

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**FÁDUA COZAC GONÇALVES**

**ABORDAGEM SOBRE METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE  
ENERGIA INCIDENTE: UM ESTUDO DE CASO**

VITÓRIA  
2021

FÁDUA COZAC GONÇALVES

**ABORDAGEM SOBRE METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE  
EI: UM ESTUDO DE CASO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Fádua Cozac Gonçalves**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista

VITÓRIA  
2021

FÁDUA COZAC GONÇALVES

## **ABORDAGEM SOBRE METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE EI: UM ESTUDO DE CASO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Fádua Cozac Gonçalves**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

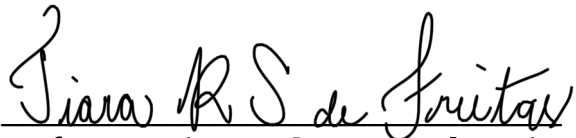
Aprovada em 07 de outubro de 2021.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



---

**Prof. Dr. Oureste Elias Batista**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**



---

**Profa. Dra. Tiara R. Smarssaro de Freitas**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinadora**



---

**Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

À minha mãe Waleska, meu padrasto Luiz Antônio e ao meu namorado Ramon.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Waleska, por todo o suporte prestado durante toda minha vida e por te sempre investido tempo e preocupação aos meus estudos. Agradeço também ao meu padrasto, Luiz Antônio, que sempre procurou me apoiar do jeito que pôde e sempre esteve disposto a discussões sobre todos os temas. E agradeço à minha avó, Maria Antonieta, por sempre estar presente e acreditar em mim independentemente da situação.

Um agradecimento especial ao meu namorado, Ramon, que está comigo há tanto tempo e sempre me apoiou e deu suporte em meus projetos, e me oferece tanto carinho em todos os momentos.

Agradeço aos meus colegas de curso que me acompanharam por todo o trajeto.

Agradeço a todos os que me ajudaram a crescer de alguma forma durante meu estágio e um agradecimento especial ao meu orientador de estágio Moisés Cabral pelo aprendizado, atenção e apoio nesse período em que pudemos trabalhar juntos e que me apresentou esse tema no qual me interessei tanto.

## RESUMO

Com a crescente automação de plantas e processos o número de instalações elétricas se torna cada vez maior, aumentando a urgência da aplicação de medidas de segurança e mitigação de riscos provenientes de sistemas elétricos. É de conhecimento geral que choques elétricos podem ser nocivos à saúde e muitas medidas de mitigação desses efeitos, inclusive a nível doméstico, são tomadas. Porém há outro risco que é muito relevante que não necessita de contato direto para ocorrer e pode causar queimaduras fatais: o arco elétrico. Neste trabalho foram apresentadas metodologias para cálculo de energia incidente e a aplicação delas para a caracterização de uma sala elétrica de controle. Para a realização desses cálculos foram utilizados os *softwares* PTW e ArcPro que calculam valores de EI para diversas faixas de tensão e seus resultados relativos ao barramento de alta tensão foram. Também foi aferido se os níveis de energia liberados por cada equipamento estão dentro dos limites impostos pelo regimento da empresa e qual a categoria de *Arch Thermal Performance Value* que os equipamentos de proteção individual devem oferecer.

Palavras-chave: Arco elétrico, energia incidente, ATPV, eletricidade, instalações elétricas

## **ABSTRACT**

With the growing automation of plants and processes, the number of electrical installations is increasing, increasing the urgency of applying security measures and mitigating risks arising from electrical systems. It is well known that electric shocks can be harmful to health and many measures to mitigate these effects, including at home, are taken. However, there is another risk that is very relevant that does not require direct contact to occur and can cause fatal burns: electric arc. In this work, methodologies for calculating incident energy and their application for the characterization of an electrical control room were presented. To perform these calculations, PTW and ArcPro software were used, which calculate EI values for different voltage ranges and their results for the high voltage bus were. It was also checked whether the energy levels released by each equipment are within the limits imposed by the company's bylaws and what category of Arch Thermal Performance Value that individual protection equipment must offer.

Keywords: Arc flash, incident energy, ATPV, electricity, electrical installations

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Temperatura da Pele x Tempo .....	15
Figura 2 – Ilustração do Fenômeno do Arco Elétrico.....	16
Figura 3 – EI e ATPV .....	19
Figura 4 – Distâncias limitadas radialmente das zonas de risco, controlada e livre com superfície de separação física adequada .....	29
Figura 5 – Hierarquia de controle de riscos.....	32
Figura 6 – Configurações de eletrodos segundo IEEE 1584 2018 .....	38
Figura 7 – Sala elétrica SC-26.....	53
Figura 8 – Sala elétrica de controle SC-26 A .....	54
Figura 9 – Sala elétrica de controle SC-26 B .....	54
Figura 10 – Sala elétrica de controle SC-26 C .....	55
Figura 11 – Sala elétrica de controle SC-26 D .....	55
Figura 12 – Relação X/R para transformadores .....	58
Figura 13 – Configurações de estudo PTW para metodologia IEEE 1584 .....	61
Figura 14 – Resultados para painel de 34,5 kV CJM-26H1 .....	62
Figura 15– Resultados para painel de 4,16 kV CJM-26A1.2 .....	62
Figura 16 – Resultados para painel de 4,16 kV CJM-26A1.1 .....	63
Figura 17 – Resultados para painéis de 4,16 kV CCM26A1, CCM26A2 e CCM26A3 .....	63
Figura 18 – Resultados para painel de 460 V CJM-26B1 .....	64
Figura 19 - Configurações de estudo PTW para metodologia NESC 2017 .....	65
Figura 20 – Resultados para painel de 34,5 kV CJM-26H1 NESC 2017.....	65
Figura 21 – Valores de calor x distância radial da fonte do arco .....	67
Figura 22– Fluxo de calor total gerado pelo <i>ArcPro</i> .....	68
Figura 23 – Exemplo de etiqueta .....	70



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – tabela de raios de delimitação de zonas de risco, controlada e livre .....	28
---	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas para determinação da EI.....	17
Quadro 2 – Quadro de seleção de método para cálculo de EI.....	18
Quadro 3 – Relação nível de EI e ATPV mínimo requerido para proteção .....	20
Quadro 4 – EPI especificados para cada local.....	31
Quadro 5 – Vestimentas apropriadas para cada faixa de EI .....	33
Quadro 6 – Limitações e parâmetros das metodologias citadas pela NFPA 70E.....	34
Quadro 7 – Classe do equipamento e distância típica entre condutores.....	43
Quadro 8 – Distância Típica de Trabalho.....	44
Quadro 9 – Parâmetros <i>ArcPro</i> .....	49
Quadro 10 – Valor de EI para tensões de 50V até 1000V .....	50
Quadro 11 – Relação Tensão de fase, corrente de falta, EI e número total de ciclos para extinção do arco (Parte 1).....	51
Quadro 12 – Relação Tensão de fase, corrente de falta, EI e número total de ciclos para extinção do arco (Parte 2).....	52
Quadro 13 – Relação de barramentos e tensão nominal.....	56
Quadro 14 – Relação de barramentos, motores e potências .....	56
Quadro 15 – Transformadores da planta e impedância de curto .....	58
Quadro 16 – Relés de proteção da planta .....	60
Quadro 17 – Resumo resultados de EI metodologia IEEE 1584.....	64
Quadro 18 – Comparação entre resultados IEEE 1584, NESC e <i>ArcPro</i> .....	68
Quadro 19 – Valores finais de EI e AFB para a SC-26.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abracopel	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
CA	Certificado de Aprovação
CIPA	Comissão Interna de Prevenção de Acidentes
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EI	Energia Incidente
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
NESC	<i>National Electrical Safety Code</i>
NFPA 70E	<i>National Fire Protection Association 70E</i>
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PTW	<i>Power Tools for Windows</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$AFB_1$	primeira interpolação para a distância de aproximação entre 600V e 2700V (mm)
$AFB_2$	segunda interpolação para distância de aproximação para tensão $V_{oc} > 2700V$ (mm)
$AFB_3$	terceira interpolação para distância de aproximação para tensão $V_{oc} < 2700V$ (mm)
$cal/cm^2$	Calorias por centímetro quadrado
$E_i$	energia incidente ( $cal/cm^2$ )
$D$	distância de trabalho (pol ou mm)
$E_{MA}$	máxima energia incidente para circuito ao ar livre ( $cal/cm^2$ )
$E_{MB}$	máxima energia incidente para circuito em cubículo ( $cal/cm^2$ )
$E_{Voc}$	energia incidente que pode ser calculada para valores de $V_{oc}$
$E_1$	primeira interpolação para energia incidente entre 600V e 2700V (kA)
$E_2$	segunda interpolação para energia incidente para tensão $V_{oc}$ acima de 2700V (kA)
$E_3$	terceira interpolação para energia incidente para tensão $V_{oc}$ abaixo de 2700V (kA)
$E(t)$	campo elétrico gerado pela coluna de arco ( $V/m$ )
$G$	distância típica entre condutores (mm)
$H_c$	calor convectivo total (J)
$H_T$	calor total (J)
$H_R$	calor irradiado (J)
$I_{arc_1}$	primeira corrente de arco para interpolação entre 600V e 2700V (kA)
$I_{arc_2}$	segunda corrente de arco para interpolação para tensão $V_{oc}$ acima de 2700V (kA)
$I_{arc_3}$	terceira corrente de arco para interpolação para tensão $V_{oc}$ abaixo de 2700V (kA)
$I_{arc_{Voc}}$	corrente média de arco rms que pode ser calculada para valores de $V_{oc}$
$L$	comprimento do arco (m)
$P_T$	potência do arco elétrico (W)
$r$	distância radial do arco (m)
$t$	tempo de duração do arco (s)
$V_{arc}(t)$	tensão de arco elétrico em relação ao tempo (kV)
$V_{oc}$	tensão de circuito aberto (kV)
$V_L$	tensão de fase do sistema (kV)
$\sigma$	condutividade elétrica do gás (S/m)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	Justificativa .....	20
1.2	Objetivo Geral.....	21
1.3	Objetivos Específicos.....	21
1.4	Metodologia .....	21
1.5	Organização do Trabalho .....	22
<b>2</b>	<b>REGULAMENTAÇÃO</b> .....	<b>24</b>
2.1	Contextualização.....	24
2.2	Normas Regulamentadoras Brasileiras .....	25
2.2.1	NR-5: Comissão Interna de Prevenção de Acidentes .....	25
2.2.2	NR-6: Equipamentos de Proteção Individual (EPI) .....	26
2.2.3	NR-10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade .....	26
2.3	Normas Regulamentadoras Estadunidenses .....	31
<b>3</b>	<b>O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO</b> .....	<b>35</b>
3.1	Arco Elétrico .....	35
3.2	EIErro! Indicador não definido.	
3.3	Seletividade da Proteção .....	36
3.4	Configuração dos Eletrodos.....	37
3.5	Arco elétrico <i>line side</i> e <i>bus side</i> .....	39
<b>4</b>	<b>METODOLOGIAS</b> .....	<b>41</b>
4.1	Ralph Lee.....	41
4.2	Doughty e Neal.....	41
4.3	IEEE 1584.....	42
4.4	ArcPro.....	48
4.5	NESC.....	50
<b>5</b>	<b>ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA EI</b> .....	<b>53</b>
5.1	Aplicação da Metodologia IEEE 1584 .....	53
5.2	Aplicação da Metodologia NESC – Painel de 34,5 kV .....	64
5.3	Aplicação da Metodologia <i>ArcPro</i> – Painel de 34,5 kV .....	66

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestão de continuidade.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR SC-26 .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO A – COEFICIENTES CÁLCULO CORRENTE DE ARCO.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO B – COEFICIENTES CÁLCULO EI.....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É de interesse da empresa e do trabalhador que os riscos das atividades sejam controlados para eliminar as chances de acidentes no ambiente de trabalho. Para a empresa, esse interesse existe tanto por questões legais quanto por questões logísticas, já que compete a elas cumprir e fazer cumprir as normas de segurança e medicina do trabalho; instruir os empregados quanto às precauções a tomar no sentido de evitar acidentes do trabalho e adotar as medidas que lhes sejam determinadas pelos órgãos competentes (MELO, 2013). E, para o trabalhador, a própria segurança e dos que estão ao seu redor deve ser sua maior prioridade.

O mapeamento de riscos das atividades e elaboração de planos de trabalho pela Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA) deve contar com a colaboração do maior número de trabalhadores possível para que identificação de situações que venham a trazer riscos para a segurança e saúde dos trabalhadores (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2019a). Com esses planos de trabalho, torna-se possível o levantamento de medidas para a mitigação ou eliminação dos riscos apresentados.

Acidentes com eletricidade geralmente são graves e com prejuízo material e, nos últimos anos, houve um crescimento contínuo do número de acidentes (O SETOR ELETRICO, 2020). Os fatores que mais contribuem para esses acidentes no país são a não desenergização de equipamentos e a falta do prontuário de instalações elétricas e as estatísticas de acidentes por arco apontam que 63% dos acidentes ocorrem em atividades de manutenção (O SETOR ELÉTRICO, 2018). A Abracopel (Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade) realiza o levantamento estatístico sobre acidentes de origem elétrica em todo o Brasil com a intenção de conscientizar tanto a população sobre os riscos e perigos da eletricidade em geral quanto as autoridades municipais, estaduais e federais e entidades a necessidade da regularização às normas vigentes. Esse levantamento, que é realizado desde 2013, registra e classifica diversos acidentes fatais e não fatais que ocorrem em todos os estados do país. Porém, mesmo com um grande volume de informações no próprio anuário é destacado o fato de que os dados apresentam apenas uma parte do problema, visto que muitos casos não são reportados ou divulgados suficientemente para serem classificados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE, 2020).

Outro fator a ser pontuado diz respeito às medidas de proteção coletiva a serem adotadas como a sinalização e o isolamento de áreas, os quais constituem os Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC), que podem não ser suficientes para zerar os riscos das atividades, o que torna necessário a utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) como última camada de mitigação de riscos (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2018).

Posto isto, com o objetivo garantir a segurança e a integridade dos trabalhadores, foi elaborada a Norma Regulamentadora (NR) 10 que estabelece os requisitos e condições mínimas para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores em serviços com eletricidade. São estabelecidas medidas de controle e parâmetros de segurança para trabalhos além de determinar o que é um profissional qualificado e o período de sua capacitação. No anexo III da NR-10, que trata da ementa do treinamento do curso básico em “Segurança em Instalações e Serviços com Eletricidade” há o tópico de “Arcos elétricos, queimaduras e quedas” que trata de explicitar o conceito, detalhar riscos e perigos e determinar os procedimentos para a realização de um trabalho seguro. Para garantir maior segurança para os trabalhadores, sempre que possível, as atividades com eletricidade devem ser realizadas com o circuito desenergizado. (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2019b).

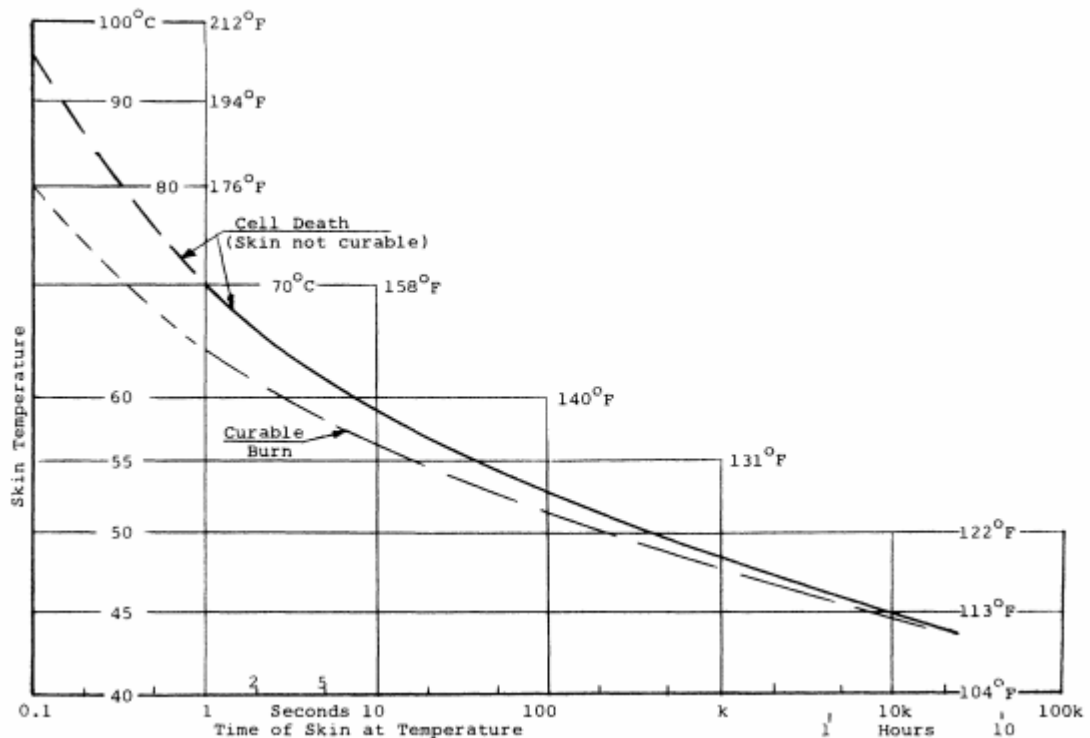
Até a década de 50 os dispositivos de proteção de sobrecorrente eliminavam a falta instantaneamente (disparador magnético), o que não permitia ajustes quanto à seletividade da proteção. Com o desenvolvimento dos relés com disco de indução e o retardamento do tempo de eliminação de falha muitos equipamentos acabaram sendo destruídos devido à energia liberada pelos arcos elétricos formados (MARDEGAN; PARISE, 2018). Lee (1982) publicou um artigo demonstrando que além do choque elétrico não ser a única fonte de riscos em uma instalação elétrica como também que as queimaduras por arco elétrico poderiam causar ferimentos fatais.

Arco elétrico é o termo para a passagem de corrente no meio dielétrico utilizando como condutor o metal vaporizado com temperaturas extremamente altas que podem ultrapassar em quatro vezes a temperatura do Sol. Quando há a formação de um arco elétrico, existe a possibilidade de uma queimadura ser fatal ocorrer mesmo se a pessoa estiver a alguns metros



de distância. Roupas inflamáveis também oferecem um grande risco caso sejam incendiadas pois não poderão ser removidas ou se extinguir as chamas rápido o suficiente para não causar queimaduras severas. Colocando em números, a distância de 1,5m é suficiente para que a energia proveniente de um arco cause queimaduras fatais. Ao analisar as informações apresentadas na Figura 1, toma-se conhecimento do tempo que a pele pode ser submetida a uma faixa de temperatura e o tempo necessário para que haja um dano irreversível. A 70°C, por exemplo, apenas 1 segundo de exposição é suficiente para causar a total destruição celular de pele.

Figura 1 – Temperatura da Pele x Tempo

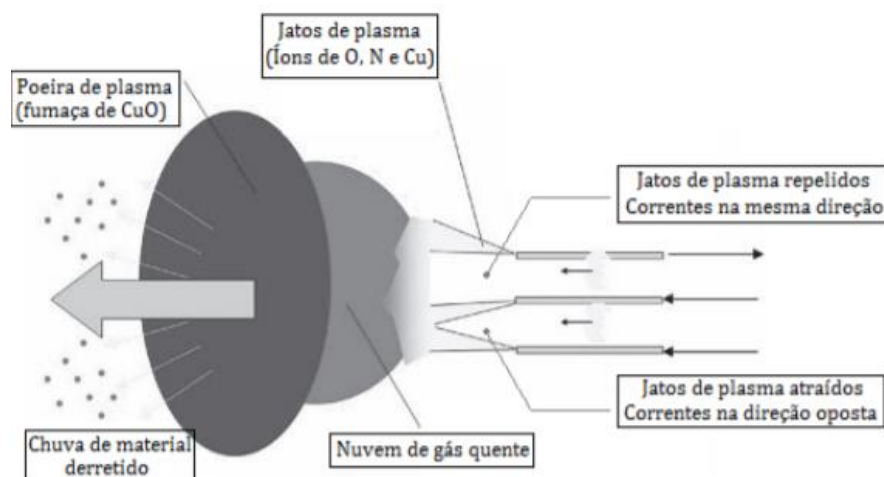


Fonte: Lee (1982).

