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

BRENDA SALOMÃO BARROSO

QUANTIFICAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE NOS PAINÉIS DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DO ESPÍRITO SANTO

VITÓRIA – ES
2018

BRENDA SALOMÃO BARROSO

QUANTIFICAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE NOS PAINÉIS DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DO ESPÍRITO SANTO

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Dr. Oureste Elias Batista

Coorientador: Eng. Douglas Figueiredo Vasconcelos

VITÓRIA – ES
2018

BRENDA SALOMÃO BARROSO

QUANTIFICAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE NOS PAINÉIS DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DO ESPÍRITO SANTO

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

BANCA AVALIADORA

_____

Professor Dr. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Professora Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro

_____

Professora Dra. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro

VITÓRIA – ES
2018

Dedico este trabalho a todos que me

incentivaram a ser o meu melhor e

a lutar pelos meus sonhos.

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia "*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*" com o intuito de quantificar a energia incidente nos painéis de uma Pequena Central Hidrelétrica, identificar a categoria de risco necessária que o Equipamento de Proteção Individual deve possuir para a execução de trabalhos tanto próximos a esses painéis energizados como também neles, assim como aferir qual a distância mínima segura de proteção, quando se trata de pessoas sem o EPI próximas a esses painéis. Para isso, o estudo foi dividido em duas etapas: análise dos painéis de 380 V e a análise dos painéis de 4,16 kV. Assim como, para uma melhor verificação de todos os possíveis níveis de energia incidente foi dividido conforme os modos de operação da planta, a configuração aberta e fechada dos painéis e ainda pelos níveis de corrente de curto-circuito no sistema. Ao final, foi avaliado o maior nível de energia incidente e qual respectivo modo de caracterização da instalação o corresponde.

Palavras-chave: Categoria de risco, Corrente de curto-circuito, Energia incidente, EPI, IEEE, Painéis, Pequena Central Hidrelétrica.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de Curto-Circuito no Sistema Elétrico 16
Tabela 2 - Faixa do modelo IEEE 1584 26
Tabela 3 - Tempo de abertura disjuntores 29
Tabela 4 - Classe de equipamentos e distância típica entre condutores 30
Tabela 5 - Classe de equipamentos e distância típica de trabalho 30
Tabela 6 - Fator de distância para cada equipamento e classe 32
Tabela 7 - Distâncias de segurança NR 10 34
Tabela 8 - Classificação EPI conforme nível de energia incidente 36
Tabela 9 - Correntes utilizadas e descrição de sua utilização 40
Tabela 10 - Classificação das análises 42
Tabela 11 - Características Painel 380 V 47
Tabela 12 - Energia Incidente painel 380 V configuração aberta 47
Tabela 13 - Energia Incidente Painel 380 V configuração fechada 48
Tabela 14 - Dados Painéis de 4,16 kV 49
Tabela 15 – Configuração aberta painéis 4,16 kV com um gerador e 100% da corrente de arco elétrico 50
Tabela 16 – Configuração aberta painéis de 4,16 kV com um gerador e 85% da corrente de arco elétrico 50
Tabela 17 – Configuração aberta painéis 4,16 kV com dois geradores e 100% da corrente de arco elétrico 50
Tabela 18 – Configuração aberta painéis de 4,16 kV com dois geradores e 85% da corrente de arco elétrico 50
Tabela 19 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com um gerador e 100% da corrente de arco elétrico 51
Tabela 20 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com um gerador e 85% da corrente de arco elétrico 51
Tabela 21 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com dois geradores e 100% da corrente de arco elétrico 51
Tabela 22 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com dois geradores e 85% da corrente de arco elétrico 52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva disjuntor Painel 380 V 43
Gráfico 2 - Corrente de curto-circuito x Tempo de duração do arco elétrico 45
Gráfico 3 - Curva característica relé 489 e 750 GE 46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relatório de Estatística de Acidentes do Setor Elétrico Brasileiro - 2013 10
Figura 2 - Relé de proteção Siemens 13
Figura 3 - Transformador de Corrente 14
Figura 4 - Transformador de Potencial 14
Figura 5 - Disjuntor 15
Figura 6 - Modelo de sequência positiva em curto no curto-circuito trifásico 17
Figura 7 - Arco elétrico em painéis enclausurados 18
Figura 8 - Tempo x Temperatura relacionada com a tolerância do tecido humano 20
Figura 9 – Circuito equivalente e digrama vetorial 22
Figura 10 - Teste arco elétrico ambiente aberto 24
Figura 11 - Teste arco elétrico enclausurado 25
Figura 12 - Energia Incidente x Corrente de Falta em arco aberto x arco enclausurado 25
Figura 13 - Software Arco Pro 33
Figura 14 - Barragem PCH Jucu 37
Figura 15 – Sequência de ações da metodologia IEEE 1584 38
Figura 16 - Corrente de curto-circuito trifásico no barramento de 4,16 kV com duas unidades geradoras 39
Figura 17 - Corrente de curto-circuito trifásico no barramento de 4,16 kV com uma unidade geradora 39
Figura 18 – Registro fotográfico painel Serviços Auxiliares 380 V 41
Figura 19 – Registro fotográfico painéis de proteção 4,16 kV 44
Figura 20 - Equação característica relé 489 e 750 GE 46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS	Análise de Faltas Simultâneas
CA	Certificado de Aprovação
CCM	Centro de Controle de Motores
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
MATLAB	MATrix LABoratory
NFPA	National Fire Protection Association
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
RMS	Root Mean Square
SAPRE	Sistema de Análise e Projetos de Redes Elétricas
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Justificativa 10
1.2 Objetivo Geral 11
1.3 Objetivo Específico 11
2 EMBASAMENTO TEÓRICO 12
2.1 Proteção de sistemas elétricos de potência 12
2.1.1 Curtos-circuitos 15
2.2 Arco elétrico 17
2.3 Histórico do Estudo sobre Energia Incidente 19
2.3.1 Estudo da Energia Incidente – Ralph Lee 21
2.3.2 Estudo de Energia Incidente – Doughty-Neal 23
2.4 Estudo da Energia Incidente – Metodologia IEEE 1584 26
2.5 Softwares para sistemas de alta tensão 33
2.6 Normas Regulamentadoras 33
3 MATERIAIS E MÉTODOS 37
3.1 Estudo das correntes de curto-circuito 38
3.2 Painéis de 380 V 41
3.3 Painéis de 4,16 kV 44
4 RESULTADOS 47
4.1 Painel de 380 V 47
4.1.1 Configuração aberta 47
4.1.2 Configuração fechada 48
4.2 Painéis de 4,16 kV 48
4.2.1 Configuração aberta 49
4.2.2 Configuração fechada 51
5 CONCLUSÃO 53
6 BIBLIOGRAFIA 54
ANEXO A 57
ANEXO B 58
ANEXO C 60

1 INTRODUÇÃO

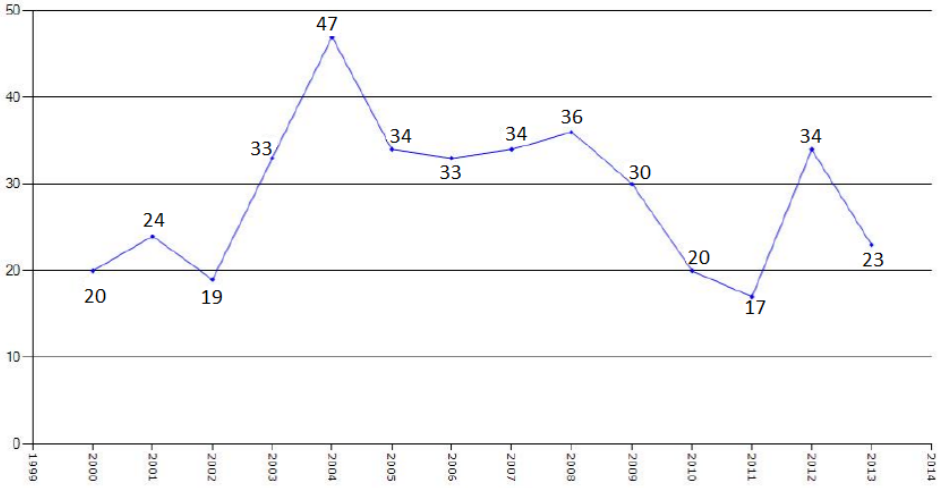
1.1 Justificativa

Tendo em vista a necessidade de se intervir em equipamentos elétricos energizados, por vezes motivada pela manutenção necessária ou por não ser viável a indisponibilidade do equipamento, essa intervenção deve ocorrer com o máximo de resguardo possível para se minimizar os riscos à saúde e bem-estar do executante.

Desse modo, além do choque elétrico, um dos grandes riscos envolvidos na execução de atividades em sistemas elétricos ou até mesmo próximo a eles é a ocorrência de um arco elétrico e em consequência a energia incidente proveniente do mesmo, a qual é acompanhada por vezes por uma onda de pressão, uma alta temperatura, projeção de estilhaços e alto ruído, colocando a vida dos trabalhadores em risco.

O levantamento feito pela Fundação COGE, Figura 1, mostra o número de acidentados por ano referente ao arco elétrico no setor elétrico brasileiro de 2000 a 2013 (Funcoge, 2013). Tendo em vista que esse levantamento somente foi feito em empresas do setor elétrico, o número será maior considerando as empresas de outros setores brasileiros. Com isso, o presente trabalho busca quantificar a energia incidente nos painéis de uma instalação para que seja possível identificar e conhecer os riscos relacionados a aproximação e manutenção nos mesmos.

Figura 1 - Relatório de Estatística de Acidentes do Setor Elétrico Brasileiro - 2013



Fonte: (Funcoge, 2013).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar a energia incidente nos painéis de uma Pequena Central Hidrelétrica, além de identificar a distância segura de aproximação desses painéis e classificar o EPI mais apropriado para a manutenção e até mesmo aproximação deles.

1.3 Objetivo Específico

O propósito deste trabalho é apresentar os conceitos para determinação da corrente de curto-circuito trifásica em um sistema, da corrente de arco elétrico e da energia incidente, assim como explicar as metodologias existentes para o cálculo da energia incidente e as condições de contorno necessárias para utilizar cada uma delas. Também possui o intuito de explicar sobre a importância da segurança para manutenção em equipamentos elétricos, as categorias de EPI existentes e como classificá-los conforme o nível de energia incidente.

Além disso, possui o objetivo de quantificar a energia incidente nos painéis de uma Pequena Central Hidrelétrica, demonstrando detalhadamente o porquê da escolha do método IEEE 1584:2002, explicar como foram realizados os cálculos e obtenção dos parâmetros necessários para esse estudo, assim como realizar a avaliação da proteção do sistema e encontrar os tempos de duração do arco elétrico. Por fim, o trabalho busca também avaliar qual a distância segura de aproximação segundo a metodologia escolhida e classificar o EPI conforme norma de segurança NFPA-70E.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Proteção de sistemas elétricos de potência

O principal objetivo da proteção em sistemas de potência é manter um alto nível de continuidade de serviço e quando condições intoleráveis ocorrerem, minimizar o tempo de indisponibilidade do equipamento ou sistema envolvido. A ocorrência de eventos, como a perda de potência, afundamento de tensão, sobretensão, irão ocorrer, assim como eventos naturais, acidentes físicos, falhas em equipamentos, ou a operação errada por conta de um equívoco humano. Logo, muitos desses problemas resultam em faltas: imprevistos, como conexões acidentais ou faíscas entre enrolamentos de fases diferentes ou entre fase e terra (Blackburn, 1997).

O sistema elétrico está exposto às mais diversas e imprevisíveis condições e as faltas aparecerão em pontos aleatórios. Elas podem ocorrer devido a problemas de isolação, em que as tensões nos condutores são elevadas e rupturas para a terra ou entre cabos podem ocorrer devido à isolação inadequada dos equipamentos, estrutura ou isoladores, devido ao material empregado na fabricação, problemas na fabricação, envelhecimento do material. Além disso, podem ocorrer devido a problemas mecânicos, ação do vento, neve, contaminação, árvore, ou problemas elétricos, como descargas atmosféricas, surtos durante manobra, sobretensão, falhas de natureza térmica, problemas na manutenção ou de outra natureza (Kindermann, 1997).

Desse modo, a proteção de sistemas elétricos vem como uma possível solução para amenizar esses efeitos tanto sistêmicos quanto para proteger o trabalhador, através da configuração dos relés e fusíveis para fornecer o máximo de sensibilidade as faltas e condições indesejáveis, entretanto, de modo que não prejudique a operação normal do sistema em todas as situações permitidas e toleráveis (Blackburn, 1997).

A IEEE define relé, Figura 2, como um dispositivo elétrico cuja função é responder às condições pré-determinadas de entrada, e no momento que essas circunstâncias forem identificadas, devem causar um contato operacional ou mudança abrupta no controle dos circuitos elétricos associados. As entradas são normalmente elétricas, mas podem ser mecânicas, térmicas ou outras e podendo ser combinadas entre si. Os relés são usados em vários tipos de atividades: em casa, comunicações, transporte, comercial, industrial (Blackburn, 1997).

