

GUSTAVO HENRIQUE ZAMBRIN BROTTTO

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO EM
SOFTWARE PARA CÁLCULO DE
ENERGIA INCIDENTE E ATPV

Toledo

2021

GUSTAVO HENRIQUE ZAMBRIN BROTTTO

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO EM
SOFTWARE PARA CÁLCULO DE ENERGIA
INCIDENTE E ATPV

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Roberto Bombacini

Toledo
2021



4.0 Internacional

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, com crédito atribuído ao autor. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.

GUSTAVO HENRIQUE ZAMBRIN BROTTTO

**IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO EM
SOFTWARE PARA CÁLCULO DE ENERGIA
INCIDENTE E ATPV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Toledo, 15 de maio de 2021:

Marcos Roberto Bombacini
Orientador

Ednei Miotto
Convidado 1

Tyndalle Silva
Convidado 2

Toledo
2021

A folha de aprovação com as assinaturas encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final.

Sou grato aos meus pais, irmãos e namorada, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. São vocês que me dão as forças necessárias para continuar e enfrentar todas adversidades da vida.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador e aos professores do curso por todos os ensinamentos e conselhos que me fizeram avançar na caminhada.

Também agradeço à todos os meus colegas de curso, pela oportunidade do convívio e pela cooperação mútua durante estes anos.

RESUMO

O arco elétrico é um fenômeno que ocorre devido a uma ruptura dielétrica de um determinado gás que por consequência resulta numa descarga de plasma. Este é considerado um dos problemas mais danosos e frequentes na indústria de montagem de painéis. Ele provoca perdas, ameaça a segurança de trabalhadores, libera onda de pressão devido à expansão do ar e pode até derreter metais em altíssimas temperaturas. Assim sendo, fazendo uso da ferramenta de cálculo de ATPV (*Arc Thermal Performance Value* – Valor de performance do arco elétrico) é possível obter um valor em cal/cm² referente a proteção que o tecido da vestimenta de um operador promove contra os efeitos do arco elétrico. Existem vários métodos destinados a cálculo de energia incidente, dentre eles, a norma IEEE 1584 se destaca no meio empresarial e industrial. Contudo, esta norma possui limites de aplicação tanto quanto os outros métodos, como por exemplo: o método Doughty-Neal, que calcula a energia incidente para arcos trifásicos em sistemas com até 600 Volts ou o método Doan que trabalha somente com sistemas acima de 1000 Volts em corrente contínua. Diante disso, pode ser mais vantajoso do ponto de vista econômico desenvolver um software que possa avaliar a situação com as informações que o usuário fornece e então ele aplicaria o método de cálculo que mais lhe convém. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo implementar um algoritmo em software de interface intuitiva capaz de avaliar as informações que o projetista fornece, tais como: dados de fornecimento de energia do sistema, dimensões, proteção e carga instalada, assim por diante. O software desenvolvido em forma de aplicativo foi capaz de sugerir o método de cálculo mais adequado para resolver determinado problema, bem como, disponibilizar ao usuário a opção de selecionar um método desejado. Desse modo, espera-se auxiliar no trabalho do projetista tanto quanto contribuir para a segurança de operadores em manutenção elétrica, diminuindo os riscos ocasionados pela eletricidade.

Palavras-chave: Arco elétrico, Segurança em eletricidade, Software livre.

ABSTRACT

An electric arc is a phenomenon that occurs due to a dielectric rupture of a given gas that consequently results in a plasma discharge. This is considered to be one of the most damaging and frequent problems in the panel building industry. It causes losses, threatens the safety of workers, releases pressure waves due to the air expansion and can even melt metals at extremely high temperatures. Therefore, using the ATPV (Arc Thermal Performance Value) calculation tool it is possible to obtain a value in cal/cm² regarding the protection that the fabric of an operator's clothing promotes against the effects of arc flashes. There are several methods for calculating incident energy, among them, the IEEE 1584 norm stands out in the business and industrial environment. However, this norm has application limits as much as other methods, such as: the Doughty-Neal method, which calculates the incident energy for three-phase arcs in systems with up to 600 Volts or the Doan method that works only with systems above 1000 Volts in direct current. Based on this it may be economically advantageous to develop a software that can assess the situation with the information that the user provides and then he would apply the calculation method that suits him best. This course conclusion project aims to implement an algorithm in intuitive interface software capable of evaluating the information that the designer provides, such as: system power supply data, dimensions, protection and installed load, and so on. The software developed as an application was able to suggest the most appropriate calculation method to solve a given problem, as well as to provide the user with the option of selecting a desired method. Thus, it is expected to assist the designer's work as much as to contribute to the safety of operators in electrical maintenance, reducing the risks caused by electricity.

Keywords: Arc flash, Electricity security, Free software.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo de energia na indústria	11
Figura 2 – Infográfico TÜV	12
Figura 3 – Ilustração de um arco elétrico.	15
Figura 4 – Linha do tempo relativa ao progresso de estudos sobre arco elétrico e métodos de gerenciamento de risco.	16
Figura 5 – Vestimentas contra arcos elétricos.	18
Figura 6 – Diagrama fasorial de tensão e corrente de arco.	21
Figura 7 – Fluxograma de funcionamento do aplicativo.	31
Figura 8 – Menu Inicial	32
Figura 9 – Escolha de Método	33
Figura 10 – Sugestão de Método	33
Figura 11 – Algoritmo de Sugestão	34
Figura 12 – Tela do Método IEEE1584	34
Figura 13 – Exemplo de Etiqueta ATPV fornecida pelo Aplicativo	35
Figura 14 – Frísia Cooperativa Agroindustrial - Tibagi/PR	36
Figura 15 – ETAP: QC-LS-B18	38
Figura 16 – Aplicativo: QC-LS-B18	38
Figura 17 – Etiquetas QC-LS-B18	39
Figura 18 – Etiquetas QDG-01 RESFRIADOR	40
Figura 19 – Etiquetas QC-SEC-KHRONOS	40
Figura 20 – Etiquetas QGBT-TR-3	41
Figura 21 – Etiquetas QC-TB-02	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Categorias de Risco - ATPVs	19
Tabela 2 –	Limitação dos Métodos de Cálculo	20
Tabela 3 –	Distâncias de trabalho	22
Tabela 4 –	Fatores para equipamentos e classes de tensão	26
Tabela 5 –	Tempo de abertura para disjuntores de potência	27
Tabela 6 –	Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos	27
Tabela 7 –	Tipos de equipamentos e distância típica de trabalho	28
Tabela 8 –	Dados equipamentos	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A Amperes

API *Application programming interface*

ASTM *American Society for Testing and Materials* - Sociedade Americana de Testes e Materiais

ATPV *Arc Thermal Performance Value* – Valor de performance do arco elétrico

CA Corrente Alternada

cal/cm² Calorias por centímetro quadrado

CC Corrente Contínua

CCM Centro de Controle de Motores

cm Centímetros

EPI Equipamento de Proteção Individual

Hz Hertz

IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos

in *Inches* - Polegadas

J/cm² Joules por centímetro quadrado

kA Quiloamperes

kV Quilovolt

mm Milímetros

ms Milissegundos

NFPA *National Fire Protection Association* - Associação Nacional de Proteção Contra Incêndio

NR Norma Regulamentadora

s Segundos

V Volts

SUMÁRIO

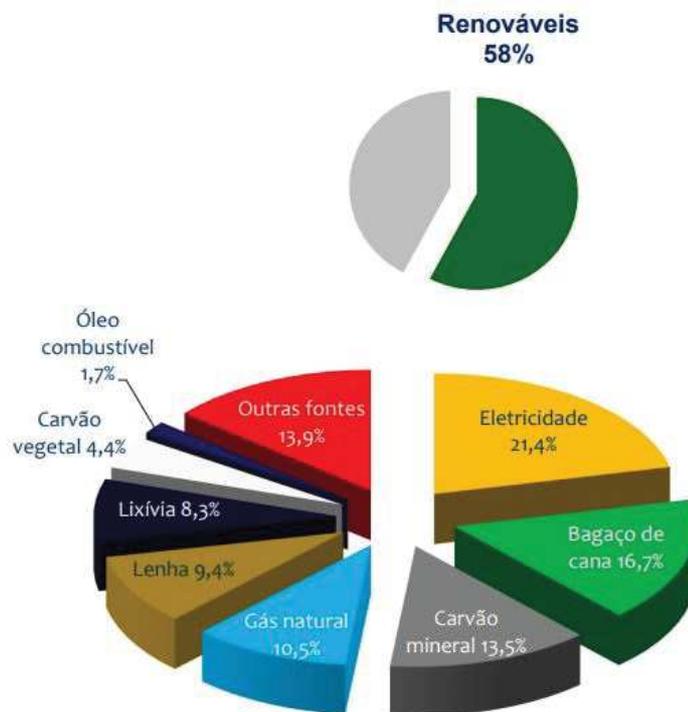
1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	O Arco Elétrico	15
3.2	Histórico	16
3.3	ATPV	18
3.4	Métodos de Cálculo de Energia Incidente	19
3.4.1	Método de Ralph Lee	21
3.4.2	Método de Doughty-Neal	22
3.4.3	Método ANSI/IEEE C2 NESC - Cálculo de energia incidente em corrente contínua	23
3.4.4	Método IEEE 1584	24
3.4.4.1	Etapa 1: obter dados do sistema	24
3.4.4.2	Etapa 2: Avaliar os modos de operação do sistema	24
3.4.4.3	Etapa 3: Determinar corrente de curto-circuito	25
3.4.4.4	Etapa 4: determinar corrente do arco elétrico	25
3.4.4.5	Etapa 5: encontro das características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco	26
3.4.4.6	Etapa 6: determinar tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos	27
3.4.4.7	Etapa 7: Distâncias Típicas de Trabalho	28
3.4.4.8	Etapa 8: cálculo da energia incidente nos equipamentos	28
3.4.4.9	Etapa 9: determinação da distância segura de aproximação contra arco elétrico	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	Justificativa	30
4.2	Plataforma de desenvolvimento	30
4.3	Aplicativo	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1	Estudo de Caso	36
6	CONCLUSÃO	42

