



# ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03  
de dezembro 2021

## USO DA NORMA ATUALIZADA IEEE 1584-2018 PARA DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE APLICADO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES COM ARCOS ELÉTRICOS EM PAINÉIS INDUSTRIAIS

**Eduardo Pauli**

Área Eletrotécnica, Campus Jaraguá do Sul – Rau, Instituto Federal de Santa Catarina

**Arthur G. Bartsch**

Área Eletrotécnica, Campus Jaraguá do Sul – Rau, Instituto Federal de Santa Catarina

**Resumo:** Este trabalho realiza um estudo da norma atualizada IEEE 1584-2018. Essa norma permite entender o cálculo da energia incidente e sua influência em arcos elétricos. O objetivo desse estudo é a prevenção de acidentes em plantas industriais. É proposto um *software* desenvolvido no desenvolvedor *Excel* que possibilita a determinação dos níveis de energia incidente presentes no sistema elétrico avaliado, além de determinar o limite de aproximação segura ao arco elétrico (AFB) e a categoria de risco ao operador através dos cálculos da IEEE 1584-2018. Além disso, é feito o estudo de caso considerando a aplicação da norma em uma planta industrial. Neste estudo, verifica-se que planta original apresenta um risco alto aos operadores e propõe-se uma solução baseada na detecção de arco para a redução desse risco ao operador.

**Palavras-chave:** IEEE-1584, Energia incidente, AFB, Curto-circuito, Relés de detecção de arco, Arco elétrico, Segurança.

## USE OF THE UPDATED IEEE STANDARD 1584-2018 FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE APPLIED IN THE PREVENTION OF FLASH ACCIDENTS IN INDUSTRIAL PANELS

**Abstract:** This work does a study about the updated standard IEEE 1584-2018. This standard allows understanding the incident energy calculus and its influence in arc-flashes. This study's purpose is accident prevention in industrial plants. Software developed in Excel is proposed to determine incident energy levels in the evaluated electrical system and the safe approach limit to the electric arc (AFB) and operator risk category through the IEEE 1584-2018 calculus. Moreover, a case study is done considering the standard application in an industrial plant. In this study, it is seen that the original plant presents an elevated risk to the operators, and an arc-detection-based solution is proposed to reduce this operator risk.

**Keywords:** IEEE-1584, Incident power, AFB, Short circuit, Arc detection relays, Electric arc, Safety.

## 1. Introdução

Com o crescente aumento da demanda mundial por energia, os serviços relacionados à eletricidade ganharam destaque no que diz respeito à segurança pessoal dos operadores e a integridade da própria instalação industrial. Frequentemente, certas operações de manutenção e operação em painéis podem ocasionar arcos elétricos por algum erro humano ou por falha do equipamento.

O arco elétrico tem como principal característica o seu alto poder de destruição. Se não detectado e extinguido rapidamente, o mesmo pode provocar danos irreversíveis ao equipamento e à integridade física ao operador. Entre estes danos, destacam-se queimaduras de elevado grau e acidentes físicos devido às forças explosivas oriundas da elevação abrupta de pressão causada pelo arco elétrico. Além disso, é possível que ocorram danos à visão causados pela forte irradiação luminosa podendo levar a cegueira permanente (ALMEIDA A. B.; CATELANI JR.; LUIZ C, 2008).

Lee (1982) mostrou que a temperatura do arco elétrico, durante um curto-circuito, pode alcançar 4 vezes a temperatura da superfície do sol, chegando a 20.000 °C, sendo o fenômeno com maior elevação de temperatura produzido pelo homem, atrás somente do raio laser (100.000 °C). Além disso, apresentou uma metodologia teórica para modelar arcos elétricos (LEE, R. H, 1982).

Doughty-Neal (2000), apresentou uma metodologia de cálculo de energia incidente através do produto de uma série de testes realizados em laboratório para diferentes cenários, em configurações abertas e fechadas. Essa energia incidente é base para determinação do risco provocado por um arco elétrico. A metodologia apresenta um progresso em relação ao método teórico de Ralph Lee que se mostrava muito conservador (DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L., 2000).

Os métodos supracitados, apesar da sua importância, apresentam uma série de limitações e alguns equívocos. Lee considera que toda a energia gerada no momento do arco elétrico é convertida em energia incidente, o que na realidade não ocorre. Uma parte significativa da energia é consumida no processo de fusão e vaporização dos condutores e deslocamento do ar (IEEE, 2018). Além disso o método não avaliou o efeito do confinamento do arco, o que não permite sua aplicação para cálculo de energia incidente em painéis elétricos. O método de Doughty-Neal pode ser aplicado somente em sistemas até 600 V com corrente de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA, limitando assim a sua aplicação (DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L., 2000).