Além disso, os relés de proteção e os equipamentos associados a eles podem ser definidos como unidades compactas de componentes analógicas e discretas, amplificadores operacionais, redes de microprocessadores digitais conectados ao sistema de potência para identificar problemas. Eles são usados em todas as partes do sistema de potência, em conjunto com fusíveis, para a detecção de condições anormais, em sua maioria, faltas (Blackburn, 1997).

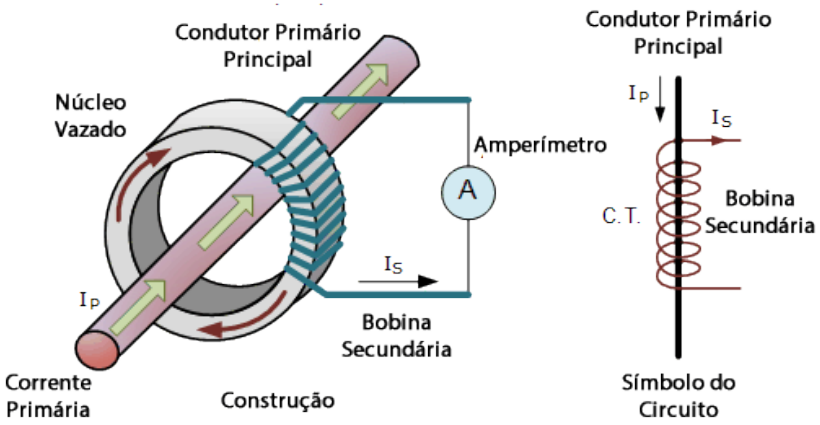
A IEEE define fusível como um dispositivo de proteção de sobrecorrente com uma parte de abertura de circuito que é aquecida e rompida pela passagem de sobrecorrente sobre ela (Blackburn, 1997).

Figura 2 - Relé de proteção Siemens

Fonte: (Direct Industry).

Trabalhando em conjunto com os relés de proteção, encontram-se os Transformadores de Corrente de proteção, TC, e os Transformadores de Potencial de proteção, TP. O TC, Figura 3, é um equipamento responsável por reduzir a corrente que circula no seu enrolamento primário para um valor inferior, compatível com o relé. Já a função do TP, Figura 4, é reduzir a tensão do circuito para níveis compatíveis com a tensão suportável pelo relé (Mamede Filho, 2017).

Figura 3 - Transformador de Corrente



Fonte: (Silveira).

Figura 4 - Transformador de Potencial

Fonte: (Instrumenti, 2012).

Os relés de proteção são como o cérebro para detectar os problemas, porém como dispositivos de baixa energia, eles não são capazes de abrir e isolar a área de problema do sistema de potência. Os disjuntores, Figura 5, e outros vários tipos de interruptores de circuitos, incluindo contatores de motores e controladores de motores, são usados para isolar a falta. Assim, os relés e os disjuntores são utilizados em conjunto, ambos necessários para o isolamento imediato de uma área ou de um equipamento danificado (Blackburn, 1997).

Figura 5 - Disjuntor

Fonte: (Schneider Electric).

2.1.1 Curtos-circuitos

Os curto-circuitos são normalmente provocados pela perda de isolamento de algum elemento energizado do sistema elétrico e seus danos são limitados à correta intervenção dos elementos de proteção. Os valores de pico da corrente de curto-circuito normalmente podem chegar a 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação e depende da localização do mesmo. A determinação das correntes de curto-circuito nas instalações elétricas é essencial para a elaboração do projeto de ajuste de proteções e coordenação dos seus diversos dispositivos. Elas adquirem valores de grande intensidade, porém duração geralmente limitada a frações de segundo (Mamede Filho, 2017).

Além das falhas provocadas com a queima de alguns componentes da instalação, as correntes de curto-circuito podem gerar oscilações de natureza mecânica, atuando sobre barramentos, chaves e condutores, em consequência podem romper os apoios e deformar a estrutura de quadros de distribuição, assim como de outras estruturas (Mamede Filho, 2017).

São considerados como fontes de correntes de curto-circuito todo componente elétrico conectado ao sistema que possa contribuir com a intensidade da corrente de defeito; assim são classificados os geradores, condensadores síncronos e motores de indução (Mamede Filho, 2017).

Em uma análise no setor elétrico brasileiro, segundo ocorrências obtidas através do levantamento histórico de defeitos nas empresas de energia, verifica-se a contribuição de cada setor do sistema de energia elétrica em relação aos curtos-circuitos exibido na Tabela 1. Observa-se pela própria natureza do sistema de energia elétrica, o mais propício à falha é a linha de transmissão. Visto que, ela percorre o país passando por diversos lugares, com terrenos e climas diversos (Kindermann, 1997).

Tabela 1 - Porcentagem de Curto-Circuito no Sistema Elétrico

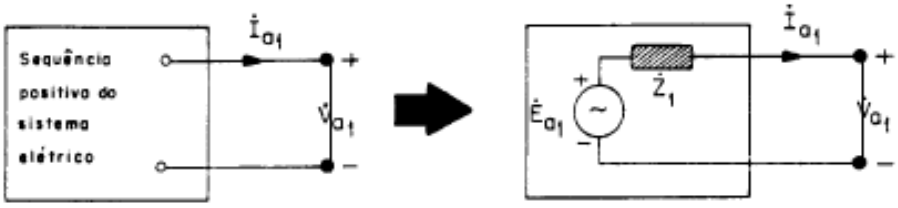
Setor do Sistema Elétrico	Curto-Circuito
Geração	6%
Subestação	5%
Linhas de Transmissão	89%

Fonte: (Kindermann, 1997).

O curto-circuito pode ser classificado como permanente e temporário, sendo que os permanentes são irreversíveis espontaneamente, necessitando de conserto na rede para restabelecer o sistema. Já os temporários, são aqueles que ocorrem sem haver defeito na rede (Kindermann, 1997). Além disso, podem ser classificados como francos, quando o condutor de fase faz contato direto com uma massa metálica aterrada, resultando em correntes maiores circulando no sistema, ou de alta impedância, quando a corrente é igual ou inferior à corrente de carga (Mamede Filho, 2017).

Os curtos-circuitos trifásicos são equilibrados, logo, para eles basta considerar o circuito equivalente de sequência positiva para encontrar a corrente de curto-circuito trifásica. Já os bifásicos, bifásicos à terra e o monofásico à terra, são desequilibrados, e os diagramas de sequência positiva, negativa e zero devem ser usados. O importante para se analisar durante os cálculos é a verificação da corrente de curto-circuito no ponto de defeito. Partindo dela, as correntes nos outros trechos são calculadas fazendo o retrocesso nos circuitos equivalentes. Para isso, deve-se fazer o equivalente de Thévenin no ponto de defeito do sistema elétrico (Kindermann, 1997). A Figura 6 mostra o modelo de sequência positiva para um curto-circuito trifásico.

Figura 6 - Modelo de sequência positiva em curto no curto-circuito trifásico



Fonte: (Kindermann, 1997).

2.2 Arco elétrico

O fenômeno arco elétrico, Figura 7, pode ser definido como uma automanutenção de uma descarga elétrica em gases. Ele se origina da ionização de um gás, no caso o ar, permitindo a condução elétrica pela interconexão entre eletrodos de diferentes potenciais, diferentes fases ou por uma fase e a terra. É um evento não intencional e pode ser causado por faltas técnicas ou por erro humano. Os arcos elétricos na maioria das vezes vêm acompanhados de curto-circuito nos equipamentos de potência em que são liberados uma grande quantidade de energia (Schau, et al., 2011).

Esse fenômeno produz um intenso calor, um barulho extremamente alto e uma onda de pressão. Possuem uma alta temperatura, podendo chegar a 4 vezes a temperatura na superfície do sol (Lee, 1982), irradiam um calor intenso, podendo incendiar roupas e causar queimaduras severas que podem ser fatais (Chet Davis, et al., 2003).

Podem ser iniciados por:

- Poeira e impurezas na superfície de isolação de um equipamento em que podem possibilitar um caminho para a corrente, permitindo uma descarga elétrica e criando um arco de descarga através da superfície, podendo-se desenvolver para arcos maiores. As fumaças e vapor provenientes podem reduzir a tensão de ruptura dielétrica do ar e causar um arco elétrico (Chet Davis, et al., 2003).

- Corrosão nas partes de um equipamento pode permitir impurezas na superfície de isolação, pode também enfraquecer o contato entre os terminais de condutores, fazendo com que cresça a resistência de contato por oxidação ou por outra contaminação corrosiva. O calor gerado nos contatos e as faíscas podem ser produzidos e isso pode levar à ocorrência de faltas entre condutores expostos de diferentes fases ou entre a fase e terra (Chet Davis, et al., 2003).
- Condensação do vapor e gotas de água podem causar um caminho na superfície de isolação dos materiais, podendo criar uma descarga elétrica para a terra ou entre fases de condutores (Chet Davis, et al., 2003).
- Contato acidental entre partes expostas de equipamentos pode iniciar um arco elétrico ou acidental momentaneamente de ferramentas podem causar um curto-circuito e produzir faíscas que iniciariam um arco elétrico (Chet Davis, et al., 2003).
- Quando a distância, *air gap*, entre condutores de diferentes fases é muito pequena, insuficiente, devido à má manutenção do equipamento ou diminuição da isolação nos materiais, arcos podem ocorrer durante a ocorrência de sobretensões (Chet Davis, et al., 2003).
- Falha na isolação dos materiais, equipamentos mal dimensionados ou mal operados, até mesmo manutenções impróprias (Chet Davis, et al., 2003).

Figura 7 - Arco elétrico em painéis enclausurados

Fonte: (Dipolo Elétrico, 2013).

Alguns perigos do arco elétrico são:

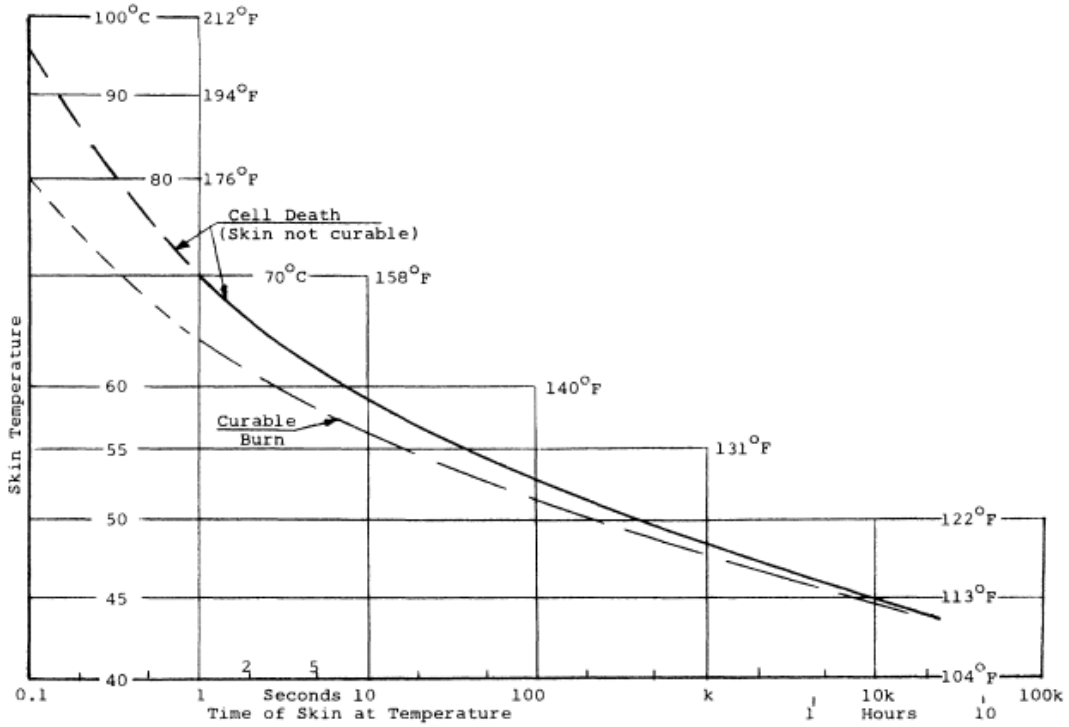
- Calor: Queimaduras fatais podem ocorrer quando a vítima está a uma certa distância do arco elétrico. Queimaduras graves são comuns a uma distância de 3,048 metros. Testes foram ensaios e mostraram temperaturas maiores que 225ºC na região do pescoço e mãos de uma pessoa estando perto da ocorrência de um arco elétrico (Chet Davis, et al., 2003).
- Objetos lançados: Arco elétrico projeta metal fundido a uma alta velocidade e pressão. Os estilhaços podem penetrar o corpo de uma pessoa próxima (Chet Davis, et al., 2003).
- Pressão: Ondas de pressão podem arremessar os trabalhadores, a pressão no peito pode ser maior que 9764,855 kg/m² (Chet Davis, et al., 2003).
- Roupas incendiadas: Roupas podem ser incendiadas de poucos metros de distância, a ponto de deixar a pele exposta (Chet Davis, et al., 2003).
- Perda parcial da audição: O barulho causado pelo arco elétrico pode chegar a uma magnitude de 140 dB, o que corresponde a um tiro ou um jato decolando, a uma distância de 0,6 metros da ocorrência (Chet Davis, et al., 2003).

