 6000-5/6001-5:** *Software* que permite a parametrização e a leitura de dados do relé. Viabiliza a configuração de todas as unidades de proteção, coleta de oscilografia e acesso ao histórico de medições do relé, entre outros;

- **Conexão serial:** A comunicação entre o relé e um computador é feita a partir de um cabo USB-B, que permite o uso de seu *software* para configurar o equipamento;
- **Funções de proteção 51 e 51-N:** Unidade de sobrecorrente temporizada, faz com que o relé atue caso a corrente medida pelo TC seja maior que a ajustada na parametrização. Nesta aplicação, apenas a detecção de corrente já deve fazer o relé atuar, visto que são correntes de altas magnitudes, e desta forma, é utilizada a função de tempo definido, ou seja, a atuação ocorre em um tempo fixo ajustado;
- **Oscilografia:** Permite as leituras das correntes de arco e seu tempo de duração, em valores instantâneos e rms. A exportação desses dados é realizada a partir de documentos *COMTRADE* (*Common Format for Transient Data Exchange*), através de arquivos de extensão .dat (arquivo de dados) e .cfg (arquivo de configuração), além de um arquivo .ros para leitura da oscilografia no *software* do relé.

A atuação da função 51 do relé ocorre a partir do ajuste da corrente de *pick-up* em valores primários e do RTC, onde o valor de corrente lido pelo relé é o quociente do primeiro pelo segundo. Destaca-se que ambos os relés são parametrizadas para atuar em tempo definido. Em condições normais de ensaio, o relé de BT sempre deve atuar antes do relé de MT, salvo em condições de curto-circuito interno nos reatores ou no transformador, ou como retaguarda em caso de falha na proteção por parte do relé ou disjuntor da BT.

No relé de MT, são ativadas as funções 51 e 51-N, para casos de curtos-circuitos monofásicos nos reatores ou no transformador, além da função de bloqueio por 2^a harmônica (I_{h2}/I_f). Como o transformador é energizado e desenergizado a cada ensaio, ocorre o surgimento de correntes de *inrush*, com elevados conteúdos harmônicos, que podem levar a operações indevidas do relé de MT na energização do transformador, o que não é desejado. Desta forma, é definido arbitrariamente o ajuste de 0,4 entre a amplitude da 2^a harmônica e da fundamental para que o relé de MT não atue devido à corrente de *inrush*, entretanto, este ajuste pode ser alterado conforme o andamento dos ensaios.

Como o relé de MT sempre deve atuar após o de BT, o mesmo deve ser parametrizado com um tempo de atuação maior. Para este ajuste, devem ser considerados o tempo de atuação do relé de BT (considerando a exatidão da unidade temporizada) e também o tempo de atuação do disjuntor de BT. A exatidão da unidade temporizada deste relé é de $\pm 2,5\%$, e o tempo de atuação do disjuntor é em torno de 35 milissegundos, logo, o tempo mínimo para ajuste do relé de MT deve ser o valor estimado pela Equação (3.1).

$$t_{MT} \geq (1,025 \times t_{BT}) + t_{DJ} \text{ (milissegundos)} \quad (3.1)$$

Desta maneira, o relé de MT não deve atuar, com exceção dos casos anômalos mencionados anteriormente. A oscilografia do relé de MT é extraída apenas para armazenamento de dados e para análise em caso de falha de sincronismo na proteção, visto

que para a análise das correntes e do tempo de arco é necessária apenas a oscilografia do relé de BT. A oscilografia do relé de BT permite a obtenção das correntes e do tempo de ensaio, visto que ela detecta o exato momento em que a corrente de arco começa circular no circuito através da partida da função 51, envia o sinal de abertura para o disjuntor através do *trip* da função 51, e detecta a ausência de corrente no circuito após a abertura do disjuntor, e conseqüentemente, a extinção do curto-circuito.

A parametrização do relé de BT é mais simples, entretanto, deve ser realizada cuidadosamente, devido ser o ajuste deste relé que controla o tempo de arco elétrico. Em termos gerais, o laboratório comporta ensaios de arcos elétricos de 100 a 2000 ms, podendo o tempo de atuação deste relé ser ajustado dentre esses valores conforme o ensaio a ser realizado, desde que seja sempre menor que o tempo ajustado no relé de MT, conforme indicado na Equação (3.1).

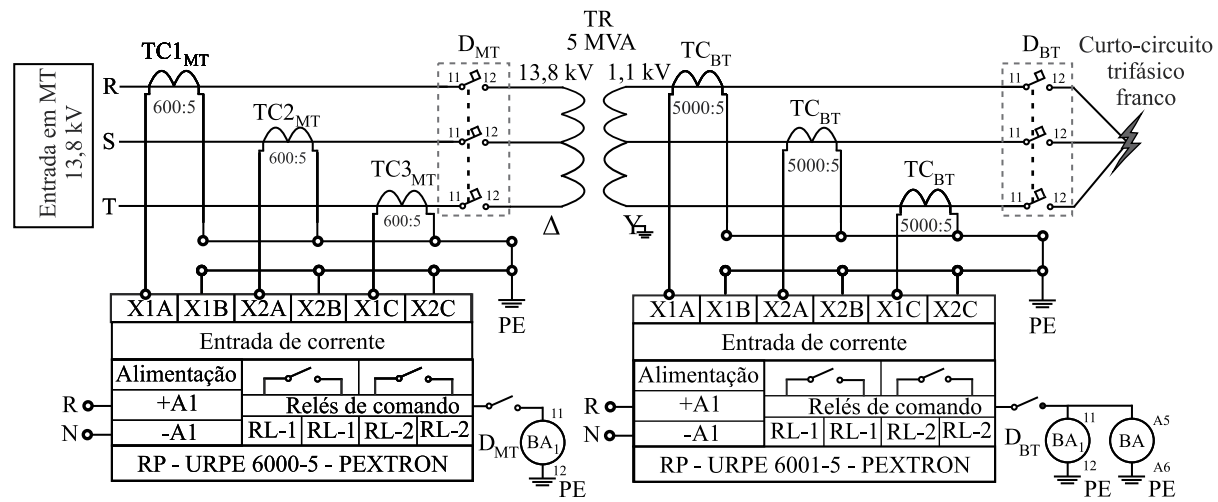
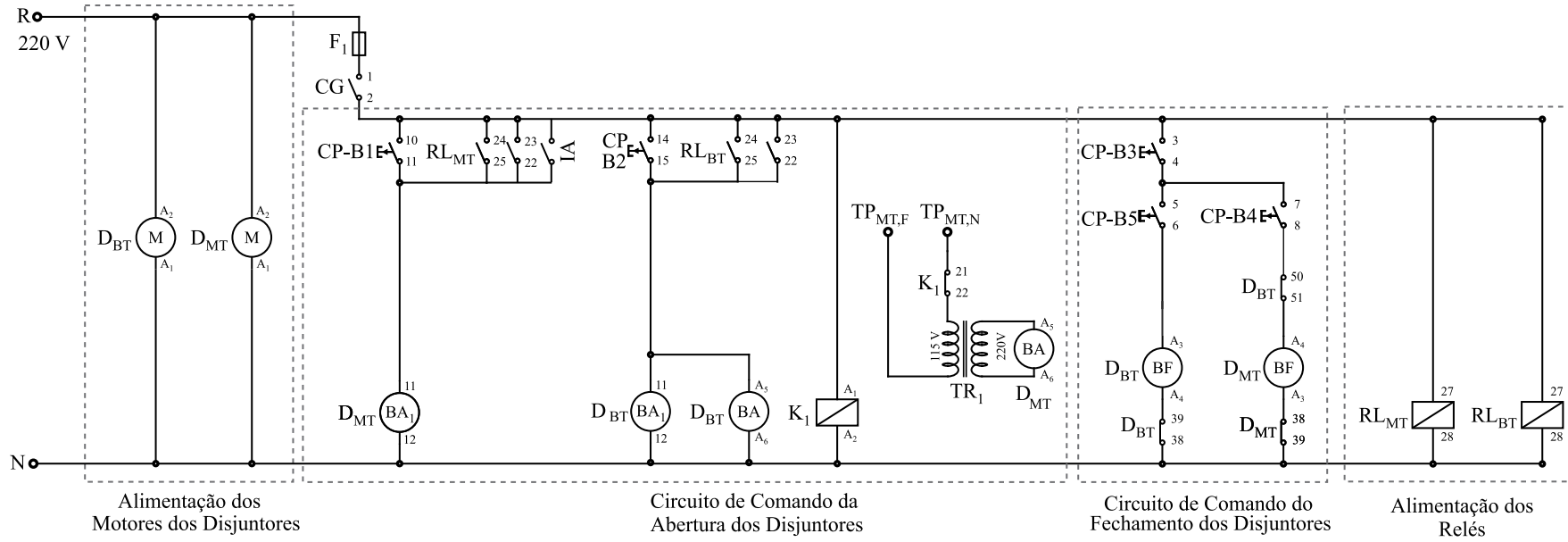
Esquema de controle e proteção

O esquema apresentado pela Figura 3.11 exemplifica, em termos gerais, a interação entre o painel de comando, os dispositivos de medição, os relés e os disjuntores, no que se refere à proteção do laboratório.

Conforme observado na Figura 3.11, no instante em que a chave geral é acionada, ocorre o carregamento automático das molas de abertura dos disjuntores a partir de sua motorização, e os relés são ligados. Em ambos relés, duas saídas de relé função 51 (RL-1 e RL-2) são ligadas em paralelo e conectadas as bobinas de abertura de seus respectivos disjuntores, para que ambas as saídas enviem o sinal de abertura para o disjuntor, diminuindo o risco de falha da proteção devido a problemas no fechamento das contatoras internas do relé. No caso do disjuntor de BT, também pode-se constatar que as bobinas de abertura e abertura auxiliar também estão conectadas em paralelo, para evitar problemas no seccionamento do circuito devido falhas na abertura do disjuntor.

O TP é conectado às entradas de tensão VB e VN do relé, que servem apenas como transmissoras de tensão da rede de MT para a chave contatora. Com o auxílio de um transformador elevador de 115 para 220 V, o TP interage com a bobina de abertura do disjuntor de MT. O TP é interligado com o transformador auxiliar elevador a partir de uma chave contatora NA conectada diretamente a rede de BT do laboratório, e em caso de ausência de tensão entre os polos da chave, ela se altera para posição NF, alimentando o transformador através da tensão da rede de MT fornecida pelo TP e abre o circuito através da BA. O objetivo dessa interligação, é que na ausência da alimentação por parte do circuito de BT do laboratório, o disjuntor de MT atue imediatamente a partir da alteração de estado da chave contatora, visto que nesse cenário os painéis de comando estão inviabilizados e não é possível realizar a abertura remota dos disjuntores.

Figura 3.11 – Diagrama-resumo do esquema de controle e proteção do laboratório.



Legenda:

- CG = Chave Geral
- CR = Controle Remoto
- D_{MT} = Disjuntor da Média Tensão
- D_{BT} = Disjuntor da Baixa Tensão
- M = Motor
- BA = Bobina de Abertura
- BA_A = Bobina de Abertura Auxiliar
- BF = Bobina de Fechamento
- IA = Intertravamento de Acesso
- PE = Ponto de Aterramento
- RL_{MT} = Relé de Proteção da Média Tensão
- RL_{BT} = Relé de Proteção da Baixa Tensão
- K = Contatora
- TR = Transformador
- TC_{BT} = Transformador de Corrente da Baixa Tensão
- TC_{MT} = Transformador de Corrente da Média Tensão
- TP_{MT,F} = Transformador de Potencial da Média Tensão

Fonte: Autor.

3.2.1.8 Reatores monofásicos

Os reatores têm papel fundamental no funcionamento do laboratório, visto que garantem a estabilidade do arco e regulam os valores da corrente de ensaio. São utilizados três reatores monofásicos (um por fase), em série com o primário do transformador de potência. Estes reatores possuem diversas opções de interligações e opções de curtos-circuitos internos entre *taps*, que permitem obter reatâncias intermediárias, possibilitando uma maior variabilidade de injeção de reatância no circuito. A ligação dos reatores no laboratório e os dados de placa do equipamento, são apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13.

Figura 3.12 – Reatores monofásicos conectados ao transformador de potência.



Fonte: Autor.

É constatado na Figura 3.12 que os condutores provenientes da entrada de energia se conectam na bucha H0 do reator, e partem em direção ao transformador a partir da bucha de outro *tap* (no caso da figura: H11), escolhido conforme o nível de corrente requerido. Destaca-se a presença de um para-raios, entre os *taps* H0-H12, onde elevados picos de tensão podem ocorrer, necessitando dessa proteção adicional. A Figura 3.13 descreve as principais características do reator, e dentre elas, destacam-se as reatâncias fornecidas ao circuito para cada conexão entre *taps* disponíveis. As correntes de curto-circuito estimadas para a BT do laboratório, considerando cada uma das ligações entre *taps* e o transformador adotado, são descritas na Tabela 3.6.

As correntes de curto-circuito apresentadas na Tabela 3.6 são apenas estimações, visto que não se conhecem totalmente os valores das impedâncias intrínsecas do circuito, principalmente a montante do laboratório. Outra questão importante, é que a capacidade de interrupção do disjuntor de BT é de 25 kA, e não pode ser violada sob nenhuma hipótese na escolha da I_{bf} de ensaio. Considerando estes aspectos, as conexões possíveis entre os *taps* dos reatores, e as duas opções de tensões possíveis na BT do transformador de potência, pode-se realizar ensaios com até 29 níveis diferentes de I_{bf} . A cada energização do laboratório, a vara de manobra deve ser utilizada para eliminar eventuais tensões residuais nas buchas dos reatores conectadas ao circuito.

Figura 3.13 – Dados de placa dos reatores monofásicos.

Conexão entre TAP		TAP em C. Circuito		Reatância (Ohms)	Corrente (A)	
H0	H1	H1	H12		Cont.	2 seg.
H0	H1	H1	H12	0,48	120	2.000
H0	H1	-	-	1,03	140	2.000
H0	H2	H2	H12	0,76	104	2.000
H0	H2	-	-	1,60	123	2.000
H0	H3	H3	H12	1,04	86	2.000
H0	H3	-	-	2,35	108	1.340
H0	H4	H4	H12	1,32	71	1.340
H0	H4	-	-	3,18	97	1.340
H0	H5	H5	H12	1,67	59	1.340
H0	H5	-	-	4,16	88	1.340
H0	H6	H6	H12	2,02	50	1.340
H0	H6	-	-	5,30	76	670
H0	H7	H7	H12	2,45	68	670
H0	H7	-	-	6,63	57	670
H0	H8	H8	H12	3,42	50	670
H0	H8	-	-	9,87	41	670
H0	H9	H9	H12	4,54	36	670
H0	H9	-	-	13,30	30	670
H0	H10	-	-	23,10	41	670
H0	H11	-	-	31,80	36	670
H0	H12	-	-	59,30	30	670

Diagrama

Diagrama: Um diagrama vertical que mostra a conexão dos taps H0 a H12. H0 está no topo e H12 no fundo. Linhas horizontais representam os taps H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8, H9, H10, H11, H12. Linhas verticais conectam H0 a cada um desses taps. O tap H12 também está conectado diretamente ao H0.

Volume Massa total

Fonte: Autor.

Tabela 3.6 – I_{bf} estimada na BT do laboratório para cada interligação entre *taps*.

Conexão entre <i>taps</i>	<i>Taps</i> em curto-circuito	I_{bf} com 1,1 kV	I_{bf} com 635 V
H0-H1	-	22,03	38,16*
	H1-H12	24,5*	43,3*
H0-H2	-	19,61	33,96*
	H2-H12	23,39	40,52*
H0-H3	-	17,12	29,66*
	H3-H12	21,98	38,08*
H0-H4	-	15,05	26*
	H4-H12	20,73	35,9*
H0-H5	-	13,09	22,75
	H5-H12	19,34	33,51*
H0-H6	-	11,4	19,75
	H6-H12	18,13	31,41*
H0-H7	-	9,91	17,16
	H7-H12	16,83	29,16*
H0-H8	-	7,5	13,0
	H8-H12	14,49	25,1*
H0-H9	-	5,97	10,34
	H9-H12	12,48	21,63
H0-H10	-	3,77	6,52
H0-H11	-	2,84	4,91
H0-H12	-	1,59	2,76

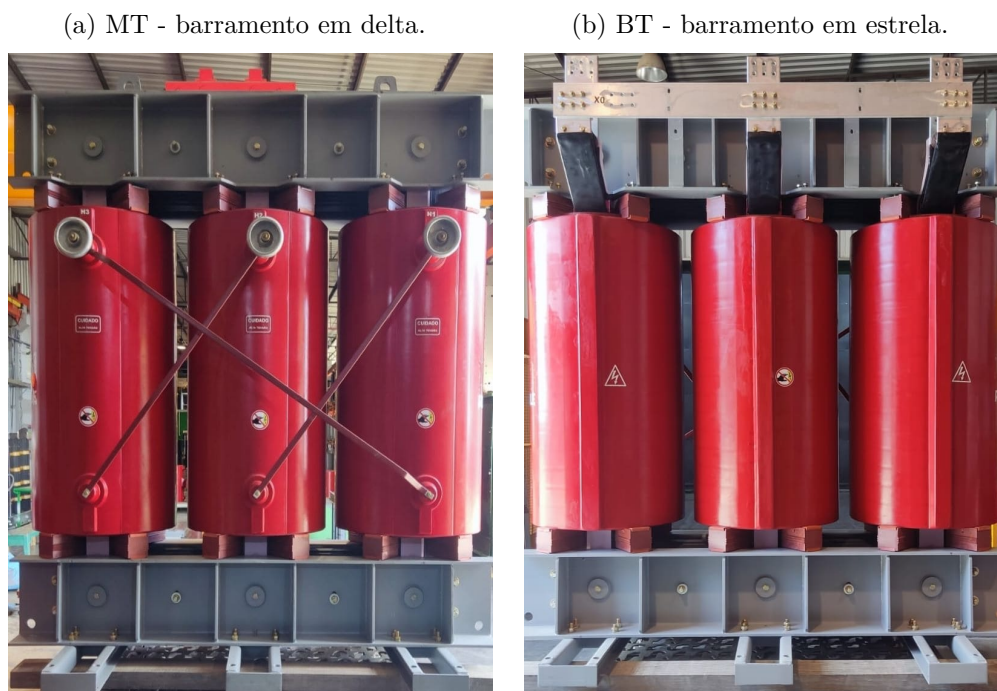
*Casos descartados, pois ultrapassam o limite de capacidade de interrupção do disjuntor de BT.

Fonte: Autor.

3.2.1.9 Transformador de potência

O equipamento que permite a aplicação de altas correntes de curto-circuito na BT do laboratório é o transformador de potência rebaixador trifásico a seco, devido a sua elevada potência elétrica de 5 MVA, a partir do rebaixamento da tensão de alimentação em MT da rede de 13,8 kV, para 1,1 kV (secundário em estrela) ou 635 V (secundário em delta). A adoção deste equipamento se justifica, pois, a rede em MT não fornece a capacidade de curto-circuito necessária para os ensaios do laboratório, além dos riscos associados à operação com tensões elevadas. Desta maneira, através do rebaixamento de tensão e com a elevada potência do transformador, pode-se obter valores elevados de correntes de curto-circuito na BT para níveis de tensão menores. A Figura 3.14 exhibe imagens em perspectiva dos lados de MT e de BT do transformador utilizado, e a Figura 3.15 apresenta os dados de placa do equipamento.

Figura 3.14 – Transformador de potência utilizado no laboratório.

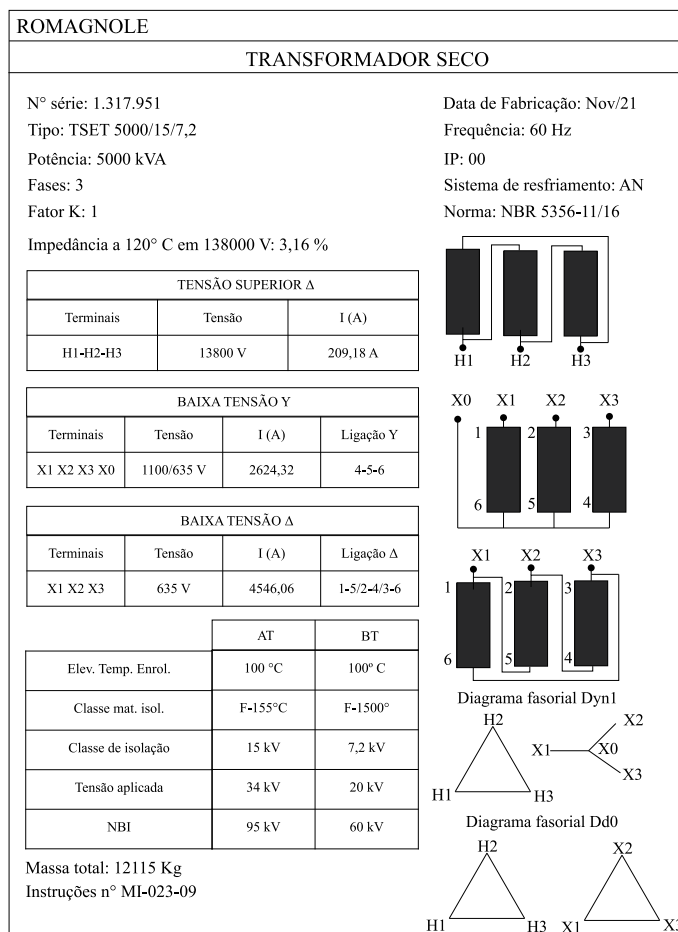


Fonte: Autor.

Apesar dos transformadores tipo a seco possuírem um custo financeiro maior se comparados aos transformadores a óleo para a mesma potência e tensão nominal, existem alguns motivos que influenciaram em sua escolha para a aplicação no laboratório, a saber:

- **Alta suportabilidade a curtos-circuitos:** Seu enrolamento é constituído por fitas (ou folhas) de alumínio, reduzindo as forças axiais de curto-circuito no transformador e conferindo elevadas resistências a esforços eletromecânicos. Este enrolamento também exige menos do isolamento do transformador;

Figura 3.15 – Dados de placa do transformador de potência trifásico.



Fonte: Autor.

- **Fácil instalação:** A única exigência de instalação dos transformadores do tipo seco é que eles devem ser instalados sob abrigo do tempo, condição atingida pelo laboratório. Também não há a necessidade da instalação de um sistema de coleta de óleo em caso de vazamento, simplificando a estrutura;
- **Manutenção:** Devido o transformador a seco utilizar o ar como meio isolante e de refrigeração, ele necessita muito pouca ou quase nenhuma manutenção;
- **Segurança:** Como este transformador não possui óleo isolante, ele não alimenta ou propaga incêndios, e isso é um ponto fundamental para a aplicação do laboratório;
- **Proteção:** Não precisa monitoramento constante, apresentando apenas sensores de temperatura nas bobinas, alarme e sistema de desligamento por sobreaquecimento.

Os transformadores a seco apresentam elevados ruídos sonoros, porém, isso não é um problema nesta aplicação, visto que o equipamento é energizado apenas durante os ensaios, por poucos segundos. Em termos gerais, o seu regime de aplicação é o seguinte:

- (a) Energização a cada ensaio de arco elétrico, com no máximo 4 ensaios ao dia e 100 ensaios ao mês;
- (b) Produção de curto-circuito na BT a cada energização, com correntes máximas de cerca de 24 kA no secundário. O controle da corrente é realizado através de três reatores monofásicos conectado em série com o transformador no circuito de MT;
- (c) Os curtos-circuitos são interrompidos pelo lado de BT do transformador, em tempos de 0,1 a 2 segundos. A duração é definida pela programação do ensaio.

3.2.1.10 Quadro de comando da sala de máquinas

A operação do quadro de comando da sala de máquinas é mais simples do que a operação do quadro de comando da sala de controle. Os quadros de comando somente são energizados em caso de acionamento das chaves gerais de ambos os painéis (energização mútua). O quadro da sala de máquinas serve principalmente como intermediador entre o painel da sala de controle e os disjuntores do laboratório, além de energizar os relés e abrigar os condutores lógicos que os conectam aos disjuntores e aos TCs. Contém um botão de emergência que abre ambos os disjuntores simultaneamente, e quando é energizado, aciona um alarme com um elevado alerta sonoro, para indicar que o laboratório está em período de ensaio. A Figura 3.16 exibe o quadro de comando descrito.

Figura 3.16 – Quadro de comando da sala de máquinas.



Fonte: Autor.

3.2.1.11 Sistema de aterramento

O aterramento do laboratório é compreendido entre uma malha principal, elaborada a partir de condutores rígidos de cobre nus com seção de 50 mm² envolvendo toda a sala de máquinas, e de uma malha secundária constituída por condutores idênticos, porém, com 25 mm². Através da malha secundária, as carcaças de todos os equipamentos e superfícies metálicas são conectados à malha principal, providenciado um caminho para correntes de fuga e dispersando eventuais tensões residuais, contribuindo para a segurança operacional do laboratório.

A malha de aterramento tem seu início e fim na porta da grade metálica que separa a sala de máquinas da área de circulação, envolvendo todo o perímetro do local. No centro da sala de máquinas, próximo aos reatores, se localiza a entrada subterrânea para o escoamento das correntes de fuga para a malha subterrânea de aterramento.

3.2.2 Câmara de ensaios

A câmara de ensaios é o local onde são realizados os ensaios de arcos elétricos, sendo os principais equipamentos que a compõem os seguintes: suporte dos eletrodos, os calorímetros e a câmara termográfica. A câmara de ensaios se situa na posição indicada pela planta baixa da Figura 3.2. Ela pode ser totalmente vedada em seu perímetro, permitindo o controle das condições ambientais no local. Além dos equipamentos principais, relacionados à ignição do arco elétrico e à medição da EI, a câmara de ensaios conta com outros equipamentos responsáveis por outras funções, como:

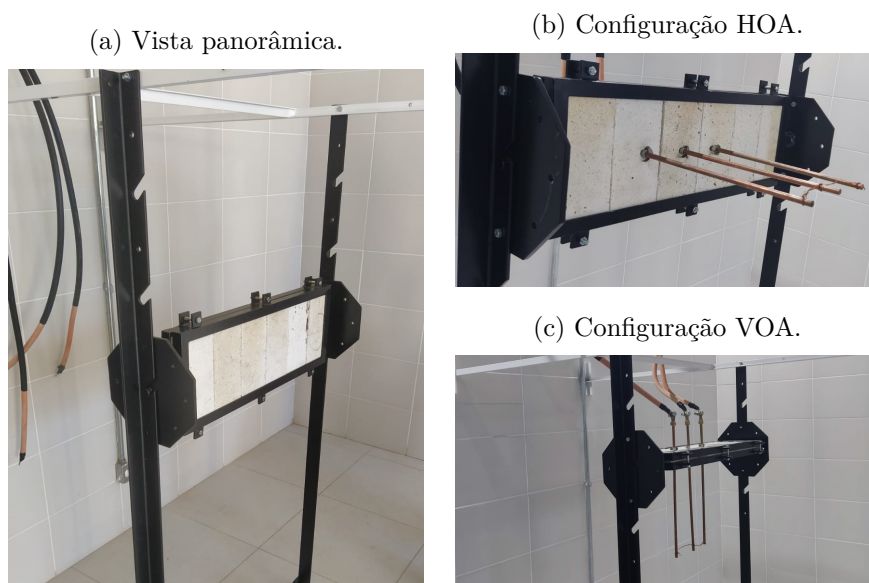
- **Condicionador de ar:** Com uma potência de 22000 BTUs, é utilizado para alterar a temperatura rapidamente na câmara de ensaios e diminuir a umidade relativa;
- **Câmera de monitoramento:** Equipamento responsável por gravar os arcos elétricos gerados na câmara de ensaio e enviar a gravação para a sala de controle;
- **Climatizador industrial:** Equipamento que possibilita alterar rapidamente a umidade relativa da câmara de ensaios;
- **Nobreak:** Dispositivo responsável por isolar a câmara termográfica da rede elétrica durante o ensaio, evitando que quaisquer perturbações afetem o equipamento;
- **Sprinkler de água:** Utilizado para ser possível reproduzir condições de chuva sobre os eletrodos;
- **Termo-higrômetro:** Instrumento de medição utilizado para medir a temperatura ambiente e a umidade relativa (UR) na câmara de ensaios.

