ALAN RÔMULO SILVA QUEIROZ

**UTILIZAÇÃO DE RELÉS DIGITAIS PARA MITIGAÇÃO DOS
RISCOS ENVOLVENDO ARCO ELÉTRICO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

São Paulo

2011

ALAN RÔMULO SILVA QUEIROZ

**UTILIZAÇÃO DE RELÉS DIGITAIS PARA MITIGAÇÃO DOS RISCOS
ENVOLVENDO ARCO ELÉTRICO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo César Senger

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Queiroz, Alan Romulo Silva

**Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico / A.R.S. Queiroz. -- São Paulo, 2011.
130 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Relés 2.Sistemas elétricos 3.Segurança no trabalho 4.Proteção de sistemas elétricos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Silvania Abreu, e minha esposa, Luciene Queiroz, pelo carinho, compreensão e constante apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo simples dom da vida.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por me proporcionar uma evolução profissional e acadêmica.

Ao professor e orientador Dr. Eduardo César Senger, pela orientação e apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores da Escola Politécnica responsáveis pelas disciplinas cursadas na pós-graduação.

Aos amigos José Alfredo Pinheiro Gomes, Maurício Figueiredo de Oliveira e Waldomiro Vinhas Passos por terem acreditado e incentivado essa pesquisa.

Ao engenheiro Ralph Lee, *Life-Fellow* do IEEE, pelo pioneirismo e desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos riscos envolvendo arcos elétricos.

A todos os colegas, professores e amigos que colaboraram para realização deste trabalho.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo avaliar e propor a utilização de soluções tecnológicas que permitam a redução dos riscos causados por arcos elétricos nas instalações de uma unidade industrial com sistema isolado de geração elétrica.

Por ser extremamente danosa à segurança das pessoas que interagem com uma instalação elétrica e por causar danos significativos aos equipamentos e instalações, a energia incidente, proveniente de um arco elétrico, deve ser mensurada em conformidade com as normas existentes e os riscos devem ser controlados e mitigados, de maneira a não comprometer a integridade física das pessoas e das instalações.

Dessa forma, o presente trabalho propõe alterações no sistema de proteção e a inserção de dispositivos dedicados à identificação de arcos elétricos no interior de painéis da unidade em questão, contribuindo significativamente para a redução da energia incidente liberada na ocorrência de um arco elétrico. Essa redução da energia incidente é conseguida devido à redução do tempo para eliminação da falta, necessitando, dessa forma, de dispositivos e relés de proteção voltados exclusivamente para a proteção contra arco elétrico.

Palavras-chave: arco elétrico, energia incidente, relé de proteção, segurança no trabalho.

ABSTRACT

This dissertation aims to evaluate and propose the use of technological solutions that enable the reduction of risks caused by arc flash on the premises of an industrial unit with insulated system of electricity generation.

It may be extremely damaging to the safety of people who interact with electrical installations and could cause significant damage to the equipment and facilities, the incident energy from an arc flash should be measured in accordance with existing standards, their risks must be controlled and attenuated, in order not to compromise the physical integrity of people and facilities.

That way, this paper proposes changes into the system of protection and the insertion of devices dedicated to the identification of arc flashes inside panels of the unit concerned, contributing significantly to the reduction of incident energy released in the event of an arc flash. This reduction is obtained by lowering the time for the elimination of absence, requiring, therefore, devices and protective relays devoted exclusively to protect against electric arc.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – A natureza direcional de um arco elétrico sem o comportamento caótico (adaptado de [4])	17
Figura 2 – Relação tempo-temperatura, tolerância do tecido humano (adaptado de [5])	21
Figura 3 – Número de acidentados com arco elétrico por nível de tensão (extraído de [24])	27
Figura 4 – Trabalhador paramentado com EPIs para proteção contra arco elétrico (extraído de [31])	32
Figura 5 – Característica da pressão, temperatura, massa de ar e volume de ar e gases durante um arco interno (adaptado de [35]).....	36
Figura 6 – Exemplo do sistema de ventilação e distribuição dos compartimentos de um painel resistente a arco interno (adaptado de [39])	37
Figura 7 – Exemplo de distribuição dos compartimentos de um painel resistente a arco interno (extraído de [40])	39
Figura 8 – Sensor pontual e sensor de fibra ótica (extraído de [51]).....	42
Figura 9 – Ângulo de detecção do sensor pontual (extraído de [49])	43
Figura 10 – Detecção de arco via sensor de fibra ótica nos compartimentos de barras, gavetas e nos disjuntores (extraído de [53]).....	44
Figura 11 – Sensor para arco do tipo lapela (extraído de [55])	45
Figura 12 – Arquitetura de proteção com unidade de arco (adaptado de [57])	47
Figura 13 – Unidade de detecção de arco comercial (extraído de [53])	48
Figura 14 – Diagrama de blocos do relé de detecção de arco com restrição de corrente (adaptado de [56])	49
Figura 15 – Arquitetura de proteção com sistema dedicado (adaptado de [57])	50
Figura 16 – Conexão de um sensor pontual de luz em um relé numérico de proteção comercial (extraído de [59])	51
Figura 17 – Bloco lógico da função de sobrecorrente de arco (adaptado de [59])	52
Figura 18 – Diagrama lógico de trip para detecção de arco elétrico (adaptado de [59])	53
Figura 19 – Oscilografia de uma falta fase-terra com detecção de corrente e luminosidade (adaptado de [60])	53

Figura 20 – Comportamento da luz e do som na ocorrência de um arco elétrico (adaptado de [49])	54
Figura 21 – Esquema de proteção contra arco utilizando relés numéricos (adaptado de [57])	55
Figura 22 – Chave para seleção de grupo de ajuste para manutenção (adaptado de [61])	56
Figura 23 – Passos para determinação da vestimenta de proteção de acordo com a NFPA-70E (extraído de [62])	61
Figura 24 – Passos para determinação da vestimenta de proteção de acordo com a IEEE 1584 (adaptado de [62])	62
Figura 25 – Esquema de proteção do gerador de emergência	76
Figura 26 – Diagrama unifilar do sistema de aterramento do gerador de emergência	78
Figura 27 – Operação com os geradores principais em paralelo	80
Figura 28 – Operação com um gerador principal em funcionamento.....	81
Figura 29 – Operação com o gerador de emergência em funcionamento	82
Figura 30 – Comparativo entre energias incidentes com e sem o sistema de proteção contra arco elétrico, considerando 100% da corrente do arco	95
Figura 31 – Comparativo entre energias incidentes com e sem o sistema de proteção contra arco elétrico, considerando 85% da corrente do arco	96
Figura 32 – Comparativo entre energias incidentes com e sem o sistema de proteção contra arco elétrico, considerando 38% da corrente de curto-circuito	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limitação dos métodos de cálculo (adaptado de [20])	25
Tabela 2: Características das roupas de proteção contra arco elétrico (adaptado de [20])	30
Tabela 3: Tipos de proteção contra arco elétrico e suas consequências (extraído de [1])	41
Tabela 4: Sistemas de baixa tensão – Limites máximos da corrente de curto-circuito para vários níveis de tensão e tempo de abertura de disjuntores, para uso recomendado de EPIs categoria de risco 2 e 4 e arco elétrico em ambiente fechado (adaptado de [20]).....	60
Tabela 5: Tempo de abertura para disjuntores de potência (adaptado de [21])......	67
Tabela 6: Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos (adaptado de [21]).	67
Tabela 7: Tipo de equipamento e distância de trabalho típica (adaptado de [21]). ..	68
Tabela 8: Fatores para equipamentos e classes de tensão (adaptado de [21])......	71
Tabela 9: Tempo de duração do arco	84
Tabela 10: Resumo dos valores de energia incidente com 100% da corrente do arco	86
Tabela 11: Resumo dos valores de energia incidente com 85% da corrente do arco	88
Tabela 12: Resumo dos valores de energia incidente com 38% da corrente de curto-circuito	89
Tabela 13: Resumo dos valores de energia incidente com sistema de proteção contra arco e com 100% da corrente do arco.....	94
Tabela 14: Resumo dos valores de energia incidente com sistema de proteção contra arco e com 85% da corrente do arco.....	95
Tabela 15: Resumo dos valores de energia incidente com sistema de proteção contra arco e com 38% da corrente de curto-circuito	97

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATPV	Arc Thermal Protection Value
ATS	Automatic Transfer Switch
CCM	Centro de Controle de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique
CLP	Controlador Lógico Programável
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHM	Interface Homem Máquina
NBR	Norma Brasileira
NEC	National Electrical Code
NESC	National Electrical Safety Code
NFPA	National Fire Protection Association
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	Occupational Safety and Health Administration's
PTW	Power Tools for Windows
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	O ARCO ELÉTRICO E FORMAS DE PROTEÇÃO	16
2.1	O arco elétrico.....	16
2.1.1	A natureza do arco elétrico	16
2.1.2	Os riscos do arco elétrico.....	18
2.1.3	Legislação e normas sobre arco elétrico.....	22
2.2	Métodos de proteção contra o arco elétrico	28
2.2.1	EPIs contra queimaduras causadas por arco elétrico	28
2.2.2	Painéis resistentes a arco interno	32
2.2.3	Dispositivos de proteção para arco elétrico	41
2.2.3.1	Princípio de funcionamento dos sensores de arco.....	42
2.2.3.2	Arquiteturas usuais para proteção contra arco elétrico.....	45
3	TÓPICOS NORMATIVOS RELEVANTES PARA ESTIMATIVA DA ENERGIA INCIDENTE	57
3.1	NFPA 70E	57
3.2	IEEE 1584.....	61
4	ESTUDO DE CASO	73
4.1	Descrição do sistema elétrico	73
4.1.1	Proteção dos sistemas de geração.....	74
4.1.2	Proteção dos barramentos.....	78
4.1.3	Proteção do sistema de aterramento por alta resistência	78
4.2	Modos de operação e valores de curto circuito.....	79
4.2.1	Definição das condições operativas.....	79
4.2.2	Cálculos de curto-circuito.....	82
4.3	Coordenação da Proteção	82
4.4	Cálculos de Energia Incidente	84
4.5	Implementação da solução proposta	90
4.5.1	Arquitetura de proteção contra arco elétrico	90
4.5.2	Substituição dos painéis do sistema de geração	91
4.5.3	Alterações para implementação.....	92
4.5.4	Avaliação dos resultados	93

5	CONCLUSÃO	98
6	REFERÊNCIAS.....	101
7	ANEXOS	108
7.1	ANEXO A: Diagrama unifilar simplificado	108
7.2	ANEXO B: Cálculos de Curto Circuito.....	110
7.3	ANEXO C: Coordenogramas	116
7.4	ANEXO D: Cálculos preliminares de energia incidente.....	119
7.5	ANEXO E: Disposição dos sensores de luminosidade e relés de proteção na instalação	125
7.6	ANEXO F: Cálculos de energia incidente com o sistema de proteção contra arcos elétricos	128

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os aspectos relativos à segurança do trabalho, vinculado diretamente a normas cada vez mais restritivas, tem causado profundas mudanças na maneira como as instalações elétricas são projetadas, operadas e gerenciadas. Dessa forma, mensurar corretamente os riscos e prover soluções para mitigá-los tornou-se uma etapa fundamental para garantir a integridade das instalações e a segurança dos trabalhadores que interagem com a mesma.

Dentre os riscos oferecidos pela eletricidade, o arco elétrico destaca-se como um dos mais danosos para os trabalhadores. Devido à grande quantidade de energia liberada e às altas temperaturas geradas por esse fenômeno, os trabalhadores podem sofrer queimaduras graves com potencial, inclusive, para levá-los a óbito. Além disso, os efeitos do arco elétrico são ainda mais amplos, pois na sua ocorrência são gerados vapores metálicos tóxicos, projeção de metal fundido, luz extremamente intensa e uma onda de pressão devido à expansão do ar.

Como a queimadura é o principal risco envolvendo arco elétrico, algumas normas foram elaboradas objetivando dimensionar a quantidade de energia incidente que pode ser liberada por uma instalação elétrica. Essa energia incidente está vinculada a algumas características da instalação, como por exemplo, o valor da corrente de curto circuito e o tempo de atuação dos dispositivos de proteção.

Aplicar a metodologia estabelecida nessas normas é necessário para se dimensionar o EPI correto para proteção contra arco. Esses EPIs são separados por níveis de energia incidente. Dessa forma, quanto maior for o nível de energia incidente, maior deverá ser a resistência relativa ao fogo repentino dos tecidos que compõem esses EPIs.

Os riscos de arco elétrico existentes na unidade avaliada nesse trabalho são mitigados através da adoção desses EPIs. Entretanto, esses EPIs possuem características que os tornam desconfortáveis para o uso dos trabalhadores, como uma elevada gramatura nos tecidos, o que torna a roupa pesada. Além disso, a instalação elétrica fica exposta a danos que podem impedir uma retomada rápida da produção gerando um reparo de custo elevado.

Para reduzir a energia incidente liberada, permitindo a utilização de EPIs mais simples ou mesmo a eliminação de sua necessidade, algumas técnicas podem ser aplicadas. Entre elas, destaca-se a utilização de detectores de arco incorporados aos relés de proteção. Essa solução atua diretamente na redução do tempo de duração do arco, dado que o arco elétrico é identificado logo no seu início e o relé de proteção pode rapidamente comandar a abertura do disjuntor, eliminando a falta no menor tempo possível o que, conseqüentemente, reduz o nível de energia incidente. Com isso, o risco de queimadura é reduzido e as instalações também sofrem danos menores. Contudo, uma dificuldade para implementar essa solução reside no fato de que muitos dos relés existentes nas instalações industriais são do tipo estático, não possuindo recursos para que possa ser implementado um sistema de proteção específico para arco elétrico.

Neste contexto, este trabalho avalia as tecnologias existentes para proteção contra arco elétrico, considerando a sua aplicação na instalação proposta.

A análise desse cenário motivou este trabalho, que objetiva propor uma solução capaz de agir diretamente na fonte de energia incidente, evitando que os trabalhadores necessitem utilizar EPIs desconfortáveis e garantindo também um nível de proteção adequado para a instalação, de maneira que ela sofra os menores danos possíveis e esteja apta a retornar a operação no menor tempo.

A estrutura do trabalho obedece a seguinte sequência de capítulos e evolução dos assuntos:

- O Capítulo 2 apresenta os pontos relevantes sobre a natureza e os riscos envolvendo arcos elétricos, tratando também da legislação e das normas referentes a esse assunto, bem como dos principais métodos para proteção.
- O Capítulo 3 trata dos principais pontos das normas NFPA 70E e IEEE 1584, necessários para subsidiar o estudo de caso desenvolvido neste trabalho. A abordagem deste capítulo é limitada aos requisitos aplicáveis à sistemas elétricos de baixa tensão, visto que a instalação considerada possui tensão máxima de 480V.

- O Capítulo 4 trata do estudo de caso, onde é descrito o sistema elétrico da unidade e todos os estudos necessários para a realização do trabalho, como valores de curto-circuito, coordenogramas de proteção e valores de energia incidente. Este capítulo também trata da solução proposta e os ganhos obtidos com a implementação da mesma.
- O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho, abordando os benefícios e as dificuldades associados à solução proposta para a mitigação dos riscos envolvendo arcos elétricos.

2 O ARCO ELÉTRICO E FORMAS DE PROTEÇÃO

Neste capítulo são analisados aspectos relevantes sobre a natureza dos arcos elétricos, desde a sua formação até a sua extinção, com uma abordagem resumida sobre as atividades com potencial de geração de arcos elétricos e seus efeitos sobre o corpo humano. Aborda também, o estado da arte no âmbito dos EPIs utilizados pelos trabalhadores para minimizar as queimaduras decorrentes da formação do arco elétrico, os principais aspectos dos painéis resistentes a arco interno e dispositivos para detecção e eliminação de faltas envolvendo arco, como sensores detectores de arco e relés de proteção numéricos digitais.

A metodologia adotada foi baseada na análise de artigos técnicos, catálogo de fabricantes de equipamentos e EPIs, estatísticas do setor elétrico brasileiro, entre outras fontes, conforme referenciado no decorrer do capítulo.

2.1 O arco elétrico

2.1.1 A natureza do arco elétrico

Um arco elétrico caracteriza-se pela passagem de uma quantidade significativa de corrente elétrica através do ar, movimentando-se a altas velocidades (aproximadamente 100 m/s) [1]. As falhas que originam um arco elétrico estão associadas, em geral, a curto-circuitos (entre fases e fase-terra). De acordo com Kumpulainen [2], a maioria das faltas envolvendo arco elétrico são iniciadas por meio de um curto-circuito fase-terra, evoluindo rapidamente para um curto-circuito trifásico. Os arcos elétricos produzem calor intenso, causam explosões, ondas de pressão, entre outros efeitos, representando riscos aos trabalhadores expostos a esse fenômeno [3].

O comportamento de um arco elétrico em um sistema trifásico é caótico, envolvendo uma rápida e irregular mudança na geometria do arco devido à convecção, aos jatos de plasma e às forças eletromagnéticas. Adicionalmente, a extinção do arco e a possibilidade de reignição, mudanças no trajeto do arco por

conta das correntes transitórias de retorno e a reconexão do arco através dos barramentos e partes de plasma, além de outros efeitos, dificultam o modelamento matemático desse fenômeno. Por conta disso, é difícil levantar as propriedades exatas de um arco elétrico, como, por exemplo, a sua impedância [4].

A figura 1 demonstra a natureza direcional de um arco elétrico, porém não ilustra o comportamento caótico citado anteriormente.

Figura 1 – A natureza direcional de um arco elétrico sem o comportamento caótico (adaptado de [4])

As correntes alternadas das três fases criam forças magnéticas sucessivas de atração e repulsão, movimentando de forma intensa os jatos de plasma, que por sua vez alimentam uma nuvem de plasma. Essa nuvem é conduzida para fora, longe das pontas, criando uma “poeira de plasma”. Como as moléculas altamente energizadas do plasma esfriam, elas terminam se recombinando em vários outros materiais. Esse fluxo de material inclui também partes derretidas dos barramentos [4].