2.3 Histórico do Estudo sobre Energia Incidente

O cuidado operacional relacionado a equipamentos elétricos tradicionalmente foi relacionada ao perigo do choque elétrico. Entretanto, o reconhecimento do arco elétrico como um risco à segurança foi formalizado em 1981 com o artigo "*The Other Electrical Hazard: Arc Blust Burns*" por Ralph Lee, apresentado em 1981 no *IEEE IAS Annual Meeting*. Esse estudo estabeleceu o modelo teórico para relacionar o calor proveniente da energia incidente em uma superfície dada uma distância do arco elétrico (Brown, et al.).

Em seu estudo, Lee também ajudou a estabelecer uma relação entre o tempo que o tecido humano suporta, para uma queimadura considerada incurável, pela temperatura aplicada, assim como uma relação de tempo para o tecido humano exposto a uma certa temperatura para uma queimadura considerada curável (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Figura 8 - Tempo x Temperatura relacionada com a tolerância do tecido humano



Fonte: (Lee, 1982).

Conforme futuras pesquisas foram sendo feitas, focadas na energia incidente, experiências indicaram que as fórmulas de Ralph Lee não eram indicadas para conciliar os efeitos térmicos do arco elétrico em pessoas posicionadas em frente à painéis abertos ou com tampas removidas de arcos provenientes de dentro dos equipamentos encapsulados (IEEE Industry Applications Society, 2002).

O artigo "*Predicting incidente energy to better manage electric arc hazard on 600 V power distribution systems*" por Doughty, Neal e Floyd apresentou vários testes para sistemas com a ocorrência de arcos elétricos em equipamentos enclausurados e abertos. Esses testes trifásicos eram feitos em sistemas de 600 V e aplicáveis para uma corrente de curto-circuito na faixa de 16 kA até 50 kA.

Com o foco da indústria em aumentar a segurança na operação e manutenção de equipamentos elétricos, causado pelo reconhecimento do perigo do arco elétrico e percebendo a necessidade de proteger os trabalhadores devido essa preocupação, foi necessário aprofundar os estudos acerca da energia incidente e sua mitigação. Além disso, com as limitações e dificuldades encontradas em aplicar as fórmulas existentes dos métodos de Lee e Dougthy, Neal e Floyd,

em 2002 foi lançado o estudo "*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*", como um guia empírico a fim de elaborar o estudo da energia incidente em um sistema; esse método é derivado de modelos baseados em análises estatísticas e curvas que melhor se adequavam aos testes realizados (IEEE Industry Applications Society, 2002).

A elaboração do guia pela IEEE Societies e pelo *Standards Coordinating Commitees* da IEEE *Standards Association* levou em consideração a dificuldade de quantificar através dos algoritmos que eram disponíveis para a análise do perigo do arco elétrico. Com isso, ele foi criado por meio de um conjunto de testes para desenvolver um novo modelo, propondo um guia rápido e com soluções compreensíveis para arcos elétricos em sistemas monofásicos, trifásicos, em ambientes abertos e fechados, assim como para baixas e médias tensões (IEEE Industry Applications Society, 2002).

2.3.1 Estudo da Energia Incidente – Ralph Lee

Segundo (Lee, 1982), o arco elétrico pode ser definido como um fluxo de corrente que passa através de um caminho constituído de vapor proveniente do material terminal do condutor. Sua resistência é muito maior que a de um metal sólido de mesma extensão que a queda de tensão no arco. Em circuitos de baixa tensão, essa queda pode atingir valores entre 29,53 e 39,37 V/cm, sendo várias vezes maior do que a queda em um condutor sólido. Já a indutância no caminho do arco elétrico não é significativamente diferente da indutância de um condutor sólido do mesmo tamanho que o arco, logo, a corrente de arco elétrico é puramente resistiva, portanto o fator de potência é unitário.

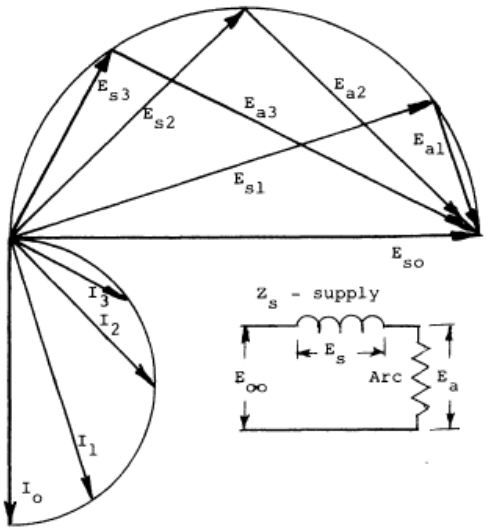
Em seu estudo, ele observou que em uma falta franca não há arco, então um pequeno aquecimento é gerado. Com isso, deve haver uma resistência mensurável no ponto da falta, a temperatura pode aumentar a ponto de derreter e vaporizar o metal e um arco poderá iniciar. Quanto mais o arco aumenta, maior será o consumo de tensão disponível pelo sistema nele, logo, a tensão será fornecida para atender a fonte de impedância e a corrente total irá diminuir (Lee, 1982).

A modelagem do circuito equivalente e diagramas fasoriais desenvolvidos pode ser visto na Figura 9. O sistema tem tensão nominal E_{∞}, e a impedância total da falta Z_s. Quatro condições

de arco elétrico são apresentadas, uma com distância zero (falta sem impedância), uma com uma distância pequena (1), com uma distância moderada (2) e com uma distância maior (3). Sendo a impedância do arco puramente resistiva, e a fonte de alimentação do sistema quase puramente indutiva, a queda de tensão através do arco e da fonte do sistema estão em quadradura para os quatro tamanhos de arco. O local de interseção dos vetores da queda de tensão da fonte (E_s) e a queda de tensão no arco (E_a) é o semicírculo com diâmetro igual a E_{s0}, a queda de tensão para uma falta sem resistência é igual a E_∞. Para essa faixa de comprimentos de arco, a corrente total é representada pelos vetores I0, I1, I2 e I3 todos no ângulo exato correspondente a E_s. A magnitude dos vetores I é proporcional aos vetores E_s, já que eles estão relacionados com a constante Z_s, ($I = E_s/Z_s$) (Lee, 1982).

A energia total do arco elétrico, então, é o produto de E_a e I. Para a falta franca essa energia é zero, é definida mensurável para condição 1, muito considerável para condição 2 e decrescente para condição 3, em que a tensão do arco aumenta moderadamente enquanto a corrente cai significativamente. Além disso, em alguma região dos casos 2 e 3, o tamanho do arco se torna tão grande que ele pode se auto extinguir, ou pelo menos se auto estabilizar em uma corrente de baixa magnitude (Lee, 1982).

Figura 9 – Circuito equivalente e digrama vetorial



Fonte: (Lee, 1982).

Com isso, tendo em vista os dados de tensão do sistema, a corrente de curto-circuito no ponto desejado de análise e o tempo de duração do arco elétrico, é possível calcular a energia incidente pelo método de Lee. Esse modelo é aplicável para sistemas trifásicos abertos como sistemas de subestações, transmissão e distribuição. Além disso, para casos em que a tensão é acima de 15 kV ou nos casos em que a distância entre condutores está fora do intervalo de 13 mm a 152 mm (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Portanto, o modelo teórico derivado do método de Lee pode ser aplicado e está incluso na metodologia IEEE 1584-2002. Porém, nos casos em que não é possível aplicar essa metodologia, ou não é recomendado, o modelo dará resultados conservadores (IEEE Industry Applications Society, 2002).

A energia incidente desse modelo, é definida por:

$$E = 2{,}142 \text{ x } 10^6 \text{ V } I_{bf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (1)$$

Onde:

E Energia incidente (J/cm²)

V Tensão do sistema (kV)

t Duração do arco (s)

D Distância do ponto do arco até a pessoa (mm)

I_{bf} Corrente de falta franca

2.3.2 Estudo de Energia Incidente – Doughty-Neal

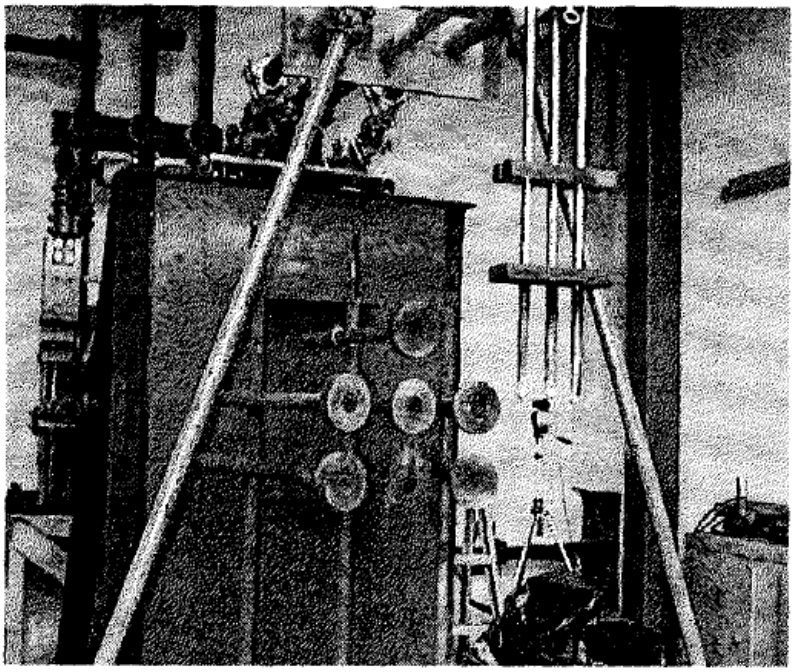
Em 1998, Doughty, Neal e Floyd publicaram o terceiro artigo existente sobre o fenômeno do arco elétrico e sobre a vestimenta necessária para se proteger caso ocorra uma exposição ao arco elétrico. Foram desenvolvidos vários testes para auxiliar na verificação da energia incidente em sistemas trifásicos, com tensão de 600 V em equipamentos abertos e encapsulados (Doughty, et al., 1998).

Em seu artigo anterior "*Protective clothing guidelines for electric arco exposure*" eles concluíram acerca da energia incidente que:

- Ela seria maior quanto maior o espaçamento entre condutores.
- É diretamente proporcional ao tempo de duração do arco elétrico.
- É significantemente afetada pelo espaço ao redor do arco elétrico. Equipamentos enclausurados trifásicos possuem energia incidente maior do que equipamentos abertos, podendo chegar essa diferença a três vezes, dependo dos parâmetros.
- A energia dissipada em derreter e vaporizar os eletrodos durante a ocorrência de um arco elétrico varia tipicamente de 3 a 20% da energia do arco elétrico, considerando um uma perda de 75% do eletrodo. Logo, a energia do arco elétrico não é totalmente convertida na energia incidente.

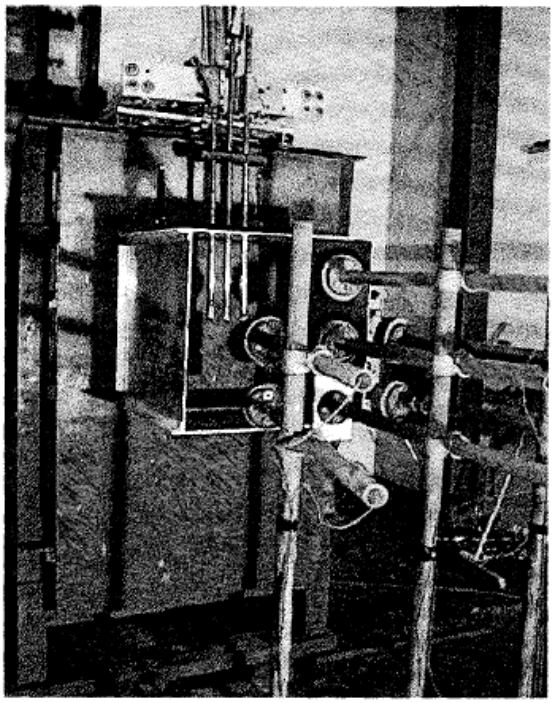
Com isso, os testes desenvolvidos pelos autores, descrito no artigo "*Predicting Incident Energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems*" vieram como um modo de permitir uma estimação melhor para a energia incidente produzida por arcos elétricos trifásicos em sistemas de 600 V. Dois tipos de testes foram executados. O primeiro foi feito com um arco elétrico trifásico em um sistema aberto, como visto na Figura 10. Já o segundo, foi um arco trifásico em um sistema enclausurado, como visto na Figura 11.

Figura 10 - Teste arco elétrico ambiente aberto



Fonte: (Doughty, et al., 1998).

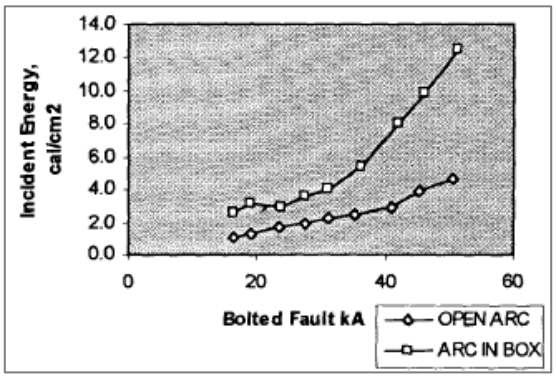
Figura 11 - Teste arco elétrico enclausurado



Fonte: (Doughty, et al., 1998).

