

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCELO CARVALHO BORGES DE MORAIS

**ANÁLISE DE RISCO HUMANO DEVIDO AO ARCO ELÉTRICO E COMPARAÇÃO
DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE**

UBERLÂNDIA

2020

MARCELO CARVALHO BORGES DE MORAIS

**ANÁLISE DE RISCO HUMANO DEVIDO AO ARCO ELÉTRICO E COMPARAÇÃO
DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares

UBERLÂNDIA

2020

MARCELO CARVALHO BORGES DE MORAIS

**ANÁLISE DE RISCO HUMANO DEVIDO AO ARCO ELÉTRICO E COMPARAÇÃO
DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares

Uberlândia, 18 de dezembro de 2020

Prof. Carlos Eduardo Tavares, Dr. (UFU)

Prof. Luciano Coutinho Gomes, Dr.(UFU)

Prof. Gustavo Brito de Lima, Dr. (UFU)

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a meus pais, que sempre se esforçaram para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Ao meu irmão, que me acompanhou na intensa jornada de estudos em Uberlândia.

Aos meus familiares em geral, que sempre torceram e vibraram com as conquistas obtidas ao longo da graduação.

Aos meus amigos e colegas de curso, que sempre mantiveram um ambiente de alegria e auxílio mútuo.

Ao professor Carlos Eduardo e aos demais docentes da Faculdade, pelo auxílio empregado na orientação deste trabalho.

E, por fim, à minha avó Maria de Lourdes Carvalho, pelo estímulo incessante ao estudo e ao aprendizado.

*“O que sabemos é uma gota,
o que ignoramos é um oceano”*

Isaac Newton

RESUMO

O fenômeno do arco elétrico esteve presente nos sistemas elétricos desde o início das aplicações práticas de engenharia; entretanto, os perigos relacionados ao arco foram bastante ignorados ao longo do tempo. Apenas há algumas décadas os estudos deste fenômeno foram sistematizados em normas, principalmente nos Estados Unidos. No Brasil, a principal norma em eletricidade, a NR-10, não trata explicitamente deste tema, o que obriga engenheiros e técnicos a recorrer às publicações internacionais para desenvolvimento seguro de projetos. Neste contexto, o presente trabalho visa estudar e comparar as possibilidades de aplicação de duas das principais normas utilizadas: a NFPA-70E e a IEEE-1584, a partir de um estudo de caso realizado em um supermercado que verifica os resultados obtidos na análise de segurança ao arco elétrico. Discutem-se, então, as especificidades de cada um dos métodos e os resultados obtidos a partir do estudo realizado.

Palavra-chave: Arco elétrico. Risco Humano. Norma. Energia Incidente. Distância de Segurança.

ABSTRACT

The electric arc phenomenon has been present in electrical systems since the beginning of practical engineering applications; however, the dangers related to the arc have been largely ignored over time. Only a few decades ago the studies of this phenomenon were systematized in norms, mainly in the United States. In Brazil, the main standard in electricity, the NR-10, does not explicitly address this issue, which forces engineers and technicians to resort to international publications for the safe development of projects. In this context, the present work aims to study and compare the possibilities of applying two of the main standards used: the NFPA-70E and the IEEE-1584, based on a case study that verifies the results obtained in the analysis of safety to the electric arc carried out in a supermarket. Then, the specificities of each method and the results obtained from the carried-out study are discussed.

Keywords: Electric Arc. Human Risk. Norm. Incident Energy. Safety Distance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arco Elétrico entre hastes de carbono estudado por Hertha Marks.....	13
Figura 2 - Arco elétrico estabelecido entre dois condutores.....	15
Figura 3 - Arborescência dielétrica estabelecida em um cubo de acrílico.....	16
Figura 4 - Descarga de Townsend entre dois eletrodos.....	17
Figura 5 - Diagrama genérico de um Sistema Elétrico de Potência.....	18
Figura 6 - Comparação entre uma falta franca e outra por arco elétrico.....	20
Figura 7 - Subestação protegida por SF ₆ em Abu Dhabi.....	21
Figura 8 - Painel tipo armário para serviços em eletricidade.....	23
Figura 9 - Diagrama para detecção de arco por supervisão de corrente e luz visível.....	24
Figura 10 - Diagrama para detecção de arco com presença de comparadores.....	25
Figura 11 - Relação entre temperatura da pele humana e tempo de tolerância.....	26
Figura 12 - Arco elétrico em um painel e sua onda de explosão característica.....	27
Figura 13 - Capa da norma IEE 902-1998.....	29
Figura 14 - Estrutura programática da norma NFPA-70E.....	31
Figura 15 - Fachada do supermercado onde realizou-se o estudo de caso.....	39
Figura 16 - Disjuntor geral do QGBT estudado.....	40
Figura 17 - Contatores e timer empregados para controle da iluminação.....	40
Figura 18 - Diagrama unifilar do sistema analisado.....	42
Figura 19 - Curva de disparo do disjuntor: DWP225-125-3.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de Tensão e suas faixas de valores.....	19
Tabela 2 - Distâncias típicas de trabalho segundo a NFPA-70E.....	32
Tabela 3 - Distâncias entre condutores e expoentes segundo IEEE-1584.....	35
Tabela 4 - Tempos de abertura para diferentes disjuntores segundo IEEE-1584.....	36
Tabela 5 - Distâncias de trabalho típicas segundo IEEE-1584.....	36
Tabela 6 - Especificações dos diferentes métodos de cálculo.....	38
Tabela 7 - Especificação das Cargas do QGBT estudado.....	41
Tabela 8 - Resumo dos dados obtidos para o sistema analisado.....	41
Tabela 9 - Estimativa da impedância percentual de transformadores.....	43
Tabela 10 - Estratificação das categorias de risco segundo a NFPA-70E.....	45
Tabela 11 - Especificação de EPIs para diferentes categorias de risco.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
<i>NFPA</i>	<i>National Fire Protection Association</i>
NR	Norma Regulamentadora
<i>ANSI</i>	<i>American National Standards Institute</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>GIS</i>	<i>Gas Insulated Subestaion</i>
TC	Transformador de Corrente
DOU	Diário Oficial da União
<i>ATPV</i>	<i>Arc Thermal Perfomance Value</i>
<i>OSHA</i>	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Técnica Brasileira

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	12
2 – O ARCO ELÉTRICO.....	15
2.1 – Características físicas do fenômeno.....	15
2.2 – O Arco no Sistema Elétrico.....	18
2.2.1 – O Arco em regiões de média e alta tensão.....	19
2.2.2 – O Arco em regiões de baixa tensão.....	22
2.3 – Riscos associados.....	25
2.3.1 – Temperatura.....	25
2.3.2 – Ondas de Pressão.....	26
2.3.3 – Riscos gerais.....	27
3 – ASPECTOS NORMATIVOS.....	28
3.1 – Histórico.....	28
3.2 – A Norma Regulamentadora NR-10.....	29
3.3 – A Norma NFPA-70E.....	30
3.4 – A Norma IEEE-1584.....	33
3.5 – Resumo das estratégias de cálculo.....	38
4 – ESTUDO DE CASO.....	39
4.1 – Coleta de Dados.....	39
4.2 – Cálculo da corrente de curto-circuito trifásico.....	42
4.3 – Aplicação do método NFPA-70E.....	44
4.4 – Aplicação do método IEEE-1584.....	46
4.5 – Discussão dos resultados obtidos.....	48
5 – CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ADICIONAIS.....	55

1 – INTRODUÇÃO

Considerando todos os aspectos relacionados à operação dos Sistemas Elétricos, aqueles referentes à segurança durante a manutenção e o trabalho cotidianos em sistemas energizados são, certamente, itens centrais em termos de planejamento. A proteção da rede em si, através dos conhecidos dispositivos protetivos, bem como dos operadores é tema de estudo desde o início dos desenvolvimentos tecnológicos derivados da Engenharia Elétrica.

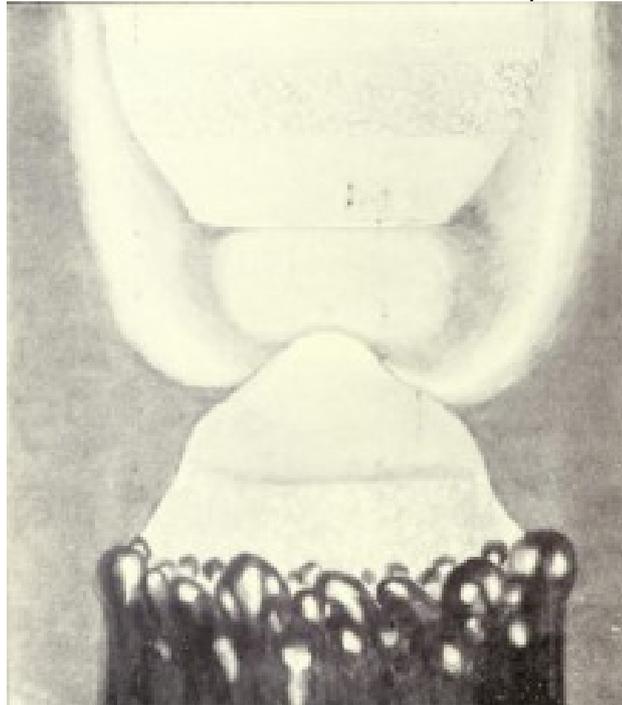
Dentre os principais riscos atribuídos ao trabalho em eletricidade, para além de perigos como choque elétrico, trabalho em altura e problemas ergonômicos, destaca-se a ocorrência do arco elétrico, fator responsável por gerar uma gama variada de riscos. Neste contexto, o arco elétrico é conhecido por efeitos como aumento de temperatura e pressão; projeção de vapores, gases contaminantes e resíduos; bem como efeitos de luminosidade e estampidos (MARDEGAN; PARISE, 2018).

É possível definir, de forma preliminar, o arco elétrico como uma descarga de eletricidade mantida entre dois terminais, envolvidos por um gás ou vapores dos terminais, de tal modo que a corrente estabelecida no sistema pode apresentar qualquer valor (ROSSI, 2001 apud LANCASTER, 1986). Quanto aos fatores relacionados ao estabelecimento dos arcos, é possível destacar como exemplos a falha de isolamento dos sistemas, o que resulta em perda de resistência superficial, bem como sobretensões transitórias devidas a manobras (OLIVEIRA, 2019 apud ROSCOE et al., 2010).

Apesar da difícil caracterização analítica, o arco enquanto fenômeno físico vem sendo estudado há longo tempo, incluindo os períodos iniciais de aplicação sistemática da eletricidade. O estudo começa tendo como um dos principais marcos as pesquisas de Hertha Marks Ayrton, notável engenheira, matemática e inventora inglesa responsável por sistematizar os conhecimentos relativos ao tema na obra *The Electrical Arc*, publicada em 1902.

A autora realiza-se nesse texto uma descrição das principais características do Arco Elétrico, a partir de experimentos conduzidos em laboratório, em que se analisam a aparência geral do fenômeno, como o comprimento do feixe de descarga, por exemplo.

Figural - Arco Elétrico entre hastes de carbono estudado por Hertha Marks.



Fonte: AYRTON (1902)

A partir da década de 50, a expansão do consumo de eletricidade levou à necessidade de aumento dos níveis de tensão tanto para transmissão quanto para distribuição, o que aumentou o risco de faltas por arco no secundário de transformadores. Ao longo da década seguinte a Academia Científica começa a realizar estudos mais analíticos, incluindo a publicação pelo IEEE de instruções para cálculo do valor mínimo provável da falta por arco em 1961.

Os estudos continuam, com foco principal na proteção do sistema elétrico, até que Ralph Lee publica, em 1982, seu primeiro trabalho com atenção aos perigos causados pelas explosões durante faltas elétricas. Ao longo da década, desenvolveu diferentes técnicas de cálculo para energia incidente devido aos arcos, fundamentando os parâmetros de análise matemática até muito recentemente empregados.

Para além dos estudos de Ralph Lee, as instruções fornecidas pela norma americana NFPA-70E, a qual é responsável por propor medidas de segurança gerais contra o fogo, começam a incluir, durante a década de 90, os riscos devidos ao arco elétrico e meios de proteção adequados.

Em 2002, no início do século XXI, a publicação da IEEE-1584 torna-se o grande marco da normatização relativa aos riscos dos arcos elétricos, ao propor análises estatísticas que

otimiza os cálculos inicialmente propostos por Ralph-Lee. Nos anos seguintes, a NFPA-70E, em suas seções relativas ao arco, passa a incluir os cálculos previstos pela norma de 2002.

