

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**JOÃO PEDRO TRIVELATO DOS SANTOS**

**PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE  
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS COM BASE NA NORMA ABNT NBR 17227**



Ilha Solteira - SP  
2025

**JOÃO PEDRO TRIVELATO DOS SANTOS**

**PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE  
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS COM BASE NA NORMA ABNT NBR 17227**

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito para conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237p Santos, João Pedro Trivelato dos.  
Procedimento para realização do estudo de energia incidente em instalações elétricas com base na norma ABNT NBR 17227 / João Pedro Trivelato dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

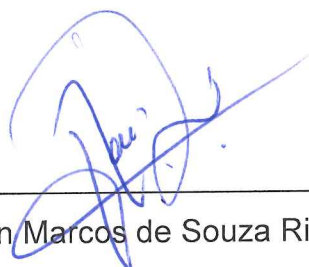
Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

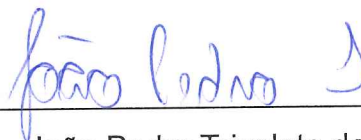
1. Energia incidente. 2. Arco elétrico. 3. Norma ABNT NBR 17227. 4. Cálculo de risco térmico. 5. Segurança em instalações industriais.

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

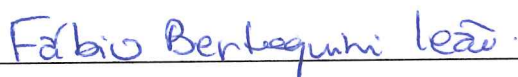
Aos dez dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **João Pedro Trivelato dos Santos**, matriculado sob o nº 182053661, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro*, o *Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão* e o *Dr. Lucas do Carmo Yamaguti*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Procedimento para realização do estudo de energia incidente em instalações elétricas com base na Norma ABNT 17227", obtendo a nota 10 (DEZ) e conceito aprovado.



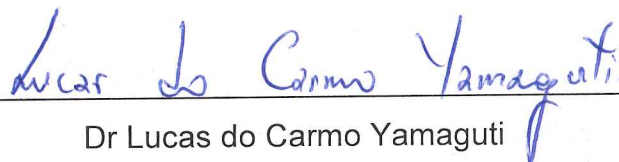
Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro  
- orientador-



João Pedro Trivelato dos Santos  
- discente-



Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão  
- Membro da Banca -



Dr Lucas do Carmo Yamaguti  
- Membro da Banca -

Aos meus pais, Lorival e Lucinete, por tudo.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Lucinete, por sempre me apoiar e incentivar, sendo o meu farol nos momentos de dúvida e o meu refúgio nos dias de tempestade. Ao meu pai, Lorival, por me ensinar o que é certo e por ser o alicerce que sustenta a minha vontade de me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

Ao meu orientador, professor Jean, pelo voto de confiança e pelo reconhecimento, agradeço pelos valiosos ensinamentos e por sua amizade sincera.

A todos os amigos e colegas de trabalho que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

“O que eu não posso criar, eu não entendo”.

Richard Feynman

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia prática para o cálculo da energia incidente em instalações elétricas com tensão nominal de até 15 kV, fundamentada na norma ABNT NBR 17227. O estudo tem como objetivo avaliar os riscos associados a arcos elétricos durante manobras e manutenções em sistemas energizados, quantificando a energia térmica liberada para definir medidas de proteção adequadas. A abordagem adotada utiliza os modelos da IEEE Std 1584 (2018) e detalha as etapas necessárias: levantamento de dados da instalação e das correntes de curto-circuito; análise das configurações físicas dos painéis; cálculo do fator de correção do tamanho do invólucro; e determinação das distâncias de trabalho. São apresentados procedimentos específicos para o cálculo da energia incidente em sistemas trifásicos nas faixas de 208 V–600 V e 600 V–15.000 V. O trabalho enfatiza a importância da correta seleção de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e da adoção de medidas de proteção com base nos resultados obtidos, visando garantir a segurança dos trabalhadores e prevenir acidentes.

**Palavras-chave:** energia incidente; arco elétrico; norma ABNT NBR 17227; segurança em instalações industriais; cálculo de risco térmico.

## ABSTRACT

This paper presents a practical methodology for calculating the incident energy in electrical installations with a nominal voltage of up to 15 kV, based on the ABNT NBR 17227 standard. The study aims to assess the risks associated with arc flashes during switching and maintenance operations in energized systems, quantifying the thermal energy released to define appropriate protective measures. The adopted approach employs the models from IEEE Std 1584 (2018) and details the necessary steps: collection of installation and short-circuit current data; analysis of the physical configurations of the panels; calculation of the enclosure size correction factor; and determination of working distances. Specific procedures are presented for calculating incident energy in three-phase systems within the voltage ranges of 208 V–600 V and 600 V–15,000 V. The work emphasizes the importance of properly selecting Personal Protective Equipment (PPE) and implementing protection measures based on the obtained results, in order to ensure worker safety and prevent accidents.

**Keywords:** incident energy, electric arc; ABNT NBR 17227 standard; industrial installation safety; thermal risk calculation.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Instalação com múltiplas fontes de alimentação .....                                     | 20 |
| Figura 2 – Risco de exposição a arcos elétricos durante a operação de equipamentos energizados..... | 22 |
| Figura 3 – Dimensões físicas de um conjunto de manobra de baixa tensão .....                        | 24 |
| Figura 4 – Configurações de condutores previstas pela norma IEEE Std 1584 .....                     | 25 |
| Figura 5 – Jato de plasma gerado por condutores dispostos na configuração HOA.                      | 26 |
| Figura 6 – Jato de plasma gerado por condutores dispostos na configuração VCBB .....                | 27 |
| Figura 7 – Jato de plasma gerado por condutores dispostos na configuração VOA.                      | 27 |
| Figura 8 – Distância de trabalho durante a operação de equipamentos elétricos energizados.....      | 32 |
| Figura 9 – Exemplo de vestimenta utilizada para proteção contra arco elétrico.....                  | 50 |
| Figura 10 – Exemplo de etiqueta de sinalização de arco elétrico.....                                | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Classes de equipamentos e espaçamentos típicos com base na norma IEEE Std 1584.....                               | 25 |
| Tabela 2 – Especificações para a determinação das alturas e larguras equivalentes de um invólucro .....                      | 29 |
| Tabela 3 – Coeficientes para o cálculo do fator de correção do invólucro .....   | 31 |
| Tabela 4 – Distâncias de trabalho típicas com base na norma IEEE Std 1584.....   | 32 |
| Tabela 5 – Coeficientes para o cálculo da corrente de arco intermediária 1 .....   | 37 |
| Tabela 6 – Coeficientes para o cálculo da corrente de arco intermediária 2 .....   | 37 |
| Tabela 7 – Coeficientes para o cálculo dos valores intermediários da energia incidente e da distância limite de arco 1 ..... | 39 |
| Tabela 8 – Coeficientes para o cálculo dos valores intermediários da energia incidente e da distância limite de arco 2 ..... | 40 |
| Tabela 9 – Tempos de abertura de referência para disjuntores de diferentes modelos e níveis de tensão .....                  | 41 |
| Tabela 10 – Coeficientes para a determinação do fator de correção da corrente de arco elétrico.....                          | 48 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Categorias de Risco e Vestimentas de Proteção contra Arco Elétrico segundo a NFPA 70E..... | 50 |
|---|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |   |
|------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i>                                   |
| ATPV | <i>Arc Thermal Performance Value</i> (Valor de Proteção Térmica ao Arco)            |
| CCM  | Centro de Controle de Motores   |
| CF   | Fator de Correção do Tamanho do Invólucro   |
| EPI  | Equipamento de Proteção Individual  |
| HCB  | <i>Horizontal Conductor Barrier</i> (Condutores Horizontais em Caixa)               |
| HOA  | <i>Horizontal Conductor Open Air</i> (Condutores Horizontais ao Ar Livre)           |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>                            |
| NFPA | <i>National Fire Protection Association</i>   |
| VCB  | <i>Vertical Conductor Barrier</i> (Condutores Verticais em Caixa)                   |
| VCBB | <i>Vertical Conductor Barrier Back</i> (Condutores Verticais em Caixa com Barreira) |
| VOA  | <i>Vertical Conductor Open Air</i> (Condutores Verticais ao Ar Livre)               |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>16</b> |
| 1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....   | 17        |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....   | 17        |
| <b>2 A NORMA ABNT NBR 17227 E O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO .....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1 ESCOPO DA NORMA .....   | 19        |
| 2.2 CONSIDERAÇÕES NECESSÁRIAS AO ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE ..   | 19        |
| 2.3 CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO .....   | 21        |
| <b>3 ETAPAS NECESSÁRIAS PARA O CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE<br/>SEGUNDO A ABNT NBR 17227 .....</b>          | <b>23</b> |
| 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA INSTALAÇÃO E CÁLCULO DAS CORRENTES<br>DE CURTO-CIRCUITO .....                  | 23        |
| 3.2 LEVANTAMENTO DAS DIMENSÕES FÍSICAS DOS INVÓLUCROS E DA<br>CONFIGURAÇÃO DOS CONDUTORES DOS PAINÉIS ..... | 24        |
| 3.3 FATOR DE CORREÇÃO DO TAMANHO DO INVÓLUCRO .....   | 28        |
| 3.4 DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS DE TRABALHO .....   | 31        |
| <b>4 VISÃO GERAL E REQUISITOS DO MODELO DE CÁLCULO PROPOSTO PELA<br/>IEEE STD 1584 .....</b>                | <b>33</b> |
| 4.1 GENERALIDADES .....   | 33        |
| 4.2 REQUISITOS DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO .....  | 33        |
| 4.3 VISÃO GERAL DA APLICAÇÃO DOS MODELOS .....  | 34        |
| 4.4 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS .....  | 35        |
| <b>5 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO IEEE 1584-2018 PARA ESTIMATIVA DA<br/>ENERGIA INCIDENTE .....</b>              | <b>36</b> |
| 5.1 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE<br>600 V E 15.000 V .....                   | 36        |
| 5.2 CORRENTE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO<br>ENTRE 600 V E 15.000 V .....                 | 36        |
| 5.3 ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO<br>ENTRE 600 V E 15.000 V .....                | 38        |
| 5.4 DISTÂNCIA LIMITE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE<br>OPERAÇÃO ENTRE 600 V E 15.000 V .....         | 43        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.5 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V .....           | 44        |
| 5.6 CORRENTE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V .....         | 45        |
| 5.7 ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V .....        | 45        |
| 5.8 DISTÂNCIA LIMITE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V ..... | 46        |
| 5.9 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE A PARTIR DA CORRENTE DE ARCO REDUZIDA .....                  | 47        |
| <b>6 MEDIDAS PARA REDUÇÃO DO RISCO DE EXPOSIÇÃO A ARCOS ELÉTRICOS .....</b>                   | <b>49</b> |
| 6.1 CATEGORIAS DE VESTIMENTAS PARA OPERAÇÕES FRENTE AO RISCO DE ARCO ELÉTRICO .....           | 49        |
| 6.2 CUIDADOS E MANUTENÇÃO DAS VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO PARA ARCO ELÉTRICO .....                | 52        |
| 6.3 ETIQUETAS DE SINALIZAÇÃO DE ARCO ELÉTRICO .....   | 53        |
| <b>7 CONCLUSÃO .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>55</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os riscos associados à eletricidade, o arco elétrico destaca-se como um dos mais severos para os trabalhadores, em razão da elevada quantidade de energia liberada e das altas temperaturas envolvidas, capazes de provocar queimaduras graves com potencial letal. Além das queimaduras, o fenômeno ocasiona outros efeitos críticos que necessitam de controle e mitigação, tais como a geração de vapores metálicos tóxicos, a projeção de metal fundido, a emissão de radiação luminosa extremamente intensa e a onda de pressão decorrente da rápida expansão do ar (QUEIROZ, 2011).