Por fim, com base nas medições de energia incidente executadas em condições especificadas pelo experimento, como distância entre condutores, tensão no sistema, corrente de curto-circuito modelada, distância do arco elétrico, foi elaborado um equacionamento acerca da energia incidente. Entretanto, o possível perigo envolvido com projeção de material derretido, impulsos de pressão, subprodutos tóxicos do arco elétrico não foram considerados no estudo. A comparação obtida entre os dois testes, Figura 12, possibilita perceber que a energia incidente em um arco enclausurado é maior do que um arco em ambiente aberto (Doughty, et al., 1998).

Figura 12 - Energia Incidente x Corrente de Falta em arco aberto x arco enclausurado



Fonte: (Doughty, et al., 1998).

As equações estimadas para o cálculo da energia incidente foram:

$$E_{MA} = 5271\, D^{-1.9593} t_A\, [\, 0.0016\, F^2 - 0.0076\, F + 0.8938] \quad (2)$$

$$E_{MB} = 1038.7\, D^{-1.4738} t_A\, [0.0093\, F^2 - 0.3453\, F + 5.9675] \quad (3)$$

Em que:

E_{MA} Energia incidente arco em ambiente aberto em cal/cm²

E_{MB} Energia incidente arco enclausurado em cal/cm²

D Distância do arco elétrico em polegadas

t_A Duração do arco elétrico em segundos

F Corrente de falta franca em kA (16-50 kA)

2.4 Estudo da Energia Incidente – Metodologia IEEE 1584

A metodologia IEEE 1584, Tabela 2, é um modelo empírico, baseado em análises estatísticas e programas que geram curvas que se encaixam nessas análises (IEEE Industry Applications Society, 2002). O IEEE considerou os estudos até então desenvolvidos por Doughy-Neal, Ralph Lee, e outros testes e estudos complementares. Foram incluídos resultados de pelo menos 300 testes, em configurações abertas, fechadas, realizadas ao longo dos anos 90. Entretanto, os riscos relacionados a projeção do material derretido, estilhaços, ondas de pressão e fumaça tóxica também não foram abordados nessa metodologia (Resende, 2016). Esse método é aplicável para sistemas que possuem as seguintes características:

Tabela 2 - Faixa do modelo IEEE 1584

Característica	Faixa aplicável
Nível de tensão trifásica	208 V - 15 kV
Frequência	50 Hz ou 60 Hz
Corrente de falta franca	700 A - 106 kA
Aterramento	Todos os tipos e não aterrados
Equipamento	Barramentos, CCM, conjunto de manobra, painéis, disjuntores e cabos
Distância entre condutores	13 mm - 152 mm
Tipo de falta	Trifásicas

Fonte: (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Os passos necessários para se calcular a energia incidente segundo a metodologia IEEE 1584:2002 em um sistema são:

1. Coletar as informações do sistema e da instalação:

   O maior esforço e dificuldade no estudo de energia incidente é coletar os dados de campo. Até mesmo para uma planta com os dados normalmente atualizados em diagramas unifilares, curvas de tempo x corrente, e estudo de curto-circuito em softwares. A parte do estudo de campo pode tomar cerca de metade do esforço para desenvolver a análise (IEEE Industry Applications Society, 2002).

   Recomenda-se, iniciar através da atualização ou criação, caso não exista, dos diagramas unifilares e das informações sobre os equipamentos elétricos do sistema em estudo. Todas os geradores de corrente alterada devem estar presentes nesse diagrama, assim como todos os transformadores, linhas de transmissão, circuitos de distribuição, sistemas elétricos de aterramento, reatores ou outros dispositivos limitadores de corrente, capacitores para correção ou de estabilização de tensão, chaves, chaves seccionadoras, CCMs (Centro de Controle de Motores), painéis, fusíveis interruptores de carga incluindo o tipo, tamanho, motores e transformadores que alimentam equipamentos de potência e dispositivos de proteção. (IEEE Industry Applications Society, 2002).

   Após isso, deve-se atualizar também as informações necessárias para se realizar o estudo de curto-circuito. Ele deve levar em consideração todos os modos de operação, todas as fontes, incluindo as redundâncias e geradores de potência, assim como os motores com grande contribuição para a potência do curto-circuito, por exemplo, acima de 37 kW. As informações e dados para o cálculo da corrente de falta devem ser realistas, não devem ser conservadoramente altos (IEEE Industry Applications Society, 2002).

2. Determinar os modos de operação:

   Os modos de operação que devem ser inclusos, caso existam, na análise de curto-circuito, tendo em vista a sua importância para determinar as correntes de curto-circuito

para os modos de operação correspondentes à corrente máxima e mínima (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Assim os possíveis modos são: Uma ou mais fontes de tensão em serviço, barras de subestações secundárias abertas e fechadas, unidades de subestações com uma ou duas fontes primárias, unidades de subestações com dois transformadores com o enrolamento secundário aberto e fechado, Centro de Controle de Motores, CCM, com uma ou duas fontes, uma ou as duas energizadas, geradores em paralelo com a fonte fornecendo energia ou em reserva. (IEEE Industry Applications Society, 2002).

3. Determinar as correntes de curto-circuito franco:
   Deve-se inserir todas as informações do diagrama unifilar e os dados coletados em um programa de análise de curto-circuito. É importante incluir todos os cabos, visto que as correntes de falta menores frequentemente persistem por mais tempo, assim é necessário ser o mais realista possível (IEEE Industry Applications Society, 2002).

4. Determinar as correntes de arco elétrico:
   Para aplicações com a tensão do sistema abaixo de 1000 V, deve-se resolver a seguinte equação (IEEE Industry Applications Society, 2002):

$$\lg Ia = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966\, V + 0.000526\, G + 0.5588\, V (\lg I_{bf}) - 0.00304\, G (\lg I_{bf}) \qquad (4)$$

Em que:

lg	$\log_{10}$
Ia	Corrente de arco elétrico (kA)
K	-0.153 para configurações abertas e -0.097 para configurações fechadas
I_{bf}	Corrente de falta trifásica franca (simétrica RMS) (kA)
V	Tensão do sistema (kV)
G	*Gap* entre condutores (mm) (Tabela 4)

Já para aplicações em que a tensão sistêmica é acima de 1000V, deve-se resolver a seguinte equação:

$$\lg Ia = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (5)$$

Para esses casos, não há distinção entre as configurações abertas e fechadas para encontrar a corrente de arco elétrico. Além disso, para ambos os casos, deve-se calcular uma segunda corrente de arco elétrico igual a 85% de I_a para determinar a duração desses dois arcos elétricos e assim obter o pior caso de energia incidente, visto que para uma corrente menor a duração do arco é maior e assim pode influenciar a energia incidente (IEEE Industry Applications Society, 2002).

5. Verificar as características dos dispositivos de proteção e a duração do arco elétrico:
   As curvas de tempo x corrente devem ser levantadas para todos os dispositivos de proteção do sistema. Somado a isso, os tempos de abertura do disjuntor devem ser adicionados. A Tabela 3 mostra os tempos de abertura recomendados, caso seja um dispositivo muito específico deve ser consultado o manual correspondente (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Tabela 3 - Tempo de abertura disjuntores

Tipo de disjuntor	**Tempo de operação em 60 Hz (ciclos)**	**Tempo de abertura (segundos)**
Baixa tensão (<1000 V)	1.5	0.025
Baixa tensão (<1000 V)	3.0	0.050
Média tensão (1-35 kV)	5.0	0.080
Alta tensão (> 35kV)	8.0	0.130

Fonte: (IEEE Industry Applications Society, 2002) .

6. Documentar as tensões do sistema e as classes de equipamento:
   Para cada barramento ou condutor, deve-se documentar a tensão do sistema e a classe de equipamento, assim como mostrado na Tabela 4. Isso facilitará durante a aplicação das equações baseadas nas classes dos equipamentos e na distância entre condutores (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Tabela 4 - Classe de equipamentos e distância típica entre condutores

Classes dos equipamentos	Distância entre condutores típica (mm)
Conjunto de manobra 15 kV	152
Conjunto de manobra 5 kV	104
Conjunto de manobra baixa tensão	32
CCM e painéis de baixa tensão	25
Cabos	13

Fonte: (IEEE Industry Applications Society, 2002).

7. Selecionar as distâncias de trabalho:

   A proteção contra o arco elétrico é baseada no nível de energia incidente na face da pessoa e no corpo a uma certa distância de trabalho. A cabeça e o corpo são os locais de maior porcentagem da pele total e quando feridas essas partes, podem causar muito mais ameaça à vida do que queimaduras nas extremidades. As distâncias típicas de trabalho podem ser vistas na Tabela 5 (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Tabela 5 - Classe de equipamentos e distância típica de trabalho

Classes dos equipamentos	Distância típica de trabalho (mm)
Conjunto de manobra 15 kV	910
Conjunto de manobra 5 kV	910
Conjunto de manobra baixa tensão	610
CCM e painéis de baixa tensão	455
Cabos	455

Fonte: (IEEE Industry Applications Society, 2002).

A distância típica de trabalho é a soma da distância entre o trabalhador estando ele em frente ao equipamento e de dentro do equipamento para o possível local onde ocorrerá o arco elétrico dentro do equipamento (IEEE Industry Applications Society, 2002).

8. Determinar a energia incidente para todos os equipamentos:

   Primeiramente, deve-se encontrar a energia incidente normalizada. Essa equação é baseada nos dados normalizados para um arco no tempo de 0.2 segundos e uma distância do possível ponto de arco elétrico de 610 mm até a pessoa.

$$\ln E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011\, G \quad (6)$$

Onde:

E_n Energia incidente normalizada no tempo e distância

K_1 -0.792 para configurações abertas e -0.555 para configurações fechadas

K_2 0 para sistemas não aterrados ou aterrados por alta resistência e -0.113 para sistemas aterrados

G *Gap* entre condutores (mm) (Tabela 4)

Após isso, converte-se a energia normalizada para:

$$E = 4.184\, C_f\, E_n \left(\frac{t}{0.2}\right)\left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (7)$$

Onde:

E Energia incidente (J/cm²)

Cf Fator de cálculo, sendo 1 para tensões acima de 1000V e 1.5 para tensões abaixo de 1000 V

E_n Energia incidente normalizada

t Duração do arco elétrico (s)

D Distância do possível ponto do arco e a pessoa (mm)

x Expoente de distância da Tabela 6

Tabela 6 - Fator de distância para cada equipamento e classe

Tensão do sistema (kV)	Tipo de equipamento	Típica distância entre condutores (mm)	Fator x de distância
0.208 - 1	Abertos - expostos	10 a 40	2
	Conjunto de manobra	32	1,473
	CCM e painéis	25	1,641
	Cabos	13	2
> 1 - 5	Abertos - expostos	102	2
	Conjunto de manobra	13 a 102	0,973
	Cabos	13	2
> 5 - 15	Abertos - expostos	13 a 153	2
	Conjunto de manobra	153	0,973
	Cabos	13	2

Fonte: (IEEE Industry Applications Society, 2002).

9. Determinar a distância segura de aproximação para todos os equipamentos:
   As equações para determinar a energia incidente podem ser resolvidas para encontrar a distância segura de aproximação da fonte do arco elétrico com a utilização da energia de 1,2 cal/cm² ou 5,0 J/cm², que corresponde a energia para causar uma queimadura do segundo grau, classificada como uma queimadura curável (IEEE Industry Applications Society, 2002).

   Com isso, a equação da distância possuirá o seguinte formato, com Eb = 5 J/cm²:

$$D = \left[4{,}184\ Cf\ \ En\ \left(\frac{t}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{x}}{Eb}\right)\right]^{\frac{1}{x}} \qquad (8)$$

Como conclusão, a metodologia IEEE 1584 verificou que:

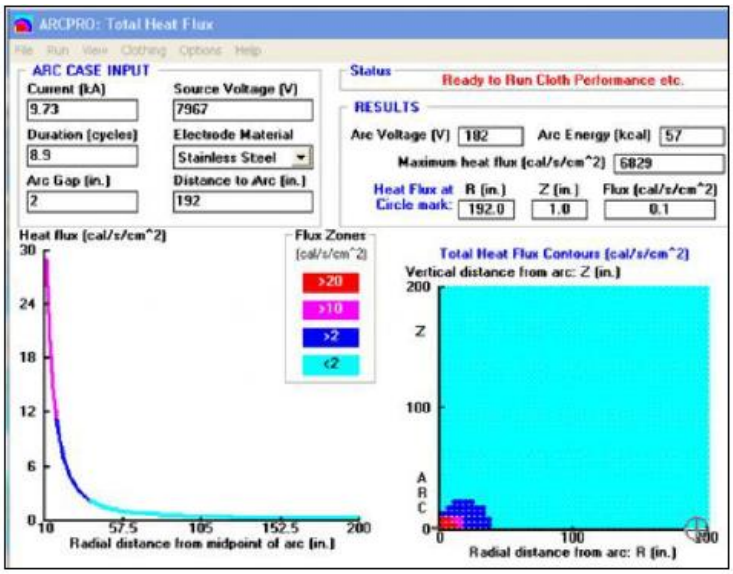
- O tempo do arco elétrico afeta linearmente a energia incidente.
- Há um decaimento exponencial da energia incidente à medida que se afasta do arco elétrico. O expoente depende do tamanho do encapsulamento.
- A energia incidente depende primariamente do cálculo da corrente de arco elétrico. A distância entre condutores, tensão do sistema, tipo de aterramento são fatores de pouca influência.