Após o seu início, o arco elétrico é um fluxo de corrente através de um caminho constituído pelo vapor dos materiais que estão sendo consumidos. Este vapor possui uma resistência consideravelmente maior do que o metal contínuo, provocando uma queda de tensão entre 30 e 40 V/cm, milhares de vezes maior em relação a um condutor sólido. O trajeto do arco é substancialmente resistivo. Essa característica confere ao arco elétrico um fator de potência unitário [5].

Em circuitos de baixa tensão, o arco, com queda de tensão entre 30 e 40 V/cm, consome uma parcela substancial da tensão disponível, deixando somente a diferença entre a tensão da fonte e a tensão do arco para forçar a corrente de falta através da impedância total do sistema. Este é o motivo para a “estabilização” da corrente do arco em circuitos de 277/480 Volts quando o comprimento do arco é da ordem de 10 cm [5].

Para tensões mais elevadas, o comprimento do arco pode ser substancialmente maior, em torno de 2,5 cm para cada 100 V da fonte, antes que a impedância do sistema comece a regular ou limitar a corrente de falta. Isso implica em comprimentos de arcos maiores em sistemas de alta tensão, podendo fazer com que outros equipamentos ou circuitos elétricos possam ser atingidos e provoquem novos curto circuitos [5].

2.1.2 Os riscos do arco elétrico

Por liberar uma grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo, o arco elétrico passou a fazer parte do grupo dos principais riscos envolvendo eletricidade, juntamente com o choque elétrico. Os efeitos causados pelo arco podem acarretar em perdas materiais, pois sua ocorrência pode causar a destruição total de painéis elétricos e impactar a receita de uma empresa por problemas de lucro cessante, mas também pode levar trabalhadores a óbito, visto que toda a energia liberada pelo arco pode provocar queimaduras letais, conforme constatou Ralph Lee [5], com o artigo “The other electrical hazard: electric arc blast burns”.

A alta temperatura que pode envolver um arco elétrico é a principal causa de preocupação com esse fenômeno. No ponto de origem do arco, a temperatura pode

atingir aproximadamente 20.000° C, o que equivale a quatro vezes a temperatura de superfície do sol. Nenhum material conhecido na Terra é capaz de suportar essa temperatura sem que ocorra o seu derretimento e vaporização [5]. Entretanto, além da alta temperatura, um arco elétrico apresenta outros riscos, como os vapores metálicos tóxicos, projeção de metal fundido, luz extremamente intensa e uma significativa onda de pressão [3].

A onda de pressão é provocada pela alta temperatura do arco, que causa uma explosiva expansão do ar circunvizinho e dos metais existentes no trajeto do arco. O cobre, por exemplo, sofre uma expansão em torno de 67.000 vezes quando muda do estado sólido para vapor [6]. As altas pressões geradas podem facilmente exceder centenas ou mesmo milhares de kgf/m^2 , atingindo trabalhadores em escadas, rompendo os tímpanos e causando danos aos pulmões. Os efeitos destrutivos dessas ondas de pressão, criadas pelo aquecimento e expansão térmica do ar e vaporização dos condutores metálicos, são conhecidos como “efeitos termo acústicos” [7]. Os sons associados a essas pressões podem exceder 160 decibéis. Finalmente, o material sólido e o metal derretido são expelidos para longe do arco em velocidades que excedem 1200 km/h, o suficiente para que as partículas penetrem completamente no corpo humano [8]. Com relação à luz emitida, o espectro de frequências do arco inclui uma grande proporção de radiação na zona dos raios ultravioletas, podendo causar danos à retina ocular de um ser humano [9].

Conforme descrito por Louro [10], a junção de todos esses efeitos ocorridos durante um arco elétrico apresenta os seguintes riscos para os seres humanos:

- Queimaduras;
- Traumatismos cranianos;
- Esmagamento dos pulmões;
- Perda de membro;
- Surdez;
- Ferimentos resultantes de estilhaços;
- Fraturas ósseas;

- Cegueira;
- Cataratas;
- Morte.

Embora o arco elétrico possua diversos riscos, aqueles associados à fonte de calor com potencial para causar queimaduras de terceiro grau são os mais perigosos e que originam a maior parte dos óbitos. Esses efeitos são graves no corpo humano porque as células da pele morrem mais rapidamente de acordo com intensidade da temperatura incidente na mesma [5].

Com a temperatura da pele próxima de 44 °C, o mecanismo de equilíbrio da temperatura corpórea começa a sofrer avaria em torno de 6 horas, podendo causar danos às células se o tempo de exposição a essa temperatura superar essas 6 horas. Entre 44 °C e 51 °C, a taxa de destruição das células duplica para cada acréscimo de 1 °C na temperatura da pele. Acima de 51 °C, a taxa de destruição é extremamente rápida. Já uma temperatura de 70 °C causa a destruição total das células em um período de tempo de um segundo. Qualquer temperatura da pele superior a 96 °C que permanecer por mais de 0,1 segundo causará queimaduras incuráveis [5].

A elevação de temperatura da pele será função da energia incidente produzida pelo arco elétrico. A energia incidente é definida na NFPA 70E como a quantidade de energia impressa em uma superfície, a certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico. Uma das unidades usadas para medir energia incidente é calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2).

A figura 2 demonstra a relação entre o tempo para a morte das células (queimaduras não curáveis) e a temperatura da pele. A linha inferior ilustra a mesma relação, porém considerando as queimaduras curáveis.

Figura 2 – Relação tempo-temperatura, tolerância do tecido humano (adaptado de [5])

Além do problema da elevação da temperatura da pele, um arco elétrico pode causar a ignição das vestimentas de um trabalhador, aumentando substancialmente o risco de queimaduras [11]. Por conta disso, vestimentas para proteção contra agentes térmicos, tratada com mais detalhes no item 2.2.1, são utilizadas nas atividades sujeitas a riscos de arco elétrico (elevada energia incidente). Em geral, essas atividades consistem em:

- Trabalho em circuitos de potência energizados com tensão superior a 120 V;
- Inserção e remoção de gavetas, contadores e disjuntores com a porta do painel aberta;
- Operação de contadores, disjuntores, chaves seccionadoras, gavetas e chaves fusível com a porta do painel aberta;

- Trabalho com circuito energizado para pesquisa de defeitos, inclusive durante a execução de medições utilizando um multímetro, por exemplo;
- Instalação do conjunto de aterramento temporário após o teste de tensão;
- Remoção de coberturas aparafusadas que exponham partes energizadas;
- Operação da manopla da chave comutadora do transformador de corrente que alimenta os amperímetros;
- Abertura de coberturas com dobradiças que exponham barramentos ou partes energizadas;
- Abertura de compartimentos de transformadores de tensão;
- Atividades de termografia com a porta do painel aberta.

2.1.3 Legislação e normas sobre arco elétrico

Atualmente há maiores preocupações com os riscos envolvendo eletricidade relacionados com o choque elétrico e com o arco elétrico [12]. Tratando-se do risco de choque elétrico, existem várias normas, tanto no Brasil, quanto no exterior, que tratam do assunto em profundidade. No entanto, quando o assunto é proteção contra os riscos originados por um arco elétrico, especialmente o risco de queimadura, as melhores referências estão nas normas americanas e européias.

No Brasil, a NR-06 [13] estabelece requisitos legais para equipamentos de proteção individual, mas não evidencia de forma explícita as características para proteção contra arcos elétricos, porém estabelece que os EPIs devem proteger os trabalhadores contra agentes térmicos.

Outra Norma que trata do assunto de maneira sucinta é a NR-10 [14]. Com a revisão da Norma Regulamentadora NR-10, publicada a partir da Portaria do Ministério do Trabalho e Emprego Nº 598, de 7 de dezembro de 2004, introduziu-se

no Brasil novas exigências relacionadas à segurança em trabalhos que envolvem eletricidade. Esta revisão definiu as diretrizes básicas para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos destinados a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores [15]. Segundo Queiroz [15], essa revisão significou um grande avanço nos requisitos de segurança, visto que impôs novas regras para todos os indivíduos que interagem direta ou indiretamente em instalações elétricas e serviços com eletricidade, dentro dos critérios dispostos na Norma.

A NR-10 [14] não entra diretamente no mérito da proteção contra arco elétrico. Esse assunto é tratado de maneira implícita nos requisitos mínimos necessários para composição do memorial descritivo do projeto das instalações elétricas. Faz parte deste memorial, um item de segurança relativo à proteção contra queimaduras e, por ser considerado um agente térmico, o arco elétrico deve ser estudado e ter suas consequências mitigadas e descritas nessa etapa do documento.

A NR-10 [14] dispõe também que as vestimentas de trabalho, denominadas EPIs, devem ser adequadas às atividades, contemplando a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas. O requisito que trata da inflamabilidade é de fundamental importância na determinação da vestimenta adequada para instalações com possibilidade de ocorrência de arco elétrico. Além disso, é previsto no conteúdo do treinamento básico da Norma, um item que trata somente dos riscos em instalações e serviços com eletricidade envolvendo arco elétrico e queimaduras.

Já nos Estados Unidos, no entendimento da OSHA, a segurança em trabalhos com eletricidade parte do princípio de que, se a instalação elétrica for concebida de acordo com a NEC, elas são seguras. Esse nível de segurança é mantido até o momento em que os compartimentos ou as barreiras de segurança em torno de circuitos elétricos são violados ou as distâncias recomendadas de segurança para as pessoas são desobedecidas. A prática de manter uma distância segura entre os trabalhadores e os circuitos elétricos energizados é considerada a principal medida de segurança [16].

Especificamente em relação ao arco elétrico, as entidades de segurança do trabalho americanas, como o OSHA e NFPA, determinam que os riscos envolvendo

arco elétrico devam ser conhecidos e as instalações elétricas devam ter sua energia liberada calculada no momento do arco. Além disso, é necessário fornecer aos trabalhadores os equipamentos de proteção contra queimaduras adequados. Esses requisitos de segurança estão sujeitos à fiscalização [17].

A norma OSHA 29 CFR 1910.335 (subparte S) [18] determina que os empregados devam utilizar equipamentos de proteção para a face e para os olhos em situações onde existe o risco de ferimentos ocasionados por arcos elétricos ou por objetos resultantes da explosão. Já a subparte R da mesma norma, a OSHA 29 CFR 1910.269 [19] apresenta um item que aborda critérios que devem ser atendidos em relação às vestimentas de segurança. De acordo com esse item, o empregador deve assegurar que nenhum trabalhador exposto ao risco de arco elétrico utilize uma roupa que, caso ocorra chama ou arco, sustente a chama e aumente a extensão dos ferimentos no corpo do trabalhador. Esse item, inclusive, proíbe a utilização de alguns tipos de tecidos.

Dada a obrigatoriedade de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico, nos Estados Unidos e na Europa foram desenvolvidas normas para verificação e determinação do desempenho dos tecidos e vestimentas utilizados como EPIs. Nos Estados Unidos, a entidade responsável é a ASTM; na Europa, a CENELEC e o IEC, este último com abrangência internacional [17].

As vestimentas de segurança, no entanto, só oferecerão a proteção adequada se forem corretamente dimensionadas para suportar a solicitação térmica no momento do arco elétrico. Para que essa escolha dos EPIs seja adequada, é necessário calcular o valor da energia que incidirá sobre o tecido, ocasionada por um arco elétrico [17].

Como não existem normas técnicas no Brasil para a realização desses cálculos, os mesmos são desenvolvidos empregando-se o disposto nas normas NFPA 70E [20] e IEEE 1584 [21].

A norma NFPA 70E tem por objetivo estabelecer práticas de segurança para proteção dos trabalhadores envolvidos em trabalhos com eletricidade [20]. O arco elétrico é um dos riscos abordados na norma, que fornece metodologias para cálculo da energia incidente e determinação dos EPIs adequados de acordo com o risco. Essas metodologias são estabelecidas no Anexo D da norma, "Incident Energy and

Flash Protection Boundary Calculation Methods”, onde é previsto alguns métodos de cálculo. A tabela 1 apresenta a limitação de cada método.

Tabela 1: Limitação dos métodos de cálculo (adaptado de [20])

Seção	Fonte	Limitação/ Parâmetros
D.2, D.3, D.4	Ralph Lee <i>paper</i>	Calcula o limite da proteção contra arco elétrico para arcos em ambiente aberto; é conservador acima de 600 V e torna-se mais conservador conforme a tensão aumenta.
D.5	Doughty/ Neal <i>paper</i>	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos de 600 V e abaixo; aplica-se as correntes de curto circuito entre 16 kA e 50 kA.
D.6	Ralph Lee <i>paper</i>	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos em ambiente aberto para instalações acima de 600 V; torna-se mais conservador conforme a tensão aumenta.
D.7	Norma IEEE 1584	Calcula a energia incidente e a proteção contra arco elétrico para instalações: de 208 V a 15 kV; sistema trifásico; de 50 Hz a 60 Hz; corrente de curto circuito de 700 A a 106.000 A e espaçamento entre condutores de 13 a 152 milímetros.
D.8	ANSI/IEEE C2 NESC Seção 410 Tabelas 410-1 e 410-2	Calcula a energia incidente para arcos fase-terra em ambiente aberto de 1 kV a 500 kV para trabalho em linha viva.

Citada e utilizada na NFPA 70E, a norma IEEE 1584 é um guia que fornece técnicas para que projetistas e operadores de sistemas elétricos possam determinar uma distância segura para o risco de arco elétrico e energia incidente durante o desenvolvimento de atividades realizadas em um equipamento elétrico ou nas proximidades de um sistema energizado [21].

Essa norma considera o desenvolvimento dos estudos envolvendo arco elétrico desde o primeiro artigo relevante sobre o tema, escrito por Ralph Lee. Entretanto, as fórmulas aplicadas por Ralph Lee para calcular a distância de segurança em relação à fonte de origem do arco (risco de queimaduras) não servem para determinar o efeito térmico em pessoas posicionadas em frente a painéis com

as portas abertas ou com as coberturas removidas, produzidos por arcos elétricos no interior de painéis [21].

Posteriormente, um artigo denominado “Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems” [22] apresentou ensaios mais estruturados, realizados em um sistema trifásico de 600 Volts, considerando dois cenários para ocorrência do arco elétrico: arcos elétricos em áreas abertas e arcos elétricos em uma caixa com formato de cubo. Com a realização desses ensaios foi possível estabelecer que a contribuição do calor refletido nas paredes nas proximidades do arco intensificava o calor dirigido no sentido da abertura do painel [21].

Os cálculos estabelecidos na norma IEEE 1584 empregam modelos baseados em análise estatística e ajuste de curvas com base em uma série de ensaios realizados. Através desses ensaios, o grupo de trabalho da norma IEEE 1584 desenvolveu novos modelos para o cálculo da energia incidente em sistemas de alta e baixa tensão. Com esses novos modelos estabelecidos na norma, as fórmulas para cálculo das queimaduras curáveis e incuráveis, estabelecidas por Ralph Lee, foram superadas [21].

A norma IEEE 1584 é utilizada para o cálculo da energia incidente e determinação dos EPIs para proteção contra arco elétrico para as seguintes características da instalação elétrica:

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

Por ser aderente às características da instalação elétrica analisada neste trabalho, a principal referência normativa empregada para realização dos cálculos de

energia incidente é a norma IEEE 1584, acompanhada do estabelecido na NFPA 70E.

Outra norma americana relevante que aborda o assunto arco elétrico é a IEEE 902 [23], também conhecida como “Yellow Book”. Essa norma é um guia para manutenção, operação e segurança de sistemas de potência industrial e comercial. No capítulo 7, da mesma, são abordados aspectos de segurança envolvendo o choque elétrico e o arco elétrico. Quanto ao risco do arco elétrico, a norma apresenta os principais aspectos referentes ao calor produzido, os impactos e as pressões resultantes desse fenômeno.

Com isto, é possível afirmar que o Brasil ainda encontra-se incipiente nas questões de segurança envolvendo o arco elétrico quando comparado às normas existentes no exterior, especialmente as americanas. Avanços foram conquistados com a última revisão da NR-10, ocorrida em 2004. Porém, mesmo com esses avanços, continua a acontecer um grande número de acidentes envolvendo arco elétrico no Brasil. A figura 3 demonstra o número de acidentes envolvendo esse fenômeno por ano no setor elétrico brasileiro, de acordo com o nível de tensão.

Figura 3 – Número de acidentados com arco elétrico por nível de tensão (extraído de [24])

Pela análise do gráfico (figura 3), verifica-se que a maioria dos acidentes ocorreram em instalações elétricas de baixa tensão (até 1 kV). Embora esse tipo de instalação exista em maior quantidade do que instalações com tensões superiores, esse cenário demonstra que o risco do arco elétrico é por vezes negligenciado em baixa tensão. É necessário que a legislação e as normas técnicas brasileiras sejam revistas, incorporando as melhores práticas das normas internacionais.

2.2 Métodos de proteção contra o arco elétrico

Com a evolução dos estudos envolvendo o arco elétrico, o mercado passou a disponibilizar diversas soluções para mitigar os efeitos desse fenômeno. As mais comuns e de vasta aplicação restringem-se às vestimentas (EPIs) para proteção contra queimaduras, utilização de cubículos resistentes a arco interno e o uso de relés de proteção associados a dispositivos detectores de arco.

2.2.1 EPIs contra queimaduras causadas por arco elétrico

A utilização de equipamentos de proteção contra queimaduras originadas por um arco elétrico deve ser tida como a última opção para proteção dos trabalhadores. Os projetos devem incorporar recursos que permitam agir na origem do arco elétrico, como os detectores de arco, a fim de diminuir o tempo de exposição dos trabalhadores à energia incidente provocada pelo arco elétrico e, conseqüentemente, reduzir a necessidade de utilização de equipamentos de proteção especiais. Além de representar riscos ao trabalhador, elevados níveis de energia incidente, provocam também, perdas materiais, já que podem danificar painéis e equipamentos elétricos.

Os painéis mais antigos não são dotados de proteção específica para arco elétrico. Dessa forma, qualquer intervenção nesses painéis obriga à adoção de EPIs

para proteção contra queimaduras. Os novos painéis também obrigam a utilização desses EPIs, dependendo da energia incidente liberada.

A energia incidente é inversamente proporcional à distância de trabalho. Ou seja, quanto mais próximo o trabalhador estiver do ponto de origem do arco, maior será a energia incidente impressa na superfície do seu corpo, provocando danos mais graves. O capítulo 3 aborda os requisitos normativos para estimativa dos valores de energia incidente em uma instalação.