6.1	Trabalhos Futuros	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Em 2019, o setor industrial consumiu cerca de 30,4% da energia gerada no Brasil. Entre as várias fontes de energia que são utilizadas neste setor (Figura 1), a eletricidade correspondeu a 21,4% da energia consumida, segundo os dados da Resenha Energética Brasileira realizado pelo Ministério de Minas e Energia (EMPRESA, 2020) . Na indústria, o consumo de energia elétrica representa um dos custos mais elevados para o processo de produção e, infelizmente, é considerado como uma das esferas com mais riscos ao operador.

Figura 1: Consumo de energia na indústria



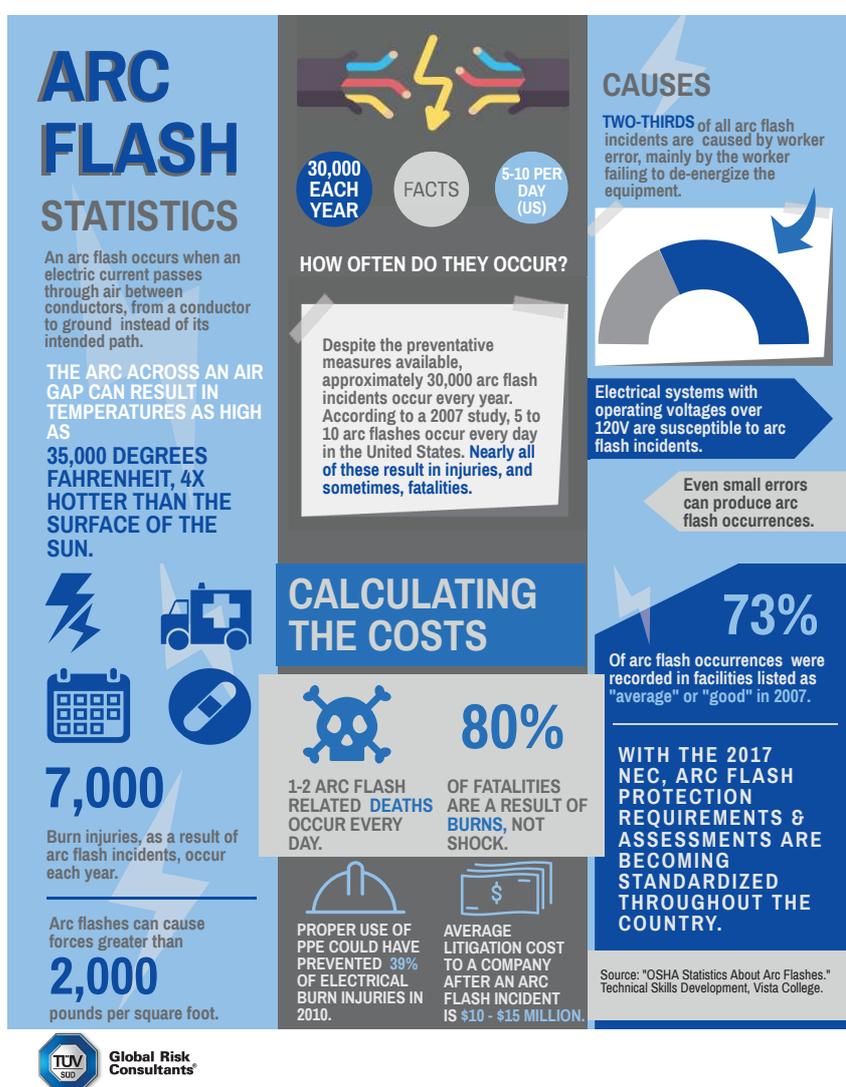
Fonte: EMPRESA (2020)

A medida que a eletricidade é responsável pelo maior percentual de consumo no setor industrial, ela também se apresenta com maior índice de falhas técnicas. As principais e mais recorrentes falhas em instalações industriais são sobrecargas elétricas, curto-circuitos, fuga de corrente, sobretensão e arcos elétricos. Em 1982, o engenheiro Ralph LEE realizou estudos com ênfase em arcos elétricos e constatou no artigo *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* que eles emitem a mais intensa fonte de calor que pode existir no planeta com temperaturas que chegam até 20.000 °C. Estes fenômenos ameaçam a segurança e saúde de operadores da área elétrica assim que, na maioria das vezes, podem causar queimaduras intensas e até levar o indivíduo a óbito. Mesmo com todas as medidas

e normas impostas para trabalhos nesta área, percebe-se que este assunto não recebe ainda a atenção devida pelos envolvidos neste setor.

Segundo o infográfico (Figura 2) da empresa multinacional alemã TÜV Süd (2020), especializada em ensaios técnicos de certificação, cerca de 30.000 incidentes com arco elétrico acontecem todos os anos e dentre eles 7.000 resultam em queimaduras em trabalhadores. O infográfico também cita que empresas estrangeiras envolvidas em acidentes deste tipo chegam a gastar em média 10 milhões de dólares em processos judiciais. Nesse sentido, o uso correto de equipamento de proteção individual (EPI) poderia ter evitado 39% de acidentes somente no ano de 2010.

Figura 2: Infográfico TÜV



Fonte: Süd (2020)

A Norma Regulamentadora de número 10 (NR-10) que rege acerca segurança em instalações e serviços em eletricidade determina uma série de procedimentos e cuidados que garantem melhores condições de proteção e saúde no trabalho com instalações elétricas.

Segundo a Norma, todos trabalhos envolvendo eletricidade devem ser desenergizados anteriormente, a fim de garantir a maior segurança para os trabalhadores envolvidos. Caso a impossibilidade da desenergização durante a empreitada, recomenda-se outra série de medidas, como barreiras, sinalização e isolamento das partes vivas.

Grande parte dos acidentes ocorrem na remoção das barreiras de proteções como portas de painéis, instalar ou inserir e remover componentes operacionais como disjuntores com o equipamento energizado. É neste momento que deslizes podem gerar arcos elétricos capazes de destruir completamente a estrutura do painel, seus componentes e ameaçar a saúde do operador. Nestas circunstâncias, o trabalhador fica totalmente suscetível ao perigo e sua segurança só depende dos procedimentos corretos e uso de EPI adequado.