Considerando o contexto nacional, as definições de manutenção da segurança em trabalhos com eletricidade são dadas pela Norma Regulamentadora 10, ou NR-10. A norma, emitida pelo Ministério do Trabalho, exige que os operadores de sistemas energizados contem com vestimentas adequadas e, também, que sejam realizados estudos relativos à energia incidente de arcos elétricos.

A NR-10 não define, entretanto, métodos específicos para essa análise. Assim, fica a cargo do responsável pelo projeto de determinada instalação elétrica definir qual método de cálculo deve ser empregado.

O presente trabalho visa, neste contexto, promover um estudo amplo dos métodos mais usados para determinação da energia incidente de arcos e, a partir de uma extensa revisão bibliográfica, promover análises específicas de caso, considerando diferentes pontos do sistema elétrico.

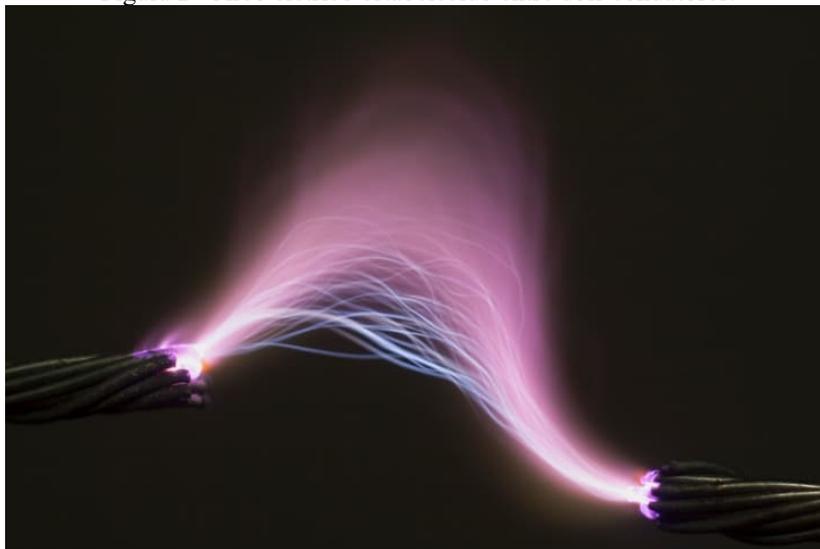
2 – O ARCO ELÉTRICO

2.1 – Características físicas do fenômeno

É possível definir o arco elétrico, de forma mais exata, como a passagem significativa de corrente elétrica por um material normalmente não condutor, como ar, se movimentando a altas velocidades, apresentando comportamento caótico em sua geometria devido à convecção de gases, jatos de plasma e forças eletromagnéticas (QUEIROZ; SENGER, 2012).

O fenômeno ocorre quando a corrente elétrica, devido a condições de curto-circuito, torna-se caótica, de tal modo que passa a superar a rigidez dielétrica do ar, fluindo entre dois terminais através do espaço entre os mesmos (MOREIRA, 2019 apud MARGOLIN, 2017). Ainda segundo Queiroz e Senger (2012), o modelamento do arco enquanto fenômeno é dificultado por fatores como mudanças no trajeto do arco a partir de correntes transitórias de retorno e sua reconexão pelos barramentos e partes de plasma.

Figura 2 - Arco elétrico estabelecido entre dois condutores.



Fonte: ANSI (2020)

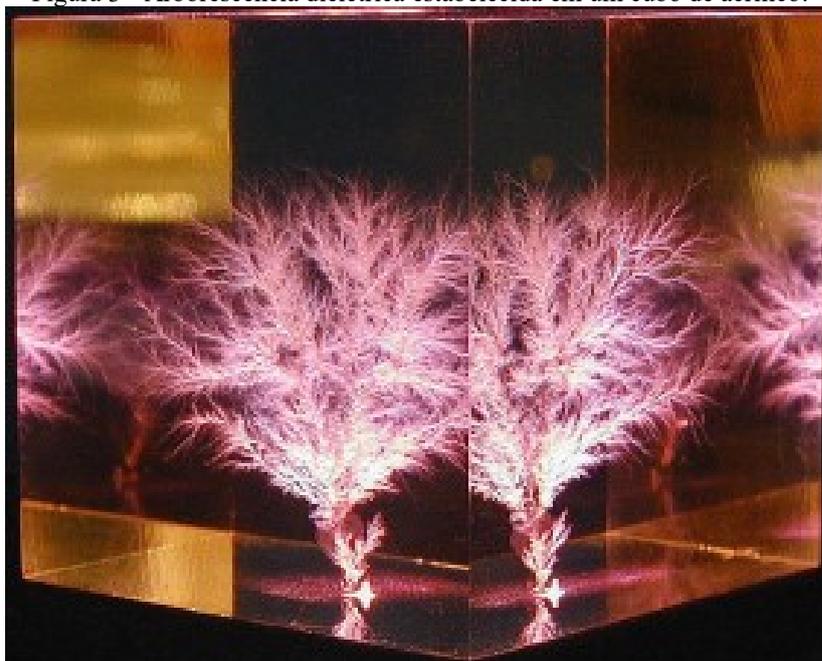
Dada a complexidade do fenômeno, é necessário considerar as origens físicas da quebra de rigidez dielétrica pelo ar, responsável por gerar o arco elétrico. Assim, é interessante rememorar os conceitos relativos à caracterização de materiais isolantes e materiais condutores. Sabe-se que materiais condutores são aqueles, como o cobre dos fios elétricos, em que as cargas elétricas se movem com facilidade, enquanto não condutores são aqueles, como a borracha, em que as cargas não se movem com facilidade (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

Considerando este contexto, a ideia de rigidez dielétrica passa a se fazer necessária, já que a definição proposta por Halliday e Resnick (2016) considera apenas as condições mais comuns de operação dos equipamentos elétricos, em que as propriedades dos elementos são aproximadamente constantes; sobre determinadas condições, entretanto, estes elementos podem ter suas características de condução ou isolamento alteradas.

Assim, a rigidez dielétrica de um material, a princípio isolante, pode ser definida como a propriedade que determina quão bem este consegue manter sua característica isolante mesmo submetido a campos elétricos elevados. Um material de elevada rigidez dielétrica, como o óleo mineral, por exemplo, apresenta grande resistência em atuar como condutor. O valor de tensão, para uma dada unidade de comprimento, responsável por vencer a rigidez dielétrica do material é chamado Tensão de Ruptura.

Quando submetido a um valor de tensão igual ou acima deste limite, a ruptura ocorre pois o número de portadores de carga no sistema aumenta bruscamente por diversas ordens de grandeza, de tal modo que sua resistência elétrica cai e ele passa a atuar como um condutor (RATEHER, 1964). De acordo com o estado do material, sólido, líquido ou gasoso, o processo de estabelecimento da ruptura pode diferir; em sólidos ocorre a conhecida arborescência dielétrica; nos gases, por sua vez, sabe-se que a ruptura se dá através de um mecanismo chamado Descarga de Townsend, processo nomeado em homenagem ao Físico-Matemático irlandês John Townsend.

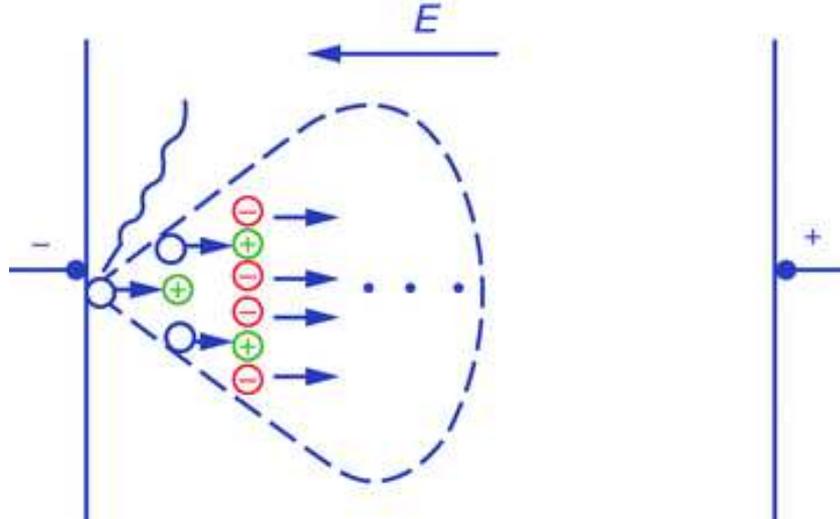
Figura 3 - Arborescência dielétrica estabelecida em um cubo de acrílico.



Fonte: HICKMAN (2006)

Essa descarga é estabelecida a partir de um efeito dominó, em que os elétrons livres são acelerados por um campo elétrico externo, colidindo com moléculas do gás e, assim, liberando elétrons adicionais (CARVALHO, 2018);

Figura 4 - Descarga de Townsend entre dois eletrodos.



Fonte: XIAO (2016)

A figura 3 mostra um diagrama do efeito avalanche gerado pela Descarga de Townsend, em que a ionização primeira de um átomo produz um par iônico, representado por um íon positivo, conhecido por cátion, e ainda um elétron livre. Caso o campo elétrico externo seja suficientemente elevado, o elétron livre produzido ganha energia cinética suficiente para liberar outro elétron assim que colidir com uma nova molécula.

O processo torna-se, portanto, uma reação em cadeia em que o número de elétrons livres cresce exponencialmente. De forma aproximada, o número de elétrons livres gerados pode ser dado por 2^n , em que n é o número de colisões. É possível perceber, na figura, a indicação do crescimento exponencial, em que cada coluna de elétrons é representada por uma quantidade duas vezes maior que aquela da região imediatamente à esquerda.

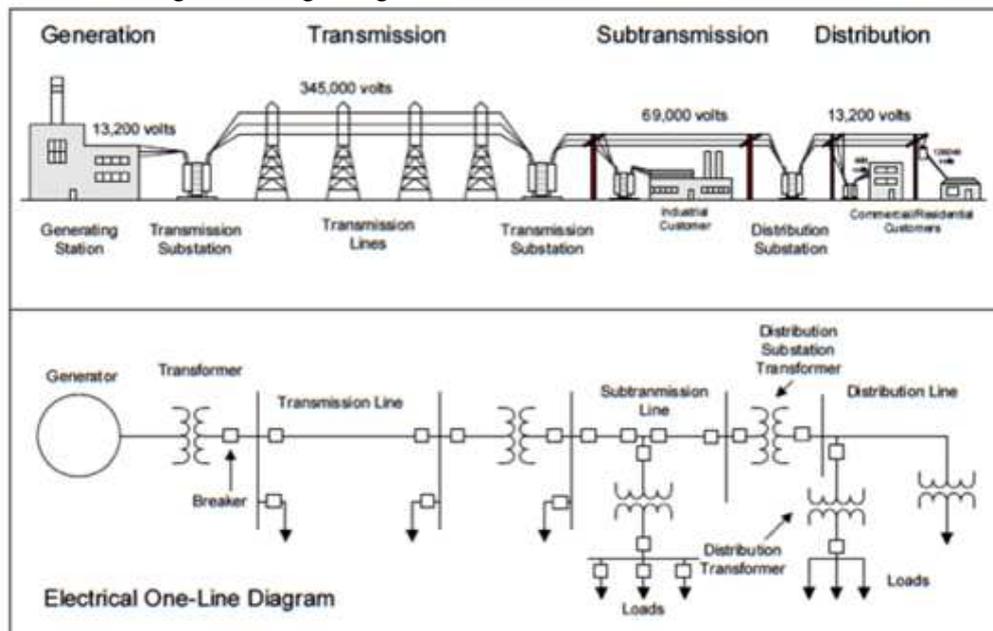
Ao fim do processo a quantidade de portadores de carga liberados se estabiliza, atingindo, segundo Raether (1964), um valor fixo, o qual é denominado Limite de Raether em homenagem ao cientista que o estudou. Diversos experimentos mostram que o efeito avalanche gerador do arco elétrico pode ocorrer para gases com diferentes densidades, mesmo em meios isolados à vácuo, o que mostra a importância dos estudos de mitigação deste fenômeno.

2.2 – O Arco no Sistema Elétrico

A análise de arcos no sistema elétrico mostra que, a princípio, seu estabelecimento pode se dar em diversos pontos da rede. Desde a geração, passando pelas linhas de transmissão até os níveis de distribuição primária e secundária, os elementos gerais do sistema estão sujeitos à ocorrência de arcos elétricos.