A ocorrência de arcos elétricos está intimamente ligada às faltas monofásicas (fase-terra), bifásicas (fase-fase) e trifásicas (entre fases). Estatisticamente, as faltas mais comuns nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são as fase-terra, e não é incomum a evolução das faltas monofásicas para as entre fases. O comportamento de um arco elétrico é considerado caótico por envolver uma mudança veloz e irregular devido à convecção e, em função dessas características, o levantamento das propriedades exatas de um arco, como o valor de sua impedância, é algo extremamente complexo. Na Figura 2, está ilustrado o fenômeno do arco

elétrico, em que a energia é emitida em várias direções. Os íons da superfície do metal entram em rápida ebulição, sendo emitidos em jatos de plasma e, essa rápida expansão no início do arco, ocasiona uma onda de pressão significativa que pode causar acidentes por queda ou danos à audição (LANG; JONES, 2014). Além disso, enquanto o arco se mantém, a energia elétrica continua a ser convertida em outras formas de energia que oferecem riscos como o alto calor do plasma, grandes volumes de fumaça tóxica, gotas de material condutor fundido e luz intensa. (ROCHA et al., 2011). De acordo com a NFPA 70E, do inglês *National Fire Protection Association 70E*, energia incidente (EI) é a quantidade de energia impressa em uma superfície, a uma certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico e uma das unidades usadas para medir a incidente a energia é calorias por centímetro quadrado ( $cal/cm^2$ ). Segundo Lee (1982) é provável que uma EI com valor de  $1,2 cal/cm^2$  cause o início de uma queimadura de segundo grau.

Figura 2 – Ilustração do Fenômeno do Arco Elétrico



Fonte: Lang e Jones (2014)

Nota: Adaptado pela autora

O cálculo da EI é de suma importância para conhecer os riscos associados às atividades elétricas pois possibilita a criação de estratégias de extinção e mitigação desses através de medidas de proteção coletivas e determina quais os tipos de EPI necessários para construir a última barreira de proteção.

Existem algumas metodologias para o cálculo de EI e para determinar qual se utilizar deve-se conhecer bem o sistema e suas características além de conhecer as limitações de cada método.

A primeira metodologia a aparecer foi a de Ralph Lee (1982) que propôs modelos para o cálculo das distâncias seguras, mas sem levar em consideração experimentos práticos. Ou seja, é um modelo conservador e bem aplicado em circuitos trifásicos de até 600V que considera que a energia irradiada seria a máxima. Outro método é o de Doughty e Neal (1998) que deu sequência ao estudo de Lee em que a busca por resultados se deu em uma série de testes em laboratório. Essas medições tornaram possível o aperfeiçoamento da metodologia anterior, sendo mais eficiente o cálculo para tensões trifásicas de até 600V.

Uma das metodologias mais utilizadas na indústria é a IEEE 1584, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, um guia que fornece técnicas para determinação da distância segura para o risco de arco elétrico, (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018). Os cálculos estabelecidos por essa norma empregam modelos embasados em análise estatística e ajuste de curvas com base em ensaios. Nela são necessárias nove etapas para a estimativa da EI e determinação dos EPI necessários como ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Etapas para determinação da EI

Etapa	IEEE 1584
1	Coleta de dados da instalação e do sistema
2	Determinar os modos de operação do sistema
3	Determinar a corrente de curto-circuito
4	Encontrar as características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco
5	Determinar a configuração dos eletrodos do equipamento
6	Determinar a distância de trabalho
7	Determinar a intensidade e tempo de duração da corrente de arco
8	Calcular a energia incidente em todos os equipamentos
9	Determinar a distância segura de aproximação contra arco elétrico

Fonte: Rômulo e Senger (2012).

Outra metodologia para cálculo de EI muito utilizada é a apresentada no *ArcPro*, *software* desenvolvido pela empresa *Kinectrics*, onde o cálculo de EI é realizado a partir de equações de transferência de calor. Nesse *software* o arco de alta potência é modelado levando-se em consideração propriedades de gás, materiais de eletrodos de arco, radiação térmica e energia convectiva. Apesar desse método não informar quais as equações internas, estão sendo utilizados dados como corrente de curto limitada por arco, campo elétrico gerado pela coluna

de arco, distância radial do arco elétrico, potência total do arco e calor convectivo total (PRIMO; COELHO; MARIANI, 2021).

A união de todas as informações anteriores pode ser observada no Quadro 2 em que há a correspondência de aplicação de cada método considerando a fonte de tensão (RESENDE, 2016).

Quadro 2 – Quadro de seleção de método para cálculo de EI

Método de Cálculo de Energia Incidente	Até 600 V <sup>1</sup>			601 V a 15 kV <sup>1</sup>			Maior do que 15 kV <sup>1</sup>		
	1 $\phi$	3 $\phi^a$	3 $\phi^b$	1 $\phi$	3 $\phi^a$	3 $\phi^b$	1 $\phi$	3 $\phi^a$	3 $\phi^b$
Ralph Lee	S-C	S	N	S-C	S-N	N	N <sup>2</sup>	N <sup>2</sup>	N <sup>2</sup>
Doughty-Neal	S-C	S	S	N	N	N	N	N	N
IEEE 1584	S	S	S	S	S	S	N	N	N
ArcPro	S	N	N	S	N	N	S	S	S

Fonte: United States Department of Labor (2014b).

Nota: <sup>1</sup> para esse nível de tensão é considerado que as faltas monofásicas irão fatalmente evoluir para faltas trifásicas, a menos que possa ser demonstrado o contrário. <sup>2</sup> embora esteja dentro dos limites de aplicação de Ralph Lee, os resultados são extremamente conservadores e irreais. <sup>3</sup> adaptado pela autora.

Em que:

1 $\phi$  : Monofásico de configuração aberta

3 $\phi^a$  : Trifásico de configuração aberta

3 $\phi^b$  : Trifásico de configuração fechada

S: Resultado aceitável

N: Resultado não aceitável

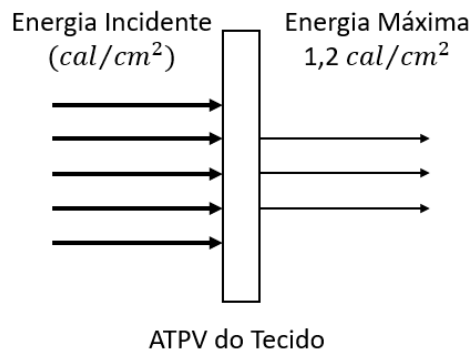
S-C Resultado aceitável, porém muito conservador

Além das quatro metodologias apresentadas ainda há uma quinta a ser comentada que é a metodologia do NESC, do inglês *National Electrical Safety Code*, norma criada para promover a segurança das instalações, da operação e da manutenção elétrica. O NESC (2017) é dividido em quatro partes, e mais especificamente em sua parte 4, seção 41, ele faz uma padronização de informações gerais, procedimentos de segurança e delega responsabilidades. No tópico de

informações gerais ele determina que se há a possibilidade do empregado ser exposto a um nível de EI superior a  $2 \text{ cal/cm}^2$  então deve ser realizada uma análise detalhada de arco elétrico baseado em três tabelas, sendo as duas últimas baseadas no *software* ArcPro. A primeira determina valores de ATPV, do inglês *Arc Thermal Performance Value*, para roupas para tensões de 50V a 1000V para determinados tipos de equipamento, a segunda valores de ATPV, corrente de falta e tempo de duração de ciclo para tensões entre 1,1kV e 46kV e a terceira, continuação da segunda, mas para valores 46,1kV a 800kV.

Após a criação de estratégias de extinção e mitigação de riscos através de medidas de proteção coletivas a determinação dos tipos de EPI necessários para construir a última barreira de proteção pode ser realizada. A proteção de uma vestimenta à EI é dada através do valor de seu ATPV, que está diretamente relacionado ao tecido que a compõe. O ATPV representa o valor máximo de EI que, ao incidir sobre o tecido, resulta em uma energia no lado protegido com 50% de chance de causar uma queimadura de segundo grau como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – EI e ATPV



Fonte: Produção da própria autora.

A EI pode ser categorizada em 4 níveis de vestimenta, quando abaixo do mínimo estabelecido o ATPV mínimo requerido não é aplicável. A relação dessas categorias pode ser observada no Quadro 3. Outro ponto que pode ser observado nesse quadro é que para valores de EI acima de  $40 \text{ cal/cm}^2$  não há vestimenta capaz de prover a proteção, então equipamentos que possuem a chance de emitir esse nível energia devem sofrer bloqueios e restrições de acesso para garantir a segurança.

Quadro 3 – Relação nível de EI e ATPV mínimo requerido para proteção

Categoria de Risco	Energia Incidente ( $cal/cm^2$ )	ATPV Mínimo Requerido para o EPI ( $cal/cm^2$ )
0	Até 1,2	Não aplicável
1	$1,2 \leq EI \leq 4$	4,0
2	$4,1 \leq EI \leq 8,0$	8,0
3	$8,1 \leq EI \leq 25,0$	25,0
4	$25,1 \leq EI \leq 40,0$	40,0

Fonte: Ministério do Trabalho e Emprego (2020a).

Nota: Adaptado pela autora.

Considerando o cenário exposto, a proposta de projeto será o estudo dos níveis de EI de uma sala elétrica nas instalações de uma empresa de mineração, que apresente níveis de tensão diferentes para aplicação de dois ou mais métodos de cálculo de EI, para comparação entre resultados e validação das metodologias dentro de seus escopos de aplicação. A partir desses resultados, poderão ser feitas avaliações em cima dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção, dos riscos relacionados ao arco elétrico nas proximidades de equipamentos energizados, da necessidade de instalação de sensores de arco elétrico nos painéis e a especificação da categoria dos EPI que os operadores deverão utilizar durante serviços nas proximidades dos painéis energizados.

### 1.1 Justificativa

A segurança no ambiente de trabalho é primordial para a execução do trabalho, tanto economicamente quanto socialmente. Os riscos com trabalho com eletricidade estão previstos em normas como a NR-10 e a NFPA 70E que consideram não só riscos de choque elétrico como também os relacionados a arcos, queimaduras e dispersão de gases. As medidas de eliminação e mitigação de riscos devem ser aplicadas inicialmente nos cenários até se obter o máximo controle em todas as instâncias antes de se determinar a necessidade de utilização de EPIs, que são a última camada de proteção.

Dentro dessas medidas de eliminação e mitigação de riscos surge a necessidade de se realizar a quantificação da EI que pode ser emitida pelo sistema e causar danos, principalmente, ao trabalhador. Essa quantificação é realizada via cálculos e simulação para criar cenários e determinar quais as medidas para a adequação desse cenário serão adequadas.

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo a respeito do fenômeno EI e aplicar as metodologias de cálculo IEEE 1584 2018, NESC 2017 e ArcPro para uma posterior comparação entre os resultados para o barramento de alta, e a aferição das categorias em que se encontram as instalações para constatar conformidade com os limites de segurança estabelecidos pela empresa e normas vigentes.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo definido serão necessários os seguintes objetivos específicos serem alcançados:

- Analisar os níveis de EI por painel utilizando uma metodologia como base;
- Comparar os resultados para um mesmo painel em diferentes metodologias e quantificar essas diferenças;
- Determinar quais EPI podem ser utilizados a fim de se obter uma última camada de proteção e determinar medidas de eliminação e mitigação de riscos;

## **1.4 Metodologia**

No projeto proposto serão realizados estudos a respeito dos níveis de EI referentes à painéis de uma sala elétrica visando o gerenciamento de riscos. Visto isso, trata-se de uma pesquisa aplicada, utilizando teorias já desenvolvidas para elaborar uma análise de uma sala elétrica.

Objetivando isso serão realizados cálculos e análises a fim de identificar características fundamentais do sistema por meio das simulações, portanto, trata-se de uma pesquisa descritiva dentro deste ponto de vista.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, inicialmente, será determinada uma sala elétrica com a finalidade de obter a melhor análise dentro das restrições de tempo e complexidade presentes. Posteriormente será eleita a metodologia que ofereça melhor desempenho no estudo para cada faixa de tensão, definindo formas cálculo e realizando observações sobre os efeitos produzidos pelas variáveis. A abordagem será a de uma pesquisa quantitativa visto que se pretende mensurar os níveis de EI no sistema e categorizar os barramentos.

### **1.5 Organização do Trabalho**

Esse trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro consistiu em um primeiro contato com o tema, abordando todos os aspectos do assunto de maneira sucinta para posterior aprofundamento. Após essa breve passagem pelo tema está presente a explicação de como foi desenvolvido o texto, assinalando objetivos, métodos e a justificativa do estudo.

No segundo capítulo primeiro o tema relacionado ao contexto da segurança do trabalho no Brasil e depois é realizada uma análise da parte normativa referente à riscos e trabalhos com eletricidade. São abordadas normas nacionais e internacionais que se referem a esse tema e que são aplicadas em empresas no país. A análise perpassa pelas normas regulamentadoras 5, 6 e 10 e pelas normas internacionais NFPA 70E e IEEE 1584.

No terceiro capítulo se inicia uma abordagem mais técnica, relativa ao fenômeno do arco elétrico e suas consequências. Tanto a natureza do arco quando o que deriva de sua ocorrência é tratado, assim foram discutidos o conceito de EI, a configuração dos eletrodos e localização da ocorrência de um arco em um sistema juntamente com suas características visto que são detalhes fundamentais para a etapa de cálculo.

O quarto capítulo consiste no aprofundamento nas metodologias citadas no primeiro com análise de equações e etapas de desenvolvimento de cálculo. São discutidas as cinco



metodologias citadas, a de Ralph Lee, a de Doughty e Neal, a da IEEE 1584, a do ArcPro e a da NESC. São abordados seus parâmetros, seus limites de aplicação e todas as variáveis necessárias para a realização do cálculo e definição da EI e distância de aproximação segura de arco.

No capítulo seguinte é realizado o estudo de caso para uma sala elétrica de controle localizada em uma empresa de mineração que possui três níveis de tensão e algumas metodologias podem ser aplicadas para realizar os cálculos de suas características. Como ela apresenta um barramento em alta tensão foi realizado o cálculo em mais de uma metodologia, para alcançar resultados fidedignos e para a visualização de como uma metodologia aplicada fora de seus limites pode distorcer os resultados e levar a uma conclusão incorreta.

E, por fim, no sexto capítulo estão concentradas as conclusões finais com uma abordagem do tema como um todo e duas sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REGULAMENTAÇÃO**

### **2.1 Contextualização**

A Revolução Industrial, período de grande desenvolvimento tecnológico datado a partir da segunda metade do século XVIII, foi o marco histórico para grandes transformações no processo produtivo e nas relações de trabalho. Os riscos nas atividades de trabalho cresceram e, como não haviam medidas de segurança para os trabalhadores, constantemente ocorriam acidentes. Em consequência dessa situação, os trabalhadores mobilizaram-se para a criação das organizações de trabalhadores, conhecidas no Brasil como sindicatos, e reivindicavam melhorias salariais e das condições de trabalho (SANTOS; ARAÚJO, 2011).

No Brasil, em 1919, surge a primeira lei brasileira em favor do infortúnio laboral, que tornou obrigatória a reparação dos danos decorrentes e responsabilização por qualquer risco que essa atividade possa acarretar aos seus empregados. (BRASIL, 1919). O processo da revolução industrial começou por volta de 1930 e no ano de 1943, o então Presidente da República, Getúlio Vargas decretou a Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) que visa a proteção do trabalhador, a regulação das relações de trabalho e a criação do direito processual do trabalho. A CLT impõe regras e determinações a respeito dos direitos e deveres do empregador e empregado e define conceitos para a interpretação das relações de trabalho. (INSTITUTO BRASILEIRO DE ENSINO PROFISSIONALIZANTE, 2017).

No ano de 1977, a lei nº 6.514 estabeleceu em seu artigo 200 que o Ministério do Trabalho deveria determinar as disposições complementares às normas relativas à segurança e saúde dos trabalhadores tendo em vista as peculiaridades de cada atividade ou setor do trabalho e, a partir, então, de 1978 iniciou-se a criação das Normas Regulamentadoras (NRs) (BRASIL, 1977). Um ponto que deve ser mantido em vista é de que as NR são de observância obrigatória para toda empresa que admite empregados regidos pela CLT e que possuem atividades laborais relacionadas aos temas tratados em cada norma. Posteriormente a Portaria nº 1.127, de 2 de outubro de 2003, estabeleceu pela primeira vez procedimentos para a elaboração das NRs relacionadas à saúde, segurança e condições de trabalho em que a definição ou criação de uma NR seria resultado de debates realizados no âmbito de um sistema tripartite paritário, composto por representantes do Governo, trabalhadores e empregadores que formam a Comissão

Tripartite Paritária Permanente, em que as três partes possuem o mesmo peso na decisão. (BRASIL, 2003).

## **2.2 Normas Regulamentadoras Brasileiras**

“As NR consistem em obrigações direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores como objetivo de se garantir trabalho seguro e sadio, prevenindo a ocorrência de doenças e acidentes de trabalho.” (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2020b). E seguindo esta premissa foram criadas, até o momento, 37 NRs. Quando se fala em mitigação ou eliminação dos riscos apresentados em um mapeamento de riscos em trabalhos que envolvem eletricidade, os procedimentos a serem adotados abordados nas NR 5, 6 e 10.

### **2.2.1 NR-5: Comissão Interna de Prevenção de Acidentes**

A NR-5 trata sobre a CIPA, constituída por empregados e seus representantes e tem como objetivo a prevenção de acidentes e doenças do trabalho e a promoção da saúde do trabalhador. Empresas públicas, privadas e órgãos governamentais que possuam empregados regidos pela CLT ficam obrigadas de organizar e manter a CIPA. Ela será composta de representantes do empregador e dos empregados e terá cargos de presidente (representante do empregador), vice-presidente (representante dos empregados) e secretário (indicado pelos membros da CIPA) eleitos a cada mandato e a quantidade de membros que deve fazer parte da CIPA depende da atividade da empresa e de quantos funcionários ela possui (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2019a).

Para controlar os riscos torna-se necessário adotar medidas técnicas, administrativas, preventivas ou corretivas que tentem a eliminar ou atenuar os fatores de risco existentes no ambiente laboral. É necessário que os trabalhadores estejam engajados em cumprir as normas de segurança e que o empregador forneça os recursos necessários para que o trabalho da CIPA seja realizado assegurando a segurança dos trabalhadores e engajá-los a cumprir as normas de segurança. Dentre as várias funções que esse comitê possui, tem-se a discussão sobre a implantação de medidas que possam prevenir ou neutralizar riscos do ambiente de trabalho, o que prevê a melhoria contínua visando a eliminação dos riscos, e a divulgação da importância das normas de segurança e higiene do trabalho para a prevenção de acidentes e doenças do

trabalho, a fim de conscientizar o trabalhador e criar uma cultura de segurança na empresa. Para a discriminação dos riscos presentes no ambiente de trabalho lança-se mão da ferramenta do mapa de risco. O mapa de risco é um documento de diagnóstico de toda a segurança e saúde das instalações pois analisa quaisquer riscos presentes. Conhecendo os riscos a determinação de medidas de prevenção ou mitigação destes riscos identificados torna-se possível (NOGUEIRA, 2008).