Desta forma, a engenharia traz métodos, como o de Doughty-Neal ou da norma IEEE 1584, de realizar o cálculo da energia incidente com o objetivo de amenizar e até zerar a probabilidade de um eletricista experienciar um arco elétrico durante uma operação. Informando os dados necessários e aplicando os cálculos é possível obter um valor máximo de energia incidente e EPI adequado.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo são estipulados os objetivos a serem alcançados neste trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

Implementar um algoritmo em software livre capaz de realizar o cálculo de energia incidente, fornecer o valor de ATPV e indicar a proteção mais adequada para os dados fornecidos pelo projetista com objetivo de facilitar a análise de risco e obter maior eficácia na escolha da vestimenta do operador.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Apresentar o fenômeno do arco elétrico, assim como os métodos de cálculo de energia incidente;
2. Realizar comparação do cálculo entre os diferentes métodos e avaliar os resultados obtidos em um caso real;
3. Criar um software visando a sua distribuição e utilização de modo livre;
4. Manter o sistema o mais didático e intuitivo possível para que o projetista consiga fazer uso sem dificuldades.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

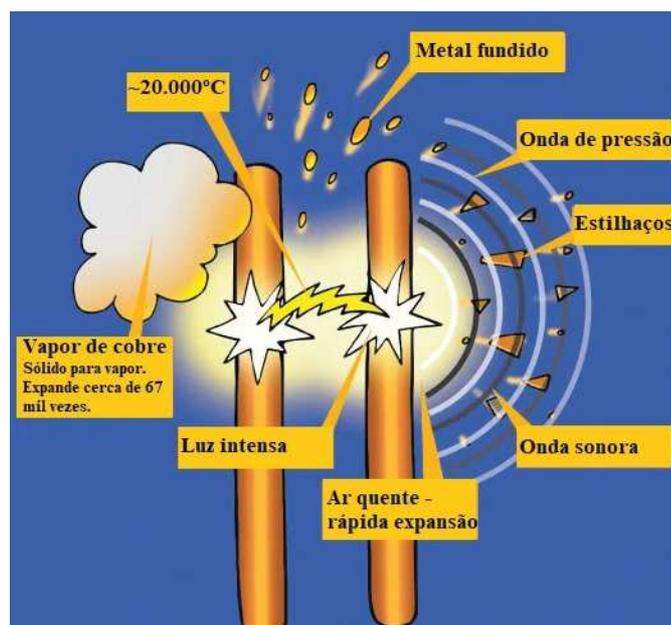
Nesta seção serão apresentados o fenômeno do arco elétrico, os conceitos sobre energia incidente e ATPV.

3.1 O ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico, também conhecido como arco voltaico, se inicia quando a ionização do ar é suficiente para permitir a passagem da corrente elétrica, tendo normalmente curta duração, menos de 1 segundo (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996). Idealmente, um circuito controla a quantidade de corrente elétrica que flui através dele mesmo, mantendo a tensão e a resistência adequadas necessárias para manter o fluxo. O arco elétrico ocorre quando a corrente elétrica se torna descontrolada e passa por um espaço de ar entre os condutores na tentativa de “pular” de um condutor para outro (MARGOLIN, 2017).

Nesse sentido, ao tocar uma maçaneta de metal, depois de arrastar os pés em um piso acarpetado pode resultar em um arco pequeno e inofensivo. O relâmpago é um fenômeno semelhante, com muito mais potência. Por haver tanta energia envolvida, um raio pode causar ferimentos como queimaduras graves, bem como danos materiais. A Figura 3 ilustra o momento da ocorrência de um arco elétrico e os efeitos que resultam do fenômeno.

Figura 3: Ilustração de um arco elétrico.



Fonte: Adaptado do site *Creative Safety Supply*. Acesso em set. de 2020.

A explosão de corrente elétrica libera luz intensa e uma enorme quantidade de calor, tão rapidamente, que pode vaporizar materiais próximos em um curto período de tempo. A expansão repentina do material quente dispara estilhaços e gera uma poderosa onda de pressão, semelhante a uma explosão, que pode ser ouvida a quilômetros de distância.

3.2 HISTÓRICO

As práticas, normas e padrões de segurança elétrica evoluíram gradativamente no tempo e continuam a mudar. A Figura 4 mostra os principais marcos do processo de aprendizagem sobre arcos e consequentemente as normativas que surgiram a partir disso.

Figura 4: Linha do tempo relativa ao progresso de estudos sobre arco elétrico e métodos de gerenciamento de risco.



Fonte: Adaptado de DOUGHTY, NEAL e FLOYD (2000)

Em 1982, Ralph Lee apresentou o artigo "The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Blast Burns". Considera-se este trabalho como o início da teoria moderna do arco elétrico. Lee quantificou os riscos potenciais de queimadura e aumentou a conscientização sobre as questões de segurança. Seu trabalho estabeleceu um método para estimar a quantidade de energia incidente produzida pelos arcos elétricos e o limite de energia "aceitável" que um ser humano suporta. Muitas das práticas atuais de proteção contra arco são baseadas nos estudos realizados por Lee.

Ao segundo marco houve a introdução da organização NFPA. A *National Fire Protection Association* (NFPA) é uma organização internacional sem fins lucrativos dedicada a cessar mortes, ferimentos e perdas econômicas devido a incêndio, eletricidade e riscos

relacionados. Ela possui cerca de 50.000 membros e 9.000 voluntários trabalhando por meio de seus 250 comitês técnicos. A NFPA é responsável por um padrão extremamente relevante para este trabalho, a NFPA 70E.

A normativa padrão NFPA 70E é intitulada "Padrão para Segurança Elétrica no Local de Trabalho" e foi somente em 1995 que começou a abordar sobre os limites do arco voltaico. O objetivo da NFPA 70E é fornecer uma área de trabalho para funcionários que estão protegidos de riscos inaceitáveis associados ao uso de eletricidade no local de trabalho (NFPA, 2018). As práticas sugeridas pelo padrão incluem:

- Análise de fator humano;
- Preparar uma zona de trabalho segura com limites, barreiras, placas e sinais;
- Posicionamento corporal adequado para redução do risco ergonômico, uso de ganchos de resgate nas manobras de média tensão;

Na edição de 2000 da NFPA 70E introduziu-se o sistema de Classificação de Categoria de Risco de Perigo. Desenvolveu-se tabelas que podem ser usadas para selecionar tecidos resistentes a chama (*Flame Resistant* - FR) e EPI para proteção contra os efeitos térmicos de arco elétrico. As tabelas baseavam-se em agrupar os níveis de risco e perigo em cinco categorias e, em seguida, seria feita a seleção da proteção com base na categoria de risco.

Em 2000 ainda, Richard Doughty, Thomas Neal e H. Landis Floyd publicaram "*Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600V Power Distribution Systems*" onde um programa de teste foi concluído para medir a energia incidente de arcos em sistemas trifásicos de 600 V. Algoritmos simples foram desenvolvidos para estimar a energia incidente a uma distância especificada dos eletrodos de arco como uma função da corrente de falha parafusada disponível no sistema de distribuição de energia elétrica (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000). Este projeto forneceu métodos de cálculo que permitiram prever a energia potencial incidente e tornou-se fundamental para os cálculos de arco voltaico atuais.

No ano de 2002 publicou-se o IEEE 1584, pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), apontado como o guia para realizar cálculos de arco elétrico. Este guia refinou os métodos anteriores e desenvolveu novos para estimar a corrente que poderia fluir durante um arco voltaico, se tornando o método predominante na indústria.

No Brasil, dentre as normas reguladoras aprovadas pela portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978, estava a primeira versão da Norma Regulamentadora nº 10, NR-10, nomeada Instalações e Serviços de Eletricidade. Com algumas alterações realizadas em 1983, foi somente em 2004 que publicou-se uma nova versão, intitulada "Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade". Ela trata das seguintes áreas: geração, transmissão, distribuição, projeto, construção, montagem, operação, manutenção e quaisquer trabalhos próximos de instalações elétricas (Ministério do Trabalho e Emprego, 2004).

3.3 ATPV

Alguns procedimentos devem ser adotados quando o objetivo é mitigar os efeitos do arco elétrico, como a desenergização do sistema (quando possível), aplicação de detectores de arco a fim de diminuir o tempo de exposição do operador e, como última opção, o uso de vestimentas (EPI) contra queimaduras. Em 1999, a *ASTM International* (*American Society for Testing and Materials*) estabeleceu um indicador de desempenho de tecidos a serem usados na proteção contra arcos elétricos. Este indicador é dimensionado em calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2) que representa o valor máximo de energia incidente sobre o tecido.

A Figura 5 dá exemplos de EPIs contra agentes térmicos ocasionados por arcos elétricos. Estas vestimentas podem gerar desconforto ao usuário levando em consideração seu peso e a sensação de calor que proporcionam. Portanto, no momento de especificação da vestimenta o projetista deve levar em consideração estes fatores, assim como o tipo da atividade a ser executada pelo electricista para melhor rendimento e segurança.

Figura 5: Vestimentas contra arcos elétricos.



Fonte: Extraído de MG Equipamentos (2020)

Segundo a Norma Reguladora 6, que rege acerca de EPIs, os equipamentos sugeridos contra agentes térmicos são (Ministério do Trabalho e Emprego, 2001):

- Capacete para proteção do crânio e face;

- Capuz para proteção do crânio e pescoço contra riscos de origem térmica;
- Protetor facial para proteção da face contra riscos de origem térmica;
- Vestimentas para proteção do tronco;
- Luvas para proteção das mãos;
- Manga para proteção do braço e do antebraço;
- Calçado para proteção dos pés contra agentes térmicos;
- Perneira para proteção da perna;
- Calça para proteção das pernas;
- Macacão para proteção do tronco e membros superiores e inferiores.