É possível considerar uma divisão que facilita o entendimento dos diferentes casos de estabelecimento do arco na rede. De modo geral, é possível separar estas ocorrências entre aquelas registradas nas etapas de média e alta tensão, com destaque para geração, transmissão ou distribuição primária; e, ainda, as que ocorrem nas etapas de baixa tensão, como a distribuição secundária, com tensões mais baixas.

Figura 5 - Diagrama genérico de um Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: KELLER et al. (2010)

De acordo com a ANEEL, responsável por regular grande parte do sistema elétrico, os níveis de tensão da rede se dividem em quatro grandes faixas, cujas divisões estão resumidas na tabela a seguir:

Tabela 1 - Níveis de Tensão e suas faixas de valores.

CLASSIFICAÇÃO DA REDE	FAIXA DE TENSÃO
Extra Alta Tensão	Maior que 230 kV
Alta Tensão	Entre 69 kV e 230 kV
Média Tensão	Entre 1 kV e 69 kV
Baixa Tensão	Abaixo de 1 kV

Fonte: ANEEL (2015)

A análise da tabela permite identificar que os fenômenos de arco elétrico ocorridos nas etapas de geração, transmissão e distribuição primária ocupam as faixas de tensão média até extra alta, enquanto aqueles presentes no sistema de distribuição primária ocorrem, majoritariamente, na faixa de baixa tensão. Do ponto de vista da origem física do fenômeno, há certa diferença entre estes dois tipos de falta.

Para os trechos de tensão mais elevada, segundo Mardegan e Parise (2018), o arco geralmente advém de uma falta fase-terra, o tipo de curto circuito mais comum nos sistemas elétricos; é possível, dado o elevado nível de tensão, que o contato à terra resulte em correntes de curto com estabelecimento de arco. Não há, necessariamente, problemas de manutenção ou falhas de isolamento neste tipo de falta. Falhas por erro humano também ocorrem em menor número, já que sistemas deste nível são, em geral, operados à distância.

Considerando os trechos do sistema que operam a baixa tensão, como painéis de distribuição ou quadro de controle de cargas, grande parte das faltas ocorre devido a erros humanos ou falhas gerais de operação. Neste contexto, Littelfuse (2005) destaca como problemas geradores, por exemplo, a perda de isolamento de condutores; obstrução de painéis; água ou líquido perto do sistema; eletricidade estática e, ainda, ferramentas ou equipamentos danificados.

2.2.1 - O Arco em regiões de média e alta tensão

Para regiões do sistema elétrico de tensão mais elevada a ocorrência da falta por arco ocorre, principalmente, por esforços decorrentes de sobretensões, que podem ser de regime permanente ou transitórias, sobre a isolamento.

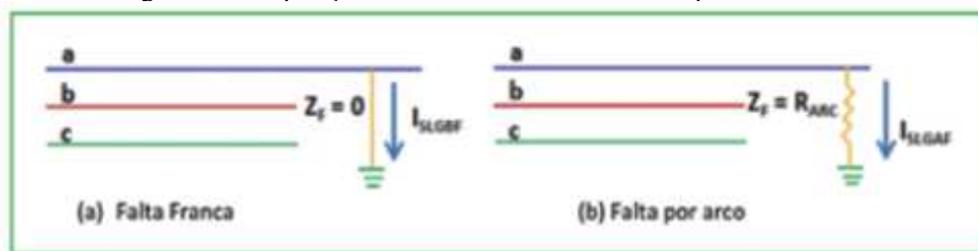
Mesmo considerando o fato de que faltas à terra não podem ser propagadas ao sistema através de transformadores delta-estrela ou delta-delta, o que torna a proteção independente

para cada trecho do sistema e, assim, mais rápida, o menor atraso na detecção e na eliminação de faltas por arco à terra gera efeitos potencialmente destrutivos.

Sabe-se, segundo Mardegan e Parise (2018), o valor de uma falta por arco de fase à terra, em regiões de média ou alta tensão, pode variar entre 20% e 100% do valor da falta franca, ou seja, aquela que ocorre com uma resistência de falta nula. Apesar de saber-se que faltas monofásicas, quando francas, apresentam valores de corrente de curto mais ou menos próximos das faltas fase-fase ou trifásicas, não se deve parametrizar a proteção contra curtos à terra do mesmo modo que a proteção de fase.

Essa limitação da parametrização deve se justamente ao fato de a corrente de arco ser limitada a uma certa fração do valor original da falta sem impedância. Tal fato indica, evidentemente, que o arco elétrico se estabelece com uma impedância diferente de zero, conforme a indica a imagem da figura 8; sabe-se ainda que a impedância do arco elétrico é praticamente resistiva e também que, neste caso, não se pode calcular a soma resultante das impedâncias, considerando as características não lineares do fenômeno.

Figura 6 - Comparação entre uma falta franca e outra por arco elétrico.



Fonte: O SETOR ELÉTRICO (2018)

De acordo com Dunki-Jacobs (2007) é possível realizar uma primeira estimativa do valor de energia incidente, cujo cálculo mais aprofundado será exposto ao longo do presente trabalho, a partir de uma expressão matemática bastante simplificada. Segundo a teoria, o valor da energia incidente da falta, seja ela um arco elétrico ou não, é função apenas da impedância de falta, do quadrado do valor da corrente de falta e, por fim, do tempo de eliminação da falta.

$$E = ZI^2T \quad (2.1)$$

A impedância de falta, na equação 2.1, é representada por Z , a corrente de falta por I e o tempo de falta por T . É interessante notar que a expressão anterior traz uma informação relevante; percebe-se que, para faltas francas, a energia dissipada no processo é necessariamente nula, pois a impedância do curto-circuito é igual a zero. Assim, apesar de a corrente de arco ser

menor quando comparada à falta convencional, a energia liberada para a vizinhança é, neste caso, não só diferente de zero como apresenta valor muito elevado.

Há, entretanto, um problema. Caso a expressão anterior seja utilizada para uma definição preliminar da energia gerada com a falta por arco, é necessário ter em mãos o valor da corrente. Ocorre que o cálculo desta grandeza não pode ser realizado analiticamente, considerando a característica caótica do fenômeno.

Assim, a fim de que os cálculos podem ser realizados, adotam-se diferentes valores de estimativas; alguns autores defendem que sejam estimados fatores entre 20% e 50% da corrente de falta, por exemplo. A definição mais analítica do cálculo desse valor será dada, ao longo do texto deste trabalho, pelas disposições contidas na norma IEEE-1584.

É possível destacar, também, que o escalamento, ou evolução de um arco monofásico para faltas bifásicas ou trifásicas, apresenta baixa possibilidade de ocorrência nas regiões do sistema que operam em média ou alta tensão. Geralmente, nestes trechos, os condutores são isolados ou muito distantes um dos outros, com exceção notável apenas dos condutores de média tensão de distribuição secundária.

A figura 7 mostra um dos exemplos mais conhecidos para otimização das características de isolamento em uma estrutura elétricas, neste caso, uma subestação. Cada uma das fases é protegida, neste sistema, por um sistema de cobertura metálica vedada, cujo volume é preenchido com gás Hexafluoreto de Enxofre, de símbolo químico SF₆. Esse gás é conhecido por apresentar baixíssima reatividade em termos químicos e, além disso, demonstrar propriedades físicas marcantes, como elevada rigidez dielétrica.

Figura 7 - Subestação protegida por SF₆ em Abu Dhabi.



Fonte: GARCIA et al. (2012)

Considerando um sistema elétrico com operação a 60 Hz, segundo Marques (2020) o gás apresenta rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que a do ar a pressões atmosféricas. Quando o mesmo é utilizado em uma GIS, a pressão empregada é de 3 a 5 vezes a equivalente atmosférica; neste caso, ainda segundo Marques (2020), a rigidez dielétrica chega a atingir valor 10 vezes maior que a do ar.

O uso das subestações a Hexafluoreto de enxofre é um dos exemplos que explicitam o motivo da baixa probabilidade de ocorrência do escalamento de arco em sistemas de extra-alta tensão. Uma aplicação bastante conhecida desta topologia no Brasil é encontrada na subestação da usina de Itaipu, que opera com tensão nominal máxima de 550 kV e gás isolante à pressão de 620 kPa.

2.2.2 – O Arco em regiões de baixa tensão

Para regiões do sistema elétrico que operem em baixa tensão, os arcos elétricos são originados por problemas diversos, dentre os quais se destacam, por exemplo, mau contato, sobrecarga, umidade, presença de animais, perda de isolamento por idade, perda de isolamento por ataque químico, erros humanos, procedimento inadequados e, também, defeitos de fabricação.

Considerando os sistemas de baixa tensão, a ocorrência do arco é bastante prevalente em painéis elétricos, centros de controle de motores, ou CCM's, mesas de comando e, ainda, cubículos fechados. A concentração de faltas nestas regiões se dá pela maior possibilidade de os problemas lembrados anteriormente ocorrerem em locais de operação como os citados.

A rigor, a estimativa a energia incidente gerada por uma falha nestas condições pode ser calculada, assim como para os trechos de alta tensão, a partir da equação 1. Ocorre, entretanto, que a estimativa feita por essa expressão é bastante preliminar; como a presença de operadores nos trechos de baixa tensão é muito comum, essa estimativa é pouco utilizada e não muito recomendada.

De qualquer modo, Mardegan e Parise (2018) indicam que, para uma ocorrência de arco elétrico trifásico em baixa tensão, é possível estimar o valor da corrente como 50% do da corrente de falta trifásica franca. A definição mais analítica do cálculo desse valor será dada, ao longo do texto deste trabalho, pelas disposições contidas na norma IEEE-1584.

Figura 8 - Painel tipo armário para serviços em eletricidade.



Fonte: WIKIMEDIA (2006)

A figura 8 indica um dos pontos com maior prevalência de estabelecimento dos arcos. Pesquisas indicam que 36% dos acidentes envolvendo arco ocorrem em painéis de trabalho em eletricidade e também nos cubículos fechados.

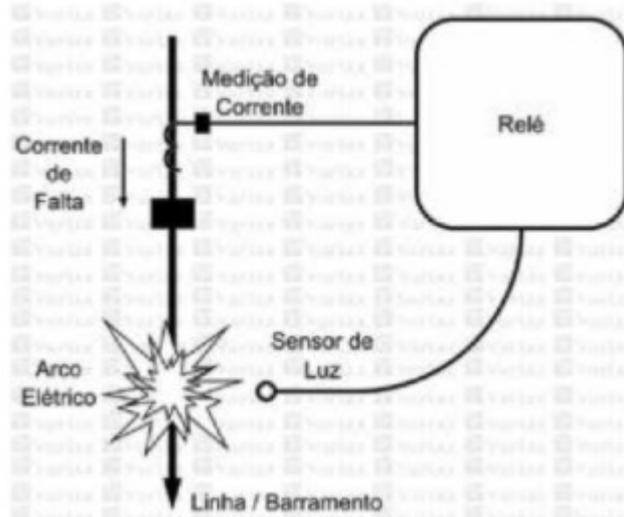
Desse modo, painéis e cubículos são projetados de modo a resistirem aos esforços mecânicos resultantes da falta, principalmente aqueles relacionados à expansão brusca do ar. Junior e Ferreira (2015) mostram que o aumento de pressão gerado pela descarga de energia do arco é controlado pela abertura automática de condutos de alívio que expulsam o ar interno para o ambiente; em geral essa expulsão do ar ocorre entre 5 e 60 milissegundos do início da falta.

Passada essa primeira etapa, a energia do arco é completamente descarregada no aumento de temperatura dos materiais internos do painel, que começam a se fundir. Apesar desta estratégia de proteção ser destrutiva para os materiais elétricos, a onda de pressão projetada sobre o operador é bastante atenuada, o que justifica o seu emprego. Deste modo, os riscos mecânicos da falta são fortemente mitigados.

Estratégias de proteção referentes à proteção não só dos operadores, mas também dos equipamentos, têm evoluído bastante. Uma estratégia bastante empregada atualmente baseia-se no emprego de relés supervisores que aliam medições da corrente elétrica com a análise de luminosidade proveniente do arco elétrico.