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) desenvolveu a norma IEEE-1584 (IEEE, 2018). Esta norma possui uma metodologia que estende os limites de aplicação do cálculo de energia incidente, podendo ser utilizado em sistemas trifásicos, em configurações abertas (onde o arco ocorre em ambiente não enclausurado), ou fechadas (onde o arco ocorre em ambientes enclausurados) e em baixa ou média tensão, suportando uma faixa bem mais extensa para a corrente de falta. Em 2018, essa normativa foi atualizada, de modo que é necessário realizar um novo estudo de categoria de risco de arco elétrico nos novos painéis industriais.

Este trabalho tem a finalidade de apresentar os conceitos de arco elétrico e energia incidente, a fim de explicitar as diferentes categorias de risco de acidentes dado o nível de energia incidente. Além disso, desenvolve-se um software para facilitar a classificação do painel fabricado, conforme sua categoria de risco. Por fim, determinam-se os níveis de energia incidente de todos os painéis elétricos presentes em uma subestação de uma unidade industrial real, utilizando a metodologia da IEEE 1584-2018, como um estudo de caso. O trabalho também propõe a utilização de sensores ópticos para controle dos riscos

oriundos do arco elétrico para as pessoas e instalação, passando pelo correto dimensionamento das vestimentas antichama

## **2. Definição do arco elétrico**

Conforme a teoria de Reinhold Rüdénberg (RÜDENBERG, R., 1968), o arco elétrico é definido como uma corrente elétrica que surge quando houver o rompimento do dielétrico que segrega dois pontos com diferença de potencial entre si, seja o dielétrico, o ar ou outro material com característica isolante.

Contextualizando a definição de Reinhold Rüdénberg a um painel elétrico, pode-se definir o arco elétrico como um curto-circuito através do ar, no qual o ar faz o papel de dielétrico, ou seja, uma descarga que surge sempre que ocorre o rompimento da isolação por meio da ionização do ar entre uma parte energizada e a terra, entre terminais da mesma fase, ou ainda entre as demais fases. Em função do seu estado, o arco provoca elevadas temperaturas e aumento de pressão. Em painéis elétricos, estes efeitos podem causar a destruição das estruturas metálicas, bem como dos equipamentos que nele estão contidos. Além disso, a energia do arco pode causar graves lesões físicas, algumas vezes letais, para as pessoas ao redor da área afetada.

As causas de um arco elétrico podem ser das mais variadas naturezas em um painel elétrico. Toda vez que o material isolante, incluindo o ar, passa a ser um condutor, causando o rompimento do dielétrico, inicia-se um arco voltaico. Os principais motivos que originam arco elétrico são:

- a) Poeira e impurezas acumuladas nos isoladores e equipamentos;
- b) Descargas parciais ou depreciação da isolação;
- c) Centelhamento devido à sobretensões e transitórios;
- d) Defeitos de fabricação de componentes;
- e) Manobras indevidas, como aberturas em carga de seccionadoras não adequadas a tais manobras;
- f) Reposição de fusível, contator ou disjuntor com o circuito energizado ou em curto-circuito;
- g) Contato acidental com partes vivas.

O arco elétrico, na grande maioria das vezes, ocorre no momento da manutenção de equipamentos elétricos como inserção e extração de disjuntores, troca de componentes, inspeções visuais com a remoção de partes dos painéis nas quais os operadores estão expostos às consequências máximas do arco voltaico (SOUZA, J. J. B. de; PEREIRA, J. G., 2008). De acordo com o levantamento realizado pela Comissão Eletrotécnica Internacional (*IEC-International Electrotechnical Commission*), 65% dos acidentes ocorrem com a porta do painel aberta, enquanto o trabalhador intervém diretamente na instalação elétrica (SOUZA, J. J. B. de; PEREIRA, J. G., 2008).

## **3. Energia incidente e a IEEE 1584 – 2018**

A energia incidente, mensurada em cal/cm<sup>2</sup>, diz respeito à energia dissipada no momento da ocorrência do arco voltaico e pode ser interpretada como a quantidade de energia incidida sobre uma superfície, a certa distância da fonte. Esta é a energia responsável pelos efeitos do arco elétrico. As principais variáveis para o cálculo de energia incidente são a tensão, o nível de curto-circuito da fonte alimentadora, o tempo de abertura do seccionador do circuito, a configuração dos eletrodos e as dimensões do painel. Em painéis elétricos de média tensão (MT) e baixa tensão (BT), adota-se o método de cálculo

proposto na norma IEEE 1584-2018 (IEEE, 2018), denominada *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*. Nessa norma, a metodologia disposta estima a energia incidente por análises estatísticas e extrapolação de resultados de testes em laboratório. O método proposto na norma IEEE 1584-2018 (IEEE, 2018) apresenta menores limitações de operação e resultados mais realistas se comparados a outros métodos de cálculo como Ralph Lee (LEE, R. H, 1982) e Doughty-Neal (DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L., 2000), informando valores menores e mais congruentes de energia incidente. Como a condição de segurança é o principal objetivo do estudo de energia incidente, deseja-se sempre o valor mais próximo do real possível, o que proporciona melhores condições de trabalho e operabilidade dos painéis elétricos de MT e BT.