### 2.2.2 NR-6: Equipamentos de Proteção Individual (EPI)

A NR-6 estabelece as medidas que devem ser tomadas em relação aos EPI no que tange sua aquisição, distribuição e utilização pelos trabalhadores. Nela é estabelecido que a empresa é obrigada a fornecer os EPI, gratuitamente, para uso em todos os segmentos quando as medidas de ordem geral não garantem a proteção completa do empregado ou situações de emergência. Também é tarefa do empregador quanto aos EPI exigir o seu uso, orientar e treinar o trabalhador sobre o uso adequado, guarda e conservação e substituí-los imediatamente quando danificados ou extraviados. Complementares às tarefas do empregador estão as do empregado. E cabe à CIPA recomendar ao empregador os EPI adequados aos riscos existentes em determinada atividade (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2018).

Todos os equipamentos de proteção disponibilizados devem possuir Certificado de Aprovação (CA) com a finalidade de manter um padrão de qualidade. O CA é um documento emitido pelo Ministério da Economia que estabelece um prazo de validade para a comercialização de determinado EPI. Essa certificação garante a qualidade e funcionalidade dos EPI pois ela é emitida diante testes comprobatórios de durabilidade, conforto e proteção para as atividades. Um ponto de atenção para isso é de que o CA não é a mesma coisa que a validade do EPI, visto que o CA é passível de renovação, diferente do prazo de validade que, se expirado, deve resultar no descarte do EPI (RODRIGUES, 2017).

### 2.2.3 NR-10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade

A NR-10 dispõe sobre a segurança em instalações e serviços em eletricidade com o objetivo de garantir a segurança e saúde dos trabalhadores implementando medidas de controle e sistemas preventivos, ou seja, ela estabelece requisitos e condições mínimas para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores. Essa norma se aplica às fases de geração, transmissão, distribuição

e consumo em todas as etapas das atividades que direta ou indiretamente interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade e nas intervenções em instalações devem ser adotadas medidas preventivas de controle de risco elétrico e outras adicionais sendo que apenas trabalhadores que forem treinados sobre os riscos desse tipo de trabalho poderão atuar em instalações elétricas. A respeito dos treinamentos, um trabalhador é considerado qualificado quando comprovar conclusão de curso na área elétrica, legalmente habilitado quando previamente qualificado e com registro no competente conselho de classe, capacitado aquele que, simultaneamente, tenha recebido capacitação sob orientação e trabalhe sob orientação de profissional habilitado e autorizado.

A NR-10 possui subdivisões em temas relacionados à segurança em serviços em eletricidade. Uma das primeiras disposições da norma é a da obrigatoriedade da atualização dos esquemas unifilares com as especificações do sistema de aterramento, proteção e demais equipamentos. É necessário também que os projetos elétricos especifiquem dispositivos de desligamento que apresentem impedimento de reenergização e, sempre que possível, dispositivos de seccionamento para equipotencialização e aterramento devem ser projetados.

Por outro lado, visando medidas de proteção coletiva tem-se, principalmente, a desenergização dos circuitos para a execução de serviços, assim como a isolação de partes vivas, barreiras e sistema de bloqueio de religamento automático. A desenergização só será considerada efetuada quando os procedimentos de seccionamento, impedimento, constatação de ausência de tensão, instalação de aterramento temporário, proteção dos elementos energizados e instalação de impedimento forem confirmados. De maneira complementar, as medidas de proteção individual visam a utilização de EPI quando as medidas de proteção coletiva forem tecnicamente inviáveis ou insuficientes para mitigar os riscos e as vestimentas de trabalho devem se adequar às atividades contemplando a proteção de riscos relacionados à condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas.

Serviços em instalações elétricas devem ser precedidos por ordens de serviço específicas que possuem um planejamento das atividades e realizados conforme procedimentos padronizados que irão possuir sinalização. Uma sinalização adequada deve ser adotada nas instalações de forma a identificar circuitos elétricos, travamentos e bloqueios, restrições e impedimentos,

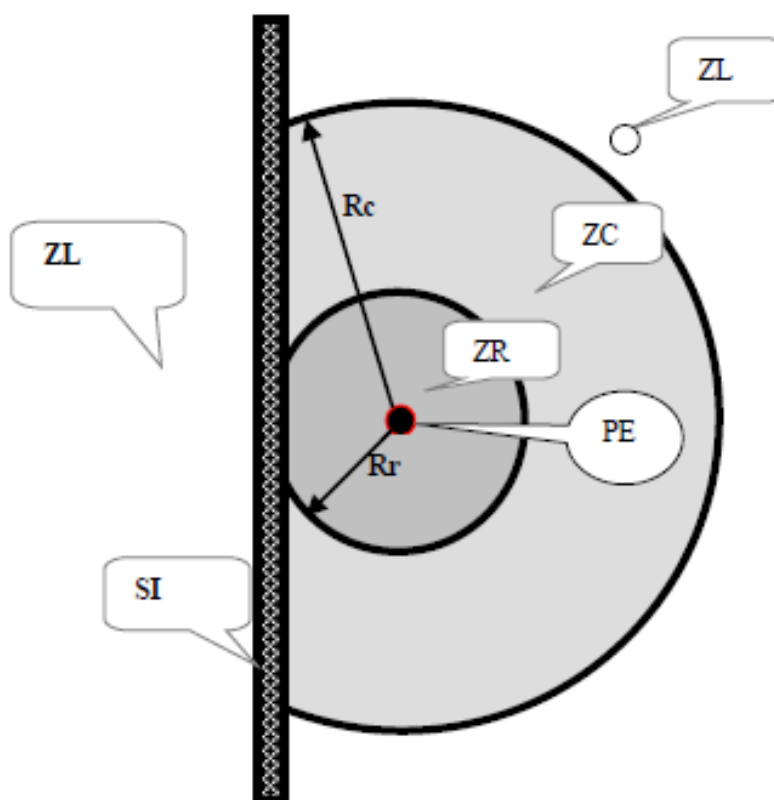
delimitação de áreas, sinalização de áreas de circulação e impedimento de energização e identificação de equipamento ou circuito impedido. Para serviços em alta tensão, trabalhadores que venham a exercer suas atividades devem obedecer aos limites estabelecidos como zonas controladas e zonas de risco, conforme valores dispostos na Tabela 1 e ilustrado na Figura 4. Vale ressaltar que, pela definição da NR-10, a partir do nível de tensão 1kV alternada e 1,5kV contínua deve-se considerar como alta tensão. (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2019b).

Tabela 1 – tabela de raios de delimitação de zonas de risco, controlada e livre

Faixa de tensão nominal da instalação elétrica (kV)	Rr – raio de delimitação entre zona de risco e zona controlada (m)	Rc – raio de delimitação entre zona controlada e livre (m)
< 1	0,20	0,70
≥ 1 e < 3	0,22	1,22
≥ 3 e < 6	0,25	1,25
≥ 6 e < 10	0,35	1,35
≥ 10 e < 15	0,38	1,38
≥ 15 e < 20	0,40	1,40
≥ 20 e < 30	0,56	1,56
≥ 30 e < 36	0,58	1,58
≥ 36 e < 45	0,63	1,63
≥ 45 e < 60	0,83	1,83
≥ 60 e < 70	0,90	1,90
≥ 70 e < 110	1,00	2,00
≥ 110 e < 132	1,10	3,10
≥ 132 e < 150	1,20	3,20
≥ 150 e < 220	1,60	3,60
≥ 220 e < 275	1,80	3,80
≥ 275 e < 380	2,50	4,50
≥ 380 e < 480	3,20	5,20
≥ 480 e < 700	5,20	7,20

Fonte: Ministério do Trabalho e Emprego (2019b).

Figura 4 – Distâncias limitadas radialmente das zonas de risco, controlada e livre com superfície de separação física adequada



Fonte: Ministério do Trabalho e Emprego (2019b).

Nota: ZL = zona livre

ZC = zona controlada, restrita a trabalhadores autorizados

ZR = zona de risco, restrita a trabalhadores autorizados e com a adoção de técnicas, instrumentos e equipamentos apropriados.

PE = ponto da instalação energizada

SI = superfície isolante construída com material resistente

Portanto, pela análise da Figura 4 pode-se observar que a zona de risco é a região que circunda o ponto da instalação que está energizada e a aproximação somente é permitida a profissionais autorizados que estejam adotando os procedimentos de segurança. Logo depois encontra-se a zona controlada, em que há a presença de campos eletromagnéticos que influenciam nos corpos em sua proximidade. Para procedimentos nas instalações apenas devem permanecer na zona controlada os profissionais que estejam envolvidos nas atividades. E, por fim, a zona livre em que os riscos de ocorrer um acidente relacionado à eletricidade são mínimos, mas ainda assim os trabalhadores presentes nessa zona devem ser instruídos e capazes de avaliar os riscos. Nos serviços com eletricidade estão presentes muitos riscos além do choque elétrico, como arcos elétricos, queimaduras, quedas e campos eletromagnéticos. Quando há a formação de

arcos elétricos ocorre a liberação de energia em várias formas que podem causar, principalmente, queimaduras severas, dependendo do tempo de exposição ao arco e das vestimentas utilizadas e quedas. As queimaduras são produzidas devido à intensidade da energia térmica incidente em contato com a pele e o tempo de exposição. Dependendo da combinação desses dois fatores pode-se ter queimaduras de primeiro, segundo e terceiro grau. As de primeiro grau são aquelas que afetam a epiderme, ou seja, apenas a camada superficial da pele é atingida. Já as de segundo grau, além da epiderme, atingem parte da derme, que é a segunda camada da pele, e há a formação de bolhas. E, por fim, as de terceiro grau atingem todas as camadas da pele, músculos e ossos, ocorre a morte dos tecidos e lesa as terminações nervosas (HOSPITAL ISRAELITA ALBERT EINSTEIN, c2020). As quedas, causadas pela liberação de energia, podem se tornar graves ocasionando lesões, fraturas, concussões (SOUZA, 2000).

Tendo em vista esses riscos, a NR-10 definiu como exigência a utilização de vestimenta retardante a chama e atenuadora dos efeitos da EI. De acordo com a norma os tecidos utilizados para a confecção das vestimentas não podem ser condutores de eletricidade, não podem ter características inflamáveis e devem resistir ou atenuar a EI decorrente de arco elétrico. Tendo isso em vista, o Ministério do Trabalho e Emprego elaborou um normativo para a especificação da vestimenta exigida pela norma. Nele são definidas as características dos EPI a serem utilizados para esse fim. No caso das vestimentas, sua composição deve possuir tecidos especiais que possuam um desempenho satisfatório em relação à sua propriedade ignífuga. A gramatura do tecido mostra-se como uma característica relevante contra os efeitos térmicos, mas é o ATPV que está diretamente relacionado às características de proteção que a vestimenta fornece. Ele representa o valor máximo de energia que pode incidir sobre o lado protegido que ofereça 50% de chance de causar uma queimadura de segundo grau e suas classificações podem ser observadas no Quadro 3.

Em conjunto à NR-6, a Secretaria de Inspeção de Trabalho definiu os EPI necessários para a proteção para contra os efeitos térmicos e os requisitos técnicos obrigatórios aplicáveis. Ficam definidos como os EPI contra EI os elencados no Quadro 4. Para a escolha dos EPI que serão utilizados em determinada atividade torna-se necessário conhecer os riscos, já que nenhum risco



é passível de prevenção se não for conhecido. Assim, o primeiro passo para a prevenção de acidentes é o conhecimento detalhado das atividades e tecnologias envolvidas.

Quadro 4 – EPI especificados para cada local

Local da proteção	Tipo do EPI
Cabeça	Capacete; capuz ou balaclava
Olhos e face	Óculos; protetor facial; máscara de solda
Proteção auditiva	Protetor auditivo
Proteção respiratória	Respirador purificador de ar não motorizado
Proteção do tronco	Vestimenta para proteção do tronco
Proteção dos membros superiores	Luva

Fonte: Saliba (2013).

### 2.3 Normas Regulamentadoras Estadunidenses

As normas estadunidenses são codificadas pelo Código de Regulamentações Federais (CFR) que compilam as regras gerais e permanentes publicadas no Registro Federal pelos departamentos executivos e agências governamentais. No título 29 do CFR constam as normas e regulamentos relacionados ao trabalho e em sua parte 1910 está a OSHA, do inglês *Occupational Safety and Health Administration*, que é uma agência dentro do Ministério do Trabalho estadunidense a qual ficou responsável por assegurar condições seguras e saudáveis para os trabalhadores por meio de normatização, treinamento e assistência. Em sua 5ª seção são tratadas as obrigações do empregador, que consistem em fornecer a cada um de seus empregados um local livre de riscos reconhecidos passíveis de causar danos físicos ou morte e devem cumprir os padrões de segurança e saúde ocupacional promulgados sob esta lei, e do empregado, que devem cumprir os padrões e todas as regras e regulamentos emitidos por ela. Em suas subpartes I, S e R trata dos assuntos de equipamento de proteção individual, elétrica e indústrias especiais, que podem ser comparados ao escopo da NR-10 (UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR, 2014a).

Em certo ponto a OSHA percebeu que acompanhar as rápidas mudanças do cenário elétrico nas indústrias seria inviável então escolheu a NFPA, do inglês *National Fire Protection Association*, como a organização responsável por desenvolver normas de segurança elétrica relacionadas ao ambiente de trabalho. Assim, foi criada a NFPA 70E, reconhecida pela OSHA como uma norma de consenso, que contém os detalhamentos das ações que devem ser tomadas seguindo os direcionamentos da OSHA e tem como propósito promover a prática de trabalho com eletricidade seguro para os empregados (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2021b). A norma tem como uma de suas prioridades a eliminação de risco na implementação das práticas relacionadas à segurança, em resumo, um trabalho com eletricidade seguro é aquele em que todos os condutores e partes vivas que podem entrar em contato com o empregado estão desenergizados. Além disso, a definição de uma condição normal de operação se faz necessária para que se tenha um parâmetro de segurança que indique que o equipamento não se encontra em uma condição insegura. Para estabelecer uma condição de trabalho segura ela possui uma determinação semelhante à NR-10 que traz como etapas o bloqueio e impedimento para o controle da exposição à riscos elétricos. Para o controle de riscos possui um procedimento que adota como metodologia a seguinte hierarquia de medidas: eliminação, substituição, controles de engenharia, sinalização, controles administrativos, EPI, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Hierarquia de controle de riscos



Fonte: Produção da própria autora.

E, caso não seja possível aplicar as medidas anteriores para a adoção de um trabalho eletricamente seguro, ou seja, se não for possível com que as tensões nas partes vivas alcancem

tensões inferiores a 50V, a norma estabelece requisitos especiais para o trabalho como a obrigatoriedade de o executor da atividade ser um trabalhador qualificado, emitir uma permissão de trabalho seguro e estudos de risco de choque e arco elétrico devem ser realizados. Em especial, a avaliação dos riscos de arco elétrico, além de identificar os riscos e suas probabilidades de ocorrência devem determinar quais medidas de proteção adicionais deverão ser adotadas. São definidos também medidas adicionais de segurança como a distância de aproximação segura, as práticas seguras apropriadas e os EPI necessários. A determinação do nível exposição à EI usa como base a distância de trabalho (distância da face e torso do empregado até uma fonte de arco elétrico) e é necessária para a escolha dos EPI como elencados no Quadro 5 (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2021a).

Quadro 5 – Vestimentas apropriadas para cada faixa de EI

Nível de Energia Incidente	EPI
$1,2 \leq EI \leq 12 \text{ cal/cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vestimenta de corpo inteiro com ATPV suficiente para proteção</li> <li>• Protetor facial e balaclava ou capuz</li> <li>• Luvas de couro ou com proteção contra arco</li> <li>• Capacete</li> <li>• Óculos de proteção</li> <li>• Protetor auricular</li> <li>• Botas de couro</li> </ul>
$EI > 12 \text{ cal/cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macacão</li> <li>• Capuz de proteção</li> <li>• Luvas de proteção contra arco elétrico</li> <li>• Capacete</li> <li>• Óculos de proteção</li> <li>• Protetor Auricular</li> <li>• Botas de couro</li> </ul>

Fonte: National Fire Protection Association (2021a).

Nota: Adaptado pela autora.

A NFPA 70E traz em forma de um anexo informativo alguns dos métodos de cálculo de EI e frisa a importância de se observar os limites de aplicação de cada uma para o caso a ser analisado como resumido, para casos de corrente alternada, no Quadro 6.

Quadro 6 – Limitações e parâmetros das metodologias citadas pela NFPA 70E

Metodologia	Limitações e Parâmetros
Ralph Lee	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcula a energia incidente e distância de aproximação segura para arcos ao ar livre;</li> <li>• Metodologia conservadora para sistemas trifásicos acima de 600V</li> </ul>
Doughty and Neal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcula a energia incidente para arcos trifásicos em sistemas com tensões menores ou iguais a 600V e correntes de curto-circuito entre 16kA e 50kA</li> </ul>
IEEE 1584	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema Trifásico</li> <li>• Tensão entre 208 V e 15kV</li> <li>• Frequência de 50 a 60Hz</li> <li>• Corrente de curto entre 500A e 106kA para tensões entre 208 e 600V</li> <li>• Corrente de curto entre 200A e 65kA para tensões entre 600V e 15kV</li> <li>• Espaçamento entre condutores de 6,35 a 76,2 mm para tensões entre 208 e 600V</li> <li>• Espaçamento entre condutores de 13 a 153 mm para tensões entre 600V e 15kV</li> </ul>

Fonte: National Fire Protection Association (2021a).

Nota: Adaptado pela autora.

Dos métodos citados pela NFPA 70E, o último é uma norma estadunidense criada pelo IEEE, do inglês *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, que é um instituto técnico-profissional dedicado ao avanço da teoria e prática nos campos da eletricidade, eletrônica e computação. A norma IEEE 1584 tem sua versão mais atualizada datada de 2018 e seu nome, em tradução livre, “Guia IEEE para realização de cálculos de risco de arco elétrico”, indica exatamente o teor de seu conteúdo. Ao longo dela é apresentado o modelo proposto, as variáveis a serem determinadas e o passo a passo para a realização dos cálculos. E como a NFPA 70E reconhece a IEEE 1584 como uma norma de consenso, logo ela é aceita pela própria OSHA.

### 3 O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO

#### 3.1 Arco Elétrico

Arco elétrico é o termo aplicável à passagem de corrente pelo meio que até então era formado pelo ar. Contudo o ar não é o condutor, a passagem da corrente é possibilitada devido à vaporização do material do terminal do condutor. A vaporização dos condutores ocorre devido ao fenômeno alcançar temperaturas da ordem de 20000 K nos terminais do arco, o que não pode ser suportado por nenhum material conhecido na Terra. Esse vapor tem resistência substancialmente maior do que o metal em seu estado sólido e a queda de tensão ao longo dele ao longo de um arco apresenta valores entre 30 e 40 V/cm, milhares de vezes do que seria essa queda nesse mesmo condutor em estado sólido. E isso justifica porque em circuitos de baixa tensão o arco não é autossustentável, já que essa queda de tensão já consumiria uma parte substancial da tensão disponível para distâncias entre condutores da ordem de 10 cm (LEE, 1982).