3.2.2.1 Suporte dos eletrodos

O suporte dos eletrodos possui 180 cm de altura e 80 cm de largura, e é localizado a uma distância de 120 cm da parede ao fundo da câmara de ensaios. É projetado de forma que seja possível posicionar os eletrodos nas configurações verticais e horizontais, e também em uma posição intermediária, onde os eletrodos ficam com uma inclinação de 45° (diagonal). Além disso, possibilita adotar três diferentes alturas na estrutura metálica conjunta aos tijolos refratários que suspendem os eletrodos: 145, 155 e 165 cm.

A estrutura metálica interna utilizada para prender os eletrodos é composta por tijolos de material refratário, com altas isolações térmicas e dielétricas, prensados entre duas chapas metálicas com cavidades internas. Estes tijolos são perfurados com aberturas de seções transversais idênticas as dos eletrodos para a fixação destes, realizada por pressão e por abraçadeiras metálicas. A estrutura metálica interna possui uma largura de 680 mm, o que permite espaçamentos de no máximo 220 mm entre eletrodos, visto que os eletrodos não podem ficar muito próximos das bordas metálicas da estrutura. O suporte dos eletrodos e algumas de suas configurações possíveis são apresentados pela Figura 3.17.

Figura 3.17 – Suporte dos eletrodos.



Fonte: Autor.

Os condutores que chegam aos eletrodos provenientes da sala de máquinas possuem seção transversal de 95 mm², e contribuem com que os eletrodos fiquem suspensos de maneira mais estável nos tijolos refratários a partir da tensão mecânica aplicada neles. Os eletrodos utilizados são constituídos de barras maciças de cobre com uma seção transversal de 3/8", contudo, no decorrer das atividades do laboratório, estão sendo estudadas a implementação de eletrodos de grafite (utilizados em fornos a arcs elétricos) com seções transversais entre 3/4" e 1" para diminuir o custo financeiro e o desgaste dos componentes.

3.2.2.2 Calorímetros

Os calorímetros utilizados no laboratório, bem como o arranjo e espaçamento entre eles, foram implementados conforme apresentado na Seção 2.1.2.1, considerando as Figuras 2.7 e 2.8. O suporte metálico projetado para suspender os calorímetros possui altura e largura de 180 e 120 cm, respectivamente, e três barras horizontais rosqueáveis com alturas reguláveis em relação ao chão a partir das laterais do suporte, com perfis deslizantes em C. A Figura 3.18 apresenta os calorímetros suspensos no suporte descrito.

Figura 3.18 – Suporte metálico com os calorímetros instalados.

(a) Vista posterior.



(b) Vista frontal.



Fonte: Autor.

A Figura 3.18b exibe os calorímetros através da perspectiva frontal, e como eles são presos nas barras horizontais do suporte, através de duas abraçadeiras metálicas: uma maior, que envolve e pressiona toda a circunferência do calorímetro, e outra menor, que abrange a barra horizontal e uma pequena abertura da abraçadeira maior. Desta forma, o calorímetro fica suspenso nas barras do suporte sem a necessidade da utilização de parafusos ou outros utensílios, visto que ele é prensado na abraçadeira maior, e essa no que lhe concerne, é prensada na barra do suporte pela abraçadeira menor, criando uma fixação robusta utilizando apenas a pressão fornecida pelas abraçadeiras metálicas.

Conforme também observado na Figura 3.18b, o Marinite A[®] dos calorímetros está com a sua parte frontal revestida por uma espécie de papel, e apenas com o disco de cobre exposto. Este material possui características não inflamáveis e de isolamento dielétrica, chamado Nomex[®] tipo 410, com espessura de 0,25 mm, e protege o Marinite A[®] de possíveis danos devido a respingos de cobre fundido gerados pelo arco elétrico, possuindo tenacidade mecânica e flexibilidade. O Nomex[®] tipo 410 possui um índice de combustibilidade (LOI) entre 27% e 32% a temperatura ambiente, e entre 22% e 25% a 220 °C, sendo que materiais com índices de combustibilidade superiores a 20,8% não entram em combustão quando expostos à temperatura ambiente (DUPONT, 2016). Para que o LOI desse material fique abaixo do limiar de inflamabilidade, ele deve ser exposto a temperaturas acima

de 300 °C por alguns segundos, algo que não é esperado durante os ensaios, devido aos calorímetros ficarem afastados a uma distância considerável da origem do arco elétrico, além dos ensaios durarem no máximo dois segundos. Porém, é importante destacar, que a norma IEC 61482-1-1 (2019) recomenda a sobreposição do isolante térmico com placas de não mais que 12 mm de espessura para proteção do material isolante térmico principal, podendo estas placas serem do mesmo material isolante.

3.2.2.3 Câmera termográfica

Conforme mencionado anteriormente, o sensoriamento da elevação de temperatura devido nos calorímetros devido aos arcos elétricos é realizado por uma câmera termográfica de alta velocidade, devidamente calibrada pela FLIR, ao invés de termopares, normalmente empregados na literatura. A câmera do modelo FLIR A6753sc é exibida pela Figura 3.19, e suas principais características são descritas pela Tabela 3.7

Figura 3.19 – Câmera termográfica modelo FLIR A6753sc utilizada no laboratório.



Fonte: Flir (2015).

Tabela 3.7 – Especificações da câmera termográfica.

Descrição	Especificação
Tecnologia de sensoriamento infravermelho	Antimonídeo de índio (InSb)
Resolução	640 x 512
Taxa de amostragem (640 x 512)	Programável de 0,0015 Hz a 125 Hz
Faixa de temperatura	-20 °C a 350 °C
Exatidão da medição	± 2 °C para temperaturas inferiores a 100 °C ± 2% para temperaturas superiores a 100 °C
Resolução da medição	0,01 °C
Lentes disponíveis	13 mm 50 mm
Intervalos de medição de temperatura para a lente de 50 mm	-20 °C - 55 °C
	10 °C - 90 °C
	35 °C - 150 °C
	80 °C - 200 °C 150 °C - 350 °C

Fonte: Flir (2015).

A norma ASTM (2014) recomenda que o sistema de aquisição de dados possua uma taxa de amostragem mínima de 20 Hz, entretanto, em recente atualização, houve a reconsideração desse valor pela 61482-1-1, que passou a utilizar 100 Hz (IEC, 2019). Além disso, o sistema de sensoriamento térmico deve conseguir registrar temperaturas de até 400 °C, e possuir uma resolução mínima de medição de 0,1 °C, com uma exatidão de $\pm 0,75$ °C, considerando apenas o sistema de aquisição de dados, ou seja, sem considerar a exatidão do termopar. Desta forma, considerando os valores especificados pela Tabela 3.7, o sistema de medição cumpre quase todas as recomendações das normativas utilizadas para o sensoriamento de temperatura em ensaios de arcos elétricos para medição da EI.

Em Marchesan (2022), foram realizados testes com a câmera termográfica descrita na Tabela 3.7 para as lentes de 13 mm e 50 mm disponíveis, para determinar as distâncias mínima e máxima em que o equipamento pode ficar dos calorímetros para ser possível registrar a ΔT nos sete dispositivos para cada lente, considerando que o orifício do isolante térmico tivesse no mínimo 5 *pixels* de diâmetro na imagem registrada pela câmera termográfica. Os seguintes resultados foram encontrados pela autora:

- **Lente de 13 mm:** Distância mínima de 820 cm e máxima de 1660 cm;
- **Lente de 50 mm:** Distância mínima de 3400 cm e máxima de 6800 cm.

Considerando o comportamento destrutivo do arco elétrico, a distância máxima para a lente de 13 mm é pequena para garantir a proteção da câmera termográfica, visto que ensaios nessas condições podem ocasionar danos no equipamento devido a possíveis respingos de cobre fundido direcionados a sua lente. Desta forma, é prudente utilizar a lente de 50 mm nos ensaios, pois, isso permite alocar a câmera a uma distância maior e da origem do arco elétrico.

A câmera termográfica é interligada do laboratório à sala de controle através de um cabo RJ45, permitindo que ela seja controlada remotamente através do *software* ResearchIR®. Neste *software*, são iniciadas e interrompidas as gravações da câmera, bem como ajustados os parâmetros de distância do ponto de medição, umidade relativa e emissividade do material em que a temperatura é medida. As questões operativas da câmera termográfica são abordadas com mais detalhes na Seção 4.2.3.

3.2.3 Sala de controle

Os ensaios são acionados e monitorados a partir da sala de controle, localizada junto ao laboratório de média tensão do INRI. Nesta sala, estão posicionados o quadro de controle do laboratório, que controlam os disjuntores da sala de máquinas e a realização do ensaio, e os computadores associados às câmeras de monitoramento e termográfica, responsáveis pelas gravações dos ensaios.

3.2.3.1 Quadro de comando

O quadro de comando da sala de controle possui função fundamental no funcionamento do laboratório, pois comanda os disjuntores da sala de máquinas, bem como energiza o quadro de comando do local. É neste equipamento que é feita a ignição do arco elétrico, bem como é realizado o procedimento de abertura do disjuntor de MT após o ensaio. O quadro de comando da sala de controle do laboratório é apresentado pela Figura 3.20, e seu funcionamento é descrito na Tabela 3.8.

Figura 3.20 – Quadro de comando da sala de controle.



Fonte: Autor.

Tabela 3.8 – Funcionamento do quadro de comando da sala de controle.

N°	Função	Requisito
1	Energizar o quadro.	Quadro da sala de máquinas estar ligado. Alerta sonoro acionado automaticamente.
2	Indicar que o quadro está energizado.	Ambos os quadros devem ser ligados.
3	Indicar que a porta da sala de máquinas está fechada.	Porta da grade de acesso à sala de máquinas estar fechada.
4	Fechar o DJ de MT (pressionar B4 e B3 simultaneamente).	2 e 3 devem estar ligados.
5	Fechar o DJ de BT (pressionar B3 e B5 simultaneamente).	2 e 3 devem estar ligados. Função 4 obrigatoriamente deve estar acionada.
6	Abre o DJ de BT, este botão não deve funcionar após o ensaio, visto que é o DJ de BT que extingue o arco.	Falha no ensaio - arco extinto pelo disjuntor de MT. DJ de BT não atuou o conforme esperado.
7	Abre o DJ de MT. Este disjuntor sempre deve ser aberto remotamente após o ensaio, para desenergizar a sala de máquinas.	Ensaio ocorreu conforme o previsto, arco extinto no tempo definido pelo DJ de BT, e o disjuntor de MT não atuou.
8	Desliga ambos os DJ ao mesmo tempo.	Falha geral no seccionamento do circuito durante o ensaio.

Fonte: Autor.

Quanto às funções e requisitos descritos pela Tabela 3.8, algumas considerações podem ser realizadas. A ignição do arco elétrico, se todos os procedimentos forem seguidos corretamente, ocorre na função 5 da Tabela 3.8, com o fechamento do disjuntor de BT. O ensaio falha se o seccionamento do circuito for feito pelo disjuntor de MT, o que pode ocorrer por dois motivos: falha na atuação do disjuntor ou do relé de BT, ocasionando a atuação da proteção de retaguarda, ou a ocorrência de um curto-circuito fora do campo de visão do relé de BT, ou seja, na zona compreendida entre os reatores e o transformador.

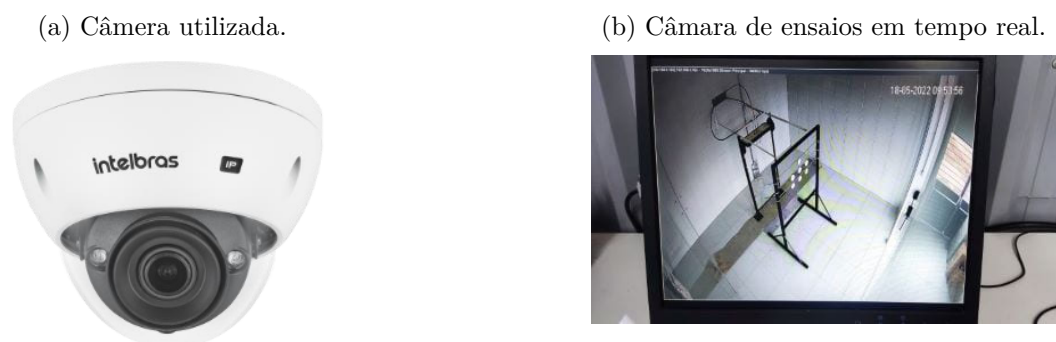
Ao iniciar o ensaio, o operador do quadro de comando deve estar atento à câmera de monitoramento (próximo ao quadro), e ao som ocasionado pela abertura dos disjuntores da sala de máquinas. Caso haja a percepção que a duração do ensaio está maior que a esperada, o botão de emergência deve ser pressionado imediatamente. Além disso, conforme é descrito na Seção 4.3, o operador sempre deve estar acompanhado por pelo menos outra pessoa capacitada e autorizada durante a reatuação do ensaio.

Após a finalização do ensaio, ambos os disjuntores devem ser abertos pelo operador através do painel de comando (apenas o de MT deve abrir) para o seccionamento da sala de máquinas, e o painel deve ser provisoriamente desligado para a abertura da chave seccionadora e aplicação da vara de manobra nos reatores. Após esse procedimento, pode-se ligar novamente os quadros de comando para serem extraídas as oscilografias dos relés, que precisam estar energizados para se comunicarem com um computador.

3.2.3.2 Monitoramento da câmara de ensaios

A câmera utilizada para o monitoramento do laboratório é do modelo Intelbras VIP 5550 DZ IA. Ela é posicionada conforme o indicado pela Figura 3.2 e conectada a um computador dedicado na sala de controle através de um cabo RJ45, local que serve como central de monitoramento da câmara de ensaios. O modelo de câmera utilizado, bem como a tela de seu *software* de monitoramento, são apresentados na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Monitoramento da câmara de ensaios



Fonte: Intelbras (2020) e Autor.

Dentre as principais características da câmera de monitoramento, destacam-se: a resolução de 5 *megapixels* (suficientes para o monitoramento do arco elétrico), o ângulo de abertura variável que pode chegar até 100°, e a taxa de amostragem de 20 *frames* por segundo, suficiente para a utilização proposta. Salienta-se que o arco elétrico gera um clarão de luz no momento de sua ignição, que demora em torno de 200 ms para ser normalizado, fenômeno que atrapalha ligeiramente o monitoramento do evento por câmeras convencionais durante este período.

3.3 AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO

Conforme descrito pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), as variações momentâneas e temporárias de tensão são adversidades que podem afetar profundamente a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos clientes da rede, levando ao desligamento de equipamentos devido a subtensões (ANEEL, 2021). Segundo Oliveira (2015), as principais causas para afundamentos momentâneos de tensão (AMT) nos sistemas elétricos são a energização de transformadores e a ocorrência do curto-circuito, sendo que estas ações são realizadas periodicamente no laboratório de arcos elétricos. O AMT perdura durante todo o tempo de permanência da falta, ou seja, desde o instante inicial do defeito até à atuação do sistema de proteção e completa eliminação do curto-circuito (AYELLO et al., 1999).

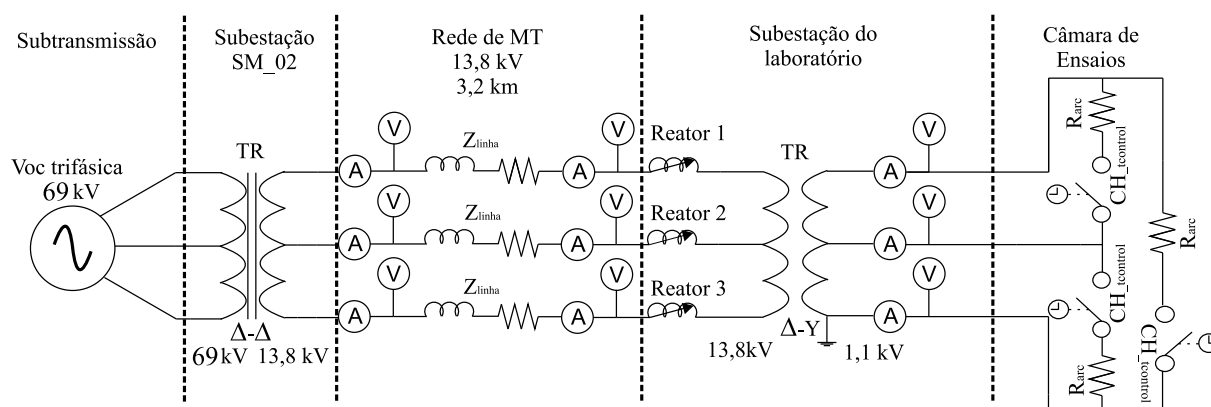
O módulo 8 do PRODIST define o AMT como as oscilações de tensão na rede superiores a 0,1pu e inferiores a 0,9pu, com durações entre 1 e 180 ciclos (ANEEL, 2021). Desta forma, o laboratório de arcos elétricos pode levar a um AMT nessa faixa, visto que são realizados curtos-circuitos na BT que duram de 6 a 120 ciclos, com correntes de curto-circuito que compreendem valores na faixa de 1,6 a 25 kA. Portanto, os ensaios possuem potencial de reduzir momentaneamente a tensão eficaz do sistema para os valores na faixa de tensão definidos como AMT pelo módulo 8 do PRODDIST.

Assim, foi realizado um estudo preliminar de perturbação na rede da UFSM para estimar de maneira aproximada o AMT para cada nível de curto-circuito disponível no laboratório, a partir das diferentes interligações entre *taps* dos reatores, descritas na Tabela 3.6. Este estudo foi realizado considerando a BT do transformador operando em 1,1 kV, sendo importante destacar que esse estudo é aproximado, visto que:

- Não são conhecidos em detalhes os valores de impedância do SEP que alimenta o laboratório, que compreende a linha de subtransmissão até a subestação do laboratório, sendo necessário estimar alguns desses valores conforme os disponibilizados pela concessionária responsável pelo fornecimento de energia na região;
- A resistência de arco varia a cada configuração de ensaio, principalmente devido a alterações nos espaçamentos entre eletrodos e nos *taps* dos reatores, influenciando consideravelmente na corrente de arco elétrico de cada ensaio. Como são diversas as possibilidades nesse cenário, é utilizada uma resistência de arco média, que resulte em valores de corrente de arco próximas às esperadas no *software* de simulação;
- Em um estudo preliminar, o AMT na rede de subtransmissão de 69 kV foi considerado irrelevante (abaixo de 2%).

Assim, através do *software* PSIM[®], foi modelado o SEP apresentado na Figura 3.22, onde as impedâncias estimadas dos componentes são descritas na Tabela 3.10.

Figura 3.22 – Circuito modelado para o estudo do AMT.



Fonte: Autor

Tabela 3.9 – Valores de impedâncias considerados no estudo de AMT.

Parâmetro	Descrição	Valor (Ω/ϕ)
Z_{LT}	Impedância da linha em MT	1,2917
Reator	Fornecida pelo reator	Variável
X_{trafo}	Reatância do transformador do laboratório	0,0076
R_{arc}	Valor adotado para a resistência de arco	0,04

Fonte: Autor.

É importante destacar, que o *software* PSIM[®] não é a melhor alternativa para estudos focados em SEP, visto que o seu escopo abrange prioritariamente estudos da área de circuitos eletrônicos e de eletrônica de potência, entretanto, a sua utilização foi uma das alternativas viáveis para analisar os AMTs de maneira aproximada a partir da modelagem da rede do laboratório conforme a aplicação de determinados níveis de curto-circuito. Para análises mais precisas, é recomendada a utilização dos *softwares* OpenDSS ou ATPDraw. Deste modo, os AMTs estimados na rede da UFSM para os ensaios de arcos elétricos no laboratório em cada interligação dos reatores, considerando que a I_{bf} não ultrapasse 25 kA e que a tensão na BT do transformador é de 1,1 kV, são descritos na Tabela 3.10.

Segundo o módulo 8 do PRODIST, quedas de tensão acima de 10% já são consideradas AMTs. Conforme observado na Tabela 3.10, na saída da subestação Santa Maria 2 (que alimenta a UFSM), dificilmente são constatados AMTs que ultrapassem este valor, entretanto, no ponto de entrega de energia para a UFSM, as perturbações são mais preponderantes. Como há diversas incertezas associadas a estes valores, é prudente que as correntes de ensaio sejam aumentadas progressivamente, e sejam sucedidas análises do medidor de qualidade de energia elétrica instalado pela concessionária a montante do alimentador do laboratório para a verificação das perturbações geradas pelos ensaios, e se eles estão ocasionando AMTs severos na rede. Infelizmente, até a conclusão deste trabalho, não foi possível obter os valores dos medidores junto à concessionária para compará-los aos estimados pela Tabela 3.10, tendo em vista os ensaios já realizados no laboratório.

Tabela 3.10 – Perturbações estimadas para ensaios de arcos elétricos com 1,1 kV.

I_{bf} para 1,1 kV	Queda de tensão ($\% \Delta V$)	
	SE_SM_2	Ponto de entrega (UFSM)
22,03	9,93	37,37
24,99	10,29	39,86
19,61	9,45	35,02
23,39	9,58	38,56
17,12	8,11	27,88
21,98	9,66	36,49
15,05	7,44	24,97
20,73	9,49	35,18
13,09	6,25	20,07
19,34	9,01	32,38
11,4	5,52	17,34
18,13	8,72	30,83
9,91	4,63	14,07
16,83	8,15	28,07
7,5	3,62	10,3
14,49	7,03	23,2
5,97	2,71	7,76
12,48	6,08	18,59
3,77	1,7	4,66
2,84	1,31	3,49
1,59	0,78	1,94

Fonte: Autor.

Além disso, ensaios que causem perturbações acima de 20% na rede que alimenta a UFSM devem ter seu horário e dia planejados de modo a evitar períodos de grandes exigências de carga da rede. Inicialmente, ensaios com chances de causar AMTs dessa magnitude devem ser realizados apenas aos finais de semana, feriados ou horários alternativos, visto que na UFSM há diversos equipamentos sensíveis a AMTs na rede elétrica, que podem ter seus funcionamentos prejudicados com oscilações severas de tensão na rede, mesmo que de curta duração.

3.4 SUMÁRIO

Conforme apresentado neste capítulo, um laboratório de arcos elétricos possui altos requisitos estruturais para a sua implementação em diversas frentes, como: equipamentos de potência, proteção, medição e controle, além de uma infraestrutura adequada para o seu funcionamento. O dimensionamento dos equipamentos deve ser realizado corretamente, e os requisitos de proteção e segurança devem ser atendidos para que o laboratório seja operável. A Figura 3.23 apresenta a sala de máquinas e a câmara de ensaios pa-

normativamente, onde a maioria dos equipamentos existentes no laboratório podem ser observados. Já o fluxograma apresentado pela Figura 3.24, complementa e sumariza os requisitos laboratoriais abordados e atingidos nesta seção para a implementação de um laboratório de arcos elétricos.

Figura 3.23 – Imagens panorâmicas internas do laboratório de arcos elétricos.

(a) Sala de máquinas com transformador de potência ao fundo.



(b) Sala de máquinas com entrada de energia ao fundo.

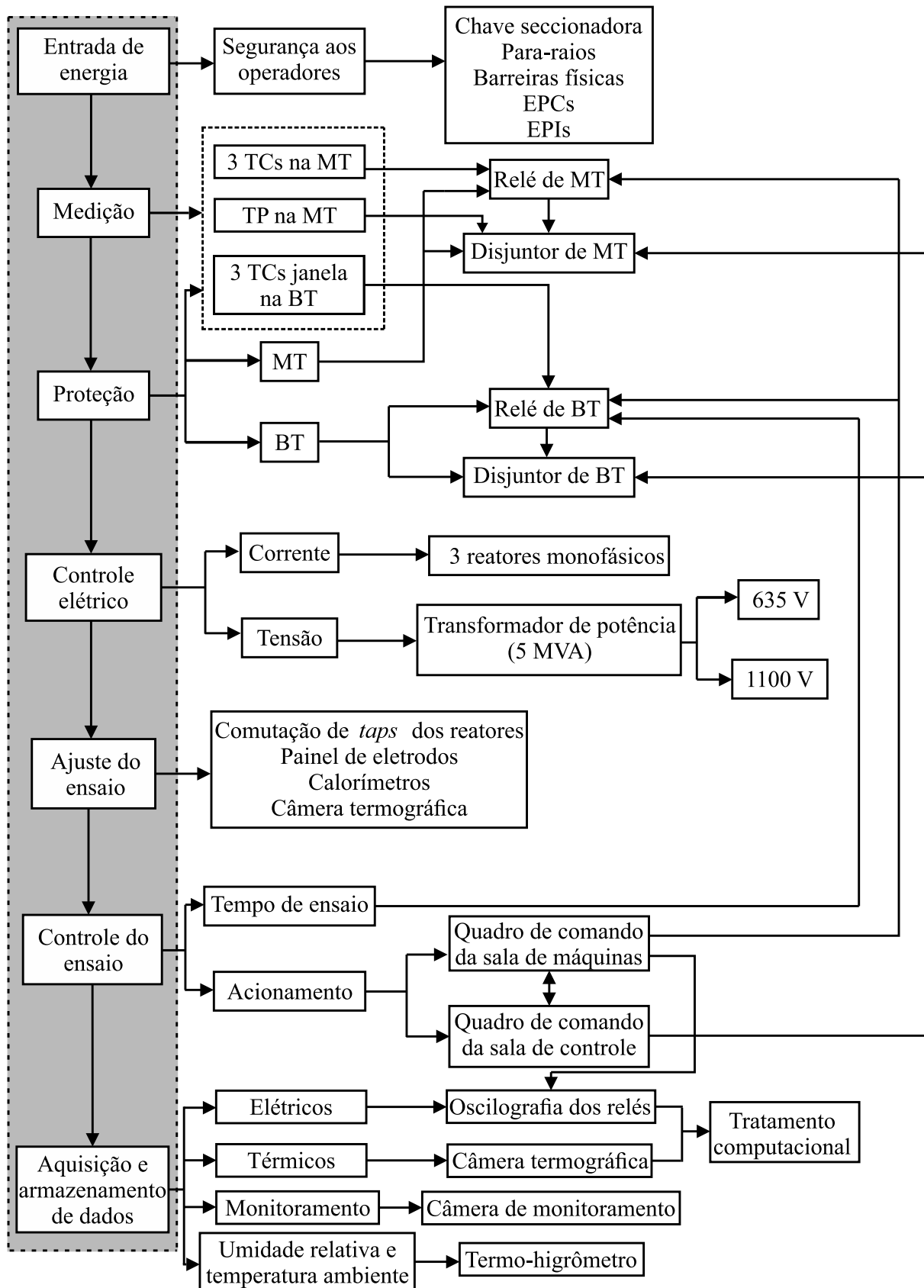


(c) Câmara de ensaios com arranjo de medição montado.