O estudo de energia incidente é obrigatório, sendo requisito mínimo em instalações elétricas a fim de atender as normas regulamentadoras de segurança em serviços com eletricidade. No Brasil, a norma responsável é a NR-10 (SOUZA, J. J. B. De; PEREIRA, J. G., 2008).

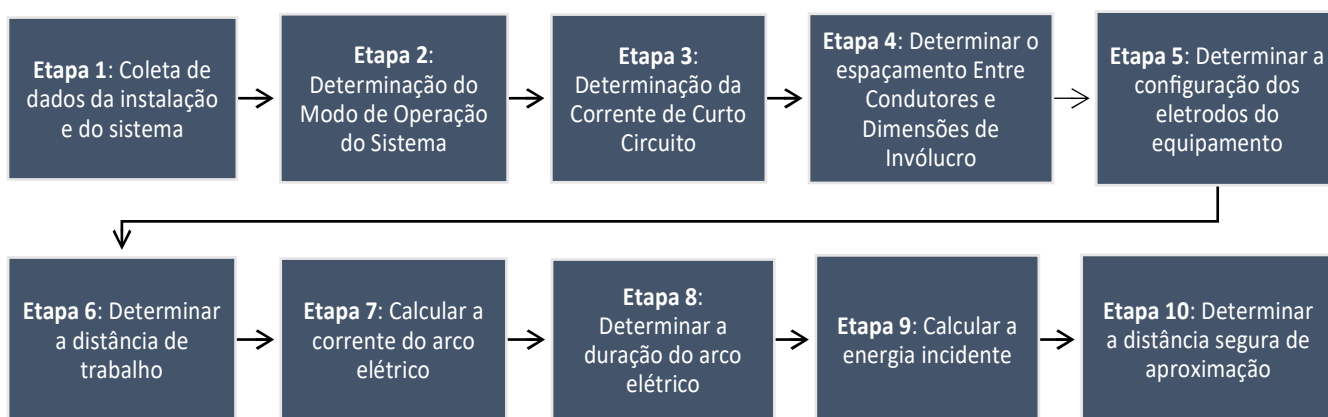
O método IEEE 1584 é resultante de modelos derivados empiricamente, com uso de análise estatística e ajuste de curvas aplicadas a dados coletados de testes e aos conhecimentos da física do arco elétrico. Em 2018, uma nova versão foi lançada trazendo novos modelos de cálculo considerando a configuração do invólucro e diferentes arranjos de eletrodos para atingir resultados cada vez mais acurados (IEEE, 2018).

A metodologia de cálculo empregada pela IEEE 1584 obrigatoriamente deve apresentar as seguintes condições:

- a) O sistema deve ser trifásico;
- b) Frequência entre 50 Hz e 60 Hz;
- c) Tensão de alimentação entre 208 V e 15 kV;
- d) Corrente de curto-circuito em valor eficaz da componente simétrica:
  - o Entre 208 V e 600 V: de 500 A a 106 kA;
  - o Entre 601 V e 15000 V: de 200 A a 65 kA;
- e) Espaçamentos entre condutores:
  - o Entre 208 V e 600 V: 6,35 mm a 76,2 mm;
  - o Entre 601 V e 15000 V: 19,05 mm a 254 mm;
- f) Distância de trabalho maior ou igual a 305 mm.

Para o cálculo de energia incidente segundo os preceitos estabelecidos pela IEEE 1584-2018, seguem-se dez passos conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1 – Etapas para o cálculo de energia incidente de acordo com a norma IEEE 1584-2018**



Fonte: Autor (2021)

#### 4. Detector de arco voltaico por monitoramento de óptico

O sistema de proteção contra arco voltaico por detecção óptica deve comandar a abertura da chave ou disjuntor a montante toda vez que houver uma emissão de luz interna ao painel proveniente de um arco voltaico, com a maior rapidez possível. A captura destes sinais luminosos ocorre por meio de sensores de luminosidade (fibra óptica ou sensor pontual). Em ambos os casos, o sinal luminoso trafega até o relé de proteção, onde é convertido em sinal elétrico, guardando a devida proporção da intensidade. O relé, então, processa o sinal elétrico e decide, de acordo com o *pick-up* (valor de grandeza para o qual o relé inicia a atuação) definido, se a condição é de *trip* ou não *trip*. Com o intuito de garantir maior segurança na atuação da proteção contra arco, o relé de proteção normalmente disponibiliza uma entrada de sobrecorrente, para utilização conjunta com o sinal luminoso.

