

ESTUDO E APLICAÇÃO DA NORMA IEEE 1584-2018 PARA CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE EM PAINÉIS INDUSTRIAIS COM FOCO NA PREVENÇÃO DE ARCOS ELÉTRICOS

Eduardo Pauli, Arthur G. Bartsch.

Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

e-mail: edu.pauli@hotmail.com, arthur.bartsch@gmail.com.

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC – 17/08/2021

Resumo – O objetivo deste documento é apresentar a metodologia para cálculo de energia incidente, aplicando-se o disposto na norma IEEE 1584-2018, expor a influência que os sistemas de proteção industriais exercem sobre a energia incidente, realizar um estudo de caso para uma planta real onde serão determinados as vestimentas antichamas necessárias para mitigar os riscos de se trabalhar em painéis energizados propondo soluções para a redução da energia incidente. Ao término será proposto um *software* desenvolvido no desenvolvedor *Excel* no qual possibilitará a determinação dos níveis de energia incidente presentes no sistema elétrico além de determinar o limite de aproximação segura ao arco elétrico (AFB) através dos cálculos apresentados.

Palavras-Chave – IEEE-1584, Energia incidente, AFB, Curto-circuito, Relés de detecção de arco, Arco elétrico, Segurança.

STUDY AND APPLICATION OF THE IEEE 1584-2018 STANDARD FOR CALCULATION OF INCIDENT ENERGY IN INDUSTRIAL PANELS WITH A FOCUS ON THE PREVENTION OF ELECTRIC ARCS

Abstract – The purpose of this document is to present the methodology for calculating incident energy, applying the provisions of IEEE 1584-2018, exposing the influence that industrial protection systems have on incident energy, conducting a case study for a plant real where the flameproof garments necessary to mitigate the risks of working on energized panels will be determined, proposing solutions to reduce the incident energy. At the end, an Excel developer software will be proposed, which will enable the determination of the incident energy levels present in the electrical system, in addition to determining the safe approach limit to the electric arc (AFB) through the calculations presented.

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

I. INTRODUÇÃO

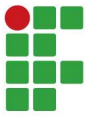
Com o crescente aumento da demanda mundial por energia, os serviços relacionados à eletricidade ganharam destaque no que diz respeito à segurança pessoal dos operadores e a integridade da própria instalação. Frequentemente, certas operações de manutenção e operação em painéis podem ocasionar arcos elétricos 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 [1].

Lee (1982) em seu trabalho *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* [2], 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). Nesse mesmo trabalho, ele determinou uma metodologia puramente teórica para o cálculo de energia incidente.

Doughty-Neal (2000) [3], 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. A metodologia apresenta um progresso em relação ao método teórico de Ralph Lee que se mostrava muito conservador. O trabalho de Doughty e Neal possibilitou uma maior compreensão do fenômeno do arco elétrico bem como um aperfeiçoamento na forma de cálculo da energia incidente [3].

Os métodos supracitados acima, apesar da sua inestimada 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 [4]. 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 [3].

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) desenvolveu a norma IEEE-1584 (2002). 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 do que foi apresentado por Doughty-Neal [4].

Esta norma possui duas versões, sendo a primeira delas lançada em 2002 e revisada em 2018. Esta atualização implica alterações significativas na metodologia de cálculo adotada até então. Conseqüentemente, é necessário revisar os procedimentos adotados na indústria no desenvolvimento de sistemas de proteção contra arcos elétricos.

Este trabalho tem a finalidade de apresentar os conceitos de arco elétrico e energia incidente, determinar os níveis de energia incidente de todos os painéis elétricos presentes em uma subestação de uma unidade industrial real, utilizando a metodologia apropriada. O trabalho também propõe medidas de controle para os riscos oriundos do arco elétrico para as pessoas e instalação, passando pelo correto dimensionamento das vestimentas antichama.

O trabalho divide-se em oito seções. Na Seção II, é apresentada a definição do arco elétrico. Na Seção III, é apresentado a definição de energia incidente. Na Seção IV, é proposta uma metodologia de cálculo para energia incidente provida pela a IEEE. Na Seção V, são apresentados os métodos e dispositivos para a redução da energia incidente. Na Seção VI, é apresentado um *software* para cálculo da energia incidente e especificação do EPI. Na Seção VII, é apresentado um estudo de caso e na Seção VIII são apresentadas as conclusões.

II. DEFINIÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

Conforme a teoria de Reinhold Rüdénberg [5], 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:

- 1) Poeira e impurezas acumuladas nos isoladores e equipamentos;
- 2) Descargas parciais ou depreciação da isolação;
- 3) Centelhamento devido à sobretensões e transitórios;
- 4) Defeitos de fabricação de componentes;
- 5) Manobras indevidas, como aberturas em carga de seccionadoras não adequadas a tais manobras;
- 6) Reposição de fusível, contator ou disjuntor com o circuito energizado ou em curto-circuito;
- 7) 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 [6]. 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 [13].