Fonte: Autor.

Figura 3.24 – Fluxograma da função dos equipamentos do laboratório



Fonte: Autor.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE ENSAIO

Para proceder os ensaios de arcos elétricos de maneira segura e eficaz, uma série de procedimentos devem ser cumpridos, e as reproduções de cenários precisam ser mapeadas antes de sua execução. Isso precisa ser feito para não ocorrerem acidentes no laboratório e para evitar o extravio de resultados dos ensaios devido ao uso impróprio das ferramentas utilizadas na aquisição de dados. Desta maneira, este capítulo apresenta a organização destes procedimentos e as instruções de uso das principais ferramentas utilizadas.

4.1 DEFINIÇÕES DE ARRANJOS DOS ENSAIOS

A configuração do ensaio é uma definição importante, visto que deve ser determinada antes do início da montagem do arranjo do ensaio. Conforme mencionado anteriormente, segundo a IEEE *Std* 1584-2018, o arco elétrico depende principalmente de sete parâmetros: V_{oc} , I_{bf} , tempo de arco, espaçamento entre eletrodos, configuração dos eletrodos, distância de trabalho e a presença de enclausuramento. Para os ensaios demonstrados neste trabalho, algumas considerações devem ser feitas a *priori*, como:

- A V_{oc} é sempre de 1,1 kV;
- A I_{bf} dos ensaios é estimada, dado que seu valor real não é totalmente conhecido;
- Os ensaios realizados contemplam apenas as configurações sem enclausuramento.

Entre cada ensaio efetuado, deve ser alterado apenas um parâmetro de entrada, para ser possível a análise comparativa de possíveis diferenças de resultados entre as provas, pois, caso seja alterado mais de um parâmetro, não é possível distinguir a influência destes na diferença dos resultados obtidos entre os ensaios. Atentando-se a estas considerações, entre cada ensaio, os parâmetros mais fáceis de serem alterados são: I_{bf} , tempo de arco, espaçamento entre eletrodos, configuração dos eletrodos e distância de trabalho. Feitas as considerações principais, mais questões podem ser levantadas, como:

- No laboratório implementado, a alteração do espaçamento entre os eletrodos requer furos adicionais nos tijolos refratários e a alteração da posição dos eletrodos, que demandam tempo e esforços adicionais para serem efetuadas. Para os ensaios iniciais, utilizam-se majoritariamente espaçamentos entre 50 e 100 mm;
- Inicialmente, se utilizam distâncias de trabalho mais conservadoras (maiores), em concordância com a abrangência da IEEE *Std* 1584-2018;
- Para evitar que resíduos decorrentes do arco elétrico danifiquem a lente da câmera termográfica, optou-se pela realização da maioria dos ensaios na configuração VOA.

Estabelecidas estas questões, são inicialmente exploradas condições de arcos elétricos a partir das alterações da I_{bf} , tempo de arco, espaçamento entre eletrodos e distância de trabalho. Na sequência de funcionamento do laboratório, são adicionadas questões relacionadas às alterações climáticas, para avaliação de seus impactos na EI resultante.

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS E *SOFTWARES* ASSOCIADOS

A aquisição de dados é um dos procedimentos mais importantes no que se refere aos procedimentos metodológicos do laboratório, pois, lida com as questões relacionadas a obtenção e tratamento dos resultados dos ensaios. Como meio de auxílio para este fim, são utilizados alguns *softwares* de equipamentos e ferramentas computacionais para tratamento de informações. Para exemplificar a aplicação da metodologia de aquisição de dados descrita nessa seção, é tomado como exemplo o ensaio descrito pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Ensaio utilizado na apresentação da metodologia de aquisição e tratamento de dados.

V_{oc} (kV)	I_{arc} (kA)	Configuração	Tempo (ms)	Gap (mm)	d (mm)	EI medida (cal/cm ²)	EI calculada (cal/cm ²)
1,1	1,81	VOA	520	50	1100	0,36	0,34

Fonte: Autor.

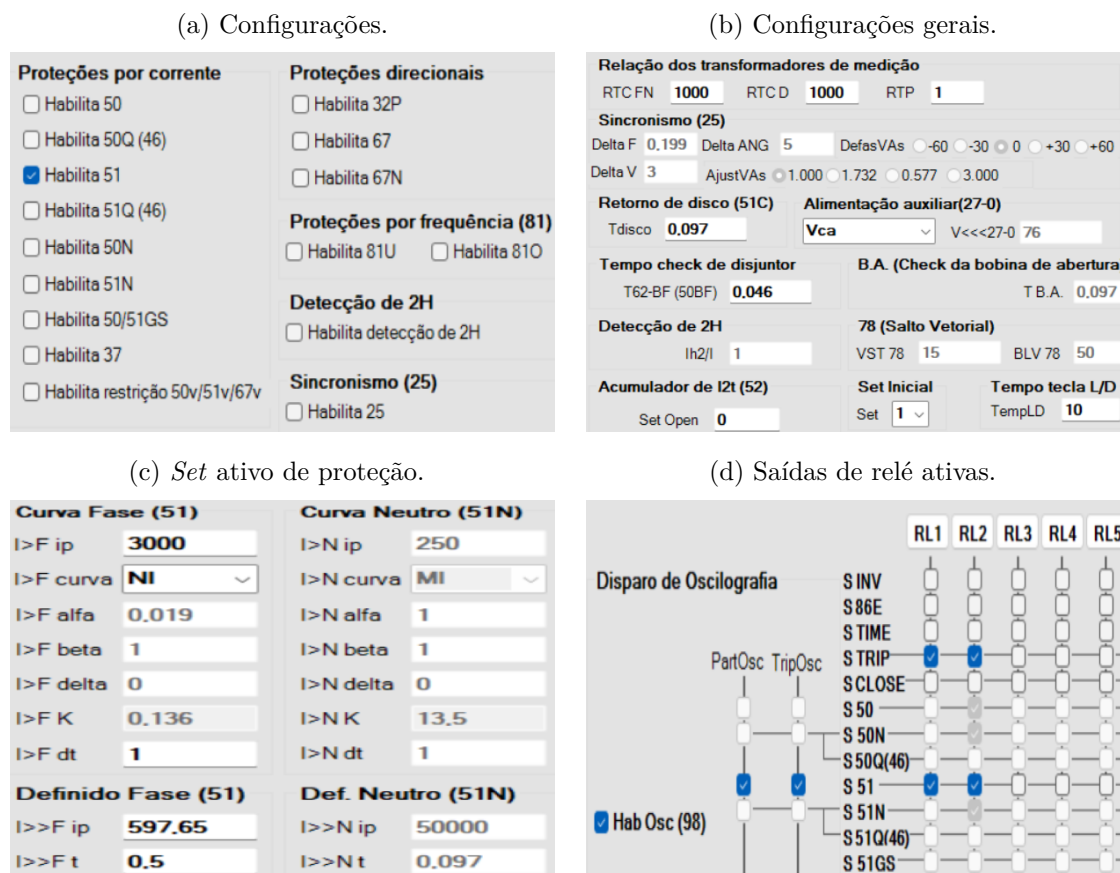
4.2.1 Definição do tempo de ensaio e aquisição das correntes de arco

O tempo de arco é definido no *software* de configuração, leitura e extração de dados dos relés da linha URP600x-5, que é um *software* de domínio público da Pextron®. A Figura 4.1 demonstra um exemplo de parametrização utilizada no relé da BT.

As Figuras 4.1a e 4.1b se referem às configurações gerais do relé. No relé de MT, devem ser habilitadas as funções 51, 51-N e detecção de 2^a harmônica, além de ser ajustado o valor de RTC, que é menor em relação ao utilizado no relé de BT. Para o relé atuar corretamente, o seu *set* parametrizado deve ser o selecionado nas configurações gerais.

A Figura 4.1c apresenta o ajuste em valores primários para a corrente definida de fase da função 51, com um dial de tempo de 0,5 segundo. O ajuste do tempo de ensaio programado no relé é de tempo definido, ou seja, ele é programado para atuar sempre em um tempo fixo quando a corrente de *pick-up* definida for menor que a corrente medida pelos TCs correspondentes ao relé. Conforme mencionado anteriormente, o tempo do relé de BT é sempre menor que o de MT, de forma que o primeiro sempre atue antes. Nota-se que, para o ajuste da curva de tempo de fase, são definidas uma corrente de *pick-up* e um dial de tempo elevados, pois, não é possível desativar esta função no relé, então ela é suprimida. Para o relé de MT, o tempo de atuação da função 51-N também deve ser configurado, com o mesmo valor da função 51, para atuarem no mesmo instante.

Figura 4.1 – Principais configurações do relé de BT utilizado nos ensaios.



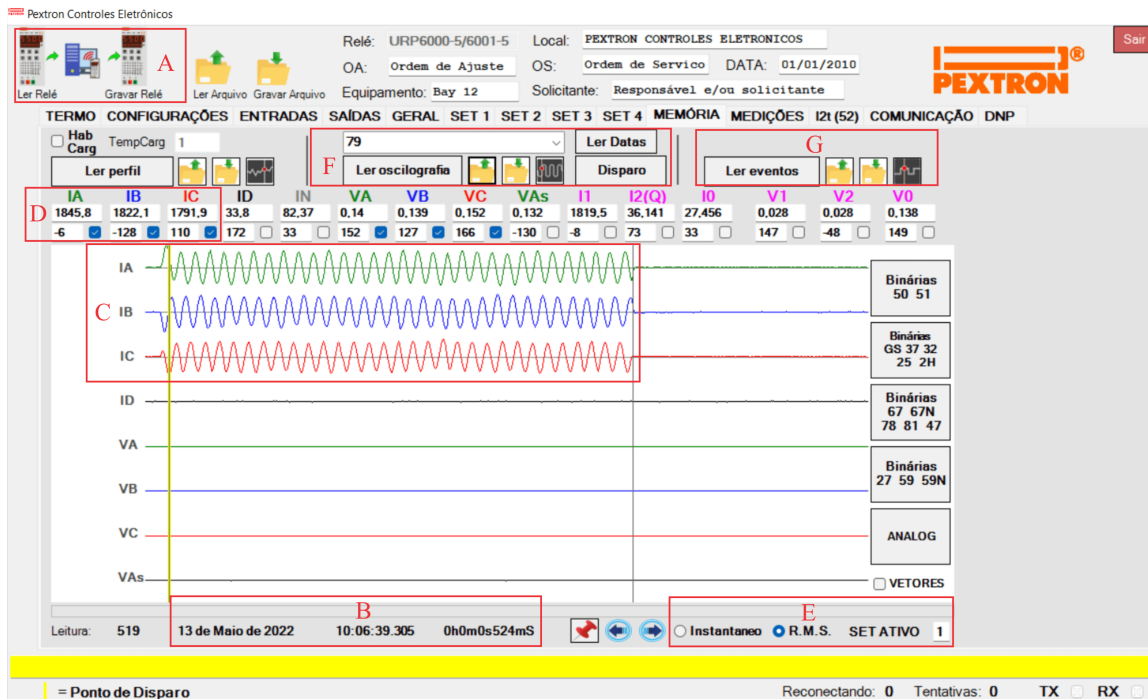
Fonte: Autor.

A configuração das saídas de relé é apresentada na Figura 4.1d. Nota-se que duas saídas de relé são habilitadas e conectadas em paralelo no equipamento (RL1 e RL2), evitando que a proteção falhe em caso de problemas nas chaves contadoras de uma das saídas. A função de habilitar oscilografia (98) também deve ser ativada para a saída 51, para ser possível obter os registros de oscilografia através da memória do equipamento.

A aquisição dos dados de oscilografia ocorre logo após o ensaio, através da conexão serial do relé a um computador e a partir da seleção da opção “ler configuração do relé” em seu respectivo *software*. Se a comunicação com o equipamento for bem-sucedida, é selecionada a função “ler oscilografia do relé”. Caso a oscilografia apareça na tela do *software*, os dados devem ser gravados em formatos .ros, .dat e .cfg, e armazenados. A tela de oscilografia do *software* é apresentada na Figura 4.2 e suas opções de *interface* são descritas pela Tabela 4.2.

Percebe-se a partir da Figura 4.2, que apesar do *software* disponibilizar a leitura das correntes, esta é fornecida de maneira rasa e com poucos detalhes, fazendo com que seja necessária a análise dos arquivos de informações gerados (.dat e .cfg) a partir de outro *software*. Como para esta aplicação é necessária uma análise completa do comportamento das correntes de arco e da duração do evento, este procedimento se faz necessário.

Figura 4.2 – Tela de oscilografia do relé.



Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Descrição da *interface* da tela de oscilografia do relé.

Parâmetro	Descrição
A	Leitura e gravação do relé.
B	Data, hora e tempo de oscilografia.
C	Formas de onda das correntes de fase.
D	Valores em módulo e ângulo das correntes de fase definidas pelo cursor.
E	Escolha entre o valor instantâneo e rms para leitura das correntes, e do set ativo de proteção.
F	Leitura da última oscilografia do relé, gravação de oscilografia, memória e leitura de arquivo de oscilografia
G	Leitura temporal dos eventos de <i>close</i> e <i>trip</i> das saídas do relé.

Fonte: Autor.

4.2.2 Tratamento das correntes de arco elétrico

As correntes de arco extraídas da oscilografia devem ser filtradas em outro *software* por dois principais motivos: precisão no tratamento de dados, fornecendo informações como o número de amostras, o tempo de arco, e a estimação dos valores das correntes em rms e a aplicação de um filtro CC, para eliminar as componentes assimétricas do curto-circuito, conforme recomendado pela norma IEEE *Std* 1584-2018.

O guia IEEE *Std* 1584-2018 é conservador no que se refere a sua utilização para a estimação da EI com o intuito de realizar o dimensionamento de EPs, e dessa forma, recomenda que sejam consideradas as componentes de nível CC para este propósito. Con-

tudo, se a pretensão é de obter os valores reais da EI gerada pelo arco elétrico, é necessário aplicar um filtro CC para processar corretamente os dados de corrente de arco elétrico, removendo as componentes CC da leitura das correntes de arco medidas, e estimando a I_{arc} através do valor rms da componente CA fundamental.

O filtro aplicado no tratamento das correntes de arco é chamado de filtro de cossenos, e a sua implementação é baseada nos equacionamentos disponibilizadas pelo anexo G.5.2 da norma IEEE *Std* 1584-2018. A justificativa da norma para a utilização deste filtro é devido à consolidação de seu uso na indústria de relés de proteção contra arcos elétricos, e a adaptação do filtro para aplicação no laboratório foi desenvolvida pela equipe interna do INRI-AF no *software* MATLAB®. O filtro utilizado é descrito pelas Equações (4.1) e (4.2), onde o valor final de I_{arc} é calculado a partir da média simples do valor eficaz de todas amostras para as fases IA, IB e IC, conforme a Equação (4.3).

$$CFC_n = \cos\left(\frac{2\pi}{N} \times n\right) \quad (4.1)$$

$$I_{filtrada} = \frac{2}{spc} \times \sum_{n=0}^N (I_{amostra+apc-n}) \times (CFC_n) \quad (4.2)$$

$$I_{arco_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{apc}^N (IA_{filtrada}^2 + IB_{filtrada}^2 + IC_{filtrada}^2)}{N-apc}} \quad (4.3)$$

onde:

$I_{filtrada}$ é o valor da corrente após a aplicação do filtro de cossenos;

$I_{arco_{rms}}$ é o valor da corrente eficaz de arco elétrico em decorrência das amostras;

N é o número de amostras;

n é a unidade de incrementação para cada termo subsequente (0, 1, 2, 3, ..., N);

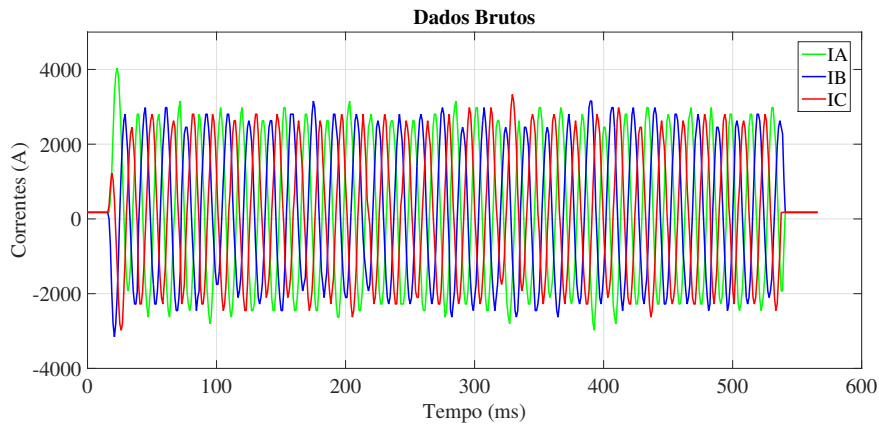
$amostra$ é a sequência das amostras (0, 1, 2, 3, ...);

apc é o número de amostras por ciclo;

$I_{amostra+apc-n}$ são os valores de corrente amostrados.

O processo de filtragem normaliza a alteração de magnitude das correntes de arco para cada amostra, enquanto o intervalo de crescimento de amostragem permanece fixo e a frequência de entrada destas é variada. No processo de extração da componente fundamental, o filtro rejeita o decaimento exponencial ocasionado pela componente CC do curto-circuito, bem como as componentes harmônicas (IEEE STD 1584, 2018). A Figura 4.3 demonstra um exemplo do processamento dos dados das correntes de arco no *software* MATLAB®, através dos valores originais extraídos do relé, ou seja, sem a aplicação do filtro de cossenos recomendado.

Figura 4.3 – Exemplo demonstrativo dos valores instantâneos de corrente de arco.

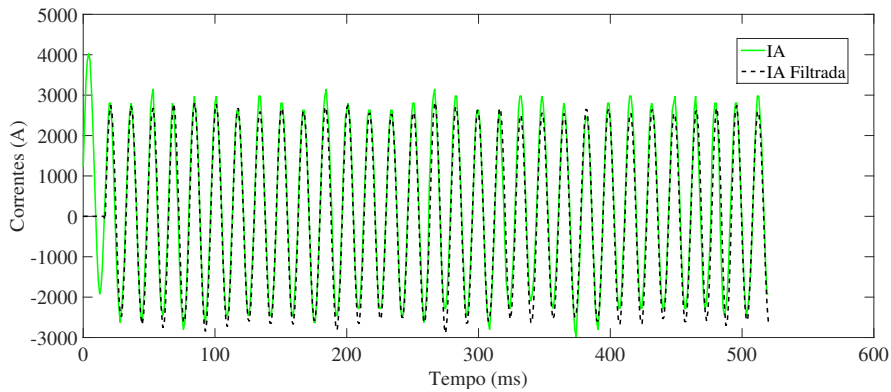


Fonte: Autor.

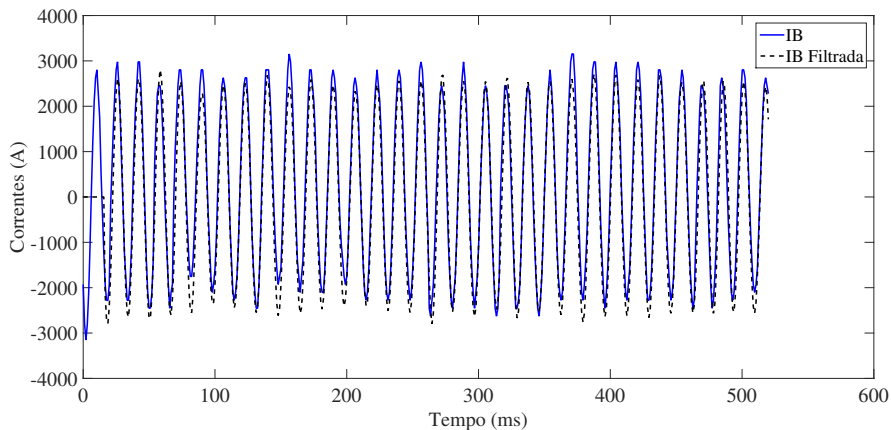
Conforme constatado na Figura 4.3, ocorre um pico no instante inicial do curto-circuito abrangendo as componentes CC e harmônicas, eliminados rapidamente devido à fusão quase instantânea do condutor de sacrifício e da instauração do caminho resistivo para propagação do arco. As formas de onda das correntes de arco para às três fases após a aplicação do filtro de cossenos são demonstradas pelas linhas tracejadas na Figura 4.4.

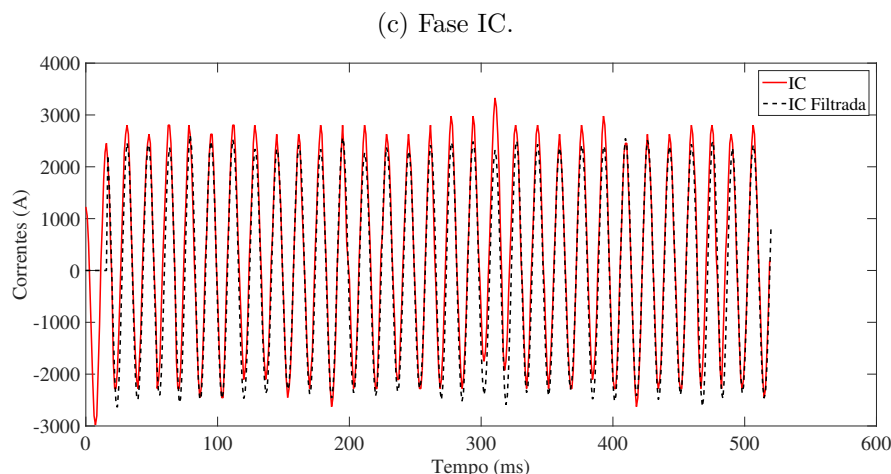
Figura 4.4 – Correntes de arco antes e após a aplicação do filtro.

(a) Fase IA.



(b) Fase IB.





Fonte: Autor.

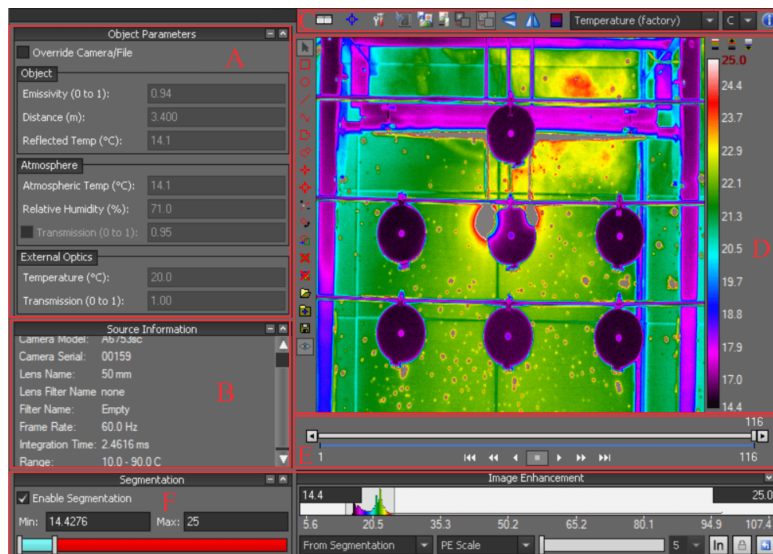
Por meio de uma análise comparativa dos valores medidos e filtrados das correntes de arco mostradas pela Figura 4.4, entende-se que após a aplicação do filtro, as correntes instantâneas de fase têm um comportamento mais moderado, permitindo a aplicação da Equação (4.3) para obtenção da corrente de arco elétrico em valor eficaz. Também pode-se constatar, que sem a aplicação do filtro de cossenos, as correntes de arco teriam um valor médio acima do verdadeiro, acarretando erros na estimação da EI a partir da aplicação do modelo matemático do guia IEEE *Std* 1584-2018 e, conseqüentemente, divergências na comparação com a EI medida pelos calorímetros através dos ensaios.

4.2.3 Aquisição da elevação de temperatura nos calorímetros

Conforme mencionado anteriormente e demonstrado nas Figuras 2.8 e 3.23c, a câmera termográfica é o equipamento responsável por captar a ΔT nos calorímetros em decorrência dos arcos elétricos. Antes do ensaio, a câmera é montada, e conectada a um *nobreak* e ao computador da sala de controle através de um cabo RJ45, onde são feitos os ajustes no *software* ResearchIR[®]. São tomadas todas as precauções para que as distâncias entre a câmera e os calorímetros, bem como o ajuste focal da lente, estejam adequados para o arranjo do ensaio proposto, e que a abertura das portas da câmara de ensaios permita que a câmera observe os discos de cobre de todos os calorímetros.

Assim, são apresentadas nesta seção através da Figura 4.5 e da Tabela 4.3¹, as principais configurações implementadas no *software* ResearchIR[®] da câmera termográfica para realização dos ensaios. Os ajustes das opções de gravação e exportação de dados utilizadas antes e após o ensaio para a aquisição de dados são mostrados na Figura 4.6.

¹Todas as configurações descritas na Tabela 4.3 são ajustáveis após a gravação termográfica, menos a categoria de lente e o ajuste focal utilizado. Por isso, deve-se ter muito cuidado no ajuste do foco, pois equívocos neste processo resultam em dados errôneos de medição de temperatura nos calorímetros.

Figura 4.5 – Tela principal do *software* ResearchIR®.

Fonte: Autor.