A NFPA 70E divide as vestimentas nas seguintes classes de risco: 0, 1, 2, 3 e 4 (Tabela 1). Nessa perspectiva, existem cinco tipos diferentes de categoria de risco, o que não impede que um fabricante produza uma vestimenta com valor intermediário ou além. Porém, somente são permitidas operações em painéis com energia incidente superior a 40 cal/cm^2 com a instalação elétrica totalmente desenergizada, assim que não existem vestimentas capazes de oferecer a proteção que esta atividade requer.

Tabela 1: Categorias de Risco - ATPVs

Categoria de Risco	ATPV mínimo requerido para o EPI (cal/cm^2)
0	Não aplicável
1	4,0
2	8,0
3	25,0
4	40,0

Fonte: Adaptado de NFPA (2018)

3.4 MÉTODOS DE CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE

Esta seção apresenta os métodos e modelagens matemáticas que são utilizados no cálculo de energia incidente.

Segundo LEE, dentre os perigos que arcos elétricos oferecem, considera-se a energia incidente a mais preocupante, visto que esta é a principal causa de ferimentos e queimaduras de 2^o e 3^o grau aos trabalhadores expostos ao evento. Destarte, é tido como fundamental compreender os fatores que influenciam na intensidade da energia incidente bem como os métodos para determinar o seu valor.

Os métodos a serem apresentados são demonstrados e explicados na seção *Informative Annex D* (anexo informativo “D”) da normativa NFPA 70E. Normalmente, o projetista tem o dever de analisar as limitações (Tabela 2) de cada método e escolher o melhor entre eles para sua aplicação. Pretende-se com este trabalho automatizar este processo e propiciar esta facilidade ao projetista, a qual será abordada abrangentemente no capítulo 4.

Tabela 2: Limitação dos Métodos de Cálculo

Método	Limitações/Parâmetros
Ralph Lee	Calcula o limite do arco voltaico comum e arco trifásico ao ar livre. Conservador acima de 600 V e torna-se mais conservador com o aumento da tensão.
Doughty-Neal	Calcula a energia incidente para arco trifásico em sistemas de 600 V ou abaixo. Aplica-se para correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA.
ANSI/IEEE C2 NESC	Calcula a energia incidente para arcos de fase-terra ao ar livre de 1 kV a 500 kV para trabalhos em linha viva.
IEEE 1584	Calcula a energia incidente e limite do arco voltaico para: 208 V a 15 kV; trifásico; de 50 Hz a 60 Hz; 700 A a 106.000 A de corrente de curto-circuito; e 13 mm a 152 mm lacunas do condutor.

Fonte: Adaptado de NFPA (2012)

A energia produzida por um arco elétrico pode ser definida como a integral do produto da tensão de arco e a corrente de arco no intervalo de duração do evento, como segue a equação 3.2 (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996). O produto da tensão de arco pela corrente, para cada instante de tempo, resulta na potência ativa instantânea. A integral do produto ao longo de um determinado período resulta na energia total fornecida pelo arco e somente parte dessa energia será convertida em energia incidente (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996).

$$Ea = \int_0^t Va Ia dt \quad (3.1)$$

Onde:

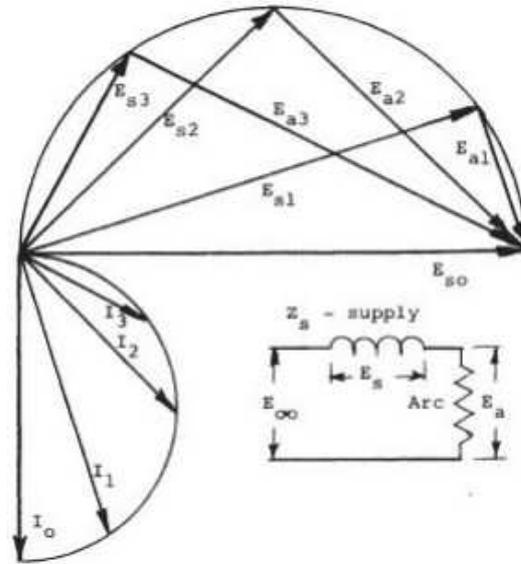
- Ea: Energia produzida no arco elétrico (W);
- Va: Tensão de arco (V);
- Ia: Corrente de arco (A).

Porém, o arco elétrico não pode ser descrito pela matemática fasorial, isso torna a determinação da integral acima algo não tão elementar. Dessa forma, adiante serão abordados os principais métodos utilizados para cálculo da energia incidente.

3.4.1 MÉTODO DE RALPH LEE

Segundo Resende, Lee criou o método modelando o arco elétrico como uma resistência estática e resumiu o circuito da falta por arco em uma fonte de tensão representada por E_{∞} , impedância por Z_s e resistência do arco por R_a , conforme Figura 6. A figura a seguir mostra o modelo adotado pelo engenheiro:

Figura 6: Diagrama fasorial de tensão e corrente de arco.



Fonte: LEE (1982)

Sabe-se da teoria de circuitos elétricos que a máxima transferência de potência para resistência R_a se dá quando $|Z_s|=|R_a|$, assim que resulta em $E_s = E_a$. Outrossim, para se determinar a máxima potência transferida da fonte para o arco elétrico, Lee considerou a resistência do arco igual a impedância da fonte, por consequência a máxima potência do arco será metade da potência de curto-circuito naquele ponto.

O cálculo da energia incidente pode então ser determinado se conhecida a potência de curto-circuito no ponto desejado e o tempo de duração do arco elétrico, relacionado com o tempo de atuação da proteção (RESENDE, 2016). A seguir é apresentado o equacionamento a partir do método de Ralph Lee, segundo NFPA (2012):

$$E = \frac{793 \cdot I_{bf} \cdot V \cdot t_A}{D^2} \quad (3.2)$$

Onde:

- E: Energia Incidente (cal/cm^2);
- V: Tensão do sistema (kV);
- t_A : Tempo de duração do arco (s);

- D : Distância do arco ao indivíduo (mm);
- I_{bf} : Corrente de curto-circuito franco no ponto estudado (kA).

3.4.2 MÉTODO DE DOUGHTY-NEAL

Este método foi inicialmente sugerido no artigo “*Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems*”, em 1998, e é o produto de uma série de testes realizados em laboratório para diferentes cenários, em configurações abertas e fechadas.

Segundo NFPA, os resultados dessas equações podem não representar o pior caso em todas situações. É essencial que as equações sejam usadas apenas dentro das limitações indicadas nas definições e se faz necessário os seguintes parâmetros para o cálculo:

- Corrente de curto-circuito trifásico máxima e de curto-circuito mínima para que um arco elétrico se sustente;
- A distância do trabalhador do possível arco na execução da tarefa (Tabela 3);
- Tempo de atuação da proteção e extinção do arco;
- Tensão do sistema igual ou inferior a 600 V.

As distâncias de trabalho típicas usadas para cálculos de energia incidente são as seguintes:

Tabela 3: Distâncias de trabalho

Local de trabalho	Distância (mm)
600 V ou abaixo: Centro de comando de motores e painéis	455
600 V ou abaixo: Painéis de distribuição	610
Acima de 600 V: Painéis de distribuição	910

Fonte: Adaptado de NFPA (2012)

As equações de energia incidente estimada para arco ao ar livre e ambiente fechado são as seguinte, respectivamente:

$$E_{MA} = 5271 \cdot D^{-1,9593} t_A (0,0016 \cdot F^2 - 0,0076 \cdot F + 0,8938) \quad (3.3)$$

$$E_{MB} = 1038,7 \cdot D^{-1,4738} t_A (0,0093 \cdot F^2 - 0,3453 \cdot F + 5,9675) \quad (3.4)$$

Onde:

- E_{MA} : Energia Incidente ao ar livre (cal/cm^2);

- E_{MB} : Energia Incidente em ambiente fechado (cal/cm^2);
- D: Distância do arco ao indivíduo (in);
- F: Corrente de curto-circuito no ponto estudado (kA);
- t_A : Tempo de duração do arco (s).

3.4.3 MÉTODO ANSI/IEEE C2 NESC - CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE EM CORRENTE CONTÍNUA

O método de estimativa da energia incidente do arco voltaico de corrente contínua (CC) que se segue foi apresentado na Oficina de Segurança Elétrica IEEE 2007 por Daniel Doan. Este método é baseado no conceito de que a potência máxima possível em um arco CC ocorrem quando a tensão de arco é a metade da tensão do sistema. Testes concluídos na usina nuclear *Bruce Power* mostraram que este cálculo é conservadoramente alto na estimativa do valor do arco. Este método aplica-se a sistemas CC com classificação de até 1000V em corrente contínua (NFPA, 2012).

$$I_{arc} = 0,5 \cdot I_{bf} \quad (3.5)$$

$$IE_m = \frac{0,01 \cdot V_{sys} \cdot I_{arc} \cdot T_{arc}}{D^2} \quad (3.6)$$

Onde:

- I_{arc} : Corrente do arco (A);
- I_{bf} : Corrente de curto-circuito (A);
- IE_m : Estimativa da energia incidente do arco elétrico CC no ponto de potência máxima (cal/cm^2);
- V_{sys} : Tensão do sistema (V);
- T_{arc} : Tempo de duração do arco (s);
- D: Distância de trabalho (cm).