III. ENERGIA INCIDENTE

A energia incidente, mensurada em cal/cm², 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 [1], 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 [4] apresenta menores limitações de operação e resultados mais realistas se comparados a outros métodos de cálculo como Ralph Lee [2] e Doughty-Neal [3], 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 [6].

IV. METODOLOGIA DE CÁLCULO IEEE 1584 -2018

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 [4].

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

- O sistema deve ser trifásico;
- Frequência entre 50 Hz e 60 Hz;
- Tensão de alimentação entre 208 V e 15 kV;
- Corrente de curto-circuito em valor eficaz da componente simétrica:
Entre 208 V e 600 V: de 500 A a 106 kA.
Entre 601 V e 15000 V: de 200 A a 65 kA.
- Espaçamentos entre condutores:
Entre 208 V e 600 V: 6,35 mm a 76,2 mm.
Entre 601 V e 15000 V: 19,05 mm a 254 mm.
- 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 Fig. 1 e explanado nas Subseções A-L, da presente Seção IV.

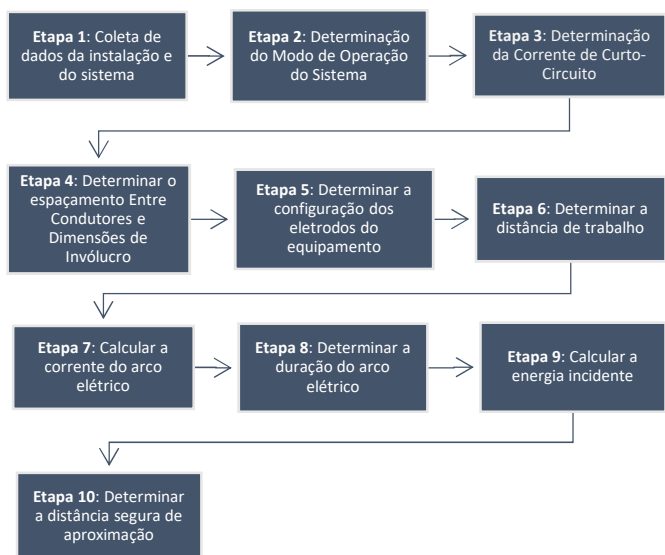


Fig. 1. Diagrama de blocos das etapas para o cálculo de energia incidente de acordo com a norma IEEE 1584-2018. Fonte: [4]

A. Coleta de dados do sistema

Esta etapa requer um mapeamento e levantamento dos dados da instalação e também do painel que está sob análise. As informações podem ser coletadas diretamente em campo

ou através dos diagramas unifilares atualizados. Todas as fontes de energia devem ser consideradas, bem como dados da distribuidora de energia elétrica, geradores, transformadores, capacitores, filtros de harmônicos, barramentos, disjuntores, relés e cabos. Além disso, motores com potência superior a 37 kW que não são acionados por chave de partida estática também devem ser considerados, pois contribuem significativamente com a corrente de curto-circuito. Centro de controle de motores (CCM), cubículos de média tensão e outros equipamentos importantes no cálculo de corrente de curto-circuito também devem ser considerados [7].

De posse dos dados, é possível realizar estudo de curto-circuito para determinar a corrente de curto-circuito trifásica simétrica em cada ponto de interesse. Esse estudo posteriormente será necessário para determinar a energia incidente.

B. Determinação do modo de operação do sistema

Nesta etapa, é necessário analisar todos os modos de operação do sistema elétrico. Em sistemas mais complexos, podem haver diversos modos de operação, dentre eles, podemos citar:

- CCMs com um ou dois alimentadores sendo um ou ambos energizados;
- Geradores funcionando em paralelo com a alimentação da distribuidora ou em modo de espera;
- Geradores atuando com carga máxima ou mínima;
- Subestações com um ou mais alimentadores primários;
- Um ou mais alimentadores em operação;
- Disjuntor de barramento do secundário da subestação da concessionária aberto ou fechado;

Cada modo de operação poderá fornecer um valor distinto de corrente de curto-circuito. Portanto, devem ser executados os cálculos de energia incidente para todos os modos de operação presente na planta para determinar o maior resultado de energia incidente e arco elétrico para cada possível localização de arco.