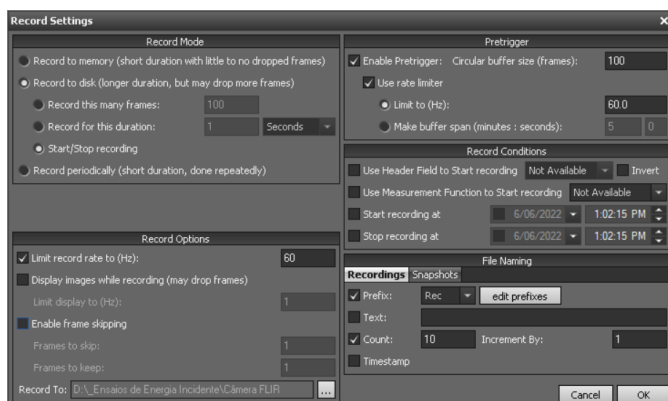
Tabela 4.3 – Descrição das opções de configuração da tela principal do *software* ResearchIR®.

Parâmetro	Descrição
A	Ajuste das condições espaciais e ambientais do ensaio, como: emissividade do objeto, distância, temperatura ambiente e umidade relativa, que influenciam na medição da temperatura instantânea, e podem ser alteradas posteriormente no arquivo de gravação.
B	Delimitação e verificação das configurações da câmera, como: modelo, tipo de lente, taxa de amostragem, e faixa de temperatura esperada a ser medida.
C	Menu de ações com opções de gráficos, gravação, unidades de medição, entre outros.
D	Visualização da imagem da câmera termográfica e da paleta de cores.
E	Menu que controla o avanço, recuo, limites e cortes de <i>frames</i> da gravação realizada.
F	Opções de segmentação, que definem os limites mínimos e máximos de temperatura exibidas pela paleta de cores e pela tela da câmera. Utilizar essa opção é importante, pois facilita a análise das medições de temperatura obtidas pela gravação em caso de eventos com elevações abruptas de temperatura.

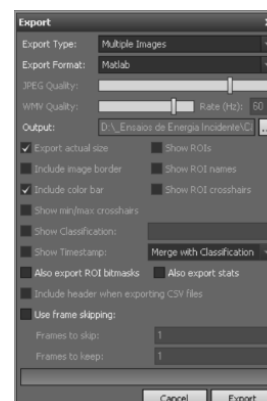
Fonte: Autor.

Figura 4.6 – Demais opções do *software* ResearchIR® utilizadas.

(a) Gravação.



(b) Exportação.



Fonte: Autor.

A gravação termográfica do ensaio resulta em um arquivo de vídeo .ats (*Advanced ETL Transformation Script*) que pode ser analisado a qualquer momento no *software* ResearchIR[®]. A taxa de amostragem adotada na câmera é de 60 FPS, pois, gera uma quantidade suficiente de dados sem ocupar um armazenamento computacional muito elevado na gravação do vídeo. É possível alterar a qualquer momento parâmetros como a distância do objeto, a temperatura ambiente e a umidade relativa, conforme observado na Figura 4.5, através da modificação de seus valores no arquivo .ats gerado. A cada alteração desses valores, o ResearchIR[®] atualiza automaticamente as medições de temperatura no objeto de interesse, concedendo flexibilidade na análise e exportação dos dados. A Figura 4.6b exibe as configurações para exportação do arquivo de vídeo para o formato de múltiplas imagens em extensão MATLAB[®] (.mat), com a finalidade de analisar posteriormente no *software* de tratamento de dados os diversos *frames* gerados na gravação.

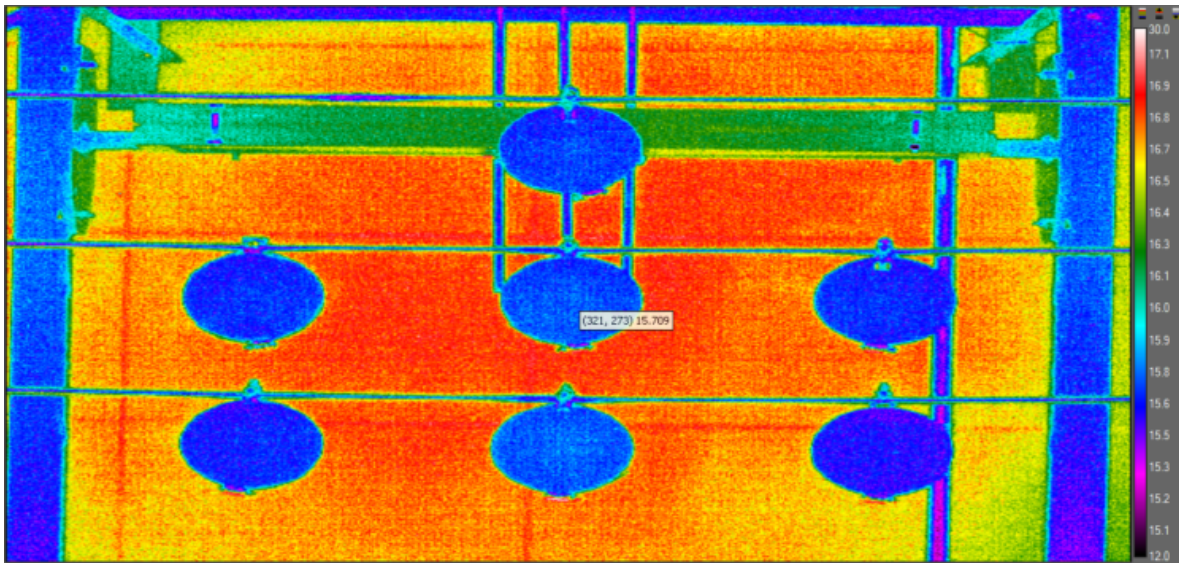
No andamento dos ensaios, foi observada a saturação na medição de temperatura pela câmera termográfica por alguns instantes devido à elevada temperatura gerada no ponto de ignição do arco elétrico durante o evento, impossibilitando a câmera de captar a curva de ΔT nos calorímetros, e a deixando “cega” durante alguns *frames* (em torno de 1,5 segundos). Todavia, conforme mencionado anteriormente, para a medição da EI são necessárias apenas as temperaturas inicial e final, e esses dados podem ser adquiridos, devido ao clarão, a fumaça, fragmentos de cobre e demais questões que distorcem a visão dos calorímetros através da lente da câmera termográfica se dissiparem rapidamente. Além disso, a queda de temperatura nos discos de cobre possui uma natureza lenta o suficiente para a câmera termográfica conseguir registrar a ΔT ocasionado pelo arco elétrico, devido ao isolante térmico que o cerca. A Figura 4.7 apresenta dois registros da câmera termográfica, um antes e um após o ensaio de arco elétrico. A gravação termográfica completa do ensaio em questão pode ser conferida na Figura E.1 do Apêndice E.

Foi tomado como referência para este exemplo o calorímetro central, visto que ele apresentou a maior ΔT durante o ensaio. Conforme observado na Figura 4.7, ao selecionar um *pixel* da imagem no *software* ResearchIR[®], é mostrada a coordenada deste *pixel* e a respectiva temperatura nele. No caso das Figuras 4.7a e 4.7b, a temperatura antes do arco elétrico é de 15,701 °C, e para o mesmo ponto após o arco é de 18,318 °C, significando uma ΔT de 2,617 °C resultante no disco de cobre em questão. Outra maneira de observar os valores aproximados de temperatura em cada ponto é através da paleta de cores mostrada nas Figuras 4.7a e 4.7b, onde através das cores azul e magenta pode-se perceber que as temperaturas exibidas na tela condizem com a sua paleta correspondente.

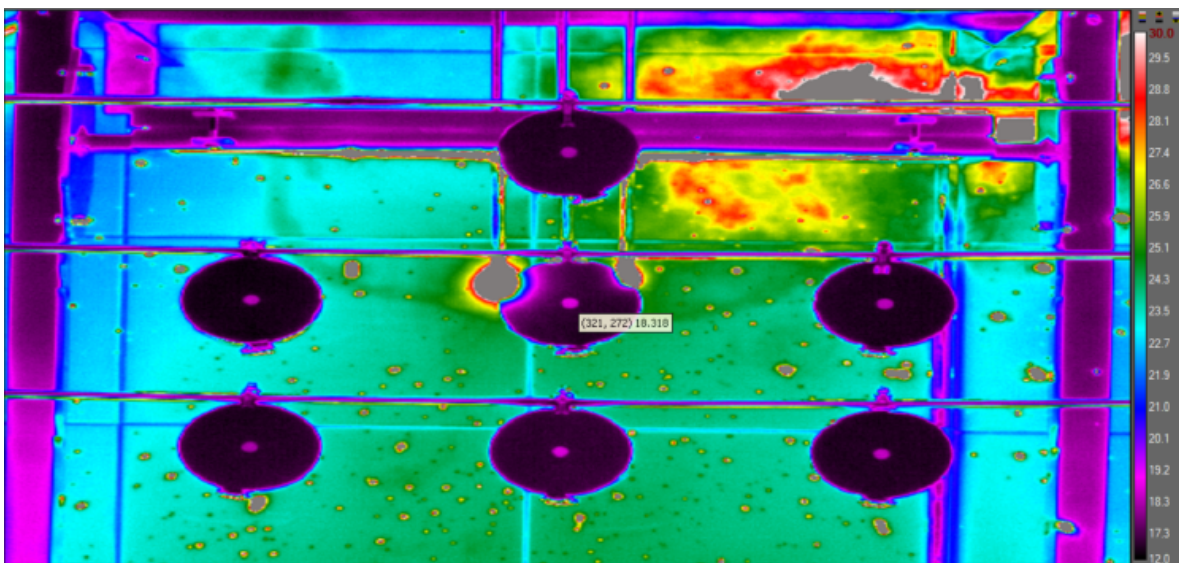
Na Figura 4.7b também é possível destacar os rejeitos de cobre (em forma de gotículas) e as alterações geradas no ambiente pelo arco elétrico, principalmente próximo aos eletrodos, com altas variações de temperatura entre os pontos. A ponta dos eletrodos está em escala cinza, indicando a saturação da câmera naquele local por ultrapassar os limites de temperatura definidos na segmentação para a análise termográfica do ensaio.

Figura 4.7 – Registros da temperatura no calorímetro de maior ΔT antes e após o ensaio.

(a) Antes do arco elétrico - temperatura inicial.



(b) Após o arco elétrico - temperatura final.



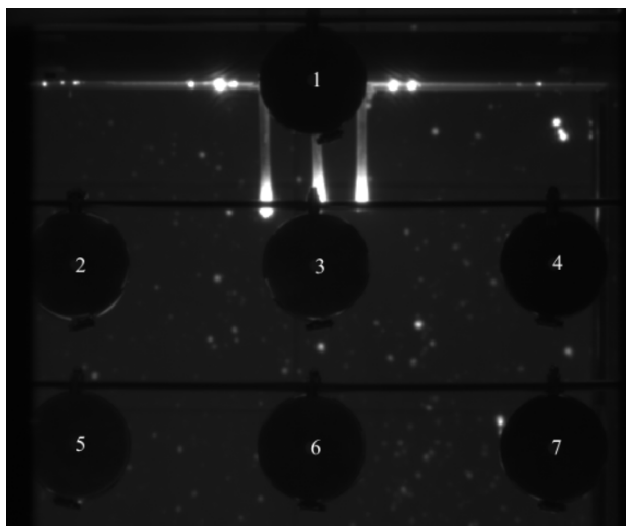
Fonte: Autor.

4.2.4 Tratamento dos dados de energia incidente

Após a obtenção dos dados de ΔT nos calorímetros, estes são tratados em um *software* desenvolvido internamente em MATLAB®. Quando o *script* em MATLAB® é executado, a pasta que contém os arquivos .mat deve ser selecionada. Após a leitura dos arquivos existentes na pasta pelo *software*, as coordenadas dos calorímetros são assinaladas pelo operador, para que o *software* identifique corretamente os *pixels* onde os orifícios posteriores dos calorímetros estão localizadas nos *frames* gerados na gravação da câmera termográfica e calcule a EI baseado nas características físicas de cada calorímetro

cadastrado no *software* e dos equacionamentos descritos na Seção 2.1.2.1. Após esse procedimento, é exibida uma imagem pelo *software* contendo as coordenadas selecionadas, conforme demonstrado pela Figura 4.8. As massas dos discos de cobre dos calorímetros são apresentadas no Apêndice C.

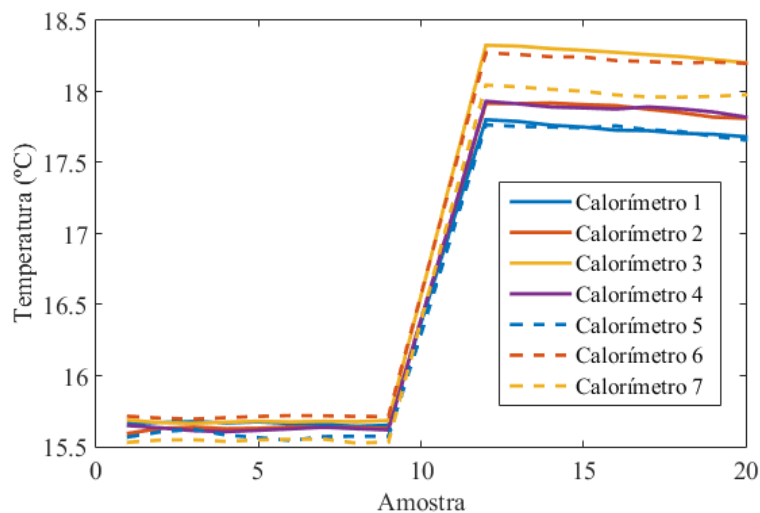
Figura 4.8 – Identificação da posição dos calorímetros.



Fonte: Autor.

A partir das coordenadas selecionadas na Figura 4.8, o *software* realiza a estimação da temperatura média em torno de nove pontos ao redor do *pixel* selecionado. Também é aplicado um filtro de média móvel de quatro amostras, para identificar a tendência de ΔT em cada disco de cobre, e por este motivo, é importante que sejam gerados arquivos *.mat* suficientes para estimar precisamente a EI. Após este processo, a ΔT em cada calorímetro é representada através do gráfico gerado pelo *software*, apresentado na Figura 4.9, onde a representação numérica dos calorímetros segue a ordem assinalada na Figura 4.8.

Figura 4.9 – Gráfico de elevação de temperatura em cada calorímetro.



Fonte: Autor.

Através da análise comparativa dos valores das temperaturas representadas na Figura 4.7 e da ΔT nos calorímetros apresentadas pelo gráfico da Figura 4.9, nos pontos de menor e maior temperatura do calorímetro três, é constatado que o *software* de tratamento de dados cumpre a função de ler corretamente as temperaturas fornecidas pelos arquivos .mat, visto que os valores apresentados na tela da câmera termográfica e lidos pelo *software* em MATLAB[®] são muito próximos. São consideradas 20 amostras para a estimação da EI, 10 antes e 10 após o arco elétrico, pois, os arquivos .mat ocupam um armazenamento computacional elevado, e por isso, são armazenados apenas o número necessário de amostras. Em caso de necessidade, a qualquer momento podem ser gerados mais arquivos .mat a partir da gravação termográfica em extensão .ats. Com posse das amostras, o *software* estima a EI em cada um dos calorímetros e indica em qual deles foi observada a EI máxima. A partir disso, é gerado um relatório contendo as principais informações e os resultados do ensaio, que pode ser conferido no Apêndice D.

4.2.5 Visualização e gravação do ensaio

O acompanhamento e a gravação do ensaio de arco elétrico é realizada de maneira simples, pois, é necessário apenas iniciar e interromper a gravação da câmera de monitoramento antes e após o arco elétrico, a partir do *software* S.I.M Next da Intelbras[®]. Após esse processo, basta realizar a edição do vídeo gerado, e a sua visualização pode ser feita em câmera lenta, caso seja conveniente. A Figura 4.10 demonstra o vídeo do arco elétrico gerado pelo ensaio da Tabela 4.1 em diferentes períodos de propagação.

Acerca dos registros apresentados pela Figura 4.10, algumas considerações sobre o arco elétrico gerado podem ser realizadas quanto ao desenvolvimento de sua propagação:

- (a) Em 200 ms: está com elevados valores de plasma e energia concentrada. A sua nuvem de gás retém bastante material ionizado para sustentação;
- (b) Entre 300 e 400 ms: a nuvem de gás já não retém muito material ionizado para sustentação, entretanto o arco se encontra em estado de equilíbrio;
- (c) Em 500 ms: nota-se a redução da área de abrangência do arco elétrico, onde sua concentração de energia está retida quase totalmente nos eletrodos;
- (d) Em 520 ms: pode-se observar o período pré-extinção do arco elétrico, representado por uma labareda.

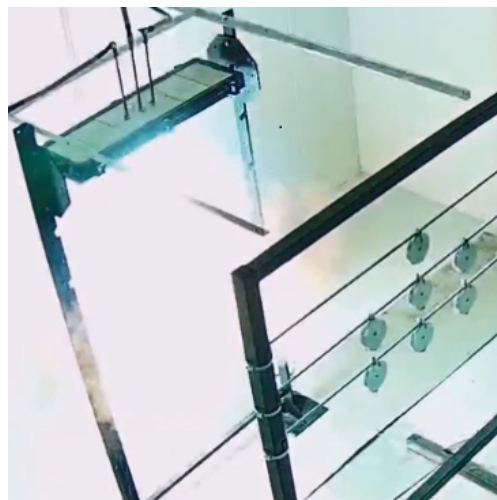
As gravações dos demais ensaios realizados no laboratório até o momento da conclusão deste trabalho estão disponíveis na Figura E.2 do Apêndice E.

Figura 4.10 – Visualização da gravação do ensaio de arco elétrico.

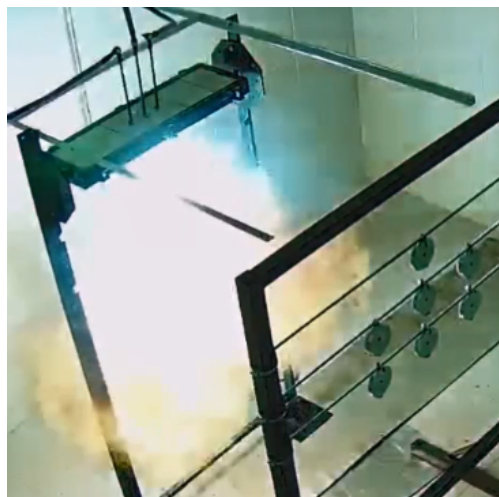
(a) Antes do ensaio.



(b) 200 ms.



(c) 300 ms.



(d) 400 ms.



(e) 500 ms.



(f) 520 ms.



Fonte: Autor.

4.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Uma série de procedimentos deve ser estritamente seguida para que o ensaio de arco elétrico ocorra satisfatoriamente, ou seja, com segurança, ajuste correto dos parâmetros de entrada e uma aquisição confiável dos dados de medição. Desta maneira, esta seção destaca os principais procedimentos realizados antes, durante e após os ensaios de arcos elétricos. Como a descrição completa dos *checklists* de procedimentos seguidos no laboratório seria muito extensa, é realizada uma síntese desses procedimentos, abordando as principais questões atentadas para a realização do ensaio.

4.3.1 Antes do ensaio

Antes da realização do ensaio, é imprescindível a verificação da posição da chave seccionadora, para garantir que o local está completamente desenergizado, e a conferência do estado dos disjuntores da sala de máquinas. Antes de adentrar a sala de máquinas para realizar qualquer alteração, é muito importante que a vara de aterramento seja utilizada nas buchas dos reatores conectadas ao circuito, para garantir a ausência de tensão residual nas mesmas. Durante a preparação da sala de máquinas e da câmara de ensaios, a chave geral do painel de comando da sala de máquinas deve estar obrigatoriamente desligada, para evitar qualquer possibilidade de acionamento acidental ou indevido dos disjuntores através da sala de controle. Tomadas essas precauções, as demais medidas descritas ao decorrer desta seção para o preparo do ensaio podem ser realizadas.

4.3.1.1 Montagem do arranjo

As principais modificações relacionadas ao arranjo dos parâmetros de entrada do ensaio são realizadas na sala de máquinas e na câmara de ensaios. Para isso, devem ser procedidos os seguintes ajustes físicos, caso haja necessidade:

- Nível da corrente de curto-circuito, através do ajuste dos *taps* nos reatores;
- Configuração do ensaio (HOA ou VOA);
- Espaçamento entre eletrodos;
- A distância de trabalho (entre os eletrodos e o painel dos calorímetros);
- Altura do painel dos calorímetros, caso seja necessário;
- Posicionamento do condutor de sacrifício, confeccionado conforme o Apêndice F.

Caso o ensaio necessite algum ajuste da umidade relativa (UR) ou da temperatura, este também é feito nesta etapa. Para modificar a UR da câmara de ensaios, o climatizador deve ser desligado antes da inserção do termo-higrômetro no local, para se obter uma medição confiável e evitar a saturação do dispositivo, de forma que o processo de umidificação da sala dure em torno de 30 a 60 minutos, a depender das condições ambientais vigentes no local e as pretendidas, pois, envolve o tempo de umidificação do recinto mais o de estabilização da medição pelo termo-higrômetro. A alteração de temperatura e o ressecamento do ambiente são realizados através do condicionador de ar. Após esses procedimentos, a sala de máquinas é fechada, e o acesso da câmara de ensaios é realizado apenas mediante a ajustes específicos e para a montagem da câmara termográfica.

4.3.1.2 Configurações dos equipamentos

Os principais equipamentos a serem configurados entre a realização de ensaios são os relés de proteção e a câmara termográfica. O relé de MT deve ser ajustado conforme o proposto pela Equação (3.1), já com relação ao tempo de atuação do relé de BT, este deve ser parametrizado conforme o tempo de arco elétrico requisitado para o ensaio. Ambas as parametrizações devem ser revisadas após o ajuste, pois, equívocos neste processo podem comprometer os resultados do ensaio e a operação segura do laboratório.

A câmara termográfica deve ser montada em seu respectivo tripé com a lente de 50 mm, e posicionada na mesma altura do calorímetro central, a uma distância de 3,4 metros. A câmara é energizada por um *nobreak* conectado à rede elétrica, que é isolado da rede imediatamente antes do ensaio, fazendo com que a câmara termográfica não fique suscetível a qualquer oscilação da rede elétrica originada pelo ensaio. Após ser ligada, a câmara demora cerca de 10 minutos para entrar em estado de operação, então é necessário configurá-la algum tempo antes do ensaio. O ajuste do foco é realizado por dois operadores do laboratório em comunicação mútua, um operador na câmara de ensaios responsável por ajustar o foco da câmara e outro na sala de controle, que visualiza e coordena o ajuste através do *software* ResearchIR[®]. O respectivo *software* deve ser configurado conforme o descrito na Seção 4.2.3, com um cuidado especial na revisão das opções de gravação e na escolha correta da opção de lente que está sendo utilizada, além dos limites de temperatura esperados no ensaio, para evitar problemas na aquisição de dados.

4.3.2 Durante o ensaio

Antes do início do ensaio, é realizada uma vistoria geral para verificar se existem pessoas não autorizadas no prédio do laboratório arcos elétricos, para estas serem retiradas

do local, e então, a chave seccionadora é fechada. Posteriormente, a chave geral do painel de comando da sala de máquinas é acionada, seguida da chave geral do painel de comando da sala de controle, ligando um alerta sonoro indicando que o laboratório está em período de ensaio e que todos os indivíduos próximos ao local devem se afastar. As luzes do painel referentes aos quadros de comando e à chave seccionadora devem estar acesas e visíveis no painel para ser dado prosseguimento ao ensaio.

4.3.2.1 Ignição do arco elétrico e cuidados no painel de comando

No momento da ignição do arco elétrico, deve-se ter dois operadores em comunicação direta via rádio ou telefone celular, um na área externa do laboratório observando o ensaio à distância e o outro na sala de controle, operando o painel de comando e visualizando o ensaio através da câmera de monitoramento. Antes do fechamento dos disjuntores, devem ser iniciadas as gravações nos *softwares* ResearchIR[®] e S.I.M Next[®], para registrar os dados do ensaio. Tomadas estas precauções e com ambos os painéis de comando ligados, são acionadas em um intervalo de cerca de 10 segundos as botoeiras que fecham os disjuntores de MT e de BT, respectivamente, ocorrendo a ignição do arco.

Se o ensaio ocorrer conforme o esperado, o seccionamento do circuito é realizado pelo disjuntor de BT (extinção do arco elétrico), e na sequência, o disjuntor de MT é aberto pelo operador através do painel de comando, desenergizando o circuito de MT da sala de máquinas. Caso o disjuntor de MT atue durante o ensaio, deve ser aberto imediatamente o disjuntor de BT pelo operador e verificadas as motivações que levaram à falha do ensaio, se foram equívocos na parametrização dos relés, ou ocorrências causadas por faltas internas no circuito. Considerando o quadro de comando apresentado na Figura 3.20, a sequência de passos a ser seguida é a seguinte: 1, 4, 5, 6 e 7. Imediatamente após a extinção do arco elétrico, devem ser interrompidas as gravações de ambas as câmeras.

4.3.3 Após o ensaio

A ação subsequente após a abertura do disjuntor de MT pelo operador é a abertura da chave seccionadora, para a desenergização completa do circuito de MT do laboratório. Posteriormente, a vara de aterramento é aplicada nas buchas dos reatores conectadas ao circuito, e então, os painéis de comando podem ser desligados, cessando o alerta sonoro. Na sequência, as portas e janelas da câmara de ensaios devem ser totalmente abertas para dispersar os resíduos gerados pelo ensaio. Todas essas ações são realizadas com o operador do laboratório utilizando os EPIs correspondentes.

Dando prosseguimento, é realizado um levantamento de danos na câmara de en-

saios (caso ocorram) e a câmera termográfica é desmontada. Os eletrodos são examinados e mantidos a cada ensaio, para deixá-los similares entre as provas, seja em comprimento ou em formato. Também são monitoradas possíveis oscilações visíveis na rede elétrica, como os “piscas” (um dos indicadores de AMTs), para observar se os ensaios estão prejudicando a qualidade de fornecimento de energia elétrica em locais próximos.