Para a probabilidade de ocorrência do arco ocorrer no interior de um painel elétrico, este método sugere que seja multiplicado o valor da energia incidente por três (NFPA, 2012).

3.4.4 MÉTODO IEEE 1584

Esta seção tem como objetivo apresentar a metodologia para cálculo de a energia incidente e os limites do arco elétrico, aplicando a proposta da norma IEEE 1584, amplamente utilizada em instalações industriais.

Para desenvolver uma equação a fim de calcular a energia incidente foram feitos variados ensaios pelo grupo de pesquisa da IEEE 1584 usando análise estatística de dados brutos, juntamente com um algoritmo de ajuste de curva (NFPA, 2012). Dessa forma, os sistemas que se aplicam a este método são os que se encaixam nos seguintes parâmetros:

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

A determinação da energia incidente por este método faz uso de 9 etapas, os quais serão demonstrados em seguida.

3.4.4.1 ETAPA 1: OBTER DADOS DO SISTEMA

Nesta etapa se faz necessário coletar dados do sistema elétrico da unidade, tais como diagramas unifilares atualizados da instalação. Devem ser considerados os circuitos de distribuição de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Após a coleta dos diagramas unifilares, todos os dados necessários devem ser providenciados para o cálculo de curto-circuito. O estudo deve considerar todas as fontes de energia, tal como aspectos técnicos de transformadores, linhas de transmissão, circuitos de distribuição, sistemas de aterramento, proteção, motores, cubículos e demais componentes constituintes da instalação elétrica. Equipamentos abaixo de 240 V não necessitam ser considerados a não ser que possuam potência mínima de 125 kVA (QUEIROZ; SENGER, 2012).

3.4.4.2 ETAPA 2: AVALIAR OS MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

De acordo com a IEEE 1584, em sistemas radiais (quando a subestação ou estação geradora está localizada no centro dos consumidores), há somente um modo de operação normal, porém existem sistemas mais complexos que possuem vários modos de operação. Exemplos: consumidores que fazem uso de geradores operando em paralelo com

a concessionária, assim como encontra-se CCMs operando com um ou dois alimentadores diferentes. Dessa forma, dependendo da instalação, estes modos de operação podem apresentar valores de correntes de curto-circuito diferentes.

3.4.4.3 ETAPA 3: DETERMINAR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Nesta etapa, a norma recomenda que todas as informações referentes ao diagrama unifilar e os dados coletados dos equipamentos sejam inseridos em um *software* para cálculo de curto-circuito. Os valores da corrente de curto-circuito devem ser determinados, principalmente, nos pontos da instalação onde os operadores desempenham suas funções (QUEIROZ; SENGER, 2012).

3.4.4.4 ETAPA 4: DETERMINAR CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO

Com objetivo de determinar o tempo de operação para dispositivos de proteção calcule-se a corrente de arco trifásica prevista.

Para aplicações com tensão do sistema abaixo de 1 *kV*, usa-se a Equação 3.7 da seguinte forma (NFPA, 2012):

$$\lg I_a = K + 0,662 \cdot \lg I_{bf} + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V(\lg I_{bf}) - 0,00304 \cdot G(\lg I_{bf}) \quad (3.7)$$

Onde:

- \lg : Logaritmo na base 10;
- I_a : Corrente do arco elétrico (*kA*);
- K : Substitui-se por 0,153 para arcos ao ar livre ou -0,097 para ambiente fechado;
- I_{bf} : Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica (*kA*);
- V : Tensão do sistema (*kV*);
- G : Distância entre condutores (*mm*), ver Tabela 4.

Tabela 4: Fatores para equipamentos e classes de tensão

Tensão do sistema (kV)	Tipo de Equipamento	Distância típica entre condutores (mm)	Distância Fator x
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: Fonte: IEEE (2002)

Para sistemas que possuem tensões entre 1 kV e 15 kV , não há distinção entre as configurações em ambiente aberto e ambiente fechado, devendo ser aplicada a seguinte equação (QUEIROZ; SENGER, 2012):

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \cdot \lg I_{bf} \quad (3.8)$$

Onde:

- \lg : Logaritmo na base 10;
- I_a : Corrente do arco elétrico (kA);
- I_{bf} : Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica (kA).

E em seguida converte-se do logaritmo:

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (3.9)$$

Calcula-se ainda uma segunda corrente do arco elétrico equivalente a 85% da I_a , com o objetivo de determinar um segundo tempo de duração do arco. A duração deste segundo arco é responsável pelas variações na corrente de arco e no tempo para o dispositivo de sobrecorrente atuar (NFPA, 2012).

3.4.4.5 ETAPA 5: ENCONTRO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E O TEMPO DE DURAÇÃO DO ARCO

Para esse levantamento, recomenda-se que os dados do sistema de proteção sejam retirados dos equipamentos instalados ou a serem instalados no campo.

Segundo Queiroz e Senger, para obter o tempo de interrupção da proteção, deve-se atentar a alguns parâmetros. Para fusíveis, as curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção, assim, deve-se adotar somente o tempo de interrupção. Caso o fabricante forneça somente a média do tempo de fusão, deve-se somar 15% no tempo de fusão, desde que esse tempo seja de até 0,03 segundos. Para tempos superiores a 0,03 segundos, soma-se 10% no tempo de fusão. Essas somas têm como objetivo determinar o tempo total da interrupção.

Para disjuntores operados por relés operando na região instantânea, considera-se a sua operação em 16 *ms*, à frequência de 60 *Hz*, devendo ser somado o tempo para abertura do disjuntor. A Tabela 5 mostra os tempos de abertura para disjuntores de potência segundo a norma IEEE 1584.

Tabela 5: Tempo de abertura para disjuntores de potência

Tensão e tipo de disjuntor	Tempo de abertura em 60Hz (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 isolada com relé de proteção integrado ou operado por relé externo	3,0	0,050
Média Tensão (1 a 35kV)	5,0	0,080
Alta Tensão (>35kV)	8,0	0,130

Fonte: Fonte: IEEE (2002)

3.4.4.6 ETAPA 6: DETERMINAR TENSÕES DOS SISTEMAS E A CLASSE DOS EQUIPAMENTOS

Para cada barramento deve-se obter a tensão do sistema e o tipo de equipamento, conforme a Tabela 6 adaptada da IEEE 1584, com o objetivo de verificar a distância entre barramentos.

Tabela 6: Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos

Tipo de equipamento	Distância típica entre barramentos (mm)
Painel de 15 kV	152
Painel de 5 kV	104
Painel de baixa tensão	32
CCMs e quadros de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

Fonte: Adaptado de IEEE (2002)

3.4.4.7 ETAPA 7: DISTÂNCIAS TÍPICAS DE TRABALHO

A Tabela 7, adaptada da IEEE 1584, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com os tipos de equipamentos. A distância típica de trabalho é a soma da distância entre o corpo e face do trabalhador e a frente do equipamento e a distância da frente do equipamento para a provável fonte de arco dentro do equipamento (NFPA, 2012).

Tabela 7: Tipos de equipamentos e distância típica de trabalho

Tipo de equipamento	Distância de trabalho típica (<i>mm</i>)
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	A ser determinada em campo

Fonte: Adaptado de IEEE (2002)

3.4.4.8 ETAPA 8: CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE NOS EQUIPAMENTOS

Para a realização dos cálculos de energia incidente, a norma estabelece que deve ser determinado, primeiramente, o valor da energia incidente normalizada, a qual é baseada em valores normalizados para um arco de 200 *ms* de duração e uma distância de 610 *mm* entre o ponto de origem do arco e uma pessoa (QUEIROZ; SENGER, 2012). Para obter esse valor de energia usa-se a equação a seguir:

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \cdot \lg I_a + 0,0011 \cdot G \quad (3.10)$$

Onde:

- \lg : Logaritmo na base 10;
- E_n : Energia incidente normalizada (J/cm^2) para tempo de 200 ms e distância de 610 mm;
- K_1 : Usa-se $-0,792$ para ambiente aberto e $-0,555$ para ambiente fechado;
- K_2 : Usa-se 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência e $-0,113$ para sistema solidamente aterrado.
- G : Distância entre condutores (*mm*), ver Tabela 4.