O sinal de sobrecorrente visa confirmar a ocorrência do arco elétrico, de forma a eliminar atuações indevidas do sistema provenientes de *flashes* de máquinas fotográficas, iluminação natural ou artificial.

#### 5. Software para cálculo da energia incidente e especificação do EPI

Esta seção propõe a aplicação de uma ferramenta gráfica desenvolvida neste trabalho para a determinação dos parâmetros calculados na Seção IV, de acordo com a IEEE 1584-2018. Conseqüentemente, através da mesma será possível determinar a distância segura para o risco de arco elétrico, energia incidente em um equipamento elétrico ou nas proximidades de um sistema energizado e a classe de EPI.

Com o intuito de flexibilizar e tornar tal ferramenta mais acessível ao público alvo (estudantes e profissionais da área), os cálculos de energia incidente foram desenvolvidos na plataforma *Microsoft Desenvolvedor*. A linguagem aplicada neste *software* é o *Visual Basic* (VBA), é uma linguagem de programação incorporada em algumas aplicações da *Microsoft*, como o *Excel*, *Word*, *PowerPoint*, *Outlook*, *Visio*, etc.

Para a utilização correta do *software*, deve-se preencher os seguintes dados de entrada:

- a) TAG ou nomenclatura do painel;
- b) Tensão de linha eficaz do sistema [kV];
- c) Corrente de curto-circuito trifásica simétrica [kA];
- d) Distância entre condutores [mm];
- e) Tempo total de arco [s];
- f) Tempo de arco mínimo [s];
- g) Distância de operação [mm];
- h) Altura do compartimento ou painel [mm];
- i) Largura do compartimento ou painel [mm];
- j) Profundidade do compartimento ou painel [mm];
- k) Configuração dos terminais [VCB, VCBB, HCB, VOA, HOA].

A interface do *software* desenvolvido e as etiquetas geradas podem ser observadas na Figura 2. Onde a interface inicial e os resultados finais podem ser apresentados em três idiomas: português, inglês e espanhol.

Figura 2 – Software / Etiqueta de energia incidente

The figure displays three screenshots of the software interface for incident energy calculation, presented in Portuguese, English, and Spanish. Each interface includes a warning icon and the text 'PERIGO' (DANGER). The Portuguese version shows input data for a 13.8 kV system with a 14.89 kA short-circuit current, resulting in an incident energy of 13.93 cal/cm² and a risk category of 3. The English version shows a 4.16 kV system with a 5.13 kA short-circuit current, resulting in 3.38 cal/cm² and a risk category of 1. The Spanish version shows a 4.52 kV system with a 4.41 kA short-circuit current, resulting in 3.38 cal/cm² and a risk category of 1. All versions include a warning: 'ATENÇÃO: A ALTERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS, AJUSTE DE RELÉS OU CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA INVÁLIDAM OS VALORES CALCULADOS E ESPECIFICAÇÃO DE EPI.' (WARNING: CHANGES IN EQUIPMENT SETTINGS OR SYSTEM CONFIGURATION WILL INVALIDATE THE CALCULATED RESULTS AND PPE REQUIREMENTS).

Fonte: Autor (2021)

## 5. Estudo de caso

Para o estudo de caso presente neste artigo, foi escolhido uma planta de distribuição elétrica de média e baixa tensão típica de instalações de grande porte radial simples, conforme demonstrado no Anexo 1.

Inicialmente, foram levantados os dados do sistema para propiciar os cálculos de energia incidente. Na sequência, analisou-se a seletividade cronométrica e verificou-se que ocasionava valores elevados de energia incidente.

Na sequência, levantaram-se os dados do sistema de detecção óptica já conhecido. Assim, são apresentados os benefícios apropriados desse tipo de sistema à planta com a redução dos seus níveis de energia incidente, comparando-se com um sistema de proteção baseado apenas no monitoramento de corrente.

Para o estudo de curto-circuito foi utilizado o software PTW, do inglês *Power Tools for Windows*, da empresa SKM, em sua versão 7.0.3.4, onde foi considerada a norma IEC-60909 como referência para os cálculos. Foram utilizados os módulos DAPPER, para a realização do estudo de curto-circuito, e CAPTOR, para coordenação e seletividade das proteções, conforme demonstrados no Anexo 1.