4.3.3.1 Organização dos dados de ensaio

Tendo em vista uma melhor organização dos resultados dos ensaios, cada ensaio possui uma pasta específica, que contém quatro sub-pastas e um relatório geral que descreve as principais informações do ensaio em questão, como: V_{oc} , I_{bf} , data, hora, ligação entre *taps*, configuração, espaçamento entre eletrodos, tempo de arco e a distância de trabalho. Além disso, na pasta principal também está localizada outra pasta com os *softwares* em MATLAB® para o tratamento dos resultados dos ensaios, facilitando o a análise de dados a partir destes. As sub-pastas existentes para o armazenamento de dados são:

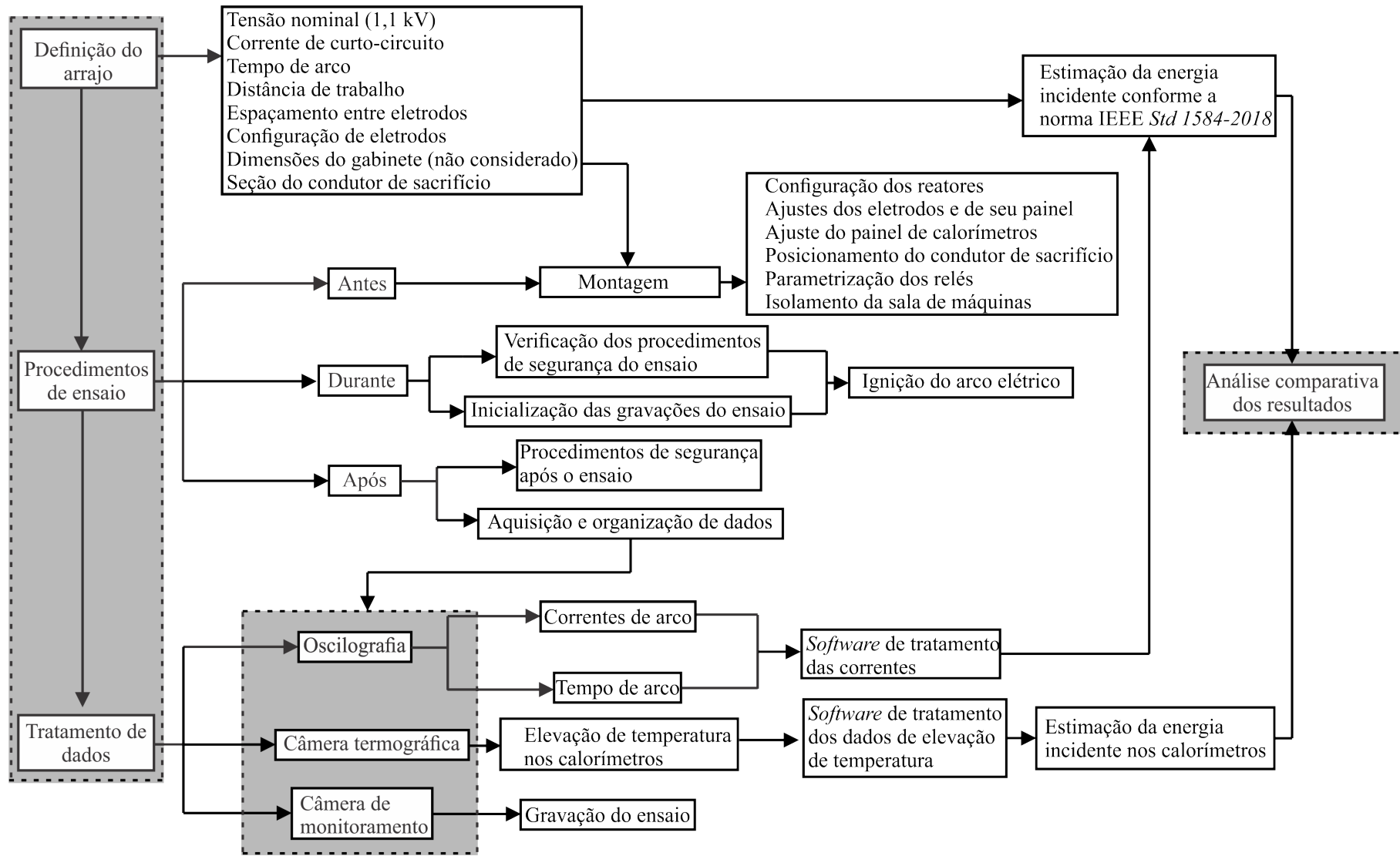
- Pasta *flir* para os arquivos *.mat* gerados pela câmera termográfica;
- Pasta *imagem* para a gravação do ensaio gerada na câmera de monitoramento;
- Pasta *relé* para os arquivos *.dat*, *.cfg* e *.ros* extraídos da oscilografia do relé;
- Pasta *termo-higrômetro* para a foto do medidor capturada antes do ensaio.

As pastas referentes aos ensaios e os arquivos extraídos dos equipamentos são nomeados considerando a seguinte sequência: ano, mês, dia e hora do ensaio. Por exemplo, para o ensaio descrito na Tabela 4.1, realizado no dia 13/05/2022 às 11 horas e 06 minutos, os arquivos gerados possuem a seguinte nomenclatura: “Ensaio 202205131106”. Esta nomenclatura contribui para a organização dos arquivos, pois, a disposição numérica na sequência ano, mês, dia e hora permite o arranjo das pastas em ordenamento numérico, facilitando a organização e processamento de dados.

4.4 SUMÁRIO

Nesta seção foram apresentados os principais procedimentos adotados no laboratório de arcos elétricos, norteando-se a partir de três principais questões: a definição do arranjo, a metodologia de aquisição de dados e os procedimentos de ensaio, ponderando-se sobre as ações e práticas que devem ser tomadas antes, durante e após os ensaios de arcos elétricos. Em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 3.24, foi elaborado um fluxograma para sintetizar a interdependência entre as questões abordadas nesta seção, conforme disposto na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Fluxograma-resumo dos procedimentos metodológicos do laboratório.



Fonte: Autor.

5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos ensaios de arcos elétricos realizados em laboratório, e procede à análise comparativa das respectivas EI medidas com as calculadas através do guia IEEE *Std* 1584-2018, conforme abordado na Seção 2.3. Além disso, é efetuada uma abordagem inicial das possíveis influências do efeito da umidade relativa nos arcos elétricos, a partir da análise dos resultados de alguns dos ensaios realizados considerando este fator incluindo este fator. Outrossim, é apresentado um sumário dos ensaios realizados no laboratório até a conclusão deste trabalho, e sucedidas discussões sobre os resultados obtidos até o momento através dos ensaios experimentais.

5.1 ESTUDO DE CASO: ENSAIOS HOA E VOA

Para proceder a comparação de ensaios na configuração vertical e horizontal em ambiente aberto para os mesmos parâmetros, é detalhado um ensaio completo realizado em HOA e outro em VOA, para as configurações descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Configurações dos ensaios HOA e VOA comparados.

Configuração	Voc (kV)	Taps	I_{arc} medida (kA)	Tempo (RL+DJ)	G (mm)	d (mm)
HOA	1,1	H0-H12	1,57	535	100	1100
VOA	1,1	H0-H12	1,63	526	100	1100

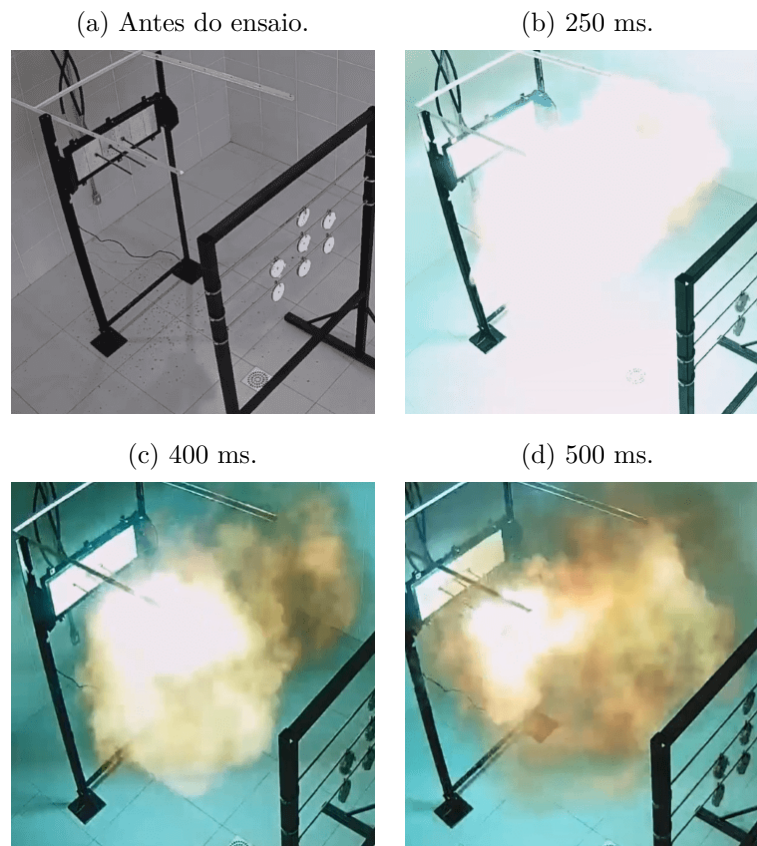
Fonte: Autor.

5.1.1 Ensaio HOA

O ensaio HOA demonstrado nesta seção possui seus parâmetros de entrada descritos na Tabela 5.1, sendo o segundo ensaio realizado no laboratório e o primeiro exibido nas gravações disponibilizadas na Figura E.2 do Apêndice E. O primeiro ensaio geral, com configurações idênticas, não foi considerado na contagem geral de ensaios, dado que não foi utilizado o sistema de medição de EI em sua execução, pois o objetivo deste era de averiguar a segurança e confiabilidade operacional do laboratório.

Para a ignição do arco elétrico, foi utilizado um condutor de sacrifício de aproximadamente $0,25 \text{ mm}^2$, que a partir da aplicação do equacionamento apresentado no Apêndice F, é o valor da seção transversal do condutor de cobre que pode-se fundir em um tempo de em torno de 2 ms, dada a corrente de curto-circuito considerada. O condutor de sacrifício foi posicionado conforme o observado na Figura 3.17b. A visualização do ensaio, em diferentes períodos, pode ser observada através da Figura 5.1.

Figura 5.1 – Ensaio HOA.

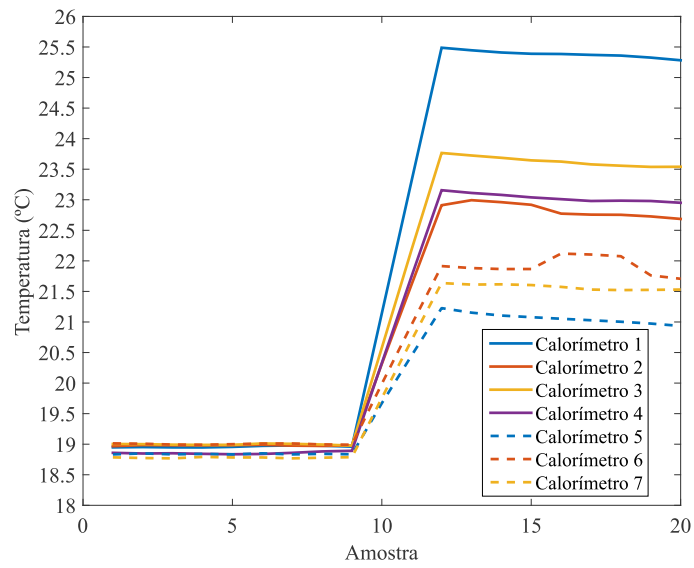


Fonte: Autor.

Após a utilização do *software* de tratamento dos dados de oscilografia, foi verificado que o ensaio durou 530 ms, e que teve uma I_{arc} de 1,57 kA. Para estes valores, e considerando os demais parâmetros da Tabela 5.1, foi calculada uma EI de $0,94 \text{ cal/cm}^2$ conforme o modelo matemático do guia IEEE *Std* 1584-2018.

Posteriormente, é feito o tratamento dos arquivos .mat extraídos da gravação realizada pela câmera termográfica. O resultado obtido através da aplicação do *software* de leitura destes arquivos é apresentada na Figura 5.2, com a ΔT nos sete calorímetros. Já na Figura 5.3, são apresentadas as temperaturas inicial e final no calorímetro de maior ΔT , que conforme mostrado pela Figura 5.2, é o calorímetro um.

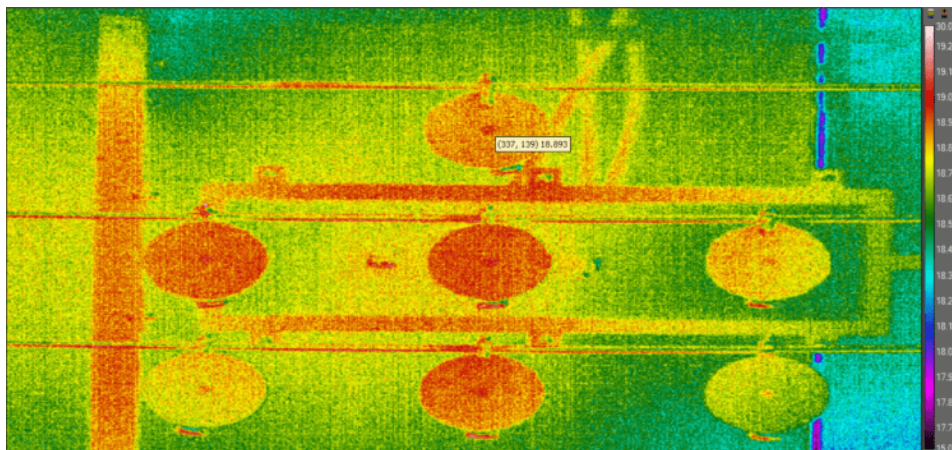
A EI máxima observada em decorrência do arco elétrico ocorre no calorímetro um, que representa a cabeça de um indivíduo conforme observado na Figura 4.8, com um valor de $0,9 \text{ cal/cm}^2$ estimado através de uma ΔT de $6,57 \text{ }^\circ\text{C}$. Este valor representa uma EI 4,26% menor que a calculada pela norma IEEE *Std* 1584-2018 ($0,94 \text{ cal/cm}^2$), mantendo-se na margem de incerteza de medição de $\pm 10\%$ abordada na Seção 2.1.2.1 e validando a medição. Neste caso, a AFB estimada foi de 964,58 mm para o valor da EI calculado pela IEEE *Std* 1584-2018 conforme a I_{arc} do ensaio, e 939 mm considerando a medição da EI nos calorímetros.

Figura 5.2 – Gráfico da ΔT nos calorímetros para o ensaio na configuração HOA.

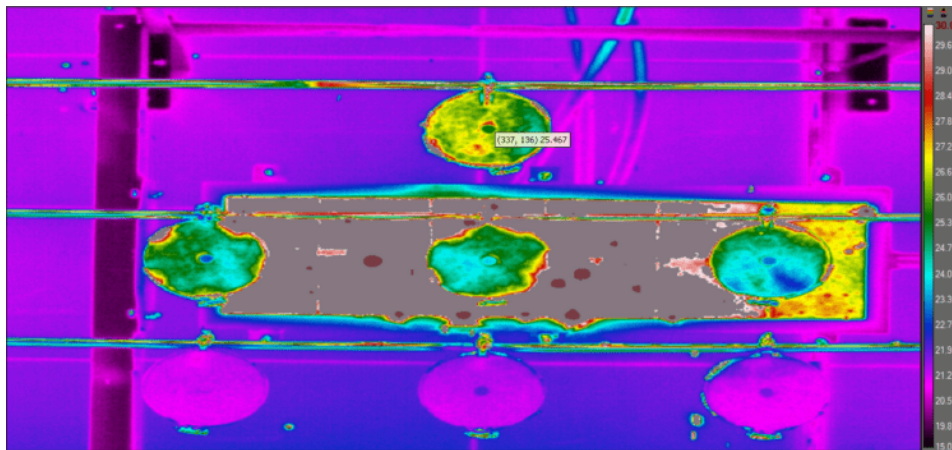
Fonte: Autor.

Figura 5.3 – Registros da temperatura no calorímetro de maior ΔT para a configuração HOA.

(a) Antes do arco elétrico - temperatura inicial.



(b) Após o arco elétrico - temperatura final.



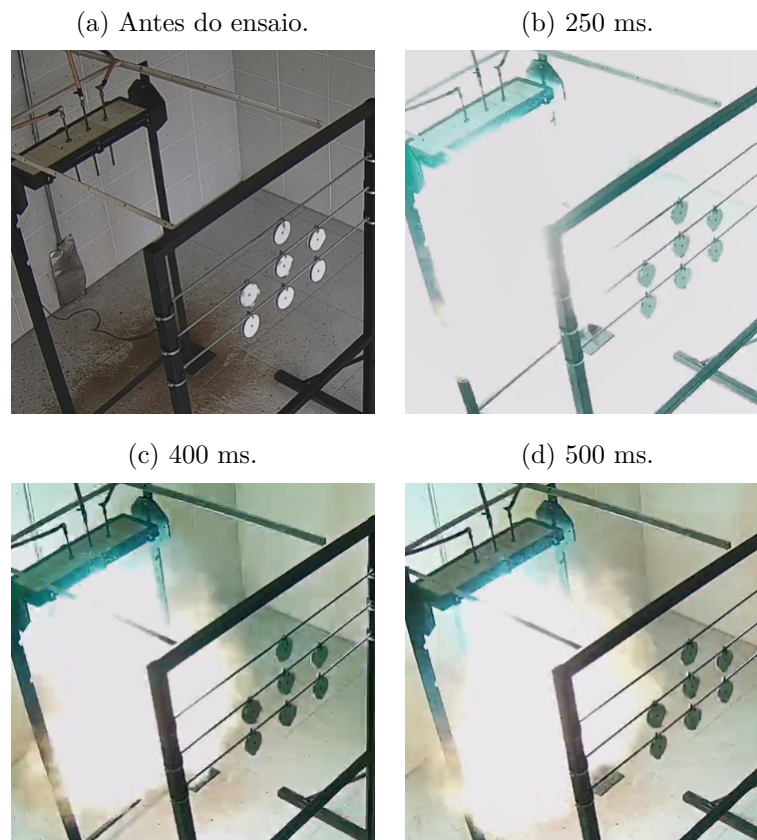
Fonte: Autor.

Até a conclusão deste trabalho, o ensaio HOA não foi repetido devido os riscos em que ele expõe a câmera termográfica, pois, esta configuração lança rejeitos no sentido dos eletrodos mais acintosamente do que inicialmente esperado, podendo atingir frontalmente a câmera. Desta forma, a repetição de ensaios nesta configuração é condicionada à aquisição de termopares para o sensoriamento de temperatura, ou de uma janela de inspeção construída a partir de um material de baixa emissividade para proteger a lente da câmera, neste caso, a base de fluoreto de cálcio (CaF_2). Este material proporciona uma alta transmissibilidade de radiação infravermelha, além de possuir um baixo coeficiente de absorção de energia, permitindo que a câmera consiga enxergar através dele.

5.1.2 Ensaio VOA

O ensaio VOA abordado nesta seção possui configurações idênticas ao apresentado na Seção 5.1.1, alterando-se apenas o sentido da disposição dos eletrodos, conforme descrito na Tabela 5.1, sendo este o décimo ensaio exibido nas gravações disponibilizadas pela Figura E.2. A ignição do arco elétrico é procedida de maneira similar à demonstrada na Seção 5.1.1, e a visualização do ensaio é apresentada na Figura 5.4.

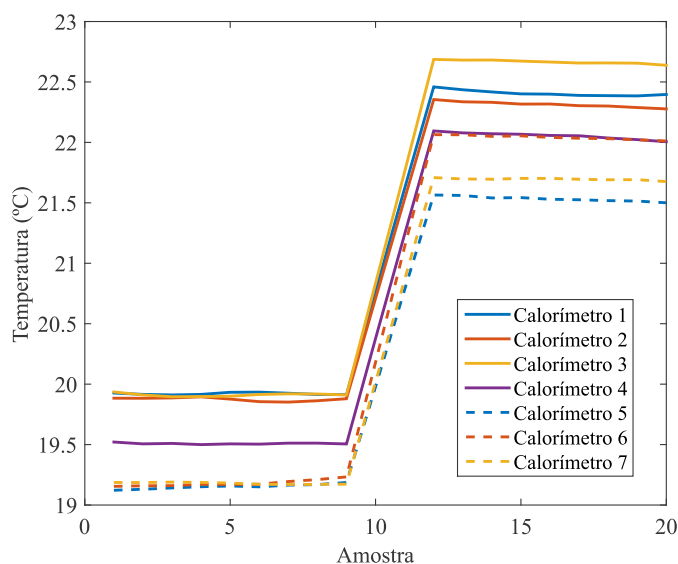
Figura 5.4 – Ensaio VOA.



Fonte: Autor.

A partir do tratamento dos arquivos .mat extraídos da gravação termográfica e da aplicação do *software* de leitura dos dados de temperatura, obtém-se a ΔT nos sete calorímetros, conforme observado na Figura 5.5. Analogamente ao procedimento demonstrado na Seção 5.1.1, a Figura 5.6 exibe as temperaturas inicial e final no calorímetro de maior elevação de temperatura, que neste caso, é o calorímetro seis.

Figura 5.5 – Gráfico da ΔT nos calorímetros para o ensaio da configuração VOA.



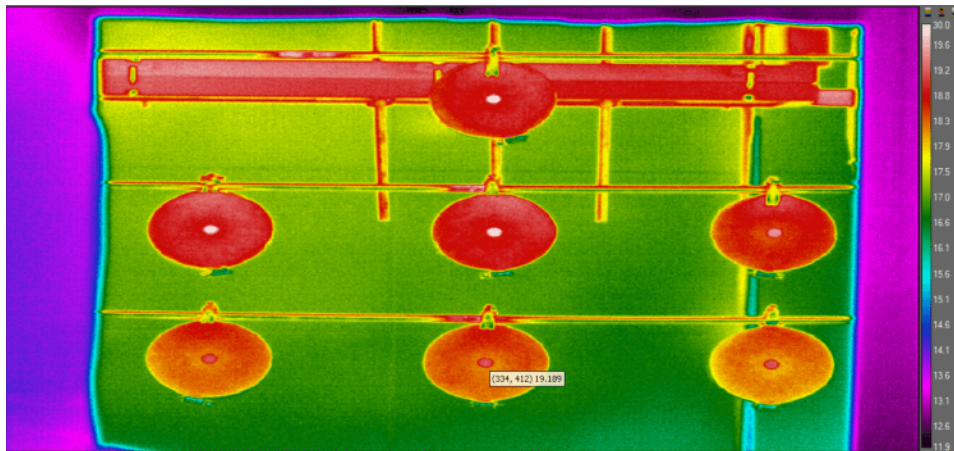
Fonte: Autor.

Duas questões podem ser constatadas nas Figuras 5.5 e 5.6 se comparadas às Figuras 5.2 e 5.3. A primeira, é que na Figura 5.2 a temperatura inicial dos calorímetros é mais parecida se comparadas às observadas na Figura 5.6, isso ocorreu porque no segundo caso foi ligado o condicionador de ar para o ressecamento do ambiente (causando um consequente aumento de temperatura), e apesar do fluxo de ar do aparelho ter sido configurado para não ser direcionado aos calorímetros, isso fez com que variassem um pouco seus valores de temperatura inicial. Ressalta-se que, para a estimativa da EI, o que é relevante é a ΔT ocasionada pelo arco elétrico em cada calorímetro. A segunda, é que imagem da câmera termográfica demonstrada na Figura 5.6a está mais nítida do que a observada na Figura 5.3a. Isto ocorre, pois, o condicionador de ar providenciou diferentes pontos de calor no ambiente, e isso permite a exibição da imagem termográfica mais nitidamente devido à existência de mais pontos de referência de temperatura, o que não ocorre no primeiro caso, pois, as temperaturas nos diversos pontos da imagem são muito similares.

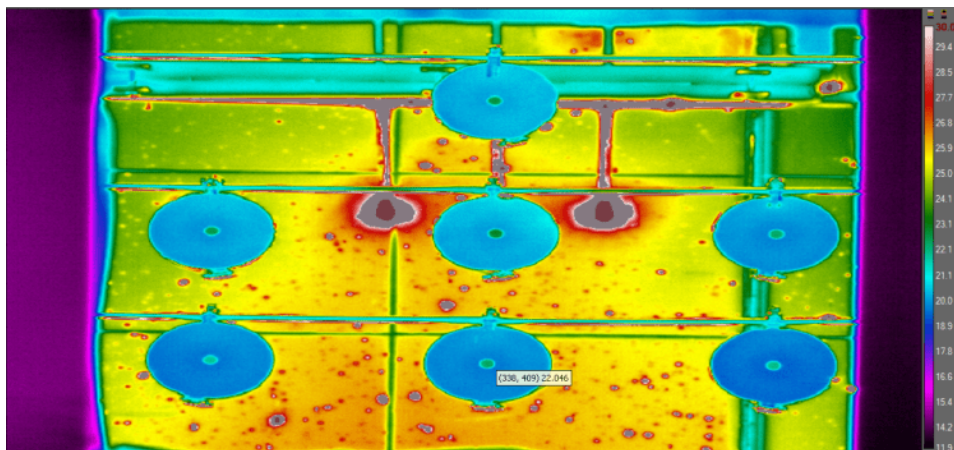
A EI máxima observada em decorrência do arco elétrico nessa configuração ocorreu no calorímetro seis, que equivale à região entre o peitoral e o tórax de um indivíduo conforme a Figura 4.8, com um valor de $0,39 \text{ cal/cm}^2$, calculado através de uma ΔT de $2,86 \text{ }^\circ\text{C}$. A EI medida no ensaio e calculada pela IEEE *Std* 1584-2018 ($0,39 \text{ cal/cm}^2$) é praticamente idêntica, validando a medição realizada. Devido a isso, a AFB calculada para os valores da EI medida e calculada é igual, sendo estimado um valor de $535,36 \text{ mm}$.

Figura 5.6 – Registros da temperatura no calorímetro de maior ΔT para a configuração VOA.

(a) Antes do arco elétrico - temperatura inicial.



(b) Após o arco elétrico - temperatura final.



Fonte: Autor.

5.1.3 Análise dos resultados obtidos nos ensaios HOA e VOA

Na comparação entre ambos os ensaios, conforme o esperado, a EI na configuração HOA foi significativamente maior, apesar de apresentar uma I_{arc} ligeiramente menor, visto que o arco elétrico é direcionado frontalmente aos calorímetros, diferentemente da configuração VOA, onde ele é direcionado para baixo e há um maior espalhamento da EI no ambiente circundante. A Tabela 5.2 compara os valores da EI medida para os ensaios descritos na Tabela 5.1.

Dos resultados apresentados pela Tabela 5.2, destaca-se que o ensaio VOA representa uma EI medida de apenas 43,3% em relação à EI do mesmo ensaio realizado em HOA, caracterizando uma diferença bastante significativa entre às duas configurações. Além disso, as discrepâncias entre a EI medida e estimada em ambos os cenários é pequena, validando os ensaios realizados.

Tabela 5.2 – Comparação das medições da EI nos ensaios HOA e VOA.

Ensaio	EI medida cal/cm²	EI estimada cal/cm²
HOA	0,9	0,94
VOA	0,39	0,39
Comparativo		
Diferença total	0,51	0,55
Valor % da EI em VOA em relação a HOA	43,3	41,48

Fonte: Autor.