Assim, convertendo:

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (3.11)$$

Por fim, converte-se para energia incidente a partir da energia normalizada pela equação seguinte (NFPA, 2012):

$$E = C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (3.12)$$

Onde:

- E: Energia incidente (cal/cm^2);
- C_f : é um fator de cálculo, usa-se 1,0 para tensão acima de 1 kV e 1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV ;
- E_n : Energia incidente normalizada;
- t: tempo do arco (s);
- D: Distância do provável arco para uma pessoa (mm);
- x: Fator de distância, ver Tabela 4.

3.4.4.9 ETAPA 9: DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO CONTRA ARCO ELÉTRICO

Para determinar a distância segura de aproximação, deve-se aplicar a Equação 3.13. Essa equação pode ser usada também para determinar se o equipamento de proteção individual selecionado é adequado para evitar lesões térmicas a uma distância especificada no evento de um arco voltaico (NFPA, 2012).

$$D_B = \left[4,184 C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.13)$$

Onde:

- D_B : Distância de aproximação do ponto do arco (mm);
- C_f : é um fator de cálculo, usa-se 1,0 para tensão acima de 1 kV e 1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV ;
- E_n : Energia incidente normalizada;
- E_B : Energia incidente (J/cm^2) na distância de proteção;
- t: tempo do arco (s);
- x: Fator de distância, ver Tabela 4.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritas as metodologias empregadas para execução e implementação do projeto.

4.1 JUSTIFICATIVA

Há alguns anos, aplicativos (ou apps) para smartphones eram algo impensável, mas essa realidade mudou drasticamente. Hoje, o brasileiro tem em média 30 a 40 aplicativos instalados em seus smartphones, com as mais variadas funcionalidades. Cerca de quarenta e oito mil aplicativos são baixados a cada minuto na App Store (Apple) e o número de aplicativos da Google Play aumentou mais de trinta vezes nos últimos oito anos (Invento Tecnologia, 2018).

Segundo o site Terra (2020), o Brasil é o segundo país onde o mercado de aplicativos mais cresce, perdendo apenas para a Indonésia. O brasileiro, em média, passa três horas por dia utilizando aplicativos no smartphone (Terra, 2020). Já no setor comercial, empresas apontam cada vez mais o aumento no volume de vendas online originadas de dispositivos móveis, principalmente em datas comemorativas.

Diante desses fatos, visando a evolução da tecnologia atual e principalmente a praticidade que um app fornece ao usuário, optou-se por desenvolver este projeto em modo de aplicativo.

4.2 PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO

A plataforma de desenvolvimento escolhida foi *Power Apps*. Este é um pacote de serviços, conectores e plataforma de dados que fornece um ambiente de desenvolvimento rápido para criar aplicativos personalizados para suas necessidades de negócios. Ao usar o *Power Apps*, é possível criar aplicativos de negócios personalizados que se conectam a dados comerciais armazenados tanto na plataforma de dados subjacente (*Microsoft Dataverse*) quanto em várias fontes de dados online e locais (*SharePoint, Microsoft 365, Dynamics 365, SQL Server* e outros).

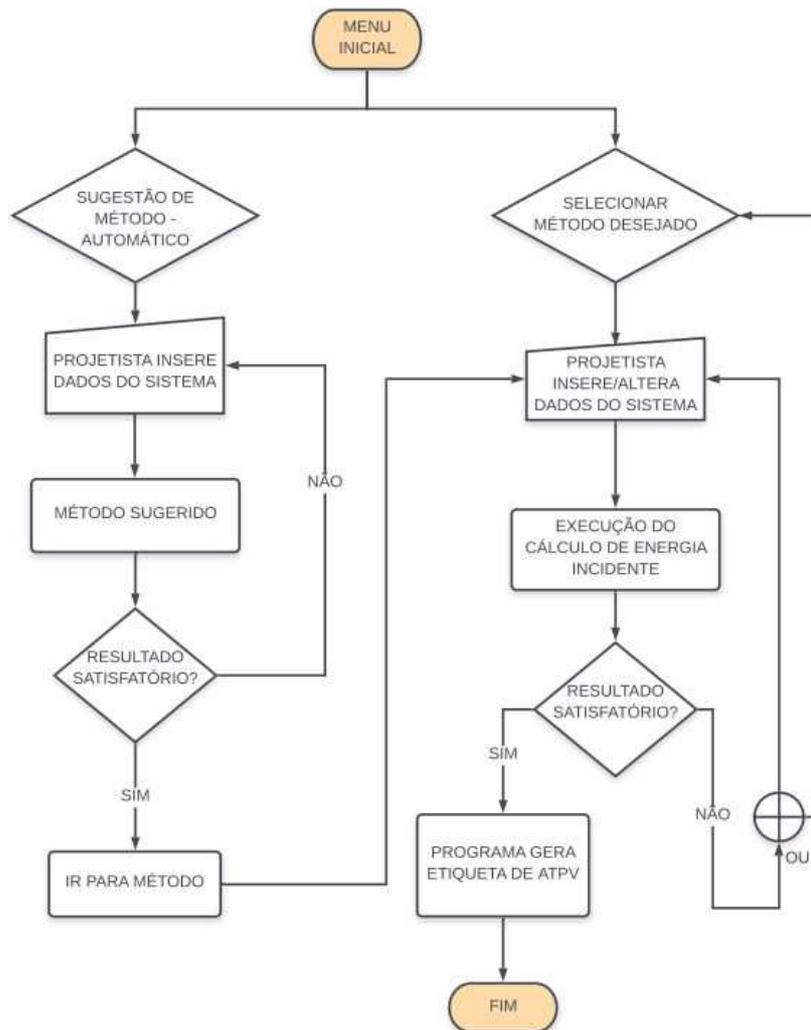
Os aplicativos criados com o uso do *Power Apps* fornecem recursos de fluxo de trabalho e lógica de negócios avançados para transformar seus processos comerciais manuais em processos automatizados digitais. Além disso, os aplicativos criados com o *Power Apps* tem um design dinâmico e podem ser executados perfeitamente no navegador ou em dispositivos móveis (telefone ou *tablet*). A linguagem de programação que é utilizada é C# ou C Sharp.

C# é uma linguagem de programação multiparadigma, de tipagem forte, desenvolvida pela Microsoft como parte da plataforma .NET. A sua sintaxe orientada a objetos foi baseada no C++ mas inclui muitas influências de outras linguagens de programação, como Object Pascal e, principalmente, Java. Além disso, simplifica muitas complexidades do C++, fornecendo recursos poderosos, como tipos de valor nulo, enumerações, delegações, expressões lambdas e acesso direto a memória, suporte a métodos e tipos genéricos, gerando uma melhor segurança de tipo e desempenho (Devmedia, 2013).

4.3 APLICATIVO

O funcionamento do aplicativo se dá de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 7. Com o objetivo de manter o sistema o mais prático possível para o projetista, algumas alterações foram consideradas e executadas referente ao planejamento original.

Figura 7: Fluxograma de funcionamento do aplicativo.



Fonte: Autoria própria.

A experiência do usuário é um dos temas mais relevantes na construção de produtos digitais. O sucesso ou a falha de um aplicativo pode ser determinado pela maneira como o aplicativo foi criado para seus usuários. Portanto, ao escolher um menu de aplicativo, deve-se torná-lo o mais prático possível para melhorar a sua usabilidade.

Seguindo este pensamento, o menu inicial (Figura 8) foi desenvolvido contendo somente três opções principais com o objetivo de dar autonomia ao projetista que queira selecionar um método específico para gerar sua etiqueta de ATPV, assim como auxiliar ao projetista que necessita de sugestão de método mais apropriado para seu projeto.

Figura 8: Menu Inicial



Fonte: Autoria própria.

Acessando a primeira opção "Escolher Método", inicia-se a tela na qual o projetista pode selecionar um dos cinco métodos específicos, como sugere a Figura 9. Em todas as telas se faz possível retornar a tela anterior.

Acessando a segunda opção do Menu Inicial, "Automático", inicia-se a tela na qual o projetista fornece algumas informações importantes para o algoritmo sugerir o método mais aconselhado para a situação, como sugere a Figura 10.

O algoritmo de sugestão (Figura 11) é simples e segue a Tabela 2 de limitações adaptada da normativa NFPA (2012).

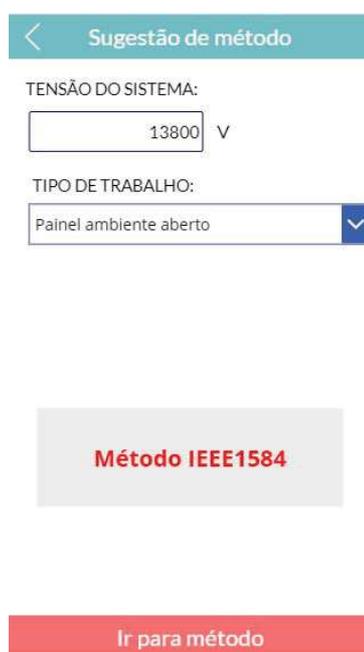
Uma vez que o projetista selecionou o método que deseja utilizar ou aceitou a sugestão do algoritmo ele será encaminhado para a tela onde deve acrescer maiores informações do sistema elétrico como: tensão do sistema, corrente de curto circuito, tempo de duração do arco, distância do arco ao indivíduo, entre outras que sejam necessárias. A Figura 12

Figura 9: Escolha de Método



Fonte: Autoria própria.