### 5.1 Características gerais da planta

Conforme o diagrama unifilar apresentado na Figura 4 no Anexo 1, basicamente o sistema é composto por quatro painéis (QD-01, QD-02, CCM-MT e CCM-BT). Em virtude da similaridade dos parâmetros de cálculo (forma construtiva, nível de tensão e corrente de curto-circuito) entre os painéis QD-01 e QD-02 o estudo ficou concentrado apenas nos painéis QD-02, CCM-MT e CCM-BT. É importante analisar que a falta pode ocorrer em qualquer parte do painel. Entretanto, o compartimento mais crítico no que diz respeito ao tempo de detecção está localizado na entrada de cada painel, ou seja, logo antes do disjuntor principal do painel, conforme a Figura 3. Neste caso, a detecção fica a cargo do relé a montante ao painel onde ocorre a falta. Em todos os casos, foram utilizados valores reais de medidas nos compartimentos estudados. O arranjo dos eletrodos se configura como condutores verticais, terminais em caixa metálica (VCB).

O disjuntor utilizado em todos os painéis é o VD4 à vácuo, da ABB. De acordo com seu catálogo, o seu tempo de abertura máximo é de 0,075 s (ABB, 2020).

- I) QD-02 - Quadro de distribuição secundário, alimentado pelo painel primário (QD-01), com tensão nominal de 13,8 kV e corrente de curto-circuito simétrica de 14,88 kA. Este quadro de distribuição é composto por um cubículo de entrada e dois alimentadores. No caso de uma falta no compartimento analisado, a detecção ficará a cargo do relé 1A1.
- II) CCM-MT - Centro de controle de motores de média tensão, este painel tem sua alimentação proveniente do QD-02, sua tensão nominal é de 4,16 kV e corrente de curto-circuito simétrica de 5,13 kA. Este quadro de distribuição é composto por um cubículo de entrada e alguns alimentadores não demonstrados no unifilar nos quais possuem cargas motóricas. No caso de uma falta no compartimento analisado, a detecção ficará a cargo do relé 2A1.
- III) CCM-BT – Centro de controle de motores de baixa tensão, este painel tem sua alimentação proveniente do QD-02, sua tensão nominal é de 480 V e corrente de curto-circuito simétrica de 31,142 kA. Este quadro irá alimentar cargas motóricas não representados no diagrama unifilar. No caso de uma falta no compartimento analisado, a detecção ficará a cargo do relé 3A1.

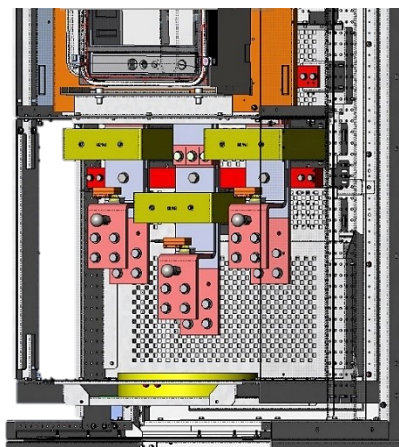
A Tabela 1 indica as principais características estruturais e mecânicas dos compartimentos estudados.

**Tabela 1 – Tipo de equipamento/distância de trabalho**

Painel	Config. dos eletrodos	Dimensional (A×L×P)	Distância entre condutores	Distância de operação
QD-02	VCB	(592x568x722) mm	152mm	914,4mm
CCM-MT	VCB	(480x690x380) mm	104mm	914,4mm
CCM-BT	VCB	(480x690x380) mm	25mm	457,2mm

Fonte: Autor (2021)

**Figura 3 – Compartimentação a ser estudada**



Fonte: WEG (2021)

## 5.2 Cálculo de energia incidente

Uma vez determinadas as correntes de curto-circuito das barras da instalação, os tempos de atuação das proteções (extraídos dos coordenogramas) e as características gerais da planta, pode-se realizar o cálculo da energia incidente para cada painel. Na Tabela 2, são apresentados os dados levantados para cálculo conforme a norma vigente [4] e os respectivos resultados para energia incidente com o tempo de abertura do circuito considerado no estudo de seletividade da subestação contida no Anexo 1.

Dados	QD-02	CCM-MT	CCM-BT
Relé	1A1	2A1	3A1
Fator de correção do Invólucro (CF)	1,061	1,069	1,067
Corrente de arco	13,9 kA	4,52 kA	22,71 kA
Corrente de arco min.	13,73 kA	4,42 kA	19,92 kA
Tempo de abertura	0,075 s	0,075 s	0,075 s
Tempo de arco	0,675 s	0,535 s	0,635 s
Tempo de arco mínimo	0,675 s	0,545 s	0,735 s
AFB	4366 mm	1771 mm	3669 mm
E	13,93 cal/ cm <sup>2</sup>	3,39 cal/ cm <sup>2</sup>	33,46 cal/ cm <sup>2</sup>
Categoria EPI	3	1	4

Fonte: Autor (2021)

Para a instalação em análise nesse trabalho, foram consideradas críticas as instalações com energia incidente maior ou igual a 8 cal/cm<sup>2</sup>, nas quais correspondem a utilização da categoria de risco grau 3. É imprescindível proteger o trabalhador com vestimenta adequada, com nível de proteção no mínimo igual à energia incidente da instalação (SOUZA, J. J. B. De; PEREIRA, J. G., 2008). Desta forma, a categoria de EPI até classe 2 demonstra-se ser razoável no ponto de vista prático, uma vez que as mesmas apresentam um certo grau de conforto e mobilidade durante a prática das atividades de manutenção.