A figura 9 mostra uma estrutura genérica para supervisão e extinção do arco elétrico. O relé supervisor recebe dois sinais a serem interpretados; um vindo do transformador de corrente, ou TC, analisa se o valor da corrente de falta é correspondente à esperada do arco; o sensor de luminosidade, por sua vez, percebe se há ou não presença de luminosidade no local a ser monitorado. Com a junção positiva dos sinais, e somente neste caso, o relé encaminha o sinal de *trip* para o disjuntor, que atua abrindo o circuito e extingue o arco.

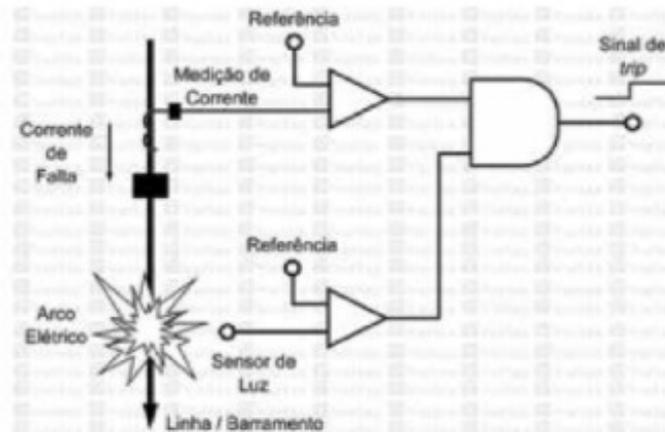
Figura 9 - Diagrama para detecção de arco por supervisão de corrente e luz visível.



Fonte: O SETOR ELÉTRICO (2015)

É possível empregar sistemas mais robustos que aumentam a confiabilidade do dispositivo protetor. Um dos meios de promover essa melhoria se dá pela comparação dos sinais captados de corrente e luminosidade com valores de referência simples, como indicado na figura 10, a fim de que o mecanismo evite atuar em situações desnecessárias. A presença de mais dispositivos nesta topologia resulta, entretanto, em aumento no tempo de envio do sinal de *trip*, o que pode ser suficiente para que o arco estabelecido cause grande estrago.

Figura 10 - Diagrama para detecção de arco com presença de comparadores.



Fonte: O SETOR ELÉTRICO (2015)

Além de sensores que utilizam a análise de luz visível, estudos recentes buscam empregar dispositivos supervisores que analisem variações no som ambiente, ou ainda que detectem radiação ultravioleta. Este último permite a detecção da falha numa etapa prévia ao estabelecimento do arco, período em que a ruptura dielétrica se inicia com a ionização do ar. Dada tamanha rapidez, o sinal de *trip* pode ser enviado em apenas 300 microssegundos.

É importante lembrar ainda que o escalamento do arco, de faltas monofásicas para bifásicas ou trifásicas, é bastante comum em instalações de baixa tensão. Os condutores das estruturas neste caso são bastante próximos entre si e também nus, o que facilita a escalada do arco. Em geral, sistemas que operam até 2,4 kV são os mais propensos a essa ocorrência.

2.3 – Riscos associados

2.3.1 – Temperatura

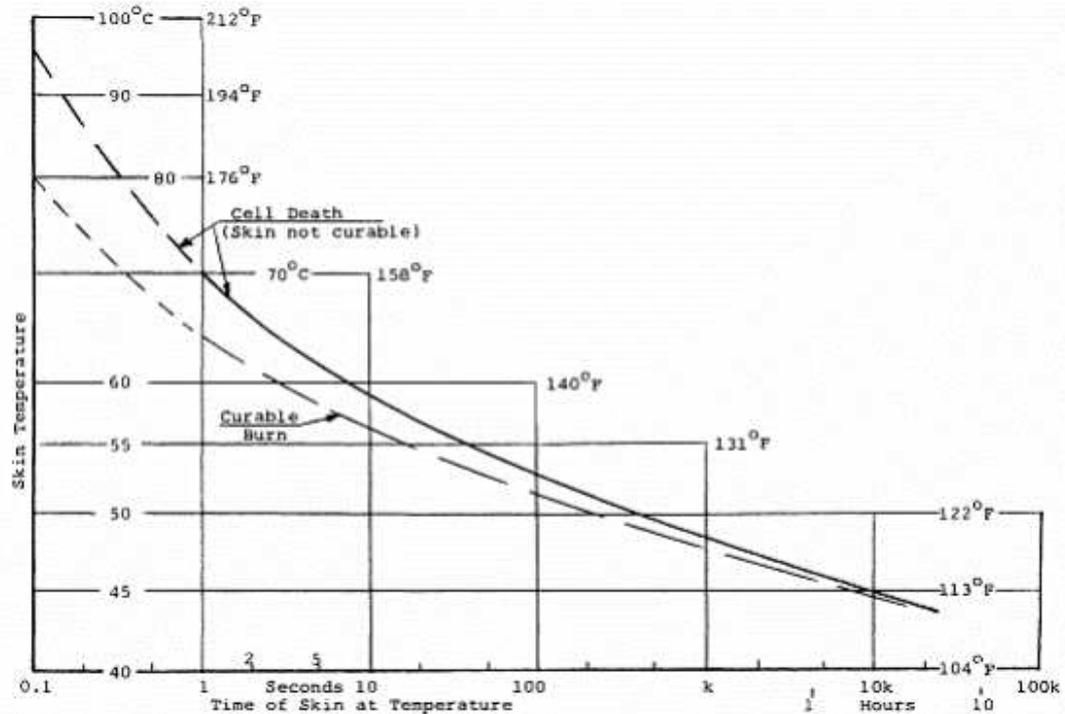
Conforme discutido na introdução, os riscos associados ao arco elétrico apresentam-se através de variada gama de eventos. Os estudos realizados por Ralph Lee (1982) mostram que a elevação de temperatura gerada pela energia incidente do arco é, certamente, o principal perigo a ele relacionado.

A região de origem do arco pode apresentar temperaturas próximas a 20000 °C, ou aproximadamente quatro vezes a temperatura do Sol, o que resulta no derretimento ou vaporização de qualquer tipo de material. Assim, há grande perigo de ocorrência de queimaduras de terceiro grau, ferimentos estes que podem levar o operador a óbito.

Sabe-se, de acordo com a revisão bibliográfica proposta por Queiroz e Senger (2012), que as células da pele humana são mais rapidamente avariadas ou mortas de acordo com o tempo de exposição.

Com uma temperatura próxima a 44 °C, por exemplo, a pele começa a sofrer danos a partir de 6 horas de exposição ao calor; para uma faixa de temperaturas entre 44°C e 51 °C, o acréscimo de 1 °C na temperatura duplica a taxa de destruição; acima de 51 °C a taxa de destruição aumenta significativamente; a partir de 70 °C as células são totalmente destruídas com apenas um segundo de exposição e, para qualquer temperatura acima de 96 °C, uma exposição maior que um décimo de segundo resulta em queimaduras incuráveis.

Figura 11 - Relação entre temperatura da pele humana e tempo de tolerância.



Fonte: LEE (1982)

A figura 5 ilustra a relação entre a temperatura, em graus Celsius e em Fahrenheit, da pele e o tempo de exposição às proximidades do arco, considerando a ocasião de morte das células na linha curva superior e de ferimentos curáveis na linha curva inferior.

2.3.2 – Ondas de Pressão

Destaca-se também a ocorrência de ondas de pressão, causada pela rápida expansão dos materiais metálicos e do ar nas localidades da falta. A expansão dos metais ocorre devido à

variação de temperatura muito elevada, que resulta na transformação dos materiais da fase sólida para a de vapor em curto espaço de tempo.

O cobre, material condutor muito empregado nas instalações elétricas, sofre uma expansão volumétrica de 67000 vezes neste processo. Essa expansão apresenta, ainda, sons associados que podem ultrapassar 160 decibéis, com potencial de resultar em danos aos pulmões e ao ouvido interno.

2.3.3 – Riscos gerais

Outros perigos de grande relevância decorrentes da falta são, por exemplo, a geração de vapores metálicos tóxicos, decorrente da fusão de matérias metálicas e plásticos; a projeção de materiais fundidos, com velocidades que podem exceder 1200 km/h e, ainda, a projeção de luz extremamente intensa, com potencial de danos à retina do olho humano.

Figura 12 - Arco elétrico em um painel e sua onda de explosão característica.



Fonte: DALTO (2017)

A figura 6 resume alguns dos perigos gerados pelo arco elétrico, entre eles a explosão e sua projeção de gases e partículas e, também, a elevada luminosidade. A revisão de Queiroz e Singer (2012) propõe, finalmente, um resumo dos efeitos que os riscos associados ao arco elétrico podem resultar no ser humano, com destaque aos seguintes itens: queimaduras; traumatismos cranianos; esmagamento dos pulmões; perda de membros; surdez; ferimentos resultantes de estilhaços; fraturas ósseas; cegueira; cataratas e, em último caso, morte.

3 – ASPECTOS NORMATIVOS

3.1 – Histórico

Como comentou-se brevemente no capítulo introdutório, a evolução do sistema elétrico norte americano em suas dimensões resultou, a partir da década de 50, no crescimento das faltas a arco. Estudiosos da eletricidade viram-se, então, obrigados a propor normas e regulações que protegessem principalmente os componentes do setor elétrico.

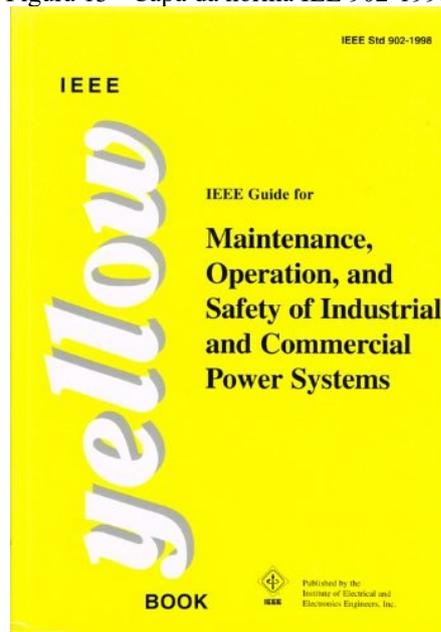
O primeiro grande passo nessa direção foi dado no fim da década de 50. Os estudiosos Kaufman e Page escrevem o artigo “*Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems – nature of the problem*”; neste texto, publicado em junho de 1960 pelo IEEE, os autores focam na análise de otimização da proteção elétrica, sem dar atenção relevante à segurança dos operadores. Este padrão de foco restrito à segurança dos componentes elétricos mostra-se também no artigo “*Predicting damage from 277 V single phase to ground arcing faults*”, de autoria de Stanback, publicado em agosto de 1977 também pelo IEEE.

A análise de riscos para os operadores do sistema começa a ser devidamente empreendida apenas no início da década de 80, a partir dos estudos de Ralph-Lee, considerado o pai da proteção humana contra arcos elétricos. Em seu artigo “*The other electrical hazard: electrical arc blats burns*”, publicado em 1982 pelo IEEE, Lee trata dos riscos associados a queimaduras, os quais foram introduzidos no item 2.3.1 do presente trabalho.

Alguns anos depois, os estudos iniciais de Lee são complementados por Dunki-Jacobs através do artigo “*The escalating arcing ground-fault phenomenon*”, publicado em 1986 pelo IEEE, em que o fenômeno da evolução de uma falta monofásica para bifásica ou trifásica é amplamente discutido. Logo depois, Lee e Jacobs se juntam e publicam, também pelo IEEE, o artigo “*Pressures developed by arcs*”, em que os fenômenos de aumento de pressão dentro de estruturas fechadas são analisados.

Os trabalhos de Lee, Jacobs e outros resultaram na promulgação do primeiro marco normativo de padronização comum dos Estados Unidos, realizada no final da década de 90 através do texto “*IEEE 902-1998 – Guide for maintenance – Operation and safety for Industrial and Comercial Power Systems*”. A norma estabelece diretrizes básicas para a segurança quanto à ocorrência de choques e arcos e, também, propões soluções de engenharia úteis para a minimização da ocorrência futura de faltas.

Figura 13 - Capa da norma IEE 902-1998.



Fonte: IEEE (1998)

Logo após a publicação do livro anterior, o estabelecimento de duas novas normas, ao longo da última década, passou a definir o atual *benchmark* internacional em termos de proteção ao arco elétrico. As definições normativas propostas inicialmente, em particular as defendidas por Lee, haviam se revelado muito conservadoras, exigindo, assim, atualizações diversas.

Com o aprimoramento da norma NFPA-70E, estabelecida pela *National Fire Protection Association*, e a promulgação da norma IEEE-1584, estas passam a ser consideradas as principais referências no estudo de arcos elétricos.