Figura 10: Sugestão de Método



Fonte: Autoria própria.

Figura 11: Algoritmo de Sugestão

```
If(  
  Value(TDS_AUTO.Text) > 208 && Value(TDS_AUTO.Text) < 15000;  
  "Método IEEE1584";  
  menu_tt.Selected.Value = "Linha viva";  
  "Método ANSI/IEEE C2 NESC";  
  Value(TDS_AUTO.Text) < 600 && menu_tt.Selected.Value = "Painel ambiente fechado";  
  "Método de Doughty-Neal Ambiente Fechado";  
  Value(TDS_AUTO.Text) < 600 && menu_tt.Selected.Value = "Painel ambiente aberto";  
  "Método de Doughty-Neal Ambiente Aberto";  
  Value(TDS_AUTO.Text) > 15000;  
  "Método de Ralph Lee"  
)
```

Fonte: Autoria própria.

mostra a mérito de exemplo a tela de dados necessários para calcular a energia incidente a partir do Método IEEE1584.

Figura 12: Tela do Método IEEE1584

A imagem mostra a interface de usuário para o Método IEEE 1584. O formulário contém os seguintes campos:

- CORRENTE DE CURTO CIRCUITO:** Campo de entrada com unidade kA.
- TENSÃO DO SISTEMA:** Campo de entrada com unidade kV.
- AMBIENTE:** Menu suspenso com uma seta para baixo.
- DISTÂNCIA ENTRE CONDUTORES:** Campo de entrada com unidade mm.
- FATOR DE DISTÂNCIA:** Campo de entrada.
- CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO:** Campo de entrada com unidade kA, exibindo o valor "1".
- TIPO DE EQUIPAMENTO:** Menu suspenso com uma seta para baixo.

Um botão azul "Conferir tabela" está localizado ao lado do campo de distância entre condutores. Um botão vermelho "Gerar Etiqueta" está na base da tela.

Fonte: Autoria própria.

Com os dados todos preenchidos e revisados pelo projetista, o algoritmo fornece a partir das fórmulas implementadas o valor de energia incidente do equipamento. Ao clicar em "Gerar Etiqueta" uma nova tela será acessada. Essa tela fornecerá a etiqueta de ATPV que fornece o nome do equipamento, tensão do sistema, classe do EPI que deve ser utilizado, valor de energia incidente e distância de trabalho recomendada. A Figura 13 mostra um exemplo de etiqueta de ATPV finalizada.

Acessando qualquer outro método de cálculo diferente do exemplificado acima deve

ser possível realizar as mesmas ações: informar os dados e gerar a etiqueta de ATPV. O código fonte do aplicativo está disponibilizado no seguinte link: [github](#).

Figura 13: Exemplo de Etiqueta ATPV fornecida pelo Aplicativo



Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são abordados os resultados obtidos com a elaboração do *software*. Para mérito de validação do funcionamento do software e algoritmo implementado um estudo de caso foi desenvolvido.

5.1 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso foi realizado com auxílio de dados obtidos na empresa GETAC Engenharia de Cascavel(PR). A GETAC Engenharia desenvolve soluções que abrangem os segmentos de engenharia elétrica, mecânica, segurança do trabalho e segurança operacional em obras dos mais diversos portes.

Neste projeto a contratada GETAC, encarregada de adequações de NR-10, gerou etiquetas de ATPV para a fixação em equipamentos elétricos da contratante Frísia Cooperativa Agroindustrial de Tibagi(PR), Unidade 3, Figura 14. Desta forma, para mérito de validação deste TCC, serão efetuadas comparações entre cinco destas etiquetas geradas pela empresa e com este aplicativo desenvolvido neste trabalho de conclusão.

Figura 14: Frísia Cooperativa Agroindustrial - Tibagi/PR



Fonte: Google Maps

A fim de realizar o cálculo de energia incidente dos equipamentos em questão, a empresa GETAC faz uso do *software* comercial ETAP *ArcSafety*TM. O software de análise de arco elétrico oferece recursos que permitem avaliação dos riscos e análise de energia incidente, suas licenças iniciais custam cerca de U\$400,00 (quatrocentos dólares aproximadamente).

Para o cálculo da energia incidente a partir do software desenvolvido neste trabalho, as seguintes linhas de raciocínio e modelos de cálculo foram utilizadas:

- Normativa NFPA 70E: Aproximação para Baixa Tensão do Método Teórico;
- Teoria de Ralph Lee: Método da Máxima Energia Incidente;
- Método de Cálculo de Energia Incidente IEEE 1584;

A Tabela 8 contém os dados que serão utilizados nos cálculos de cada equipamento. Estes dados foram obtidos em campo pela empresa.

Tabela 8: Dados equipamentos

Equipamento	I_{cc}(KA)	V(kV)	Dist. C.(mm)	t(s)
QC-LS-B18	2,964	0,380	13	0,029
QDG-01 RESFRIADOR	9,374	0,380	13	0,040
QC-SEC-KHRONOS	1,013	0,380	13	0,005
QGBT-TR-3	21,226	0,380	13	0,652
QC-TB-02	5,679	0,380	13	0,013

Fonte: GETAC Engenharia

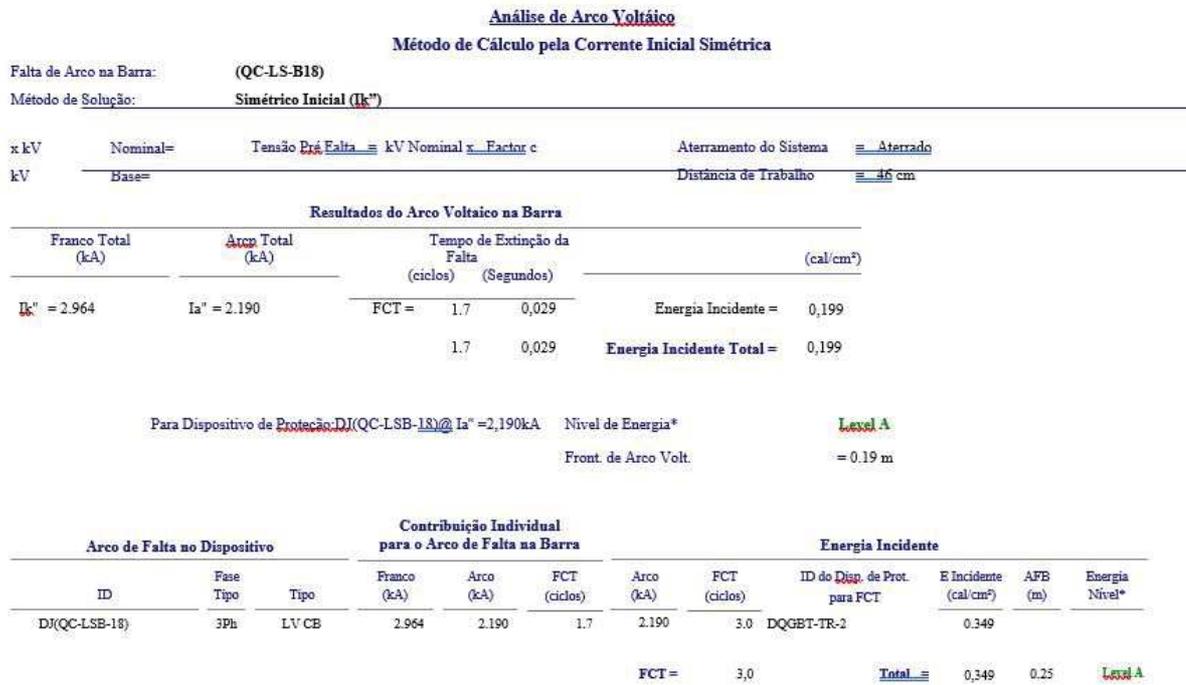
Onde:

- I_{cc}: Corrente de curto circuito em quiloampères;
- V: Tensão em Volts;
- Dist. C.: Distância entre condutores em milímetros;
- t: Tempo de arco em segundos;
- QC: Quadro de Comando;
- QDG: Quadro de Distribuição Geral;
- QGBT: Quadro de Geral de Baixa Tensão;

A Figura 15, fornecida pela empresa, mostra o relatório gerado pelo ETAP *ArcSafety* (software utilizado pela empresa) referente ao cálculo da energia incidente do equipamento QC-LS-B18 (quadro de comando LS B18). É importante destacar que o *software* fornece todos os dados a partir do unifilar levantado e implementado no programa previamente pelo projetista.