A elevada temperatura gerada por um arco elétrico — que pode atingir aproximadamente 20.000 °C em seu ponto de origem — constitui a principal razão para a preocupação com esse fenômeno, pois corresponde a um nível térmico que nenhum material conhecido na Terra é capaz de suportar sem sofrer fusão ou vaporização. No que se refere às lesões humanas, as queimaduras tornam-se irreversíveis quando a temperatura da pele ultrapassa 96 °C por mais de um décimo de segundo, o que evidencia a relevância da quantificação da energia incidente (LEE, 1982).

O estudo da energia incidente em instalações elétricas tem como principal objetivo identificar e avaliar os riscos associados à exposição a arcos elétricos durante manobras e atividades de manutenção em sistemas energizados. Ao quantificar essa energia, o estudo permite estimar o grau de severidade das queimaduras decorrentes da exposição ao arco elétrico, com ênfase nas regiões do tórax e do rosto — as mais vulneráveis durante operações em sistemas de energia elétrica (ABNT, 2025).

Para isso, são adotadas normas técnicas, com destaque para a recente ABNT NBR 17227, cujas recomendações se baseiam em referências internacionais consolidadas, como a IEEE 1584 e a NFPA 70E. A norma IEEE 1584 constitui um guia amplamente utilizado, que apresenta técnicas padronizadas baseadas em análise estatística e em ajustes de curvas obtidos a partir de uma série de ensaios, destinadas à determinação da distância segura e da energia incidente associadas ao risco de arco elétrico. Essa metodologia aplica-se especificamente a instalações que atendem a critérios como tensão entre 208 V e 15.000 V, sistema trifásico, frequência de 50 Hz a 60 Hz e corrente de curto-circuito entre 700 A e 106 kA, servindo de base

para o cálculo empírico de energia incidente previsto na NFPA 70E (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Com base nos resultados obtidos, podem ser definidas medidas de controle eficazes, como a seleção adequada dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e a adoção de sinalizações e barreiras físicas. O estudo também viabiliza a elaboração de procedimentos operacionais seguros, contribuindo diretamente para a prevenção de acidentes e a proteção dos trabalhadores. Além de atender às normas de segurança do trabalho, essa análise reforça o compromisso das empresas com a promoção de uma cultura sólida de segurança. Dessa forma, o estudo da energia incidente consolida-se como uma ferramenta fundamental na gestão dos riscos elétricos, possibilitando intervenções mais seguras no ambiente industrial.

A introdução da ABNT NBR 17227 no Brasil constitui um marco relevante para a segurança em instalações elétricas, ao estabelecer uma metodologia de análise de risco de arco elétrico que integra requisitos e recomendações de referências internacionais consolidadas. A norma brasileira fornece um roteiro sistematizado para a avaliação dos riscos, abrangendo desde a coleta de dados e a análise dos cenários operacionais até a definição das medidas de proteção aplicáveis a instalações com tensões entre 208 V e 15 kV, em sistemas trifásicos de corrente alternada (ABNT, 2025).

## 1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo oferecer um meio prático de consulta para a realização de estudos de energia incidente em instalações elétricas com tensão nominal de até 15 kV, com base na metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 17227.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1, apresenta-se a motivação do estudo, contextualizando a necessidade de uma metodologia prática para o cálculo da energia incidente em equipamentos de distribuição de energia elétrica, em instalações com tensão nominal de até 15 kV.

No Capítulo 2, introduz-se a norma ABNT NBR 17227, detalhando seu escopo, aplicabilidade e considerações essenciais para estudos de energia incidente, com ênfase na análise de cenários operacionais em sistemas com múltiplas fontes de alimentação, além de caracterizar o fenômeno do arco elétrico, suas causas e efeitos. No Capítulo 3, descrevem-se as etapas para o cálculo da energia incidente, conforme a ABNT NBR 17227. São abordados o levantamento dos dados da instalação e das correntes de curto-circuito, o dimensionamento dos invólucros, a avaliação da configuração dos condutores, o cálculo do fator de correção do tamanho do invólucro (CF) e a definição das distâncias de trabalho.

No Capítulo 4, apresentam-se os requisitos e a estrutura do modelo de cálculo da IEEE Std 1584 (2018), base da norma brasileira, incluindo critérios de aplicação, faixas de tensão admissíveis, procedimentos gerais para a estimativa da energia incidente e o método de cálculo para sistemas monofásicos.

No Capítulo 5, detalha-se o cálculo da energia incidente para tensões entre 600 V e 15.000 V, abordando a determinação da corrente de arco intermediária, o cálculo da energia incidente e a definição da distância-limite de arco.

No Capítulo 6, apresenta-se o método específico para sistemas de 208 V a 600 V, destacando as particularidades do cálculo das mesmas grandezas — corrente de arco, energia incidente e distância-limite — na faixa de baixa tensão.

No Capítulo 7, aborda-se o cálculo da energia incidente com base na corrente de arco reduzida, avaliando seu impacto na energia térmica liberada em função das variações no tempo de atuação dos dispositivos de proteção.

No Capítulo 8, abordam-se as medidas para redução do risco de exposição a arcos elétricos, incluindo a especificação e seleção de EPIs com base na energia incidente calculada e nas categorias de risco definidas pela NFPA 70E, os cuidados necessários com a manutenção das vestimentas de proteção e as diretrizes para a confecção e fixação de etiquetas de sinalização de risco nos equipamentos.

## 2 A NORMA ABNT NBR 17227 E O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO

A ABNT NBR 17227 constitui um marco significativo para a segurança das instalações elétricas no Brasil, ao integrar metodologias reconhecidas internacionalmente para o estudo da energia incidente. A norma apresenta um roteiro estruturado para a avaliação dos riscos relacionados a arcos elétricos, abrangendo todas as etapas — desde a coleta de dados até a definição das medidas de proteção. Sua aplicação estende-se a sistemas elétricos de baixa e média tensão, garantindo que os procedimentos adotados estejam em conformidade com as melhores práticas e respaldados pelas evidências técnicas mais atuais (ABNT, 2025).

### 2.1 ESCOPO DA NORMA

A ABNT NBR 17227 estabelece uma metodologia para a análise de risco de arco elétrico, incluindo o cálculo da energia incidente, a determinação de medidas de proteção adequadas para os trabalhadores e para a instalação, além da orientação de ações voltadas à redução dos danos causados pela intensidade dessa energia durante manobras e trabalhos de manutenção em equipamentos elétricos, com base nos resultados mais recentes obtidos em ensaios realizados por laboratórios de pesquisa reconhecidos mundialmente (ABNT, 2025).

Os requisitos e recomendações desta Norma aplicam-se a instalações que possuam equipamentos elétricos e condutores com tensões nominais entre 208 V e 15 kV, em corrente alternada trifásica, ou a sistemas de corrente contínua com tensões de até 1,5 kV.

A metodologia descrita envolve a coleta de dados técnicos e de campo, a análise dos cenários operacionais do sistema elétrico de potência e a definição dos parâmetros necessários para possibilitar a realização dos cálculos pelo profissional técnico habilitado.

### 2.2 CONSIDERAÇÕES NECESSÁRIAS AO ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE

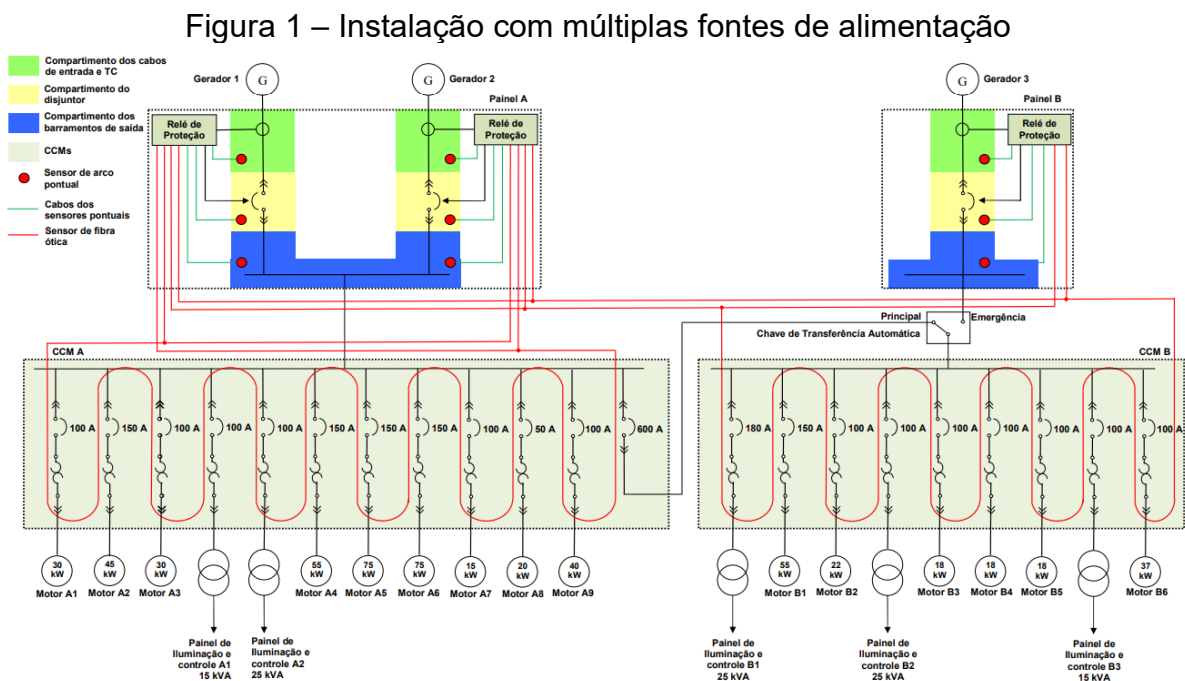
De modo geral, o nível de energia incidente depende diretamente da magnitude da corrente de curto-circuito no ponto da instalação onde é realizada a análise. Como essa corrente varia conforme a contribuição de diferentes fontes durante uma falta, os

cálculos da energia incidente devem considerar cenários que representem as diversas configurações do sistema elétrico.

O cálculo da energia incidente deve considerar o valor da corrente de curto-circuito que gere o maior nível de energia entre todos os cenários avaliados. No caso de instalações que possuam alimentação própria por meio de cogeração, além da alimentação fornecida pela concessionária, devem ser analisados três cenários distintos:

- 1) Sistema alimentado exclusivamente pela concessionária (uma ou mais fontes, se houver);
- 2) Sistema alimentado pela concessionária, em paralelo com gerador interno;
- 3) Sistema alimentado apenas pelo gerador interno.

Na Figura 1 é mostrado o diagrama unifilar de uma instalação industrial que possui mais de uma fonte de alimentação, conforme descrito nos cenários anteriores.



O diagrama unifilar, apresentado na Figura 1, mostra um sistema elétrico composto por três geradores: dois destinados à alimentação das cargas em condições normais e um destinado à alimentação de *backup*. Dependendo da condição operacional do sistema, faltas em diferentes pontos da instalação podem ser alimentadas por um ou dois geradores simultaneamente, situação que impacta

diretamente a magnitude da corrente de curto-circuito e, conseqüentemente, a intensidade da energia incidente nos respectivos setores.

Além disso, para que os valores das correntes de curto-circuito calculados em cada setor da instalação se aproximem ao máximo dos valores reais, é imprescindível considerar a contribuição de motores síncronos, motores de indução e as variações na corrente de curto-circuito provocadas pelas características dinâmicas dos geradores síncronos. Esses componentes podem influenciar significativamente os resultados obtidos e devem ser avaliados, caso a caso, pelo profissional responsável pelo estudo (MARDEGAN, 2022).