C. Determinação da corrente de curto-circuito

Nesta etapa, deve-se determinar os valores das correntes de curto-circuito nos pontos da instalação de cada equipamento. É necessário considerar todas as correntes de curto-circuito, máximas e mínimas. Correntes de curto-circuito mais altas podem resultar em tempos de disparo mais curtos para dispositivos de proteção de sobrecorrente, resultando em uma energia incidente menor. Correntes de falta mais altas sem uma diminuição no tempo de abertura do dispositivo de proteção de sobrecorrente resultam em uma energia incidente maior. Correntes de falta mais baixas podem resultar em um tempo de abertura mais longo para o dispositivo de proteção de sobrecorrente, aumentando assim a energia incidente.

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. Esse cálculo deve determinar os valores de corrente de curto-circuito nos pontos da instalação onde os trabalhadores desenvolvem suas atividades e em áreas sujeitas à necessidade de manutenção ou chaveamento enquanto energizadas.

D. Determinação do espaçamento típico e tamanho do painel

Nesta etapa, deve-se estabelecer as distâncias entre os condutores e as dimensões do painel. Em muitos casos, não é viável obter tais dados através de medidas. Portanto, a IEEE 1584 apresenta valores testados em laboratórios para cada equipamento que faz parte do estudo. A tensão do sistema e a classe de equipamento podem ser usadas para estabelecer os espaçamentos típicos entre os condutores ou barramentos, como mostrado na Tabela I.

TABELA I
Distância típica entre condutores / classe de equipamento

Classe do equipamento	Distância típica entre condutores	Dimensional (A×L×P)
Disjuntor 15 kV	152 mm	1143 mm x 762 mm x 762 mm
CCM 15 kV	152 mm	914,4 mm x 914,4 mm x 914,4 mm
Disjuntor 5 kV	104 mm	914,4 mm x 914,4 mm x 914,4 mm
Disjuntor 5 kV	104 mm	1143 mm x 762 mm x 762 mm
CCM 5 kV	104 mm	660,4 mm x 660,4 mm x 660,4 mm
Disjuntor BT	32 mm	508 mm x 508 mm x 508 mm
CCM's e quadros de BT rasos	25 mm	355,6 mm x 304,8 mm x ≤ 203,2 mm
CCM's e quadros de BT profundos	25 mm	355,6 mm x 304,8 mm x >203,2 mm
Caixa de passagem de cabos	13 mm	355,6 mm x 304,8 mm x ≤ 203,2 mm

E. Determinação da configuração dos terminais (eletrodo) do equipamento

Nesta etapa, a IEEE 1584 estabelece diferentes configurações dos terminais dos equipamentos como parâmetro de cálculo para energia incidente. A disposição desses eletrodos pode determinar a movimentação de nuvem de plasma expelida durante o arco elétrico e interferir nos valores de energia incidente.

Diferentes tipos de equipamentos, como CCMs, painéis de MT e BT, podem conter condutores organizados de maneira semelhante às configurações dos terminais apresentados no Anexo 1. Em casos onde o painel possui diferentes tipos de configurações, deve-se considerar a configuração mais crítica como parâmetro de cálculo, pois a norma não segrega os níveis de energia incidente por compartimentos e sim por painel.

F. Determinação da distância de trabalho

Nesta etapa, a IEEE 1584-2018 estabelece distâncias típicas de trabalho entre o operador e a fonte de origem do arco. A proteção contra arco elétrico é baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou o tronco do trabalhador a uma determinada distância, e não na energia incidente que atinge seus braços e mãos [7]. O nível do dano depende da porcentagem da pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura. A cabeça e o tronco 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 II, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com o tipo de equipamento.

TABELA II
Tipo de equipamento/distância de trabalho

Classe do equipamento	Distância de trabalho
Disjuntor 5 kV e 15 kV	914,4 mm
CCM 5 e 15 kV	914,4 mm
Disjuntor BT	609,6 mm
Caixa de passagem de cabos	457,2 mm
CCM's e quadros BT rasos	457,2 mm
CCM's e quadros BT profundos	457,2 mm

G. Determinação da corrente de arco elétrico

A corrente de arco elétrico nos pontos de interesse da instalação depende principalmente dos valores de corrente de curto-circuito, tensão do sistema, arranjos dos eletrodos e espaçamento entre condutores.

A IEEE 1584-2018 estabelece dois modelos para a determinação da corrente de arco elétrico, o primeiro modelo trata-se de para tensões de circuito aberto: $600 V < V \leq 15 kV$ e $208 V < V \leq 600 V$.