A Figura 16 mostra a tela do método IEEE1584 no aplicativo com todos os dados inseridos do ETAP e da empresa GETAC sobre o equipamento QC-LS-B18.

Figura 15: ETAP: QC-LS-B18



Fonte: GETAC Engenharia

Figura 16: Aplicativo: QC-LS-B18



Fonte: Autoria Própria

Figura 17: Etiquetas QC-LS-B18



Fonte: Autoria Própria/GETAC

A Figura 17 compara as etiqueta geradas por ambos, do equipamento QC-LS-B18. A etiqueta à esquerda é a gerada automaticamente pelo aplicativo. A etiqueta à direita foi criada pela empresa.

As seguintes Figuras 18, 19, 20 e 21 também fazem comparação entre as etiquetas geradas para os outros equipamentos selecionados neste estudo de caso (Tabela 8).

Figura 18: Etiquetas QDG-01 RESFRIADOR

PERIGO			
		RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO	
			
EQUIPAMENTO: QDG1-RESFRIADOR			
TENSÃO: 380 V	CLASSE DO EPI: Não aplicável	ENERGIA INCI. 0,652 cal/cm ²	
DISTÂNCIA TRABALHO 460 mm	AVALIAR O RISCO DA ATIVIDADE A EXECUTAR PRIORIZAR A DESENERGIZAÇÃO UTILIZAR EPIs E FERRAMENTAS ADEQUADAS		

PERIGO			
EQUIPAMENTO: QDG-01 RESFRIADOR			
RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO SOMENTE PROFISSIONAL AUTORIZADO			
	TENSÃO 380 V	CLASSE DO EPI CLASSE 00 RISCO 00	ENERGIA INCI. 0,658 cal/cm ²
	AVALIAR O RISCO DA ATIVIDADE A EXECUTAR PRIORIZAR A DESENERGIZAÇÃO UTILIZAR EPIs E FERRAMENTAS ADEQUADAS		
LIMITE DE PROTEÇÃO 340 mm	DIST. TRABALHO 460 mm		

Fonte: Autoria Própria/GETAC

Figura 19: Etiquetas QC-SEC-KHRONOS

PERIGO			
		RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO	
			
EQUIPAMENTO: QC_SEC_KHRONOS			
TENSÃO: 380 V	CLASSE DO EPI: Não aplicável	ENERGIA INCI. 0,013 cal/cm ²	
DISTÂNCIA TRABALHO 460 mm	AVALIAR O RISCO DA ATIVIDADE A EXECUTAR PRIORIZAR A DESENERGIZAÇÃO UTILIZAR EPIs E FERRAMENTAS ADEQUADAS		

PERIGO			
EQUIPAMENTO: QC-KHRONOS			
RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO SOMENTE PROFISSIONAL AUTORIZADO			
	TENSÃO 380 V	CLASSE DO EPI CLASSE 00 RISCO 00	ENERGIA INCI. 0,012 cal/cm ²
	AVALIAR O RISCO DA ATIVIDADE A EXECUTAR PRIORIZAR A DESENERGIZAÇÃO UTILIZAR EPIs E FERRAMENTAS ADEQUADAS		
LIMITE DE PROTEÇÃO 50 mm	DIST. TRABALHO 400 mm		

Fonte: Autoria Própria/GETAC

Figura 20: Etiquetas QGBT-TR-3



Fonte: Autoria Própria/GETAC

Figura 21: Etiquetas QC-TB-02



Fonte: Autoria Própria/GETAC

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um software capaz de calcular a energia incidente através dos diversos métodos existentes. Para que esse objetivo fosse alcançado, fez-se necessário a implementação de algoritmos em software do tipo aplicativo PowerApps. Cinco métodos de cálculo de energia incidente foram implementados, sendo esses o Método de Ralph Lee, o Método de Doughty Neal ao ar livre, o Método de Doughty Neal em ambiente fechado, o Método ANSI/IEEE C2 NESC e o Método IEEE 1584. Além disso, também foi implementado um algoritmo que sugere um único método a partir dos dados informados foi executado com o objetivo de auxiliar o projetista a obter maior precisão.

A vantagem deste software se dá na praticidade que o projetista ou operador pode ter no momento de gerar etiquetas de ATPV. Operadores que eventualmente realizarão trabalhos em locais sem a informação requerida também podem ter a facilidade de rapidamente obter (qual vestimenta utilizar ou distância sugerida). Deve-se ressaltar que a utilização do software tornam-se interessante por profissionais capacitados e habilitados na área da elétrica. Adicionalmente, a plataforma utilizada no desenvolvimento possui diversas APIs (Interface de Programação de Aplicações) relevantes que possibilitam ampliação de funcionalidades do software.

Foi possível visualizar no estudo de caso que os valores de energia incidente alcançados e classe de EPI sugeridos pelo aplicativo desenvolvido são muito próximos ou iguais aos do *software* ETAP ArcSafety. Desta forma, este software também é viável do ponto de vista econômico, assim que, há a ideia da distribuição gratuita para universitários com objetivo aprofundamento no assunto e ampliação do aplicativo, assim como para empresas que possuem seus respectivos objetivos comerciais. Com isso, os objetivos iniciais do TCC proposto foram alcançados.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho possibilita que novos métodos e propostas sejam feitos e testados. A ampliação do software com um banco de dados se faria interessante, dessa forma empresas poderiam manter um controle de projetos realizados. A implementação da API que gera *QR codes* de ATPVs criados pelo projetista e armazená-los em banco de dados também seria um grande avanço.

Implementar o cálculo de correntes de curto circuito é considerado complexo porém é altamente recomendado. Permitir ao projetista calcular e prever o valor de corrente corretamente seria aprimorar diretamente na segurança do operador de painéis ou cabos.

REFERÊNCIAS

- Devmedia. **Introdução à linguagem C**. 2013. Disponível em: <<https://www.devmedia.com.br/introducao-a-linguagem-csharp/27711>>. Acesso em: 06/04/21.
- 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**, v. 36, n. 1, 2000.
- EMPRESA, D. P. E. Balanço energético nacional 2020. **Empresa de Pesquisa Energética e Ministério de Minas e Energia**. Rio de Janeiro, 2020.
- IEEE. "IEEE std. 1584 Guide for performing arc-flash hazard calculations". **IEEE Industry Applications Magazine**, 2002.
- Invento Tecnologia. **6 ESTATÍSTICAS INTERESSANTES SOBRE APLICATIVOS**. 2018. Disponível em: <<https://inventotecnologia.com.br/infografico-estatisticas-aplicativos/>>. Acesso em: 04/04/21.
- LEE, R. H. The other electrical hazard: Electric arc blast burns. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IA-18, n. 3, p. 246–251, 1982.
- MARGOLIN, S. **What are the main causes of an Arc Flash?** 2017. [Online; acessado em 10-09-2020]. Disponível em: <<https://tyndaleusa.com/blog/2017/11/14/what-are-the-main-causes-of-an-arc-flash/>>.
- MG Equipamentos. **Uniforme para Eletricista NR10**. 2020. [Online; acessado 20-09-2020]. Disponível em: <<https://www.epimg.com.br/index.php>>.
- Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Reguladora n.6 (NR-06) - Equipamento de Proteção Individual**. 2001. Brasília.
- Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Reguladora n.6 (NR-10) - Segurança em instalações e serviços em eletricidade**. 2004. Brasília.
- NEAL, T. E.; BINGHAM, A. H.; DOUGHTY, R. L. Protective clothing guidelines for electric arc exposure. In: IEEE. **Proceedings of 1996 IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference**. [S.l.], 1996. p. 281–298.
- NFPA. **Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces**. 2012.
- NFPA. **FACT SHEET » NFPA 70E®**. 2018. [Online; acessado em 15-09-2020]. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/~media/3B937D481EAE4B8DA74C0C1CE5BFBE9E.pdf>>.
- QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. **A IEEE 1584 e os métodos para cálculo de energia incidente e distância segura de aproximação**. 2012. [Online; acessado em 10-10-2020]. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed76_fasc_arco_eletrico_cap5.pdf>.

RESENDE, F. B. Proteção elétrica em subestações: uma abordagem sobre a energia incidente. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

SüD, T. **ARC FLASH Infographics**. 2020. [Online; acessado em 05-10-2020]. Disponível em: <<https://www.tuvsud.com/en-my/resource-centre/infographics/arc-flash>>.

Terra. **Brasil, segundo país onde o mercado de aplicativos mais cresce**. 2020. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/dino/brasil-segundo-pais-onde-o-mercado-de-aplicativos-mais-cresce,1fd9d38aa995ad8ca1243f6c58080f79u2ee8tfj.html>>. Acesso em: 04/04/21.