Um arco elétrico pode ser causado por diversos fatores, incluindo poeira, queda de ferramentas, toque acidental, corrosão e falha na instalação e três fatores são determinantes no que tange a severidade do ferimento: a proximidade do empregado ao risco, a temperatura e o tempo de interrupção do circuito. A OSHA define arco elétrico como um fenômeno onde um *flashover* de corrente que parte de um ponto até o outro pelo ar de um condutor para outro ou para o chão. *Flashover* é o momento no desenvolvimento de um fogo no qual todas as superfícies atingem suas temperaturas de ignição quase que simultaneamente e o fogo se espalha ao longo desse espaço. Porém devido à natureza violenta do fenômeno, quando há um acidente ele certamente será grave e podendo, inclusive, resultar em morte. A ocorrência de um arco elétrico pode, além de gerar queimaduras devido à suas altas temperaturas, levar a ferimentos físicos (pressão da explosão que ultrapassa 95 kPa), auditivos (explosão sonora que pode atingir 140 dB) e químicos (derretimento e vaporização de materiais). (UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR, 2007).

E, com o objetivo de proteger o empregado a OSHA e o NESC, do inglês *National Electrical Safety Code*, definiram a distância limite de arco elétrico (AFB), do inglês, *arc flash boundary*, como a distância onde a EI emitida pelo arco elétrico seja menor ou igual a  $2 \text{ cal/cm}^2$ .

### 3.2 Energia Incidente

Em termos gerais EI é a energia que atinge algo e transfere uma parte de sua potência para o objeto em questão. Esse tipo de energia aparece em muitos fenômenos, mas é mais comum associá-la à radiação térmica. Um ponto importante a se observar é o termo “incidente” que descreve a existência de energia, mas sem restringi-la a um tipo específico em que há a sua liberação e ela se afasta da sua fonte de origem. Por exemplo, ao aproximar-se de uma fogueira é possível perceber o calor vindo das chamas em forma de radiação térmica e ele poderia ser medido em termos de EI.

Em um arco elétrico a EI liberada é inversamente proporcional ao quadrado da distância de trabalho e diretamente proporcional à corrente de falta disponível e ao tempo de duração do arco e sua unidade é calorias por centímetro quadrado ( $cal/cm^2$ ), portanto ela pode ser entendida como a expressão de um arco elétrico em termos quantitativos. Outros fatores que podem influenciar no valor de EI são o nível da corrente de curto circuito tanto na entrada quanto no barramento da carga, o tamanho e o comprimento do cabo, o tipo dos dispositivos de proteção utilizados e suas configurações (MOREIRA, 2018).

Falhas elétricas podem ter várias origens e causar consequências em diversos níveis visto que nossos sistemas de distribuição, por exemplo, estão em constante crescimento e com cargas de diversos tipos e prioridades. As configurações dos dispositivos de proteção influenciam diretamente no tempo de duração das falhas e, por conta disso, a implementação um segundo grupo temporário de configuração está se mostrando uma alternativa muito atrativa hoje em dia. Essa estratégia tem como objetivo criar uma descoordenação da proteção diminuindo o tempo da atuação dos dispositivos quando há uma pessoa acessando ou interagindo com as instalações podendo reduzir de forma significativa os riscos (CLARK, 2015).

### 3.3 Seletividade da Proteção

A seletividade da proteção é uma maneira de se isolar uma falha elétrica ao setor em que ela ocorreu, visto que os disjuntores mais próximos da carga são programados a atuar antes que a

falha se disperse pelo sistema aumentando a confiabilidade dos equipamentos e das instalações. Um estudo a respeito da seletividade de disjuntores, relés e fusíveis visa obter os tempos de disparo dos dispositivos a fim de se determinar qual a melhor configuração para cada dispositivo para minimizar o impacto negativo das falhas.

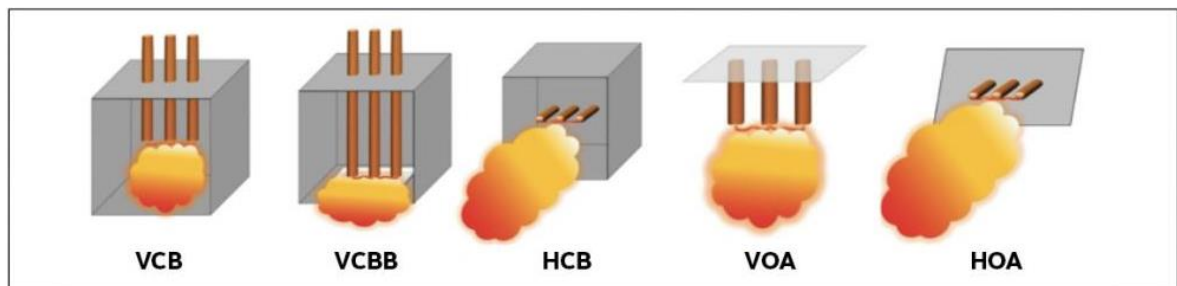
Apesar da existência desses estudos para isolar falhas, em algumas situações, é necessário perder essa seletividade a fim de diminuir o nível de EI de determinado painel. Essa prática é chamada de grupo de ajustes, ela é utilizada quando há, por exemplo, um painel que possui um nível de EI acima de  $8 \text{ cal/cm}^2$  e as vestimentas oferecem um nível de proteção ATPV de categoria 2, logo a chance de ocorrer uma queimadura seria acima de 50%. Para mitigar esse problema diminui-se, por exemplo, o tempo de atuação do disjuntor à montante podendo, inclusive, ser igual ou menor do que o do disjuntor da carga, o que causaria uma descoordenação da proteção. Essa descoordenação, normalmente, seria um problema para o sistema, promovendo diversas atuações indevidas, mas torna-se necessária quando pessoas precisam acessar locais em que o nível de EI se encontra acima do possível de se promover uma proteção adequada (SANTOS; JÚNIOR; NETO, 2014). Essa escolha pela perda da robustez do sistema é uma escolha que visa a priorização da segurança dos trabalhadores, mas deve ser enxergada como uma forma paliativa, sendo utilizada em períodos de transição para medidas com uma maior cobertura.

### **3.4 Configuração dos Eletrodos**

Como citado, são vários os fatores que podem influenciar nos valores da EI de um arco elétrico. Um outro fator a ser citado é a configuração dos eletrodos, conceito que foi introduzido pela IEEE 1584 (2018) e que é determinante no nível de emissão de EI pois existe a variação da direção de propagação do arco. Vale pontuar que essas alterações na versão de 2018 não eram consideradas na versão anterior, datada de 2002, pois não levavam em consideração a orientação dos eletrodos nem a forma de propagação do plasma do arco visto que todos os experimentos foram realizados com os eletrodos na vertical ao ar livre e em consequência dessa consideração o novo modelo foi baseado em seis vezes mais testes do que o antigo.

Posto isso, na versão atual são descritas cinco configurações diferentes: VCB, VCBB, HCB, VOA e HOA. Com a VCB, do inglês *vertical conductors in a metal box*, a ocorrência do arco elétrico se dá para longe da fonte, em direção à parte inferior do invólucro, paralelamente à abertura do cubículo. Na VCBB, do inglês *vertical conductors terminated in a metal box insulating barrier*, na qual também possui os condutores na vertical, se esses eletrodos terminam em uma barreira isolante o arco atinge a barreira e a nuvem de plasma se direciona para a parte aberta do invólucro. Considerando a orientação dos eletrodos na vertical, de acordo com Wilkins, Allison e Lang (2005), o arco tende a se propagar na direção contrária a dos eletrodos devido a forças eletromagnéticas e, uma vez que eles se encontram na vertical, a tendência é de que o arco se choque contra o fundo do painel provocando a dispersão de calor primeiramente dentro do cubículo e em sua parte inferior. A configuração HCB, do inglês *horizontal conductors in a metal box*, os condutores são dispostos horizontalmente e, como o arco tende a se formar na direção contrária aos eletrodos, o plasma é direcionado das extremidades dos condutores para o lado externo, resultando em uma EI maior do que nas configurações VCB e VCBB. VOA, do inglês, *vertical conductors in open air*, e HOA, do inglês, *horizontal conductors in open air*, são as duas últimas configurações que direcionam o plasma na direção dos condutores em meio aberto. Na Figura 6 é possível observar todas essas configurações e a direção de propagação do plasma do arco elétrico (REEVES; FREYENBERGER; HODDER, 2020).

Figura 6 – Configurações de eletrodos segundo IEEE 1584 2018



Fonte: Electrical Contractor (2019).



### 3.5 Arco elétrico *line side* e *bus side*

Além da configuração dos eletrodos há um outro aspecto importante a ser considerado na análise de arco elétrico, o local onde ele irá acontecer, existe a opção de se fazer a análise do arco elétrico do lado da linha, do inglês *line side*, ou do lado da carga, do inglês *bus side*. Essa escolha torna-se possível quando há um dispositivo de proteção de sobrecorrente na linha, sendo os mais comumente usados fusíveis, disjuntores e relés de sobrecorrente. Essa escolha afetará fortemente, principalmente, os procedimentos de manutenção dos equipamentos elétricos. Isso porque, em geral, os valores de EI são maiores do lado da linha e se optar-se por utilizar esse valor para o painel completo serão exigidos EPI com uma proteção mais elevada do que se fosse escolhido se utilizar os valores da carga.

Ao trabalhar na seção de entrada do painel o trabalhador estará sujeito ao nível de EI do lado da linha e ao trabalhar nas seções do alimentador estaria sujeito ao nível de EI do lado da carga, que ofereceria risco menor. No entanto deve-se considerar o que poderia acontecer caso o profissional estivesse em uma seção adjacente à entrada, já que, um arco poderia ocorrer devido a uma falha de isolamento ou sobretensão, por exemplo, e esse cenário já considera que os quadros não possuem barreiras suficientemente confiáveis para realizar o isolamento da entrada e das cargas. Portanto, esse empregado estaria sujeito à exposição a um nível de EI mais alta do que ele estaria protegido. Posto isso, foram elaboradas algumas maneiras de se contornar essa situação. Uma delas é a de se rotular o equipamento com apenas um valor de EI, o mais alto, o que exigirá do electricista a utilização de um EPI com classificação mais elevada, mas garantirá sua proteção. E outra seria a identificação do painel com dois valores de EI, o do lado da carga e o do lado da linha, e o trabalhador deveria realizar uma análise adicional quando fosse atuar em um quadro adjacente à entrada para garantir sua proteção, porém essa medida apenas pode ser adotada para painéis com certificação de resistência a arco.

O valor de EI do lado da linha ou *line side* é normalmente mais alto porque o dispositivo de proteção de sobrecorrente monitora a contribuição do motor e gerador para a falha, que, normalmente, é muito menor do que a contribuição da alimentação a montante. O dispositivo que interromperá essa corrente será um equipamento a montante e com um limiar de corrente muito mais alto, o que resultará em um maior tempo para a interrupção gerando EI mais elevadas. Existem, no entanto, alguns poucos casos em que a EI do lado da carga é maior do

que do lado da linha então a realização do cálculo de EI por painel é primordial para garantir a segurança (SKM SYSTEMS ANALYSIS, c2021).

## 4 METODOLOGIAS

O cálculo de EI é realizado de diferentes formas seguindo diferentes métricas e considerações. Algumas metodologias são baseadas apenas em estudos teóricos, enquanto outras são baseadas em testes em laboratório. Cada uma delas possui um escopo de aplicação que deve ser respeitado para que os resultados obtidos sejam os mais fidedignos.

### 4.1 Ralph Lee

A metodologia de Ralph Lee é uma metodologia teórica conservadora para cálculo de EI em sistemas com tensão acima de 600V que calcula a proteção para o arco elétrico ao ar livre. São necessários quatro parâmetros para encontrar os valores de EI, a máxima corrente de falta e o tempo que a proteção leva para atuar (se o tempo de atuação da proteção for maior do que dois segundos é necessário considerar nos cálculos o tempo que uma pessoa levaria para se afastar de um arco na ocorrência deste), a distância de trabalho e a tensão de linha do sistema. O equacionamento é então como descrito na equação 1, utilizando as constantes determinadas em sua formulação (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2021a) (LEE, 1982):

$$E_i = \frac{793 \times I_{arc} \times V_L \times t}{D^2} \quad (1)$$

Em que:

$E_i$  – EI ( $cal/cm^2$ )

$I_{arc}$  – corrente de falta (kA)

$V_L$  – tensão de fase do sistema (kV)

$t$  – tempo de duração do arco (s)

$D$  – distância de trabalho (pol)

### 4.2 Doughty e Neal

A Doughty e Neal é uma metodologia experimental aplicada a sistemas trifásicos com tensão menor ou igual a 600V e corrente entre 16 e 50 kA. Um ponto importante a se observar é que esse modelo não representa o pior caso de EI em todas as situações, já que considera a

interrupção do arco com duração de 6 ciclos, então torna-se essencial que os limites desse modelo sejam respeitados e que seja utilizada por profissionais com experiência na área. Os parâmetros necessários para o cálculo com essa metodologia são: a máxima corrente de falta, em que os cálculos devem considerar seu valor máximo e no menor, valor no qual o arco consegue se auto sustentar e atingir os maiores valores de EI onde o dispositivo de proteção levaria segundos ou minutos para atuar; o tempo de atuação dos dispositivos de proteção para a maior e menor corrente de falta; a distância de trabalho. A equação 2 mostra o equacionamento a ser utilizado em dois casos, ao ar livre e num cubículo (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2021) (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000) .

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1,9593} t [0,0016I_{arc}^2 - 0,0076I_{arc} + 0,8938] \quad (2)$$

$$E_{MB} = 1038,7D_B^{-1,4738} t [0,0093I_{arc}^2 - 0,3453I_{arc} + 5,6975] \quad (3)$$

Em que:

$E_{MA}$  – máxima EI para circuito ao ar livre ( $cal/cm^2$ )

$E_{MB}$  – máxima EI para circuito em cubículo ( $cal/cm^2$ )

### 4.3 IEEE 1584

A IEEE 1584 é um manual para a realização de cálculos de riscos de arco elétrico com o objetivo de capacitar uma pessoa qualificada para analisar sistemas de energia via um processo analítico para possibilitar o cálculo da EI provável de ser emitida por certo barramento e da distância segura de aproximação. O processo de cálculo consiste em etapas como a coleta de dados, a consideração de operação em diferentes cenários e os cálculos propriamente ditos. O escopo dessa metodologia é definido, basicamente, pelo nível de tensão trifásica que se encontra na faixa de 208V até 15kV, seus limites de aplicação estão citados de forma completa no quadro 6. Um ponto que é interessante de se ressaltar é que o equacionamento deve ser incorporado a uma planilha ou software pois realizar os cálculos a mão pode ser impraticável.

As nove etapas para a realização do cálculo de EI estão enumeradas no Quadro 1. A primeira etapa consiste na coleta de dados da instalação e do sistema, ou seja, é a etapa em que os diagramas unifilares são consultados para conferir se estão atualizados e os dados necessários

para o cálculo da corrente de curto coletados. A segunda etapa consiste na determinação dos modos de operação do sistema, ou seja, a análise dos modos de operação e a classificação dos modos com maior e menor corrente de curto-circuito, podem, ser incluídas configurações com diferentes alimentadores e anéis atuantes ou não. Na terceira há a determinação da corrente de curto-circuito e essa corrente de curto deve ser, preferencialmente, de pontos onde trabalhadores desenvolvam suas atividades. Na etapa seguinte, para cada equipamento, deve-se determinar as distâncias típicas entre os condutores que variam dependendo da classe do equipamento como descrito no Quadro 7.

Quadro 7 – Classe do equipamento e distância típica entre condutores

Classe do Equipamento	Distância Típica Entre Condutores (mm)
Painel de 15kV	152
Painel de 5kV	104
Quadro de distribuição de baixa tensão	32
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13

Fonte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (2018).

Nota: Adaptado pela autora.

Na quarta etapa é realizado o levantamento da configuração dos eletrodos dos equipamentos. Essa configuração diz respeito do posicionamento dos condutores dentro do espaço confinado ou ao ar livre. Na etapa de número seis são determinadas as distâncias de trabalho. A proteção contra EI é baseada na intensidade da energia que pode atingir o trabalhador, então essa distância de trabalho depende das características de tensão e tipo de equipamento. No Quadro 8 estão dispostas as distâncias típicas de trabalho em relação às classes dos equipamentos.

Quadro 8 – Distância Típica de Trabalho

Classe do Equipamento	Distância Típica de Trabalho (mm)
Painel de 15kV	914,4
Painel de 5kV	914,4
Quadro de distribuição de baixa tensão	609,6
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	457,2
Cabos	457,2

Fonte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (2018).

Nota: Adaptado pela autora.

Na etapa 7 são determinadas a intensidade e o tempo de duração do arco elétrico. A corrente de arco intermediária pode ser calculada segundo a equação 4 para três valores de  $V_{oc}$ .

$$I_{arc\_Voc} = 10^{(k1+k2\log I_{bf}+k3\log G)} (k4I_{bf}^6 + k5I_{bf}^5 + k6I_{bf}^4 + k7I_{bf}^3 + k8I_{bf}^2 + k9I_{bf} + k10) \quad (4)$$

Em que:

$I_{bf}$  – corrente de curto de falta trifásica

$I_{arc\_Voc}$  – corrente média de arco em valores eficazes que pode ser calculada para valores de  $V_{oc}$  iguais a 600V, 2700V e 14300V

G – distância típica entre condutores

k1 até k10 – coeficientes presentes no Anexo A

Caso a tensão do sistema tenha valores entre  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$ , utilizam-se as equações 5, 6 e 7 para encontrar o valor final da corrente de arco.

$$I_{arc\_1} = \frac{I_{arc\_2700} - I_{arc\_600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc\_2700} \quad (5)$$

$$I_{arc\_2} = \frac{I_{arc\_14300} - I_{arc\_2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc\_14300} \quad (6)$$

$$I_{arc\_3} = \frac{I_{arc\_1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc\_2}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (7)$$

Onde:

$V_{oc}$  – tensão de circuito aberto (kV)

$I_{arc\_1}$  – é a primeira corrente de arco para interpolação entre 600V e 2700V (kA)

$I_{arc\_2}$  – é a segunda corrente de arco para interpolação para tensão  $V_{oc}$  acima de 2700V (kA)

$I_{arc\_3}$  – é a terceira corrente de arco para interpolação para tensão  $V_{oc}$  abaixo de 2700V (kA)

Quando  $600V < V_{oc} \leq 2700V$  o valor final da corrente de arco é igual a  $I_{arc\_3}$  e quando  $V_{oc} > 2700V$  o valor final da corrente de arco é igual a  $I_{arc\_2}$ .

Em contrapartida, se a tensão do sistema tenha valores entre  $208 V < V_{oc} \leq 600 V$  então a equação 8 deve ser utilizada para encontrar o valor final.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{arc\_600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2}\right)\right]}} \quad (8)$$

Após calcular a corrente de arco deve-se determinar o tempo de duração do arco. Tipicamente, esse tempo de duração é definido como o tempo que a fonte a montante da corrente de arco fornece energia para a falta. Vale ressaltar que a duração do arco não depende apenas do tempo de abertura do circuito como também da quantidade de energia armazenada que será descarregada durante a formação do arco. Um estudo de coordenação se mostra necessário para essa etapa pois considera todos os dispositivos de proteção presentes e seus tempos de atuação sendo possível, então, determinar o tempo de duração do arco.