3.2 – A Norma Regulamentadora NR-10

Paralelamente aos estudos desenvolvidos nos Estados Unidos, o grande marco da normatização sobre segurança em eletricidade no Brasil ocorre com a publicação pelo Ministério do Trabalho da Norma Regulamentadora conhecida como NR-10, aprovada pela Portaria n. 3214 e publicada no DOU em 06 de julho de 1978.

O objetivo primeiro da norma, segundo o item 10.1.1, baseia-se em estabelecer os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde de trabalhadores em serviços elétricos (NR-10, 1978).

A norma, em sua publicação original, inseria-se em um contexto de pouca atenção ao arco elétrico e, também, de maior cuidado com os riscos de choque presentes no sistema

elétrico. Ao longo dos anos, seu conteúdo foi atualizado com alterações realizadas por Portarias, nos anos de 1983, 2004 e 2016.

Apesar de diferentes atualizações, a norma em sua versão atual não trata explicitamente da proteção contra arco elétrico em seus itens. O único ponto em que o arco é citado, segundo o subitem 2-b do anexo III, o elenca como um dos itens que deve ser ministrado no curso básico, oferecido a trabalhadores autorizados, sobre os conteúdos da norma. As definições do texto que podem ser relacionadas ao fenômeno tratam de mitigar consequências que, a princípio são causadas principalmente pelo arco elétrico.

O item 10.2.9.2, por exemplo, afirma que as vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas (NR-10, 1978). A elevação de temperatura e a inflamabilidade de roupas e equipamentos são problemas derivados principalmente dos riscos de arco; desse modo, a definição das vestimentas e seus EPIs, requerida neste item, relaciona-se ao fenômeno estudado.

O subitem a do item 10.3.9, por sua vez, define que o memorial descritivo de um projeto elétrico deve conter especificações relativas à proteção contra choque, queimaduras e outros riscos adicionais (NR-10, 1978). Como em um sistema elétrico a principal causa de queimaduras é a exposição a arco, é essencial que o engenheiro responsável pelo memorial descritivo inclua os efeitos da falta dentre as informações a serem consideradas.

Considerando a falta de definições específicas sobre arco elétrico na norma, a fim de garantir que os prestadores de serviços em eletricidade, é comum que sejam expedidos, pelos órgãos competentes, Termos de Notificação que obriguem as empresas a realizar estudos de exposição ao arco. Em geral estes termos exigem que se realize, em até 60 dias após sua publicação, o cálculo da energia incidente, ou ATPV, explicitando os métodos empregados e suas limitações e contemplando todos os cenários de atividades realizadas.

Em virtude da obrigatoriedade legal da realização dos cálculos de energia provenientes do arco, para além do respeito aos requisitos de segurança dos operadores, o conhecimento das normas mais empregadas para esta análise é de essencial importância no trabalho prático do engenheiro eletricitista.

3.3 – A Norma NFPA-70E

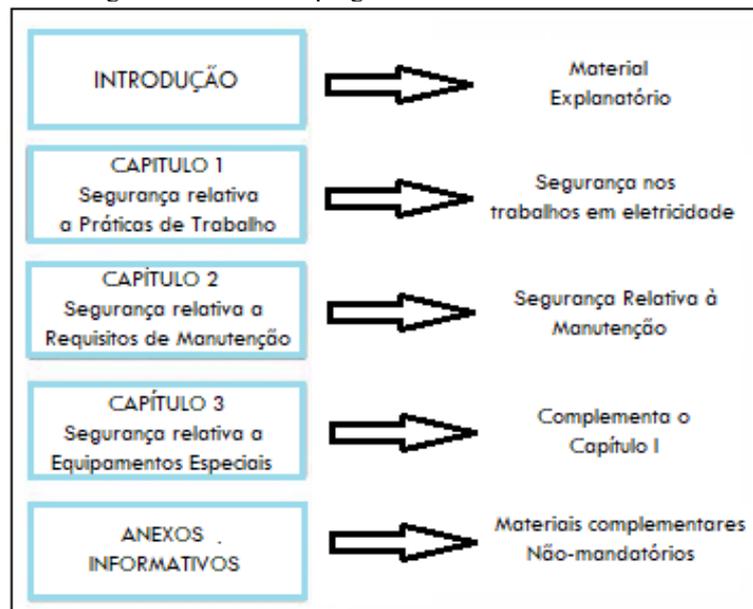
A NFPA tem por objetivo promover métodos e técnicas de proteção contra o fogo, mesmo aquelas que não tem origem na eletricidade. Com o avanço dos serviços em eletricidade a associação viu-se obrigada, segundo Mardegan e Parise (2018), a propor um conjunto

normativo que tratasse especificamente da segurança em eletricidade, o que deu origem à NFPA-70E.

A publicação foi desenvolvida com o objetivo principal de atender os requisitos em segurança propostos pela OSHA, uma Associação de grande referência, nos Estados Unidos, no combate aos riscos ocupacionais.

O texto da norma expõe que o cálculo de energia incidente deve ser realizado a fim de que se determinem duas informações principais para a operação do sistema: a distância mínima de aproximação segura do operador e, também, qual ou quais tipos de EPI o trabalhador deve usar. Os métodos de cálculo são, por sua vez, expostos no anexo da norma. A definição do tipo de EPI a ser empregado, a partir dos cálculos de energia, é exposta na tabela 10, item 4.3 do presente trabalho; enquanto os EPIs são especificados na tabela 11, presente no APÊNDICE A.

Figura 14 - Estrutura programática da norma NFPA-70E.



Fonte: Adaptado de MARDEGAN E PARISE (2018)

O cálculo do ATPV, citado no item anterior, é de essencial realização para que se possa aplicar a norma NFPA-70E. Segundo o exposto nas normatizações do Ministério do Trabalho e Emprego (2019), este dado é de extrema importância por indicar o grau de resistência que uma determinada vestimenta apresenta contra a transferência de calor; seu valor é definido como a quantidade de calor necessária para que exista uma probabilidade de 50 % para que a energia transmitida resulte em uma queimadura de segundo grau.

Obtido este valor limiar, uma consulta à curva da figura 11 permite que se estabeleçam diferentes valores limites de densidade de energia que, quando aplicados a um determinado

EPI, não resultem em riscos ou ferimentos para um operador. É possível, então, construir as tabelas de seleção dos equipamentos, como aquela presente na norma.

O cálculo da energia incidente, como preconizado pela NFPA-70 E, baseia-se nos estudos de Doughty e Neal, que complementaram as análises de Lee ao escrever o artigo “*Predicting Incident to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems*”. Este trabalho pode ser empregado para a estimativa do valor da energia gerada pelos arcos não só para sistemas que operam a 600 V, mas para qualquer um que funcione abaixo desse valor.

Além disso, os experimentos conduzidos por Doughty e Neal baseiam-se em dois ambientes diferentes para estabelecimento da falta, um deles aberto e o outro confinado, sendo este último o modo como, em geral, são construídos os quadros de baixa tensão. Para cada um destes aplica-se uma expressão matemática particular.

A aplicação matemática do método requer a coleta de dados preliminares como a corrente de curto-circuito trifásico na região estudada; o intervalo total do tempo de ação do arco; e, por fim, a distância de trabalho do operador aos equipamentos do sistema.

O valor considerado para a corrente de curto-circuito deve ser o trifásico pois as normatizações consideram sempre o pior cenário, a fim de que as medidas de proteção consideradas sejam adequadas; deve ser analisado individualmente a cada sistema.

O intervalo total do tempo de arco está relacionado com o intervalo necessário para que algum dos dispositivos de proteção à montante dos equipamentos terminais, ou seja, mais próximos do ponto de geração, atuem e, assim, consigam extinguir o arco; também deve ser analisado individualmente para cada caso.

A distância de trabalho, por sua vez, pode ser estimada a partir de diversos autores. Rômulo e Senger (2012) definem como distâncias seguras de trabalho os valores abaixo

Tabela 2 - Distâncias típicas de trabalho segundo a NFPA-70E.

TIPO DE AMBIENTE	DISTÂNCIA DE TRABALHO
Quadros de Distribuição e CCMs (com tensão igual ou inferior a 600 V)	455 mm
Painéis de Distribuição de Baixa Tensão (com tensão igual ou inferior a 600 V)	610 mm
Painel de Distribuição de Média Tensão (acima de 600 V)	910 mm

Fonte: Adaptado de RÔMULO et al. (2012)

Coletadas as informações anteriores, a energia máxima gerada por um arco elétrico em ambientes abertos pode ser calculada como:

$$E_{MA} = 5271 \times D^{-1,9593} \times t_A (0,0016 \times I^2 - 0,0076 \times I + 0,8938) \quad (3.1)$$

Para uma região fechada, em que se enquadram, por exemplo, quadros de baixa tensão e centros de comando de motores, por exemplo, deve-se empregar a seguinte expressão:

$$E_{MB} = 1038,7 \times D^{-1,4738} \times t_A (0,0093 \times I^2 - 0,3453 \times I + 5,9675) \quad (3.2)$$

Nas equações, os termos E_{MA} e E_{MB} indicam as energias máximas dissipadas, respectivamente, em regiões abertas e regiões fechadas. O termo t_A indica o tempo de duração do arco, I representa o valor da corrente de curto trifásico e D a distância de trabalho do operador, em polegadas.

Realizados os cálculos, a tabela 10 e a tabela 11 devem ser analisadas, a fim de que os EPIs adequados para o nível de energia calculado sejam determinados. É interessante lembrar que a aplicação dessa norma apresenta, como todas as outras, limitações diversas, dentre as quais se destaca: deve ser aplicada em tensões menores ou iguais que 600 V e, também, a sistemas cuja corrente de curto esteja entre 16 kA e 50 kA.

3.4 – A Norma IEEE-1584

Publicada pelo IEEE no ano de 2002, a norma IEEE-1584 tem por objetivo determinar não só os níveis de energia incidente originários do arco elétrico, mas também definir uma distância segura de trabalho para os operadores. Os estudos da norma se baseiam numa série de análises estatísticas que incluem agrupar os dados de diversos experimentos e, a partir de técnicas de ajuste de curvas, estabelecer expressões que otimizam os cálculos realizados.

Para além da determinação de uma distância segura, o dado de energia incidente calculado através da norma da IEEE pode ser empregado para a determinação dos EPIs. Apesar do texto original da norma não contar com uma tabela descritiva dos equipamentos a serem usados, costuma-se empregar os dados presentes na NFPA-70E, que representa a maior referência em termos de segurança das vestimentas.

Assim como outras normas, a IEEE-1584 requer a coleta de alguns dados para a realização de cálculos. Em primeiro lugar, destaca-se o levantamento dos dados gerais da

instalação, dentre os quais se destaca a obtenção do diagrama unifilar, com a representação de todos os elementos de potência e proteção presentes. Deve-se considerar ainda a contribuição de grandes motores para as correntes de curto durante uma falta.

É necessário levantar também os modos de operação do sistema, com atenção para os casos em que o sistema é não-radial, dado que a análise e o levantamento dos dados de curto-circuito tornam-se mais complexos.

Quanto à corrente estabelecida durante a falta, além da obtenção do valor da corrente de curto para uma falta franca, cujos métodos de cálculo são bastante conhecidos, a norma prevê uma expressão que determina o valor da corrente de arco elétrico em si, já que o valor desta não é necessariamente igual ao da falta franca. Essa correção deve ser feita devido às informações elencadas nos itens 2.2.1 e 2.2.2

A norma prevê, para sistemas que operam com tensão até 1 kV, a seguinte expressão para a corrente de arco:

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{bf}) - 0,00304G(\log I_{bf}) \quad (3.3)$$

Para instalações com tensão entre 1 kV e 15 kV, a expressão para correntes de arco se reduz a:

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (3.4)$$

Nas equações anteriores, K representa uma constante, que vale -0,153 para ambientes abertos e -0,097 para ambientes fechados; I_{bf} representa o valor da corrente de falta trifásica original, em kA; V é a tensão do sistema, em kV; G é a distância típica entre os condutores dos equipamentos de trabalho. O valor calculado para a corrente de arco efetiva é denotado por I_a . Deve-se notar que não há fator de distinção entre ambientes fechados e abertos para a equação 3.4

Em geral, as grandezas anteriores são encontradas para o estudo particular de cada sistema. Ocorre que a distância G entre os condutores pode ser estimada de acordo com a própria norma, considerando diferentes ambientes de trabalho. A tabela a seguir resume estes dados:

Tabela 3 - Distâncias entre condutores e expoentes segundo IEEE-1584.