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO

Segundo a ABNT NBR 17227, define-se arco elétrico como o fluxo de corrente que ocorre quando há a ruptura da isolação elétrica entre partes energizadas ou entre uma parte energizada e um ponto aterrado, permitindo a passagem de corrente elétrica por um meio normalmente isolante, como o ar, por exemplo.

A ocorrência de um arco elétrico resulta em uma liberação abrupta e intensa de energia, que se manifesta principalmente na forma de calor, luz e ondas de pressão. Essa liberação pode causar sérios danos aos equipamentos elétricos, como o derretimento de condutores e a destruição de painéis ou invólucros metálicos. Além dos prejuízos materiais, os efeitos térmicos do arco representam um risco significativo à integridade física dos trabalhadores expostos à zona de risco, uma vez que, durante um curto-circuito, a temperatura do arco elétrico pode atingir até 20.000 °C — valor aproximadamente quatro vezes superior à temperatura da superfície do Sol (LEE, 1982).

Na Figura 2 é apresentado um exemplo dos efeitos causados por um arco elétrico em um painel de distribuição de uma instalação industrial durante uma operação de manutenção.

Figura 2 – Risco de exposição a arcos elétricos durante a operação de equipamentos energizados



Fonte: (EATON, 2022).

Entre as possíveis causas para a ocorrência de um arco elétrico, destacam-se falhas na isolação de condutores, conexões frouxas ou mal dimensionadas, presença de sujeira, poeira condutiva ou umidade em componentes elétricos, além da entrada de objetos estranhos ou do contato acidental com partes energizadas. Situações como manobras incorretas, ausência de manutenção preventiva e degradação natural dos materiais isolantes ao longo do tempo também podem criar condições propícias para a ruptura dielétrica e, conseqüentemente, a formação do arco. Em ambientes industriais, a presença de contaminantes, vibrações mecânicas e atmosferas corrosivas pode intensificar o desgaste dos componentes isolantes, aumentando o risco de ocorrência de arcos elétricos (MARDEGAN, 2022).

### **3 ETAPAS NECESSÁRIAS PARA O CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE SEGUNDO A ABNT NBR 17227**

O cálculo da energia incidente requer uma base sólida de informações técnicas sobre a instalação elétrica. Essa etapa inicial é essencial, pois a precisão dos resultados depende diretamente da qualidade e da abrangência dos dados coletados. A seguir, são apresentados os principais elementos que compõem essa base, abrangendo desde os parâmetros elétricos até as características físicas dos equipamentos (ABNT, 2025).

#### **3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA INSTALAÇÃO E CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

O cálculo da energia incidente depende diretamente do conhecimento detalhado das características elétricas do sistema analisado. Por isso, esse estudo deve ser realizado em conjunto com as análises de curto-circuito, coordenação e seletividade da instalação, uma vez que a definição das correntes de curto-circuito e dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção é indispensável para a avaliação da energia incidente (MARDEGAN, 2022).

Durante esses estudos, é fundamental que os diagramas da instalação e o arranjo dos equipamentos existentes sejam revisados com o apoio de profissionais familiarizados com o local, garantindo que estejam atualizados e representem fielmente a configuração real do sistema. Devem ser criteriosamente levantados e registrados os dados da concessionária, transformadores, geradores, cabos, barramentos, dispositivos de proteção e de seccionamento, assim como as possíveis configurações das fontes de alimentação do sistema elétrico analisado.

Devem ser coletados dados de todos os equipamentos que requerem inspeção, ajuste ou manutenção enquanto energizados. É importante destacar que, por se basear no estudo de curto-circuito da instalação, caso este ainda não exista, ele deve ser realizado como parte integrante do estudo de energia incidente (ABNT, 2025).

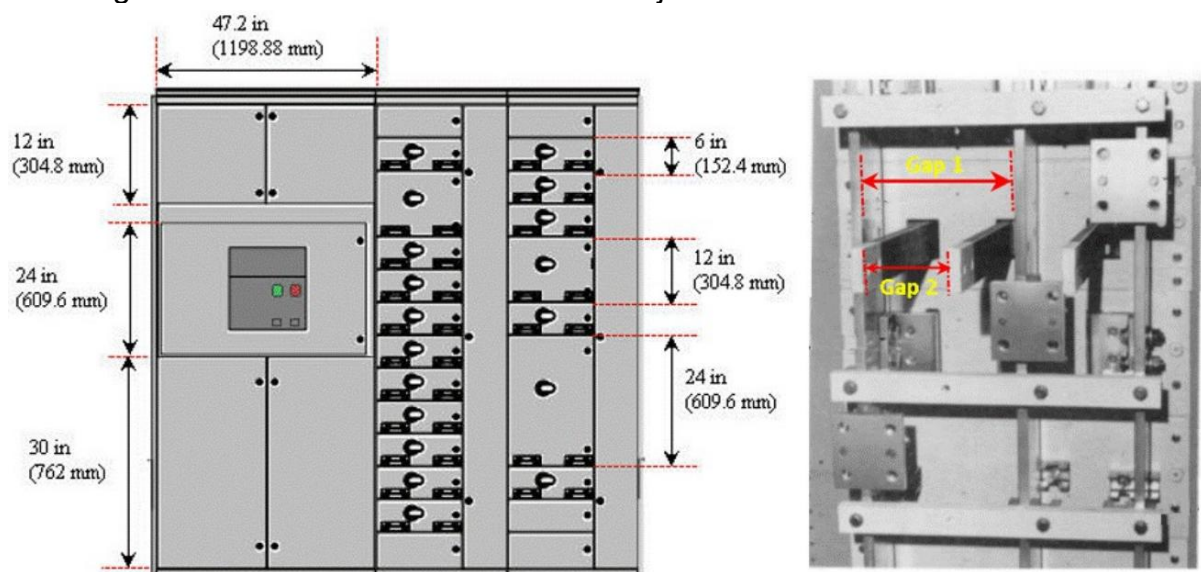
É necessário coletar dados de todos os equipamentos que requerem inspeção, ajuste ou manutenção enquanto energizados. É importante destacar que, por se basear no estudo de curto-circuito da instalação, caso este ainda não exista, ele deve ser realizado como parte integrante do estudo de energia incidente (ABNT, 2025).

### 3.2 LEVANTAMENTO DAS DIMENSÕES FÍSICAS DOS INVÓLUCROS E DA CONFIGURAÇÃO DOS CONDUTORES DOS PAINÉIS

Recomenda-se realizar a análise documental e a medição das dimensões e distanciamentos dos painéis, preferencialmente por meio de levantamento *in loco*. Na impossibilidade de obter esses dados, é permitido, como último recurso, utilizar valores típicos indicados em normas, conforme mostrado na Tabela 1, que apresenta espaçamentos padrão baseados nos ensaios de arco elétrico da IEEE Std 1584.

O levantamento das dimensões físicas dos invólucros e da disposição dos eletrodos em painéis elétricos constitui uma etapa fundamental para a análise da energia incidente, uma vez que tais características impactam diretamente a avaliação da intensidade e da propagação do arco elétrico em situações de falha (ABNT, 2025).

Figura 3 – Dimensões físicas de um conjunto de manobra de baixa tensão



Fonte: (ETAP, 2025).

Para cada equipamento incluído no estudo de arco elétrico, a tensão do sistema e a classe do equipamento podem ser utilizadas para determinar o espaçamento típico entre os barramentos de fase, especialmente quando essas informações não estão disponíveis junto ao fabricante ou não podem ser medidas diretamente no campo.

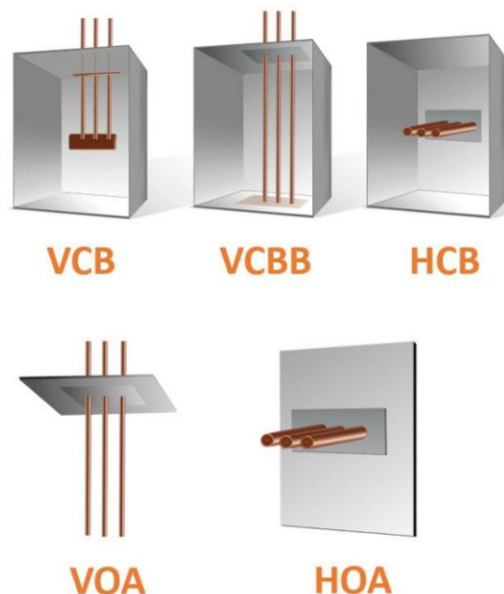
Tabela 1 – Classes de equipamentos e espaçamentos típicos com base na norma IEEE Std 1584

| <b>Equipamento e classe de tensão</b> | <b>Espaçamento típico [mm]</b> | <b>Tamanho do invólucro (A x L x P) [mm]</b>        |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| CCM 15 kV                             | 152                            | 914,4 x 914,4 x 914,4                               |
| Conjunto de manobra 15 kV             | 152                            | 1143 x 762 x 762                                    |
| CCM 5 kV                              | 104                            | 660,4 x 660,4 x 660,4                               |
| Conjunto de manobra 5 kV              | 104                            | 914,4 x 914,4 x 914,4                               |
| Conjunto de manobra 5 kV              | 104                            | 1143 x 762 x 762                                    |
| CCM e painel raso de BT               | 25                             | 355,6 x 304,8 x ≤203,2                              |
| CCM e painel típico de BT             | 25                             | 355,6 x 304,8 x >203,2                              |
| Conjunto de manobra BT                | 32                             | 508 x 508 x 508                                     |
| Caixa de junção de cabos              | 13                             | 355,6 x 304,8 x ≤203,2 ou<br>355,6 x 304,8 x >203,2 |

Fonte: (ABNT, 2025).

Após identificar a categoria dos equipamentos elétricos e determinar a distância entre fases, deve-se verificar o arranjo dos elementos condutores no interior do painel. A configuração dos eletrodos é um aspecto fundamental no estudo da energia incidente, pois influencia diretamente a forma, o percurso e a intensidade do arco elétrico em situações de falha. A norma prevê cinco configurações de barramentos, apresentadas a seguir.

Figura 4 – Configurações de condutores previstas pela norma IEEE Std 1584



Fonte: (ETAP, 2025).

- 1) VCB (*Vertical Conductor Barrier*): Condutores verticais dispostos no interior de uma caixa metálica ou de um compartimento fechado.
- 2) VCBB (*Vertical Conductor Barrier Back*): Condutores verticais dentro de uma caixa metálica, mas terminados em uma barreira isolante no seu interior.
- 3) HCB (*Horizontal Conductor Barrier*): Condutores arranjados horizontalmente dentro de uma caixa metálica.
- 4) VOA (*Vertical Conductor Open Air*): Condutores verticais expostos ao ar livre ou com tampa removida.
- 5) HOA (*Horizontal Conductor Open Air*): Condutores dispostos horizontalmente em ambiente ao ar livre ou com tampa removida.

A disposição dos eletrodos influencia diretamente o percurso do arco elétrico, a dispersão da energia térmica e a intensidade da energia incidente sobre os operadores envolvidos na intervenção. Por esse motivo, esse fator é determinante para a correta especificação dos EPIs e para a definição de outras medidas de segurança. Nas Figuras 5, 6 e 7, ilustra-se como diferentes configurações de condutores em um painel afetam a forma de dispersão da energia térmica.

Figura 5 – Jato de plasma gerado por condutores dispostos na configuração HOA



Fonte: (ETAP, 2025).

Figura 6 – Jato de plasma gerado por condutores dispostos na configuração VCBB



Fonte: (ETAP, 2025).

Figura 7 – Jato de plasma gerado por condutores dispostos na configuração VOA



Fonte: (ETAP, 2025).