De acordo com a NR-06 [13], os EPIs típicos para proteção contra os agentes térmicos são:

- Capuz de segurança para proteção do crânio e pescoço;
- Vestimentas de segurança que ofereçam proteção ao tronco;
- Luva de segurança para proteção das mãos;
- Manga de segurança para proteção do braço e do antebraço;
- Calçado de segurança para proteção dos pés;
- Perneira de segurança para proteção da perna;
- Calça de segurança para proteção das pernas;
- Macacão de segurança para proteção do tronco e membros superiores e inferiores;
- Conjunto de segurança, formado por calça e blusão ou jaqueta, para proteção do tronco e membros superiores e inferiores.

As vestimentas de proteção são constituídas por tecidos especiais, que tem como objetivo evitar que os trabalhadores sofram queimaduras de terceiro grau. Em 1999, a ASTM [25] definiu um indicador denominado ATPV para medir o desempenho desses tecidos contra arco elétrico. O indicador representa o valor máximo da energia incidente sobre o tecido que não resulta em energia no lado protegido (o corpo humano) superior ao valor que produz queimadura de segundo grau, ou seja, que não ultrapasse 5 J/cm^2 e não entre em combustão. Este valor é

medido por testes específicos expondo o material aos arcos elétricos em diferentes condições de corrente e tempo de exposição [26].

O indicador ATPV é dividido em cinco categorias de risco, conforme definido pela NFPA 70E. As características das vestimentas são determinadas de acordo com a energia incidente calculada. A tabela 2 demonstra essas cinco categorias.

Tabela 2: Características das roupas de proteção contra arco elétrico (adaptado de [20])

Categoria de risco ou ferimento	Descrição da vestimenta	Suportabilidade mínima do EPI contra arco elétrico [J/cm² (cal/cm²)]
0	Não fundível, materiais inflamáveis (por exemplo, algodão não tratado, lã, nylon, seda ou mistura destes materiais) com gramatura mínima de 152 g/cm ²	Não aplicável
1	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama	16,74 (4)
2	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama	33,47 (8)
3	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama e roupa de proteção contra arco selecionada de forma que atenda os requisitos mínimos do nível de proteção desejado	104,6 (25)
4	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama e roupa de proteção contra arco selecionada de forma que atenda os requisitos mínimos do nível de proteção desejado	167,36 (40)

A realização de serviços em painéis com energia incidente calculada superior a 40 cal/cm², somente é permitido com a instalação elétrica desenergizada, visto que não existem EPIs capazes de oferecer uma proteção adequada para esse nível de energia incidente.

Para garantir o desempenho esperado dos tecidos que compõem essas vestimentas, são realizados testes embasados principalmente nas normas ASTM-F 1959/F1959M [25], IEC-61482-1 [27] e CENELEC ENV 50354:2000 [28]. As normas

possuem técnicas diferentes para avaliação dos materiais. A ASTM e a IEC estabelecem critérios de teste e análise que avaliam de forma quantitativa a característica térmica do material e o desempenho da proteção com determinação do ATPV. Essa técnica permite comparar o desempenho de diferentes materiais de proteção, auxiliando na escolha da proteção adequada de acordo com o risco existente.

Já o critério estabelecido na CENELEC analisa o material de forma qualitativa. Através da corrente e tempo do arco, sem medição da energia, é verificado se o material passou ou não no teste dentro dos parâmetros estabelecidos através da inspeção visual e tempo de combustão do material.

A ABNT ainda não possui normalização sobre as vestimentas de proteção térmica. O Comitê Brasileiro de Equipamentos de Proteção Individual (CB-32), através da Comissão de Estudos CE 32:006.04 está revisando as normas que serão utilizadas para compor o primeiro projeto de norma [29].

Uma característica das vestimentas para arco elétrico é a sensação de desconforto que ela pode causar ao usuário. Vestimentas com gramaturas superiores a 260 gr/cm² geram elevados níveis de desconforto, pois são pesadas. Em geral, os trabalhadores não se sentem à vontade para utilizar esse tipo de EPI, o que termina, em alguns casos, levando o trabalhador a não utilizar o EPI adequado para a atividade que irá realizar. Outro fator relevante refere-se à capacidade que o tecido possui de permitir a troca de ar entre o meio externo e o interno à vestimenta. Portanto, o tempo de utilização da vestimenta deve ser considerado na hora de especificar a gramatura a ser utilizada [30].

A figura 4 ilustra um trabalhador paramentado com os principais EPIs para proteção contra os agentes térmicos ocasionados pelo arco elétrico. Trata-se de um conjunto de EPIs utilizados basicamente em manobras ou quando há a necessidade de intervenção em instalações/equipamentos elétricos energizados.

Figura 4 – Trabalhador paramentado com EPIs para proteção contra arco elétrico (extraído de [31])

As vestimentas são desconfortáveis e dificultam, em alguns casos, a realização de atividades manuais. Além disso, podem causar uma sensação de calor incômoda no interior das mesmas. Dessa forma, limitar a energia incidente de uma instalação elétrica é uma forma de reduzir os requisitos de segurança desses EPIs, podendo proporcionar ao trabalhador condições mais adequadas de trabalho, sem a necessidade de utilização de EPIs tão pesados e quentes [30].

2.2.2 Painéis resistentes a arco interno

Falhas internas em painéis elétricos podem gerar arcos elétricos capazes de destruir completamente a estrutura do painel e seus componentes. Devido à forte expansão do ar no seu interior, as partes móveis do painel, como as portas, podem ser arremessadas, existindo a possibilidade de atingir pessoas próximas ao local da ocorrência [32].

Essas falhas podem ocorrer devido a uma série de fatores difíceis de serem previstos e controlados. Dentre esses fatores, destacam-se [33]:

- Falha da isolação ou dos contatos devido ao envelhecimento;
- Falha de transformadores de instrumentação (TP e TC);
- Sobreensões no sistema devido à manobra em disjuntores;
- Sobreensões ocasionadas por descargas atmosféricas;
- Poluição no ambiente de instalação do painel;
- Operação equivocada;
- Manutenção precária.

O processo do arco interno impõe dois esforços significativos para o painel elétrico: o esforço mecânico e o esforço térmico [34].

No esforço mecânico, o aumento da pressão interna afeta a estrutura do painel. Os elementos de fixação do painel, tais como parafusos, porcas e dobradiças tendem a se desprenderem devido a esta pressão gerada internamente pelo arco. Para mitigar esse problema, são escolhidos materiais especiais capazes de suportar essa solicitação mecânica sem sofrer danos ou deformações impróprios. A onda de pressão inicial tem duração aproximada de 10 ms e trafega a cerca de 330 m/s [35].

A equação (1) pode ser aplicada para determinar a amplitude da onda de pressão em um painel metálico fechado [36].

$$A = \frac{1,5(It)}{d} \quad (1)$$

onde:

A = Amplitude da onda de pressão em kN/m²

d = distância do painel para o arco em metros

I = corrente do arco em Ampéres

t = tempo de duração do arco em segundos

Já o esforço térmico implica no derretimento e vaporização dos materiais presentes no painel elétrico, principalmente próximo ao ponto de origem do arco interno. O principal material que sofre esse stress térmico são as peças de cobre, que pode sofrer uma expansão de 67.000 vezes em relação ao volume original [6]. Além disso, a estrutura do painel, incluindo suas divisórias, pode ser igualmente derretida e vaporizada. Caso isso ocorra, os gases quentes gerados no arco elétrico podem ser direcionados para fora do painel, tendo o risco de atingir pessoas próximas ao local da ocorrência. As peças plásticas e isolantes utilizados no painel elétrico também sofrem esse aquecimento e podem, eventualmente, serem vaporizadas. Os materiais isolantes do painel devem ser concebidos de forma a não continuar queimando após a extinção do arco. Também não devem liberar elementos tóxicos ou corrosivos capazes de aumentar os danos indiretos do arco interno [33].

Uma das maneiras de minimizar a possibilidade de ocorrência de um arco interno em um painel elétrico é aplicar um controle de qualidade e testes de fábrica rígidos. A escolha de materiais isolantes de boa qualidade e adequados ao nível de tensão, o uso de intertravamentos elétricos e mecânicos, facilidade para manobrar e operar o painel, entre outros fatores, é fundamental para garantir a segurança e a continuidade operacional de um painel elétrico. Além disso, a utilização de detectores de arco elétrico no interior desses painéis contribui para reduzir a energia gerada e, dessa forma, minimizar os danos materiais e aumentar o nível de segurança da instalação [33].

Entretanto, mesmo com a aplicação de todas essas técnicas, o risco de uma falha interna ainda permanece. Por essa razão, torna-se necessária a utilização de painéis capazes de suportar um arco interno de maneira segura, minimizando o dano no próprio painel e em instalações adjacentes.

Esses painéis, conhecidos como painéis resistentes a arco, possuem características construtivas especiais para suportar o fenômeno físico do arco elétrico. Esse fenômeno pode ser dividido em quatro fases. Essas fases são: a compressão, a expansão, a emissão e a fase térmica, conforme definido em [37].

A primeira fase é a compressão, que é iniciada com a abertura do arco. O ar confinado no interior do painel será aquecido de acordo com a energia liberada pelo

arco, aumentando a pressão interna no painel elétrico. Nesta fase, a pressão aumenta rapidamente e só termina após atingir a pressão máxima no interior do compartimento correspondente. Essa pressão é diretamente proporcional à corrente de falta e ao comprimento do arco, e inversamente proporcional ao volume do painel. A duração da fase de compressão depende da energia do arco e do volume interno do painel, além de outros fatores como a posição onde ocorre a ignição e das aberturas para circulação de ar [33].

A segunda fase é a expansão, que ocorre quando a pressão atinge seu pico. Nesta fase, o ar que se encontra comprimido é direcionado para o exterior do painel, por meio de aberturas para circulação de ar projetadas para essa finalidade. Com isso, a pressão no interior do painel diminui, mas a temperatura continua a aumentar. Esta fase só termina quando a pressão interna no painel é reduzida a uma pressão próxima daquela existente no início do arco [35].

A terceira fase é a emissão, onde o arco ainda está ocorrendo e, por consequência, continua aquecendo o ar remanescente no interior do painel. Este ar continua sendo direcionado para o lado externo do painel, porém com uma pressão menor. Esta fase só termina quando o ar atinge a temperatura do arco. Nessa etapa quase todo o ar é expulso do painel elétrico [35].

A última fase é a fase térmica, que ocorre até o fim da duração do arco. A temperatura torna-se constante no interior do painel. Neste estágio, a energia do arco é aplicada diretamente sobre as partes fixas dentro do painel. Isto implica no derretimento e vaporização das conexões de cobre, alimentadores, dispositivos de manobra, partes metálicas da estrutura, peças plásticas e materiais isolantes. Este processo depende da duração e da corrente do arco, em conjunto com as características térmicas dos materiais usados e da distância dos componentes em relação ao ponto de origem do arco. A fase térmica dura até a abertura do disjuntor, interrompendo a corrente de falta [35].

A figura 5 ilustra graficamente o que ocorre com a pressão (**P**), a temperatura (**T**), a massa de ar no interior do painel (**M**) e o volume de ar e gases descarregados para o exterior do painel (**V**) durante a ocorrência de um arco interno.

Figura 5 – Característica da pressão, temperatura, massa de ar e volume de ar e gases durante um arco interno (adaptado de [35])

Para suportar o fenômeno físico do arco interno, os painéis resistentes a arco interno possuem características construtivas específicas. O projeto de um painel resistente a arco elétrico deve ser executado de forma a confinar os efeitos do arco elétrico no local da ocorrência, sem comprometer as instalações restantes não relacionadas com o arco. Contudo, conforme definido na norma IEC TR 61641 [38], essa proteção só é garantida quando as portas e coberturas do painel estão devidamente instaladas e fechadas.

As portas e tampas são projetadas de forma a não se desprenderem do painel por conta do aumento significativo da pressão interna. Essa pressão é direcionada para o exterior do painel por intermédio de aletas e dutos de ar. A figura 6, ilustra o sistema de ventilação e a distribuição dos compartimentos internos de um painel comercial resistente a arco interno. O fluxo de ar em cada compartimento é independente.

- A** Compartimento dos instrumentos
- B** Compartimento dos barramentos
- C** Compartimento dos cabos

Figura 6 – Exemplo do sistema de ventilação e distribuição dos compartimentos de um painel resistente a arco interno (adaptado de [39])

Como os painéis são compartimentados, ou seja, os barramentos são segregados do compartimento do disjuntor e também do compartimento de proteção e controle, essas aletas devem ser projetadas de forma a não contaminar o ambiente vizinho. Isso significa que um arco interno ocorrido, por exemplo, no compartimento do disjuntor, não deve se propagar para o compartimento dos barramentos [33].

A figura 7 ilustra a distribuição dos compartimentos internos de outro painel comercial resistente a arco interno, de um fabricante diferente da figura anterior, dividido da seguinte maneira:

- Compartimento de instrumentação e comando (1);
- Compartimento do disjuntor (2);
- Compartimento de acesso frontal dos cabos (3);
- Compartimento dos cabos de entrada e TCs (4);
- Compartimento dos barramentos de saída (5).

Figura 7 – Exemplo de distribuição dos compartimentos de um painel resistente a arco interno (extraído de [40])

Além disso, outros cuidados adicionais devem ser tomados no projeto de painéis resistentes a arcos internos. As janelas de inspeção, por exemplo, devem ser projetadas de modo que a elevada pressão interna no painel, na ocorrência de uma falta, não seja transmitida para superfície da mesma, evitando que ela venha a sofrer danos que comprometam a integridade da instalação. Outro ponto que deve ser observado é com relação ao espaçamento entre cubículos adjacentes. Deve ser previsto um espaço livre de aproximadamente 5 mm entre as paredes laterais de dois cubículos vizinhos. Essa distância tem o objetivo de proporcionar uma segurança extra, pois o arco gerado em um cubículo não será transmitido para outras partes do painel. A utilização desse critério, além de contribuir para

segurança, impede que os cubículos íntegros sofram danos, o que agiliza a manutenção e o retorno operacional do painel elétrico [33].

Para que o painel possa ser considerado resistente a arco interno, é necessário que o mesmo seja submetido a testes conforme o disposto em algumas normas técnicas e guias técnicos. De acordo com [41], as normas e guias internacionais que descrevem as etapas de teste são a IEC TR 61641 [38] e a IEC 60298 [42].

O guia técnico IEC TR 61641 é aplicável a painéis de baixa tensão construídos conforme a norma IEC 60439-1 [43]. O Brasil, inclusive, possui normalização equivalente à IEC 60439-1, que fica sob a gestão do CB-03 (Comitê Brasileiro de Eletricidade) da ABNT. A norma equivalente é a NBR IEC 60439-1 [44], cujo objetivo é estabelecer as definições, indicar as condições de serviço, os requisitos de construção, as características técnicas e os ensaios para conjuntos de manobra e controle de baixa tensão. Esta norma é composta por mais duas partes: a NBR IEC 60439-2 [45], que trata dos requisitos particulares para linhas elétricas pré-fabricadas, e a NBR IEC 60439-3 [46], que aborda os requisitos particulares para montagem de acessórios de baixa tensão destinados a instalação em locais acessíveis a pessoas não qualificadas durante sua utilização (quadros de distribuição).

A finalidade da IEC TR 61641 é definir a metodologia a ser aplicada para testar os painéis de baixa tensão com possibilidade de formação de arco elétrico devido a uma falha interna. Os testes visam avaliar a eficácia do painel em limitar os riscos de ferimentos às pessoas e os danos no próprio painel na ocorrência de um arco interno. A aplicação dos testes definidos nessa norma é voluntária e podem ser realizados por interesse do próprio fabricante do painel ou através de um acordo entre o fabricante e o usuário final [38]. Já a norma IEC 60298 é aplicável aos painéis de média tensão e também prescreve o tipo de ensaio de arco elétrico provocado por falhas internas.

Adicionalmente, os painéis elétricos podem incorporar outros recursos de segurança para limitar as consequências de um arco elétrico. Por exemplo, o painel pode dispor de mecanismo que permita a inserção ou extração de partes extraíveis,

como disjuntores e contadores, somente quando sua porta estiver fechada. Essa e outras medidas de segurança estão dispostas na NBR IEC 62271-200 [47].

2.2.3 Dispositivos de proteção para arco elétrico

O emprego de painéis resistentes a arco interno e a utilização de EPIs são meios eficientes para proteção contra os efeitos do arco elétrico. Contudo, nenhuma das duas técnicas atua diretamente na redução da fonte de energia incidente.

Essa redução da energia incidente é conseguida através da utilização de dispositivos de detecção de arco. A redução da energia incidente, além de contribuir para o aumento da segurança dos trabalhadores, reduz significativamente a explosão decorrente da abertura de um arco elétrico, o que evita danos mais graves na instalação elétrica [1].

A tabela 3 apresenta os tipos de proteção contra arco elétrico e as consequências para os trabalhadores e os equipamentos de um cubículo.

Tabela 3: Tipos de proteção contra arco elétrico e suas consequências (extraído de [1])

TIPO DE PROTEÇÃO	CONSEQUÊNCIAS	
	Trabalhador	Equipamentos
EPIs/ Vestimentas especiais	Proteção Total	Dano Total
Painel com proteção para arco interno	Proteção Total	Dano Parcial
Operação remota	Proteção Total	Dano Total
Relé de detecção de arco	Proteção Total	Proteção Total

Conclui-se, pela tabela 3, que a utilização do relé de detecção de arco é o único tipo de proteção capaz de proteger totalmente os trabalhadores e os equipamentos. Por esse motivo, a aplicação desses relés deve ser priorizada em um projeto que objetive reduzir os níveis de energia incidente. Entretanto, as quatro técnicas relacionadas na tabela 3 podem ser aplicadas conjuntamente, o que aumenta consideravelmente o nível de segurança da instalação

2.2.3.1. Princípio de funcionamento dos sensores de arco

Uma falta envolvendo arco elétrico produz uma radiação que pode ser detectada analisando o espectro de luz visível [48]. Por esse motivo, o tipo mais comum de proteção contra arco elétrico utiliza-se dessa luz emitida pelo próprio arco, para eliminação da falta, detectados por sensores conhecidos como sensores de luminosidade. Os primeiros sensores de luminosidade utilizados com essa finalidade foram desenvolvidos na década de 80, mas passaram a ser usados em larga escala somente a partir do ano 2000 [49].