5.2 VARIAÇÕES DE CENÁRIOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados de alguns dos ensaios realizados considerando a modificação de apenas uma variável de entrada e mantendo os outros parâmetros de ensaio idênticos, para verificar a influência de cada parâmetro no valor da EI e a precisão do arranjo de medição da EI utilizado neste trabalho. Para esta análise, os parâmetros variados entre cada ensaio são os seguintes: corrente de arco, distância de trabalho, espaçamento entre eletrodos e a umidade relativa.

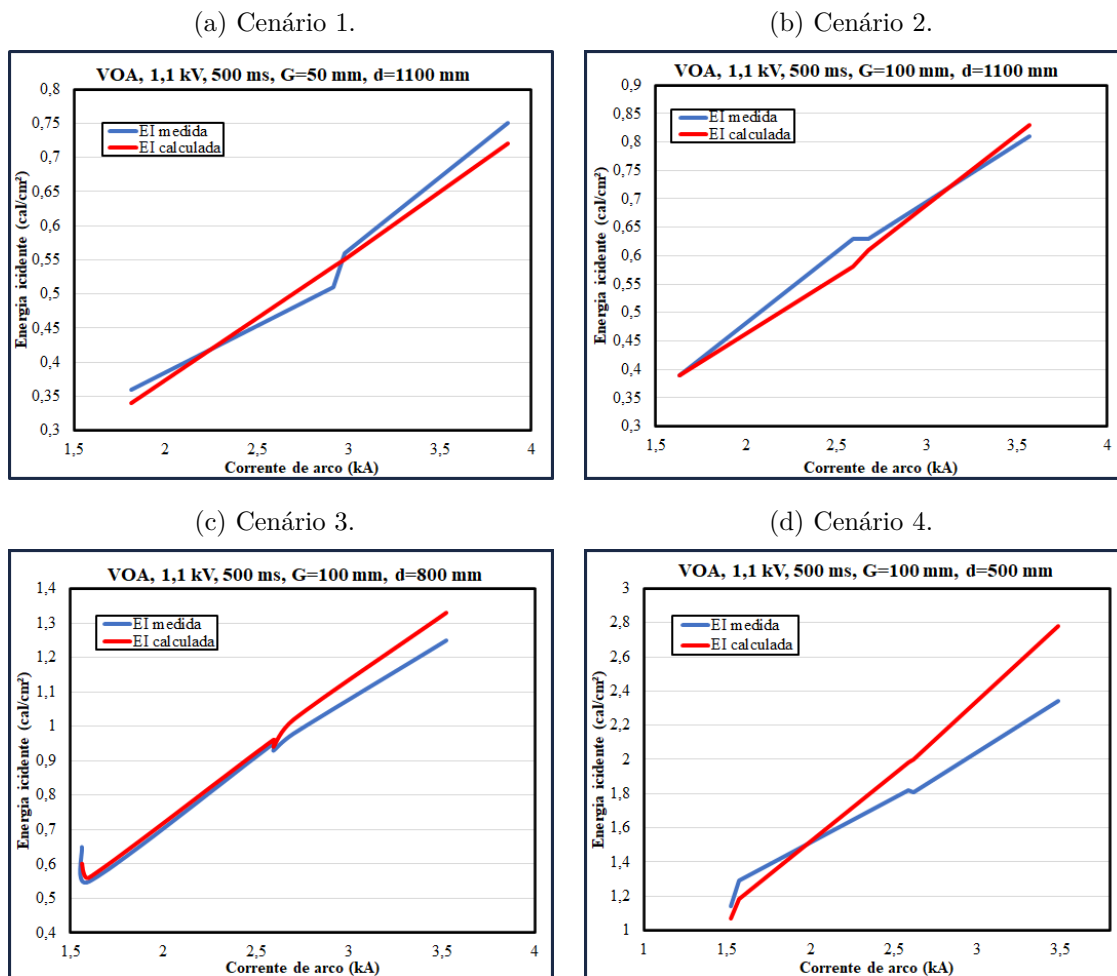
5.2.1 Variação das correntes de arco

A corrente de arco é um dos fatores que mais influenciam na magnitude da energia incidente. Entretanto, também é o parâmetro que mais exige da estrutura física do laboratório, bem como é o responsável pelas AMTs na rede elétrica, devido à exigência requerida do sistema de distribuição para gerar elevadas correntes de curto-circuito. Por este motivo, para conservação do laboratório e também por ainda não ter sido possível verificar os AMTs causados na rede devido aos ensaios realizados, os ensaios compreenderam até o momento apenas três níveis de corrente de arco, com a tensão de 1,1 kV na BT, para a seguinte ligação entre *taps*: H0-H12, H0-H11 e H0-H10. Desta forma, foram realizadas análises comparativas relacionadas ao aumento da EI considerando apenas a variação da corrente de arco entre os ensaios. Os arranjos utilizados, bem como os resultados encontrados, são apresentados pela Figura 5.7.

A partir dos resultados dispostos na Figura 5.7, as seguintes considerações podem ser feitas para cada cenário:

- Cenário 1: as retas referentes à EI medida e a calculada são muito parecidas, indicando que a sua estimativa pela norma IEEE *Std* 1584-2018 e a sua medição apresentam valores muito próximas;

Figura 5.7 – Medição da energia incidente com a variação das correntes de arco.



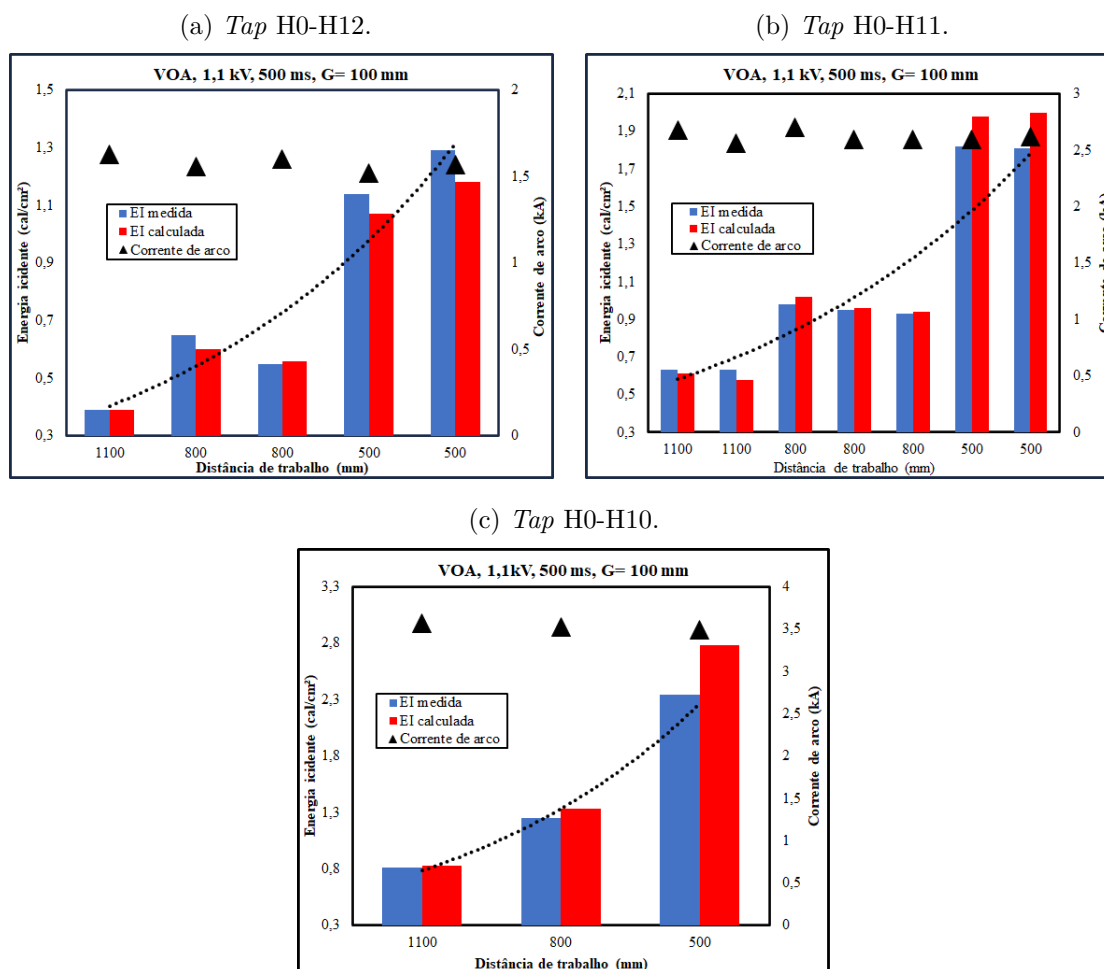
Fonte: Autor.

- Cenário 2: analogamente ao cenário 1, as retas referentes à EI medida e a calculada são muito próximas. Nota-se que com o aumento do espaçamento entre eletrodos em relação ao cenário 1, há um pequeno aumento da EI, apesar de uma leve diminuição na corrente de arco;
- Cenário 3: mesmo com a diminuição da distância de trabalho, o sistema de medição consegue medir valores de EI muito próximos aos dos calculados pela norma. Percebe-se um aumento significativo da EI em relação aos cenários anteriores, em virtude da aproximação dos calorímetros do ponto de ignição do arco elétrico;
- Cenário 4: com os calorímetros ainda mais próximos do arco elétrico em relação ao cenário 3, observam-se EI ainda maiores para os mesmos cenários. As retas já não se sobrepõem tão significativamente como nos cenários anteriores, onde a EI calculada pela norma através da corrente de arco é relativamente maior que a medida.

5.2.2 Alteração da distância de trabalho

Conforme já constatado, a diminuição da distância de trabalho, ou do painel dos calorímetros em relação aos eletrodos, aumenta a EI impressa nestes. Considerando os diversos ensaios apresentados na Tabela 5.8, foi elaborado um gráfico, apresentado na Figura 5.8, onde o único parâmetro modificado entre os ensaios foi a distância de trabalho. O objetivo dessa análise é de observar o aumento da EI a partir da redução da distância de trabalho, e avaliar se o sistema de medição consegue estimar a ΔT nos calorímetros com eles mais próximos dos eletrodos, para serem realizadas as devidas comparações com a EI calculada pela norma IEEE *Std* 1584-2018. Além da redução da distância do painel dos calorímetros para os eletrodos em 300 mm entre os ensaios analisados, também é realizado o avanço da câmera termográfica nesta mesma medida, para ser respeitada a distância de 3,4 metros entre o equipamento e os calorímetros.

Figura 5.8 – Aumento da EI com a redução das distâncias de trabalho.



Fonte: Autor.

Considerando os resultados apresentados pelos gráficos da Figura 5.8, podem ser feitas as seguintes constatações:

- Todas as distâncias de trabalho utilizadas nos ensaios constam no escopo da norma IEEE *Std* 1584-2018, visto que ela é válida para distâncias de trabalho entre 457,2 e 1193,8 mm para tensões de circuito aberto entre 601 V e 15000 V;
- As magnitudes das correntes de arco apresentam uma baixa variação entre ensaios considerando os mesmos *taps*, representadas pelo eixo vertical secundário dos gráficos. Recorda-se que a corrente de arco não se altera com a modificação da distância de trabalho, pois são variáveis independentes (uma não influencia na outra);
- A redução das distâncias de trabalho, para as mesmas correntes de arco, aumentou substancialmente a EI medida nos ensaios. Foi constatado que, por exemplo, para a redução da distância de trabalho de 800 para 500 mm, o aumento da EI é praticamente exponencial;
- O sistema de medição proposto teve resultados mais próximos da norma para ensaios com distâncias de trabalho intermediárias e elevadas (entre 800 e 1100 mm), pois em distâncias menores, é necessário um tempo maior para dissipação dos efeitos inerentes ao arco elétrico, como o gás em altas temperaturas, dos calorímetros. Isso faz, com que medição ótica da temperatura instantânea ΔT nos calorímetros seja prejudicada por um curto período de tempo;
- Apesar dos resultados encontrados pela medição terem respeitado a margem de $\pm 10\%$ de incerteza, mais ensaios devem ser realizados com a redução das distâncias de trabalho nos arranjos, para verificar se o sistema de medição adotado consegue manter a confiabilidade dos resultados para distâncias de trabalho reduzidas.

Considerando os resultados apresentados na Figura 5.8, a Tabela 5.3 compara os valores medidos e calculados da EI considerando as distâncias de trabalho adotadas.

A partir dos dados demonstrados na Tabela 5.3, é constatado que para as distâncias de trabalho entre 1100 e 800 mm, de maneira geral, não são observadas diferenças significativas na medição da energia incidente pelo sistema de medição adotado em relação aos valores calculados pela norma IEEE *Std* 1584-2018, considerando a margem de $\pm 10\%$ de incerteza entre o valor real e o medido para a EI.

Já quando as distâncias de trabalhos são reduzidas para a mínima (500 mm), observam-se diferenças muito próximas, ou que até mesmo ultrapassam, os referidos $\pm 10\%$, devido às questões mencionadas anteriormente. De qualquer maneira, os resultados encontrados são próximos aos calculados, e é de grande interesse a realização de mais estudos nessa área de pesquisa, principalmente através da comparação da medição realizada pela câmera termográfica com a exercida por sensores termopares tipos J ou K associados aos calorímetros.

Tabela 5.3 – Diferença entre a EI medida e a calculada a partir da diminuição da distância de trabalho.

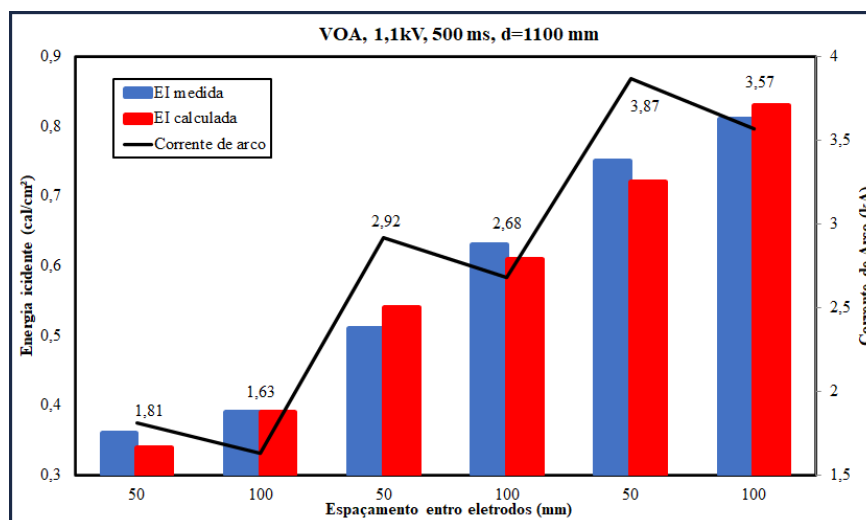
<i>Taps</i>	Tempo (ms)	d (mm)	EI medida (cal/cm ²)	EI estimada (cal/cm ²)	Diferença %
H0-H12	526	1100	0,39	0,39	0,00
H0-H11	486	1100	0,63	0,58	8,62
H0-H11	489	1100	0,63	0,61	3,28
H0-H10	491	1100	0,81	0,83	-2,41
H0-H12	513	800	0,65	0,6	8,33
H0-H12	472	800	0,55	0,56	-1,79
H0-H11	488	800	0,95	0,96	-1,04
H0-H11	474	800	0,93	0,94	-1,06
H0-H11	495	800	0,98	1,02	-3,92
H0-H10	484	800	1,25	1,33	-6,02
H0-H12	489	500	1,14	1,07	6,54
H0-H12	486	500	1,29	1,18	9,32
H0-H11	482	500	1,82	1,98	-8,08
H0-H11	482	500	1,81	2	-9,50
H0-H10	492	500	2,34	2,78	-15,83

Fonte: Autor.

5.2.3 Variação do espaçamento entre eletrodos

Para a análise da influência do espaçamento entre eletrodos nos níveis da I_{arc} e da EI, em alguns ensaios o único parâmetro de entrada alterado foi o espaçamento entre os eletrodos, e assim, foi possível observar às diferenças ocasionadas por este fator. Com base nos resultados encontrados, foi desenvolvido o gráfico apresentado pela Figura 5.9.

Figura 5.9 – Medição da EI com a variação do espaçamento entre eletrodos.



Fonte: Autor.

A diferença dos tempos de arco entre os ensaios foram muito pequenas, e desprezadas na apresentação destes resultados. É constatado na Figura 5.9, que um maior

espaçamento entre eletrodos aumenta a EI enquanto reduz o valor da I_{arc} , situação mencionada anteriormente e que não trivial, visto que, a EI é proporcional à I_{arc} . Ocorre que, apesar da conseqüente redução da I_{arc} devido o aumento da R_{arc} promovida pelo maior espaçamento entre eletrodos, também ocorre um aumento considerável na área impressa de energia térmica liberada pelo arco elétrico, o que nos conjuntos de ensaios abordados neste trabalho, promoveu um aumento da EI, apesar da redução da I_{arc} . Esta relação também é descrita na Tabela 5.4, para os mesmos parâmetros considerados na Figura 5.9.

Tabela 5.4 – Influência do aumento do espaçamento entre eletrodos nas correntes de arco e na EI.

Gap (mm)		Corrente de arco (kA)					
50		1,81		2,98		3,87	
100		1,63		2,68		3,57	
Redução %		9,94		10,07		7,75	
Gap (mm)		Energia incidente (cal/cm ²)					
	Medição	IEEE 1584	Medição	IEEE 1584	Medição	IEEE 1584	
50		0,36	0,34	0,56	0,55	0,75	0,72
100		0,39	0,39	0,63	0,61	0,81	0,83
Aumento %		8,33	14,71	12,5	10,91	8	10,6

Fonte: Autor.

A partir da análise dos dados demonstrados na Tabela 5.4, é constatado que a corrente de arco cai em torno de 10% com o aumento do espaçamento entre eletrodos de 50 para 100 mm. Esta queda da I_{arc} tende a ser mais acentuada com a adoção de maiores espaçamentos, sendo o oposto igualmente válido. Além disso, é verificado que o acréscimo no espaçamento entre eletrodos teve uma maior influência sobre o aumento da EI que no decaimento da I_{arc} decorrente dele, ou seja, o aumento do espaçamento imprimiu uma EI maior aos calorímetros, também na faixa dos 10%. É importante destacar, que essa relação não é trivial, pois na hipótese de adoção de espaçamentos maiores entre eletrodos, é possível que a redução no valor da I_{arc} seja tão elevado devido ao aumento da R_{arc} que, mesmo com o aumento do espaçamento entre eletrodos, a EI seja menor.

Convém lembrar, que arcos elétricos com grandes espaçamentos entre condutores são mais difíceis de ocorrerem, visto que, a rigidez dielétrica do ar é maior, e o rompimento desta em laboratório é forçada através de um condutor de sacrifício. Porém, caso se originem por erros operacionais ou causas naturais, mesmo com grandes espaçamentos entre condutores, os arcos elétricos podem oferecer elevados riscos a indivíduos próximos.

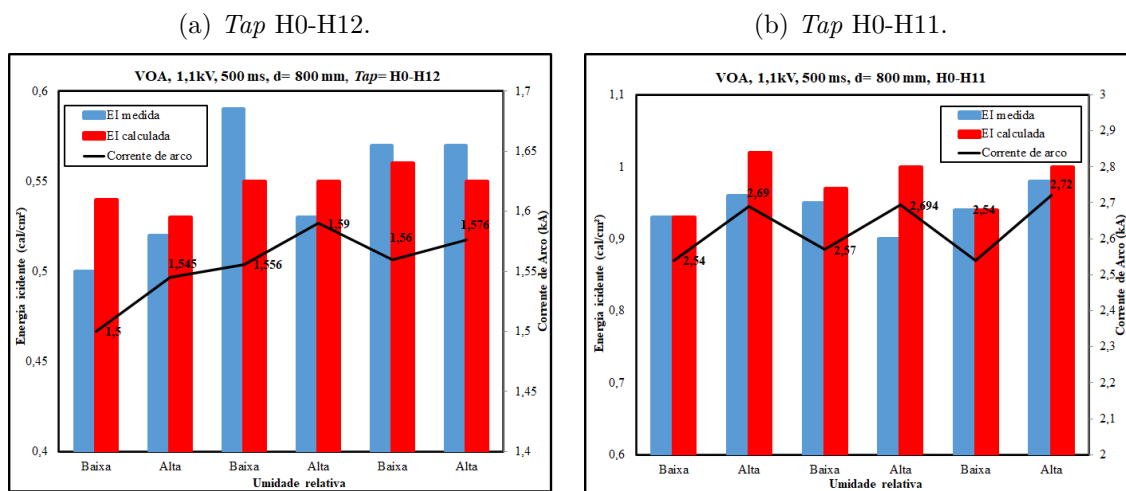
5.2.4 ANÁLISE DA INCLUSÃO DO FATOR DE UMIDADE RELATIVA

Com relação aos ensaios realizados para avaliar as influências da umidade relativa, foram considerados os ensaios que empregaram uma distância de trabalho de 800 mm e as correntes de arco referentes aos *taps* H0-H12 e H0-H11. Os valores de UR considerados

foram de 55% como umidade baixa e 90% como umidade alta, onde o erro percentual do termo-higrômetro utilizado para esta medição é de $\pm 5\%$.

Até a conclusão deste trabalho, não foi possível chegar a implicações significativas quanto à interferência da UR no valor da EI, devido à baixa quantidade de ensaios realizadas. As baterias de ensaios efetuadas com parâmetros de entrada idênticos, alterando-se apenas a UR, compreenderam o conjunto de ensaios entre os números 27 e 38, considerando o sumário de ensaios apresentado pela Tabela 5.8. O aumento da I_{arc} em relação à alteração da UR, bem como as variações da EI, considerando o conjunto de ensaios mencionados, são apresentados pela Figura 5.10.

Figura 5.10 – Medição da energia incidente com a variação da umidade relativa.



Fonte: Autor.

A Figura 5.10 indica que não ocorreram variações significativas da I_{arc} a partir do aumento da umidade relativa, onde nos ensaios realizados, estas variaram entre 2% a 5%, e como se tratam de valores de correntes de altas magnitudes e de um evento de alta complexidade, outras razões podem ter levado a estas variações.

Em relação à diferença causada na EI devido os ensaios com aumento da UR, não foram observadas grandes mudanças em sua amplitude na comparação entre ensaios com UR baixa e alta, onde as variações observadas podem ser explicadas pelo pequeno aumento da I_{arc} nos ensaios com maior UR. Além disso, os valores da EI encontrados a partir da variação da UR como parâmetro principal se encontram na margem de incerteza da medição da EI com relação à calculada de $\pm 10\%$, fornecendo um resultado inconclusivo até o momento sobre a influência da UR.

Além disso, é desconhecido se o aumento artificial de umidade através da condensação de água (névoa) pelo climatizador industrial influencia negativamente na medição da EI por parte dos calorímetros. Há a possibilidade, apesar disso de não ter sido verificado na prática, que pequenas gotículas de água possam se acumular na superfície do disco de cobre do dispositivo, o que poderia influenciar em sua transferência e absorção

de energia térmica. Apesar disso, após os primeiros ensaios, os calorímetros passaram a ser retirados da câmara de ensaios durante as alterações da UR, para mitigar qualquer eventual prejuízo que este processo possa causar ao sistema de medição de temperatura.

É válido ressaltar, que apesar de até o momento não ter sido possível obter conclusões acerca no efeito da UR na EI, uma abordagem desse fator relacionada a sua influência no grau de proteção de EPIs é bastante interessante, tanto em situações de trabalho em condições de alta umidade como em cenários onde os EPIs estão úmidos ou encharcados por quaisquer razões.

5.3 ENSAIOS DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO FRANCO

No modelo matemático da norma IEEE *Std* 1584-2018, um dos parâmetros essenciais para a estimação da EI e da AFB é a corrente de curto-circuito trifásico franco (I_{bf}). Para comparar as medições da EI nos ensaios laboratório com as estimadas pelo modelo matemático da norma, neste trabalho foram utilizadas diretamente as correntes de arco obtidas das oscilografias. Entretanto, posteriormente, foram realizados ensaios de curtos-circuitos, através da interligação dos condutores de curto-circuito que partem da BT do transformador em direção aos eletrodos em um ponto comum e da promoção de um curto-circuito trifásico, para medir os valores de I_{bf} gerados no laboratório e compará-los com os valores previamente estimados no projeto do local. Através destes ensaios, foram encontrados os valores descritos pela Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de curto-circuito trifásico franco realizados.

Ensaio	TAPs	V_{oc} (kV)	Tempo real (ms)	I_{bf} (kA)
1	H0-H12	1,1	189	2,04
2	H0-H12	1,1	488	2,02
3	H0-H12	1,1	492	2,02
4	H0-H11	1,1	481	3,3
5	H0-H11	1,1	494	3,28
6	H0-H10	1,1	190	4,37
7	H0-H10	1,1	192	4,33
8	H0-H10	1,1	484	4,24
9	H0-H10	1,1	482	4,39

Fonte: Autor.

A partir dos valores de I_{bf} apresentados na Tabela 5.5, e considerando a utilização dos mesmos *taps* nos reatores, é possível estimar o valor percentual de I_{arc} em relação à I_{bf} , e a partir disso, modelar a influência da resistência de arco na I_{arc} . A estimação da R_{arc} não é abordada neste trabalho, todavia, a relação entre a I_{bf} e a I_{arc} pode ser um parâmetro importante para modelagem em trabalhos futuros. Além disso, fica subentendido da norma IEEE *Std* 1584-2018 uma estimativa de que para sistemas trifásicos de até

1 kV, valor de tensão próximo ao praticado no laboratório, as magnitudes das correntes de arco são cerca 70% à 95% da corrente de curto-circuito trifásico franco, a depender de outros fatores, como a disposição e o espaçamento dos eletrodos. A Tabela 5.6 apresenta a relação percentual encontrada entre I_{arc} e I_{bf} através dos ensaios.

Tabela 5.6 – Valores percentuais de I_{arc} em relação à I_{bf} encontrados.

Configuração	Taps	Gap (mm)	I_{arc} (kA)	I_{bf} (kA)	$\frac{I_{arc}}{I_{bf}} \times 100\%$
HOA	H0-H12	100	1,57	2,03	77,34
VOA	H0-H12	50	1,81	2,03	89,16
VOA	H0-H12	100	1,57	2,03	77,34
VOA	H0-H11	50	2,92	3,29	88,75
VOA	H0-H11	100	2,63	3,29	79,94
VOA	H0-H10	50	3,93	4,34	90,55
VOA	H0-H10	100	3,56	4,34	82,03

Fonte: Autor.