Nas imagens apresentadas, a intensidade da energia térmica foi determinada por meio de calorímetros, os quais são destacados com maior clareza na Figura 7. Observa-se que a configuração HOA registra o maior fluxo de energia térmica, resultado da atuação conjunta de dois mecanismos de transferência de calor: convecção e radiação. Já na configuração VCBB, ambos os mecanismos também estão presentes, mas com maior predominância da radiação. Por fim, na configuração VOA, a transferência de calor ocorre principalmente por radiação.

Pontos de análise dentro de um mesmo equipamento podem envolver múltiplas configurações de condutores, ou seja, um painel pode possuir barramentos com configurações VCB e VCBB simultaneamente. Além disso, a configuração dos barramentos em um ponto de intervenção pode variar conforme a tarefa a ser realizada e a presença ou ausência de componentes removíveis (ABNT, 2025).

Quando um equipamento apresentar mais de uma configuração de eletrodos, deve-se considerar, para o estudo, aquela que resultar no maior valor de energia incidente calculada.

### 3.3 FATOR DE CORREÇÃO DO TAMANHO DO INVÓLUCRO

No modelo apresentado pela IEEE Std 1584, as equações propostas para o cálculo da energia incidente e da distância-limite de arco elétrico para as configurações VCB, VCBB e HCB são normalizadas para invólucros cúbicos com aresta de 508 mm. Assim, quando o invólucro analisado apresentar dimensões diferentes das utilizadas na normalização, torna-se necessário calcular o valor do fator de correção do tamanho do invólucro (CF), de modo a ajustar os resultados de energia incidente e de distância-limite de arco (ABNT, 2025).

A determinação do CF depende das dimensões equivalentes de largura e altura do invólucro, determinadas conforme as especificações mostradas na Tabela 2. Para aplicar essa metodologia, deve-se, primeiramente, verificar se o invólucro é classificado como raso ou típico.

Um invólucro é considerado raso quando todas as condições a seguir são atendidas simultaneamente:

- a) Tensão de operação do painel inferior a 600 V;
- b) Altura e largura menores que 508 mm;
- c) Profundidade do compartimento menor ou igual a 203,2 mm.

Tabela 2 – Especificações para a determinação das alturas e larguras equivalentes de um invólucro

| Variável             | Medida menor que 508 mm       | Medida maior ou igual a 508 mm e menor ou igual a 660,4 mm | Medida maior ou igual a 660,4 mm e menor ou igual a 1244,6 mm | Medida maior que 1244,6 mm  |
|----------------------|-------------------------------|--|---|---|
| <b>VCB</b>           |                               |  |   |   |
| Largura <sub>1</sub> | = 20 (se típico)              | = 0,03937 x Largura  | Obtido a partir da Equação (1), com o valor real da largura   | Obtido a partir da Equação (1), considerando largura de 1244,6 mm |
|                      | = 0,03937 x Largura (se raso) |  |   |   |
| Altura <sub>1</sub>  | = 20 (se típico)              | = 0,03937 x Altura   | = 0,03937 x Altura  | = 49  |
|                      | = 0,03937 x Altura (se raso)  |  |   |   |
| <b>VCBB</b>          |                               |  |   |   |
| Largura <sub>1</sub> | = 20 (se típico)              | = 0,03937 x Largura  | Obtido a partir da Equação (1), com o valor real da largura   | Obtido a partir da Equação (1), considerando largura de 1244,6 mm |
|                      | = 0,03937 x Largura (se raso) |  |   |   |
| Altura <sub>1</sub>  | = 20 (se típico)              | = 0,03937 x Altura   | Obtido a partir da Equação (2), com o valor real da altura    | Obtido a partir da Equação (2), considerando altura de 1244,6 mm  |
|                      | = 0,03937 x Altura (se raso)  |  |   |   |
| <b>HCBB</b>          |                               |  |   |   |
| Largura <sub>1</sub> | = 20 (se típico)              | = 0,03937 x Largura  | Obtido a partir da Equação (1), com o valor real da largura   | Obtido a partir da Equação (1), considerando largura de 1244,6 mm |
|                      | = 0,03937 x Largura (se raso) |  |   |   |
| Altura <sub>1</sub>  | = 20 (se típico)              | = 0,03937 x Altura   | Obtido a partir da Equação (2), com o valor real da altura    | Obtido a partir da Equação (2), considerando altura de 1244,6 mm  |
|                      | = 0,03937 x Altura (se raso)  |  |   |   |

Fonte: (ABNT, 2025).

Caso qualquer uma das condições para a classificação como invólucro raso não seja atendida, o invólucro deve ser considerado típico.

Além disso, conforme indicado na Tabela 2, existem situações em que a determinação da largura equivalente e da altura equivalente deve ser realizada de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$Largura_{a_1} = \left[ 600,4 + (Largura - 660,4) \cdot \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right] \cdot \frac{1}{25,4} \quad (1)$$

$$Altura_{a_1} = \left[ 600,4 + (Altura - 660,4) \cdot \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right] \cdot \frac{1}{25,4} \quad (2)$$

Sendo:

- $Largura_{a_1}$  é o valor equivalente da largura do invólucro (mm);
- $Altura_{a_1}$  é o valor equivalente da altura do invólucro (mm);
- $Largura$  é o valor real da largura do invólucro (mm);
- $Altura$  é o valor real da altura do invólucro (mm);
- $V_{oc}$  é a tensão nominal do sistema (kV);
- $A$  é uma constante cujo valor é 4 para a configuração VCB e 10 para as configurações VCBB e HCB;
- $B$  é uma constante cujo valor é 20 para a configuração VCB, 24 para a configuração VCBB e 22 para a configuração HCB.

Com os valores de largura e altura corrigidos, e estabelecida a classificação do invólucro como raso ou típico, prossegue-se para o cálculo do CF. O tamanho equivalente do invólucro é obtido por meio da Equação 3, enquanto o valor de CF é determinado pela Equação 4 (para invólucros rasos) ou pela Equação 5 (para invólucros típicos).

$$EES = \frac{Largura_{a_1} + Altura_{a_1}}{2} \quad (3)$$

$$CF = \frac{1}{b_1 \cdot EES^2 + b_2 \cdot EES + b_3} \quad (4)$$

$$CF = b_1 \cdot EES^2 + b_2 \cdot EES + b_3 \quad (5)$$

Sendo:

- $EES$  é o tamanho equivalente do invólucro;
- $CF$  é o fator de correção do tamanho do invólucro;

Os coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  são determinados de acordo com a configuração dos eletrodos, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes para o cálculo do fator de correção do invólucro

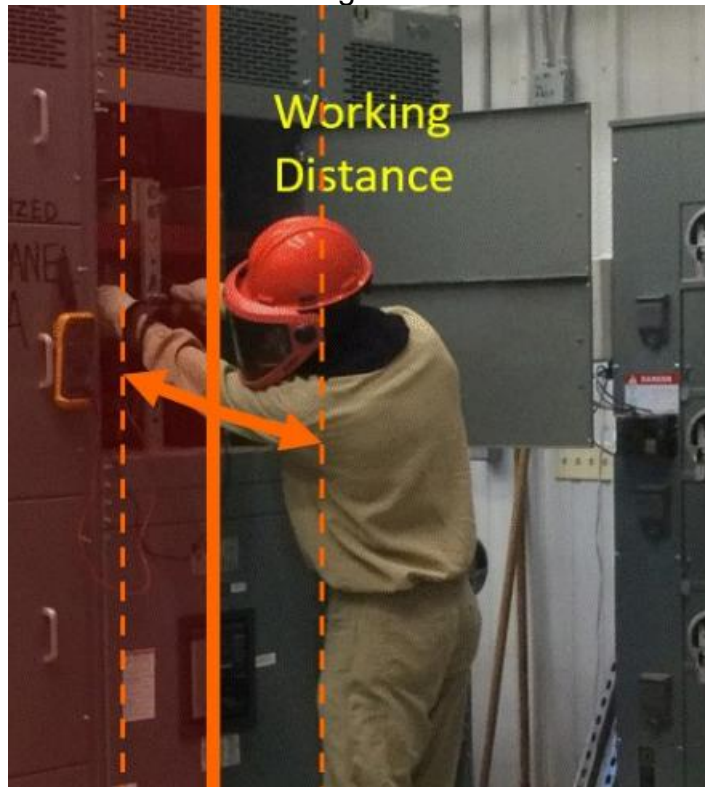
| <b>Tipo de compartimento</b> | <b>Configuração dos eletrodos</b> | <b>b1</b> | <b>b2</b> | <b>b3</b> |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Típico                       | VCB                               | -0,0003   | 0,03441   | 0,4325    |
|                              | VCBB                              | -0,0003   | 0,032     | 0,479     |
|                              | HCB                               | -0,0002   | 0,01935   | 0,6899    |
| Raso                         | VCB                               | 0,00222   | -0,0256   | 0,6222    |
|                              | VCBB                              | -0,0028   | 0,1194    | -0,2778   |
|                              | HCB                               | -0,0006   | 0,03722   | 0,4778    |

Fonte: (ABNT, 2025).

### 3.4 DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS DE TRABALHO

Nos estudos de energia incidente, a distância de trabalho representa a proximidade do trabalhador em relação ao ponto de arco elétrico durante a execução das tarefas, conforme ilustrado na Figura 8. A energia incidente, que representa a quantidade de energia térmica liberada e potencialmente absorvida pelo operador, varia consideravelmente de acordo com essa distância, impactando diretamente a avaliação do risco e a seleção dos equipamentos de proteção apropriados. Portanto, a definição correta das distâncias de trabalho é fundamental para garantir uma análise precisa da exposição térmica, impactando diretamente a especificação das vestimentas de proteção e as medidas de segurança adotadas.

Figura 8 – Distância de trabalho durante a operação de equipamentos elétricos energizados



Fonte: (ETAP, 2025).

Na Tabela 4, são apresentadas distâncias de trabalho típicas, conforme a norma IEEE Std 1584, classificadas por tipo de equipamento e faixa de tensão. Contudo, deve-se dar preferência ao uso de distâncias de trabalho reais, específicas para cada tarefa, considerando os equipamentos e procedimentos próprios da atividade avaliada no estudo, a fim de determinar esses parâmetros.

Tabela 4 – Distâncias de trabalho típicas com base na norma IEEE Std 1584

| <b>Equipamento e classe de tensão</b> | <b>Distância de trabalho [mm]</b> |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| CCM 15 kV                             | 914,4                             |
| Conjunto de manobra 15 kV             | 914,4                             |
| CCM 5 kV                              | 914,4                             |
| Conjunto de manobra 5 kV              | 914,4                             |
| CCM e painel raso de BT               | 457,2                             |
| CCM e painel típico de BT             | 457,2                             |
| Conjunto de manobra BT                | 609,6                             |
| Caixa de junção de cabos              | 457,2                             |

Fonte: (ABNT, 2025).

## 4 VISÃO GERAL E REQUISITOS DO MODELO DE CÁLCULO PROPOSTO PELA IEEE STD 1584

O modelo de cálculo da IEEE Std 1584 constitui a base técnica da metodologia adotada na ABNT NBR 17227. Com revisões que incorporam avanços relevantes — em especial a edição de 2018 —, o guia apresenta equações validadas experimentalmente para a estimativa realista da energia incidente. Compreender seus fundamentos e limites de aplicação é essencial para a condução adequada dos estudos de risco de arco elétrico. A seguir, são detalhados os requisitos, a estrutura e a aplicação prática desses modelos em diferentes faixas de tensão.

### 4.1 GENERALIDADES

A IEEE Std 1584 é um guia desenvolvido pela IEEE *Industry Applications Society* (IAS) para fornecer modelos matemáticos utilizados na determinação da energia incidente e da distância segura de exposição ao risco de arco elétrico. A primeira versão foi publicada em 2002, com revisões em 2004 e 2011. Em 2018, foi lançada a segunda versão do guia. Os cálculos indicados na norma brasileira ABNT NBR 17227 consideram a versão de 2018 da IEEE Std 1584.