Após todas essas etapas tem-se o cálculo da EI propriamente dito em todos os equipamentos e deve-se levar em conta todas as características levantadas pois cada uma delas influencia no valor da EI. Outro fator decisivo no cálculo da EI é a determinação do local da falta se foi do lado da linha ou do lado da carga e ambos os valores serão calculados. A EI intermediária pode ser encontrada aplicando-se as equações 9 e 10.

$$E_{V_{oc}} = \frac{12,552}{50} T \times 10^\alpha \quad (9)$$

$$\alpha = k1 + k2lgG + \frac{k3I_{arcVoc}}{k4I_{bf}^7 + k5I_{bf}^6 + k6I_{bf}^5 + k7I_{bf}^4 + k8I_{bf}^3 + k9I_{bf}^2 + k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k12lgD + k13I_{arcVoc} + lg \frac{1}{CF} \quad (10)$$

Em que:

$E_{Voc}$  – EI que pode ser calculada para valores de  $V_{oc}$  iguais a 600V, 2700V e 14300V

T – tempo de duração do arco

D – distância de trabalho (mm)

k1 a k13 – coeficientes presentes no Anexo B para cada nível de  $V_{oc}$

E, novamente, caso a tensão do sistema tenha valores entre  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$ , utilizam-se as equações 11, 12 e 13 para encontrar o valor final da EI.

$$E_1 = \left[ \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \right] / 4,184 \quad (11)$$

$$E_2 = \left[ \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \right] / 4,184 \quad (12)$$

$$E_3 = \left[ \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \right] / 4,184 \quad (13)$$

Onde:

$E_1$  – primeira interpolação para EI entre 600V e 2700V (kA)

$E_2$  – segunda interpolação para EI para tensão  $V_{oc}$  acima de 2700V (kA)

$E_3$  – terceira interpolação para EI para tensão  $V_{oc}$  abaixo de 2700V (kA)

E, em contrapartida, se a tensão do sistema tenha valores entre  $208 \text{ V} < V_{oc} \leq 600 \text{ V}$  então o valor final da EI será dado pelas equações 14 e 15.

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^\alpha \quad (14)$$

$$\alpha = k1 + k2lgG + \frac{k3I_{arc.600}}{k4I_{bf}^7 + k5I_{bf}^6 + k6I_{bf}^5 + k7I_{bf}^4 + k8I_{bf}^3 + k9I_{bf}^2 + k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k12lgD + k13I_{arc} + lg \frac{1}{CF} \quad (15)$$

Quando  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 2700 \text{ V}$  o valor final da EI é igual a  $E_3$  e quando  $V_{oc} > 2700 \text{ V}$  o valor final da EI é igual a  $E_2$ .



Após todos os cálculos, para cada barramento, fica definido, em termos de proteção, que a EI local é a apresentada pelo pior caso, ou seja, a que apresenta o maior valor.

Com os valores de EI em cada ponto calculados pode-se realizar a determinação da distância segura de aproximação contra arco elétrico (AFB, do inglês *arc-flash boundary*) utilizando as equações 16 e 17 para encontrar o valor intermediário caso a tensão do sistema tenha valores entre  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$ .

$$AFB_{V_{oc}} = 10^\beta \quad (16)$$

$$\beta = \frac{k1 + k2lgG + \frac{k3I_{V_{oc}}}{k4I_{bf}^7 + k5I_{bf}^6 + k6I_{bf}^5 + k7I_{bf}^4 + k8I_{bf}^3 + k9I_{bf}^2 + k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k13I_{V_{oc}} + lg\frac{1}{CF} - lg\frac{20}{T}}{-k12} \quad (17)$$

A partir das equações 18, 19 e 20 pode-se encontrar o valor final da distância de aproximação

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (18)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (19)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (20)$$

Onde:

$AFB_1$  – primeira interpolação para a distância de aproximação entre 600V e 2700V (mm)

$AFB_2$ – segunda interpolação para distância de aproximação para tensão  $V_{oc}$  acima de 2700V (mm)

$AFB_3$ – terceira interpolação para distância de aproximação para tensão  $V_{oc}$  abaixo de 2700V (mm)

Quando  $600\text{V} < V_{oc} \leq 2700\text{V}$  o valor final da distância de aproximação é igual a  $AFB_3$  e quando  $V_{oc} > 2700\text{V}$  o valor final da corrente de arco é igual a  $AFB_2$ .

E, seguindo a mesma lógica das outras situações, se a tensão do sistema tenha valores entre 208 V <  $V_{oc} \leq 600$  V então as equações 21 e 22 devem ser utilizadas para encontrar o valor final. (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1584)

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\beta} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{k1 + k2lgG + \frac{k3I_{arc,600}}{k4I_{bf}^7 + k5I_{bf}^6 + k6I_{bf}^5 + k7I_{bf}^4 + k8I_{bf}^3 + k9I_{bf}^2 + k10I_{bf}} + k11lgI_{bf} + k13I_{arc} + lg\frac{1}{CF} - lg\frac{20}{T}}{-k12} \quad (22)$$

#### 4.4 ArcPro

A empresa *Kinectrics* desenvolveu o programa *ArcPro*, um *software* baseado em um modelo teórico que calcula o fluxo de calor associado a um arco elétrico em que os parâmetros térmicos estão associados com um arco monofásico alinhado verticalmente no ar. O *software* modela o arco levando em consideração propriedades de gás, materiais dos eletrodos, radiação térmica e dissipação de energia e, apesar de não declarar quais equações utiliza em seu dimensionamento, ele informa as equações 23, 24, 25 e 26 para os cálculos. Para efetuar os cálculos, o arco é modelado pontualmente na origem e, a partir da distância formada pela superfície da esfera, determina-se a energia (RESENDE, 2016)

$$I_{arc} = E(t) \times \int_0^R \sigma 2\pi r dr \quad (23)$$

$$V_{arc} = E(L) + V_{eletrodo} \quad (24)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx \frac{\sigma E^2}{\rho C_p} - \frac{U}{\rho C_p} + \frac{1}{\rho C_p} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (25)$$

$$H_T = \int P_{arc} dt = H_R + H_C \quad (26)$$

Em que:

$E(t)$  – campo elétrico gerado pela coluna de arco (V/m)

$\sigma$  – condutividade elétrica do gás (S/m)

$r$  – distância radial do arco (m)

$V_{arc}$  – tensão de arco elétrico em relação ao tempo

$L$  – comprimento do arco (m)

$P_T$  – potência do arco elétrico (W)

$H_c$  – calor convectivo total (J)

$H_T$  – calor total (J)

$H_R$  – calor irradiado (J)

$T$  – temperatura (K)

$\rho$  – densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  – calor específico do gás a pressão constante ( $\frac{J}{K.kg}$ )

$U$  – transferência de calor por radiação líquida do arco elétrico (W/m<sup>3</sup>)

$\eta$  – condutividade térmica do gás ( $\frac{W}{m.K}$ )

Em geral, a metodologia do *ArcPro* se aproxima dos valores encontrados pelo método da IEEE 1584 nas configurações VCB e VCBB para correntes de curto de até 21,5 kA e tensões até 15 kV, seus parâmetros podem ser vistos de forma completa no Quadro 9 (AMMERMAN, 2008). Para correntes mais elevadas, no entanto, esse método apresenta valores mais conservadores, superando os da IEEE 1584, o que o faz ser mais utilizado em altas tensões. (PRIMO; COELHO; MARIANI, 2020).

Quadro 9 – Parâmetros *ArcPro*

Parâmetro	Intervalo de Valores
Corrente de arco	3,5 até 21,5 kA
Espaçamento entre condutores	254 até 3048 mm
Duração do arco	4 a 30 ciclos
Distância de arco	2032 até 6096 mm

Fonte: Produção da própria autora

O programa emprega fatores de correção e consegue estender sua aplicação para modelos de falta monofásicos enclausurados ou trifásicos. Em seu apêndice ele recomenda a utilização do

fator de correção igual a 1,5 para a EI calculada em uma falta monofásica e igual a 1,2 até 2,2 para um arco trifásico, ambos ao ar livre, e um fator de 3,7 a 6,5 para um arco elétrico trifásico enclausurado. Porém, apesar de ter estes valores definidos é recomendado que para o cálculo de um sistema trifásico eles sejam utilizados com cautela, pois testes averiguaram que os valores de EI corresponderam a 2,5 a 3 vezes os valores previstos para os casos monofásicos ao ar livre e cerca de 5,2 a 12,2 vezes os valores enclausurados.

#### 4.5 NESC

O NESC apresenta dois quadros que se utilizam da metodologia do *ArcPro* para suas formulações. Todavia, como é um quadro pode se tornar um pouco limitado no que diz respeito à exatidão dos seus resultados já que utiliza uma distância entre barramentos determinada, faixas de tensão e valores escolhidos de corrente de falta. Para o primeiro quadro foi desenvolvido a partir de testes de falha com base no tipo de equipamento e não depende da corrente de falta. Os cálculos e dados são baseados, em geral, em uma distância de trabalho de 46 cm. O uso dos quadros tem como objetivo a seleção de vestimentas para proteção para reduzir a quantidade ou severidade da lesão, mas não está prevista a sua eliminação, e o Quadro 10 demonstra essa primeira relação.

Quadro 10 – Valor de EI para tensões de 50V até 1000V

Tipo de equipamento	Faixa de tensão nominal e energia incidente [cal/cm <sup>2</sup> ]		
	50 V até 250 V	251V até 600V	601V até 1000V
Medidores / armários autônomos	4	20	30
Transformadores de solo	4	4	6
Medidores CT e fiação de controle	4	4	6
Equipamentos de manobra / CCT	8	40	60
Pedestais / gavetas	4	8	12
Ar livre (incluindo linhas)	4	4	6
Protetores de rede	4		
Porta de painéis – mono/trifásico ( $\leq 100$ A)	4	8	12
Porta de painéis – trifásico ( $> 100$ A)	4		

Fonte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (2017).

Nota: Adaptado pela autora. No documento original pode ser encontrado com maiores detalhes.

Já o segundo quadro, representado pelos Quadros 11 e 12 os cálculos são baseados em um arco fase-terra ao ar livre, o quadro não prevê valores para EI de arcos fase-fase ou arcos em cubículos.

Quadro 11 – Relação Tensão de fase, corrente de falta, EI e número total de ciclos para extinção do arco (Parte 1)

Tensão de Fase (kV)	Corrente de falta (kA)	Número total de ciclos		
		EI = 4cal/cm <sup>2</sup>	EI = 8 cal/cm <sup>2</sup>	EI = 12 cal/cm <sup>2</sup>
1,1 até 15	5	46,5	93	139,5
	10	18	36,1	54,1
	15	10	20,1	30,1
	20	6,5	13	19,5
15,1 até 25	5	27,6	55,2	82,8
	10	11,4	22,7	34,1
	15	6,6	13,2	19,8
	20	4,4	8,8	13,2
25,1 até 36	5	20,9	41,7	62,6
	10	8,8	17,6	26,5
	15	5,2	10,4	15,7
	20	3,5	7,3	10,6
36,1 até 46	5	16,2	32,4	48,6
	10	7	13,9	20,9
	15	4,3	8,5	12,8
	20	3	6,1	9,1
46,1 até 72,5	20	18,2	36,4	54,5
	30	10,2	20,4	30,6
	40	6,6	13,2	19,7
	50	4,6	9,2	13,9
72,6 até 121	20	9,9	19,8	29,8
	30	5,7	11,4	17,1
	40	3,8	7,5	11,3
	50	2,7	5,4	8,1
138 até 145	20	12,1	24,1	36,2
	30	7,4	14,9	22,3
	40	5,2	10,4	15,6
	50	3,9	7,8	11,7
161 até 169	20	11,9	23,9	35,8
	30	7,4	14,8	22,2
	40	5,2	10,3	15,5
	50	3,9	7,8	11,6

Fonte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (2017).

Nota: Adaptado pela autora. No documento original pode ser encontrado com maiores detalhes.

Quadro 12 – Relação Tensão de fase, corrente de falta, EI e número total de ciclos para extinção do arco (Parte 2)

Tensão de Fase (kV)	Corrente de falta (kA)	Número total de ciclos		
		EI = 4 cal/cm <sup>2</sup>	EI = 8 cal/cm <sup>2</sup>	EI = 12 cal/cm <sup>2</sup>
230 até 242	20	13,6	27,3	40,9
	30	8,4	16,8	25,2
	40	5,9	11,7	17,6
	50	4,4	8,8	13,2
345 até 362	20	26,4	52,7	79,1
	30	16,2	32,4	48,6
	40	11,3	22,6	34
	50	8,5	17	25,5
500 até 550	20	23,1	46,2	69,2
	30	14,2	28,4	42,6
	40	10	19,9	29,9
	50	7,5	15	22,4
765 até 800	20	25,3	50,5	75,8
	30	15,6	31,2	46,8
	40	10,9	21,7	32,6
	50	8,2	16,3	24,5

Fonte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (2017).

Nota: Adaptado pela autora. No documento original pode ser encontrado com maiores detalhes.

Como os quadros não preveem arcos fase-fase ou enclausurados existe a necessidade da aplicação de um fator de correção para realizar a equivalência entre os resultados e esses valores estão entre 3,7 e 6,5 que são valores dados pelo próprio manual do *software*.

Outra correção possível diz respeito à distância de trabalho, que é considerada 381 mm para o desenvolvimento das tabelas pois a NESC prevê atividades em linha viva. Assim, para a realização da correção do valor de EI pode-se utilizar a equação 26 para adequar a distância de trabalho.

$$Ei_{REAL} = \left( \frac{381}{Distância\ de\ Trabalho\ Real} \right)^2 \times Ei_{NESC} \quad (26)$$

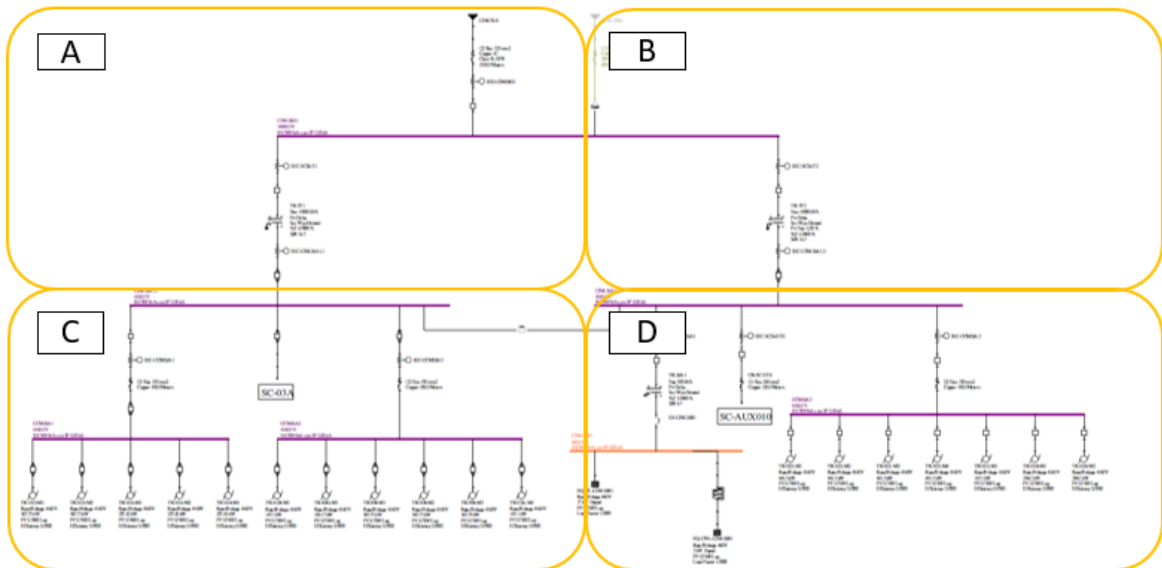
## 5 ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA EI

Nesta seção, é apresentado o estudo da aplicação das metodologias de cálculo de EI para uma sala elétrica localizada em uma empresa de mineração para o conhecimento dos riscos existentes possibilitando a implantação de medidas a fim de minimizá-los. Os cálculos foram realizados nos softwares PTW e ArcPro e as razões serão detalhadas a seguir.

### 5.1 Aplicação da Metodologia IEEE 1584

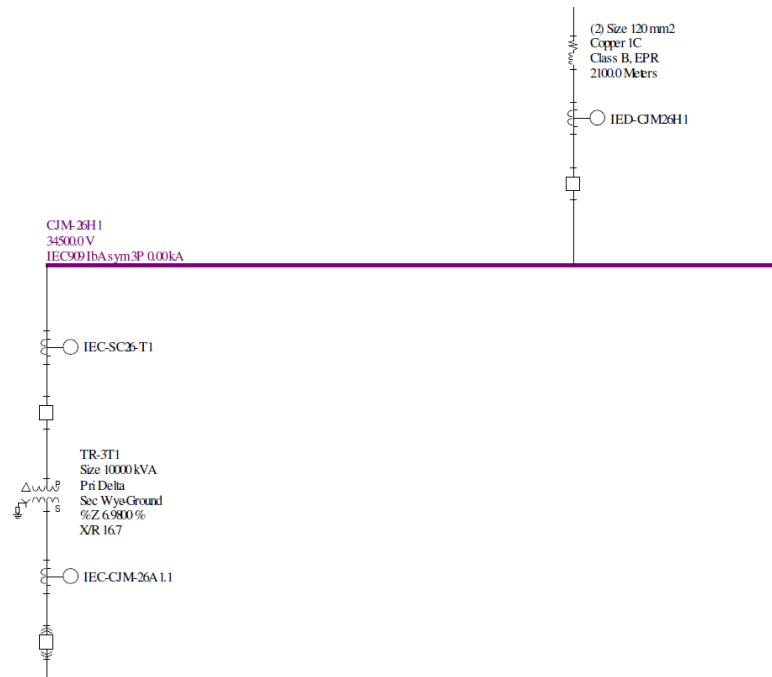
Seguindo a linha de raciocínio da metodologia da norma IEEE 1584, primeiramente foi realizado o levantamento da documentação técnica e informações do sistema, como descrito pelo primeiro passo no Quadro 1. O diagrama unifilar da sala elétrica de controle 26 é apresentada em figura única no Apêndice A e de forma a mostrar um maior detalhamento nas Figuras 7, 8, 9, 10 e 11, sendo que a Figura 7 funciona como guia.

Figura 7 – Sala elétrica SC-26



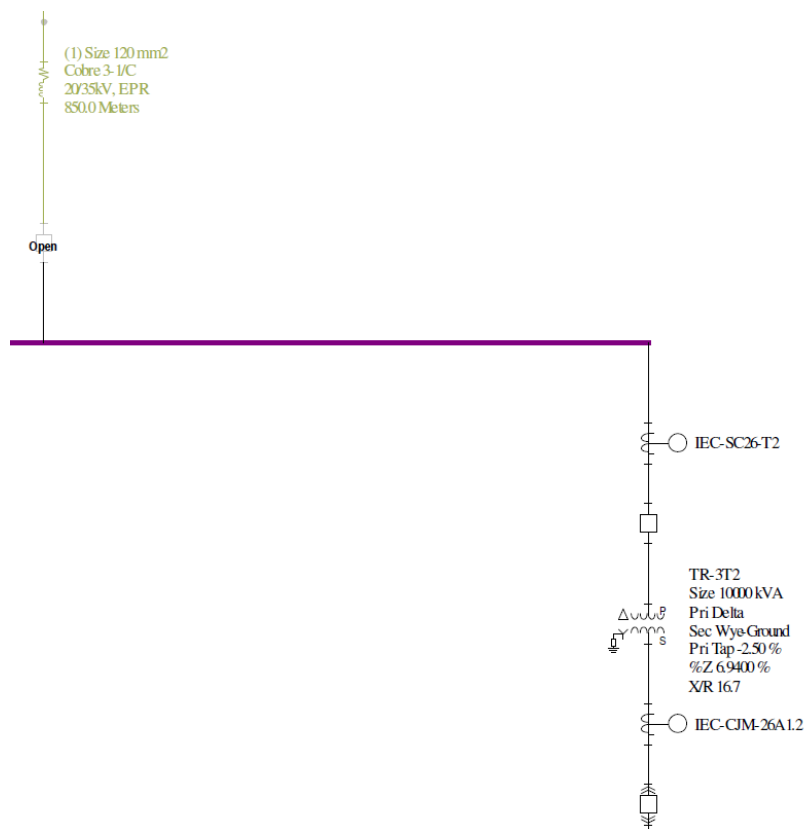
Fonte: Produção da própria autora.