2.5 Softwares para sistemas de alta tensão

Para os sistemas de alta tensão, apesar do método de Ralph Lee ser aplicável, existem softwares que utilizam equações de transferência de calor para verificar a energia incidente correspondente, sendo mais precisas para esse objetivo, visto que o estudo de Ralph Lee é considerado conservador, pois considera que toda a energia do arco elétrico é transformada em energia incidente (Resende, 2016).

O método *Arc Pro*, feito pela empresa Kinectrics, é uma opção para média alta e extra alta tensão, até 800 kV. Outro software é o *Duke Power Heat Flux Calculator*, assim como o *Heat Flux* (Resende, 2016).

Figura 13 - Software Arco Pro



Fonte: (Resende, 2016).

2.6 Normas Regulamentadoras

Prioritariamente, segundo o Ministério do Trabalho, deve-se adotar medidas de proteção coletiva; são elas técnicas e conhecimentos adotados de forma a reduzir os riscos existentes beneficiando assim o grupo de trabalhadores presentes. Adicionalmente, medidas administrativas também devem ser tomadas, por exemplo a redução da jornada de trabalho devidos à exposição excessiva à ambientes nocivos, assim como análises preliminares de risco como medida de prevenção. Desse modo, quando essas não forem suficientes ou ainda estiverem em fase de implantação, é necessário ter outras barreiras para evitar a exposição do

trabalhador. Dentre elas estão as medidas de proteção individual, o EPI, em que consiste na última alternativa para auxiliar na proteção do trabalhador (MTE).

No Brasil, não existe uma norma explicita sobre os riscos relacionados aos efeitos térmicos do arco elétrico. O Ministério do Trabalho apresenta duas Normas Regulamentadoras envolvendo instalações elétricas: NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade e NR 6 – Equipamentos de Proteção Individual (Dias, et al.).

A NR 10 aborda sobre a proteção contra o choque elétrico, apresentando uma tabela de distâncias de segurança a serem observados em termos do nível de tensão em que o equipamento está submetido, Tabela 7. Porém, não informa explicitamente quanto aos efeitos e consequências do arco elétrico, contudo, afirma que "observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competente e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais são cabíveis". Por outro lado, a NR 6 descreve EPI utilizados para proteção de choques elétricos e contra riscos térmicos (Dias, et al.).

Tabela 7 - Distâncias de segurança NR 10

Faixa de tensão Nominal da instalação elétrica em kV	Rr - Raio de delimitação entre zona de risco e controlada em metros	Rc - Raio de delimitação entre zona controlada e livre em metros
<1	0,2	0,7
e <3	0,22	1,22
e <6	0,25	1,25
e <10	0,35	1,35
e <15	0,38	1,38
e <20	0,4	1,4
e <30	0,56	1,56
e <36	0,58	1,58
e <45	0,63	1,63
e <60	0,83	1,83
e <70	0,9	1,9
e <110	1	2
e <132	1,1	3,1
e <150	1,2	3,2
e <220	1,6	3,6
e <275	1,8	3,8
e <380	2,5	4,5
e <480	3,2	5,2
e <700	5,2	7,2

Fonte: (Guia Trabalhista).

Conforme a NR 6, a empresa é obrigada a fornecer aos trabalhadores, gratuitamente, EPI adequado conforme o risco exposto e em perfeito estado de conservação e funcionamento, sempre que as medidas de ordem geral não ofereçam completa proteção contra riscos de acidente ou doenças, enquanto as medidas estiverem sendo implantadas e para atender situações de emergência. O EPI não elimina o risco em si, sendo apenas uma das barreiras para se evitar ou amenizar a lesão do possível acidente (MTE).

Os EPI devem ter características especiais para que lhe seja aferida sua eficácia certificada pelo Ministério do Trabalho e Emprego, através da emissão do certificado de aprovação, CA, indispensável para sua comercialização e utilização. Uma das características mais importantes na avaliação e escolha da vestimenta de proteção contra efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino é a gramatura que a compõe, para isso eles devem ser *Fire Retardant – FR* (retardante ao fogo) (MTE).

Somado a isso, o *ATPV – Arc Thermal Performance Value* (valor em cal/cm² da proteção oferecida pelo tecido ao efeito térmico proveniente a ocorrência de um arco elétrico) está relacionada às características do tecido que compõe a vestimenta e sua tecnologia fabril. Assim, o ATPV representa o máximo valor de energia incidente sobre o tecido que resulta numa energia no lado protegido de 50% de chance de causar queimaduras do segundo grau (MTE).

O padrão americano NFPA 70E, *Standard for Electrical Safety in the Workplace*, aborda sobre as condições para práticas seguras de trabalho envolvendo eletricidade. Além disso, as normas referentes as características dos EPIs foram relacionadas as normas de fabricação da *American Society for Testing and Material*, ASTM, órgão americano de normalização de vários materiais produtos, sistemas e serviços (MTE). Desse modo, o padrão NFPA 70E descreve sobre os riscos associados ao arco elétrico, definições, distâncias de segurança e especificação de EPI, assim como relaciona as categorias do EPI ao nível de energia incidente mínimo, conforme ilustrado na Tabela 8 (Resende, 2016).

Tabela 8 - Classificação EPI conforme nível de energia incidente

Categoria de Risco	Descrição do vestuário (camadas de roupas entre parênteses)	Nível de proteção da roupa (J/cm²)	Ilustração
0	Fibra natural não tratada, camisa de manga comprida, calça comprida	N/A	
1	Camisa antichamas, calça antichamas ou macacão antichamas (1)	16,74	
2	Roupa interior de algodão + camisa e calça antichamas (1 ou 2)	33,47	
3	Roupa interior de algodão + camisa e calça antichamas + macacão antichamas ou roupa interior + dois macacões antichamas (2 ou 3)	104,6	
4	Roupa interior de algodão + camisa antichamas + calça antichamas + traje de multicamadas contra arco (3 ou mais)	167,36	

Fonte: (NFPA, 2015) (Adaptado).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A instalação analisada foi uma Pequena Central Hidrelétrica, PCH Jucu, localizada no estado de Espírito Santo, no município de Domingos Martins. Ela possui duas unidades geradoras, geradores síncronos, com capacidade de aproximadamente 2,4 MW cada. O principal intuito da análise foi quantificar e avaliar os níveis de energia incidente em seus painéis e verificar as distâncias seguras de aproximação dos mesmos.

Os painéis em que o estudo foi realizado se encontram no barramento de 4,16 kV, destacados em laranja no diagrama unifilar, ANEXO A, e o painéis de 380 V que são alimentados pelo transformador de serviço auxiliar, destacados pelo título “Serviço Auxiliar” no diagrama, contido no mesmo anexo.

Figura 14 - Barragem PCH Jucu

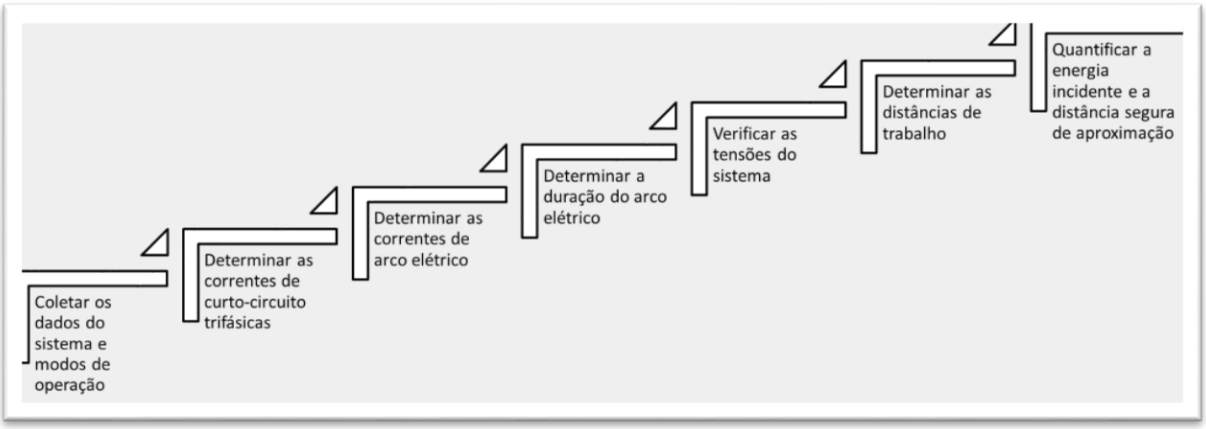
Fonte: EDP Energias do Brasil.

A metodologia escolhida para a realização do estudo e estimativa da energia incidente foi a IEEE 1584, *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, visto que ela possui um guia prático e detalhado para essa análise, além de considerar o arco elétrico tanto enclausurado como em ambientes abertos, e possui também as condições de contorno que atendem as características dos painéis analisados.

Após a escolha da metodologia, foi essencial levantar todos os dados necessários da PCH, sendo eles o diagrama unifilar, as curvas e equações dos disjuntores e relés de proteção, os modos de operação da planta, executar o estudo de curto-circuito para todos esses modos, obter o tipo de aterramento dos sistemas e verificar a distância entre os condutores dos painéis. Com isso, a

sequência de ações, contida na Figura 15 e sugerida pela metodologia, foi executada para se chegar ao nível de energia incidente nos painéis.

Figura 15 – Sequência de ações da metodologia IEEE 1584



Fonte: Própria autora.

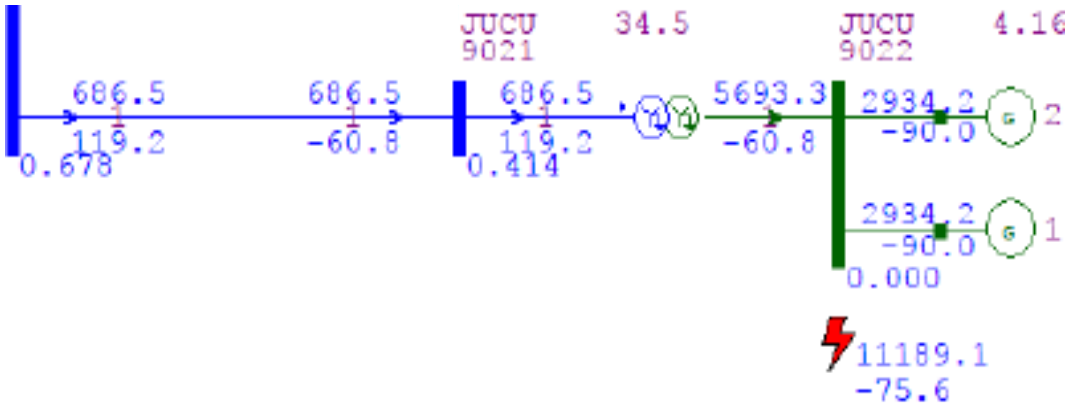
3.1 Estudo das correntes de curto-circuito

Para a realização do cálculo da energia incidente, foi necessário levantar as correntes de curto-circuito trifásico da planta analisada. O software utilizado para a verificação dessas correntes foi o ANAFAS, Análise de Faltas Simultâneas, amplamente utilizado por empresas como a Eletrobras, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério de Minas e Energia (MME), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), assim como as concessionárias de transmissão e distribuição (Cepel). Ele é utilizado juntamente com o programa SAPRE, Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas, o qual possui a interface gráfica, facilitando a análise das faltas. Como referência normativa para a realização dos cálculos de corrente de curto-circuito, o software utiliza os procedimentos de rede do ONS.

Desse modo, foi possível obter os valores das correntes de curto-circuito nos barramentos da PCH, assim como as correntes de contribuição de cada parte do sistema. Foram feitas simulações em dois modos de operação, que são frequentes na instalação, com somente um gerador e com os dois geradores em funcionamento. Devido à baixa fluência do rio, ou por necessidade de manutenção, por vezes há somente um gerador em funcionamento no sistema.