Existem basicamente dois tipos de sensores de luminosidade: sensores pontuais e sensores de fibra ótica [50]. A figura 8 apresenta dois modelos comerciais desses sensores.

Figura 8 – Sensor pontual e sensor de fibra ótica (extraído de [51])

Os sensores pontuais são fototransistores que transmitem as informações referentes à luminosidade detectada no interior do painel através de sinais elétricos para as entradas do relé. Os sensores são instalados em diversos pontos do painel e cada sensor protege uma única zona, como o compartimento do disjuntor ou o

compartimento dos barramentos. Os sensores dentro de uma zona definida podem ser conectados juntos, enviando somente um sinal de *trip* para o relé de proteção [49].

Com relação à área coberta pelo sensor pontual, o mesmo possui um ponto focal para detecção do arco, ou seja, a cobertura do sensor é definida e limitada, o que reduz a possibilidade do sensor atuar indevidamente devido a alguma luminosidade externa e também facilita a identificação do ponto exato da falta. Contudo, essa característica também limita a área de cobertura da proteção contra o arco no interior do painel. A figura 9 ilustra a faixa de detecção de um sensor pontual típico, limitada a 20 graus em relação ao ponto central [49].

Figura 9 – Ângulo de detecção do sensor pontual (extraído de [49])

O desenvolvimento dos sensores de fibra ótica começou com o advento das mesmas, passando por diversas pesquisas com o objetivo de observar a luz emitida pelas descargas elétricas [52].

A fibra ótica é um tipo de sensor que realiza a detecção de luz através de toda sua superfície. Uma vantagem em utilizar esse tipo de sensor é que ele pode cobrir uma área extensa de um painel através de um enlace único, fornecendo uma proteção mais abrangente. Porém, dada à extensão da fibra ótica, ela pode vir a sofrer danos devido a dobras e pressões, o que pode inviabilizar a sua funcionalidade.

A figura 10 demonstra uma alternativa para o enlace físico realizado por um único sensor de fibra ótica (ilustrado na cor azul) em um painel elétrico. O mesmo sensor faz a proteção contra arco elétrico nos compartimentos dos barramentos, dos disjuntores e das gavetas.

Figura 10 – Detecção de arco via sensor de fibra ótica nos compartimentos de barras, gavetas e nos disjuntores (extraído de [53])

Diferentemente do que ocorre com o sensor pontual, o sensor de fibra ótica possui uma área de atuação maior, permitindo que a luz originada por um arco elétrico seja detectada por toda extensão da fibra. A fibra ótica possui uma janela de detecção de praticamente 360 graus. Essas características, dependendo da aplicação, podem aumentar ou diminuir a confiabilidade do sistema elétrico. Entretanto, o sensor de fibra ótica também pode ser utilizado para detectar pontos definidos. Para isso, somente uma pequena parte da fibra fica exposta, enquanto o restante da mesma é utilizado somente para fazer a conexão com o relé de proteção [49].

De acordo com [54], a escolha do tipo de sensor adequado para a instalação depende da aplicação. O enlace utilizando os sensores de fibra ótica é menos custoso do que a utilização de sensores pontuais quando a instalação envolve painéis de baixa tensão e centro de controle de motores (CCM) com múltiplos compartimentos. Já as vantagens em utilizar o sensor pontual é que os dispositivos são de fácil instalação em painéis existentes e podem fornecer o local exato onde ocorreu a falta, já que são instalados individualmente em cada compartimento.

Existe ainda a possibilidade em utilizar um sensor de arco do tipo lapela. Este tipo de dispositivo é destinado à proteção dos trabalhadores que realizam intervenções em instalações elétricas energizadas. O sensor de lapela é preso na roupa do trabalhador e conectado ao dispositivo de detecção de arco. Caso ocorra um arco elétrico, o sensor de lapela irá detectar essa ocorrência e enviar um comando de abertura para o disjuntor [55]. A figura 11 demonstra um sensor do tipo lapela.

Figura 11 – Sensor para arco do tipo lapela (extraído de [55])

2.2.3.2. Arquiteturas usuais para proteção contra arco elétrico

A proteção contra arco elétrico é realizada basicamente através de três tipos de arquiteturas, sendo que cada uma apresenta aspectos de confiabilidade e custos diferentes. Dessa forma, a técnica escolhida depende da aplicação e dos requisitos operacionais do sistema de proteção.

Conforme [53], os sensores luminosos podem ser conectados e transferir informações para três dispositivos distintos. São eles:

- A. Unidade de detecção de arco;
- B. Sistema dedicado exclusivamente para proteção contra arco elétrico;
- C. Relés de proteção numéricos com detecção de arco integrada.

A. Unidade de detecção de arco

As unidades de detecção de arco representam a solução mais simples e econômica porque utiliza apenas o critério da luz emitida pelo arco elétrico para prover proteção para a instalação. Não caracteriza um sistema porque é restrito basicamente aos sensores luminosos conectados na unidade [53].

A sensibilidade do relé à luz pode ser ajustada manualmente ou automaticamente. Quando o relé está na posição automática, ele ajusta continuamente sua sensibilidade de modo que a luz proveniente da abertura da porta de um compartimento, por exemplo, não seja identificada como originada por um arco elétrico, evitando, dessa forma, um comando de *trip* desnecessário. Já o ajuste manual do nível da intensidade de luz pode ser mais apropriado para painéis onde possa ocorrer a formação de arcos de baixa intensidade provocados por disjuntores do tipo sopro magnético mais antigos [56].

A figura 12 ilustra uma arquitetura de proteção que utiliza a unidade de detecção de arco.

Figura 12 – Arquitetura de proteção com unidade de arco (adaptado de [57])

Nessa configuração, os sensores do tipo pontual são conectados à unidade de detecção de arco. A quantidade de sensores que podem ser conectados à unidade varia de acordo com o modelo do componente. Essa unidade é responsável por processar os sinais emitidos pelos sensores e, através dos seus contatos de saída, comandar a abertura do disjuntor do circuito envolvido na falta.

A unidade de detecção de arco também pode ser dotada de, no máximo, um detector de fumaça [57].

A figura 13 demonstra um modelo comercial de uma unidade de detecção de arco com capacidade para conexão de 10 sensores pontuais.

Figura 13 – Unidade de detecção de arco comercial (extraído de [53])

B. Sistema dedicado para proteção contra arco elétrico

O sistema para proteção contra arco elétrico difere-se das unidades de detecção de arco por possuir recursos de operação e seletividade, tornando o sistema de proteção contra arco elétrico mais abrangente e versátil. Com relação aos critérios de operação, o comando de *trip* pode ser emitido de duas formas: somente com a detecção de luz ou incorporar junto à detecção de luz a função de sobrecorrente. Nesta última, só será emitido o sinal de *trip* se ocorrerem simultaneamente à detecção de luz e a sobrecorrente no circuito. Já a seletividade pode ser conseguida através da divisão da operação por zonas e da transferência do sinal de *trip* entre as unidades de detecção de arco [53].

De acordo com [56], a utilização da função de sobrecorrente é recomendada pelos fabricantes na maioria das aplicações, pois fornece uma segurança adicional. Contudo, a aplicação dessa técnica gera um atraso de aproximadamente 2 ms no tempo de funcionamento do relé.

A figura 14 mostra um diagrama de blocos do relé de detecção de arco com restrição de corrente.

Figura 14 – Diagrama de blocos do relé de detecção de arco com restrição de corrente (adaptado de [56])

A figura 15 demonstra uma arquitetura utilizando um sistema de detecção de arco. A proteção é composta por equipamentos com funcionalidades distintas, como os sensores de arco (pontual e fibra ótica), a unidade de detecção de arco, a unidade de medição de corrente e uma unidade central responsável pelo funcionamento do sistema.

neutro, garantindo uma atuação rápida e confiável do sistema de proteção durante eventos envolvendo arco elétrico [58].

A figura 16 demonstra a conexão de um sensor pontual de luz em um relé numérico de proteção comercial.

Figura 16 – Conexão de um sensor pontual de luz em um relé numérico de proteção comercial (extraído de [59])

Além da possibilidade de conexão dos sensores luminosos, outra característica importante do relé digital dotado de proteção contra arco elétrico é o tempo que o mesmo leva para detectar uma sobrecorrente no circuito envolvido em uma falta com arco. Para proporcionar uma atuação mais veloz, o relé utiliza elementos de sobrecorrente de alta velocidade, que possuem um sistema de filtragem distinto das funções utilizadas normalmente para correntes de curto circuito. Para as proteções de sobrecorrente relacionadas à detecção de arco interno, é utilizada uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo. Posteriormente, as amostras são comparadas com os valores de *pick up* previamente ajustados e, na ocorrência de duas amostras possuírem valores superiores a esse *pick up*, o relé emite um sinal de função atuada. Esse sinal é tratado posteriormente pela lógica estabelecida no relé [59].

A figura 17 demonstra o diagrama de blocos da função de sobrecorrente de arco de um relé comercial.

Figura 17 – Bloco lógico da função de sobrecorrente de arco (adaptado de [59])

No relé de proteção comercial do fabricante acima, são utilizadas as seguintes funções de sobrecorrente relacionadas à detecção de arco elétrico [58]:

- 50 PAF (*Phase Arc Fault*): Sobrecorrente de fase instantânea de alta velocidade para detecção de arco elétrico;
- 50 NAF (*Neutral Arc Fault*): Sobrecorrente de neutro instantânea de alta velocidade para detecção de arco elétrico.

Dessa forma, com as informações provenientes dos sensores luminosos e da função de sobrecorrente instantânea de alta velocidade, é possível estabelecer uma lógica AND para que o relé só emita o sinal de *trip* quando realmente ocorrer um arco elétrico no interior do painel, evitando, dessa forma, atuações indevidas.

A figura 18 ilustra um modelo de lógica AND que associa esses elementos.

Figura 18 – Diagrama lógico de *trip* para detecção de arco elétrico (adaptado de [59])

Outro recurso disponível nos relés digitais é a oscilografia, que permite identificar, por meio de gráficos, o comportamento do sistema elétrico durante a ocorrência de um curto-circuito. Os relés dotados de proteção contra arco elétrico permitem, também, que a oscilografia detecte o comportamento da luz emitida por um arco elétrico.

A figura 19 mostra uma oscilografia envolvendo um curto-circuito entre a fase B e a terra, onde é possível verificar o comportamento da corrente e da luz proveniente do arco elétrico.

Figura 19 – Oscilografia de uma falta fase-terra com detecção de corrente e luminosidade (adaptado de [60])

Outra alternativa para proteção contra arco elétrico é utilizar sensores que combinam a detecção de luz e som. A diferença entre a velocidade da luz (3×10^8 m/s) e do som (343 m/s) gera um atraso de tempo único, suficiente para diferenciar um evento de arco elétrico de outras fontes de luz e som. Dessa forma, é possível detectar um evento de arco elétrico de maneira rápida e confiável. Para isso, é utilizado um sensor capaz de detectar a luz e o som simultaneamente. Este sensor deve ser instalado próximo aos pontos potenciais de geração de arco elétrico [49].

A figura 20 demonstra o comportamento da luz e do som, bem como o tempo requerido para detecção do arco elétrico.

Figura 20 – Comportamento da luz e do som na ocorrência de um arco elétrico (adaptado de [49])

De acordo com a figura acima, o tempo requerido para o sensor detectar o arco elétrico e emitir o sinal de desligamento é de aproximadamente 1 ms, o que permite uma rápida extinção da falta [49].

A vantagem em utilizar esse tipo de sensor decorre do fato do mesmo dispensar a medição de corrente como um critério de confirmação para a ocorrência de um arco, o que torna a instalação mais simples, pois não há a necessidade de instalação de transformadores de corrente [49].

Com relação à arquitetura do sistema de proteção, podem ser utilizadas diversas configurações, dependendo dos requisitos operacionais do sistema elétrico e da lógica de seletividade e operação dos dispositivos de detecção de arco.

A figura 21 mostra um esquema de sistema de proteção seletivo utilizando relés numéricos equipados com o sistema de detecção de arco.

Figura 21 – Esquema de proteção contra arco utilizando relés numéricos (adaptado de [57])

No caso acima, se ocorrer um curto-circuito envolvendo arco elétrico no compartimento de cabos (ilustrado pelo quadrado azul na figura 21), por exemplo,

somente o disjuntor correspondente ao circuito envolvido será desligado, garantindo a seletividade do sistema elétrico [57].

Outra forma, distinta das anteriores, de prover maior segurança contra os efeitos do arco elétrico é configurar, no relé de proteção digital, grupos de ajustes para manutenção e manobras em equipamentos elétricos. Por meio do acionamento de um botão / chave local, através de comunicação remota ou utilizando a IHM do próprio relé, é possível selecionar um grupo de ajustes configurado somente com a proteção de sobrecorrente instantânea, eliminando qualquer atraso intencional. Isso faz com que o disjuntor atue no menor tempo possível e evite, dessa forma, que a energia incidente liberada atinja valores muito elevados [60].

A figura 22 apresenta um esquema que pode ser aplicado para seleção de um grupo de ajuste para manutenção. Nesse caso, o grupo de ajustes é selecionado por uma chave local.

Figura 22 – Chave para seleção de grupo de ajuste para manutenção (adaptado de [61])

Embora seja uma solução de baixo custo, a aplicação desses grupos de ajuste possui a desvantagem de comprometer a coordenação e seletividade do sistema de proteção da unidade, pois o recurso de temporização é inibido. Dessa forma, essa solução deve ser aplicada somente quando os trabalhadores realizarem manutenções ou manobras próximas a instalações energizadas [61].

3 TÓPICOS NORMATIVOS RELEVANTES PARA ESTIMATIVA DA ENERGIA INCIDENTE

Este capítulo trata dos principais pontos das normas NFPA 70E e IEEE 1584, necessários para subsidiar o estudo de caso desenvolvido neste trabalho. A abordagem deste capítulo é limitada aos requisitos aplicáveis a sistemas elétricos de baixa tensão, visto que esta é a aplicação de interesse neste trabalho.

3.1 NFPA 70E

De acordo com a NFPA 70E, os cálculos de energia incidente devem ser realizados com o objetivo de determinar os EPIs necessários para trabalhos executados a uma distância que apresente riscos de queimaduras em função do arco elétrico.

O cálculo da energia incidente somente é dispensável caso o trabalho seja realizado a uma distância segura de aproximação. A distância segura de aproximação é definida como a distância da fonte do arco na qual uma energia de calor de 1,2 (cal/cm²), ou 5,0 (J/cm²), incide sobre uma pessoa sem equipamento de proteção, causando-lhe queimadura de segundo grau.

A NFPA 70E possui duas metodologias de cálculo para estimar os valores de energia incidente. O primeiro método, considerado Método Teórico, estima a energia incidente baseando-se em um valor teórico máximo, conforme estudos realizados por Ralph Lee. Por esse método, aplicável para arcos elétricos ocorridos em ambiente aberto e tensão superior a 600V, a energia incidente é determinada pela seguinte equação (2):

$$E = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{D^2} \quad (2)$$

onde:

E = Energia incidente, em cal/cm^2 ;

F = Corrente de curto-circuito, em kA;

V = Tensão de linha, em kV;

t_A = Tempo de duração do arco, em segundos;

D = Distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas.

Por ser um modelo teórico, os valores de energia incidente calculados por esse método são muito elevados. Porém, pode ser aplicado em substituição aos outros métodos quando as condições de contorno não forem devidamente respeitadas.

Para arcos ocorridos em ambiente aberto, a NFPA 70E disponibiliza outra equação (3) para estimativa da energia incidente.

$$E_{MA} = 5271 \times D_A^{-1,9593} \times t_A \times [0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938] \quad (3)$$

onde:

E_{MA} = Energia incidente máxima em ambiente aberto, em cal/cm^2 ;

D_A = Distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegada;

t_A = Tempo de duração do arco, em segundos;

F = Corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 a 50 kA).

Já em ambiente fechado, de acordo com a NFPA 70E, deve ser aplicada a equação (4) para estimativa de energia incidente.

$$E_{MB} = 1038,7 \times D_B^{-1,4738} \times t_A \times [0,0093 F^2 - 0,3453 F + 5,9675] \quad (4)$$

onde:

E_{MB} = Energia incidente máxima em ambiente fechado, em cal/cm²;

D_B = Distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegada;

t_A = Tempo de duração do arco, em segundos;

F = Corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 a 50 kA).

A NFPA 70E também possui um método simplificado para determinação do EPI adequado para proteção contra arco elétrico de acordo com o nível de tensão, o tempo para eliminação do arco e a corrente de curto-circuito. Esse método não estima o valor da energia incidente e considera somente a utilização de EPIs ATPV Categorias 2 e 4. Essas informações estão dispostas em tabelas no anexo D da norma e abrangem instalações de baixa e alta tensão.

A tabela 4, adaptada da tabela D.9.1 da NFPA 70E, apresenta os valores de energia incidente para instalações de baixa tensão.

Tabela 4: Sistemas de baixa tensão – Limites máximos da corrente de curto-circuito para vários níveis de tensão e tempo de abertura de disjuntores, para uso recomendado de EPIs categoria de risco 2 e 4 e arco elétrico em ambiente fechado (adaptado de [20]).

TENSÃO (V)	TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO ARCO (s)	MÁXIMA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO- TRIFÁSICA PARA USO DE EPI Cat. 2 (8 cal/cm²)	MÁXIMA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO- TRIFÁSICA PARA USO DE EPI Cat. 4 (40 cal/cm²)
690	0,05 0,10 0,20 0,33 0,50	39 kA 20 kA 10 kA Não Recomendado Não Recomendado	180 kA 93 kA 48 kA 29 kA 20 kA
600	0,05 0,10 0,20 0,33 0,50	48 kA 24 kA 12 kA Não Recomendado Não Recomendado	200 kA 122 kA 60 kA 36 kA 24 kA
480	0,05 0,10 0,20 0,33 0,50	200 kA 122 kA 60 kA 36 kA 24 kA	200 kA 183 kA 86 kA 50 kA 32 kA
400	0,05 0,10 0,20 0,33 0,50	87 kA 39 kA 18 kA 10 kA Não Recomendado	200 kA 200 kA 113 kA 64 kA 39 kA
208	0,05 0,10	200 kA 104 kA	Não Aplicável 200 kA

A NFPA 70E disponibiliza, ainda, outro grupo de tabelas para determinação do EPI a ser utilizado para proteção contra arcos elétricos. Nessas tabelas, a seleção do EPI é realizada de acordo com a atividade que será executada, a corrente do curto-circuito e o tempo para eliminação do arco.