Pode ser constatado na Tabela 5.5 que os valores percentuais de I_{arc} em relação à I_{bf} encontrados ficaram na margem subentendida pela norma IEEE Std 1584-2018 para tensões de até 1 kV, entretanto, mais ensaios relacionadas ao aumento do espaçamento entre eletrodos devem ser realizados para ser averiguado até que ponto essa relação é verdadeira. Além disso, através dos dados contidos nas Tabelas 3.10 e 5.5, pode ser avaliada a relação percentual das I_{bf} consideradas no projeto do laboratório e das medidas através dos ensaios de curto-circuito trifásico franco, conforme demonstrado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Relação da I_{bf} estimada com a I_{bf} medida nos ensaios de curto-circuito do laboratório.

Taps	I_{bf} estimada (kA)	I_{bf} medida (kA)	$\frac{I_{bf_estimada}}{I_{bf_medida}} \times 100\%$
H0-H12	1,59	2,03	78,33
H0-H11	2,84	3,29	86,32
H0-H10	3,77	4,34	86,87

Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.7, é constatado que a I_{bf} medida nos ensaios de curtos-circuitos trifásicos foi significativamente maior do que as projetadas inicialmente para o laboratório nas ligações entre os taps H0-H12, H0-H11 e H0-H10, com valores 440, 450 e 570 A maiores, respectivamente. Apesar disso, esse aumento foi em torno de 10% a 20% do valor de curto-circuito total, o que para um projeto dessa magnitude, onde muitas incertezas são consideradas, pode ser considerado aceitável, pois, conforme mencionado anteriormente, as impedâncias do sistema que alimenta o laboratório e influenciam diretamente na magnitude da I_{bf} não são totalmente conhecidas, o que prejudicou um dimensionamento mais precisos da I_{bf} esperada.

5.4 SUMÁRIO

Esta seção apresentou detalhadamente os resultados obtidos através de dois ensaios de arcos elétricos realizados em ambiente aberto conforme os padrões da norma IEEE *Std* 1584-2018, um na configuração HOA e outro na configuração VOA. Foi constatado que os valores da EI mensuradas pelo sistema de medição e calculados pelo modelo matemático da referida norma foram compatíveis para os ensaios realizados, validando os resultados.

Além disso, também foram comparados resultados de ensaios a partir da modificação de I_{arc} , mantendo-se os demais parâmetros de ensaio constantes, e posteriormente, a partir da alteração de dois parâmetros espaciais de entrada para os mesmos valores de I_{arc} : espaçamento entre eletrodos e distância de trabalho. Os resultados encontrados mostraram que os valores medidos da EI foram condizentes com os calculados para os três casos, e que a modificação destes parâmetros alterou consideravelmente os valores da EI, principalmente a redução da distância de trabalho.

Adicionalmente, esta seção abordou brevemente ensaios de arcos elétricos em diferentes condições de umidade relativa, porém, reitera-se que há a necessidade da realização de uma quantidade muito maior de ensaios, além de estudos mais aprofundados no tema, para chegar à conclusão da existência, ou não, de alguma relação causal entre a umidade relativa e a magnitude da EI, apesar de terem sido observados pequenos aumentos da I_{arc} em ensaios onde a UR foi aumentada.

Ademais, além dos ensaios promovidos para medição da EI proveniente dos arcos elétricos, também foram efetuados ensaios para medir as correntes de curto-circuito trifásico franco empregadas até o momento no laboratório. Foi observado, que para os níveis de curto-circuito ensaiados até o momento, as I_{bf} medidas foram em torno de 10% a 20% maiores que as inicialmente projetadas para o laboratório, e que, os valores encontrados de I_{arc} até o momento se mantiveram na margem de 70% a 95% do valor total da I_{bf} , condição subentendida no guia IEEE *Std* 1584-2018.

O sumário dos ensaios realizados no laboratório e seus respectivos resultados, até a conclusão deste trabalho, é apresentado na Tabela 5.8. Considerou-se que não há a necessidade de detalhar todos os ensaios realizados em um nível analítico, visto que poucas questões foram modificadas entre eles até o momento, pois, o laboratório ainda está em fase de melhorias estruturais e pontuais, para ser possível aumentar a frequência de realização de ensaios e, conseqüentemente, mais conclusões possam ser obtidas.

Tabela 5.8 – Sumário dos ensaios de arcos elétricos realizados no laboratório.

													(continua)
N° Ensaio	Config.	V_{oc} (kV)	Lig. <i>Taps</i>	I_{arc} medida (kA)	Tempo (ms) (RL+DJ)	G (mm)	d (mm)	T_{amb} °C	RH %	EI medida cal/cm ²	EI estimada cal/cm ²	Diferença %	
1	HOA	1,1	H0-H12	1,57	535	100	1100	-	-	0,9	0,94	-4,26	
2	VOA	1,1	H0-H12	1,81	520	50	1100	14,2	71	0,36	0,34	5,88	
3	VOA	1,1	H0-H11	2,92	492	50	1100	17	56	0,51	0,54	-5,56	
4	VOA	1,1	H0-H11	3,88	196	50	1100	11,5	61	0,31	0,29	6,90	
5	VOA	1,1	H0-H10	3,87	490	50	1100	11,8	61	0,75	0,72	4,17	
6	VOA	1,1	H0-H10	3,96	185	50	1100	16,5	89	0,31	0,28	10,71	
7	VOA	1,1	H0-H11	2,98	494	50	1100	16,7	87	0,56	0,55	1,82	
8	VOA	1,1	H0-H11	2,92	486	50	1100	14,7	84	-	0,53	-	
9	VOA	1,1	H0-H10	3,87	193	50	1100	14,7	84	-	0,28	-	
10	VOA	1,1	H0-H12	1,63	526	100	1100	16,2	59	0,39	0,39	0	
11	VOA	1,1	H0-H10	3,67	171	100	915	14,4	64	0,48	0,4	20	
12	VOA	1,1	H0-H11	2,68	489	100	1100	14,5	61	0,63	0,61	3,28	
13	VOA	1,1	H0-H12	1,56	513	100	800	22,3	75	0,65	0,6	8,33	
14	VOA	1,1	H0-H11	2,70	495	100	800	22,3	75	0,98	1,02	-3,92	
15	VOA	1,1	H0-H10	3,56	174	100	915	22,4	72	0,38	0,39	-2,56	
16	VOA	1,1	H0-H10	3,57	491	100	1100	16,6	76	0,81	0,83	-2,41	
17	VOA	1,1	H0-H11	2,59	488	100	800	16,6	76	0,95	0,96	-1,04	
18	VOA	1,1	H0-H11	2,59	474	100	800	17,7	74	0,93	0,94	-1,06	
19	VOA	1,1	H0-H12	1,6	472	100	800	17,7	74	0,55	0,56	-1,79	
20	VOA	1,1	H0-H10	3,52	484	100	800	23,6	74	1,25	1,33	-6,02	
21	VOA	1,1	H0-H10	3,49	492	100	500	23,6	74	2,34	2,78	-15,83	
22	VOA	1,1	H0-H11	2,62	482	100	500	23,6	74	1,81	2	-9,50	
23	VOA	1,1	H0-H11	2,59	482	100	500	25	71	1,82	1,98	-8,08	
24	VOA	1,1	H0-H11	2,58	486	100	1100	25	71	0,63	0,58	8,62	
25	VOA	1,1	H0-H12	1,57	486	100	500	25	71	1,29	1,18	9,32	
26	VOA	1,1	H0-H12	1,52	489	100	500	25	71	1,14	1,07	6,54	

Tabela 5.5 - Sumário dos ensaios de arcos elétricos realizados no laboratório.

N° Ensaio	Config.	V_{oc} (kV)	Lig. <i>Taps</i>	I_{arc} medida (kA)	Tempo (ms) (RL+DJ)	G (mm)	d (mm)	T_{amb} °C	RH %	EI medida cal/cm ²	EI estimada cal/cm ²	(conclusão)
												Diferença %
27	VOA	1,1	H0-H11	2,54	481	100	800	16,2	91	0,93	0,93	0,00
28	VOA	1,1	H0-H11	2,57	494	100	800	16,2	91	0,95	0,97	-2,06
29	VOA	1,1	H0-H11	2,54	484	100	800	16,3	92	0,94	0,94	0,00
30	VOA	1,1	H0-H12	1,55	473	100	800	16,3	92	0,52	0,53	-1,89
31	VOA	1,1	H0-H12	1,59	474	100	800	16,3	91	0,53	0,55	-3,64
32	VOA	1,1	H0-H12	1,58	478	100	800	16,3	91	0,57	0,55	3,64
33	VOA	1,1	H0-H12	1,5	491	100	800	22,5	55	0,5	0,54	-7,41
34	VOA	1,1	H0-H12	1,56	485	100	800	22,5	55	0,59	0,55	7,27
35	VOA	1,1	H0-H12	1,56	493	100	800	19	56	0,57	0,56	1,79
36	VOA	1,1	H0-H11	2,69	496	100	800	19	56	0,96	1,02	-5,88
37	VOA	1,1	H0-H11	2,69	484	100	800	18,2	57	0,9	1	-10,00
38	VOA	1,1	H0-H11	2,72	483	100	800	18,2	57	0,98	1	-2,00
39	VOA	1,1	H0-H11	2,68	483	100	800	16,9	66	0,98	1	-2

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a concepção, as questões técnicas, construtivas e os procedimentos operacionais do laboratório de arcos elétricos (INRI-AF) da UFSM, bem como alguns resultados obtidos neste até o momento da conclusão deste trabalho. As considerações e proposições realizadas tiveram como base os principais trabalhos e normativas encontradas na literatura relacionada ao assunto.

Como fruto deste trabalho, são consideradas tão ou mais importante que os resultados encontrados a partir dos ensaios, as questões abordadas nos Capítulos 3 e 4, envolvendo alguns dos equipamentos necessários para a implementação de um laboratório de curto-circuito e os procedimentos a serem seguidos em sua operação. Esta categoria de material não é encontrada na literatura difundidamente, e espera-se com este trabalho, contribuir com o surgimento de mais laboratórios relacionados ao estudo dos arcos elétricos e da energia incidente, para que novas pesquisas derivadas destes possam contribuir para melhorias na compreensão do fenômeno e na segurança e conforto dos trabalhadores.

Foram apresentadas as funções contextuais de cada um dos equipamentos utilizados no laboratório, além da descrição das principais especificações e motivações que levaram as suas escolhas. Através dos fluxogramas apresentados pelas Figuras 3.24 e 4.11, buscou-se sintetizar a estrutura e o funcionamento do laboratório de maneira sucinta e objetiva, onde os fluxogramas interagem entre si e constituem o processo estrutural e operacional completo do laboratório.

Além disso, o trabalho apresentou em seu Capítulo 4 a metodologia associada à aquisição dos dados relacionados às medições das correntes de arco pelo conjunto de TCs e relés, e da energia incidente, por meio dos calorímetros e da câmera termográfica presentes no laboratório. Destaca-se que os *softwares* implementados em MATLAB[®] para o tratamento dos dados das correntes de arco adquiridos das oscilografias e da gravação termográfica foram desenvolvidos conjuntamente pelo grupo de trabalho do laboratório.

Conforme mencionado nos Capítulos 4 e 5, o laboratório consegue gerar curtos-circuitos capazes de produzir arcos elétricos e medir sua conseqüente energia incidente através da estrutura implementada e dos equipamentos descritos. Dessa forma, foram realizados ensaios de arcos elétricos compreendidos no escopo do modelo matemático da maior referência normativa existente neste quesito, a IEEE *Std* 1584-2018, e os resultados encontrados permitiram concluir que além de gerar o arco elétrico, o laboratório consegue medir a energia incidente através de seu sistema de medição de forma que os resultados encontrados são análogos aos estimados através do modelo matemático da norma.

Há a percepção que ainda existem muitas questões relacionadas ao assunto a serem exploradas e respondidas através das potencialidades do laboratório, dentre elas, análises mais detalhadas do comportamento dos arcos elétricos considerando questões ambientais e climáticas diversificadas, além de pesquisas relacionadas aos EPIs, condições operacionais de redes de distribuição e estudos mais aprofundados acerca das metodologias existentes de medição da EI. Todavia, no que compete ao escopo deste trabalho, considera-se que os objetivos previamente traçados foram alcançados através do cumprimento das questões propostas, deixando brechas para futuras pesquisas relacionados ao tema.

6.2 DIFICULDADES ENFRENTADAS

As maiores contribuições deste trabalho são relacionadas à explanação dos principais requisitos necessários para a construção de um laboratório de arcos elétricos e os procedimentos que devem ser seguidos para a sua operação segura. Devido a esta categoria de laboratório ser incomum e de difícil implementação, não são encontradas muitas referências na literatura que sirvam de instrução para facilitar o projeto e construção de laboratórios de ensaios de arcos elétricos para a medição da energia incidente.

Além disso, infelizmente, ocorreram diversas adversidades na construção e finalização do laboratório, que foi concluído com cerca de seis meses de atraso, diminuindo potencialmente o número total de ensaios e situações de arcos elétricos promovidos até a conclusão deste trabalho. Dentre os principais motivos para isso, se destacam as questões relacionadas as readequações do projeto original e também o atraso em sua concepção devido à pandemia da COVID-19, que afetou drasticamente o mundo entre 2020 e 2021.

6.3 PUBLICAÇÕES VINCULADAS

O estudo desenvolvido durante o período de elaboração desta dissertação permitiu a publicação dos seguintes artigos em congressos científicos:

BACIN, P. O. et al. Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente. **IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, Santa Maria, Brasil, 2022, pp. 1-8.

BACIN, P. O. et al. Ensaio de Arco Elétrico para Determinação da Energia Incidente Conforme a Norma IEEE *Std* 1584-2018. **XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA)**, Fortaleza, Brasil, 2022, pp. 1-8.

6.4 SUGESTÕES DE MELHORIAS PARA O LABORATÓRIO

Como futuras melhorias para o laboratório, o autor sugere:

- Aquisição de uma janela de inspeção de fluoreto de cálcio (CaF₂) da marca FLIR, para possibilitar ensaios na configuração HOA utilizando a câmera termográfica;
- Aquisição de relés de proteção mais modernos com a função 87 (proteção diferencial) e oscilogramas com uma maior taxa de amostragem;
- Aquisição de manequins para ensaios de arcos elétricos em EPIs, além da montagem dos arranjos existentes nas referências normativas para tais ensaios;
- Automação do controle das condições ambientais da câmara de ensaios;
- Confecção de um invólucro metálico personalizado, para efetuar ensaios com eletrodos em ambiente fechado e emular situações de arcos elétricos em cubículos;
- Criação de um plano de inspeção dos equipamentos do laboratório, para avaliar possíveis desgastes destes conforme mais ensaios forem sendo realizados;
- Implementação de um sistema de ignição de arco elétrico mais refinado, considerando o ângulo de acionamento senoidal na ignição e chaves síncronas.

6.5 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros relacionadas ao laboratório e ao tema deste trabalho, o autor sugere:

- Aprofundamento e continuação da investigação das influências de condições ambientais como chuva, temperatura, umidade, salinidade, entre outros, nos arcos elétricos;
- Comparação da medição da energia incidente nos calorímetros através de sensores termopares e da câmera termográfica;
- Efetuar estudos relacionados a outras categorias de arcos elétricos, como os originados por curtos-circuitos monofásicos e bifásicos;
- Proceder ensaios nas diferentes configurações de *taps* disponíveis, bem como com a tensão de 635 V na BT, respeitando as limitações do laboratório;
- Proceder estudos relacionados a queimaduras de segundo grau no corpo humano causadas por arcos elétricos, a partir de manequins e peles artificiais;

- Promover ensaios com configurações de eletrodos diferentes das adotadas pela norma IEEE Std 1584-2018, considerando inclusive, situações operacionais de ocorrências de arcos elétricos em MT, como aberturas de chaves fusíveis;
- Realizar estudos e ensaios relacionados ao grau de proteção de EPIs quanto a diferentes magnitudes de arcos elétricos, e discutir formas de aprimorar o dimensionamento destes, para maior conforto e segurança no trabalho com eletricidade.

REFERÊNCIAS

- ABB. **Protection against electric arc Integration between Arc Guard System™ (TVOC-2) and Emax air-circuit breakers**. Bergamo, 2011. 24 p.
- ABNT. **NBR 15688 - Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus**. 2012. 158 p.
- _____. **ABNT NBR 16384:2020 Segurança em eletricidade - Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020. 56 p. Disponível em: <www.abnt.org.br>.
- ABRACOPEL. **Anuário Estatístico Brasileiro dos Acidentes de Origem Elétrica-2021**. 2021. 88 p. Disponível em: <<http://mkt.abracopel.org.br/w/1e1ueXjpe5ulFzWj3RSledcb-3b-beluid?egu=uar31zdpicyltxbe>>.
- AKDAG, A. et al. Effects of main transformer replacement on the performance of an electric arc furnace system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 2, p. 649–658, 2000. ISSN 00939994.
- AMMERMAN, R. F.; SEN, P. K.; NELSON, J. P. Electrical arcing phenomena: A historical perspective and comparative study of the standards IEEE 1584 and NFPA 70E. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 15, n. 3, p. 42–52, 2007. ISSN 10772618.
- _____. Comparative Study of Arc Modeling and Arc Flash Incident Energy Exposures. **Record of Conference Papers - Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**, 2008. ISSN 00903507.
- ANDERS, A. Tracking down the origin of arc plasma science-II. Early continuous discharges. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 31, n. 5 II, p. 1060–1069, 2003. ISSN 00933813.
- ANEEL. **Prodlist Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica**. Brasília: Resolução Normativa ANEEL 956/2021, 2021. 69 p. Disponível em: <<https://antigo.aneel.gov.br/modulo-8>>.
- ASTM. **Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing**. West Conshohocken: [s.n.], 2014. i. 1–15 p.
- AYELLO, F. P. et al. Influência do Sistema de Proteção na Qualidade da Energia. In: USP (Ed.). **III CONLADIS - Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo: [s.n.], 1999.
- BACIN, P. O. et al. Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente. In: **IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. Santa Maria: [s.n.], 2022. p. 8.

BALESTRO. **Para raios de óxido de Zinco Polimérico (Silicone)**. Mogi Mirim: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://balestro.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Para-raios-Oxido-Zinco-Polim-silicone-PBP.pdf>>.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying: Principles and Applications**. 3. ed. New York: [s.n.], 2006. 638 p. ISSN 1540-7977. ISBN 9781574447163.

BOTTARO, M.; EICHINGER, H. Uncertainties in the Heat Energy calculation process and influences on determination of arc thermal performance value (ATPV) of heat- and flame-resistant materials tests. **Elsevier Measurement**, v. 123, p. 275–284, 2018.

BRASIL. **NR 06: Equipamento de Proteção Individual (EPI)**. Brasília: Ministério do Trabalho e do Emprego, 1978. 11 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-06.pdf>>.

_____. **NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Brasília: Portaria MTE n.º 598, de 07 de dezembro de 2004, 1978. 18 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf/view>>.

CAMISASSA, M. Q. **Segurança e saúde no trabalho: NRs 1 a 36 comentadas e descomplicadas**. 5. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2015. 909 p. ISBN 978-85-309-5933-3.

CAMPBELL, R. B.; DINI, D. A. **Occupational Injuries From Electrical Shock and Arc Flash Events**. Quincy, 2015. 81 p. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Electrical/RFArcFlashOccData.ashx?la=en>>.

CAMPONOGARA, M. **Análise de Energia Incidente em Redes de Distribuição: Estimação, Estratégias de Mitigação e Medidas de Proteção**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria: [s.n.], 2021. 121 p.

CANO, E. A. et al. Electric Arc Furnace Model in Distribution Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 51, n. 5, p. 4313–4320, 2015.

COOPER BUSSMANN. **Electrical safety**. Houston, 2005. 116–126 p. Disponível em: <https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Electrical_Safety_and_Arc_Flash_Protection.pdf>.

CUNDEVA, S.; DIGALOVSKI, M. Calculation of electric arc furnace secondary circuit: analytical and numerical approach. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 92, n. 12, p. 21–24, 2016. ISSN 00332097.

DAS, J. C. **Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation**. 2nd. ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2021. 629 p. ISBN 9781118163818.

DOUGHTY, R. L. et al. Testing Update on Protective Clothing and Equipment for Electric Arc Exposure. **Copyright Material IEEE Paper No. PCIC-97-35**, p. 14, 1997.

DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, L. Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 257–279, 2000. ISSN 00939994.

DUGDALE, P. N. **Arc Flash Protection of a Low Voltage Motor Control Centre**. [S.l.], 2014. 214 p.

DUPONT. **Nomex 410**. [S.l.], 2016. 1–8 p. Disponível em: <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/electronic-electrical-materials/assets/DPT16_21668_Nomex_410_Tech_Data_Sheet_me03_REFERENCE.pdf>.

FLIR. **FLIR A6750sc**. Nashua, 2015. 2 p. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/products/Flir-A6750sc-8679312.html>>.

GAUNCE, A. C. **Predictive Modeling of DC Arc Flash in 125 Volt System**. Dissertação (Mestrado) - University of Kentucky, Lexington, 2019. Disponível em: <https://uknowledge.uky.edu/mng_etds/46%0AThis>.

GHAVAMI, Y.; MOBAYEN, M. R.; VAGHARDOOST, R. Electrical burn injury: A five-year survey of 682 patients. **Trauma Monthly**, v. 19, n. 4, p. 29–33, 2014. ISSN 22517472.

GOLOVKOV, M. et al. Effect of arc electrode geometry and distance on cotton shirt ignition. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 1, p. 36–44, 2015. ISSN 00939994.

GOODMAN, M. Methods of Inspection to Determine the Presence of Potential Arc-Flash Incidents. **Neta World**, Spring, p. 5, 2007.

GOOGLE. **Google Earth**. Mountain View: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/>>.

HERBST. **Arc Flash PPE Categories from NFPA 70E (2015)**. 2015. Disponível em: <[https://www.herbstelectric.com/pdfs/QRG_Arc-Flash-PPE\(arcppe\)\(1\).pdf](https://www.herbstelectric.com/pdfs/QRG_Arc-Flash-PPE(arcppe)(1).pdf)>.

HOAGLAND, H. Arc-flash PPE research update. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 3, p. 1177–1187, 2013. ISSN 00939994.

HUGHES, B. et al. High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System. In: **38th Annual Western Protective Relay Conference Spokane**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–9.

HUSSAIN, G. A. **Methods for Arc-Flash Prediction in Medium Voltage and Low Voltage Switchgear**. Tese (Doutorado) — Aalto University, 2015.

IEC. **IEC 61482-1-1: Live Working – Protective Clothing Against the Thermal Hazards of an Electric Arc**. Geneva: [s.n.], 2019. 140 p.

IEEE; NFPA. **Arc Flash Phenomena: Collaborative Research Project**. [S.l.], 2005. 6 p. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/products-services/arcflash/index.html>>.

IEEE STD 1584. **IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations**. 2nd. ed. Nova Iorque: IEEE Press, 2002. 108 p. ISSN 0018-9235. ISBN 0738133515.

_____. _____. Nova Iorque: IEEE Press, 2018. 122 p. ISBN 978-1-5044-5262-5. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/standard/1584-2018.html>>.

INTELBRAS. **Câmera VIP 550 D Z IA**. São José, 2020. 4 p. Disponível em: <<https://backend.intelbras.com/sites/default/files/2021-11/VIP5550ZIA-Datasheet.pdf>>.

ISOLET. **Transformador de Corrente BDE 2700A**. Itu: [s.n.], 2021. Disponível em: <<http://isolet.com.br/site/wp-content/uploads/2020/01/BDE-2700D-1.pdf>>.

_____. **Transformador de Potencial BDE FF9A**. Itu: [s.n.], 2021. Disponível em: <<http://isolet.com.br/site/wp-content/uploads/2020/01/BDE-ff9.pdf>>.

JACCARD, L. R. Operation of The ELeCtric Arc Furnace - With Examples. In: **18^a Steelmaking Conference**. Santa Fe: [s.n.], 2011. p. 25.

JOHNSON, J.; BOWER, W.; QUINTANA, M. Electrical and thermal finite element modeling of arc faults in photovoltaic bypass diodes. **World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen**, v. 3, n. June 2015, p. 2059–2066, 2012.

JONES, R. A. et al. Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 2, p. 659–667, 2000. ISSN 00939994.

KAUFMANN, R. H.; PAGE, J. C. Arcing Fault Protection for Low-Voltage Power Distribution Systems- Nature of the Problem. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, v. 79, p. 160–165, 1960. ISSN 00972460.

LANG, M.; JONES, K. Exposed to the arc flash hazard. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 51, n. 1, p. 51–61, 2015. ISSN 00939994.

LANG, M.; NEAL, T.; WILKINS, R. Introduction to arc flash. **8th International Conference on Electric Fuses and their Applications, ICEFA**, p. 179–184, 2007.

LASICA, A. et al. Laboratory tests of face shields protecting against the thermal effects of electric arc. **2017 Progress in Applied Electrical Engineering, PAEE 2017**, p. 0–4, 2017.

LEE, R. H. The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IA-18, n. 3, p. 246–251, 1982. ISSN 19399367.

_____. Pressures developed by arcs. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IA-23, n. 4, p. 760–763, 1987. ISSN 19399367.

LEE, W.-j.; GAMMON, T. IEEE/NFPA Arc Flash Phenomena Collaborative Research Project. In: . [S.l.: s.n.], 2011. p. 54.

LOURO, M. **O sistema de protecções na perspectiva da segurança de pessoas em redes de MT**. [S.l.], 2008. 105 p.

MARCHESAN, A. P. G. **Projeto de um Conjunto de Calorímetros Utilizando uma Câmera Termográfica para Determinação da Energia Incidente de Arcos Elétricos**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022. 70 p.

NEAL, T. E.; BINGHAM, A. H.; DOUGHTY, R. L. Protective clothing guidelines for electric arc exposure. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 4, p. 1041–1054, 1996. ISSN 00939994.

NFPA. **Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E)**. 2021. ed. Quincy: National Fire Protection Association, 2021. 120 p.

NIST. **Solid Phase Heat Capacity: Copper**. Gaithersburg: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/cgi/inchi?ID=C7440508&Type=JANAFS&Plot=on#JANAFS>>.

OLIVEIRA, F. D. D. **Monitoramento e Análise de Afundamentos Momentâneos de Tensão**. DiSSERTAÇÃO (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. 107 p.

OSHA 1910.269. **Protection From Flames and Electric Arcs: Appendix E**. Washington: [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.269AppE>>.

PEACH, N. Protect low-voltage systems from arcing-fault damage. **Power**, v. 108, p. 61–65, 1964.

PEREIRA, L. F. **Estudo da Energia Incidente por Arco Elétrico sob a ótica da Engenharia de Segurança do Trabalho**. Monografia (Especialização) - Faculdade Pitágoras, Belo Horizonte, 2020. 91 p.

PEXTRON. **Manual de Operação: URP 6000 e URP 6001**. São Paulo, 2021. 248 p.

PHILLIPS, J. **The Two-Second Rule**. 2020. Disponível em: <<https://www.ecmag.com/section/safety/two-second-rule>>.