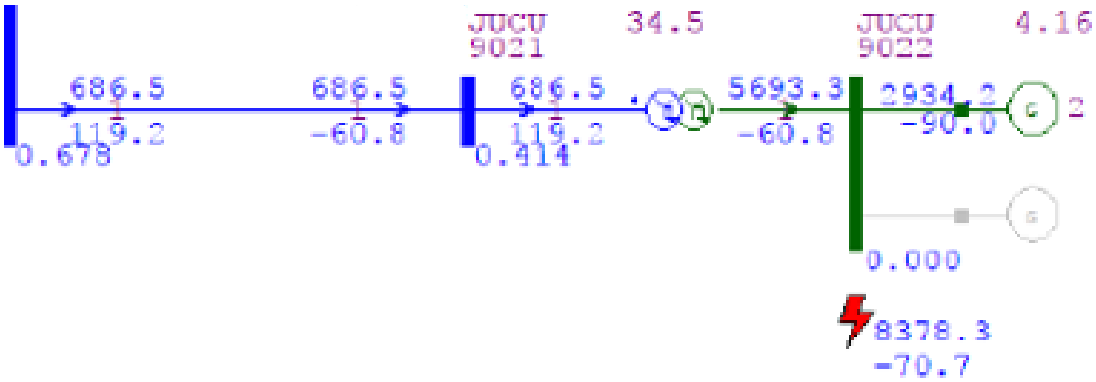
Assim, essas duas análises foram necessárias visto que, a metodologia aplicada recomenda verificar as correntes para todos os modos de operação existentes, para que seja encontrada a situação de maior energia incidente. As Figura 16 e Figura 17 mostram os resultados obtidos na simulação.

Figura 16 - Corrente de curto-circuito trifásico no barramento de 4,16 kV com duas unidades geradoras



Fonte: EDP Energias do Brasil.

Figura 17 - Corrente de curto-circuito trifásico no barramento de 4,16 kV com uma unidade geradora



Fonte: EDP Energias do Brasil.

Logo, em posse das simulações mostradas anteriormente, foi possível obter a corrente de curto-circuito trifásica para os cinco painéis localizados no barramento de 4,16 kV, assim como as correntes de contribuição dos outros barramentos. Essas correntes são de suma importância para o estudo, tendo em vista que existem dois relés de proteção nessa instalação, um de proteção da

unidade geradora, que recebe a leitura do TC que se encontra na barra do gerador, e um de proteção de saída da PCH, que recebe a leitura do TC que se encontra após o transformador elevador; assim elas auxiliaram a encontrar os tempos de atuação desses relés.

Já para os painéis de 380 V, foi necessária a realização de cálculos para considerar o transformador de serviço auxiliar, o qual é responsável por abaixar a tensão de 4,16 kV para 380V. Esses cálculos são apresentados no ANEXO B. Com isso, as correntes utilizadas para a realização do estudo estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Correntes utilizadas e descrição de sua utilização

Corrente [kA]	Utilização
11,1891	Cálculo Corrente de Arco Elétrico - Painéis 4,16 kV - Modo de operação dois geradores
2,9342	Cálculo tempo de atuação relé do gerador
0,6865	Cálculo tempo de atuação relé saída PCH
8,3783	Cálculo Corrente de Arco Elétrico - Painéis 4,16 kV - Modo de operação um gerador
3,524	Cálculo Corrente de Arco Elétrico - Painéis 380 V - Modo de operação dois geradores
3,4906	Cálculo Corrente de Arco Elétrico - Painéis 380 V - Modo de operação um gerador

Fonte: Própria autora.

Para a elaboração dos cálculos de arco elétrico e energia incidente, foi elaborada uma programação no Excel, a partir das fórmulas de arco elétrico, energia incidente normalizada e energia incidente da metodologia utilizada, de modo que otimizasse os cálculos e para se obter uma maior assertividade na quantificação; o formato final desse programa pode ser observado no ANEXO C.

Além disso, ao final foi feito o cálculo da distância segura de aproximação. Essa distância é a mínima necessária de aproximação caso uma pessoa, sem nenhum tipo de EPI deva permanecer próxima à um painel, para sua segurança. A metodologia IEEE 1584 considera essa distância mínima uma distância para a ocorrência de uma queimadura considerada curável, queimadura de segundo grau, sendo assim uma energia incidente igual a 5 J/cm².

3.2 Painéis de 380 V

Com o objetivo de verificar a corrente de arco elétrico para os painéis com nível de tensão de 380 V, foi necessário levantar a corrente de curto-circuito, conforme visto na seção anterior. Além disso, foi necessário realizar o cálculo para o modo de configuração do painel fechado e do painel aberto, para que fosse analisado em qual caso haveria uma energia incidente maior. Por último, foi analisado o espaçamento entre condutores, em que o valor utilizado foi o de referência apresentado na Tabela 4, tendo em vista que esses painéis, Figura 18, se enquadram na classificação “MCC e painéis” da tabela, foi utilizado o valor de 25 mm.

Figura 18 – Registro fotográfico painel Serviços Auxiliares 380 V

Para determinar a duração do arco elétrico, foi verificado que o sistema de proteção utilizado para esses painéis é através do disjuntor termomagnético SACE Isomax S2B da ABB, com corrente térmica I_{th} = 160 A para 40ºC e com corrente magnética I_m = 10 x I_{th}, cuja curva correspondente pode ser encontrada no Gráfico 1. Então, foram feitas oito análises, conforme descrito na Tabela 10. A verificação para os dois tipos de configurações dos painéis, tanto abertos como fechados, foi necessária para se obter o conhecimento do nível da energia incidente e consequentemente a necessidade de proteção dos trabalhadores para atividades em que seja necessário abrir os painéis ou atividades próximas a eles.

Tabela 10 - Classificação das análises

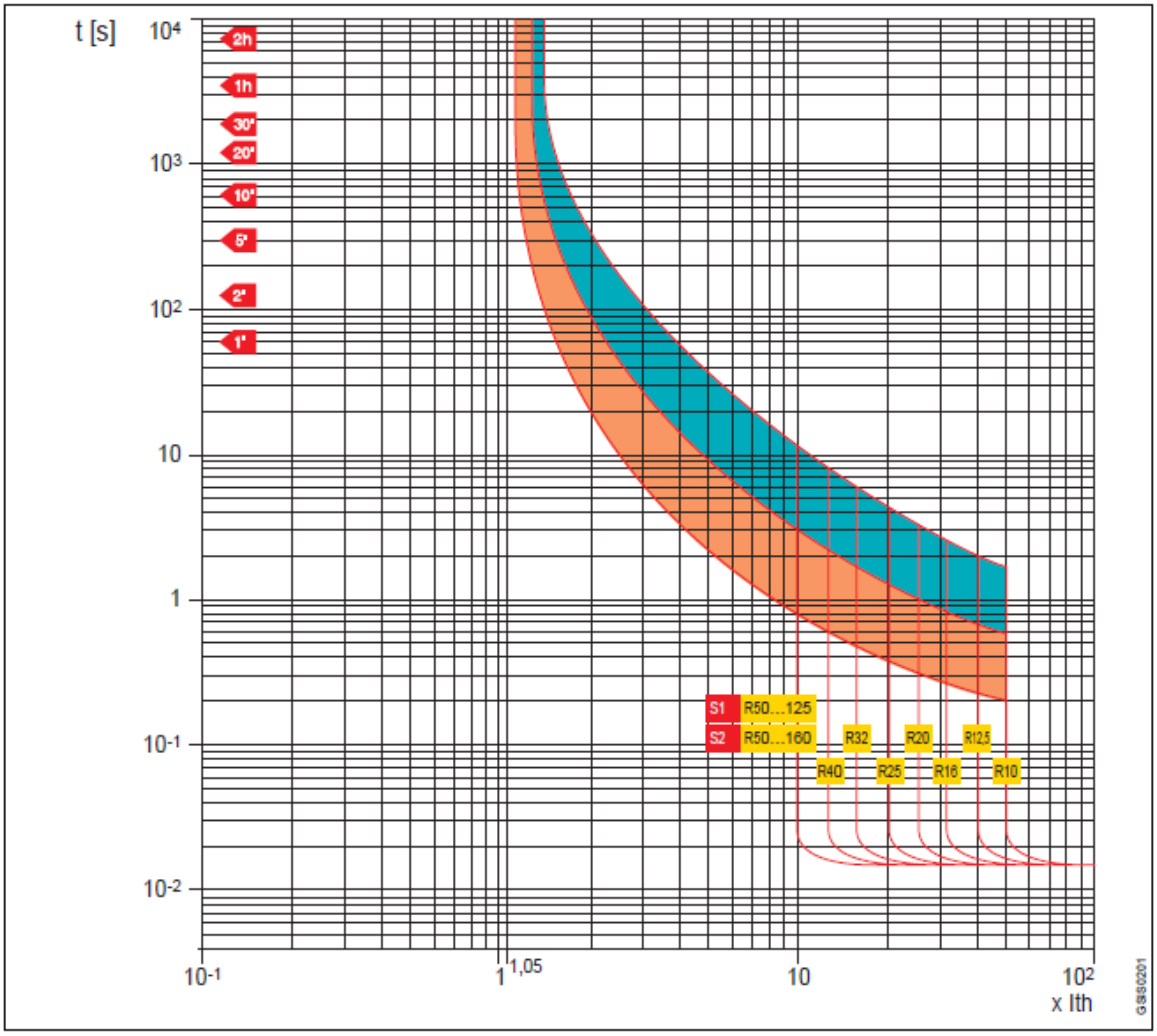
Porcentagem da corrente de arco elétrico	Modo de operação	Configuração
100%	Um gerador	Aberto
100%	Um gerador	Fechado
85%	Um gerador	Aberto
85%	Um gerador	Fechado
100%	Dois geradores	Aberto
100%	Dois geradores	Fechado
85%	Dois geradores	Aberto
85%	Dois geradores	Fechado

Fonte: Própria autora.

A análise da porcentagem de 85% da corrente de arco elétrico é recomendada, já que o tempo de duração do arco elétrico para uma corrente menor que a corrente de curto-circuito trifásico é maior e como a energia incidente é maior quanto maior o tempo e a corrente, a metodologia recomenda quantificar os dois casos para considerar o pior cenário.

A análise dos tempos de atuação, foram possíveis através do gráfico do disjuntor, verificando a fração que as correntes de arco elétrico possuem da I_{th} e graficamente verificando qual tempo corresponde a esse ponto da curva. Desse modo, todas as correntes analisadas se encontram na atuação instantânea da curva, ou seja, acima de 10xI_{th} e os tempos variaram em torno de 0,14 s e 0,2 s.

Gráfico 1 - Curva disjuntor Painel 380 V



Fonte: (ABB).

Após isso, para a verificação da distância de trabalho, foi utilizada a Tabela 5, recomendada pela metodologia. Desse modo, com todos os parâmetros necessários, foi possível realizar o cálculo da energia incidente para os oito casos apresentados na Tabela 10.

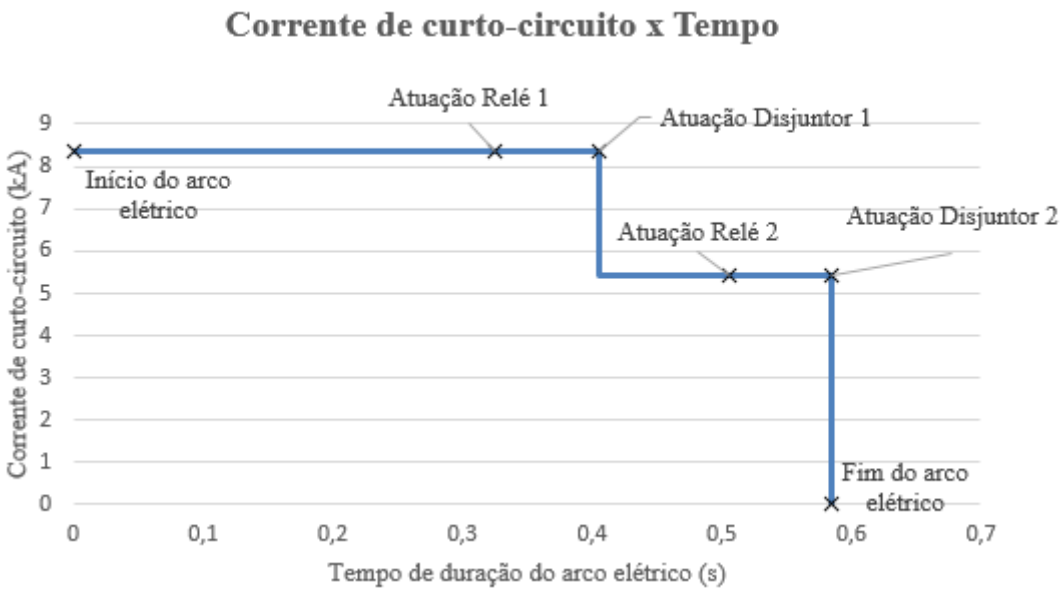
3.3 Painéis de 4,16 kV

As considerações e cálculos feitos para os painéis de 4,16 kV, Figura 19, foram similares aos feitos para os painéis de 380 V. No entanto, para a verificação da duração do arco elétrico, foi analisado que a proteção desses painéis é feita por dois relés, o de proteção do gerador síncrono e o de saída da PCH, de modo que o arco elétrico não irá ter qualquer contribuição do sistema quando os dois dispositivos atuarem, assim como seus respectivos disjuntores.