### 4.2 REQUISITOS DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Conforme a metodologia da IEEE Std 1584:2018, os modelos de cálculo são aplicáveis a sistemas que atendam simultaneamente aos seguintes critérios:

1. Tensão de linha trifásica: entre 208 V e 15.000 V.
2. Frequência: 50 Hz ou 60 Hz.
3. Corrente de falta franca trifásica:
  - 500 A a 106 kA para sistemas de 208 V a 600 V.
  - 200 A a 65 kA para sistemas de 601 V a 15.000 V.
4. Espaçamento entre condutores de fase:
  - 6,35 mm a 76,2 mm para sistemas de 208 V a 600 V.
  - 19,05 mm a 254 mm para sistemas de 601 V a 15.000 V.
5. Distância de trabalho mínima: 305 mm.

#### 6. Dimensões do invólucro:

- Altura e largura máximas de 1.244,6 mm.
- Área máxima de abertura de 1,549 m<sup>2</sup>.

Em sistemas com tensão inferior a 240 V e corrente de curto-circuito menor que 2 kA, a probabilidade de manutenção de um arco elétrico é reduzida. Por esse motivo, recomenda-se que, nesses casos, não sejam realizados cálculos de energia incidente, adotando-se como resultado o uso da vestimenta de proteção padrão da planta.

Nos casos em que a largura e/ou a altura do invólucro ultrapassem 1.244,6 mm, esses valores devem ser limitados a 1.244,6 mm para efeito de aplicação do modelo. Adicionalmente, os invólucros avaliados devem possuir compartimentos com largura mínima superior a quatro vezes o espaçamento entre condutores de fase.

### 4.3 VISÃO GERAL DA APLICAÇÃO DOS MODELOS

A norma estabelece dois modelos distintos para a estimativa da energia incidente, definidos conforme o nível de tensão ( $V_{oc}$ ) do sistema:

- a) Modelo aplicável a sistemas com  $600\text{ V} < V_{oc} \leq 15.000\text{ V}$ ;
- b) Modelo aplicável a sistemas com  $208\text{ V} \leq V_{oc} \leq 600\text{ V}$ .

A aplicação do método é realizada em cinco etapas. Nas quatro primeiras, são realizadas as seguintes atividades: determinação da corrente de arco elétrico, definição da duração do arco ou do tempo de extinção pelo dispositivo de proteção, cálculo da energia incidente e determinação da distância-limite de arco — também denominada limite seguro de aproximação, limite de aproximação segura ou distância-limite de aproximação.

A quinta e última etapa consiste no cálculo da corrente de arco elétrico reduzida (também chamada de corrente mínima de arco elétrico), repetindo-se todos os passos anteriores para avaliar se a variação da corrente impacta a energia incidente. Para a configuração do eletrodo em análise, deve-se considerar a energia incidente mais elevada entre as duas condições avaliadas: utilizando a corrente de arco intermediária e a corrente de arco reduzida.

Uma vez atendidas as condições de aplicação do modelo da IEEE Std 1584, deve-se proceder conforme os passos descritos nas seções seguintes, considerando cada um dos cenários especificados.

#### 4.4 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS

Como ainda não foram realizados ensaios que possibilitem a elaboração de modelos específicos para arcos fase-terra internos a painéis elétricos, os cálculos devem recorrer às equações já estabelecidas para sistemas trifásicos. Nesse procedimento, é necessário realizar algumas adaptações para refletir as características do arco fase-terra (ABNT, 2025):

- Substituir a tensão entre fases pela tensão fase-terra;
- Substituir a corrente de falta trifásica pela corrente de falta fase-terra;
- Substituir a distância entre fases pela distância fase-terra.

Ressalta-se que, ao aplicar essas adaptações, os resultados obtidos tendem a ser conservativos, ou seja, eles provavelmente superestimam a energia incidente e a corrente do arco. Essa abordagem garante uma margem de segurança, uma vez que ainda não existem dados experimentais específicos para validar modelos de arcos internos fase-terra.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO IEEE 1584-2018 PARA ESTIMATIVA DA ENERGIA INCIDENTE

A norma IEEE Std 1584-2018 define procedimentos específicos para o cálculo da corrente de arco, energia incidente e distância-limite de arco em diferentes faixas de tensão. Para sistemas trifásicos de 208 V a 600 V, utiliza-se o nível de referência de 600 V, enquanto para sistemas entre 600 V e 15 kV, os valores são obtidos por interpolação entre os níveis de 600 V, 2.700 V e 14.300 V.

### 5.1 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 600 V E 15.000 V

Para sistemas trifásicos com tensão nominal entre 600 V e 15.000 V, a IEEE Std 1584 estabelece um procedimento de cálculo que utiliza a interpolação dos valores das grandezas de interesse, previamente calculados para três níveis de tensão específicos — 600 V, 2.700 V e 14.300 V — correspondentes a faixas típicas de sistemas elétricos industriais e comerciais. A seguir, apresenta-se o procedimento necessário para calcular os valores intermediários da corrente de arco, da energia incidente e da distância-limite de arco nessas condições.

### 5.2 CORRENTE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 600 V E 15.000 V

Os valores intermediários da corrente de arco para os níveis de tensão de referência são obtidos a partir da Equação 6.

$$I_{Voc} = 10^{[k_1 + k_2 \cdot \log(I_{bf}) + k_3 \cdot \log(G)]} \cdot (k_4 \cdot I_{bf}^6 + k_5 \cdot I_{bf}^5 + k_6 \cdot I_{bf}^4 + k_7 \cdot I_{bf}^3 + k_8 \cdot I_{bf}^2 + k_9 \cdot I_{bf} + k_{10}) \quad (6)$$

Sendo:

- $I_{600}$ ,  $I_{2700}$  e  $I_{14300}$  são as correntes de arco médias para  $V_{oc}$  igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente (kA);
- $I_{bf}$  é a corrente de falta trifásica franca (kA);
- $G$  é a distância entre os eletrodos (mm).

Os coeficientes  $k_1$  a  $k_{10}$  apresentados na Equação 6 podem ser obtidos de acordo com a configuração dos eletrodos do painel e o nível de tensão de operação, conforme indicado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Coeficientes para o cálculo da corrente de arco intermediária 1

| Configuração dos eletrodos | $V_{oc}$ (V) | $k_1$     | $k_2$ | $k_3$   | $k_4$      | $k_5$      |
|----------------------------|--------------|-----------|-------|---------|------------|------------|
| VCB                        | 600          | -0,04287  | 1,035 | -0,083  | 0          | 0          |
|                            | 2700         | 0,0065    | 1,001 | -0,024  | -1,557E-12 | 4,556E-10  |
|                            | 14300        | 0,005795  | 1,015 | -0,011  | -1,557E-12 | 4,556E-10  |
| VCBB                       | 600          | -0,017432 | 0,98  | -0,05   | 0          | 0          |
|                            | 2700         | 0,002823  | 0,995 | -0,0125 | 0          | -9,200E-11 |
|                            | 14300        | 0,014827  | 1,01  | -0,01   | 0          | -9,200E-11 |
| HCB                        | 600          | 0,054922  | 0,988 | -0,11   | 0          | 0          |
|                            | 2700         | 0,001011  | 1,003 | -0,0249 | 0          | 0          |
|                            | 14300        | 0,008693  | 0,999 | -0,02   | 0          | -5,040E-11 |
| VOA                        | 600          | 0,043785  | 1,04  | -0,18   | 0          | 0          |
|                            | 2700         | -0,02395  | 1,006 | -0,0188 | -1,557E-12 | 4,556E-10  |
|                            | 14300        | 0,005371  | 1,010 | -0,029  | -1,557E-12 | 4,556E-10  |
| HOA                        | 600          | 0,111147  | 1,008 | -0,24   | 0          | 0          |
|                            | 2700         | 0,000435  | 1,006 | -0,0380 | 0          | 0          |
|                            | 14300        | 0,000904  | 0,999 | -0,02   | 0          | 0          |

Fonte: (ABNT, 2025).

Tabela 6 – Coeficientes para o cálculo da corrente de arco intermediária 2

| Configuração dos eletrodos | $V_{oc}$ (V) | $k_6$      | $k_7$      | $k_8$      | $k_9$     | $k_{10}$ |
|----------------------------|--------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| VCB                        | 600          | -4,783E-09 | 1,962E-06  | -0,000229  | 0,003141  | 0,9729   |
|                            | 2700         | -4,186E-08 | 8,346E-07  | 5,482E-05  | -0,003191 | 0,9729   |
|                            | 14300        | -4,186E-08 | 8,346E-07  | 5,482E-05  | -0,003191 | 1,013    |
| VCBB                       | 600          | -5,767E-09 | 2,542E-06  | -0,00034   | 0,01187   | 0,98250  |
|                            | 2700         | 2,901E-08  | -3,262E-06 | 0,0001569  | -0,004003 | 0,98250  |
|                            | 14300        | 2,901E-08  | -3,262E-06 | 0,0001569  | -0,004003 | 0,97250  |
| HCB                        | 600          | -5,382E-09 | 2,316E-06  | -0,000302  | 0,0091    | 0,98810  |
|                            | 2700         | 4,859E-10  | -1,814E-07 | -9,128E-06 | -0,0007   | 0,98390  |
|                            | 14300        | 2,233E-08  | -3,046E-06 | 0,000116   | -0,001145 | 1,092    |
| VOA                        | 600          | -4,783E-09 | 1,962E-06  | -0,000229  | 0,003141  | 0,9729   |
|                            | 2700         | -4,186E-08 | 8,346E-07  | 5,482E-05  | -0,003191 | 0,9729   |
|                            | 14300        | -4,186E-08 | 8,346E-07  | 5,482E-05  | -0,003191 | 1,1      |
| HOA                        | 600          | -3,895E-09 | 1,641E-06  | -0,000197  | 0,002615  | 0,9981   |
|                            | 2700         | 7,859E-10  | -1,914E-07 | -9,128E-06 | -0,0007   | 0,9981   |
|                            | 14300        | 7,859E-10  | -1,914E-07 | -9,128E-06 | -0,0007   | 0,9729   |

Fonte: (ABNT, 2025).

O valor final da corrente de arco é obtido por meio da interpolação dos três valores de corrente calculados anteriormente, correspondentes aos níveis de tensão de referência. A interpolação é realizada utilizando as Equações 7, 8 e 9, conforme apresentado a seguir.

$$I_1 = \left( \frac{I_{2700} - I_{600}}{2,1} \right) \cdot (V_{oc} - 2,7) + I_{2700} \quad (7)$$

$$I_2 = \left( \frac{I_{14300} - I_{2700}}{11,6} \right) \cdot (V_{oc} - 14,3) + I_{14300} \quad (8)$$

$$I_3 = \frac{I_1 \cdot (2,7 - V_{oc}) + I_2 \cdot (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (9)$$

Sendo:

- $I_1$  é o primeiro termo da interpolação (kA);
- $I_2$  é o segundo termo da interpolação (kA);
- $I_3$  é o terceiro termo da interpolação (kA);
- $V_{oc}$  é a tensão nominal do sistema (kV).