Figura 8 – Sala elétrica de controle SC-26 A



Fonte: Produção da própria autora.

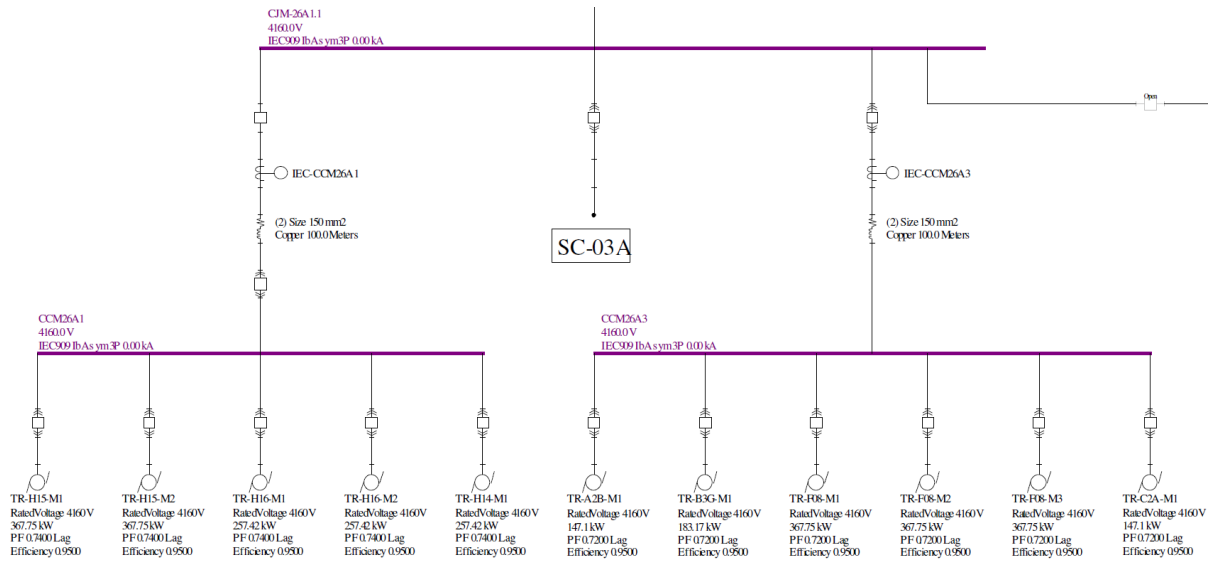
Figura 9 – Sala elétrica de controle SC-26 B



Fonte: Produção da própria autora.

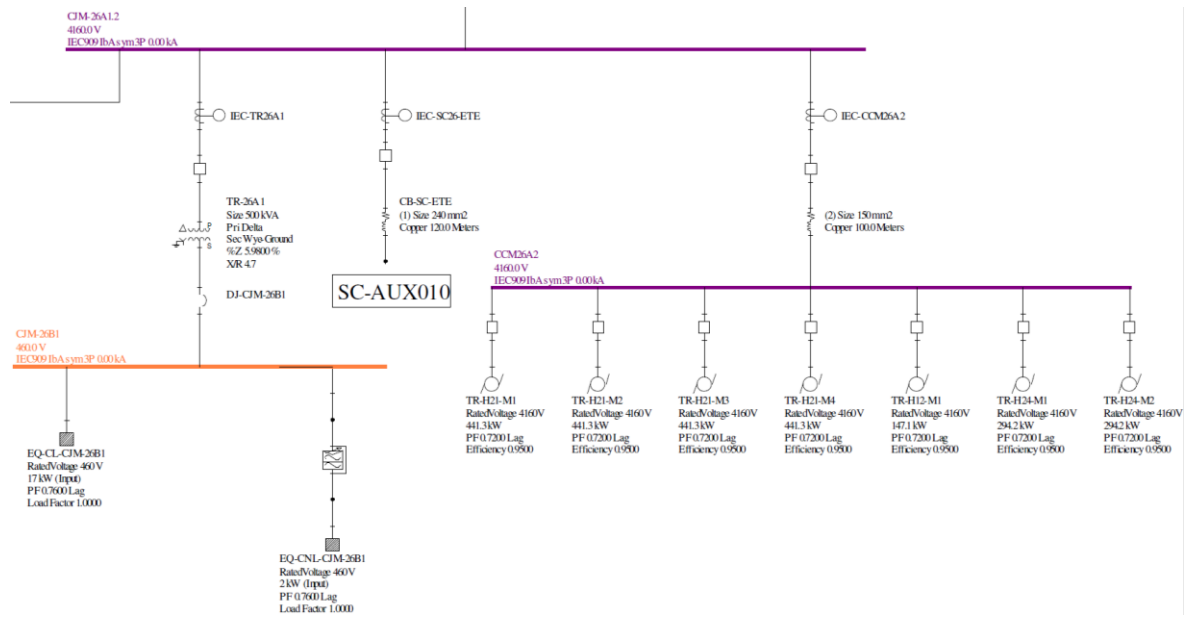


Figura 10 – Sala elétrica de controle SC-26 C



Fonte: Produção da própria autora.

Figura 11 – Sala elétrica de controle SC-26 D



Fonte: Produção da própria autora.

A SC-26 é alimentada por tensão trifásica, possui 3 níveis de tensão e 6 barramentos, essas informações se encontram de forma sintetizada no Quadro 13 e as principais cargas da instalação são motores (transportadores de correia) de potências variadas com fator de carregamento de 20% são encontradas dispostas no Quadro 14.

Quadro 13 – Relação de barramentos e tensão nominal

Barramento	Tensão nominal
CJM-26H1	34,5 kV
CJM-26A1.1	4,16 kV
CJM-26A1.2	4,16 kV
CCM-26A1	4,16 kV
CCM-26A2	4,16 kV
CCM-26A3	4,16 kV
CJM-26B1	460 V

Fonte: Produção da própria autora.

Quadro 14 – Relação de barramentos, motores e potências

Barramento	Motor	Potência
CCM-26A1	TR-H15-M1	367,75 kW
	TR-H15-M2	367,75 kW
	TR-H16-M1	257,42 kW
	TR-H16-M2	257,42 kW
	TR-H14-M1	257,42 kW
CCM-26A2	TR-H21-M1	441,3 kW
	TR-H21-M2	441,3 kW
	TR-H21-M3	441,3 kW
	TR-H21-M4	441,3 kW
	TR-H12-M1	147,1 kW
	TR-H24-M1	294,2 kW
	TR-H24-M2	294,2 kW
CCM-26A3	TR-A2B-M1	147,1 kW
	TR-B3G-M1	183,17 kW
	TR-F08-M1	367,75 kW
	FR-F08-M2	367,75 kW
	FR-F08-M3	367,75 kW
	TR-C2A-M1	147,1 kW

Fonte: Produção da própria autora.

O aterramento da instalação possui um sistema de aterramento distinto para cada nível de tensão. Para o sistema de 34,5 kV há um resistor de aterramento de 600 A, ou seja, a corrente é limitada pela corrente do resistor e em 4,16 kV o sistema elétrico apresenta resistor de aterramento de 420 V. E para o sistema de 460 V o sistema é solidamente aterrado, ou seja, a corrente de curto-circuito fase-terra possui a mesma ordem de grandeza do curto entre fases.

A segunda etapa consiste na determinação dos modos de operação do sistema pois estes impactam fortemente nos níveis da corrente de curto. O sistema elétrico dessa empresa opera de forma radial com apenas um alimentador principal energizado e dispõe redundância em

algumas subestações. Nesse caso são previstos 5 cenários, com outras subestações que estão representadas no Apêndice B para entendimento de como se conectam à SC-26. Desta forma, para o estudo de EI serão definidos os seguintes cenários:

1. Cenário 1: Cenário de operação padrão. Neste caso são adotados os ramais convencionais das subestações. Os cenários terão mudanças em relação aos seguintes pontos:
  - a. SC-03A alimentada eletricamente pela SC-26;
  - b. SC-26 alimentada eletricamente pela SER-02;
  - c. SE-AUX04 alimentada eletricamente pela SE-PR4,16kV;
  - d. SC-27 alimentada eletricamente pela SER-02
  
2. Cenário 2: Serão considerados os mesmos critérios do Cenário 1, exceto o item:
  - a. SC-03A alimentada eletricamente pela SC-30
  
3. Cenário 3: Serão considerados os mesmos critérios do Cenário 1, exceto o item:
  - b. SC-26 alimentada eletricamente pela SC-27;
  
4. Cenário 4: Serão considerados os mesmos critérios do Cenário 1, exceto o item:
  - c. SE-AUX04 alimentada eletricamente pela SC-02;
  
5. Cenário 5: Serão considerados os mesmos critérios do Cenário 1, exceto o item:
  - d. SC-27 alimentada eletricamente pela SC-26;

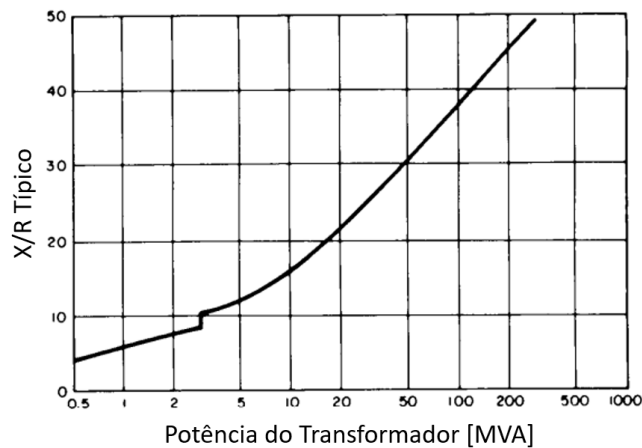
O objetivo da utilização de cenários é a determinação do pior caso de liberação de EI e determinar a categoria de EPI para realizar a proteção adequada para qualquer um dos cenários previstos tanto para a o lado da carga quanto para o lado da linha.

Na terceira etapa há a determinação da corrente de curto-circuito e ela deve ser calculada nos pontos em que os trabalhadores executem suas atividades já que a intensidade da corrente de curto é proporcional à intensidade das correntes de arco. Para a realização dos cálculos foi utilizado o módulo IEC 60909 *FaultAnalysis*, que utiliza a metodologia IEC 60909, de nome *Short Circuit Calculation in ThreePhase AC System*, do PTW em que são calculadas (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2016):

- $I''k$  = corrente inicial de curto, valor da componente CA no instante do curto
- $I_p$  = valor de pico instantâneo da corrente de curto, pico de meio ciclo
- $I_{dc}$  = valor da componente CC do curto circuito
- $I_b$  = corrente simétrica de interrupção
- $I_{basym}$  = corrente assimétrica de interrupção

A determinação da intensidade da corrente de falta em certo ponto está diretamente relacionada com as impedâncias dispostas entre esses dois pontos, ou seja, as principais impedâncias limitadoras das correntes de curto estão distribuídas entre condutores, transformadores e reatores série. A impedância de curto dos transformadores foi obtida através dos dados de placa e as relações X/R foram adotadas a partir de valores típicos de literatura extraídos da norma IEEE 141 que podem ser analisados a partir da Figura 12.

Figura 12 – Relação X/R para transformadores



Fonte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (1993).

Nota: Adaptado pela autora.

A partir disso foram determinados para os transformadores mostrados no Quadro 14:

Quadro 15 – Transformadores da planta e impedância de curto

Transformador	Potência	%Z	X/R
TR-3T1	10 MVA	6,98	16,7
TR-3T2	10 MVA	6,94	16,7
TR-26A1	500 kVA	5,89	4,7

Fonte: Produzido pela própria autora.

Os resultados encontrados serão mostrados todos juntos no modelo da análise de falha do PTW. Um detalhe que se deve comentar é que a intensidade das correntes de arco elétrico esperadas em cada um dos barramentos é proporcional à intensidade das correntes de curto-circuito. Estão sendo considerados os valores da corrente simétrica de curto trifásico a jusante do ponto analisado, sendo que se deve analisar os valores máximos e mínimos dessa corrente visto que ambos podem resultar na máxima EI.

A próxima ação a se tomar é a determinação das distâncias entre condutores que pode ser guiado de acordo com o Quadro 7, em que para valores de tensão superiores a 15 kV, seriam considerados as mesmas distâncias.

Para a etapa de número cinco está prevista a determinação das configurações dos eletrodos dos equipamentos. No caso da SC-26 todos os equipamentos apresentaram a configuração HCB, em que os eletrodos se encontram em posição horizontal dentro do invólucro, o que também resulta em um maior valor de EI comparando-se a outras configurações enclausuradas.

Na próxima etapa foram determinadas as distâncias de trabalho já que a intensidade da EI é inversamente proporcional à distância no qual o trabalhador se encontra em relação à fonte de arco. Para tal, foram consideradas as distâncias listadas no quadro 8, sendo que para tensões acima de 15 kV foram considerados os mesmos valores.

Na etapa de número sete são determinadas a intensidade e o tempo de duração do arco. O arco, segundo a IEEE 1584 apresenta uma queda de tensão que tende a limitar a corrente de falta, mas essa limitação se torna mais representativa em sistemas de baixa tensão. O cálculo da corrente de arco  $I_{arc}$  é realizado por meio do cálculo das correntes de arco intermediárias  $I_{arc\_Voc}$  e as equações relativas a esse cálculo estão numeradas de 3 a 6 para quando a tensão do sistema se encontra entre 0,6 e 15 kV e pela equação 7 quando o sistema possui tensão entre 208 e 600V. Já o tempo de duração do arco elétrico é determinado pelo tempo para a supressão da fonte de corrente/energia que alimenta o arco durante a falta. Para tal serão considerados os tempos de atuação de dispositivos de proteção por meio das funções 50/51 e o tempo de atuação dos dispositivos como disjuntores e chaves seccionadoras. A função 50 do relé de proteção consiste na proteção de sobrecorrente instantânea, em que o valor de atuação escolhido seja o

menor possível que não provoque atuação indevida. Já a função 51 corresponde a proteção de sobrecorrente temporizada utilizando como parâmetro  $I_p$ , ou seja, o relé será sensibilizado para valores de corrente superiores a esse parâmetro e atuará se o tempo for superior ao da sua curva característica no ponto de operação. Vale pontuar que o tempo de atuação dos dispositivos para faltas a terra não foram considerados pois a metodologia considera apenas a ocorrência de faltas trifásicas simétricas. A partir dessas considerações, para o presente estudo foram determinados os seguintes tempos de atuação para a proteção como tempos mínimos:

- 50ms – tempo de atuação dos relés, tempo de *trip*
- 83,3ms – tempo de atuação dos disjuntores

E quando havia a informação de um tempo de atuação diferente esse valor substituiu as premissas iniciais. No Quadro 16 estão dispostas as informações dos relés de proteção da planta.

Quadro 16 – Relés de proteção da planta

Alimentador	Nome PTW	Modelo	Ib
CJM-26H1	IED-CJM26H1	Schneider SEPAM S42	800 A
TR-3T1	IEC-SC26-T1	Schneider SEPAM S42	300 A
TR-3T2	IEC-SC26-T2	Schneider SEPAM S42	300 A
CJM-26A1	IEC-CJM-26A1.1/2	Schneider SEPAM S42	2500 A
CCM-26A1	IEC-CCM26A1	Schneider SEPAM S42	600 A
CCM-26A2	IEC-CCM26A2	Schneider SEPAM S42	1000 A
CCM-26A3	IEC-CCM26A3	Schneider SEPAM S42	600 A
TR-26A1	IEC-TR26A1	Schneider SEPAM S42	150 A
CJM-03AA	SC-26	Schneider SEPAM S42	2500 A

Fonte: Produção da própria autora.

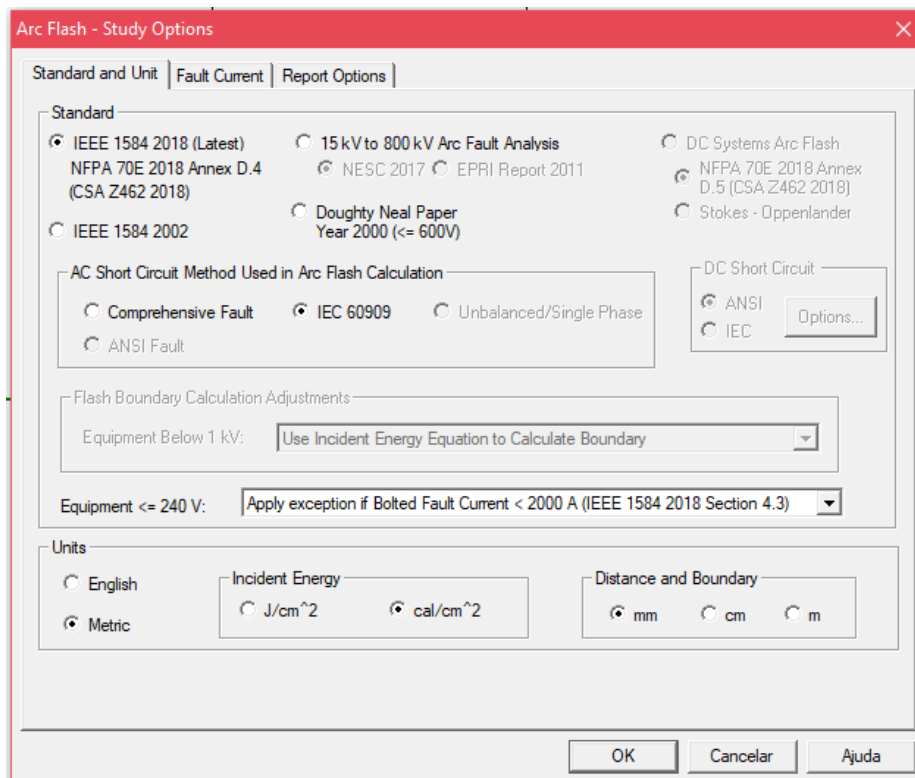
Tendo feito todas essas etapas, o próximo passo foi a realização do cálculo de EI e para tal, primeiramente, calculou-se a EI intermediária pelas equações 8 e 9 e para o cálculo da EI as equações relativas a isso estão numeradas de 10 a 12 para quando a tensão do sistema se encontra entre 0,6 e 15 kV e pelas equações 13 e 14 quando o sistema possui tensão entre 208 e 600V.

E, finalmente, há a determinação da distância de aproximação segura contra arco elétrico AFB em que, da mesma maneira que nos passos anteriores, primeiramente, encontra-se a AFB

intermediária pelas equações 15 e 16 e a partir das equações 17, 18 e 19 pode-se encontrar seu valor final para sistemas com tensão entre 0,6 e 15 kV e pelas equações 20 e 21 para tensões entre 208 e 600 V.

A determinação dos valores descritos pelas etapas dessa metodologia dentro de todos os cenários previstos e disposições *line side* e *bus side* é crucial para a escolha da proteção a ser implementada pois irá garantir a proteção em qualquer situação. As configurações para escolha de estudo no programa PTW podem ser visualizadas na Figura 13.

Figura 13 – Configurações de estudo PTW para metodologia IEEE 1584



Fonte: Produção da própria autora.

Os valores encontrados nas etapas 3, 7, 8 e 9, aplicando-se o que foi encontrado e determinado nas etapas de 1 a 6, pode ser visto nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18.