Figura 19 – Registro fotográfico painéis de proteção 4,16 kV

Foi observado que o tempo de atuação do relé do gerador somado ao tempo do seu disjuntor é menor que o tempo de atuação do relé de saída da usina, desse modo, a corrente de arco elétrico após a atuação desses dispositivos é somente de contribuição do barramento de 34,5 kV para o de 4,16 kV, até que o disjuntor de saída da usina atue. Esse modo de operação pode ser observado no Gráfico 2 em que foi simulada a corrente de curto-circuito para o caso de somente um gerador funcionando no sistema. Assim, para esse cálculo de energia incidente, foi levado em consideração essas diferentes correntes e tempos, assim como as porcentagens também consideradas para os painéis de 380 V.

Gráfico 2 - Corrente de curto-circuito x Tempo de duração do arco elétrico



Fonte: Própria autora.

A instalação possui dois principais dispositivos de proteção, a proteção do gerador síncrono e sua área correspondente, e a proteção de saída e sua área correspondente. O relé responsável pela proteção do gerador síncrono é o 489 da GE e o de saída da PCH, responsável pela proteção do transformador de saída da Pequena Central e da barra de saída é o 750 da GE. A partir da consulta dos seus respectivos manuais foi possível obter a equação característica moderadamente inversa desses relés e foi verificado que eles possuem a mesma, conforme Figura 20, com M = 1,6 e I_{pickup} = 125 A. Essas informações foram obtidas consultando o software dos relés. De porte dessa equação foi possível fazer o levantamento da curva característica dos relés através do software MATLAB, Gráfico 3. Além disso, o tempo de atuação dos disjuntores utilizado foi com base na Tabela 3, recomendada pela metodologia.

Figura 20 - Equação característica relé 489 e 750 GE

$$T = M \times \left(A + \frac{B}{(I/I_{pickup}) - C} + \frac{D}{((I/I_{pickup}) - C)^2} + \frac{E}{((I/I_{pickup}) - C)^3} \right) \quad \textbf{(EQ 5.4)}$$

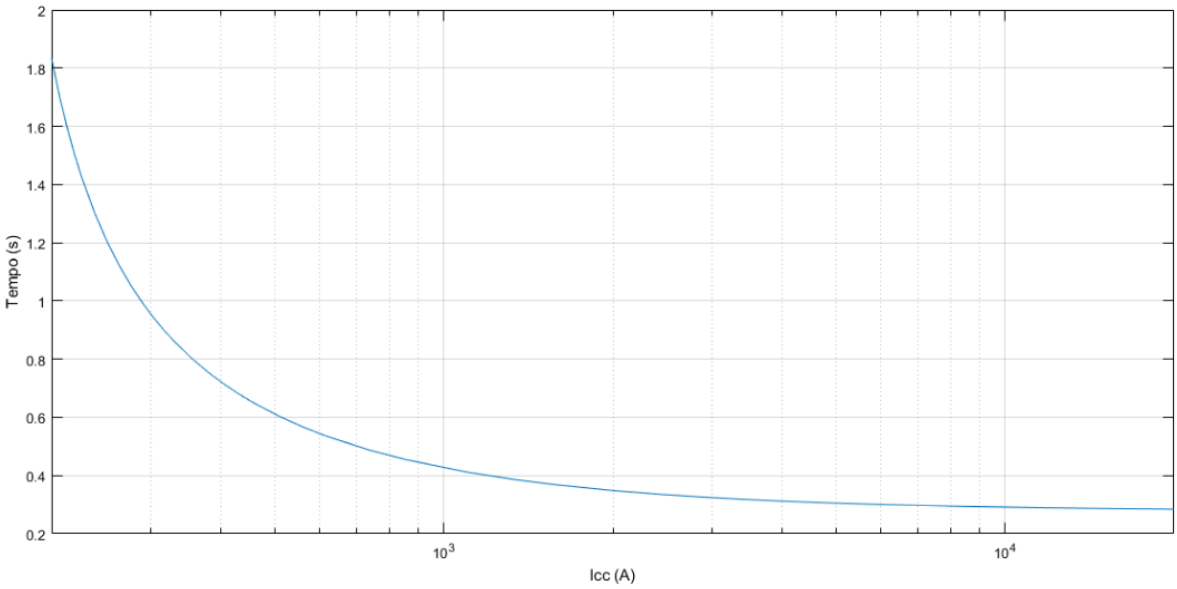
where: T = Trip Time in seconds
M = Multiplier setpoint
I = Input Current
I_{pickup} = Pickup Current setpoint
A, B, C, D, E = Constants

Table 5–2: ANSI Inverse Time Curve Constants

ANSI Curve Shape	Constants				
	A	B	C	D	E
Extremely Inverse	0.0399	0.2294	0.5000	3.0094	0.7222
Very Inverse	0.0615	0.7989	0.3400	−0.2840	4.0505
Normally Inverse	0.0274	2.2614	0.3000	−4.1899	9.1272
Moderately Inverse	0.1735	0.6791	0.8000	−0.0800	0.1271

Fonte: (GE Industrial Systems, 2004).

Gráfico 3 - Curva característica relé 489 e 750 GE



Fonte: Própria autora.

4 RESULTADOS

4.1 Painel de 380 V

A partir dos dados obtidos descritos na seção anterior e da Tabela 6 recomendada pela metodologia, foi feito um levantamento das características dos painéis de 380 V, responsáveis pelo serviço auxiliar da instalação, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Características Painel 380 V

Dados Painel 380 V	
Corrente de curto-circuito franca trifásica [kA - Duas máquinas]	3,5243
Corrente de curto-circuito franca trifásica [kA - Uma máquina]	3,4906
Tensão do sistema [kV]	0,38
Gap entre condutores [mm]	25
Informação aterramento	Aterrado
Distância de trabalho típica [mm]	455
Expoente x	1,641

Fonte: Própria autora.

4.1.1 Configuração aberta

Tendo em vista a necessidade de execução de atividades com o painel aberto, foram executados cálculos para verificar o nível de energia incidente para esse caso. Na Tabela 12 pode-se verificar o nível de energia incidente tanto para uma corrente 100% de curto-circuito trifásico quanto para 85% do curto-circuito trifásico.

Tabela 12 - Energia Incidente painel 380 V configuração aberta

Modo de operação	Corrente de curto-circuito[kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Um gerador	3,491	100%	2,139	0,15	2,287	1
Um gerador	3,491	85%	1,818	0,20	2,557	1
Dois geradores	3,524	100%	2,156	0,15	2,304	1
Dois geradores	3,524	85%	1,832	0,20	2,552	1

Fonte: Própria autora.

Com isso, observa-se que para a execução de uma manutenção com o painel de 380 V aberto, a categoria de risco necessária do EPI seria nível 1, conforme Tabela 8.

4.1.2 Configuração fechada

Considerando que o painel permanece a maior parte do tempo fechado, somente é aberto quando há alguma necessidade de manutenção no mesmo, é necessário considerar esse modo também para melhor análise das características da energia incidente nesse sistema.

Tabela 13 - Energia Incidente Painel 380 V configuração fechada

Modo de operação	Corrente de curto-circuito[kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Um gerador	3,491	100%	2,434	0,15	4,497	1
Um gerador	3,491	85%	2,069	0,16	4,129	1
Dois geradores	3,524	100%	2,453	0,15	4,504	1
Dois geradores	3,524	85%	2,085	0,15	3,855	1

Fonte: Própria autora.

Assim como o modo de configuração aberto, o painel fechado possui uma categoria de risco 1. Entretanto, percebe-se que a energia incidente para essa configuração obteve aproximadamente o dobro da energia incidente.

Considerando o pior cenário para o painel de 380 V, que seria com os dois geradores em funcionamento e a configuração fechada, verifica-se que a distância segura de aproximação do painel é de 43 cm dos condutores do painel aproximadamente, conforme Equação 8.

4.2 Painéis de 4,16 kV

No barramento de 4,16 kV encontram-se cinco painéis, um contendo o transformador que alimenta o serviço auxiliar, dois contendo chaves seccionadoras e dois contendo os disjuntores de cada uma das unidades geradoras. As características desses painéis podem ser vistas na Tabela 14. Essas informações foram obtidas pelas simulações e através da tabela de referência do modelo, Tabela 6.

Tabela 14 - Dados Painéis de 4,16 kV

Dados Painéis 4,16 kV	
Corrente de curto-circuito franca trifásica [kA - Duas máquinas]	11,1891
Corrente de curto-circuito franca trifásica [kA - Uma máquina]	8,3783
Tensão do sistema [kV]	4,16
Gap entre condutores [mm]	50
Informação aterramento	Aterrado
Distância de trabalho típica [mm]	910
Expoente x	0,973

Fonte: Própria autora.

Assim como os painéis de 380 V foram executados cálculos para observação da energia incidente tanto para o caso dos painéis abertos quanto para configuração fechada.

4.2.1 Configuração aberta

Para facilitar a análise, os resultados dos painéis de 4,16 kV, foram divididos em duas tabelas, uma para 100% da corrente de curto-circuito e outra para 85% dessa corrente. Dentro da tabela, a energia incidente foi dividida em duas análises, correspondentes aos instantes t1 e t2. O primeiro instante, t1, é para o cálculo da energia incidente correspondente até a atuação do relé e do disjuntor do gerador e o segundo instante, t2, para o cálculo da energia incidente desde o instante t1, até a atuação do relé e do disjuntor de saída da usina. Foi necessário efetuar essas duas análises, pois a corrente de curto-circuito diminui seu valor quando há a atuação das proteções da unidade geradora.

A Tabela 15 possui a análise para o modo de operação de um gerador e corrente de curto-circuito de 100%, já a Tabela 16 possui a análise para 85% da corrente de curto-circuito. Em ambos casos, o nível de proteção do EPI é 1 conforme NFPA 70E.

Tabela 15 – Configuração aberta painéis 4,16 kV com um gerador e 100% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Um gerador	t1	8,378	100%	7,412	0,41	7,075	1
Um gerador	t2	5,441	100%	4,947	0,18	2,039	1

Fonte: Própria autora.

Tabela 16 – Configuração aberta painéis de 4,16 kV com um gerador e 85% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Um gerador	t1	8,378	85%	6,300	0,41	6,063	1
Um gerador	t2	5,441	85%	4,205	0,22	2,074	1

Fonte: Própria autora.

O modo de operação com os dois geradores, conforme Tabela 17 e Tabela 18 apresenta um nível de energia incidente maior do que o modo de um gerador, entretanto a classificação de risco do EPI ainda se enquadra no nível 1.

Tabela 17 – Configuração aberta painéis 4,16 kV com dois geradores e 100% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Dois geradores	t1	11,189	100%	9,723	0,41	9,487	1
Dois geradores	t2	5,321	100%	4,841	0,18	1,983	1

Fonte: Própria autora.

Tabela 18 – Configuração aberta painéis de 4,16 kV com dois geradores e 85% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Dois geradores	t1	11,189	85%	8,264	0,41	8,129	1
Dois geradores	t2	5,321	85%	4,115	0,22	2,028	1

Fonte: Própria autora.

4.2.2 Configuração fechada

Assim como os painéis de 380 V, os painéis de 4,16 kV também apresentaram um nível de energia incidente maior para a configuração fechada. Além disso, o modo de configuração para um gerador também apresentou categoria de risco 1 para o EPI, conforme Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 19 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com um gerador e 100% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Um gerador	t1	8,378	100%	7,412	0,41	12,210	1
Um gerador	t2	5,441	100%	4,947	0,18	3,501	1

Fonte: Própria autora.

Tabela 20 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com um gerador e 85% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Um gerador	t1	8,378	85%	6,300	0,41	10,463	1
Um gerador	t2	5,441	85%	4,205	0,22	3,580	1

Fonte: Própria autora.

A configuração fechada, com dois geradores, Tabela 21 e Tabela 22, apresentou o maior nível de energia incidente dentre as análises. Apesar disso, a categoria do EPI permaneceu com nível 1, conforme as outras análises, visto que conforme a Tabela 8, o nível 1 varia de 0 a 16,74 J/cm².

Tabela 21 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com dois geradores e 100% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Dois geradores	t1	11,189	100%	9,723	0,41	16,373	1
Dois geradores	t2	5,321	100%	4,841	0,18	3,423	1

Fonte: Própria autora.

Tabela 22 - Configuração fechada painéis 4,16 kV com dois geradores e 85% da corrente de arco elétrico

Modo de operação	Instante	Corrente de curto-circuito [kA]	Porcentagem da corrente de arco elétrico	Corrente de arco elétrico [kA]	Duração do arco elétrico [s]	Energia Incidente [J/cm²]	Categoria de Risco
Dois geradores	t1	11,189	85%	8,264	0,41	14,030	1
Dois geradores	t2	5,321	85%	4,115	0,22	3,500	1

Fonte: Própria autora.

Considerando o mais alto nível de energia incidente, configuração fechada, dois geradores em funcionamento e 100% da corrente de arco elétrico, foi feita a estimativa da distância segura de aproximação desses painéis, assim como foi feito para os de 380V. Portanto, tendo em vista o valor de 16,373 J/cm² a distância segura de aproximação dos painéis de 4,16 kV é de 3,1 m.

5 CONCLUSÃO

Como previsto pela metodologia, a etapa que demandou mais dificuldade e tempo para a realização do estudo foi a coleta de dados e informações da instalação, tendo em vista a necessidade de consulta de manuais dos dispositivos de proteção, executar o estudo de curto-circuito nos barramentos, além do estudo de seletividade e proteção dos sistemas para os cálculos dos tempos de atuação.