Verifica-se através da Tabela 2, que dois painéis da subestação apresentaram valores críticos de energia incidente, sendo o pior caso deles, CCM-BT, onde é necessária a utilização de vestimentas classe 4. Com o uso desse tipo de vestimenta, a condição de trabalho é altamente afetada e existe um custo elevado com aquisição e manutenção deste tipo de EPI. Este tipo de situação é danosa à concentração e desenvolvimento de atividades laborais, pois movimentos precisos não são possíveis devido à espessura das proteções. Em locais com clima quente, a condição de trabalho pode inclusive trazer problemas à saúde, como desmaios e enxaquecas devido à alta temperatura do corpo.

## 5.3 Análise de resultados e propostas de redução de energia incidente

Uma vez determinados os painéis que apresentam níveis de energia incidente críticas, faz-se necessário buscar medidas de redução do risco ao qual estão expostos as pessoas e equipamentos levando-se em consideração que a planta em questão já está em operação. Como visto na Seção 4, a medida mais adequada, neste caso, é a instalação de relé de proteção contra arco elétrico, capaz de desligar o disjuntor na presença de altas correntes e luz proveniente do arco, com um tempo de atuação mínimo.

A utilização de sensores de luminosidade para detecção do arco torna o tempo de atuação do dispositivo de proteção dependente apenas do tempo de atuação do relé de proteção contra arco e não mais da corrente passante no dispositivo de proteção no momento do arco. Além disso, elimina-se a necessidade de análise do coordenograma e dos cálculos de valor de corrente de arco mínima, sendo o pior caso sempre quando a corrente de curto-circuito do painel é máxima.



Para o estudo de caso presente, será considerado a instalação do dispositivo relé de detecção de arco SEL-751A- *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL, 2020). Seu tempo de detecção e atuação do relé é de 2 ms. Portanto, o tempo total para interrupção do arco será o tempo de abertura do disjuntor (0,075 s) acrescido do tempo do relé mencionado acima, 0,002 s, resultando em 0,077 s.

**Tabela 3 – Energia incidente com sistema de monitoramento óptico**

Dados	QD-02	CCM-MT	CCM-BT
Relé	1A1	2A1	3A1
Fator de correção do Invólucro (CF)	1,061	1,069	1,067
Corrente de arco	13,9 kA	4,52 kA	22,71 kA
Corrente de arco min.	13,73 kA	4,42 kA	19,92 kA
Tempo de abertura	0,075 s	0,075 s	0,075 s
Tempo de arco	0,077 s	0,077 s	0,077 s
Tempo de arco mínimo	0,077 s	0,077 s	0,077 s
AFB	1093 mm	515 mm	967 mm
E	1,59 cal/ cm <sup>2</sup>	0,49 cal/ cm <sup>2</sup>	3,98 cal/ cm <sup>2</sup>
Categoria EPI	1	0	1

Fonte: Autor (2021)

Ao analisarem-se as Tabelas 2 e 3, é evidente a diferença de energia incidente liberada entre as diferentes filosofias de proteção, além dos níveis de distância segura de operação (AFB) mudarem a dinâmica de operação e acessibilidade dos painéis.

Para os painéis QD-02 (I) e CCM-BT (III), onde houveram maiores níveis de energia incidente, a seletividade convencional deve ser evitada, uma vez que resultou em um alto nível de categoria de risco e conseqüentemente em um elevado AFB. Com a aplicação do relé monitor de arco a atenuação dos níveis de energia incidente foram superiores a 85%, atendendo assim a premissa de reduzir os valores para categoria mínima 2. Além disso, o operador pode estar consideravelmente mais próximo ao painel. Para a utilização destes relés, é necessário fazer uma análise dos painéis existentes, verificando junto aos desenhos construtivos se há espaço e estrutura física para instalação dos módulos, sensores e cabos.

Para o CCM-MT (II), a seletividade convencional apresentou uma redução baixa de categoria de risco, uma vez que com a seletividade lógica da instalação não era crítica. Entretanto, é importante analisar que os níveis de energia incidente e AFB diminuíram significativamente com a aplicação do relé monitor de arco, reduzindo em 85% os níveis de energia incidente e tornando as operações no painel mais acessíveis. É importante mencionar que apesar da categoria de risco ter sido reduzida a zero, a NFPA 70E (NFPA, 1999) recomenda uso de vestimenta antichama, ainda que no nível mais básico de proteção, para intervenções em instalações elétricas. Neste caso, deve-se efetuar uma análise do custo benefício da aplicação desta filosofia.