TENSÃO DO SISTEMA (kV)	TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE CONDUTORES (mm)	DISTÂNCIA x FATOR
0,208 – 1,0	Ambiente aberto	10 - 40	2,000
	Painel de Distribuição	32	1,473
	CCM e Painel	25	1,641
	Cabos	13	2,000
1 – 5	Ambiente Aberto	102	2,000
	Painel de Distribuição	13 - 102	0,973
	Cabos	13	2,000
5 - 15	Ambiente aberto	13 - 153	2,000
	Painel de Distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Fonte: Adaptado de QUEIROZ E SENGER (2012) apud IEEE-1584 (2002)

O fator x , presente na tabela, será usado como um expoente nos cálculos futuros de energia e distância segura de trabalho.

Obtidas as correntes efetivas de curto, a aplicação da norma caminha para análise dos tempos de atuação da proteção do sistema e, conseqüentemente, do tempo de duração do arco. Assim como a análise do curto trifásico, o tempo de atuação da proteção deve ser calculado caso a caso. Eventualmente, considerando que não haja informações suficientes sobre os equipamentos de proteção, é possível fazer estimativas para o tempo de atuação de fusíveis e disjuntores.

Para os fusíveis, caso seja conhecido apenas o tempo de fusão, o intervalo total para atuação, durante o arco, segundo Rômulo e Senger (2012), deve ser o tempo de fusão original aumentado em 15% do seu valor, isto para um intervalo de até 0,03 s para o tempo de fusão original. Para aqueles cujo intervalo original de fusão supera 0,03 s, o tempo de atuação deve ser o intervalo acrescido de 10% do seu valor original.

Para disjuntores, recomenda-se a análise da curva de tempo de atuação, principalmente para aqueles modelos muito específicos. Entretanto, a IEEE-1584 traz alguns valores típicos para atuação dos tipos mais comuns de disjuntores.

Tabela 4 - Tempos de abertura para diferentes disjuntores segundo IEEE-1584.

TENSÃO E TIPO DE DISJUNTOR	TEMPO DE ABERTURA EM 60 Hz (CICLOS)	TEMPO DE ABERTURA (s)
Baixa tensão (1 kV), caixa moldada e relé de proteção integrado	1,5	0,025
Baixa tensão (1 kV), caixa moldada e relé de proteção integrado ou operado por relé externo	3,0	0,050
Média Tensão (1 a 35 kV)	5,0	0,080
Alta Tensão (> 35 kV)	8,0	0,130

Fonte: Adaptado de QUEIROZ E SENGER (2012) apud IEEE-1584 (2002)

Em seguida, deve-se estimar a distância de trabalho do operador aos equipamentos. A norma é bem específica em determinar que essa distância é obtida para a cabeça e o tronco do corpo humano, que são as regiões mais sensíveis. A tabela a seguir indica os valores típicos empregados.

Tabela 5 - Distâncias de trabalho típicas segundo IEEE-1584

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA DE TRABALHO TÍPICA (mm)
Painel de 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de Baixa Tensão	610
CCMs e Quadros de Baixa Tensão	455
Cabos	455
Outros	DETERMINADA NO CAMPO

Fonte: Adaptado de QUEIROZ E SENGER (2012) apud IEEE-1584 (2002)

Coletados todos os dados e, contando com o valor da corrente de arco elétrico, é possível finalmente obter os valores de energia incidente e distância de trabalho. A princípio, calcula-se uma quantidade denominada Energia Incidente Normalizada, ou E_n , que leva em conta como

variável apenas o valor calculado para as correntes de arco. Os valores de distância de operação e tempo de arco são normalizados para, respectivamente, 610 mm e 200 ms.

A Energia Normalizada é dada, em J/cm^2 , por:

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \quad (3.5)$$

Em que G representa a distância normalizada entre os condutores, que pode ser estimada pela tabela 3. K_1 representa uma constante de valor -0,792 para ambientes abertos e -0,555 para locais fechados. K_2 , por sua vez, vale zero para sistemas isolados ou -0,113 para sistemas de aterramento sólido.

O cálculo final da energia incidente E é feito, em cal/cm^2 , com base no valor normalizado obtido a partir da equação 3.5. Basta aplicá-lo, em J/cm^2 , na expressão a seguir:

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610}{D} \right)^x \quad (3.6)$$

Considerando a expressão anterior, C_f representa uma constante de valor 1,0 para tensões acima de 1 kV ou 1,5 para tensões menores de 1 kV; E_n representa a energia normalizada; t o tempo de duração da falta em segundos; D representa a distância estimada do operador a aos equipamentos, em mm ; o fator x é aquele indicado na tabela 3, variando para diferentes valores de D .

O último ponto de análise proposto pela norma baseia-se, finalmente, no cálculo da distância segura de operação. A norma indica neste caso uma energia de incidência máxima no operador, denotada por E_B de $5,0 J/cm^2$ como referência; seu valor deve ser empregado na fórmula a seguir:

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.7)$$

As demais variáveis, para além da energia E_B , são as mesmas empregadas na equação 3.6. É importante lembrar que o valor de E_B deve ser aplicado nesta equação em J/cm^2 diferentemente dos valores de energia aplicados nas outras expressões, empregados em cal/cm^2 .

A IEEE-1584 deve ser empregada, por fim, apenas em sistemas que respeitem as características a seguir:

- Tensão entre 208 V e 15000 V;
- Sistema Trifásico;
- Frequências entre 50 Hz e 60 Hz;
- Corrente de curto-circuito de 700 A a 106 kA;
- Espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm.

Apesar de mais abrangente, em termos de possibilidade de aplicação, percebe-se que os passos para aplicar a norma da IEEE são muito mais complexos que aqueles usados na NFPA.

3.5 – Resumo das estratégias de cálculo

As informações gerais relacionadas à aplicação dos cálculos descritos anteriormente por cada uma das normas podem ser resumidas de acordo com o especificado na tabela a seguir:

Tabela 6: Especificações dos diferentes métodos de cálculo

FONTE	LIMITAÇÕES/PARÂMETROS	VANTAGENS
NFPA-70E	- Não permite calcular Distância de Segurança analiticamente. Calcula a Energia Incidente para arcos em sistemas trifásicos com as seguintes características: - Tensão nominal ou inferior a 600 V; - Correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA;	- Cálculos mais simplificados; - Trabalha com valor conhecido da corrente de curto; - Define categorias de risco e EPIs adequados.
IEEE-1584	- Não define categorias de risco. Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos com as seguintes características: - Tensão entre 208 V e 15000 V; - Frequências entre 50 e 60 Hz; - Corrente de curto entre 700 A e 16 kA; - Espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm.	- Melhor especificação do valor calculado de Energia Incidente; - Permite o cálculo analítico da Distância de Segurança.

Fonte: Adaptado de QUEIROZ E SENGER (2012) apud IEEE-1584 (2002)

4 – ESTUDO DE CASO

A fim de que os métodos de cálculo da energia incidente possam ser comparados de forma prática, realizou-se um estudo de caso para o sistema elétrico de baixa tensão de um supermercado localizado em Uberaba, Minas Gerais.

Considerando os objetivos do estudo, foram coletadas diversas informações necessárias para o emprego dos métodos previstos pela norma, dentre os quais se destacam: potência do transformador alimentador, esquema de aterramento e tipo do elemento protetor.

Figura 15 - Fachada do supermercado onde realizou-se o estudo de caso



Fonte: JORNAL DA MANHÃ (2018)

4.1 – Coleta de Dados

Segundo informação fornecida pelo técnico responsável presente no supermercado, o transformador trifásico empregado na alimentação apresenta 225 kVA de potência, sendo responsável por transformar a tensão de distribuição primária de 13800 V para 220 V, com ligação delta-estrela aterrado. Além disso, verificou-se que o esquema de aterramento empregado é o TN-S, o qual é bastante utilizado neste tipo de instalação.

A figura 16 mostra, pela inspeção no QGBT, o emprego do disjuntor da marca WEG tipo DWP225-125-3. O disjuntor em caixa moldada do tipo DWP é, segundo a WEG (2020), responsável pela proteção contra curto-circuito e sobrecarga do sistema; para o sistema analisado, a corrente de operação do aparelho é 125 A, sua capacidade de interrupção 22 kA e a tensão nominal de Isolação 800 V, em corrente alternada.

Figura 16 - Disjuntor geral do QGBT estudado



Fonte: O autor.

De acordo com figura 17 percebe-se, ainda pela inspeção do QGBT, a presença de três contadores e de um timer para o controle da luz externa.

Figura 17 - Contadores e timer empregados para controle da iluminação



Fonte: O autor.

A tabela 7, transcrita da descrição de cargas presente no QGBT, e a tabela 8 resumem as informações coletadas sobre o sistema em estudo.

Tabela 7 - Especificação das cargas do QGBT estudado

PRIMEIRA LINHA	TERCEIRA LINHA
1 – DPS 2 – DPS 3 – DPS 4 - GERAL	23 – ILUMINAÇÃO LOJA 24 – ILUMINAÇÃO LOJA 25 – ILUMINAÇÃO LOJA 26 – ILUMINAÇÃO GÔNDOLAS CENTRAIS 27 – ILUMINAÇÃO GÔNDOLAS CENTRAIS E MÓVEIS
SEGUNDA LINHA	QUARTA LINHA
5 – AR CPD 6 – CLIMATIZADOR 7 – CLIMATIZADOR 8 – CLIMATIZADOR 9 – CLIMATIZADOR 10 – TOMADA / IMPRESSORA GERÊNCIA 11 – ILUMINAÇÃO RUA 12 – TOMADA SALA DE MÁQUINAS 13 – CHAVE BYPASS 14 – NOBREAK 15 – BOMBA DE INCÊNDIO 16 – ILUMINAÇÃO BANHEIROS/SALA DE REUNIÃO 17 – ILUMINAÇÃO ADMINISTRATIVO / GERÊNCIA / CPD / TESOURARIA 18 – TOMADA DML 19 – BEBEDOURO 20 – TOMADAS TESOURARIA 21 – TOMADAS SALA DE EMBALAGEM 22 – TOMADAS SALA DE REUNIÃO	28 – ILUMINAÇÃO LETREIRO E MARQUISE 29 – ILUMINAÇÃO TOTEM E ESTACIONAMENTO 30 – AR SALA DE REUNIÃO 31 – TOMADA CAFETEIRA / GÔNDOLA 32 – ESTEIRAS CAIXAS 6-10 33 – ESTEIRAS CAIXAS 1-5 34 – ILUMINAÇÃO DEPÓSITO 2 35 - IMPRESSORA RECEPÇÃO 36 – RESERVA 37 - RESERVA 38 – CONTATORA 1 – ILUMINAÇÃO LOJA 39 – CONTATORA 2 – ILUMINAÇÃO GÔNDOLA/ MÓVEIS 40 – CONTATORA 3 – ILUMINAÇÃO EXTERNA 41 – TIMER – COMANDO ILUMINAÇÃO EXTERNA

Fonte: O autor

Tabela 8- Resumo dos dados obtidos para o sistema analisado

TRANSFORMADOR	Potência de 225 kVA
ATERRAMENTO	Sistema TN-S
DISJUNTOR	Corrente nominal de 125 A Capacidade de interrupção de 22 kA Tensão nominal de Isolamento de 800 V

Fonte: O autor

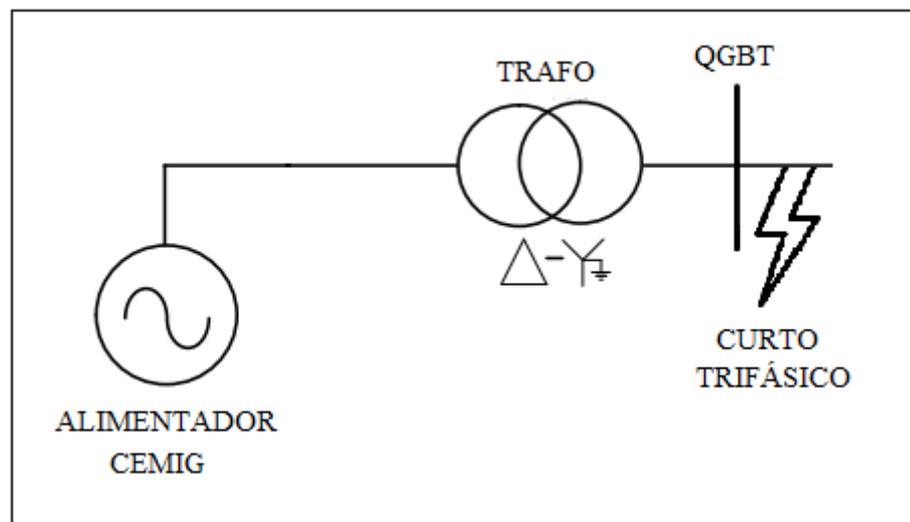
4.2 – Cálculo da corrente de curto-circuito trifásico

É possível considerar o sistema elétrico, do ponto de vista do consumidor, como um alimentador radial, em que a CEMIG entrega a energia ao transformador que, por sua vez, a transfere ao QGBT.