Figura 14 – Resultados para painel de 34,5 kV CJM-26H1

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )
CJM-26H1 (SC-26)	IEC-SC26-T1 (Phase-Grupo2)	34.50	17.42	17.42	1.03	1.03	0.0833	0.0000	HCB	762	1143	762	152	5379	914	30.6
CJM-26H1 (SC-26)	IEC-SC26-T2 (Phase-Grupo2)	34.50	17.42	17.42	0.36	0.36	0.0833	0.0000	HCB	762	1143	762	152	5379	914	30.6
CJM-26H1 (SC-26)	IED-CJM26H2 (Phase-Grupo2)	34.50	17.42	17.42	1.23	1.23	0.0833	0.0000	HCB	762	1143	762	152	5379	914	30.6
CJM-26H1 (SC-26)	IED-CJM26H1 (Phase-Grupo2)	34.50	17.42	17.42	14.81	14.81	0.05	0.0833	HCB	762	1143	762	152	5379	914	41.4
CJM-26H1 (SC-26) (IED-CJM26H1 LineSide)	IED-CJM26H1 (Phase-Grupo2)	34.50	17.42	17.42	2.62	2.62	0.0833	0.0000	HCB	762	1143	762	152	5379	914	30.6
CJM-26H1 (SC-26) (IED-CJM26H1 LineSide)	IED-M28 (Phase)	34.50	17.42	17.42	14.81	14.81	0.05	0.0833	HCB	762	1143	762	152	5379	914	41.4
CJM-26H1 (SC-26) (IEC-SC26-T1 LoadSide)	IEC-SC26-T1 (Phase-Grupo2)	34.50	17.14	17.14	16.11	16.11	0	0.0833	HCB	762	1143	762	152	4592	914	30.1
CJM-26H1 (SC-26) (IEC-SC26-T1 LoadSide)	IEC-CJM-26A 1.1 (Phase-Grupo2)	34.50	17.14	17.14	1.03	1.03	0.0833	0.0000	HCB	762	1143	762	152	4592	914	30.1
CJM-26H1 (SC-26) (IEC-SC26-T2 LoadSide)	IEC-SC26-T2 (Phase-Grupo2)	34.50	17.14	17.14	16.77	16.77	0	0.0833	HCB	762	1143	762	152	4592	914	30.1
CJM-26H1 (SC-26) (IEC-SC26-T2 LoadSide)	IEC-CJM-26A 1.2 (Phase-Grupo2)	34.50	17.14	17.14	0.36	0.36	0.0833	0.0000	HCB	762	1143	762	152	4592	914	30.1

Fonte: Produção da própria autora.

Figura 15– Resultados para painel de 4,16 kV CJM-26A1.2

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )
CJM-26A1.2 (SC-26)	IEC-CCM26A 2 (Phase-Grupo2)	4.16	22.18	19.43	3.31	2.90	0.0833	0.0000	HCB	570	1020	980	104	2400	914	4.30
CJM-26A1.2 (SC-26)	IEC-CJM-26A 1.2 (Phase-Grupo2)	4.16	22.18	19.43	18.87	16.53	0.05	0.0833	HCB	570	1020	980	104	2400	914	6.27
CJM-26A1.2 (SC-26) (IEC-CJM-26A1.2 LineSide)	IEC-CJM-26A 1.2 (Phase-Grupo2)	4.16	22.18	19.43	3.31	2.90	0.0833	0.0000	HCB	570	1020	980	104	2400	914	4.30
CJM-26A1.2 (SC-26) (IEC-CJM-26A1.2 LineSide)	IEC-SC26-T2 (Phase-Grupo2)	4.16	22.18	19.43	18.87	16.53	0.05	0.0833	HCB	570	1020	980	104	2400	914	6.27
CJM-26A1.2 (SC-26) (IEC-TR26A1 LoadSide)	DJ-CJM-26B1 (Phase)	4.16	0.46	0.41	0.46	0.41	0.08	0.0000	HCB	570	1020	980	104	164	914	0.06
CJM-26A1.2 (SC-26) (IEC-TR26A1 LoadSide)	IEC-TR26A1 (Phase)	4.16	0.46	0.41	0.46	0.00	0	0.0833	HCB	570	1020	980	104	164	914	0.06
CJM-26A1.2 (SC-26) (IEC-CCM26A2 LoadSide)	IEC-CCM26A 2 (Phase-Grupo2)	4.16	0.46	0.41			1.917	0.0833	HCB	570	1020	980	104	1075	914	1.58

Fonte: Produção da própria autora.



Figura 16 – Resultados para painel de 4,16 kV CJM-26A1.1

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )
CJM-26A1.1 (SC-26)	IEC-CCM26A1 (Phase-Grupo2)	4.16	32.78	28.32	1.95	1.68	0.0833	0.0000	HCB	570	1020	980	104	2856	914	6.47
CJM-26A1.1 (SC-26)	IEC-CCM26A3 (Phase-Grupo2)	4.16	32.78	28.32	2.10	1.81	0.0833	0.0000	HCB	570	1020	980	104	2856	914	6.47
CJM-26A1.1 (SC-26)	IED-CJM-03A A-ENTRADA 1 (Ph-Grupo2)	4.16	32.78	28.32	9.94	8.59	0.0833	0.0000	HCB	570	1020	980	104	2856	914	6.47
CJM-26A1.1 (SC-26)	IEC-CJM-26A1.1 (Phase-Grupo2)	4.16	32.78	28.32	18.81	16.25	0.05	0.0833	HCB	570	1020	980	104	2856	914	8.45
CJM-26A1.1 (SC-26) (IEC-CJM-26A1.1 LineSide)	IEC-CJM-26A1.1 (Phase-Grupo2)	4.16	32.78	28.32	13.98	12.08	0.0833	0.0000	HCB	570	1020	980	104	2880	914	6.47
CJM-26A1.1 (SC-26) (IEC-CJM-26A1.1 LineSide)	IEC-SC26-T1 (Phase-Grupo2)	4.16	32.78	28.32	18.81	16.25	0.05	0.0833	HCB	570	1020	980	104	2880	914	8.45
CJM-26A1.1 (SC-26) (IEC-CCM26A1 LoadSide)	IEC-CCM26A1 (Phase-Grupo2)	4.16	0.46	0.41			1.917	0.0833	HCB	570	1020	980	104	1075	914	1.58
CJM-26A1.1 (SC-26) (IEC-CCM26A3 LoadSide)	IEC-CCM26A3 (Phase-Grupo2)	4.16	0.46	0.41			1.917	0.0833	HCB	570	1020	980	104	1075	914	1.58
CJM-26A1.1 (SC-26) (IEC-CCM26A4 LoadSide)	IEC-CCM26A4 (Phase-Grupo2)	4.16	0.46	0.41			1.917	0.0833	HCB	570	1020	980	104	1075	914	1.58
CJM-26A1.1 (SC-26) (IEC-CCM26A4 LoadSide)	IED-CJM-03A A-ENTRADA 1 (Ph-Grupo2)	4.16	0.46	0.41			1.917	0.0833	HCB	570	1020	980	104	1075	914	1.58

Fonte: Produção da própria autora.

Figura 17 – Resultados para painéis de 4,16 kV CCM26A1, CCM26A2 e CCM26A3

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )	PPE Level / Notes ('N)
CCM26A1 (SC-26)	IEC-CCM26A1 (Phase-Grupo2)	4.16	30.45	26.41	28.50	24.72	0.05	0.0833	HCB	860	1020	980	104	2697	914	7.66	Level 2 (*S4)
CCM26A2 (SC-26)	IEC-CCM26A2 (Phase-Grupo2)	4.16	21.32	18.70	17.99	15.78	0.05	0.0833	HCB	870	1020	980	104	2300	914	5.83	Level 2 (*S4)
CCM26A3 (SC-26)	IEC-CCM26A3 (Phase-Grupo2)	4.16	30.47	26.42	28.37	24.60	0.0401	0.0833	HCB	870	1020	980	104	2622	914	7.30	Level 2 (*S4)

Fonte: Produção da própria autora.

Figura 18 – Resultados para painel de 460 V CJM-26B1

Bus Name	Protective Device Name	Bus KV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )
CJM-26B1 (SC-26)	DJ-CJM-26B1	0.46	11.16	8.03	11.16	8.03	0.08	0.0000	HCB	600	650	140	25	709	457	2.92
CJM-26B1 (SC-26) (DJ-CJM-26B1 LineSide)	IEC-TR26A1 (Phase)	0.46	10.95	7.88	10.95	7.88	0.2	0.0833	HCB	600	650	140	25	1300	457	10.0

Fonte: Produção da própria autora.

A partir da observação dos resultados obtidos pela análise de arco elétrico realizada pelo PTW pode-se resumir os valores de EI e distância de aproximação segura para arco elétrico que são observados no Quadro 22. Esses valores foram os maiores encontrados para cada barramento e seguem a metodologia citada anteriormente que indica a sinalização do barramento pelo maior nível de EI nele calculado.

Quadro 17 – Resumo resultados de EI metodologia IEEE 1584

Barramento	Localização	Cenário	Energia Incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	AFB (mm)
CJM-26H1	Line Side	1	41,4	5379
CJM-26A1.1	Line Side	1	8,45	2856
CJM-26A1.2	Line Side	1	6,27	2400
CCM-26A1	Line Side	5	7,66	2697
CCM-26A2	Line Side	5	5,83	2300
CCM-26A3	Line Side	5	7,3	2622
CJM-26B1	Line Side	1	10,0	1300

Fonte: Produção da própria autora.

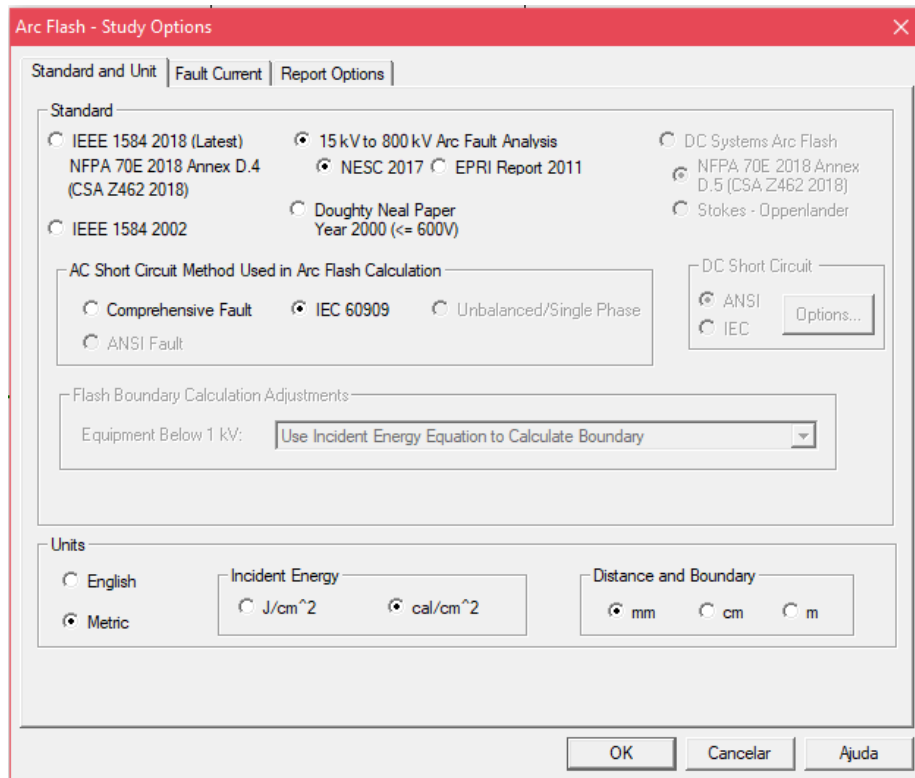
Levando-se em consideração os limites de aplicação das metodologias e como o barramento de alta possui tensão de 34,5 kV apresenta tensão que se encontra além dos valores de aplicação da norma IEEE 1584 deve-se então realizar a análise por meio de outra metodologia própria para tal que irá fornecer resultados menos conservadores.

## 5.2 Aplicação da Metodologia NESC – Painel de 34,5 kV

Utilizando o mesmo *software* da aplicação da metodologia IEEE 1584, o PTW, pode-se realizar a análise para sistemas com tensão acima de 15 kV pela metodologia da NESC 2017. Esse

método permite a aplicação para uma vasta gama de tensões porém ele se torna muito limitado por ter seus valores baseados em uma distância de trabalho fixa, o que pode tornar os cálculos não condizentes com a realidade da planta e os valores são baseados em um arco ao ar livre fase-terra, ou seja, não é própria para arcos fase-fase ou enclausurados. As configurações para escolha de estudo no programa podem ser visualizadas na Figura 19.

Figura 19 - Configurações de estudo PTW para metodologia NESC 2017



Fonte: Produção da própria autora.

Os valores encontrados ao aplicar essa metodologia com fator de correção 6,5 foram os ilustrados pela Figura 20:

Figura 20 – Resultados para painel de 34,5 kV CJM-26H1 NESC 2017

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	SLG Bolted Fault (kA)	Trip/Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Duration of Arc (sec.)	Equipment Type	Altitude (m)	3-Phase Multiplier	Gap (mm)	LL/ LG	Separation Distance (mm)	Minimum Approach Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )
CJM-26H1 (SC-26)	IED-CJM26H1 (Phase-Ground po2)	34.50	0.654	0.0500	0.0833	0.1333	SWG	0	6.5	152	LL	381	890	26

Fonte: Produção da própria autora.

Os valores relativos às distâncias foram preenchidos automaticamente pelo programa, demonstrando uma falta de adaptabilidade dos resultados pelo *software* ao local analisado. O fator de correção 6,5 foi adotado para a equivalência do arco elétrico trifásico foi o limiar inferior proposto pelo manual do próprio *software*, então uma das correções previstas já foi implementada. Para a correção da distância de trabalho aplica-se a equação 26 para uma distância de trabalho de 1500 mm, que resulta num valor de EI de  $0,95 \text{ cal/cm}^2$ . Caso fosse utilizado o limiar superior de correção o valor encontrado seria de  $1,67 \text{ cal/cm}^2$ .

### 5.3 Aplicação da Metodologia *ArcPro* – Pannel de 34,5 kV

Utilizando os parâmetros previamente encontrados para o barramento de alta tensão podemos submetê-los ao *software* a fim de realizar a simulação com base em sua metodologia e alcançar resultados menos conservadores. Os parâmetros submetidos foram:

- Tensão do barramento: 34,5 kV
- Corrente de arco: 17,42 kA
- Tempo de duração da falta: 8 ciclos
- Material do eletrodo: cobre
- Tipo do arco elétrico: arco trifásico enclausurado
- Distância de trabalho: 1500 mm

A partir disso foram gerados os resultados pelo *software* apresentados pelas Figuras 21 e 22. O programa realiza a medição em polegadas, do inglês *inches*, então o resultado é representado por 59 in que correspondem a aproximadamente 1498,6 mm. A partir dos cálculos realizados pelo *software* o resultado de EI para o pannel em questão reduziu drasticamente, devido a análise menos conservadora para altas tensões oferecida por essa metodologia. Um detalhe a ser pontuado é que distância de trabalho na simulação pelo PTW não pôde ser alterada para o valor de campo real, ação que foi possível no *ArcPro*. Porém o resultado para 914 mm ainda apresenta uma redução para a mesma categoria que pela distância real.

Figura 21 – Valores de calor x distância radial da fonte do arco

ARCPRO: Table of Heat vs. Distance  
(radial distance from midpoint of arc)

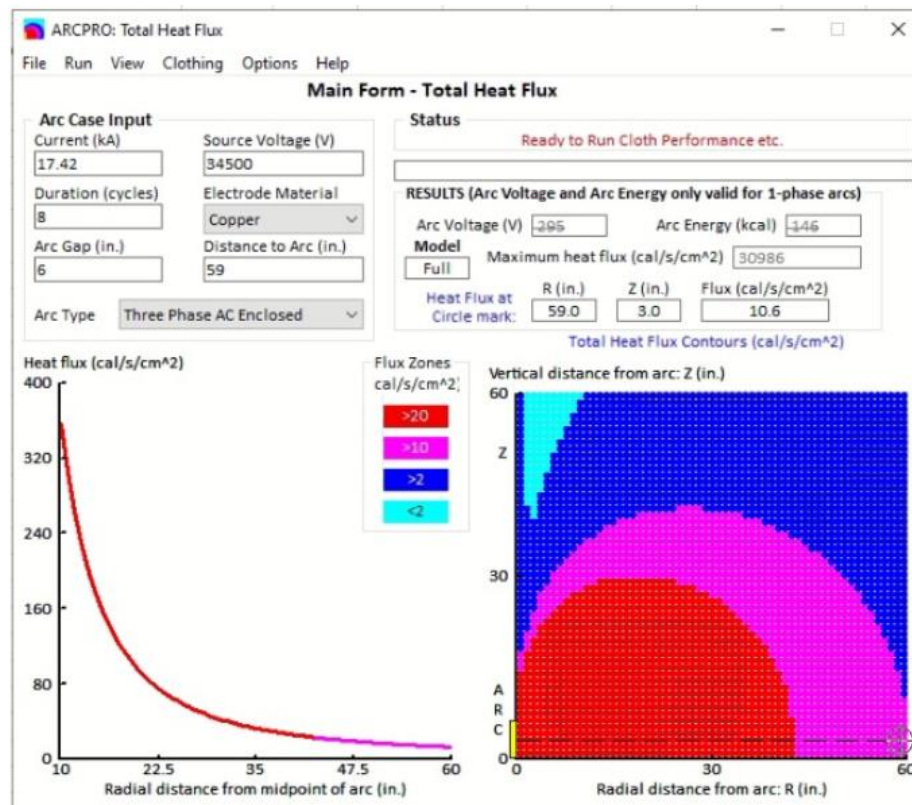
Current (kA): 17.42  
Duration (cycles): 8  
Arc Gap (in.): 6  
Source Voltage (V): 34500  
Electrode Material: Copper  
Arc Type: Three Phase AC Enclosed  
Distance to Arc (in.): 59  
Calculation Type: Full  
AFB: arc flash boundary

Arc Voltage (V): 295  
Arc Energy (kcal): 146  
Arc Type: Three Phase AC Enclosed

Distance (in.)	Heat Flux (cal/s/cm <sup>2</sup> )	Heat Energy (cal/cm <sup>2</sup> )
0.4	30986	4131
2	5119	682
4	1846	246
6	917	122
8	540	72.0
10	354	47.1
12	249	33.2
14	184	24.6
16	142	18.9
18	112	15.0
20	91.3	12.2
22	75.6	10.1
24	63.6	8.48
26	54.2	7.23
28	46.8	6.24
30	40.8	5.44
32	35.9	4.79
34	31.8	4.24
36	28.4	3.78
38	25.5	3.40
40	23.0	3.07
42	20.9	2.78
44	19.0	2.54
46	17.4	2.32
48	16.0	2.13
50	14.7	1.97
52	13.6	1.82
54	12.6	1.69
56	11.8	1.57
58	11.0	1.46
* 59	10.6	1.41
60	10.2	1.37
AFB 64.01	9	1.2

Fonte: Produção da própria autora.

Figura 22– Fluxo de calor total gerado pelo ArcPro



Fonte: Produção da própria autora.

#### 5.4 Comparação dos Resultados

A comparação entre os valores encontrados de acordo com as diferentes metodologias pode ser vista no Quadro 18.