A partir dos termos da interpolação, determina-se a corrente de arco intermediária considerando a tensão nominal do sistema. Quando  $V_{oc}$  estiver entre 0,6 kV e 2,7 kV, o valor de  $I_{arc}$  deve ser calculado a partir da Equação 10. Para valores de  $V_{oc}$  superiores a 2,7 kV, a determinação de  $I_{arc}$  é feita a partir da Equação 11.

$$I_{arc} = I_3 \quad (10)$$

$$I_{arc} = I_2 \quad (11)$$

### 5.3 ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 600 V E 15.000 V

Os valores intermediários da energia incidente para os níveis de tensão de referência são obtidos a partir das Equações 12, 13, 14, 15 e 16.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{\left( k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{600}}{A_1} + A_2 \right)} \quad (12)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{\left( k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{2700}}{A_1} + A_2 \right)} \quad (13)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{\left( k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{14300}}{A_1} + A_2 \right)} \quad (14)$$

$$A_1 = k_4 \cdot I_{bf}^7 + k_5 \cdot I_{bf}^6 + k_6 \cdot I_{bf}^5 + k_7 \cdot I_{bf}^4 + k_8 \cdot I_{bf}^3 + k_9 \cdot I_{bf}^2 + k_{10} \cdot I_{bf} \quad (15)$$

$$A_2 = k_{11} \cdot \log(I_{bf}) + k_{12} \cdot \log(D) + k_{13} \cdot \log(I_{Voc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \quad (16)$$

Sendo:

- $E_{600}$ ,  $E_{2700}$  e  $E_{14300}$  são os valores da energia incidente  $V_{oc}$  igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente ( $J/cm^2$ );
- $I_{600}$ ,  $I_{2700}$  e  $I_{14300}$  são as correntes de arco médias para  $V_{oc}$  igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente (kA);
- $I_{Voc}$  é a corrente de arco calculada para o nível de tensão de referência;
- $T$  é o tempo de duração do arco (ms);
- $G$  é a distância entre os eletrodos (mm);
- $I_{bf}$  é a corrente de falta trifásica franca (kA);
- $D$  é a distância de trabalho (mm);
- $CF$  é o fator de correção do tamanho do invólucro.

Os coeficientes  $k_1$  a  $k_{13}$  apresentados nas Equações 12, 13, 14, 15 e 16 podem ser obtidos de acordo com a configuração dos eletrodos do painel, conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Coeficientes para o cálculo dos valores intermediários da energia incidente e da distância limite de arco 1

| Configuração dos eletrodos | $k_1$    | $k_2$ | $k_3$     | $k_4$      | $k_5$      | $k_6$      | $k_7$      |
|----------------------------|----------|-------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| <b>600 V</b><br>VCB        | 0,753364 | 0,566 | 1,752636  | 0          | 0          | -4,783E-09 | 1,962E-06  |
| <b>600 V</b><br>VCBB       | 3,068459 | 0,26  | -0,098107 | 0          | 0          | -5,767E-09 | 2,524E-06  |
| <b>600 V</b><br>HCB        | 4,073745 | 0,344 | -0,370259 | 0          | 0          | -5,382E-09 | 2,316E-06  |
| <b>600 V</b><br>VOA        | 0,679294 | 0,746 | 1,222636  | 0          | 0          | -4,783E-09 | 1,962E-06  |
| <b>600 V</b><br>HOA        | 3,470417 | 0,465 | -0,261863 | 0          | 0          | -3,895E-09 | 1,641E-06  |
| <b>2700 V</b><br>VCB       | 2,40021  | 0,165 | 0,354202  | -1,557E-12 | 4,556E-10  | -4,186E-08 | 8,346E-07  |
| <b>2700 V</b><br>VCBB      | 3,870592 | 0,185 | -0,736618 | 0          | -9,204E-11 | 2,901E-08  | -3,262E-06 |
| <b>2700 V</b><br>HCB       | 3,486391 | 0,177 | -0,193101 | 0          | 0          | 4,859E-10  | -1,814E-07 |

| Configuração dos eletrodos | k <sub>1</sub> | k <sub>2</sub> | k <sub>3</sub> | k <sub>4</sub> | k <sub>5</sub> | k <sub>6</sub> | k <sub>7</sub> |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>2700 V</b><br>VOA       | 3,880724       | 0,105          | -1,906033      | -1,557E-12     | 4,556E-10      | -4,186E-08     | 8,346E-07      |
| <b>2700 V</b><br>HOA       | 3,616266       | 0,149          | -0,761561      | 0              | 0              | 7,859E-10      | -1,914E-07     |
| <b>14300 V</b><br>VCB      | 3,825917       | 0,11           | -0,999749      | -1,557E-12     | 4,556E-10      | -4,186E-08     | 8,346E-07      |
| <b>14300 V</b><br>VCBB     | 3,644309       | 0,215          | -0,585522      | 0              | -9,204E-11     | 2,901E-08      | -3,262E-06     |
| <b>14300 V</b><br>HCB      | 3,044516       | 0,125          | 0,245106       | 0              | -5,043E-11     | 2,233E-08      | 3,046E-06      |
| <b>14300 V</b><br>VOA      | 3,405454       | 0,12           | -0,93245       | -1,557E-12     | 4,556E-10      | -4,186E-08     | 8,346E-07      |
| <b>14300 V</b><br>HOA      | 2,04049        | 0,177          | 1,005092       | 0              | 0              | 7,859E-10      | -1,914E-07     |

Fonte: (ABNT, 2025).

Tabela 8 – Coeficientes para o cálculo dos valores intermediários da energia incidente e da distância limite de arco 2

| Configuração dos eletrodos | k <sub>8</sub> | k <sub>9</sub> | k <sub>10</sub> | k <sub>11</sub> | k <sub>12</sub> | k <sub>13</sub> |
|----------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>600 V</b><br>VCB        | -0,000229      | 0,003141       | 1,092           | 0               | -1,598          | 0,957           |
| <b>600 V</b><br>VCBB       | -0,00034       | 0,01187        | 1,013           | -0,06           | -1,809          | 1,19            |
| <b>600 V</b><br>HCB        | -0,000302      | 0,0091         | 0,9725          | 0               | -2,03           | 1,036           |
| <b>600 V</b><br>VOA        | -0,000229      | 0,003141       | 1,092           | 0               | -1,598          | 0,997           |
| <b>600 V</b><br>HOA        | -0,000197      | 0,002615       | 1,1             | 0               | -1,99           | 1,04            |
| <b>2700 V</b><br>VCB       | 5,482E-05      | -0,003191      | 0,9729          | 0               | -1,569          | 0,9778          |
| <b>2700 V</b><br>VCBB      | 0,0001569      | -0,004003      | 0,9825          | 0               | -1,742          | 1,09            |
| <b>2700 V</b><br>HCB       | -9,128E-06     | -0,0007        | 0,9881          | 0,027           | -1,723          | 1,055           |
| <b>2700 V</b><br>VOA       | 5,482E-05      | -0,003191      | 0,9729          | 0               | -1,515          | 1,115           |
| <b>2700 V</b><br>HOA       | -9,128E-06     | -0,0007        | 0,9981          | 0               | -1,639          | 1,078           |
| <b>14300 V</b><br>VCB      | 5,482E-05      | -0,003191      | 0,9729          | 0               | -1,568          | 0,99            |
| <b>14300 V</b><br>VCBB     | 0,0001569      | -0,004003      | 0,9825          | 0               | -1,677          | 1,06            |
| <b>14300 V</b><br>HCB      | 0,000116       | -0,001145      | 0,9839          | 0               | -1,655          | 1,084           |
| <b>14300 V</b><br>VOA      | 5,482E-05      | -0,003191      | 0,9729          | 0               | -1,534          | 0,979           |
| <b>14300 V</b><br>HOA      | -9,128E-06     | -0,0007        | 0,9981          | -0,05           | -1,633          | 1,151           |

Fonte: (ABNT, 2025).

A determinação da duração do arco elétrico deve ser realizada a partir do tempo de atuação dos dispositivos de proteção do sistema, considerando sempre o equipamento instalado a montante do ponto de análise. Esse tempo corresponde à soma do tempo de sensibilização da proteção com o tempo de abertura física do respectivo disjuntor.

Na prática, são utilizados relés de sobrecorrente associados a disjuntores, além de fusíveis e disjuntores termomagnéticos. Para fusíveis, deve-se adotar o tempo de interrupção informado pelo fabricante ou, na ausência desse dado, estimar o tempo total de atuação corrigindo o tempo médio de fusão: acrescenta-se 15% para valores de até 0,03 s ou 10% para tempos superiores. Nos disjuntores operados por relés externos, deve-se somar o tempo de sensibilização do relé ao tempo de abertura do disjuntor (QUEIROZ, 2012).

Na Tabela 9, são apresentados os valores de tempo de abertura de disjuntores recomendados pela IEEE Std 1584, a serem utilizados como referência quando não for possível consultar os dados específicos do fabricante. Em todos os casos, a norma recomenda priorizar informações obtidas em campo, com o auxílio de softwares especializados ou de catálogos técnicos, a fim de assegurar maior precisão na determinação da duração do arco e, conseqüentemente, no cálculo da energia incidente e da severidade do risco (QUEIROZ, 2012).

Tabela 9 – Tempos de abertura de referência para disjuntores de diferentes modelos e níveis de tensão

| <b>Tipo de disjuntor e nível de tensão de operação</b>                      | <b>Tempo de abertura [ciclos, 60 Hz]</b> | <b>Tempo de abertura [s]</b> |
|---|--|------------------------------|
| Baixa tensão (< 1kV), caixa moldada. Relé de proteção intrínseco            | 1,5                                      | 0,025                        |
| Baixa tensão (< 1kV), caixa isolada. Relé de proteção intrínseco ou externo | 3  | 0,05                         |
| Média tensão (1 a 35kV)   | 5  | 0,08                         |
| Alta tensão (> 35kV)  | 8  | 0,13                         |

Fonte: (QUEIROZ, 2012).

O valor final da energia incidente é obtido por meio da interpolação dos três valores de energia calculados anteriormente, correspondentes aos níveis de tensão

de referência. A interpolação é realizada utilizando as Equações 17, 18 e 19, conforme apresentado a seguir.

$$E_1 = \left( \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \right) \cdot (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (17)$$

$$E_2 = \left( \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \right) \cdot (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (18)$$

$$E_3 = \frac{E_1 \cdot (2,7 - V_{oc}) + E_2 \cdot (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (19)$$

Sendo:

- $E_1$  é o primeiro termo da interpolação ( $J/cm^2$ );
- $E_2$  é o segundo termo da interpolação ( $J/cm^2$ );
- $E_3$  é o terceiro termo da interpolação ( $J/cm^2$ );
- $V_{oc}$  é a tensão nominal do sistema (kV).

A partir dos termos da interpolação, determina-se a energia incidente intermediária considerando a tensão nominal do sistema. Quando  $V_{oc}$  estiver entre 0,6 kV e 2,7 kV, o valor de  $E$  deve ser calculado a partir da Equação 20. Para valores de  $V_{oc}$  superiores a 2,7 kV, a determinação de  $E$  é feita a partir da Equação 21.

$$E = E_3 \quad (20)$$

$$E = E_2 \quad (21)$$

Para converter a energia incidente de joules por centímetro quadrado ( $J/cm^2$ ) para calorias por centímetro quadrado ( $cal/cm^2$ ), utiliza-se o fator de conversão entre as unidades de energia. Considerando que  $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$ , basta dividir o valor em  $J/cm^2$  por 4,184 para obter o equivalente em  $cal/cm^2$  (ABNT, 2025).