Para a escolha do tipo de sensor mais adequado, deve-se levar em consideração a estrutura do painel e a disponibilidade para a instalação, uma vez que para instalar tal sistema, é necessário que o painel esteja desenergizado. Para a aplicação nos CCMs, é recomendado a utilização do sensor tipo fibra óptica em virtude da sua grande capacidade de enlace para o elevado número de compartimentos existente. Usualmente, para fins de projeto, a fibra deve percorrer todas as colunas de CCM principalmente nos pontos de maior incidência de arco elétrico, normalmente, nos compartimentos de entrada de cabos, conexões com o disjuntor e transições das seções dos barramentos. Infere-se, portanto que para este tipo de instalação, deve-se analisar os aspectos construtivos do painel e o trecho no qual a fibra irá percorrer, para que a instalação se torna eficaz e menos custosa.

Para o QD-02, ambas soluções são factíveis, caso seja escolhida a opção por fibra óptica, deve-se analisar a sua transição de um compartimento para o outro. Quando necessário

realizar novos furos no painel, deve-se ter o cuidado para que não haja comprometimento da isolação e segurança do cubículo e, caso necessário, o fabricante deve ser consultado. A utilização do sensor pontual neste caso se torna mais viável em virtude do menor número de compartimentações existentes, além do mesmo possuir uma fácil instalação e identificar o local exato de uma possível falta. Usualmente, devido a forma construtiva dos cubículos de média tensão são instalados três sensores por compartimento, um no compartimento de entrada de cabos, um na conexão com o disjuntor e outro no barramento geral.

## 6. Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise aos riscos do arco elétrico, permitindo avaliar e definir um método de redução de energia incidente em painéis BT e MT. Conforme já destacado, o arco elétrico pode causar diversos riscos extremamente nocivos à saúde humana, bem como os efeitos devastadores das queimaduras que frequentemente são irreversíveis.

Pode-se concluir que os conceitos apresentados no decorrer das seções aliados ao estudo de caso real - típico da indústria, implementado através PTW, permitem uma análise detalhada para cada situação e nível de energia incidente, correlacionando com o nível do risco de um eventual acidente com arco elétrico.

Para determinar a energia incidente, foi escolhido o método da IEEE 1584, tal metodologia ocupa um lugar de destaque no ambiente industrial, sendo utilizada em larga escala, dentro dos seus limites de aplicação.

Com o intuito de viabilizar o cálculo de energia incidente e tornar a obtenção dos resultados de maneira mais prática, foi desenvolvida uma ferramenta gráfica de fácil interface através da plataforma *Microsoft Desenvolvedor Excel*.

Especificamente, sobre a aplicação do relé de detecção óptica de arco elétrico para mitigar a energia incidente, verificou-se a efetividade do método diante dos elevados níveis de energia incidente encontrados no estudo de caso real. A redução significativa de energia incidente permitiu a adequação das áreas ao correto EPI através de reduções do nível de energia incidente em 85%. Níveis menores de energia incidente, implicam diretamente na redução dos custos com as vestimentas necessárias para proteção dos trabalhadores, viabilizando o investimento da implementação do relé de detecção óptica de arco. Além de garantir a eficiência operacional fabril, evitam-se paralizações desnecessárias de produção, reduzem-se os riscos aos operadores e mantém-se a integridade física das instalações e painéis elétricos. Cabe ao corpo de engenharia buscar conceitos, métodos e ações para aumentar a segurança de todos que irão interagir durante a vida útil da instalação elétrica ou equipamento projetado.

## Referências

### Livros

SOUZA, J. J. B. De; PEREIRA, J. G. **NR-10 Comentada**: Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10. São Paulo: LTR, 2008.

RÜDENBERG, R., **Electrical shock waves in power systems: traveling waves in lumped and distributed circuit elements** - 1ed. Cambridge: Harvard University Press, 1968.

### Normas

IEEE. **IEEE 1584**: IEEE - Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. 2018.

NFPA. **NFPA 70E**: Standard for electrical safety in the workplace. 1999.

### Artigos de periódico

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

LEE, R. H. The other electrical hazard: electric arc blast burns. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-18, n. 3, p. 246-251, May 1982.