Neste caso, é razoável considerar que a única impedância relevante para a determinação do curto no Quadro Geral seria a do transformador, tomando o nível de curto-circuito da geração como infinito. Esta última consideração é adequada pois, em vistas da aplicação de uma norma de segurança, o eventual superdimensionamento das medidas de proteção não seria indesejado.

Um melhor entendimento do circuito alimentador é dado pela figura exposta na página a seguir.

Figura 18 - Diagrama unifilar do sistema analisado



Fonte: O autor

Sendo a impedância do transformador a mais relevante neste sistema, podemos considerar uma simplificação na análise de curto-circuito. Neste caso, é necessário encontrar apenas dois parâmetros para o cálculo requerido, sendo eles: corrente nominal do transformador e valor da impedância percentual do mesmo.

Segundo Boylestad (2004), conhecidas a potência e a tensão nominal de um sistema elétrico trifásico, a corrente nominal pode ser estabelecida pela seguinte expressão:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}V_n} \quad (4.1)$$

A aplicação dos dados coletados para o sistema, considerando que se deseja obter a corrente nominal para o trecho de baixa tensão, a 220 V, resulta no seguinte valor:

$$I_n = \frac{225000}{\sqrt{3} \times 220} \rightarrow I_n = 590,47 \text{ A} \quad (4.2)$$

O valor encontrado denota um claro superdimensionamento do transformador quando considerada a corrente nominal do disjuntor, fato que será melhor analisado na sequência do trabalho. É necessário, ainda, obter uma estimativa do valor da impedância percentual do transformador, que não foi informada na coleta de dados. De acordo com Oliveira (2019) apud Muniz et al. (2014) é possível obter este valor aproximado a partir da tabela seguinte.

Tabela 9 - Estimativa da impedância percentual de transformadores

POTÊNCIA (kVA)	IMPEDÂNCIA (%)
112,5 a 150	3,0
150 a 350	3,5
350 a 630	4,0
630 a 1250	5,0
1250 a 3150	6,0
3150 a 6300	7,0
6300 a 12500	8,0

Fonte: OLIVEIRA (2019) apud MUNIZ et al. (2014)

A norma promulgada NBR 5356, promulgada pela ABNT, define outro critério mais simples. Segundo a NBR 5356 (1993), podemos estimar a impedância percentual de transformadores até 630 kVA com o valor de 4%, enquanto aqueles com potência entre 630 kVA e 1000 kVA tem valor estimado em 5%.

Será considerado neste trabalho a estimativa proposta por Oliveira (2019), em que a impedância do transformador empregado no supermercado apresenta valor de 3,5%. Finalmente, ainda segundo Oliveira (2019) apud Wirmond (2012), o valor final da corrente de curto é calculado como:

$$I_{cc} = \frac{I_n}{Z\%} \times 100 \quad (4.3)$$

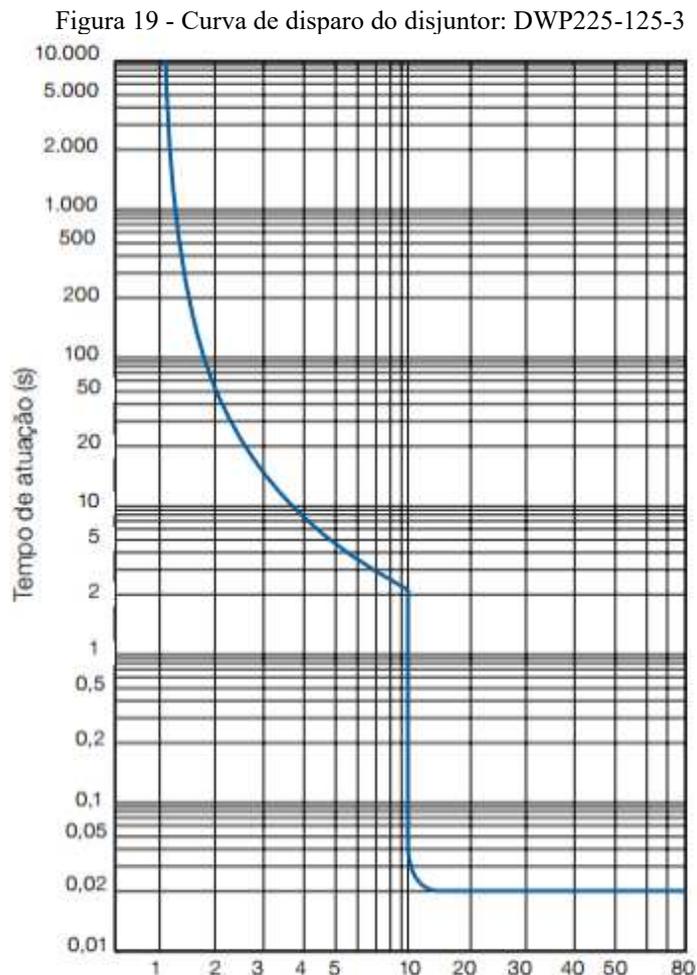
Considerando o resultado obtido em 4.2 e aplicando a equação anterior, a corrente de curto pode finalmente ser calculada como:

$$I_{cc} = \frac{590,47}{3,5} \times 100 \rightarrow I_{cc} = 16,87 \text{ kA} \quad (4.4)$$

4.3 – Aplicação do método NFPA-70E

Para o estudo que utiliza o método NFPA-70E, duas informações estão até este ponto bem determinadas, sendo elas a corrente de curto I e a distância de operação D , esta última encontrada via consulta da tabela 2; neste caso, a distância de trabalho é de 610 mm.

É necessário obter ainda o valor do tempo t_A de duração do arco. Para tanto, devemos consultar a curva que descreve a relação entre tempo e corrente para atuação do disjuntor, como esquematizado na figura a seguir:



Fonte: WEG (2020)

A corrente de curto calculada em 4.4 pode ser obtida em termos da nominal por:

$$n = \frac{I_{cc}}{I_n} \rightarrow n = \frac{16,87 \text{ kA}}{125 \text{ A}} \rightarrow n = 134,96 \quad (4.5)$$

Em que n representa a corrente de curto normalizada pelo valor nominal do disjuntor.

Percebe-se que, para este caso, a corrente de curto encontra-se no trecho de atuação de tempo definido, em que o tempo de abertura do dispositivo é igual a 0,02 s. Percebe-se ainda que, houvesse sido usada a informação da primeira linha da tabela 4, o tempo de atuação obtido seria igual a 0,025 s, número muito próximo do valor obtido pela coleta de dados.

Finalmente, basta converter a distância de trabalho, consultada na tabela 2, de milímetros para polegadas; neste caso, a distância de 610 mm corresponde 20,02 in. Aplica-se, assim, a equação 3.2 de energia incidente para ambientes fechados proposta pela NFPA-70E. Tem-se:

$$E_{MB} = 1038,7 \times 20,02^{-1,4738} \times 0,02(0,0093 \times 16,87^2 +$$

$$-0,3453 \times 16,87 + 5,9675)$$

$$E_{MB} = 0,70 \text{ cal/cm}^2 \quad (4.6)$$

O valor calculado é condizente com o ambiente de trabalho, considerando um QGBT que opera a 220 V. Considerando a tabela disponibilizada pela norma, responsável por dividir os riscos do arco em faixas de energia incidente, é possível identificar a categoria de risco do trabalho.

Tabela 10: Estratificação das categorias de risco segundo a NFPA-70E

RISCO	ENERGIA (cal/cm²)	CATEGORIA DE RISCO
Mínimo	Até 1,2	0
Leve	1,2 a 4	1
Moderado	4,1 a 8	2
Elevado	8,1 a 25	3
Elevadíssimo	25,1 a 40	4

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2019) apud NFPA-70E (2019)

Finalmente, consultada a tabela 10 para definição da categoria de risco, basta recorrer à tabela 11 presente no APÊNDICE A para que os EPIs adequados sejam especificados.

Neste caso, prevê-se o uso de roupas de mangas e calças compridas, óculos de segurança, protetor auricular tipo plug e luvas de couro.

4.4 - Aplicação do método IEEE-1584

Para a aplicação desta norma, o primeiro passo baseia-se em calcular a corrente de arco através do valor de curto franco. Para tanto, para além das informações já coletadas, basta consultar a segunda linha da tabela 3 para que se obtenha a distância de referência entre os condutores de 32 mm. Basta, em seguida, aplicar a expressão 3.3:

$$\begin{aligned} \log I_a &= -0,097 + 0,662 \log 16,87 + 0,0966 \times 0,22 \\ &+ 0,000526 \times 32 + 0,5588 \times 0,22 (\log 16,87) \\ &- 0,00304 \times 32 (\log 16,87) \end{aligned}$$

$$\log I_a = 0,78 \rightarrow I_a = 10^{0,78} \rightarrow I_a = 6,09 \text{ kA} \quad (4.7)$$

Com o valor obtido em 4.7, pode-se obter a energia normalizada E_n , a partir do uso da equação 3.5. Assim, tem-se, considerando as constantes K1 e K2 adequadas ao estudo:

$$\log E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log 6,09 + 0,0011 \times 32$$

$$\log E_n = 0,22 \rightarrow E_n = 10^{0,22} \rightarrow E_n = 1,64 \text{ J/cm}^2 \quad (4.8)$$

O cálculo de E envolve o tempo de duração do arco. Este pode ser obtido a partir da mesma estratégia aplicada na análise da norma NFPA-70E. Basta consultar a figura 17 a partir da corrente de arco normalizada n . Assim, tem-se:

$$n = \frac{I_{cc}}{I_n} \rightarrow n = \frac{6,09 \text{ kA}}{125 \text{ A}} \rightarrow n = 48,72 \quad (4.9)$$

Verifica-se, pela análise da curva de disparo na figura 19, que, assim como no caso anterior, o tempo de abertura do circuito previsto pela IEEE-1584 é de 0,02 s. Finalmente, aplicando a equação 3.6 e considerando os dados da tabela 3 e da tabela 5, tem-se:

$$E = 1,5 \times 1,64 \left(\frac{0,02}{0,2} \right) \left(\frac{610}{610} \right)^{1,473}$$

$$E = 0,25 \text{ cal/cm}^2 \quad (4.10)$$

O valor de energia incidente obtido pelo segundo método exibe valor menos conservador do que o obtido pelo primeiro. Caso este valor fosse considerado para a determinação da categoria de risco da operação, o resultado obtido via leitura da tabela 10 e da tabela 11, esta presente no APÊNDICE A, seria o mesmo em relação anterior.

Seria previsto, neste caso, o uso de roupas de mangas e calças compridas, óculos de segurança, protetor auricular tipo plug e luvas de couro.

O cálculo da distância segura, por sua vez, pode ser realizado através do uso da equação 3.7, como exposto a seguir:

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \left(\frac{0,02}{0,2} \right) \left(\frac{610^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 113,2 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Este resultado é interessante pois mostra que a distância segura para suportar o arco encontra-se dentro da zona de trabalho típica de um trabalhador, como especificado pela tabela 5. É importante lembrar que, segundo a definição de distância segura, uma pessoa exposta ao arco a uma distância menor que a especificada, caso não tenha EPI, pode apresentar queimaduras de até segundo grau.

4.5 – Discussão dos resultados obtidos

Os cálculos efetuados por ambas metodologias mostram que, do ponto de vista da energia incidente, o ambiente de trabalho no QGBT do supermercado oferece riscos mínimos. Entretanto há algumas especificidades a serem consideradas para o caso analisado

Em primeiro lugar, é necessário pontuar que aplicação dos dois métodos para análise de um mesmo sistema resultam em valores diferentes que não são, necessariamente muito próximos.