Além disso, como também verificado pela metodologia adotada, os níveis de energia incidente com a configuração de painel fechado para todos os cálculos executados foram maiores do que com a configuração de painel aberto, podendo chegar a quase o dobro da energia incidente para o primeiro caso. O modo de operação com dois geradores no sistema apresentou maior energia incidente, o que é justificável pois, a corrente de curto-circuito é maior nesse caso e a energia incidente é significativamente maior quanto maior for essa corrente.

Portanto, tendo em vista a importância da segurança dos trabalhadores e como as empresas estão incorporando esse pensamento no seu planejamento e cultura corporativa, a partir dos resultados percebe-se que para a execução de atividades na instalação analisada de maneira segura e preventiva, é necessário utilizar a categoria mínima de risco 1 pela NFPA 70E. Deve-se também observar que a distância mínima dos painéis para pessoas sem o EPI é de 3,1 m para os painéis de 4,16 kV e 43 cm para os painéis de 380 V.

6 BIBLIOGRAFIA

ABB. SACE Isomax S Technical catalogue. ***Low-voltage moulded-case circuit-breakers.***

BLACKBURN, J. L. ***Protective Relaying Principles and Applications.*** 2 edition. 1997.

BROWN, B.; Square D'Engineering Services**. *Section 12: Arc Flash Hazard Considerations.***

CEPEL. **ANAFAS-Análise de Faltas Simultâneas**. *Eletrobras Cepel.* Eletrobras . Disponível em: <http://www.cepel.br/produtos/anafas-analise-de-faltas-simultaneas.htm.> Acesso em: 29 de outubro de 2018.

CHET, D. et al. 2003**. *Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards***. s.l. : ESA, Inc, 2003.

DIAS, G.; DENTZIEN A.; LEAL, C. ***Riscos do Arco Elétrico.***

DIPOLO ELÉTRICO. ***Dipolo Elétrico***.Disponível em <http://dipoloeletrico.blogspot.com/2011/07/reducao-do-risco-de-arco-eletrico.html>. Acesso em: 19 de novembro de 2018.

DIRECT INDUSTRY. **RELÉ DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE / DE FUGA À TERRA / DE SUBTENSÃO / DE SOBRETENSÃO**. *Direct Industry.* Disponível em: <http://www.directindustry.com/pt/prod/siemens-energy-management/product-30064-216879.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA>. Acesso em: 06 de novembro de 2018.

DOUGHTY, R. L.; NEAL, T.; FLOYD, H. ***PREDICTING INCIDENT ENERGY TO BETTER MANAGE THE ELECTRIC ARC HAZARD ON 600 V POWER DISTRIBUTION SYSTEMS.*** s.l. : Paper No. PCIC-98-36 IEEE, 1998.

FUNCOGE. **Curso básico sobre segurança em instalações elétricas temporárias em canteiros de obras.** ***Ministério do Trabalho FUNDACENTRO***. Ministério do Trabalho FUNDACENTRO, 2013. Disponível em: <http://www.fundacentro.gov.br/Arquivos/sis/EventoPortal/AnexoPalestraEvento/APRESENTA%C3%87%C3%83O%20CMATIC%20-%20CURSO%20I.pdf>. Acesso em: 04 de novembro de 2018.

GE INDUSTRIAL SYSTEMS. **489 Generator Management Relay Instruction Manual.** 2004.

GUIA TRABALHISTA. ***Guia Trabalhista NR 10.*** Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr10_anexoI.htm.>. Acesso em: 10 de outubro de 2018.

IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY. ***IEEE 1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations***. 2002.

INSTRUMENTI. ***Transformador de Potencial 24,2kV - Uso Externo TPAE-25***. 2012.

KINDERMANN, G. ***Curto Circuito 2 edição.*** 1997.

LEE, R. ***The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns.*** 1982.

MAMEDE FILHO, J.***INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS***. Rio de Janeiro : LTC, 2017.

MTE***. MANUAL DE ORIENTAÇÃO PARA ESPECIFICAÇÃO DAS VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO CONTRA OS EFEITOS TÉRMICOS DO ARCO ELÉTRICO E FOGO REPENTINO.*** Disponível em: <http://www.segurancanotrabalho.eng.br/manuais_tecnicos/manual_vestimentas.pdf>. Acesso em: 06 de novembro de 2018.

NEAL, T.; BINGHAM, A.; DOUGHTY, R. ***Protective clothing guidelines for electric arc exposure***. 1996.

NFPA. ***NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace.*** 2015.

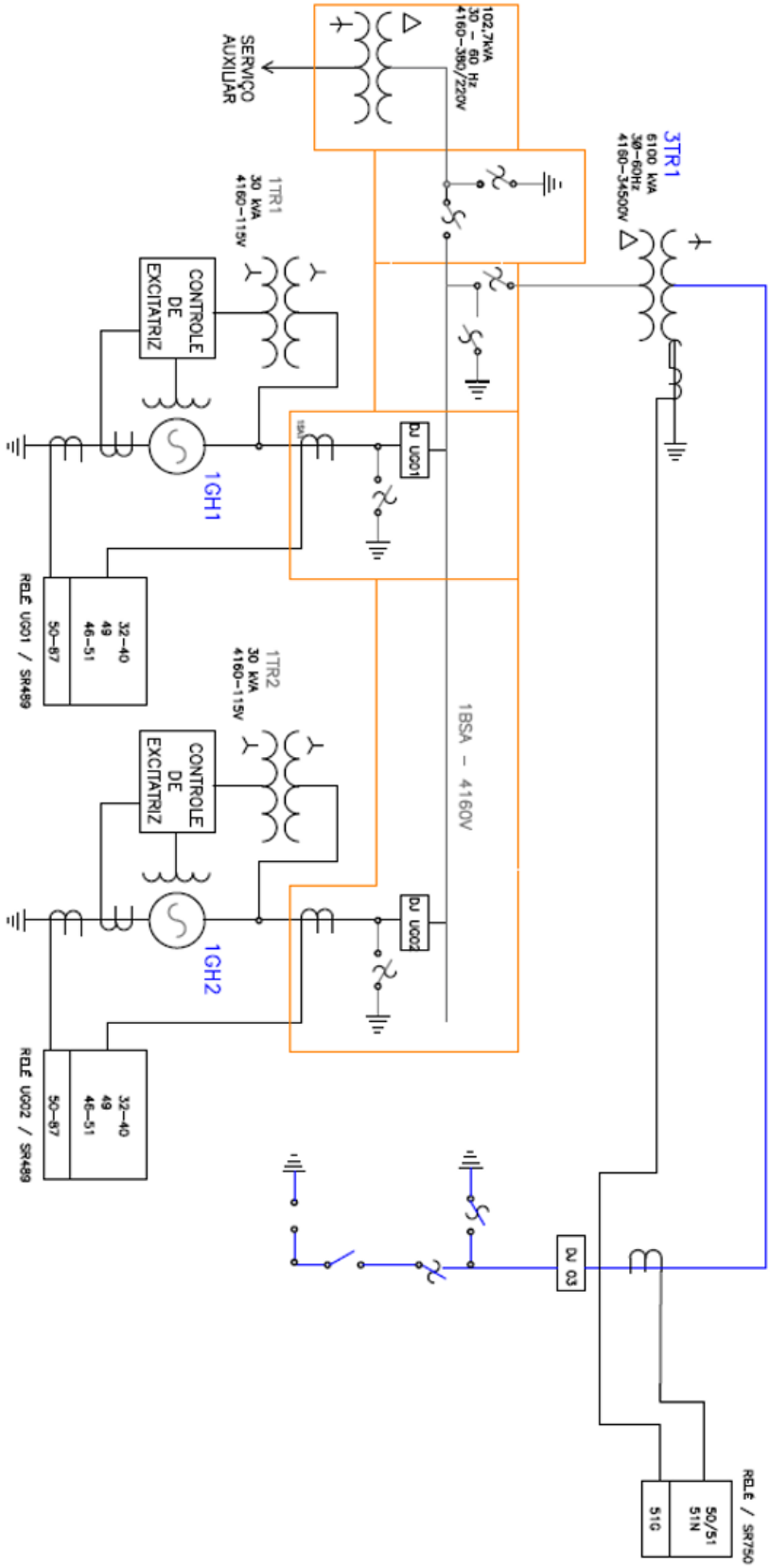
RESENDE, F. ***Proteção elétrica em subestações: Uma abordagem sobre energia incidente.*** Belo Horizonte : s.n., 2016.

SCHAU, H. et al. ***Guideline for selection of personal protective equipment when exposed to the thermal effects of an electric fault arc.*** s.l. : International Social Security Association, 2011.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Disjuntores Abertos Schneider.** ***Disjuntores Masterpact NW.*** **Schneider Electric**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/1007-disjuntores-masterpact-nw/?parent-category-id=4200&parent-subcategory-id=4220>. Acesso em: 11 de novembro de 2018.

SILVEIRA, C. B. **Transformador de Corrente: Veja Quais os Tipos.** *Citisystem.* Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/transformador-de-corrente/>. Acesso em: 11 de novembro de 2018.

ANEXO A


3TR1
6100 kVA
3Ø-60Hz
4160-34500V
102,7kVA
3Ø - 60 Hz
4160-380/220V
SERVIÇO
AUXILIAR
1TR1
30 kVA
4160-115V
CONTROLE
DE
EXCITATRIZ
1GH1
DJ UG01
1BSA - 4160V
RELÉ UG01 / SR489
32-40
49
46-51
50-87
1TR2
30 kVA
4160-115V
CONTROLE
DE
EXCITATRIZ
1GH2
DJ UG02
RELÉ UG02 / SR489
32-40
49
46-51
50-87
DJ 03
RELÉ / SR750
50/51
51N
51G

ANEXO B

Cálculo da corrente de curto-circuito trifásica no painel de 380 V com o modo de operação de duas unidades geradoras.

Dados:

- Icc duas máquinas (barra de 4,16kV) = 11,1891 kA.
- Strafo = 102,7 kVA, 4160/380V.

Base utilizada (gerador):

- Vbase = 4,16 kV, Sbase = 2625 kVA, Zbase = 6,593Ω, Ibase = 3988,23 A (lado de baixa do transformador), Ibase = 364,31 A (lado de alta do transformador).

1) Transformação da corrente de curto circuito trifásico para pu:

$$Icc\ (pu) = \frac{11189{,}1}{364{,}31} = 30{,}71312893\ pu$$

2) Cálculo da impedância equivalente do sistema:

$$Z = \frac{1}{30{,}71312893} = 0{,}032559365\ pu$$

3) Cálculo da impedância do transformador, o valor abaixo foi retirado da placa do transformador.

Z (%)= 4,3.

$$Z = 0{,}043 * \frac{2625}{102{,}7}\left(\frac{4160^2}{4160^2}\right) = 1{,}099074976\ pu$$

4) Cálculo da impedância total:

$$Z = Ztrafo + \ Zsistema = 1{,}099074976 + 0{,}032559365 = 1{,}131634341\ pu$$

5) Cálculo da corrente de curto:

$$I = \frac{1}{1{,}131634341} = 0{,}883677672\ pu * 3988{,}23 = 3{,}524309803\ kA$$

Cálculo da corrente de curto-circuito trifásica no painel de 380 V com o modo de operação com uma unidade geradora.

Dados:

- Icc uma máquina (barra de 4,16kV) = 8,3783 kA.
- Strafo = 102,7 kVA, 4160/380V.

Base utilizada (gerador):

- Vbase = 4,16 kV, Sbase = 2625 kVA, Zbase = 6,593Ω, Ibase = 3988,23 A (lado de baixa do Trafo), Ibase = 364,31 A (lado de alta do Trafo).

1) Transformação da corrente de curto circuito trifásico para pu:

$$Icc\ (pu) = \frac{8378,3}{364,31} = 22,99772172\ pu$$

2) Cálculo da impedância equivalente do sistema:

$$Z = \frac{1}{22,99772172} = 0,043482568\ pu$$

3) Cálculo da impedância do transformador, o valor abaixo foi retirado da placa do transformador.

Z (%)= 4,3.

$$Z = 0,043 * \frac{2625}{102,7}\left(\frac{4160^2}{4160^2}\right) = 1,099074976\ pu$$

4) Cálculo da impedância total:

$$Z = Ztrafo + \ Zsistema = 1,099074976 + 0,043482568 = 1,142557544\ pu$$

5) Cálculo da corrente de curto:

$$I = \frac{1}{1,142557544} = 0,87522944\ pu * 3988,23 = 3,490616311\ kA$$

ANEXO C

Entrada de dados do Sistema

Tensão Nominal [kV]	Corrente de Curto-Circuito	Gap entre condutores [mm]
4,16	5,3207	50

Tipo de configuração	Tipo de aterramento	Duração do arco elétrico [s]
Fechado	Aterrado	0,18

Tipo de sistema	Distância do arco elétrico [mm]	
Equipamentos de manobra ou Disjuntores	910	Cálculo

RESULTADOS

Corrente de Arco Elétrico [kA]	Energia Incidente [J/cm²]
4,84	3,42