A segunda metodologia de cálculo prevista na NFPA 70E, considerado Método Empírico, é baseada na IEEE 1584 e está descrita no item 3.2.

A figura 23 mostra as quatro etapas necessárias para determinação dos EPIs de acordo com essas tabelas.

Figura 23 – Passos para determinação da vestimenta de proteção de acordo com a NFPA-70E (extraído de [62])

3.2 IEEE 1584

A metodologia de cálculo disposta na IEEE 1584 [21] estima a energia incidente a partir de equações desenvolvidas através de análises estatísticas retiradas de inúmeros testes de laboratório. Esse método de cálculo tende a ser mais realista do que o método proposto por Ralph Lee, implicando em níveis de energia incidente menores para uma mesma instalação. Na prática, os cálculos baseados na IEEE 1584 evitam que o trabalhador utilize uma proteção excessiva, o que facilita a execução de suas atividades laborais.

Pelo método da IEEE 1584, são necessárias nove etapas para estimativa da energia incidente e determinação dos EPIs adequados. A figura 24 apresenta essas etapas.

Figura 24 – Passos para determinação da vestimenta de proteção de acordo com a IEEE 1584 (adaptado de [62])

Os itens a seguir detalham cada etapa desse processo de cálculo.

- **Etapa 1: Coleta de dados da instalação e do sistema.**

Nesta etapa é necessário realizar a coleta de dados do sistema elétrico da unidade, tais como diagramas unifilares, que devem estar atualizados. Devem ser considerados os circuitos de distribuição de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos.

Após a coleta dos diagramas unifilares, deve-se providenciar todos os dados necessários para o cálculo de curto-circuito. O estudo deve considerar todas as fontes de energia, incluindo a concessionária, geradores auxiliares e motores acima de 37 kW (segundo a IEEE 1584, motores com potência superior ou igual a 37 kW contribuem de maneira significativa para os valores de curto-circuito). Os diagramas devem mostrar os transformadores, linhas de transmissão, circuitos de distribuição, sistemas de aterramento elétrico, reatores limitadores de correntes e outros equipamentos limitadores de corrente, correção ou estabilização de tensão, capacitores, chaves seccionadoras, disjuntores e CCMs. Também deve considerar painéis e cubículos, incluindo equipamentos de proteção, chaves fusíveis (informando o tipo e capacidade dos fusíveis), alimentadores e circuitos derivados, bem como motores menores que 600 V e transformadores para instrumentos e proteção. Equipamentos abaixo de 240 V não necessitam ser considerados a não ser que possuam potência mínima de 125 kVA.

- **Etapa 2: Determinação dos modos de operação do sistema.**

Nessa etapa é necessário analisar todos os modos de operação do sistema elétrico. De acordo com a IEEE 1584, em sistemas radiais há somente um modo de operação normal, porém existem outros sistemas mais complexos que possuem vários modos de operação.

É importante determinar a corrente de curto-circuito para o modo de operação que tem a maior corrente de curto-circuito.

- **Etapa 3: Determinação da corrente de curto-circuito.**

Nesta etapa, a IEEE 1584 recomenda que todas as informações referentes ao diagrama unifilar e os dados coletados dos equipamentos sejam inseridos em um programa para cálculo de curto-circuito. Há programas comerciais que possibilitam a inclusão de milhares de barras para execução dos cálculos e que permitem um fácil chaveamento entre os modos de operação. É necessário também, incluir as informações referentes aos cabos elétricos da instalação, como comprimento e impedância.

Os valores da corrente de curto-circuito devem ser determinados, principalmente, nos pontos da instalação onde os trabalhadores desenvolvam suas atividades laborais.

- **Etapa 4: Determinação da corrente do arco elétrico.**

Nesta etapa é determinada a corrente do arco elétrico nos pontos de interesse da instalação quanto ao risco do arco elétrico. Também é determinada a parcela da corrente que passa através do primeiro equipamento de proteção à montante do local da falta envolvendo arco.

A corrente do arco elétrico depende principalmente dos valores da corrente de curto-circuito, mensurados na etapa 3. Após a determinação desses valores, a corrente do arco elétrico pode ser calculada, através da aplicação de equações estabelecidas na norma, para sistemas de baixa tensão (até 1kV) ou para tensões maiores, entre 1 e 15 kV. Para baixa tensão, deve-se aplicar a equação (5).

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\lg I_{bf}) - 0,00304G(\lg I_{bf}) \quad (5)$$

onde:

$\lg$ = Logaritmo na base 10;

I_a = corrente do arco elétrico, em kA;

$K = -0,153$ para arco em ambiente aberto;

$K = -0,097$ para arco em ambiente fechado;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica, em kA;

V = tensão do sistema, em kV;

G = distância entre condutores, em mm.

Para tensões entre 1 e 15 kV, não há distinção entre as configurações em ambiente aberto e ambiente fechado, devendo ser aplicada a seguinte equação (6):

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (6)$$

onde:

$\lg$ = Logaritmo na base 10;

I_a = corrente do arco elétrico, em kA;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica, em kA.

Posteriormente, realiza-se a conversão do logaritmo, conforme a equação (7).

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (7)$$

Esta etapa determina, ainda, que deve ser calculada uma segunda corrente do arco elétrico equivalente a 85 % da I_a , com o objetivo de determinar um segundo tempo de duração do arco.

- **Etapa 5: Encontrar as 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 no campo. Caso contrário, os parâmetros da proteção devem ser calculados através da aplicação de softwares comerciais específicos, ou, caso a instalação analisada seja simples, as características dos dispositivos de proteção podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes.

Para fusíveis, as curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção. Neste caso, deve-se adotar 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 s. Para tempo superior a 0,03 s, soma-se 10% no tempo de fusão. Essas somas têm como objetivo determinar o tempo total da interrupção.

Para disjuntores com relés de proteção integrados, a curva tempo/corrente inclui as informações referentes ao tempo de disparo e o tempo de interrupção.

Para disjuntores operados por relés externos, a curva do relé mostra somente o tempo de operação do relé na região temporizada. Para relés operando na região instantânea, considera-se a operação do mesmo em 16 ms, à frequência de 60 Hz, devendo ser somado o tempo para abertura do disjuntor. A IEEE 1584 possui uma tabela onde são recomendados tempos de abertura para disjuntores de potência. A tabela 5 apresenta essas recomendações. A norma orienta, ainda, que tempos de abertura para disjuntores específicos devem ser consultados nos catálogos dos fabricantes.

Tabela 5: Tempo de abertura para disjuntores de potência (adaptado de [21]).

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

- **Etapa 6: Determinar as tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos.**

Deve-se documentar, para cada barramento, a tensão do sistema e o tipo de equipamento, conforme dispõe a tabela 6 (tabela 2 da IEEE 1584), com o objetivo de identificar o espaçamento entre os barramentos.

Tabela 6: Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos (adaptado de [21]).

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE OS BARRAMENTOS (mm)
Painel de 15 kV	152
Painel de 5 kV	104
Painel de baixa tensão	32
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

- **Etapa 7: Determinar a distância de trabalho.**

De acordo com a IEEE 1584, a proteção contra arco elétrico é sempre baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou corpo de um trabalhador a uma determinada distância, e não na energia incidente que atinge suas mãos ou braços. O nível do dano depende da porcentagem da pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura. A cabeça e o corpo representam a maior parte da superfície do corpo humano, por isso queimaduras nessas áreas são mais graves do que aquelas ocorridas nas extremidades do corpo. A tabela 7, adaptada da tabela 3 da IEEE 1584, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com os tipos de equipamentos.

Tabela 7: Tipo de equipamento e distância de trabalho típica (adaptado de [21]).

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA DE TRABALHO TÍPICA (mm)
Painel de 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	A ser determinada no campo

A distância de trabalho típica é a soma da distância entre o trabalhador e a parte frontal do equipamento com a distância entre a parte frontal e a fonte de origem do arco, localizada dentro do equipamento.

- **Etapa 8: calcular a energia incidente em todos os equipamentos.**

Nesta etapa, a IEEE 1584 recomenda a utilização de um programa para cálculo da energia incidente. A própria IEEE 1584 disponibiliza uma planilha em Excel para realização desses cálculos, conforme apresentado no capítulo 6 da norma.

Para a realização dos cálculos de energia incidente, a norma estabelece que deve ser determinado, primeiramente, o valor da energia incidente normalizada. A energia incidente normalizada 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. Essa energia pode ser estimada através da equação (8).

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011G \quad (8)$$

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 = é -0,792 para ambiente aberto;

é -0,555 para ambiente fechado.

K_2 = é 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência;

é -0,113 para sistema solidamente aterrado.

G = Distância entre os condutores, em mm.

Posteriormente, realiza-se a conversão do logaritmo, aplicando a equação (9).

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (9)$$

Finalmente, converte-se para energia incidente a partir da energia normalizada, através da equação (10).

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (10)$$

onde:

E = Energia incidente (J/cm^2);

C_f = é um fator de cálculo

1,0 para tensão acima de 1 kV;

1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV.

E_n = Energia incidente normalizada;

t = tempo do arco, em segundos;

D = Distância do possível ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = Expoente de distância, conforme tabela 8.

O expoente de distância (x) é determinado através da tabela 8, extraída da IEEE 1584.

Tabela 8: Fatores para equipamentos e classes de tensão (adaptado de [21]).

TENSÃO DO SISTEMA (kV)	TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE CONDUTORES (mm)	EXPOENTE DE DISTÂNCIA
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

Para determinar o valor da energia incidente em cal/cm^2 , deve ser aplicada a seguinte equação (11):

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (11)$$

onde:

E = Energia incidente (cal/cm^2);

C_f = é um fator de cálculo

1,0 para tensão acima de 1 kV;

1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV.

E_n = Energia incidente normalizada;

t = tempo do arco, em segundos;

D = Distância do possível ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = Expoente de distância, conforme tabela 8.

- **Etapa 9: determinar a distância segura de aproximação contra arco elétrico.**

Assim como a NFPA 70E, a IEEE 1584 define a distância segura de aproximação como a distância da fonte do arco na qual uma energia de calor de 1,2 (cal/cm²), ou 5,0 (J/cm²), incide sobre uma pessoa sem equipamento de proteção, causando-lhe queimadura de segundo grau.

Para determinar a distância segura de aproximação, deve-se aplicar a seguinte equação (12):

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (12)$$

onde:

D_B = Distância de aproximação do ponto do arco, em (mm);

C_f = é um fator de cálculo

1,0 para tensão acima de 1 kV;

1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV.

E_n = Energia incidente normalizada;

E_B = Energia incidente (J/cm²) na distância de proteção;

t = tempo do arco, em segundos;

x = Expoente de distância, conforme tabela 5.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Descrição do sistema elétrico

A instalação elétrica utilizada como exemplo neste capítulo é típica de plataformas petrolíferas, sendo composta por três unidades geradoras, sendo dois geradores responsáveis pela geração principal da unidade e um gerador pelo sistema de emergência.

Como mostrado no diagrama unifilar do Anexo A, o conjunto de geração principal da unidade é composto pelos geradores trifásicos A e B que geram em 480 V e possuem potência de 600 kW. Esses geradores são acionados por motores de combustão interna movidos a gás. O painel A concentra as funções de proteção, controle, sincronismo e disjunção do sistema de geração principal.

A geração de emergência da unidade é composta pela unidade geradora trifásica C de 250 kW / 480 V, acionada por motor a diesel. As funções de proteção, controle e disjunção estão concentradas no painel B.

Em situação normal de operação, a unidade opera com um gerador principal em funcionamento, enquanto o segundo gerador principal e o gerador de emergência permanecem de reserva. Na ocorrência de um desligamento no gerador principal que estiver operando, o outro gerador principal entra em funcionamento automaticamente e supre as mesmas cargas. Simultaneamente, é comandada a partida do grupo de geração de emergência. O gerador de emergência foi projetado para entrar automaticamente na linha em 45 segundos, no caso do gerador principal falhar na partida e não conseguir suprir as cargas nesse espaço de tempo. Tanto a lógica de partida dos conjuntos de geração, quanto o controle da temporização, é realizada por um CLP.

Caso a ocorrência que gerou o desligamento de um gerador principal for caracterizada como uma situação de emergência, o outro gerador principal, que estará no modo *stand-by*, não entrará em funcionamento. Ele permanecerá nessa condição até ser sanada a situação que originou a emergência e ocorrer o rearme manual do Sistema de Parada de Emergência.

O sistema de geração de emergência não pode operar em paralelo com as unidades principais, mesmo após ter sido restabelecida a operação normal. A transferência das cargas entre o sistema de geração de emergência e o sistema de geração principal ocorre por meio de uma chave de transferência automática. Essa chave de transferência possui um monitor trifásico para evitar a transferência a menos que ambas as fontes estejam numa condição de fase, na mesma frequência ou próximo de tal condição.

Uma vez que qualquer dos geradores principais tenha retornado à operação, a chave de transferência automática transfere as cargas essenciais de volta para a unidade principal e desliga o gerador de emergência, recolocando-o na modalidade de *stand-by*.

Tanto os geradores principais, quanto o de emergência, possuem uma resistência de aterramento de 200 ohms.

A distribuição de energia elétrica na unidade é realizada através de dois CCMs, ambos de 480V. O CCM A supre as cargas normais da unidade e é alimentado pelo sistema de geração principal. Já o CCM B supre as cargas essenciais e em situação normal de operação, é alimentado pelo sistema de geração principal. Caso a geração principal não esteja disponível, este CCM é alimentado pelo gerador de emergência, selecionado por uma chave de transferência automática. As cargas da unidade são constituídas basicamente por motores trifásicos de indução e transformadores de iluminação/controle.

4.1.1 Proteção dos sistemas de geração

A proteção dos sistemas de geração engloba tanto as proteções associadas à máquina primária, quanto aquelas associadas ao gerador elétrico.

Com relação à máquina primária, são empregadas as seguintes proteções:

- Baixa pressão de óleo lubrificante;
- Nível de óleo lubrificante;
- Alta temperatura da água de refrigeração;
- Baixo nível de água de refrigeração;
- Excesso de velocidade;
- Excesso de vibração.

A proteção dos geradores é realizada empregando-se as seguintes funções:

- Sobrecorrente;
- Potência reversa;
- Temperatura nos enrolamentos;
- Temperatura dos mancais;
- Subfrequência;
- Desequilíbrio de corrente;
- Sobretenção/subtenção.

A figura 25 demonstra o esquema da proteção aplicado ao gerador de emergência.

não necessita de limpeza ou ajuste dos contatos, verificação de folgas, entre outros itens inerentes à manutenção de um relé eletromecânico [64].

São empregados os seguintes relés estáticos:

- Relé de sobretensão modelo 300TD-1X, fabricado pela Wilmar Electronics;
- Relé de subtensão modelo 400TD-1AX, fabricado pela Wilmar Electronics;
- Relé de subfrequência modelo WUF-12-5060-TA, fabricado pela Wilmar Electronics.

A proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada é realizada através de relés instalados nos disjuntores de conexão dos geradores com os barramentos de carga. No sistema de geração principal são utilizados dois disjuntores modelo DS-416, um para cada gerador, fabricado pela Westinghouse, com tensão nominal de 600 V, corrente nominal de 1600 A e capacidade de ruptura de 42 kA. O relé de proteção utilizado é o modelo Ampector IIA-LI, também de fabricação Westinghouse.

Esse disjuntor possui um TC com relação 1200/5A. A unidade instantânea está ajustada para atuar com uma corrente de oito vezes a corrente nominal no secundário do transformador de corrente, ou seja, uma corrente de 40A. Já a unidade temporizada possui ajuste de *pick up* de 20 segundos para uma corrente de 30A, ou seja, seis vezes a corrente nominal no secundário do TC.

Os controles de sincronização estão localizados no painel de geração principal e podem operar nos modos de sincronização manual e semi-automática, por meio de um relé de checagem de sincronização. O painel contém ainda um sincronoscópio e lâmpadas indicadoras.

No sistema de geração de emergência é utilizado um disjuntor DS-206, com tensão nominal de 600V, corrente nominal de 800A e capacidade de ruptura de 42 kA. O relé de proteção é o mesmo empregado nos disjuntores do sistema de geração principal, porém utilizando um TC com relação 600/5A.

4.1.2 Proteção dos barramentos

A proteção dos barramentos da unidade é realizada empregando-se somente a função de sobretensão. O relé utilizado para isso é o modelo UFOV 260, de fabricação da Basler Electric.

4.1.3 Proteção do sistema de aterramento por alta resistência

Os sistemas de geração principal e de emergência possuem uma resistência no seu sistema de aterramento no valor de 200 Ohms. Essas resistências limitam o valor da corrente que flui para a terra, durante um curto-circuito fase-terra, em 1,38A. A figura 26 demonstra o diagrama unifilar do sistema de aterramento do gerador de emergência.

Figura 26 – Diagrama unifilar do sistema de aterramento do gerador de emergência

O sistema de aterramento é dotado de um relé de sobretensão de neutro (ANSI 59G), de tecnologia eletromecânica, modelo 292B402A10, fabricado pela Westinghouse.

Na ocorrência de uma falta fase-terra em qualquer parte do sistema de 480V, o relé 59G, sensível às variações de tensão, aciona um alarme no painel anunciador da unidade. Uma vez que as correntes de falta são limitadas a menos de 2A, o sistema elétrico pode continuar operando. Porém, a falha deve ser localizada e corrigida brevemente. O voltímetro localizado no sistema de aterramento indicará tensões entre 0 e 277V caso exista uma falta de alta impedância no sistema elétrico.