#### 5.4 DISTÂNCIA LIMITE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 600 V E 15.000 V

Os valores intermediários da distância limite de arco para os níveis de tensão de referência são obtidos a partir da Equações 22, 23, 24, 25 e 26.

$$DLA_{600} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{600} + A_4}{A_3}}{-k_{12}} \right) \quad (22)$$

$$DLA_{2700} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{2700} + A_4}{A_3}}{-k_{12}} \right) \quad (23)$$

$$DLA_{14300} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{14300} + A_4}{A_3}}{-k_{12}} \right) \quad (24)$$

$$A_3 = k_4 \cdot I_{bf}^7 + k_5 \cdot I_{bf}^6 + k_6 \cdot I_{bf}^5 + k_7 \cdot I_{bf}^4 + k_8 \cdot I_{bf}^3 + k_9 \cdot I_{bf}^2 + k_{10} \cdot I_{bf} \quad (25)$$

$$A_4 = k_{11} \cdot \log(I_{bf}) + k_{13} \cdot \log(I_{Voc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{T}\right) \quad (26)$$

Sendo:

- $DLA_{600}$ ,  $DLA_{2700}$  e  $DLA_{14300}$  são as distâncias limite de arco intermediárias para  $V_{oc}$  igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente (mm);
- $I_{600}$ ,  $I_{2700}$  e  $I_{14300}$  são as correntes de arco médias para  $V_{oc}$  igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente (kA);
- $G$  é a distância entre os eletrodos (mm);
- $I_{bf}$  é a corrente de falta trifásica franca (kA);
- $I_{Voc}$  é a corrente de arco calculada para o nível de tensão de referência;
- $CF$  é o fator de correção do tamanho do invólucro;
- $T$  é o tempo de duração do arco (ms).

Os coeficientes  $k_1$  a  $k_{13}$  apresentados nas Equações 22, 23, 24, 25 e 26 podem ser obtidos de acordo com a configuração dos eletrodos do painel, conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8.

O valor final da distância limite de arco é obtido por meio da interpolação dos três valores de distância calculados anteriormente, correspondentes aos níveis de tensão de referência. A interpolação é realizada utilizando as Equações 27, 28 e 29, conforme apresentado a seguir.

$$DLA_1 = \left( \frac{DLA_{2700} - DLA_{600}}{2,1} \right) \cdot (V_{oc} - 2,7) + DLA_{2700} \quad (27)$$

$$DLA_2 = \left( \frac{DLA_{14300} - DLA_{2700}}{11,6} \right) \cdot (V_{oc} - 14,3) + DLA_{14300} \quad (28)$$

$$DLA_3 = \frac{DLA_1 \cdot (2,7 - V_{oc}) + DLA_2 \cdot (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (29)$$

Sendo:

- $DLA_1$  é o primeiro termo da interpolação (mm);
- $DLA_2$  é o segundo termo da interpolação (mm);
- $DLA_3$  é o terceiro termo da interpolação (mm);
- $V_{oc}$  é a tensão nominal do sistema (kV).

A partir dos termos da interpolação, determina-se a distância limite de arco intermediária considerando a tensão nominal do sistema. Quando  $V_{oc}$  estiver entre 0,6 kV e 2,7 kV, o valor de DLA deve ser calculado a partir da Equação 30. Para valores de  $V_{oc}$  superiores a 2,7 kV, a determinação de DLA é feita a partir da Equação 31.

$$DLA = DLA_3 \quad (26)$$

$$DLA = DLA_2 \quad (27)$$

## 5.5 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V

Para sistemas trifásicos com tensão nominal entre 208 V e 600 V, a IEEE Std 1584 determina que os valores das grandezas de interesse sejam calculados considerando apenas o nível de tensão de referência de 600 V. A seguir, descreve-se o procedimento para determinar os valores intermediários da corrente de arco, da energia incidente e da distância-limite de arco nessas condições.

## 5.6 CORRENTE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V

Para sistemas com tensão de operação entre 208 V e 600 V, o valor intermediário da corrente de arco deve ser calculado apenas para a tensão de referência de 600 V, utilizando a Equação 6.

O valor final da corrente de arco é obtido aplicando-se a Equação 32.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{I_{600}} - \frac{0,36 - V_{oc}^2}{0,6 \cdot I_{bf}}\right)}} \quad (32)$$

Sendo:

- $I_{arc}$  é a corrente de arco intermediária final (kA);
- $V_{oc}$  é a tensão nominal do sistema (kV);
- $I_{600}$  é a corrente de arco intermediária para 600 V (kA);
- $I_{bf}$  é a corrente de falta franca para faltas trifásicas (kA).

## 5.7 ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V

O valor intermediário da energia incidente para o nível de tensão de referência é obtido a partir da Equação 33.

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{\left(k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arc600} + A_6}{A_5}\right)} \quad (33)$$

$$A_5 = k_4 \cdot I_{bf}^7 + k_5 \cdot I_{bf}^6 + k_6 \cdot I_{bf}^5 + k_7 \cdot I_{bf}^4 + k_8 \cdot I_{bf}^3 + k_9 \cdot I_{bf}^2 + k_{10} \cdot I_{bf} \quad (34)$$

$$A_6 = k_{11} \cdot \log(I_{bf}) + k_{12} \cdot \log(D) + k_{13} \cdot \log(I_{arc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \quad (35)$$

Sendo:

- $E_{\leq 600}$  é o valor da energia incidente para  $V_{oc}$  menor ou igual a 600 V ( $J/cm^2$ );
- $T$  é o tempo de duração do arco (ms);
- $G$  é a distância entre os eletrodos (mm);
- $I_{arc\_600}$  é a corrente de arco intermediária para  $V_{oc}$  menor ou igual a 600 V (kA);
- $I_{arc}$  é a corrente de arco (kA);
- $I_{bf}$  é a corrente de falta trifásica franca (kA);
- $D$  é a distância de trabalho (mm);
- $CF$  é o fator de correção do tamanho do invólucro.

Os coeficientes  $k_1$  a  $k_{13}$  apresentados na Equação 29 podem ser obtidos de acordo com a configuração dos eletrodos do painel, conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8.

O valor final da energia incidente corresponde ao valor intermediário de  $E$  para tensões de operação iguais ou inferiores a 600 V, conforme indicado na Equação 36.

$$E = E_{\leq 600} \quad (36)$$

## 5.8 DISTÂNCIA LIMITE DE ARCO INTERMEDIÁRIA PARA TENSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE 208 V E 600 V

O valor intermediário da distância limite de arco para o nível de tensão de referência é obtido a partir da Equação 37.

$$DLA_{\leq 600} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arc\_600} + A_8}{A_7}}{-k_{12}} \right) \quad (37)$$

$$A_7 = k_4 \cdot I_{bf}^7 + k_5 \cdot I_{bf}^6 + k_6 \cdot I_{bf}^5 + k_7 \cdot I_{bf}^4 + k_8 \cdot I_{bf}^3 + k_9 \cdot I_{bf}^2 + k_{10} \cdot I_{bf} \quad (38)$$

$$A_8 = k_{11} \cdot \log(I_{bf}) + k_{13} \cdot \log(I_{arc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{T}\right) \quad (39)$$

Sendo:

- DLA<sub>600</sub> é a distâncias limite de arco intermediária para V<sub>oc</sub> menor ou igual a 600 V (mm);
- G é a distância entre os eletrodos (mm);
- I<sub>arc\_600</sub> é a corrente de arco intermediária para V<sub>oc</sub> menor ou igual a 600 V (kA);
- I<sub>arc</sub> é a corrente de arco (kA);
- I<sub>bf</sub> é a corrente de falta trifásica franca (kA);
- CF é o fator de correção do tamanho do invólucro;
- T é o tempo de duração do arco (ms).

Os coeficientes k<sub>1</sub> a k<sub>13</sub> apresentados nas Equações 37, 38 e 39 podem ser obtidos de acordo com a configuração dos eletrodos do painel, conforme mostrado nas Tabelas 7 e 8.

O valor final da distância limite de arco corresponde ao valor intermediário de DLA para tensões de operação iguais ou inferiores a 600 V, conforme indicado na Equação 40.

$$DLA = DLA_{\leq 600} \quad (40)$$

## 5.9 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE A PARTIR DA CORRENTE DE ARCO REDUZIDA

Após determinar a energia incidente e a distância-limite de arco com base no valor máximo da corrente de arco, deve-se proceder ao recálculo dessas variáveis para a corrente de arco reduzida. O objetivo dessa etapa é avaliar se a redução da corrente de arco altera o tempo de atuação dos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, o nível de energia incidente no ponto analisado (ABNT, 2025).

A corrente de arco reduzida é obtida aplicando-se um fator de correção à corrente de arco intermediária. O valor desse fator varia de acordo com o nível de

tensão do equipamento e o tipo de configuração dos eletrodos, conforme indicado na Equação 41. Na Tabela 10, são apresentados os valores dos coeficientes a serem utilizados no cálculo do fator de correção.

$$VarC_f = k_1 \cdot V_{oc}^6 + k_2 \cdot V_{oc}^5 + k_3 \cdot V_{oc}^4 + k_4 \cdot V_{oc}^3 + k_5 \cdot V_{oc}^2 + k_6 \cdot V_{oc} + k_7 \quad (41)$$

Sendo:

- $VarC_f$  é o fator de correção da variação da corrente de arco;
- $V_{oc}$  é a tensão nominal do sistema (kV).

A partir desses dados, determina-se a corrente de arco mínima a partir da Equação 42.

$$I_{min} = I_{arc}(1 - 0,5 \cdot VarC_f) \quad (42)$$

Sendo:

- $I_{min}$  é a corrente de arco reduzida (kA);
- $I_{arc}$  corresponde ao valor final da corrente de arco para sistemas com tensão nominal entre 208 V e 600 V ou aos valores intermediários  $I_{600}$ ,  $I_{2700}$  e  $I_{14300}$  para sistemas com tensão nominal entre 600 V e 15.000 V (kA);
- $VarC_f$  é o fator de correção da variação da corrente de arco.

Após estimar a energia incidente e a distância-limite de arco utilizando a corrente de arco reduzida, esses resultados devem ser comparados com os obtidos na estimativa realizada com a corrente de arco intermediária. Os valores finais a serem adotados no estudo serão aqueles que apresentarem os maiores resultados entre as duas análises.

Tabela 10 – Coeficientes para a determinação do fator de correção da corrente de arco elétrico

| Configuração dos eletrodos | $k_1$     | $k_2$       | $k_3$       | $k_4$      | $k_5$    | $k_6$    | $k_7$   |
|----------------------------|-----------|-------------|-------------|------------|----------|----------|---------|
| VCB                        | 0         | -1,4269E-06 | 0,000083137 | -0,0019382 | 0,022366 | -0,12645 | 0,30266 |
| VCBB                       | 1,138E-06 | -6,0287E-05 | 0,0012758   | -0,013778  | 0,080217 | -0,24066 | 0,33524 |

| <b>Configuração dos eletrodos</b> | <b>k<sub>1</sub></b> | <b>k<sub>2</sub></b> | <b>k<sub>3</sub></b> | <b>k<sub>4</sub></b> | <b>k<sub>5</sub></b> | <b>k<sub>6</sub></b> | <b>k<sub>7</sub></b> |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| HCB                               | 0                    | -3,097E-06           | 0,00016405           | -0,0033609           | 0,033308             | -0,16182             | 0,34627              |
| VOA                               | 9,561E-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: (ABNT, 2025).

## **6 MEDIDAS PARA REDUÇÃO DO RISCO DE EXPOSIÇÃO A ARCOS ELÉTRICOS**

A seleção dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) contra o risco de arco elétrico constitui uma etapa essencial para assegurar a proteção dos trabalhadores que atuam em sistemas elétricos energizados. A norma NFPA 70E, estabelece diretrizes para a análise e o controle desse risco, definindo os níveis de proteção e os requisitos de vestimentas conforme a energia incidente e a natureza da atividade executada (QUEIROZ, 2012).