Quadro 18 – Comparação entre resultados IEEE 1584, NESC e ArcPro

Metodologia	Energia incidente ( $cal/cm^2$ )	AFB (mm)
IEEE 1584	41,4	5379
NESC 2017	1,67	-
ArcPro	1,41	1625,6

Fonte: Produção da própria autora

Portanto, a partir dos resultados alcançados pode-se definir o nível de EI dos barramentos como o maior encontrado dentre os cenários e posicionamentos seguindo a metodologia de

identificação de painéis abordada anteriormente. Sendo assim, os valores finais de EI e AFB para os barramentos da SC-26 estão dispostos no Quadro 19.


Quadro 19 – Valores finais de EI e AFB para a SC-26

Barramento	Metodologia	Energia Incidente ( $cal/cm^2$ )	AFB (mm)
CJM-26H1	ArcPro	1,41	1625,6
CJM-26A1.1	IEEE 1584	8,45	2856
CJM-26A1.2	IEEE 1584	6,27	2400
CCM-26A1	IEEE 1584	7,66	2697
CCM-26A2	IEEE 1584	5,83	2300
CCM-26A3	IEEE 1584	7,3	2622
CJM-26B1	IEEE 1584	10,0	1300

Fonte: Produção da própria autora.

A partir dos resultados observa-se que para os barramentos CJM-26A1.1 e CJM-26B1 foram encontrados valores de EI acima de  $8 cal/cm^2$ , valor máximo de EI permitido dentro das normativas da empresa em que se encontram, o que demonstra a necessidade de alterações que visem a adequação desses valores. Medidas que podem viabilizar a proteção por EPI e garantir que esses painéis se encontrem dentro das normas da empresa devem ser encontradas e aplicadas ao sistema já que, caso contrário, estes devem ser realizados bloqueio e impedimentos além de serem sinalizados a respeito do risco de morte e interações só serão possíveis a partir de utilização de equipamento de categoria 4 e procedimentos de segurança mais elaborados. O PTW fornece exemplos de etiqueta para serem colocados nos equipamentos como os ilustrados pela Figura 23 em que são fornecidas informações como o barramento e o dispositivo de proteção associado, AFB, valor de EI, categoria do EPI, tensão do sistema e distância de aproximação restrita.

Figura 23 – Exemplo de etiqueta

 <b>ATENÇÃO</b>	
<b>Arc Flash and Shock Risk Appropriate PPE Required</b>	
<b>709 mm</b>	<b>Arc Flash Boundary</b>
<b>2.92</b>	<b>cal/cm<sup>2</sup> Incident Energy at 457 mm</b>
<b>PPE</b>	<b>Categoria 2:</b>
<b>460 VAC</b>	<b>Shock Risk when cover is removed</b>
<b>00</b>	<b>Glove Class</b>
<b>Not Specified</b>	<b>Limited Approach</b>
<b>200 mm</b>	<b>Restricted Approach</b>
<b>Bus: CJM-26B1 (SC-26) Prot: DJ-CJM-26B1</b>	

Fonte: Produção da própria autora.

Uma das formas de adequação seria a utilização de grupos de ajustes na proteção local ou a montante de onde for destacada a sua necessidade, essa implementação acaba impossibilitando a seletividade da proteção por diminuir os tempos de atuação para o mínimo e, por conta disso, deve ser utilizada apenas quando há a realização de intervenções nos painéis. Outra possibilidade seria a utilização de relés de arco com atuação local e a montante através da utilização de sensores detectores de um arco a partir da associação do fenômeno com a luz emitida por ela e a sobrecorrente relacionada à sua ocorrência. Uma terceira forma que seria proveitosa mas dispendiosa, seria a troca dos painéis com EI acima de  $8 \text{ cal/cm}^2$  para painéis resistentes a arco, o que possibilitaria a aplicação da segunda metodologia de sinalização de painéis citada anteriormente e o nível de EI conseguiria ser reduzido nos painéis por diferenciar os valores *line side* e *bus side* garantindo que os efeitos do arco elétrico não iriam se propagar ao longo do painel. E, com a conformidade desses itens, o acesso a SC-26 seria permitido para trabalhadores habilitados perante a utilização de equipamentos de proteção de categoria 2.



## **6 CONCLUSÃO**

Este trabalho explorou a aplicação de algumas das metodologias disponíveis atualmente para fazer o estudo de caso de uma sala elétrica de controle em uma empresa de mineração. Como ela foi construída em um período em que essas precauções ainda não eram amplamente aplicadas nas indústrias, tornou-se necessário o estudo do nível de exposição aos riscos de arcos elétricos aos quais os trabalhadores estavam submetidos para o desenvolvimento de medidas para tornar essa sala segura.

O objetivo foi entender o fenômeno com um todo e realizar a aplicação da norma em uma sala como esta que possui 3 níveis de tensão e poderia ser feita uma comparação entre os resultados para a visualização do efeito de erro quando a norma é aplicada fora de seu escopo, o que se mostrou fortemente não recomendável por conta da diferença de cerca de 30 vezes de uma para a outra. Em suma, foi constatada que se deve utilizar determinada metodologia somente se ela apresentar todos os seus parâmetros atendidos a fim de gerar resultados fidedignos. Outro ponto a se destacar é de que uma metodologia apresentada em forma de tabelas pode ser mais facilmente aplicada, porém seus resultados não consideram todos as singularidades da planta analisada gerando resultados aproximados.

Finalmente, foram apresentados os valores finais para a sala de controle e medidas que podem ser adotadas para a adequação da proteção da sala para que trabalhadores possam acessá-la e tenham os riscos controlados caso haja algum incidente.

### **6.1 Sugestão de continuidade**

A ideia proposta neste trabalho foi a exploração dos conceitos de EI e aplicação das metodologias disponíveis tornando possível uma comparação entre alguns resultados. Porém alguns resultados se mostraram além do limite permitido para a empresa e, por conta disso, propostas para a diminuição desses valores foram apresentadas. Um possível trabalho posterior seria a aplicação dessas medidas sugeridas para estudar como elas podem alterar o comportamento do sistema diminuindo a EI.

Outra possível proposta seria a exploração das outras metodologias que não foram abordadas, como Ralph Lee e Doughty and Neal, por estarem fora do escopo de aplicação, em um circuito de baixa tensão para a análise dos resultados utilizando-se de todas e comparar os resultados para observar se convergem para um valor comum.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMMERMAN, R. F.; GAMMON, T.; SEN, P. K.; NELSON, J. P. Comparative study of arc modeling and arc flash energy exposures. *In: IEEE PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE*, 55, 2008, Cincinnati. **Proceedings[...]**. Cincinnati: IEEE, 2008, p.1-12.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE. **Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2020**: Ano base 2019. 2020 Disponível em : [https://abracopel.org/wp-content/uploads/2020/02/Anu%C3%83%C2%A1rio\\_2020-Site.pdf](https://abracopel.org/wp-content/uploads/2020/02/Anu%C3%83%C2%A1rio_2020-Site.pdf) . Acesso em: 18 mar. 2021

BRASIL. Decreto nº 3.724, de 15 de janeiro de 1919. Regula as obrigações resultantes dos acidentes no trabalho. **Diário Oficial da União**: seção 1, Rio de Janeiro, RJ, ano 31, p. 1013, 18 jan. 1919.

BRASIL. Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977. Altera o Capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo à segurança e medicina do trabalho e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 15, Brasília, DF, ano 89, 23 dez. 1977.

BRASIL. Portaria nº 1.127, de 02 de outubro de 2003. Estabelece procedimentos para a elaboração de normas regulamentares relacionadas à saúde, segurança e condições gerais de trabalho. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, ano 130, 03 out. 2018.

CLARK, C. G. The basics of arc flash. **General Electric**. 2015. Disponível em: <https://library.industrialsolutions.abb.com/publibrary/checkout/ArcFlash4?TNR=White%20Papers%7CArcFlash4%7CPDF> . Acesso em 11 set. 2021.

DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], vol. 36, n. 1, p. 257-269, 2000.

ELECTRICAL CONTRACTOR. **Questions and Answers: Electrode Configuration in 2018 IEEE 1584**. 2019. Disponível em: <https://www.ecmag.com/section/safety/questions-and-answers-electrode-configuration-2018-ieee-1584> . Acesso em: 20 mar. 2021.

HOSPITAL ISRAELITA ALBERT EINSTEIN. **Queimaduras**, c2020. Disponível em: <https://www.einstein.br/doencas-sintomas/queimaduras> . Acesso em: 22 ago. 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60909-0**: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. Geneva: IEC, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ENSINO PROFISSIONALIZANTE. **História Segurança do Trabalho**. 2017. Disponível em: <https://inbraep.com.br/publicacoes/historia-seguranca-do-trabalho/> . Acesso em: 18 ago. 2021.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **2017 National Electrical Safety Code**. New York: IEEE, 2017.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1584-2018: IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations**. New York: IEEE, 2018.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants**. New York: IEEE, 1993.

LAFLAIR, N.; MCKINNEY, M. H.; HADIDI, R. Arc flash assessment for a megawatt scale medium voltage research and testing facility. *In: 2017 NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, 2017, Morgantown. Proceedings[...]*. Morgantown: IEEE, 2017, p.1-5.

LANG, M.; JONES, K. Exposed to the arc flash hazard. **IEEE IAS Electrical Safety Workshop**, [s. l.], [s. v.], p. 1-10, 2014.

LEE, R. The other electrical hazard: Electrical arc blast burns. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], vol. 1A-18, n. 3, p. 246–251, 1982.

LUZ, D. P.; MILLAN, L. S.; ALESSI, M. S.; UGUETTO, W. F.; PAGGIARO, A.; GOMEZ, D. S.; FERREIRA, M. C. Electrical Burns: A retrospective analysis across a 5-year period. **Burns.**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 1015-1019, November 2009.

MARDEGAN, C.; PARISE, G. Estudos de Arco Elétrico: Cálculo de EI. **O Setor Elétrico**, [s. l.], 2018, ed. 144, p. 28-33, 2018.

MELO, R. S. **Direito ambiental do trabalho e a saúde do trabalhador: responsabilidades legais, dano material, dano moral, dano estético**. 5. Ed. São Paulo: LTr, 2013.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Manual De Orientação Para Especificação Das Vestimentas De Proteção Contra Os Efeitos Térmicos Do Arco Elétrico E Do Fogo Repentino**. [s. l.], MTE, 2020a. Disponível em: [https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/manuais-e-publicacoes/manual\\_de\\_orientacao\\_para\\_especificacao\\_das\\_vestimentas\\_de\\_protecao\\_de\\_arco\\_eletrico\\_e\\_fogo\\_repentino.pdf/view](https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/manuais-e-publicacoes/manual_de_orientacao_para_especificacao_das_vestimentas_de_protecao_de_arco_eletrico_e_fogo_repentino.pdf/view) . Acesso em: 19 mar. 2021.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Normas Regulamentadoras – NR. 2020b**. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs> . Acesso em: 19 mar. 2021.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora 5: Comissão Interna de Prevenção de Acidentes**. 2019a. Brasília: MTE, 2019. 33 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora 6: Equipamento de Proteção Individual - EPI**. 2018. Brasília: MTE, 2018. 11 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora 10: Segurança em Trabalhos com Eletricidade**. 2019b. Brasília: MTE, 2019. 18 p.

MOREIRA, B. M. **Estudo e redução de EI por arco elétrico em um sistema industrial**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 70E**. Quincy: 2021a. 120 p.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **OSHA and NFPA 70E: A History of Powerful Protection for Employees on the Job**. 2021b. Disponível em: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2021/04/21/OSHA-and-NFPA-70E-A-History-of-Powerful-Protection-for-Employees-on-the-Job> . Acesso em 10 set. 2021.

NOGUEIRA, Sandro D'Amato. **Meio ambiente do trabalho: o princípio da prevenção na vigilância e na saúde ambiental**. São Paulo: LTr, 2008.

O SETOR ELÉTRICO. **Acidentes com choques elétricos no Brasil: em 7 anos, mais de 4 mil mortes**. 2020. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/acidentes-com-choques-eletricos-no-brasil-em-7-anos-mais-de-4-mil-mortes/> . Acesso em: 18 mar. 2021.

O SETOR ELÉTRICO. **Tipologia dos Acidentes Elétricos no Brasil**. 2018. <https://www.osetoreletrico.com.br/tipologia-dos-acidentes-eletricos-no-brasil/> Acesso em 18 mar. 2021.

PRIMO, H. F.; COELHO, J. I.; MARIANI, R. T.; Estudo Comparativo das Metodologias de Cálculo de EI da IEEE-1584 2018, IEEE-1584 2002 e ARCPRO: Estudo de Caso Real. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 1, 2020, Santo André. **Anais[...]**. Santo André: SBA, 2021, [s. p.].

REEVES, A.; FREYENBERGER, M.; HODDER, M. Understanding the effect of electrode configuration on incident energy and arc-flash boundary. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], vol. 56, n. 6, p. 6069- 6075, 2020.

RESENDE, F. **Proteção Elétrica em Subestações: Uma abordagem sobre a EI**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ROCHA, G.; ZANIRATO, E.; AYELLO, F.; TANINAGA, R. Arc-flash protection for low-and medium-voltage panels. *In*: IEEE PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE, 58, 2011, Toronto. **Proceedings[...]**. Toronto: IEEE, 2011, p.1-8.

RODRIGUES, C. M.; **EPI na Construção Civil: Causas da resistência ao uso**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

RÔMULO, A.; SENGER, E. A IEEE 1584 e os métodos para cálculo de EI e distância segura de aproximação. **O Setor Elétrico**, [s. l.], 2012, ed. 76, p. 34-39, 2012.

SALIBA, T. M. **Legislação de Segurança, Acidente do Trabalho e Saúde do Trabalhador**. 9. ed. São Paulo: LTr, 2013.

SANTOS, E.; JÚNIOR, M.; NETO, V. Coordenação e seletividade: uma revisão de conceitos e os benefícios das técnicas disponíveis. **O Setor Elétrico**, [s. l.], 2014, ed. 96, 2014.

SANTOS, S. S.; ARAÚJO, R. B. **História Econômica Geral e do Brasil**. São Cristóvão: CESAD, 2011.

SKM SYSTEMS ANALYSIS. **SKM Arc Flash Line Side vs. Load Side**. c2021. Disponível em: [https://www.skm.com/SKM\\_Arc\\_Flash\\_Line\\_Side\\_vs\\_Load%20Side.html](https://www.skm.com/SKM_Arc_Flash_Line_Side_vs_Load%20Side.html) . Acesso em: 15 set. 2021.

SOUZA, V. **Lesões Decorrentes de Acidentes de Trabalho nas Indústrias Madeireiras**. 2000. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública, Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

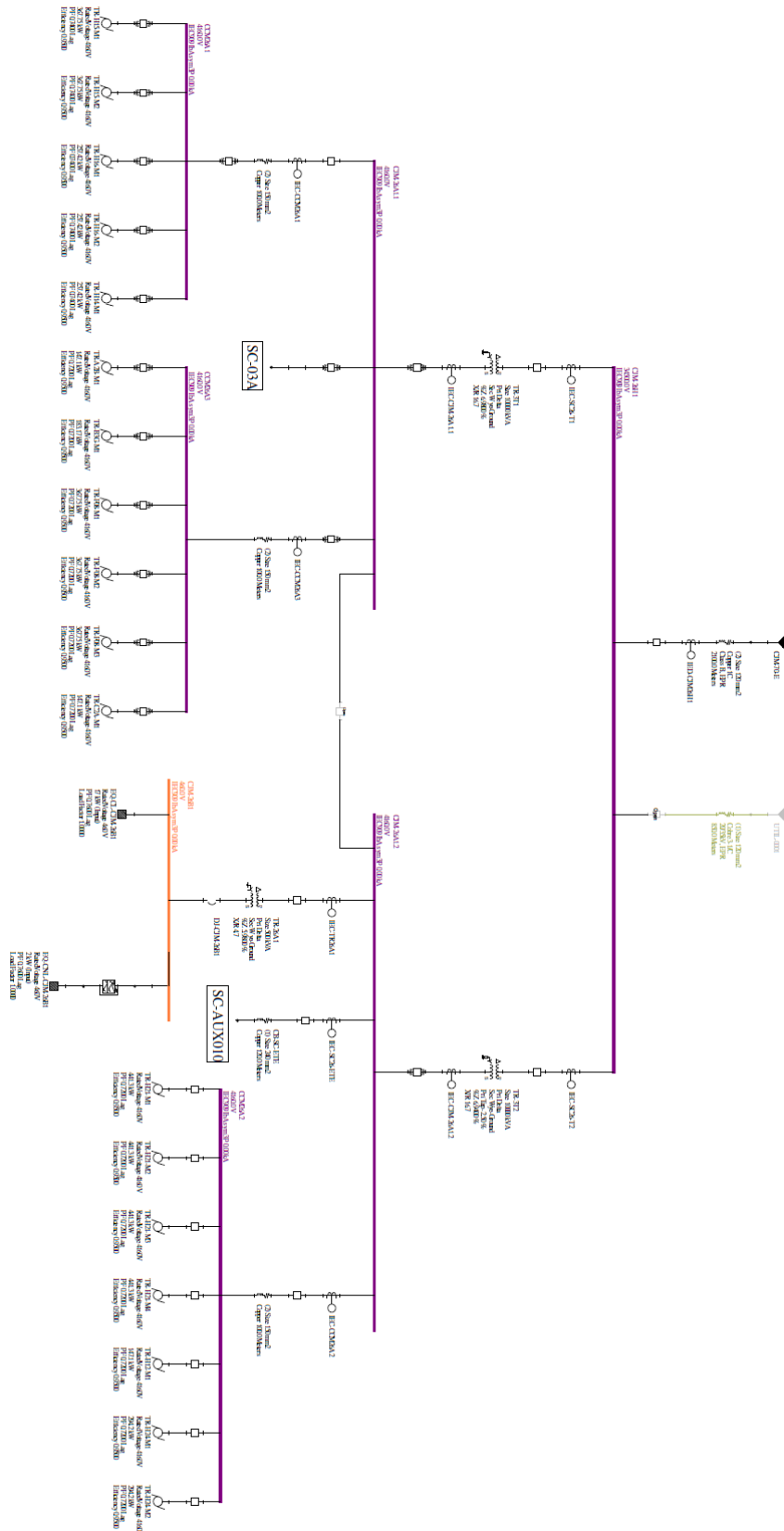
UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR. **OSHA 1910: Table of Contents**. 2014a. Disponível em: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.269AppE> Acesso em: 20 mar. 2021.

UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR. **OSHA 1910.269: Appendix E**. 2014b. Disponível em: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.269AppE> Acesso em: 20 mar. 2021.

UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR. **Arc Flash Handout**. 2007. Disponível em: [https://www.osha.gov/sites/default/files/2018-12/fy07\\_sh-16615-07\\_arc\\_flash\\_handout.pdf](https://www.osha.gov/sites/default/files/2018-12/fy07_sh-16615-07_arc_flash_handout.pdf) . Acesso em: 12 set. 2021.

WILKINS, R.; ALLISON, M.; LANG, M. Effect of electrode orientation in arc flash testing. *In*: CONFERENCE RECORD OF THE 2005 INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 40, 2005, Honk Kong. **Proceedings[...]**. Toronto: IEEE, 2005, p. 459-465.

# APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR SC-26



## ANEXO A – COEFICIENTES CÁLCULO CORRENTE DE ARCO

	E.C./V <sub>∞</sub>	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
<b>VCB</b>	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
<b>VCBB</b>	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
<b>HCB</b>	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
<b>VOA</b>	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
<b>HOA</b>	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



## ANEXO B – COEFICIENTES CÁLCULO EI

Quadro A – Voc = 600V

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.957
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
VCBB	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

Quadro B – Voc = 2700V

2700 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
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	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.742	1.09
VCBB	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

Quadro C – Voc = 14300V

14 300 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
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	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.677	1.06
VCBB	3.044516	0.125	0.245106	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-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