4.2 Modos de operação e valores de curto circuito

4.2.1 Definição das condições operativas

A unidade possui três modos de operação do sistema de geração elétrica. As três condições visam garantir fundamentalmente a segurança da unidade e a operação dos sistemas mínimos necessários para o processo. O detalhamento das condições operacionais é apresentado a seguir, sendo que cada condição foi utilizada como base para o desenvolvimento dos cálculos de curto-circuito.

- **Condição 1: Dois geradores principais operando em paralelo.**

Nessa condição, os geradores principais encontram-se em paralelo alimentando todas as cargas da plataforma. O gerador de emergência não é acionado nesse caso por não possuir sincronismo com o sistema de geração principal. Embora os geradores principais estejam projetados para operar nessa condição, ela somente ocorre momentaneamente para execução de manobras no sistema elétrico, visto que somente um gerador é suficiente para suprir a demanda da unidade. A figura 27 demonstra, através do diagrama unifilar, a configuração do sistema elétrico para esse caso.

Figura 27 – Operação com os geradores principais em paralelo

- **Condição 2: Operação com um gerador principal em funcionamento.**

Esta é a condição normal de operação da unidade. Somente um gerador em funcionamento garante o suprimento de energia necessário para manter a operação da unidade.

Figura 28 – Operação com um gerador principal em funcionamento

- **Condição 3: Operação com o gerador de emergência em funcionamento.**

O gerador de emergência entra em operação somente na ocorrência de falha nos dois geradores principais. O suprimento de energia é garantido apenas para as cargas essenciais, conectadas ao painel Painel B.

Figura 29 – Operação com o gerador de emergência em funcionamento

4.2.2 Cálculos de curto-circuito

Para a realização dos cálculos de curto-circuito, foi utilizado o software PTW, desenvolvido pela empresa americana SKM. Os cálculos de curto circuito estão baseados na norma IEC 60909 [65]. Essa norma é aplicável a sistemas trifásicos de baixa e alta tensão, desde que os mesmos operem na frequência nominal de 50 ou 60 Hz.

Os cálculos de curto circuito foram realizados para as três configurações definidas no item 4.2.1, onde é esperada a máxima corrente de falta. Os relatórios de curto-circuito estão dispostos no Anexo B.

4.3 Coordenação da Proteção

A coordenação da proteção foi realizada de maneira a otimizar a proteção dos equipamentos elétricos, garantir a seletividade e proporcionar a continuidade

operacional, sendo que os valores considerados de *pick-up* e tempo de atuação da proteção de sobrecorrente foram retirados dos critérios de projeto da unidade.

Foram adotadas as seguintes premissas:

- Tempo mínimo de coordenação de 200 ms;
- Corrente de partida dos motores seis vezes superior a corrente nominal dos mesmos;
- Ajuste de proteção de sobrecorrente de 1,15 vezes a corrente nominal dos motores;
- Ajuste magnético dos disjuntores de proteção contra curto circuito no valor de 10 vezes a corrente nominal de cada motor.

A tabela 9 apresenta, de forma resumida, os tempos de duração do arco considerando três situações distintas previstas na IEEE 1584 e na NFPA 70E. De acordo com essas normas, deve ser determinado o tempo de duração do arco considerando 100% e 85% da corrente do arco, e 38% da corrente de curto-circuito, conforme descrito no item 4.4.

O cálculo considerando 38% da corrente de curto-circuito é aplicável a sistemas industriais com tensão nominal de 480 V e representa a corrente mínima do arco capaz de auto sustentá-lo [20]. A motivação para esse cálculo, segundo a NFPA 70E, é que um alto nível de energia incidente pode ser emitido mesmo com um nível de curto-circuito mais baixo, devido à atuação demorada do relé de sobrecorrente, que pode levar alguns segundos ou minutos para comandar a abertura do circuito [20].

O tempo de duração do arco é determinado através da soma do tempo de coordenação da proteção, disponível no Anexo C, com o tempo para abertura do disjuntor (que para esse caso é 50 ms).

Tabela 9: Tempo de duração do arco

	TEMPO DE DURAÇÃO DO ARCO (s)			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
100% da corrente do arco	0,45	0,25	0,45	0,25
85% da corrente do arco	0,45	0,25	0,45	0,25
38% da corrente de curto-circuito	0,45	0,25	0,45	0,25

Nesse caso específico, não há diferença nos tempos de atuação da proteção porque nenhuma das correntes previstas na norma entram na curva de tempo inverso do relé. Dessa forma, o maior valor de energia incidente será obtido para 100% da corrente do arco.

4.4 Cálculos de Energia Incidente

O cálculo de energia incidente foi realizado segundo a metodologia disposta na norma IEEE 1584. É parte integrante desta norma uma planilha denominada “IEEE_1584_Arc_Flash_Hazard.xls”, utilizada para determinação da energia incidente e da distância segura de aproximação, tendo como principal resultado a definição da categoria de risco da instalação. A definição da categoria de risco é necessária para que o EPI destinado à proteção contra os riscos do arco elétrico seja dimensionado corretamente.

A planilha efetivamente utilizada neste trabalho é uma adaptação da planilha original fornecida pela norma, a fim de facilitar a utilização da mesma. Esta adaptação é possível devido às características específicas do tipo da instalação analisada neste trabalho, consideradas protegidas e fechadas, sem partes abertas ou expostas ao ar livre. Por ser uma planilha específica, a mesma não pode ser aplicada para outros tipos de instalação.

Para a correta utilização da planilha, os seguintes dados devem ser preenchidos:

- TAG ou nomenclatura do painel;
- Tipo de painel (CCM ou CDC);
- Tipo de instalação: aberto (para instalações ao ar livre, ex: disjuntores, seccionadoras de subestações) ou fechado (painéis fechados, sistemas em canaletas, dutos de barramentos);
- Tipo de aterramento: indireto (sistema aterrado por meio de reator, alta resistência ou isolado) ou direto (sistema solidamente aterrado);
- Corrente de curto-circuito do sistema elétrico, em kA;
- Tensão de linha do sistema elétrico, em kV;
- Tempo de abertura do disjuntor: tempo que o disjuntor leva fisicamente para abrir, não contemplando o tempo de atuação do relé de proteção;
- Tempo de atuação do relé de proteção: é o tempo que o relé leva para sentir a falta e emitir o comando para o disjuntor abrir. Este tempo é determinado através das curvas de coordenação e seletividade do disjuntor e do sistema elétrico em questão, conseguido através dos estudos de coordenação e seletividade.

As informações referentes à corrente de curto-circuito e tempo de atuação da proteção foram extraídas dos estudos realizados no software PTW e estão descritas detalhadamente nos itens 4.2.2 e 4.3.

O resultado final da planilha informará basicamente três itens:

- **Energia Incidente em J/cm^2 ou cal/cm^2 :** esta é a energia que será emanada do curto-circuito e poderá atingir um trabalhador;
- **Distância Segura:** esta é a mínima distância que o operador pode ficar do ponto de origem do arco utilizando roupas normais sem sofrer

queimaduras consideradas incuráveis. Nesta distância a energia incidente que atinge o trabalhador é igual ou menor do que $1,2 \text{ cal/cm}^2$ ou 5 J/cm^2 ;

- **Categoria de risco ou categoria da roupa:** forma de classificar o risco de queimadura devido o arco elétrico. Essa categoria de risco é determinada pela norma NFPA 70E (versão de 2009) e varia de acordo com as faixas de energia envolvidas, indo de 0 a 4. Maiores detalhes estão dispostos no item 2.2.1.

Os cálculos de energia incidente foram baseados na condição operativa onde os dois geradores principais operam em paralelo. Nessa condição, as correntes de curto-circuito apresentam os maiores valores, impactando em níveis mais elevados de energia incidente.

A tabela 10 apresenta os valores preliminares de energia incidente da instalação analisada, considerando 100% da corrente do arco elétrico.

Tabela 10: Resumo dos valores de energia incidente com 100% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
TIPO DE EQUIPAMENTO	CDC	CDC	CCM	CCM
I_{cc} (kA)	14,2	12,6	13,9	12,1
V nom (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo total do arco (s)	0,45	0,25	0,45	0,25
Corrente do arco elétrico (kA)	8,43	7,63	8,69	7,72
Energia Incidente (cal/cm^2)	10,22	5,10	16,78	8,20
Distância Segura (mm)	2619	1633	2276	1471
Categoria Roupa (NFPA 70E)	3	2	3	3

Somente os painéis listados na tabela 10 possuem energia incidente suficiente para gerar riscos aos trabalhadores que interagem com a instalação. Os demais painéis da unidade possuem energia incidente inferior a $1,2 \text{ cal/cm}^2$, o que não representa riscos aos trabalhadores.

Segundo as normas IEEE 1584 e NFPA 70E, a energia incidente também deve ser calculada considerando somente 85% da corrente do arco elétrico. Esse cálculo é realizado somente para sistemas de baixa tensão e tem o objetivo de encontrar um segundo tempo de duração do arco devido à relação tempo x corrente do dispositivo de proteção ser uma função inversamente proporcional. De acordo com a norma IEEE 1584, para os casos onde a corrente do arco cai na parte temporizada da curva de sobrecorrente ou próximo a uma mudança de etapa (de temporizado para instantâneo), a variação na corrente do arco pode causar um erro significativo no relé de proteção, comprometendo o seu tempo de atuação ou mesmo a sua operação. O valor de 85% da corrente do arco foi definido empiricamente pela IEEE através da realização de testes baseados na metodologia “e se”. Basicamente, a proposta dessa metodologia é avaliar situações onde a corrente do arco é menor do que a estimada para uma determinada instalação e o impacto dessa corrente no tempo de atuação da proteção. Dessa forma, é possível estimar a condição onde é esperada a maior quantidade de energia incidente.

Conforme preconizado nessas normas, a energia incidente a ser adotada para a instalação é aquela que apresentar o maior valor entre o cálculo considerando 100% da corrente do arco elétrico e o cálculo considerando somente 85% dessa mesma corrente [21].

A tabela 11 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos considerando somente 85% da corrente do arco elétrico.

Tabela 11: Resumo dos valores de energia incidente com 85% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
TIPO DE EQUIPAMENTO	CDC	CDC	CCM	CCM
85% da corrente do arco elétrico (kA)	7,17	6,49	7,38	6,56
V nom (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo total do arco (s)	0,45	0,25	0,45	0,25
Energia Incidente (cal/cm²)	8,57	4,28	14,07	6,88
Distância Segura (mm)	2324	1450	2045	1322
Categoria Roupa (NFPA 70E)	3	1	3	2

O cálculo considerando 38% da corrente de curto-circuito, conforme estabelecido na NFPA 70E, é apresentado resumidamente na tabela 12.

Tabela 12: Resumo dos valores de energia incidente com 38% da corrente de curto-circuito

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
TIPO DE EQUIPAMENTO	CDC	CDC	CCM	CCM
38% da corrente de curto-circuito (kA)	5,40	4,79	5,28	4,60
V nom (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo total do arco (s)	0,45	0,25	0,45	0,25
Energia Incidente (cal/cm²)	6,31	3,08	9,80	4,68
Distância Segura (mm)	1887	1160	1640	1046
Categoria Roupa (NFPA 70E)	2	1	3	1

A tabela completa, contemplando os cálculos realizados para todas as condições de corrente do arco, está disposta no Anexo D.

De acordo com os resultados obtidos, os maiores valores de energia incidente foram encontrados para a situação considerando 100% da corrente do arco, sendo, portanto, os valores adotados para a realização desse estudo.

Conclui-se, dessa forma, que a energia incidente emitida pelo Painel A, Painel B, CCM A e CCM B oferecem riscos aos trabalhadores da instalação. Portanto, o projeto para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico tem como objetivo reduzir significativamente a energia incidente emitida pelos mesmos, de modo a torná-los mais seguros para os trabalhadores que interagem com a instalação e minimizar os danos materiais ocasionados pela ocorrência de um arco elétrico.

4.5 Implementação da solução proposta

A seguir são apresentadas as soluções propostas e os resultados obtidos com a análise do sistema de proteção contra arcos elétricos, de acordo com a metodologia adotada.

4.5.1 Arquitetura de proteção contra arco elétrico

Os relés de proteção instalados na unidade estudada neste trabalho são do tipo estático. Dada as características e limitações desse tipo de relé, não é possível implementar um sistema de proteção contra arcos elétricos utilizando os mesmos. Dessa forma, torna-se necessário utilizar equipamentos compatíveis com os detectores de arco e que possuam recursos adicionais para aumentar a confiabilidade do sistema de detecção.

A primeira solução, aplicando uma unidade de detecção de arco, possui a vantagem de ser mais barata e dedicada somente para a proteção contra arcos elétricos. Entretanto, os recursos oferecidos por uma arquitetura utilizando essas unidades é limitada, não possuindo, por exemplo, a funcionalidade de restrição por sobrecorrente. No máximo, essas unidades podem ser dotadas de detectores de fumaça. Dada essas limitações, essa solução não será considerada para o projeto do sistema de proteção contra arcos elétricos da unidade analisada neste trabalho.

Outra possibilidade é utilizar um sistema dedicado para proteção contra arcos elétricos. Esse sistema possui recursos operacionais e de seletividade, tornando o sistema de proteção contra arco elétrico mais abrangente e versátil. Com relação aos critérios de operação, o comando de *trip* pode ser emitido de duas formas: somente com a detecção de luz ou incorporar junto à detecção de luz a função de sobrecorrente. Já a seletividade pode ser conseguida através da divisão da operação por zonas e da transferência do sinal de *trip* entre as unidades de detecção de arco. Embora este sistema seja dotado de recursos adicionais, o mesmo também não será empregado para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico, devido a outras funcionalidades disponíveis nos relés de proteção digitais que o tornam mais atrativo para a aplicação proposta.

A arquitetura escolhida neste trabalho utiliza os relés de proteção numéricos dotados do recurso para detecção de arco. As vantagens dessa arquitetura é que ela pode agregar diversas funcionalidades além da detecção de luz por meio dos sensores luminosos, como a detecção de sobrecorrente de fase e neutro, detecção de som e a possibilidade de configuração de grupo de ajustes específicos para operação e manutenção em painéis que possuem o risco de arco elétrico.

Além das características específicas para proteção contra arco elétrico, os relés de proteção digitais poderão agregar novos recursos para o sistema de proteção da unidade, indisponíveis no momento devido à tecnologia dos relés instalados atualmente. Entre esses recursos, pode-se destacar a geração de relatórios de eventos, a oscilografia, automonitoração e a medição de grandezas elétricas em tempo real, tais como corrente, tensão, frequência e potência.

Dessa forma, a solução proposta consiste na substituição dos relés estáticos instalados atualmente por relés digitais. Esses relés serão dotados de entradas opcionais para os sensores luminosos, que serão dispostos ao longo dos painéis nos pontos susceptíveis à formação de arco. Adicionalmente, também será adotado um grupo de ajustes específico para manobras e operações nesses painéis, habilitando somente a função de sobrecorrente instantânea, o que reduz o tempo de atuação da proteção e, conseqüentemente, a energia incidente emitida.

Outra medida de segurança que poderá ser implementada é a operação remota do sistema elétrico visto que esses relés digitais podem ser integrados à rede de automação da unidade, garantindo que as manobras sejam realizadas a uma distância segura de aproximação.

4.5.2 Substituição dos painéis do sistema de geração

Com o objetivo de aumentar a segurança das pessoas e da instalação, outra solução proposta consiste na substituição dos painéis existentes no sistema de geração da unidade por painéis resistentes a arco, que possuem características construtivas especiais para suportar o fenômeno físico do arco elétrico.

A substituição envolveria somente os Painéis A e B. Os novos painéis devem estar em conformidade com a norma NBR IEC 60439-1 e testados de acordo com o disposto no guia técnico IEC TR 61641.

Adicionalmente, esses painéis elétricos deverão incorporar o recurso que permite a inserção e extração dos disjuntores com a porta do painel fechada.

4.5.3 Alterações para implementação

A solução proposta consiste na utilização de painéis resistentes a arco interno e de um sistema de proteção contra arcos elétricos utilizando relés digitais interligados a sensores de detecção de luminosidade.

A distribuição dos sensores de luminosidade no interior dos painéis e a conexão dos mesmos aos relés de proteção estão dispostas no Anexo E.

Com relação à filosofia do sistema de proteção contra arco elétrico, foram consideradas as seguintes premissas:

- Qualquer falta envolvendo arco elétrico implicará no desligamento do sistema de geração principal e de emergência;
- A substituição dos relés de proteção estáticos por relés digitais com recursos para detecção de arco será realizada somente nos relés dos painéis A e B (painéis do sistema de geração);
- Nos Painéis A e B, os sensores de luminosidade serão do tipo pontual, instalado nos compartimentos do painel onde há o risco de arco elétrico (compartimento da entrada dos cabos, do disjuntor e da saída dos barramentos);
- A restrição de atuação por sobrecorrente será aplicada somente nos Painéis A e B;
- Os sensores de luminosidade instalados nos CCMs A e B serão do tipo fibra ótica interligados diretamente aos relés de proteção do sistema de geração principal e de emergência;

- Os CCMs A e B não são dotados de IEDs para detecção de arco. Dessa forma, não é possível aplicar a restrição de sobrecorrente nesses painéis. Portanto, o único critério utilizado para atuação da proteção desses painéis será a luz;
- O *pick-up* dos sensores de luminosidade será ajustado acima dos valores da iluminação ambiente (500 lux para o local analisado), com o objetivo de evitar a atuação do sistema de proteção sem que haja a ocorrência de arco elétrico, principalmente nos CMMs A e B. De acordo com Stokes [66], a intensidade de luz emitida por um arco elétrico é superior a 20000 lux, permitindo um ajuste de *pick-up* suficientemente acima de 500 lux;
- As faltas envolvendo arco elétrico ocorridas antes do disjuntor de entrada do Painei A serão detectadas pelo sensor pontual instalado no compartimento de entrada dos cabos, comandando a abertura do disjuntor. O disjuntor desligará o sistema de excitação do gerador e atuará na parada da máquina primária.

4.5.4 Avaliação dos resultados

Esta avaliação tem como objetivo verificar se a solução proposta no item 4.5.3 apresenta resultados efetivos em relação à diminuição da energia incidente nos painéis do sistema de geração e CMMs. O cálculo de energia incidente foi realizado segundo a metodologia disposta na norma IEEE 1584 e segue a mesma sequência descrita no item 4.4.