- QUEIROZ, A. R. S. **Utilização de Relés Digitais Para Mitigação dos Riscos Envolvendo Arco Elétrico**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2011. 134 p.
- RESENDE, F. B. **Proteção Elétrica Em Subestações Uma Abordagem Sobre Energia Incidente**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 102 p.
- REWITZER, D. The New IEEE-1584 Guide for Performing Arc-Flash Calculations. In: **IEEE IAS Atlanta**. Atlanta: [s.n.], 2019. p. 51.
- SAHIN, I. et al. Cost analysis of acute burn patients treated in a burn centre: the Gulhane experience. **Annals of burns and fire disasters**, v. 24, p. 9–13, 2014.
- SANTOS, G. J. G. dos. **Metodologia para Classificar Redes de Distribuição em Categorias Conforme NFPA70E-2018 e Cálculos de Energia Incidente do Guia IEEE1584-2018**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. 75 p.
- SEGURA, R. G. et al. Electric Arc Furnace Modeling with Artificial Neural Networks and Arc Length with Variable Voltage Gradient. **Energies (MDPI)**, v. 10, n. 1424, p. 11, 2017.
- SELLUX. **GV: 01 Chave Seccionadora Tripolar Abertura Sem Carga Uso Interno**. São Bernardo do Campo: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://sellux.com.br/produto/gv-01-chave-seccionadora-tripolar-abertura-sem-carga-uso-interno/>>.
- SENGER, E. C.; QUEIROZ, A. R. S. **Proteção contra Arco elétrico e EPIS**. [S.l.], 2012. 52 p. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/category/fasciculos/anteriores/epis-e-protecao-contr-arco-eletrico/>>.
- SHIELDS, F. J. The Problem of Arcing Faults in Low-Voltage Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Industry and General Applications**, IGA-3, n. 1, p. 15–25, 1967. ISSN 0018943X.
- SHIPP, B. Y. D. D. et al. Total system approach to improve electrical safety. **Industry Applications**, Vol.17, n. May, p. 28–37, 2011.
- SHORT, T. A. Arc-flash analysis approaches for medium-voltage distribution. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 47, n. 4, p. 1902–1909, 2011. ISSN 00939994.
- SHORT, T. A.; EBLEN, M. L. Medium-voltage arc flash in open air and padmounted equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 1, p. 245–253, 2012. ISSN 00939994.
- SOARES, F. C. S.; BOTTARO, M.; SANTOS, J. C. Desenvolvimento de calorímetro baseado em sensor óptico para determinação do ATPV. In: **VIII IEEE ESW**. Salto, São Paulo: [s.n.], 2019.

- SPERL, J.; WHITNEY, C.; MILNER, A. Arc flash hazard regulation and mitigation. **2009 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers**, p. 417–425, 2009.
- STOKES, A. D.; OPPENLANDER, W. T. Electric arcs in open air. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 24, n. 1, p. 26–35, 1991. ISSN 13616463.
- STOKES, A. D.; SWEETING, D. K. Electric arcing burn hazards. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 42, n. 1, p. 134–141, 2006. ISSN 00939994.
- STOLL, A. M.; CHIANTA, M. A. **Heat transfer through fabrics**. Warmister, 1970. 41 p.
- SWEETING, D.; STOKES, A. D. Energy transfers within arcing faults in electrical equipment. **8th International Conference on Electric Fuses and their Applications, ICEFA**, p. 169–178, 2007.
- WEG. **VBW: DISJUNTOR A VÁCUO**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2021. 20 p. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h23/hd9/WEG-disjuntor-a-vacu-VBW-50039960-catalogo-pt.pdf>>.
- WHITE, J. **78- How to use the new arc-flash PPE tables in the 2018 edition of NFPA 70E**. 2018. 9 p. Disponível em: <http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/6006933_0000_ENG_A_W.PDF>.
- WILKINS, R.; ALLISON, M.; LANG, M. Improved method for arc flash hazard analysis. **Conference Record of Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**, p. 55–62, 2004.
- ZHANG, Z. **Arc Flash Hazard Analysis**. 182 p. Tese (Doutorado) — The University of Texas, Texas, 2015.
- ZHANG, Z. et al. Effect of electrode geometry on arc flash protection boundary. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 56, n. 1, p. 57–64, 2020. ISSN 19399367.

APÊNDICES

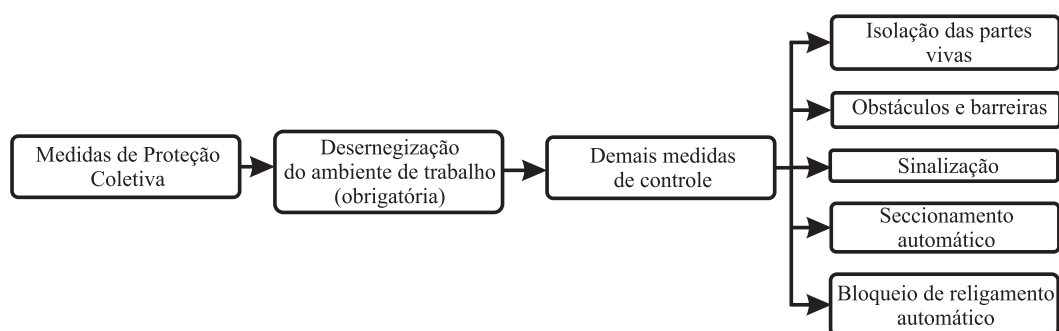
APÊNDICE A – MEDIDAS DE SEGURANÇA LABORATORIAL

A NR-10 é a norma utilizada no que se refere a segurança em trabalhos com sistemas elétricos ao nível nacional, sendo suas instruções empregadas na maioria dos laboratórios e indústrias do setor. Para a operação segura do laboratório, são requeridos diversos procedimentos de segurança, tanto por parte do projeto como dos operadores, devido aos riscos de operação da estrutura e ao ensaio destrutivo associado. Os operadores devem sempre exercer as suas atividades em um sistema desenergizado, dado que a energização ocorre apenas no instante de realização do ensaio, seguido da desenergização do local. Desta forma, além dos equipamentos de proteção relacionados ao sistema elétrico do laboratório, são imprescindíveis medidas de controle bem estruturadas para a operação do local, tanto na condição desenergizada como na energizada (BRASIL, 1978).

A.1 MEDIDAS DE PROTEÇÃO COLETIVA

As medidas de proteção coletiva são prioritariamente adotadas em qualquer instalação elétrica, para o operador não ser exposto ao risco elétrico sob nenhuma circunstância (PEREIRA, 2020). A principal medida de proteção coletiva mencionada pela NR-10 é a desenergização do local de trabalho, e no que se refere a aplicação abordada neste trabalho, esta medida é imprescindível e sempre deve ser atendida. A Figura A.1 resume as principais medidas de proteção coletiva consideradas no trabalho com eletricidade.

Figura A.1 – Algumas medidas de proteção coletiva conforme a NR-10.



Fonte: Adaptação de Camisassa (2015).

Conforme apresentado no esquema da Figura A.1, a desenergização é obrigatória, e devem existir outras medidas de controle para evitar contatos acidentais com possíveis partes energizadas e religamentos indevidos do circuito, além de dispositivos de sinalização e segurança pertinentes para perigos com eletricidade, incêndio e de emergência.

Outra medida de controle de suma importância é o aterramento das carcaças dos equipamentos do ambiente de trabalho, pois, este protege os operadores de adversidades como descargas atmosféricas e cargas estatísticas presentes nos equipamentos (PEREIRA,

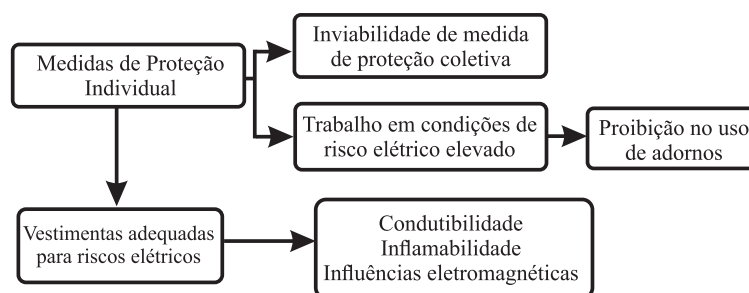
2020). O aterramento é obrigatório em laboratórios de estudos com eletricidade, e deve ser realizado segundo as normas estabelecidas pelos órgãos competentes ou normas internacionais vigentes (BRASIL, 1978). Além disso, a existência de uma vara de aterramento é de grande importância para a operação segura do local, visto que a partir do seu manuseio pode-se garantir a ausência de tensão residual nos equipamentos. Adicionalmente, devem ser empregados sistemas de intertravamento nas portas de acesso a áreas energizadas do laboratório e tapetes de borracha com classe de tensão adequada ao local de operação nos pontos em que as manobras do local são realizadas.

A.2 MEDIDAS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL

Conforme a NR-6, as medidas de proteção individual devem ser utilizadas como uma proteção adicional ou obrigatória pelos trabalhadores em forma de EPIs, dependendo da atividade realizada e agindo como a última camada de segurança do trabalhador, no caso de inviabilidade técnica de processo vigente de implementação das medidas de proteção coletivas (BRASIL, 1978). Segundo Camisassa (2015), as medidas de controle contra o risco, em ordem de prioridade, são: 1) medidas de proteção coletiva; 2) medidas administrativas ou de organização do trabalho; 3) fornecimentos de EPIs. Destaca-se que as duas últimas não são obrigatórias, e devem ser adotadas no caso de impossibilidades técnicas de implementação de EPCs ou em atividades específicas de risco elevado.

Na Figura 2.6 foram detalhados alguns dos EPIs necessários em atividades em que existe o risco de arco elétrico. Desta forma, nesta apêndice, busca-se resumir como a NR-6 pode ser associada a NR-10 quanto às recomendações de utilização de medidas individuais de proteção, conforme apresentado na Figura A.2.

Figura A.2 – Recomendações gerais de proteção individual no trabalho com eletricidade das NRs 6 e 10.



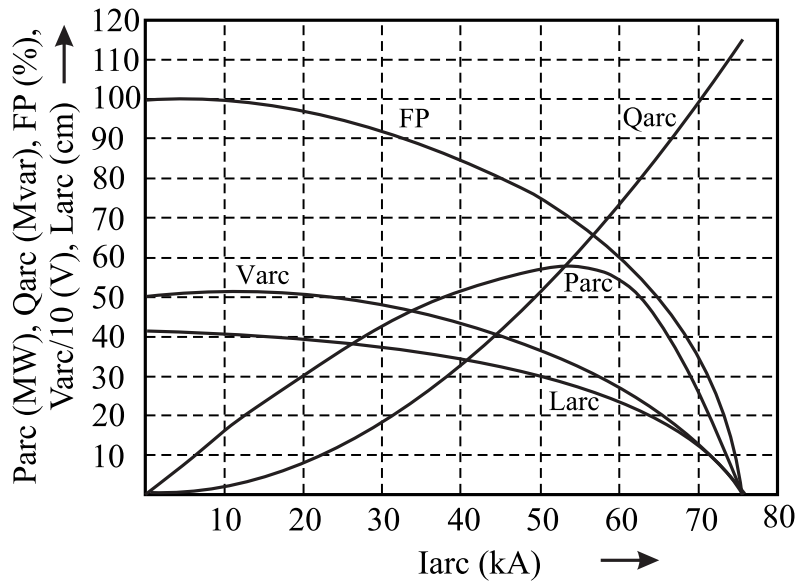
Fonte: Adaptação de Camisassa (2015).

Através da Figura A.2, pode-se observar que um dos destaques da NR-10 é em relação à obrigatoriedade dos EPIs possuírem valores condizentes de condutibilidade, inflamabilidade e influência eletromagnética considerando a categoria de serviço, e que nenhuma vestimenta deve ser constituída elementos condutivos ou inflamáveis, questão fundamental para a proteção do trabalhador contra os arcos elétricos (BRASIL, 1978).

APÊNDICE B – ASPECTOS DE FORNOS A ARCOS ELÉTRICOS

Apesar de diversos parâmetros interferirem no comportamento das características elétricas do arco elétrico, Akdag et al. (2000) e Blackburn e Domin (2006) demonstram de maneira aproximada suas particularidades baseadas em estudos com fornos a arcos. Essas características, fundamentadas nos parâmetros apresentados em Akdag et al. (2000), são demonstradas na Figura B.1.

Figura B.1 – Características elétricas de um forno a arcos elétricos.



Fonte: Adaptação de Akdag et al. (2000) e de Blackburn e Domin (2006).

Conforme observado na Figura B.1, para um forno de arcos elétricos que produz correntes de magnitude de até 75 kA, a potência ativa começa decair quando ocorre a intersecção de sua curva com a curva de potência reativa, e conseqüentemente, a partir desse ponto, o fator de potência decresce acintosamente. Outro ponto importante é a relação diretamente proporcional de L_{arc} com a tensão de arco, que segundo Akdag et al. (2000) e Cano et al. (2015), segue o proposto pela Equação (B.1), para estimar associação aproximada entre as duas variáveis.

$$V_{arc} = C \times L_{arc} + 40 \therefore L_{arc} = \frac{V_{arc} - 40}{C} \quad (B.1)$$

onde:

V_{arc} é a tensão de arco elétrico;

L_{arc} é o comprimento de arco elétrico;

C^1 é um valor de gradiente constante de 11,5 V/cm.

¹De acordo com a literatura, o valor de C é fixado em 11,5 V/cm, que geralmente é assumido como constante em todas as etapas do processo de fusão (comportamento estacionário) (SEGURA et al., 2017).

Desta forma, considerando alguns pontos existentes na literatura de fornos a arcos elétricos, é possível entender algumas das relações necessárias para a análise do processo de reignição do arco elétrico, embora muito dos equacionamentos existentes sejam aproximados. Conforme o gás ionizado produzido pelos metais derretidos se dissipa após a ignição do arco elétrico, este passa gradualmente a perder o seu caminho resistivo de propagação, até ser definitivamente extinto, caso não seja dissipado antes disso pelo sistema de proteção.

Assim, pode-se ponderar que a estimação do FP de um arco elétrico não é trivial e exata, mas é possível se ter uma aproximação. Para sustentar um arco elétrico pelo tempo desejado, há a necessidade do equilíbrio de diversos parâmetros, como: impedância do sistema, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e comprimento de arco. E esta não é uma tarefa simples, pois em diversas situações alguns desses parâmetros não podem ser ajustados conforme o desejado na instalação em que o arco elétrico está sendo ensaiado.

APÊNDICE C – MASSA DOS CALORÍMETROS UTILIZADOS

Tabela C.1 – Massa dos discos de cobre dos calorímetros usados na medição da EI.

Calorímetro	Massa (g)
1	18,8556
2	18,8584
3	18,6092
4	18,8523
5	18,9418
6	18,3750
7	18,7814

Fonte: Autor.

APÊNDICE D – MODELO DE RELATÓRIO DE ENSAIO

Figura D.1 – Modelo de relatório de ensaio.

RESULTADOS DO ENSAIO	
ESPECIFICAÇÕES	
Data: 13/05/2022	
Hora: 11:06	
Tensão de circuito aberto: 1.10 kV	
Corrente de curto-circuito: 1.59 kA	
Tap dos reatores: H0-H12	
Tempo de duração do arco elétrico: 520.00 ms	
Configuração dos eletrodos: VOA	
Espaçamento dos eletrodos: 50.00 mm	
Distância de trabalho: 1100.00 mm	
Corrente de arco elétrico medida: 1.81 kA	
Energia Incidente calculada pela IEEE 1584: 0.34 cal/cm ²	
RESULTADOS	
Energia incidente no CALORÍMETRO 1:	0.297 cal/cm ²
Energia incidente no CALORÍMETRO 2:	0.320 cal/cm ²
Energia incidente no CALORÍMETRO 3:	0.362 cal/cm ²
Energia incidente no CALORÍMETRO 4:	0.320 cal/cm ²
Energia incidente no CALORÍMETRO 5:	0.307 cal/cm ²
Energia incidente no CALORÍMETRO 6:	0.346 cal/cm ²
Energia incidente no CALORÍMETRO 7:	0.346 cal/cm ²
Energia incidente MÁXIMA: 0.36 cal/cm ²	
Diferença % entre a EI máxima nos calorímetros e a EI calculada pela IEEE: 5,88%	

Fonte: Autor.

APÊNDICE E – GRAVAÇÕES DE ENSAIOS REALIZADOS

Figura E.1 – *Link e QR code* exemplificando a gravação termográfica do ensaio.



<https://youtu.be/iADkmHSLKfl>

Fonte: Autor.

Figura E.2 – *Link e QR code* das gravações dos ensaios de arcos elétricos realizados.



<https://youtube.com/playlist?list=PLreiFeGVDwTLkUA-Ne-vJTDJpWpgnFhgj>

Fonte: Autor.

APÊNDICE F – SEÇÃO DO CONDUTOR DE SACRIFÍCIO

A literatura indica que os ensaios de arcos elétricos normalmente utilizam condutores de sacrifício entre 0,5 e 2,5 mm², entretanto, não especificam qual seção utilizar para cada caso (IEEE STD 1584, 2018). Os autores Hughes et al. (2011), por exemplo, utilizam em seu laboratório de altas-correntes para testes de sistemas de detecção de arcos elétricos condutores de sacrifício de 0,32 mm². Desta forma, não existe consenso na literatura quanto a adoção da seção do condutor de sacrifício, entretanto, o que se sabe é que quanto maior for a magnitude da corrente de arco, maior poderá ser este valor.

Assim a escolha da seção do condutor de sacrifício utilizado nos ensaios de arcos elétricos deve seguir a seguinte premissa: o condutor deve fundir no menor tempo possível, enquanto fornece a maior quantidade de rejeitos para a nuvem de gás ionizado que cria o caminho resistivo para propagação do arco. Dessa forma, a energia de fusão do condutor de cobre em questão deve ser a mais próxima o possível da energia do arco elétrico, como pode-se observar na Equação (F.1).

$$\Delta E = E_{arco} - E_{fusão} \approx 0 \quad (F.1)$$

onde:

E_{arco} é a energia de arco elétrico (J);

$E_{fusão}$ é a energia de fusão do condutor de cobre (J).

Em primeiro lugar, é necessário definir o espaçamento entre eletrodos que vai ser utilizado no ensaio, para se ter conhecimento do comprimento do condutor. Com essa informação e a partir da 2^a Lei de Ohm, apresentada na Equação (F.2), temos:

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \quad (F.2)$$

onde:

R é a resistência do condutor de cobre (Ω);

ρ é a resistividade do cobre (0,0172 $\Omega \cdot mm^2/m$);

l é o comprimento do condutor (mm);

A é a área de seção transversal do fio (mm^2).

A partir da resistência do condutor de cobre utilizado, pode-se estimar a potência e a energia do arco elétrico considerando este condutor através das Equações (F.3) e (F.4).

$$P_{arco} = R \times I_{bf}^2 \quad (F.3)$$

$$E_{arco} = P_{arco} \times t_{fusão} \quad (F.4)$$

onde:

P_{arco} é a potência do arco elétrico (kW);

I_{bf} é a corrente de curto-circuito trifásico franco esperada (kA);

$t_{fusão}$ tempo definido para a fusão do condutor de sacrifício (ms).

Por outro lado, é necessário definir a energia necessária para fundir o condutor de sacrifício utilizado. Isso pode ser feito a partir do peso do condutor considerado e da energia latente de fusão do cobre, conforme indicado pelas Equações (F.5) e (F.6)

$$m_s = \gamma \times l \times A \quad (\text{F.5})$$

$$E_{fusão} = m_s \times L \quad (\text{F.6})$$

onde:

m_s é a massa do condutor de sacrifício (g);

γ é o peso específico do cobre (g/mm^3);

l é o comprimento do condutor (mm);

A é a área de seção transversal do condutor (mm^2);

L é o calor latente de fusão do cobre (j/g).

É importante que os valores de comprimento e de seção transversal utilizados para os cálculos das energias de arco e de fusão do condutor sejam as mesmas, para evitar equívocos. A partir da aplicação destes equacionamentos, utiliza-se um teste de hipótese no *software* Microsoft Excel[®] com meta definida para que a diferença entre as energias de arco e de fusão (ΔE) seja a mais próxima de zero possível, partindo da alteração de um único parâmetro: a seção transversal do condutor de sacrifício. Dessa forma, a partir de um tempo de fusão estipulado no *software* (normalmente 2 ms), pode-se estimar uma seção transversal mínima para o condutor de sacrifício ser fundido o mais rapidamente possível. Dessa forma, o tempo de arco resultante adquirido através do sistema de aquisição de dados é o mais próximo possível do tempo real do arco elétrico.

ANEXOS

ANEXO A – SUMÁRIO DE ENSAIOS REALIZADOS PARA A ELABORAÇÃO DO GUIA IEEE *STD* 1584-2018

Tabela A.1 – Sumário de ensaios da norma IEEE 1584-2018.

Tensão (kV)	Corrente de CC (kA)	Gap	Nº de testes	Invólucro (A × L × P)
0.208	2.5-20	6.35-19.05	67	355.6 mm × 304.8 mm × 203.2 mm 203.2 mm × 152.4 mm × 152.4 mm
0.24	20-41	12.7-25.4	25	355.6 mm × 304.8 mm × 203.2 mm
0.3	20-60	25.4-38.1	24	355.6 mm × 304.8 mm × 203.2 mm
0.311	17-26	6.35-12.7	11	355.6 mm × 304.8 mm × 203.2 mm
0.48	0.5-80.2	10-50.8	369	508 mm × 508 mm × 508 mm
0.575	40	25.4-38.1	21	508 mm × 508 mm × 508 mm
0.60	0.5-37	12.7-101.6	375	508 mm × 508 mm × 508 mm
2.7	0.5-33	38.1-114.3	293	660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm
2.97	37-40	38.1	32	660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm 914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm
3.90	60-65	38.1	18	660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm 914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm
4.16	20-63	38.1-76.2	184	660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm
14.3	0.5-42	76.2-152.4	274	914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm
0.253 (1-Ph)	5.0-23	6.35-19.05	41	Gaiola de Faraday
12	2.3-9.1	254	136	Equipamentos reais
0.6	1.6-33	22		Equipamentos reais

Fonte: Adaptação da IEEE STD 1584 (2018).

ANEXO B – COEFICIENTES UTILIZADOS NO MODELO MATEMÁTICO DO GUIA IEEE *STD* 1584-2018

Tabela B.1 – Coeficientes para determinação dos valores intermediários de I_{arc} .

E.C.	V_{oc}	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
VCB	600 V	-0,04287	1,035	-0,083	0	0	-4,783E-09	1,962E-06	-0,000229	0,003141	1,092
	2 700 V	0,0065	1,001	-0,024	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729
	14 300 V	0,005795	1,015	-0,011	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729
VCBB	600 V	-0,017432	0,98	-0,05	0	0	-5,767E-09	2,524E-06	-0,00034	0,01187	1,013
	2 700 V	0,002823	0,995	-0,0125	0	-9,204E-11	2,901E-08	-3,262E-06	0,0001569	-0,004003	0,9825
	14 300 V	0,014827	1,01	-0,01	0	-9,204E-11	2,901E-08	-3,262E-06	0,0001569	-0,004003	0,9825
HCB	600 V	0,054922	0,988	-0,11	0	0	-5,382E-09	2,316E-06	-0,000302	0,0091	0,9725
	2 700 V	0,001011	1,003	-0,0249	0	0	4,859E-10	-1,814E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9881
	14 300 V	0,008693	0,999	-0,02	0	-5,043E-11	2,233E-08	-3,046E-06	0,000116	-0,001145	0,9839
VOA	600 V	0,043785	1,04	-0,18	0	0	-4,783E-09	1,962E-06	-0,000229	0,003141	1,092
	2 700 V	-0,02395	1,006	-0,0188	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729
	14 300 V	0,005371	1,0102	-0,029	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729
HOA	600 V	0,111147	1,008	-0,24	0	0	-3,895E-09	1,641E-06	-0,000197	0,002615	1,1
	2 700 V	0,000435	1,006	-0,038	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981
	14 300 V	0,000904	0,999	-0,02	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981

Fonte: IEEE STD 1584 (2018).

Tabela B.2 – Tabela de coeficientes para a Equação (2.12).

Configuração dos eletrodos	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
VCB	0	-1,4269E-06	0,000083137	-0,0019382	0,022366	-0,12645	0,30226
VCBB	1,138E-06	-6,0287E-05	0,0012758	-0,013778	0,080217	-0,24066	0,33524
HCB	0	-3,097E-06	0,00016405	-0,0033609	0,033308	-0,16182	0,34627
VOA	9,5606E-07	-5,1543E-05	0,0011161	-0,01242	0,075125	-0,23584	0,33696
HOA	0	-3,1555E-06	0,0001682	-0,0034607	0,034124	-0,1599	0,34629

Fonte: Adaptação da IEEE STD 1584 (2018).

Tabela B.3 – Coeficientes para determinar os valores intermediários da EI e da distância segura de aproximação (AFB).

V_{oc}	C.E	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
600 V	VCB	0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,9778
	VCBB	3,068459	0,26	-0,098107	0	0	-5,767E-09	0,000002524	-0,00034	0,01187	1,013	-0,06	-1,809	1,19
	HCB	4,073745	0,344	-0,370259	0	0	-5,382E-09	0,000002316	-0,000302	0,0091	0,9725	0	-2,03	1,036
	VOA	0,679294	0,746	1,222636	0	0	-4,783E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,997
	HOA	3,470417	0,465	-0,261863	0	0	-3,895E-09	0,000001641	-0,000197	0,002615	1,1	0	-1,99	1,04
2700	VCB	2,40021	0,165	0,354202	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729	0	-1,569	0,9778
	VCBB	3,870592	0,185	-0,736618	0	-9,204E-11	2,901E-08	-3,262E-06	1,569E-04	-0,004003	0,9825	0	-1,742	1,09
	HCB	3,486391	0,177	-0,193101	0	0	4,859E-10	-1,814E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9881	0,027	-1,723	1,055
	VOA	3,880724	0,105	-1,906033	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729	0	-1,515	1,115
	HOA	3,616266	0,149	-0,761561	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981	0	-1,639	1,078
14300 V	VCB	3,825917	0,11	-0,999749	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729	0	-1,568	0,99
	VCBB	3,644309	0,215	-0,585522	0	-9,204E-11	2,901E-08	-3,262E-06	1,569E-04	-0,004003	0,9825	0	-1,677	1,06
	HCB	3,044516	0,125	0,245106	0	-5,043E-11	2,233E-08	-3,046E-06	1,160E-04	-0,001145	0,9839	0	-1,655	1,084
	VOA	3,405454	0,12	-0,93245	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729	0	-1,534	0,979
	HOA	2,04049	0,177	1,005092	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981	-0,05	-1,633	1,151

Fonte: Adaptação da IEEE STD 1584 (2018).