### **6.1 CATEGORIAS DE VESTIMENTAS PARA OPERAÇÕES FRENTE AO RISCO DE ARCO ELÉTRICO**

As vestimentas de proteção contra arco elétrico são confeccionadas com tecidos especiais, projetados para reduzir o risco de queimaduras graves em trabalhadores expostos a esse tipo de acidente, conforme ilustrado na Figura 9. Em 1999, a ASTM instituiu o indicador ATPV (Arc Thermal Protection Value) como parâmetro para avaliar o desempenho desses tecidos diante da exposição a arcos elétricos. De acordo com a norma ASTM F1959-06, o ATPV corresponde à quantidade de energia incidente sobre um material — ou sobre um sistema de multicamadas — que resulta em uma probabilidade de 50% de transferência de calor suficiente para causar queimaduras de segundo grau na pele humana, conforme previsto pela curva de Stoll, utilizada para determinar o limiar de ocorrência desse tipo de lesão (BOTTARO, 2016).

Figura 9 – Exemplo de vestimenta utilizada para proteção contra arco elétrico



Fonte: (BOTTARO, 2016).

A determinação do ATPV é realizada por meio de ensaios específicos, nos quais o material é submetido a arcos elétricos sob diferentes condições de corrente e tempo de exposição. Os resultados obtidos são, então, classificados em cinco categorias de risco, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Categorias de Risco e Vestimentas de Proteção contra Arco Elétrico segundo a NFPA 70E

| Categoria de Risco | Vestimenta de proteção e EPI  |
|--------------------|---|
| 0                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vestimenta de proteção, fibra natural não tratada (algodão não tratado, lã, nylon seda ou combinações), com gramatura mínima de 152 g/cm<sup>2</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Camisas (manga comprida)</li> <li>○ Calças (compridas)</li> </ul> </li> <li>• Equipamentos de proteção           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Óculos de segurança</li> <li>○ Protetor auricular</li> <li>○ Luvas de couro, se necessário</li> </ul> </li> </ul>  |
| 1                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm<sup>2</sup>.           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Camisa e calça compridas ou macacão resistentes a arco elétrico</li> <li>○ Protetor facial ou capuz carrasco resistente a arco</li> </ul> </li> <li>• Equipamentos de proteção           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Capacete; Óculos de segurança</li> <li>○ Protetor auricular; Luvas de couro</li> <li>○ Calçado de segurança de couro, se necessário</li> </ul> </li> </ul> |

| Categoria de Risco | Vestimenta de proteção e EPI   |
|--------------------|--|
| 2                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm<sup>2</sup>.               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Camisa e calça compridas ou macacão resistentes a arco elétrico</li> <li>○ Protetor facial ou capuz carrasco resistente a arco</li> <li>○ Jaqueta resistente a arco elétrico, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário.</li> </ul> </li> <li>• Equipamentos de proteção               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Óculos de segurança</li> <li>○ Protetor auricular</li> <li>○ Luvas de couro</li> </ul> </li> </ul> <p>Calçado de segurança de couro, se necessário</p>   |
| 3                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 25 cal/cm<sup>2</sup>.               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Camisa e calça compridas ou macacão resistentes a arco elétrico</li> <li>○ Protetor facial ou capuz carrasco resistente a arco</li> <li>○ Jaqueta resistente a arco elétrico, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário.</li> <li>○ Luvas resistentes a arco</li> </ul> </li> <li>• Equipamentos de proteção               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Óculos de segurança</li> <li>○ Protetor auricular</li> <li>○ Luvas de couro, se necessário</li> </ul> </li> </ul> <p>Calçado de segurança de couro, se necessário</p> |
| 4                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 40 cal/cm<sup>2</sup>.               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Camisa e calça compridas ou macacão resistentes a arco elétrico</li> <li>○ Protetor facial ou capuz carrasco resistente a arco</li> <li>○ Jaqueta resistente a arco elétrico, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário.</li> <li>○ Luvas resistentes a arco</li> </ul> </li> <li>• Equipamentos de proteção</li> </ul>   |

Fonte: (QUEIROZ 2012).

A escolha das vestimentas e dos EPIs pode ser realizada de duas formas: (i) por meio do estudo de energia incidente, que calcula a quantidade de energia térmica (em cal/cm<sup>2</sup>) à qual o trabalhador estará exposto. Nesse caso, as vestimentas

resistentes a arco e demais EPIs devem ser utilizados pelo trabalhador de acordo com o nível de energia incidente calculado; ou (ii) pela aplicação das categorias de risco, organizadas em tabelas da NFPA 70E. O método baseado em categorias constitui uma abordagem prática e simplificada, permitindo identificar rapidamente os níveis mínimos de proteção necessários, considerando o tipo de equipamento, a tensão envolvida e a atividade a ser realizada (QUEIROZ, 2012).

Importante destacar que, conforme a norma, atividades com energia incidente superior a 40 cal/cm<sup>2</sup> somente podem ser realizadas com a instalação desenergizada, uma vez que não existem EPIs capazes de garantir proteção eficaz para esse nível de exposição.

## 6.2 CUIDADOS E MANUTENÇÃO DAS VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO PARA ARCO ELÉTRICO

A NFPA 70E estabelece uma série de cuidados que devem ser observados em relação às vestimentas de proteção contra arco elétrico, abrangendo desde o armazenamento até o uso (ABNT, 2025). As principais recomendações são:

a) Inspeção: As vestimentas resistentes a arco elétrico devem ser inspecionadas antes de cada utilização. Qualquer vestimenta danificada ou contaminada de forma a comprometer o nível de proteção não deve ser utilizada. Também é vedado o uso de vestimentas ou EPIs contaminados com graxa, óleo ou quaisquer líquidos ou materiais inflamáveis.

b) Instruções do fabricante: As orientações fornecidas pelos fabricantes quanto à manutenção e ao cuidado das vestimentas devem ser rigorosamente seguidas pelos usuários.

c) Armazenamento: As vestimentas resistentes a arco devem ser armazenadas de modo a prevenir danos físicos, bem como deterioração causada por umidade, poeira ou outros agentes contaminantes, incluindo materiais inflamáveis ou combustíveis.

d) Limpeza e reparo: A lavagem das vestimentas resistentes a arco deve seguir as recomendações do fabricante, a fim de preservar seu nível de proteção. Caso seja necessário realizar reparos, devem ser utilizados os mesmos materiais empregados na fabricação original da vestimenta.

### 6.3 ETIQUETAS DE SINALIZAÇÃO DE ARCO ELÉTRICO

Segundo a Norma NFPA 70E, após determinar os parâmetros do estudo de energia incidente, é obrigatório confeccionar etiquetas para fixar nos equipamentos contemplados no estudo, permitindo a visualização clara dos níveis de energia e a correta seleção dos EPIs para inspeção, ajuste e manutenção (MARDEGAN, 2022). Essas etiquetas devem conter as seguintes informações:

- Tensão nominal do sistema;
- Uma das seguintes informações:
  - Energia incidente e a distância de trabalho correspondente;
  - Categoria de EPI especificada de acordo com as recomendações apresentadas na Tabela 11.

Na Figura 10 apresenta-se um exemplo de etiqueta de arco elétrico destinada à fixação em equipamentos incluídos em um estudo de energia incidente.

Figura 10 – Exemplo de etiqueta de sinalização de arco elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia prática e detalhada para o cálculo da energia incidente em instalações elétricas com tensão nominal de até 15 kV, fundamentada na norma ABNT NBR 17227 e nos modelos matemáticos estabelecidos pela IEEE Std 1584 (2018). O estudo evidenciou a criticalidade da avaliação dos riscos associados a arcos elétricos durante manobras e atividades de manutenção em sistemas energizados, propondo uma abordagem sistemática para quantificar a energia térmica liberada e, a partir disso, definir medidas de proteção robustas e adequadas para garantir a integridade física dos trabalhadores.

A metodologia desenvolvida percorreu todas as etapas necessárias para uma análise confiável. Iniciou-se com o levantamento minucioso dos dados da instalação e o cálculo das correntes de curto-circuito, passou pela caracterização das configurações físicas dos painéis (VCB, VCBB, HCB, VOA, HOA), pelo cálculo do fator de correção do tamanho do invólucro (CF) e pela determinação criteriosa das distâncias de trabalho. Detalharam-se os procedimentos específicos de cálculo para sistemas trifásicos nas faixas de 208 V a 600 V e 600 V a 15.000 V, incluindo a interpolação para tensões intermediárias e o tratamento da corrente de arco reduzida. Adicionalmente, discutiu-se a aplicação dos modelos propostos em sistemas monofásicos, visto que os modelos específicos para faltas fase-terra ainda não estão plenamente desenvolvidos e validados.

Conclui-se que a metodologia proposta se constitui como uma ferramenta valiosa e abrangente para engenheiros, técnicos e profissionais de segurança do trabalho, por facilitar o acesso a informações técnicas consolidadas e de aplicação prática imediata. A replicabilidade do método, embasada em normas nacionais e internacionais, viabiliza sua adoção em diferentes contextos da indústria, o que promove a padronização e a confiabilidade das análises.

Trabalhos futuros podem focar na automatização desses cálculos com o uso de softwares especializados e na atualização dos modelos com novos dados experimentais. A adoção desses procedimentos assegura a conformidade normativa e reflete o compromisso das organizações com uma cultura de segurança preventiva, protegendo colaboradores e o patrimônio físico das instalações elétricas. Esse esforço contínuo busca neutralizar riscos e promover ambientes de trabalho mais seguros.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17227: Arco elétrico — Gerenciamento de risco de energia incidente, precauções e métodos de cálculo.** Rio de Janeiro, 2025.

BOTTARO, Marcio; RAPOSO, Ivan Bueno. Proteção contra arco elétrico. O Setor Elétrico, 17 fev. 2016. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/protecao-contrar-arco-eletrico/>. Acesso em: 12/07/2025.

EATON. ARCON® 3G: **3rd Generation of Internal Arc-Fault Mitigation System.** [Brochura]. Eaton Industries (Austria) GmbH, Viena, Áustria, agosto de 2022. Publicação N° BR014037EN. Disponível em: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/low-voltage-power-distribution-controls-systems/arcon/eaton-arcon-arc-fault-protection-3rdgen-brochure-br014037en-en-us.pdf>. Acesso em: 31/05/2025.

ETAP – Electrical Transient Analysis Program (versão 24.0.3). Disponível em: <https://etap.com/solutions/arcflash>. Acesso em: 01/07/2025.

LEE, Ralph H. **The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns.** IEEE Transactions on Industry Applications, Wilmington, DE, v. IA-18, n. 3, p. 246-251, May/June 1982.

MARDEGAN, Cláudio Sérgio. Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais. 1. ed. Barueri, SP: Edição do autor, 2022.

QUEIROZ, Alan Rômulo Silva. **Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico.** 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

QUEIROZ, Alan Rômulo Silva; SENGER, Eduardo César. **A NFPA 70E e os requisitos de segurança para arco elétrico:** Seleção de EPIs. Revista O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/capitulo-iii-a-nfpa>

70e-e-os-requisitos-de-seguranca-para-arco-eletrico-selecao-de-epis/. Acesso em: 07/05/2025.

QUEIROZ, Alan Rómulo Silva; SENGER, Eduardo César. **A NFPA 70E e os métodos para cálculo de energia incidente**. Revista O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/capitulo-iv-a-nfpa-70e-e-os-metodos-para-calculo-de-energia-incidente/>. Acesso em: 07/05/2025.

QUEIROZ, Alan Rómulo Silva; SENGER, Eduardo César. **A IEEE 1584 e os Métodos para Cálculo de Energia Incidente e Distância Segura de Aproximação**. Revista O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: [https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed76\\_fasc\\_arco\\_eletrico\\_cap5.pdf](https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed76_fasc_arco_eletrico_cap5.pdf). Acesso em: 07/05/2025.