Segundo resultados divulgados por Matumoto (2018), é comum que a aplicação das normas para regiões de baixa tensão resulte em valores de energia incidente segundo a norma NFPA-70E que valem aproximadamente o dobro daqueles obtidos via IEEE-1584. Essa relação foi observada no presente trabalho, em que a relação N entre a energia obtida via NFPA-70E e IEEE-1584 é igual a:

$$N = \frac{0,7}{0,25} \rightarrow N = 2,8 \quad (4.12)$$

Assim, cabe ao projetista responsável pelo projeto determinar qual nível deve ser considerado para o projeto de EPIs. Para este caso específico, ambos indicam o mesmo nível de proteção em termos de EPI; quando, entretanto, os níveis indicados por cada um dos métodos se enquadram em diferentes categorias de risco, é conveniente escolher os equipamentos de proteção indicados pela categoria de risco mais elevada.

A diferença observada deve-se, certamente, ao fato dos cálculos da norma NFPA-70E basearem-se no método de Doughty e Neal, que não considera a resistência de arco em seus cálculos, diferentemente do método IEEE-1584 que trabalha com uma corrente de arco menor do que aquela obtida com o curto franco.

Além disso, é interessante considerar que o estudo apresentado, apesar de enquadrar-se em um nível mínimo de risco, indica equipamentos de proteção para os trabalhadores, como o uso protetor auricular, por exemplo. O uso destes equipamentos deve ser rigorosamente fiscalizado, já que, para níveis de baixos de riscos, é comum os operadores não observarem o uso adequado de EPIs.

Ainda é interessante realizar uma última constatação. O transformador empregado é, como já discutido, bastante superdimensionado para a carga exigida pelo supermercado. Este fato, em acordo com o previsto pelas equações 4.2 e 4.3, indica que o nível de curto no terminal

de baixa tensão da alimentação torna-se bastante elevado, em virtude da diminuição da impedância efetiva oferecida pelo transformador ao sistema.

Como os riscos derivados do arco são função quase direta do nível de curto, poderia supor-se que uma elevação da corrente de curto aumentaria o valor de energia incidente de um arco elétrico, de modo a colocar o ambiente de trabalho em uma categoria de risco mais elevada, que previsse o uso de EPIs mais adequados.

Verificou-se, entretanto, que a energia incidente apresenta valor baixo, mesmo com o superdimensionamento do transformador. Desse modo, os operadores podem continuar trabalhando em uma região de risco mínimo, enquanto a eventual expansão das atividades do supermercado pode ser garantida adequadamente pelo transformador de alimentação.

5 – CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu identificar como ocorreu a evolução dos estudos sobre o arco elétrico ao longo do tempo. Verificou-se, como comentado no resumo deste trabalho, que as normatizações consensuais sobre o tema foram definidas apenas no final do século XX, com desenvolvimento de regulamentações realizado principalmente nos Estados Unidos

Viu-se ainda que os itens elencados na NR-10 são deficitários em definir estratégias de análise para os arcos. Neste sentido, a aplicação de normas internacionais, com destaque para a NFPA-70E e a IEEE-1584 foi considerado ao longo do trabalho, com especificação detalhada do processo de desenvolvimento teórico de cada uma delas.

Percebeu-se, também, que o fenômeno do arco apresenta diferentes especificidades em termos de local de ocorrência no sistema elétrico e estratégias de proteção, o que o torna uma ocorrência muito particular, quando comparado ao choque elétrico, por exemplo. Assim, a constante revisão bibliográfica do fenômeno por parte dos agentes do sistema elétrico mostrou-se bastante necessária.

Os dados obtidos com o estudo de caso mostram, por sua vez, as particularidades do modo de aplicação de cada uma das normas consideradas, com um cálculo prático que resultou em valores de energia incidente condizentes com o esperado pelo ambiente de trabalho e da previsão teórica, contribuindo para a confiabilidade de aplicação dos mesmos.

Para além dos resultados elencados nesta conclusão, recomenda-se para trabalhos futuros a constante revisão dos meios de aplicação das normas responsáveis por definir a energia incidente dos arcos elétricos, por meio da aplicação de softwares, por exemplo, a fim de que os operadores do sistema elétrico estejam familiarizados com as técnicas de proteção a um fenômeno tão potencialmente perigoso como o arco elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao#:~:text=O%20sistema%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9,ou%20inferior%20a%201%20kV>). Acesso em: 28 de nov.2020

AYRTON, H. *The Electric Arc*. Nova Iorque: The D. Van Nostrand Co. 1902. Disponível em: <https://archive.org/details/electricarc00ayrtrich/page/n5/mode/2up>. Acesso em: 20 nov. 2020

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. Prentice Hall/Pearson, 10ª. Ed, 2004.

CARVALHO, P. **Influência da granulometria das cargas na rigidez dielétrica de nanocompósitos epóxi-alumina**. Trabalho de Conclusão de curso – Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10025533.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2020

DOUGHTY, R. L., NEAL, T. E. e FLOYD, H. L. 2000. *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 257–269.

ELERT, G. *Dielectrics. The Physics Hypertextbook*. Disponível em: <https://physics.info/dielectrics/>. Acesso em: 25 nov. 2020

HALLIDAY, D; RESNICK; R. **Fundamento de Física, volume 3: Eletromagnetismo**. tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 10 ed. Rio de janeiro: LTC, 2016.

IEEE. *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*. em *IEEE Std 1584-2018* (Revisão da IEEE Std 1584-2002), vol., no., pp.1-134, 30 nov. 2018.

ITAIPU BINACIONAL. **Subestação Isolada a gás SF₆**. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/subestacao-isolada-gas-sf6>. Acesso em: 29 nov.2020

JÚNIOR, S.; FERREIRA, C. **Comparativo entre topologias de detecção de arco elétrico**. O Setor Elétrico, 2015. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/comparativo-entre-topologias-de-deteccao-de-arco-eletrico/#:~:text=O%20arco%20el%C3%A9trico%20%C3%A9%20um,como%20o%20ar%2C%20por%20exemplo.&text=Quando%20a%20rigidez%20diel%C3%A9trica%20%C3%A9,%20qu%C3%ADmica%20radia%C3%A7%C3%A3o%20e%20mec%C3%A2nica>. Acesso em: 29 nov.2020

J. R. Dunki-Jacobs. *The Escalating Arcing Ground-Fault Phenomenon*. em *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 6, pp. 1156-1161, nov. 1986

LAKVOVIC, V. *Arc Flash Calculation Methods*. CED Engineering. Disponível em: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Arc%20Flash%20Calculation%20Methods.pdf>. Acesso em 30 nov.2020

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

LITTELFUSE. *ELECTRICAL SAFETY HAZARDS HANDBOOK*. 2005. Disponível em: https://www.lanl.gov/safety/electrical/docs/arc_flash_safety.pdf. Acesso em: 27 nov. 2020

MARDEGAN, C.; PARISE, G. **Capítulo 1 – Estudos de Arco Elétrico – Cálculo de Energia Incidente**. O Setor Elétrico, 2018. Disponível em: <http://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed-144-Fasc%C3%ADculo-Capitulo-I-Protacao-contra-arco-eletrico.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020

MARDEGAN, C.; PARISE, G. **Capítulo 2 – O arco elétrico**. O Setor Elétrico, 2018. Disponível em: <http://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed-145-Fasc%C3%ADculo-Capitulo-II-Prote%C3%A7%C3%A3o-contra-arco-el%C3%A9trico.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2020

MARQUES, S. **O que é o Hexafluoreto de Enxofre ou gás SF₆?** 2020. Disponível em: <https://blog.wika.com.br/know-how/o-que-e-o-hexafluoreto-de-enxofre-ou-gas-sf6/>. Acesso em: 01 dez. 2020

MATUMOTO, Keide. **Tópicos Especiais – NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade – Parte 2**. Disponível em: <https://www.dropbox.com/sh/wi5xshbtp0nxxwc/AAD4xkIMuL9bPB22IieWK0Mla/keide%20matumoto%202/Seguran%C3%A7a%20em%20Instala%C3%A7%C3%B5es/nr10parte2.pdf?dl=0>. Acesso em: 06 dez.2020

MOREIRA, B. **Estudo e redução de energia incidente por arco elétrico em um sistema industrial**. Projeto de Graduação – Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10027717.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020

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**. Disponível em: http://www.segurancaotrabalho.eng.br/manuais_tecnicos/manual_vestimentas.pdf. Acesso em 03: de dez. de 2020.

NORMA BRASILEIRA. **NBR 5356: Transformador de potência**. ABNT. Rio de Janeiro. 1993. 59 p. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5356.PDF>. Acesso em: 05 dez. 2020.

NORMA REGULAMENTADORA. **NR 10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.** 3 ed. 2016. Disponível em: http://www.ccb.usp.br/arquivos/arqpessoal/1360237189_nr10atualizada.pdf. Acesso em: 03 dez.2020

OLIVEIRA, D. **Riscos Elétricos. Uma abordagem sobre arco elétrico e estudo de caso.** Trabalho de Conclusão de Curso – Ijuí. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/6849/Dandara%20de%20Oliveira.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 nov. 2020

QUEIROZ, A.; SENER, E. **Capítulo 1: A natureza e os riscos do arco elétrico.** O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/03/Ed72_fasc_arco_eletrico_cap1.pdf. Acesso em: 18 nov. 2020

QUEIROZ, A.; SENER, E. **Capítulo 4: A NFPA-70E e os Métodos para cálculo de Energia Incidente.** O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed75_fasc_arco_eletrico_cap4.pdf. Acesso em: 25 nov. 2020

QUEIROZ, A.; SENER, E. **Capítulo 5: A IEEE-1584 e os Métodos para cálculo de Energia Incidente e distância segura de aproximação.** O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed76_fasc_arco_eletrico_cap5.pdf. Acesso em: 25 nov. 2020

QUEIROZ, A. **Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico.** Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2011.

RAETHER, H. *Electron Avalanche and breakdown in gases* – Minnesota. Universidade de Minnesota. Butterworths, 1964.

ROSSI, M. **Uma contribuição ao conhecimento da Física do Arco aplicada em Soldagem.** Dissertação de Mestrado – Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14902/1/d.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020

WALKER, T. *What is an Electric Arc?* Firetrace Internacional, 2019 Disponível em: <https://www.firetrace.com/fire-protection-blog/arcing-the-leading-cause-of-electrical-fires>. Acesso em: 29 nov.2020

WEG. **Disjuntores em caixa moldada DWP.** 2020. Disponível em:
https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Disjuntores/Caixa-Moldada/Disjuntores-em-Caixa-Moldada-DWP/Disjuntores-em-Caixa-Moldada-DWP/p/MKT_WDC_BRAZIL_MOLDED_CASE_CIRCUIT_BREAKERS_DWP. Acesso em: 07 dez.2020

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Tabela 11 - Especificação de EPIs para diferentes categorias de risco

CATEGORIAS DE RISCO	EPIs RECOMENDADOS
0	<p>Vestimenta de proteção, não tratada e não fundível, em fibra natural (algodão não tratado, viscose, seda ou misturas destes) com um peso de tecido mínimo de 152 g/cm².</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisa manga comprida; - Calças compridas; - Óculos de segurança; - Protetor auricular (tipo plug); - Luvas de couro.
1	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm²:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco; - Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco; - Capacete; - Óculos de segurança; - Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo); - Luvas de couro; - Sapato de segurança em couro, quando necessário.
2	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm²:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco; - Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco e balaclava resistente a arco; - Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário; - Capacete; - Óculos de segurança; - Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo); - Luvas de couro; - Sapato de segurança em couro, quando necessário.
3	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada de modo que atenda à classificação de arco mínima de 25 cal/cm²:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requeridas; - Calças compridas resistentes a arco, quando requeridas; - Macacão resistente a arco, quando requerido; - Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida; - Capuz carrasco resistente a arco; - Luvas resistentes a arco;

	<ul style="list-style-type: none"> - Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário; - Capacete; - Óculos de segurança; - Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo); - Sapato de segurança em couro, quando necessário.
4	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada de modo que atenda à classificação de arco mínima de 40 cal/cm²:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requeridas; - Calças compridas resistentes a arco, quando requeridas; - Macacão resistente a arco, quando requerido; - Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida; - Capuz carrasco resistente a arco; - Luvas resistentes a arco; - Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário; - Capacete; - Óculos de segurança; - Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo); - Sapato de segurança em couro, quando necessário.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2019) apud QUEIROZ E SENGER (2012)