### Manuais

ABB. **Disjuntor de média tensão a vácuo com comando mecânico**. Disponível em: [https://library.e.abb.com/public/9a4f7173b93348d2b71720d7f15e72fe/LE\\_VD4\(PT\)E\\_1VCP000186-1610.pdf](https://library.e.abb.com/public/9a4f7173b93348d2b71720d7f15e72fe/LE_VD4(PT)E_1VCP000186-1610.pdf) Acesso em: 23 ago. 2020

SEL. **Memória de cálculo para os ajustes do relé de proteção de alimentador SEL-751A**. Disponível em: [https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Flyers/PF00154PT\\_751A\\_20181001\\_WEB.pdf?v=20191025-174517](https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Flyers/PF00154PT_751A_20181001_WEB.pdf?v=20191025-174517) Acesso em: 23 ago. 2020

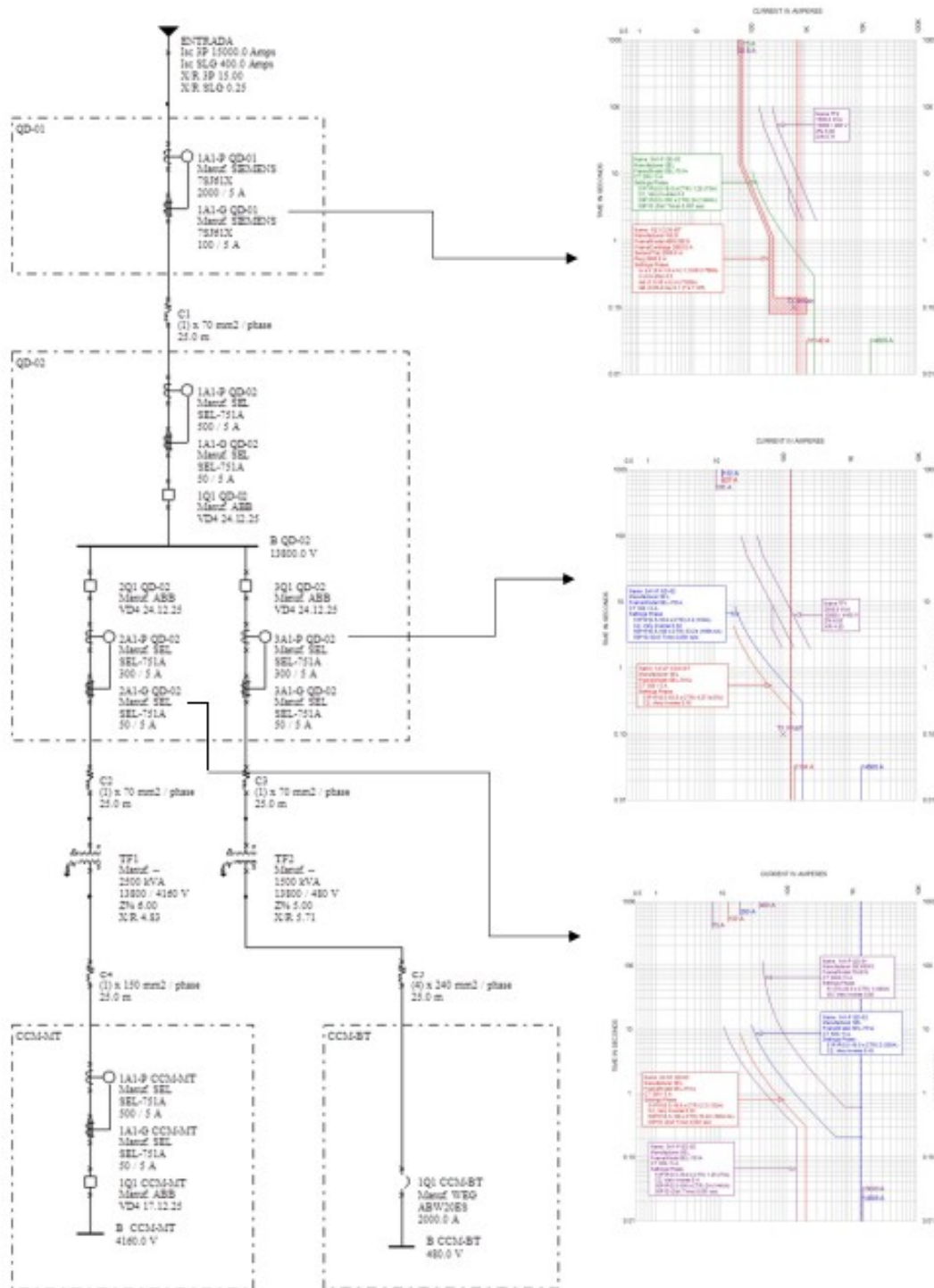
### Publicações periódicas consideradas em parte (suplementos, fascículos, números especiais)

ALMEIDA A. B.; CATELANI JR.; LUIZ C. Aterramento temporário: A medida provisória usada em redes elétricas desenergizadas protege o trabalhador. **Revista Proteção**, ed. 195, 2008.

## ANEXO

A Figura 4 apresenta os diagramas unifilares dos quadros avaliados nos estudos de caso. Além disso, apresenta os respectivos coordenogramas da análise convencional.

Figura 4 – Diagramas unifilares e coordenogramas do estudo de caso



Fonte: o Autor (2021).