O tempo considerado para atuação do sensor de luminosidade é de 7 ms, conforme catálogo da empresa VAMP [51]. A proteção considerada não adota curvas de tempo inverso, sendo, portanto, instantânea. A restrição com a detecção de sobrecorrente não altera o tempo de atuação da proteção.

A tabela 13 apresenta os valores de energia incidente da unidade analisada com a instalação do sistema de proteção contra arcos elétricos, considerando 100% da corrente de arco elétrico.

Tabela 13: Resumo dos valores de energia incidente com sistema de proteção contra arco e com 100% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
TIPO DE EQUIPAMENTO	CDC	CDC	CCM	CCM
I_{cc} (kA)	14,2	12,6	13,9	12,1
V nom (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo total do arco (s)	0,057	0,057	0,057	0,057
Corrente do arco elétrico (kA)	8,43	7,63	8,69	7,72
Energia Incidente (cal/cm²)	1,29	1,16	2,12	1,87
Distância Segura (mm)	644	599	646	598
Categoria Roupa (NFPA 70E)	1	0	1	1

Com a alteração no tempo de atuação da proteção proporcionado pela instalação dos equipamentos para detecção de arco e do relé de proteção compatível com essa tecnologia, a energia incidente emitida pelo painel A, por exemplo, foi reduzida significativamente, caindo de 10,22 para apenas 1,29 cal/cm². Com essa redução da energia incidente, a categoria do EPI utilizado para proteção contra arco elétrico também foi reduzida.

A figura 30 ilustra graficamente a redução da energia incidente considerando 100% da corrente do arco elétrico.

Figura 30 – Comparativo entre energias incidentes com e sem o sistema de proteção contra arco elétrico, considerando 100% da corrente do arco

Seguindo o disposto nas normas IEEE 1584 e NFPA 70E, também foi calculada a energia incidente considerando somente 85% da corrente do arco elétrico. A tabela 14 demonstra os resultados obtidos para essa condição.

Tabela 14: Resumo dos valores de energia incidente com sistema de proteção contra arco e com 85% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
TIPO DE EQUIPAMENTO	CDC	CDC	CCM	CCM
85% da corrente do arco elétrico (kA)	7,17	6,49	7,38	6,56
V nom (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo total do arco (s)	0,057	0,057	0,057	0,057
Energia Incidente (cal/cm²)	1,09	0,98	1,78	1,57
Distância Segura (mm)	572	531	581	537
Categoria Roupa (NFPA 70E)	0	0	1	1

Nesta situação, a energia incidente no PAINEL A também foi consideravelmente reduzida, caindo de 8,57 para 1,09 cal/cm².

A figura 31 ilustra graficamente a redução da energia incidente considerando 85% da corrente do arco elétrico.

Figura 31 – Comparativo entre energias incidentes com e sem o sistema de proteção contra arco elétrico, considerando 85% da corrente do arco

Os resultados considerando 38% da corrente de curto-circuito são apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Resumo dos valores de energia incidente com sistema de proteção contra arco e com 38% da corrente de curto-circuito

	Painéis			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tipo de equipamento	CDC	CDC	CCM	CCM
38% da corrente da corrente de curto-circuito (kA)	5,40	4,79	5,28	4,60
V nom (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo total do arco (s)	0,057	0,057	0,057	0,057
Energia Incidente (cal/cm²)	0,80	0,70	1,24	1,07
Distância Segura (mm)	464	425	466	425
Categoria Roupa (NFPA 70E)	0	0	1	0

Nesta situação também houve a redução da energia incidente no Painel A, que caiu de 6,31 para apenas 0,80 cal/cm² considerando a instalação do sistema de proteção contra arcos elétricos. A figura 32 ilustra graficamente a redução da energia incidente considerando 38% da corrente de curto-circuito.

Figura 32 – Comparativo entre energias incidentes com e sem o sistema de proteção contra arco elétrico, considerando 38% da corrente de curto-circuito

A tabela completa, com todos os cálculos de energia incidente, está disposta no Anexo F.

5 CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram analisados aspectos relevantes sobre a natureza e os riscos envolvendo arcos elétricos, sendo esses riscos extremamente danosos para as pessoas expostas a esse fenômeno. Devido à sua gravidade, os riscos envolvendo arco elétrico é motivação para a existência de uma série de normas internacionais e estrangeiras, que buscam maneiras eficazes de mensurar os riscos do arco elétrico e propor a utilização de EPIs adequados, quando necessário. O Brasil ainda está carente de normas que tratem detalhadamente dos métodos empregados para estimativa da energia incidente, bem como normas para confecção e ensaio de vestimentas para trabalhos com risco de arco elétrico.

Para minimizar o efeito dos danos provocados por um arco elétrico, existem alguns métodos de proteção que utilizam diferentes filosofias. Nessa pesquisa, abordou-se os EPIs como um dos meios de proteção dos trabalhadores. Porém, esse tipo de proteção não reduz os níveis de energia incidente e limita a proteção somente aos trabalhadores, deixando a instalação exposta a uma série de danos.

Foram considerados como outros meios de proteção os painéis resistentes a arco interno e os diversos dispositivos de proteção para arco elétrico compatíveis com os sensores de luminosidade. Com relação aos painéis elétricos, o trabalho tratou das principais normas relacionadas à construção e ensaios dos mesmos. Os dispositivos de proteção foram analisados de acordo os limites de aplicação de cada um, baseando-se em critérios operacionais (seletividade) e recursos adicionais (restrição de atuação por sobrecorrente, por exemplo).

Como é necessário mensurar os níveis de energia incidente para determinar a proteção correta para os trabalhadores, o trabalho descreveu os principais pontos das normas NFPA 70E e IEEE 1584, limitados a sistemas de baixa tensão. Nessas normas são estabelecidas equações que permitem estimar os valores de energia incidente através de métodos teóricos e métodos empíricos. O dimensionamento dos EPIs ocorreu conforme o disposto da NFPA 70E. Na sequência, o trabalho tratou da descrição da unidade industrial utilizada no estudo de caso e da solução proposta para redução dos níveis de energia incidente. Foram abordadas as características operacionais e dos equipamentos, bem como aspectos quantitativos relacionados

com a redução da energia incidente, proporcionada pela instalação do sistema de proteção contra arco elétrico.

Observou-se, nesta etapa, a necessidade de prover maiores recursos para o sistema de proteção da unidade que contemplasse também a proteção contra arcos elétricos. Dessa forma, a opção pela arquitetura utilizando os sensores de luminosidade interligados a relés de proteção digitais foi escolhida em razão do vasto número de recursos disponíveis nesses relés. Os outros tipos de equipamentos e sistemas abordados na revisão bibliográfica podem contribuir de forma semelhante para a redução da energia incidente dos painéis estudados neste trabalho.

Outro fator determinante para a escolha dos relés de proteção digitais foi a possibilidade de utilizar o sistema de detecção de arco com restrição de sobrecorrente, o que permite evitar desligamentos espúrios e indesejados na ocorrência de detecção de luz pelos sensores que não sejam provenientes de um arco elétrico. Outro recurso oferecido por esses relés e utilizado neste trabalho é o grupo de ajustes que permite uma configuração específica para uso em manobras e manutenção executadas com o sistema energizado. Com a seleção desse grupo de ajustes, a função de sobrecorrente atua instantaneamente, reduzindo o tempo para eliminação da falta e, conseqüentemente, reduzindo a energia incidente liberada pelo arco elétrico. Contudo, a utilização do grupo de ajustes para operação e manobras funciona como uma retaguarda para o sistema de detecção de arco, pois mesmo configurado de forma instantânea, o sistema composto pelos detectores de luminosidade atua de forma mais rápida.

Outra consideração relevante trata da substituição do painel existente por outro resistente a arco elétrico. Essa substituição garante um aumento nos requisitos de segurança, visto que, além de suportarem explosões internas geradas por um arco elétrico, ainda permitem que as manobras nos disjuntores sejam realizadas com a porta do painel fechada.

Conclui-se, que o sistema de proteção contra arco elétrico proposto neste trabalho é eficiente e capaz de reduzir significativamente os níveis de energia incidente dos painéis elétricos, contribuindo para a segurança dos trabalhadores que

interagem com o sistema elétrico da unidade e reduzindo os danos materiais na instalação.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Rocha, G. et al. Detecção de arco voltaico em painéis de média e baixa tensão. In: *III PCIC BR – “Petroleum and Chemical Industry Conference”* - IEEE, 2010.
- [2] Kumpulainen, L.; Dahl, S.; Ma, J. Mitigation of arc-flash hazards and reduction of costs by selective arc-flash protection. In: *“China International Conference on Electricity Distribution” – CIED, IEEE, 2008.*
- [3] Floyd, H.L. et. al. Arc flash hazards and electrical safety program implementation. In: *“Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference”*, 2005.
- [4] Lang, M.; Neal, T. “Arc flash basics: testing update”. Disponível em: http://us.ferrazshawmut.com/resources/media/articles/icefa2007_paper_FINAL_11.pdf. Acesso em 13/09/2010.
- [5] Lee, R.H. The other electrical hazard: electric arc blast burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-18, p. 246–251, May/June 1982.
- [6] Wilson, W.R. High current arc erosion of electric contact materials. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers - Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 74, 1955.
- [7] Wactor, M. et al. Modeling the pressure wave associated with arc fault. In: *“Conference Papers of the 47th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference”*, USA, 333-341, 2000.
- [8] Mohla, D.C. et al. Mitigation electric shock and arc flash energy – a total system approach for personnel and equipment protection. In: *“Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference”*, PCIC, 2010.
- [9] IEEE. “Requirements for qualification of high power testing services: IEEE/NFPA arc flash phenomena”. Disponível em: <http://standards.ieee.org/about/arcflash/hpts.pdf>. Acesso em 14/09/2010.

- [10] Louro, M.F. “O sistema de proteções na perspectiva de segurança de pessoas em redes de MT”. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores). Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [11] Doughty, R.L. et al. Minimizing burn injury: electric-arc hazard assessment and personnel protection. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002.
- [12] Camp, R. “Electrical safety and arc flash protection. In: “*Twenty-First IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering*”, 2005.
- [13] Ministério do Trabalho e Emprego. “Norma Regulamentadora n.6 (NR-6)”, Equipamento de Proteção Individual – EPI. Brasília, 2001.
- [14] Ministério do Trabalho e Emprego. “Norma Regulamentadora n.10 (NR-10)”, Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília, 2004.
- [15] Queiroz, A.R.S. e Oliveira, M.F. “Adequação à NR-10: estudo comparativo entre unidades de produção antigas e novos projetos”. In: *IEEE Electrical Safety Workshop*, 2009.
- [16] Jamil, S.; Jones, R.A. e McClung, L.B. Arc and flash burn hazards at various levels of an electrical system. “*IEEE Transactions on Industry Applications*”, v. 33, n. 2, March/April 1997, p. 359-366.
- [17] Tomiyoshi, L.K. Arcos elétricos - proteção contra queimaduras, estimativa de energia e determinação da proteção.”*Trabalho técnico*”, 2000.
- [18] OSHA 29 CFR 1910.335 – subpart S. “Safeguards for personnel protection”, 1990.
- [19] OSHA 29 CFR 1910.269 – subpart R. “Electric power generation, transmission, and distribution”, 1994.
- [20] NFPA 70E. “Standard for electrical safety requirement for employee workplace”, 2009.
- [21] IEEE Std. 1584. “IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations”, 2002.

- [22] Doughty, R.L.; Neal, T.E. 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, p. 257–269, Jan./Fev. 2000.
- [23] IEEE Std. 902. "Guide for maintenance, operation and safety of industrial and commercial power systems", 1998.
- [24] FUNCOGE – Fundação COGE. "Relatório de estatística de acidentes do setor elétrico brasileiro", 2008. Disponível em: <http://www.funcoge.org.br>. Acesso em 15/09/2010.
- [25] ASTM- F-1959/F1959M. "Standard test method for determining the arc thermal performance value of materials for clothing", 1999.
- [26] Tomiyoshi, L.K. Vestimenta de proteção contra queimaduras por arco elétrico. "*Trabalho técnico*", 2004.
- [27] IEC 61482-1. "Live working- flame resistant materials for clothing for thermal protection of workers – Thermal hazards of an electric arc- Part 1- Test methods", 2002.
- [28] CENELEC – ENV 50354. "Electrical test methods for materials and garments for use by workers at risk from exposure to an electric arc", 2000.
- [29] MSA. Disponível em:
http://media.msanet.com/International/Brazil/PDFs/informativo_cb32.pdf.
Acesso em 22/09/2010.
- [30] Erthal, L.; Guimarães, M.E.S. "A experiência de uma empresa de petróleo na aquisição de vestimentas de segurança para profissionais que atuam em serviços de eletricidade". In: *III PCIC BR – "Petroleum and Chemical Industry Conference"* - IEEE, 2010.
- [31] REATIVA. Disponível em:
http://www.reativa.com/img_up/EPI%20nível%204.JPG. Acesso em 22/09/2010.

- [32] Kalkstein, E.W. et al. The safety benefits of arc resistant metalclad medium voltage switchgear. In: *"Record of the Petroleum and Chemical Industry Conference"*, 1994.
- [33] Deb, N. et al. Design of a new generation of internal arc resistant switchgear. In: *"IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference"*, 2004.
- [34] Kaltenbom, U. "The thermal effects of fault arcs on plastics in electrical switchgear". *Darmstadt University of Technology*, 1998.
- [35] Deaton, R.; Gostic, J.M. "Installation and operational considerations of arc resistant switchgear". *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, 1996.
- [36] Drouet, M.G.; Nadeau, F. Pressure waves due to arcing faults in a substation. In: *"IEEE Transactions on Power Apparatus and System"*. V. PAS-98, 1979.
- [37] Finke, S.; Koenig, D.; Kaltenborn, U. Effects of fault arcs on insulating walls in electrical switchgear. In: *"Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation"*, 2000.
- [38] IEC TR 61641. "Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies – guide for testing under conditions of arcing due to internal fault", 2008.
- [39] ABB. Catálogo. Disponível em:
[http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5629ced95ec888fdc125761f004fef8c/\\$file/Vol.6.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5629ced95ec888fdc125761f004fef8c/$file/Vol.6.pdf). Acesso em 25/01/2010.
- [40] WEG. Catálogo. Disponível em: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-quadros-eletricos-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em 25/01/2010.
- [41] Finke, S.; Koenig, D. Recent investigations on high current internal arcs in low voltage switchgear. In: *"Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation"*, 2002.
- [42] IEC 60298. "A.C. metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1kV and up to and including 52kV", 1990.

- [43] IEC 60439-1. “Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 1: Type-tested and partially type-tested assemblies”, 1999.
- [44] NBR IEC 60439-1. “Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão. Parte 1: Conjuntos com ensaio de tipo totalmente testados (TTA) e conjuntos com ensaio de tipo parcialmente testados (PTTA)”. Rio de Janeiro, 2003.
- [45] NBR IEC 60439-2. “Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão. Parte 2: Requisitos particulares para linhas elétricas pré-fabricadas (sistemas de barramentos blindados)”. Rio de Janeiro, 2004.
- [46] NBR IEC 60439-3. “Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão. Parte 3: Requisitos particulares para montagem de acessórios de baixa tensão destinados à instalação em locais acessíveis a pessoas não qualificadas durante sua utilização - Quadros de distribuição”. Rio de Janeiro, 2004.
- [47] NBR IEC 62271-200. “Conjunto de manobra e controle de alta-tensão Parte 200: Conjunto de manobra e controle de alta-tensão em invólucro metálico para tensões acima de 1 kV até e inclusive 52 Kv”. Rio de Janeiro, 2007.
- [48] Kay, J.A.; Arvola, J.; Kumpulainen, L. Protection at the speed of light: arc-flash protection combining arc flash sensing and arc-resistant technologies. In: “*IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*” (PCIC), 2009.
- [49] Roscoe, G.; Valdes, M.E.; Luna, R. Methods for arc-flash detection in electrical equipment. In: “*IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*” (PCIC), 2010.
- [50] Valdes, M.; Meiners, S.; Asokan, T. Rápida mitigación de energía, sin corto circuito, para control de arc flash en sistemas de baja y media tensión. In: “*IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*”, Brazil (PCIC-BR), 2010.
- [51] VAMP. Catálogo Disponível em: http://www.vamp-reles.com.br/home/hp/Publicacoes/Arco_eletrico.pdf. Acesso em 02/02/2011.

- [52] Melouki, B.; Lieutier, M.; Lefort, A. "The correlation between luminous and electric arc characteristics", *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 29, n. 11, 1996.
- [53] VAMP. Catálogo. Disponível em: http://www.vamp-reles.com.br/home/Produtos/Conteudo/Home/Guia_de_Aplicação_Sistema_de_Detecção_de_Arco_VAMP_08_08_08.pdf. Acesso em 02/02/2011.
- [54] Kumpulainen, L.; Dahl, S. "Selective arc-flash protection", *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1 (CIRED- IEEE)*, 2009.
- [55] VAMP. Disponível em: <http://www.vamp.fi/Manuals/Portuguese/VM221.PO009.pdf>. Acesso em 02/02/2011.
- [56] Inshaw, C.; Wilson, R.A. Arc flash hazard analysis and mitigation. In: "58th Annual Conference for Protective Relay Engineers", *IEEE*, 2005.
- [57] Kumpulainen, L.; Dahl, S. Minimizing hazard to personnel, damage to equipment, and process outages by optical arc-flash protection. In: "IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference", *Europe*, 2010.
- [58] SEL – Schweitzer Engineering Laboratories. "Memória de cálculo para os ajustes do relé de proteção de alimentador SEL-751A". Disponível em: <http://www.selinc.com.br/calculo/ROTEIRO%20DE%20AJUSTES%20SEL-751A.PDF>. Acesso em 04/02/2011.
- [59] SEL – Schweitzer Engineering Laboratories. "Como criar um elemento de detecção de arco voltaico rápido e seletivo, utilizando elementos de sobrecorrente e intensidade luminosa". Disponível em: http://www.selinc.com.br/guia_aplic/ag_protecao_arco.pdf. Acesso em 06/02/2011.
- [60] Zeller, M.; Scheer, G. Add trip security to arc-flash detection for safety and reliability. In: "Power Systems Conference", *IEEE*, 2009.

- [61] Luna, R.; Cassidy, B.; Franco, J. Reducing arc flash risk with the application of protective relays. In: "*IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*", *PCIC*, 2009.
- [62] Souza, F.B. "Vestimenta de proteção contra queimaduras provocadas por arcos elétricos para trabalhadores que atuam em instalações e serviços em eletricidade". Monografia (Pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho). Universidade Nove de Julho, 2009.
- [63] Sleva, A.F. "Protective Relay Principles". CRC Press, 2009.
- [64] Silva, R.A. "Comportamento da função de proteção de sobrecorrente instantânea frente a distorções harmônicas nos relés de proteção numéricos". Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2008.
- [65] IEC 60909. "Short-circuit currents in three-phase a.c. systems", 2001.
- [66] Stokes, A.D.; Sweeting, D.K. Electric arcing burn hazards. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 42, p. 134-141, January-February 2006.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO A: Diagrama unifilar simplificado

7.2 ANEXO B: Cálculos de Curto Circuito

D1. Condição 1 – Dois geradores principais operando em paralelo

16 Feb 2011 14:40:52

 SKM POWER*TOOLS FOR WINDOWS
 IEC 60909 FAULT ANALYSIS REPORT
 COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2006

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT
 System Frequency(Hz): 60 Tmin: 0.02 sec.
 Calculate Maximum Short-Circuit Current

=====

PAINEL DOS GERADORES PRINCIPAIS

*FAULT BUS: PAINEL A Voltage:0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq): 0.0833 Ik" (kA): 22.031
 Ip(kA): 55.599 Ik(kA): 3.473

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	30.853	14.196	10.250	8.994
Ib(Sym. RMS) (kA)	19.353	12.425	10.114	8.993
i(DC) (kA)	24.028	6.867	1.661	0.091
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.594	1.143	1.013	1.000

Ib(Asym. RMS) (kA)	30.853	14.196	10.250	8.994
Ib(Sym. RMS) (kA)	19.353	12.425	10.114	8.993
i(DC) (kA)	24.028	6.867	1.661	0.091
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.594	1.143	1.013	1.000

PAINEL DO GERADOR DE EMERGENCIA

*FAULT BUS: PAINEL B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq): 0.1114 Ik" (kA): 21.096
 Ip(kA): 51.362 Ik(kA): 3.464

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	28.037	12.572	9.885	8.858
Ib(Sym. RMS) (kA)	18.548	12.028	9.875	8.858
i(DC) (kA)	21.024	3.658	0.450	0.005
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.512	1.045	1.001	1.000

Ib(Asym. RMS) (kA)	28.037	12.572	9.885	8.858
Ib(Sym. RMS) (kA)	18.548	12.028	9.875	8.858
i(DC) (kA)	21.024	3.658	0.450	0.005
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.512	1.045	1.001	1.000

PAINEL DAS CARGAS NORMAIS

*FAULT BUS: CCM A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq): 0.0859 Ik" (kA): 21.999

Ip(kA): 55.315 Ik(kA): 3.472

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	30.628	13.886	10.126	8.912
Ib(Sym. RMS) (kA)	19.309	12.353	10.035	8.912
i(DC) (kA)	23.775	6.342	1.360	0.054
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.586	1.124	1.009	1.000

PAINEL DAS CARGAS ESSENCIAIS

*FAULT BUS: CCM B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq): 0.1338 Ik" (kA): 20.269

Ip(kA): 48.049 Ik(kA): 3.453

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	25.997	12.141	9.927	8.988
Ib(Sym. RMS) (kA)	17.917	11.909	9.925	8.988
i(DC) (kA)	18.837	2.363	0.210	0.002
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.451	1.019	1.000	1.000

DISJUNTOR GERADOR 01A

GROUP CONTRIBUTION THROUGH BRANCH : BUS-UG-01A

R/X: 0.068 Ik" (kA): 6.713

Ip(kA): 17.262 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	9.972	5.826	4.759	4.372
Ib(Sym. RMS) (kA)	6.387	5.205	4.704	4.372
i(DC) (kA)	7.659	2.616	0.721	0.044
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.561	1.119	1.012	1.000

DISJUNTOR GERADOR 01B

GROUP CONTRIBUTION THROUGH BRANCH : BUS-UG-01B

R/X: 0.068 Ik" (kA): 6.713

Ip(kA): 17.262 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
=====				
Ib(Asym. RMS) (kA)	9.972	5.826	4.759	4.372
Ib(Sym. RMS) (kA)	6.387	5.205	4.704	4.372
i(DC) (kA)	7.659	2.616	0.721	0.044
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.561	1.119	1.012	1.000

D2. Condição 2 – Operação com um gerador principal em funcionamento

16 Feb 2011 14:48:08

 SKM POWER*TOOLS FOR WINDOWS
 IEC 60909 FAULT ANALYSIS REPORT
 COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2006

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT
 System Frequency(Hz): 60 Tmin: 0.02 sec.
 Calculate Maximum Short-Circuit Current

=====

PAINEL DOS GERADORES PRINCIPAIS

*FAULT BUS: PAINEL A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq): 0.0898 Ik" (kA): 15.319
 Ip(kA): 38.339 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	20.883	8.386	5.519	4.663
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.966	7.230	5.438	4.663
i(DC) (kA)	16.370	4.250	0.940	0.047
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.611	1.160	1.015	1.000

Ib(Asym. RMS) (kA)	20.883	8.386	5.519	4.663
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.966	7.230	5.438	4.663
i(DC) (kA)	16.370	4.250	0.940	0.047
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.611	1.160	1.015	1.000

PAINEL DO GERADOR DE EMERGENCIA

*FAULT BUS: PAINEL B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq): 0.1048 Ik" (kA): 14.933
 Ip(kA): 36.656 Ik(kA): 1.734

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	19.771	7.680	5.389	4.644
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.647	7.098	5.374	4.644
i(DC) (kA)	15.197	2.932	0.407	0.006
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.563	1.082	1.003	1.000

Ib(Asym. RMS) (kA)	19.771	7.680	5.389	4.644
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.647	7.098	5.374	4.644
i(DC) (kA)	15.197	2.932	0.407	0.006
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.563	1.082	1.003	1.000

PAINEL DAS CARGAS NORMAIS

*FAULT BUS: CCM A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq):	0.0889	Ik" (kA):	15.331
Ip(kA):	38.405	Ik(kA):	1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
=====				
Ib(Asym. RMS) (kA)	20.917	8.325	5.432	4.573
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.961	7.173	5.359	4.573
i(DC) (kA)	16.418	4.226	0.890	0.037
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.614	1.161	1.014	1.000

PAINEL DAS CARGAS ESSENCIAIS

*FAULT BUS: CCM B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.

R/X of Z(eq):	0.1194	Ik" (kA):	14.556
Ip(kA):	35.099	Ik(kA):	1.732

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
=====				
Ib(Asym. RMS) (kA)	18.800	7.423	5.445	4.740
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.379	7.092	5.440	4.740
i(DC) (kA)	14.149	2.192	0.240	0.002
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.519	1.047	1.001	1.000

DISJUNTOR GERADOR 01A

GROUP CONTRIBUTION THROUGH BRANCH : BUS-UG-01A

R/X:	0.068	Ik" (kA):	6.713
Ip(kA):	17.262	Ik(kA):	1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
=====				
Ib(Asym. RMS) (kA)	9.972	5.826	4.759	4.372
Ib(Sym. RMS) (kA)	6.387	5.205	4.704	4.372
i(DC) (kA)	7.659	2.616	0.721	0.044
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.561	1.119	1.012	1.000

D3. Condição 3 – Operação com o gerador de emergência em funcionamento

16 Feb 2011 14:50:02

 SKM POWER*TOOLS FOR WINDOWS
 IEC 60909 FAULT ANALYSIS REPORT
 COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2006

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT
 System Frequency(Hz): 60 Tmin: 0.02 sec.
 Calculate Maximum Short-Circuit Current
 =====

PAINEL DO GERADOR DE EMERGENCIA

*FAULT BUS: PAINEL B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.
 R/X of Z(eq): 0.0825 Ik" (kA): 4.731
 Ip(kA): 11.951 Ik(kA): 0.724

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	6.600	2.924	2.032	1.790
Ib(Sym. RMS) (kA)	4.101	2.518	1.999	1.790
i(DC) (kA)	5.172	1.488	0.361	0.020
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.610	1.162	1.016	1.000

PAINEL DAS CARGAS ESSENCIAIS

*FAULT BUS: CCM B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.
 R/X of Z(eq): 0.0837 Ik" (kA): 4.724
 Ip(kA): 11.912 Ik(kA): 0.723

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	6.566	2.856	1.973	1.734
Ib(Sym. RMS) (kA)	4.083	2.474	1.946	1.734
i(DC) (kA)	5.142	1.428	0.324	0.015
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.608	1.155	1.014	1.000

7.3 ANEXO C: Coordenogramas

E1. Coordenograma 1 – Coordenação entre o gerador A e a maior carga instalada no CCM B.

onde:

- 1– Curva de partida e operação do maior motor deste CCM;
- 2– Curva do relé térmico do maior motor deste CCM;
- 3– Curva magnética do disjuntor de proteção do maior motor deste CCM;
- 4– Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor alimentador do CCM B;
- 5– Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor de proteção do gerador principal A;
- 6– Curva de dano do gerador principal A.

E2. Coordenograma 2 – Coordenação entre o gerador A e a maior carga instalada no CCM A.

Coordenograma 2

onde:

- 7– Curva de partida e operação do maior motor deste CCM;
- 8– Curva do relé térmico do maior motor deste CCM;
- 9– Curva magnética do disjuntor de proteção do maior motor deste CCM;
- 5– Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor de proteção do gerador principal A;
- 6– Curva de dano do gerador principal A.

E3. Coordenograma 3 – Coordenação entre o gerador C e a maior carga instalada no CCM B.

Coordenograma 3

onde:

- 1 – Curva de partida e operação do maior motor deste CCM;
- 2 – Curva do relé térmico do maior motor deste CCM;
- 3 – Curva magnética do disjuntor de proteção do maior motor deste CCM;
- 10 - Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor de proteção do gerador auxiliar;
- 11 – Curva de dano do gerador auxiliar.

7.4 ANEXO D: Cálculos preliminares de energia incidente

D1. Dados da instalação necessários para o cálculo

Dados da instalação necessários para o cálculo

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tipo de equipamento	CDC	CDC	CCM	CCM
Tipo de instalação	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada
Tipo de aterramento	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto
Corrente de curto-circuito (kA)	14,2	12,6	13,9	12,1
Tensão da instalação (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo de abertura do disjuntor (s)	0,05	0,05	0,05	0,05
Tempo de atuação do relé(s)	0,4	0,2	0,4	0,2
Tempo total do arco (s)	0,45	0,25	0,45	0,25

onde:

- Tipo de equipamento: CDC ou CCM
- Tipo de instalação: Aberta ou fechada
- Tipo de aterramento: Direto ou Indireto

D2. Dados tabelados normatizados

Dados tabelados normatizados

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
D	610	610	455	455
G	32	32	25	25
X	1,473	1,473	1,641	1,641
K	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097
K1	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555
K2	0	0	0	0
Cf	1,5	1,5	1,5	1,5

onde:

- **D** = Distância do operador ao ponto de arco (mm)
 Para $0,208 \leq V \leq 1$ kV:
 Se CCM = 455 mm
 Se CDC = 610 mm
- **G** = Distância entre condutores e barramentos (mm)
 Para $0,208 \leq V \leq 1$ kV:
 Se CCM = 25 mm
 Se CDC = 32 mm
- **X** = Expoente de distância
 Para $0,208 \leq V \leq 1$ kV:
 Se CCM = 1,641
 Se CDC = 1,473

- Fator K e K1: Instalação aberta

$$K = -0,153; K1 = -0,792$$

Instalação fechada

$$K = -0,097; K1 = -0,555$$

- Fator K2: Aterramento indireto

$$K2 = 0$$

Aterramento direto

$$K2 = -0,113$$

- Fator Cf: Fator de cálculo

Para tensões iguais ou menores que 1 kV, Cf = 1,5

D3. Valores de energia incidente com 100% da corrente do arco

Valores de energia incidente com 100% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Corrente do arco elétrico (kA)	8,43	7,63	8,69	7,72
Energia incidente normalizada(J/cm²)	3,03	2,72	3,07	2,70
Energia incidente (J/cm²)	42,76	21,33	70,19	34,31
Energia incidente (cal/cm²)	10,22	5,10	16,78	8,20
Distância segura (mm)	2619	1633	2276	1471
Categoria Roupa (NFPA 70E)	3	2	3	3

D4. Valores de energia incidente com 85% da corrente do arco

Valores de energia incidente com 85% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tempo total de extinção do arco para 85% (s)	0,45	0,25	0,45	0,25
85% da corrente do arco elétrico (kA)	7,17	6,49	7,38	6,56
Energia incidente normalizada(J/cm²)	2,54	2,28	2,58	2,27
Energia incidente (J/cm²)	35,87	17,90	58,88	28,78
Energia incidente (cal/cm²)	8,57	4,28	14,07	6,88
Distância segura (mm)	2324	1450	2045	1322
Categoria Roupa (NFPA 70E)	3	1	3	2

D5. Valores de energia incidente com 38% da corrente de curto-circuito

Valores de energia incidente com 38% da corrente de curto-circuito

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tempo total de extinção do arco para 38% (s)	0,45	0,25	0,45	0,25
38% da corrente de curto-circuito (kA)	5,40	4,79	5,28	4,60
Energia incidente normalizada(J/cm²)	1,87	1,64	1,79	1,54
Energia incidente (J/cm²)	26,39	12,88	40,99	19,60
Energia incidente (cal/cm²)	6,31	3,08	9,80	4,68
Distância segura (mm)	1887	1160	1640	1046
Categoria Roupa (NFPA 70E)	2	1	3	1

7.5 ANEXO E: Disposição dos sensores de luminosidade e relés de proteção na instalação

Solução proposta para o sistema elétrico da unidade

Disposição dos sensores luminosos nos Painéis A e B

- Compartimento de instrumentação e comando (1);
- Compartimento do disjuntor (2);
- Compartimento de acesso frontal dos cabos (3);
- Compartimento dos cabos de entrada e TCs (4);
- Compartimento dos barramentos de saída (5).

7.6 ANEXO F: Cálculos de energia incidente com o sistema de proteção contra arcos elétricos

F1. Dados da instalação necessários para o cálculo

Dados da instalação necessários para o cálculo

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tipo de equipamento	CDC	CDC	CCM	CCM
Tipo de instalação	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada
Tipo de aterramento	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto
Corrente de curto-circuito (kA)	14,2	12,6	13,9	12,1
Tensão da instalação (kV)	0,48	0,48	0,48	0,48
Tempo de abertura do disjuntor (s)	0,05	0,05	0,05	0,05
Tempo de atuação do relé(s)	0,007	0,007	0,007	0,007
Tempo total do arco (s)	0,057	0,057	0,057	0,057

onde:

- Tipo de equipamento: CDC ou CCM
- Tipo de instalação: Aberta ou fechada
- Tipo de aterramento: Direto ou Indireto

F2. Dados tabelados normalizados

Dados tabelados normalizados

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
D	610	610	455	455
G	32	32	25	25
X	1,473	1,473	1,641	1,641
K	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097
K1	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555
K2	0	0	0	0
Cf	1,5	1,5	1,5	1,5

onde:

- **D** = Distância do operador ao ponto de arco (mm)
 Para $0,208 \leq V \leq 1$ kV:
 Se CCM = 455 mm
 Se CDC = 610 mm
- **G** = Distância entre condutores e barramentos (mm)
 Para $0,208 \leq V \leq 1$ kV:
 Se CCM = 25 mm
 Se CDC = 32 mm
- **X** = Expoente de distância
 Para $0,208 \leq V \leq 1$ kV:
 Se CCM = 1,641
 Se CDC = 1,473

- Fator K e K1: Instalação aberta

$$K = -0,153; K1 = -0,792$$

Instalação fechada

$$K = -0,097; K1 = -0,555$$

- Fator K2: Aterramento indireto

$$K2 = 0$$

Aterramento direto

$$K2 = -0,113$$

- Fator Cf: Fator de cálculo

Para tensões iguais ou menores que 1 kV, Cf = 1,5

F3. Valores de energia incidente com 100% da corrente do arco

Valores de energia incidente com 100% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Corrente do arco elétrico (kA)	8,43	7,63	8,69	7,72
Energia incidente normalizada(J/cm²)	3,03	2,72	3,07	2,70
Energia incidente (J/cm²)	5,42	4,86	8,89	7,82
Energia incidente (cal/cm²)	1,29	1,16	2,12	1,87
Distância segura (mm)	644	599	646	598
Categoria Roupa (NFPA 70E)	1	0	1	1

F4. Valores de energia incidente com 85% da corrente do arco

Valores de energia incidente com 85% da corrente do arco

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tempo total de extinção do arco para 85% (s)	0,057	0,057	0,057	0,057
85% da corrente do arco elétrico (kA)	7,17	6,49	7,38	6,56
Energia incidente normalizada(J/cm²)	2,54	2,28	2,58	2,27
Energia incidente (J/cm²)	4,54	4,08	7,46	6,56
Energia incidente (cal/cm²)	1,09	0,98	1,78	1,57
Distância segura (mm)	572	531	581	537
Categoria Roupa (NFPA 70E)	0	0	1	1

F5. Valores de energia incidente com 38% da corrente de curto-circuito

Valores de energia incidente com 38% da corrente de curto-circuito

	PAINÉIS			
	Painel A	Painel B	CCM A	CCM B
Tempo total de extinção do arco para 38% (s)	0,057	0,057	0,057	0,057
38% da corrente de curto-circuito (kA)	5,40	4,79	5,28	4,60
Energia incidente normalizada(J/cm²)	1,87	1,64	1,79	1,54
Energia incidente (J/cm²)	3,34	2,94	5,19	4,47
Energia incidente (cal/cm²)	0,80	0,70	1,24	1,07
Distância segura (mm)	464	425	466	425
Categoria Roupa (NFPA 70E)	0	0	1	0