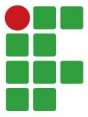
Os valores intermediários de corrente de arco para tensões entre 600 e 15 kV, são obtidos por:

$$I_{arc,Voc} = 10^{(k1+k2 \cdot \log(I_{bf})+k3 \cdot \log(G))} \cdot (k4 \cdot I_{bf}^6 + k5 \cdot I_{bf}^5 + k6 \cdot I_{bf}^4 + k7 \cdot I_{bf}^3 + k8 \cdot I_{bf}^2 + k9 \cdot I_{bf} + k10) \quad (1)$$

onde:

- G - distância típica entre condutores [mm];
- I_{bf} - corrente de curto-circuito trifásico simétrico [kA];
- $I_{arc_{600}}$ - corrente de arco para tensão do sistema em 600 V [kA];
- $I_{arc_{2700}}$ - corrente de arco para tensão do sistema em 2700 V [kA];
- $I_{arc_{14300}}$ - corrente de arco para tensão do sistema em 14300 V [kA];
- $k1 a k10$ - coeficiente fornecidos pela IEEE 1584, na Tabela 1 do Anexo 3.

A Equação (2) descreve a corrente de arco eficaz média para tensões entre 208 V e 600 V. Neste caso o I_{arc} pode ser obtido conforme:



$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{OC}}\right]^2 \cdot \left[\frac{1}{I_{arc,600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{OC}^2}{0,6^2 \cdot I_{bf}^2}\right)\right]}} \quad (2)$$

onde:

- V_{OC} - tensão do sistema [kV];
- I_{bf} - corrente de curto-circuito trifásico simétrico [kA];
- I_{arc} - corrente de arco para a tensão nominal do sistema [kA];
- $I_{arc,600}$ - corrente de arco para tensão do sistema em 600 V [kA].

Para obter-se a corrente de arco final específica para o nível de tensão, deve-se utilizar as Equações de interpolação, dadas por:

$$I_{arc1} = \frac{I_{arc,2700} - I_{arc,600}}{2,1} \cdot (V_{OC} - 2,7) + I_{arc,2700} \quad (3)$$

$$I_{arc2} = \frac{I_{arc,14300} - I_{arc,2700}}{11,6} \cdot (V_{OC} - 14,3) + I_{arc,14300} \quad (4)$$

$$I_{arc3} = \frac{I_{arc1} \cdot (2,7 - V_{OC})}{2,1} + \frac{I_{arc2} \cdot (V_{OC} - 0,6)}{2,1} \quad (5)$$

onde:

- V_{OC} - tensão do sistema [kV];
- I_{arc1} - primeiro termo da interpolação da I_{arc} entre 600 V e 2700 V [kA];
- I_{arc2} - segundo termo da interpolação da I_{arc1} maior que 2700 V [kA];
- I_{arc3} - terceiro termo da interpolação da I_{arc} menor que 2700 V [kA].

Nos casos em que: $600V < V \leq 2700V$, utiliza-se:

$$I_{arc} = I_{arc3}. \quad (6)$$

Nos casos em que: $V > 2700V$, utiliza-se:

$$I_{arc} = I_{arc2}. \quad (7)$$

Em virtude da variação da magnitude que pode ocorrer com o arco elétrico, é necessário calcular um segundo valor de corrente de arco mínima, para determinar se essa variação da corrente tem efeito no tempo de operação dos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, na energia incidente. A energia incidente final ou a distância segura de aproximação é o maior dos dois valores calculados. Para isso, utiliza-se:

$$I_{arc,min} = I_{arc} \cdot (1 - 0,5 \cdot CF_{arc}) \quad (8)$$

$$CF_{I_{arc}} = k1 \cdot V_{oc}^6 + k2 \cdot V_{oc}^5 + k3 \cdot V_{oc}^4 + k4 \cdot V_{oc}^3 + k5 \cdot V_{oc}^2 + k6 \cdot V_{oc} + k7 \quad (9)$$

onde:

- V_{OC} - tensão do sistema [kV];
- $CF_{I_{arc}}$ - fator de correção de variação de I_{arc} ;
- I_{arc} - corrente de arco para a tensão nominal do sistema, [kA];
- $I_{arc,min}$ - corrente de arco mínima baseada no fator de correção de variação de corrente de arco, [kA];
- $k1$ a $k7$ - coeficientes fornecidos pela IEEE 1584, na Tabela 2 do Anexo 3.

H. Determinação da duração do arco elétrico

A determinação da duração do arco deve ser realizada a partir do tempo de atuação das proteções do sistema, sempre considerando o equipamento de proteção existente à montante que interromperá a corrente de arco no caso da falta.

Nas aplicações mais comuns, em qualquer sistema elétrico, se faz uso dos seguintes equipamentos, conforme abaixo:

- Relé de detecção de arco;
- Relés associados com disjuntores ou contadores;
- Fusíveis e disjuntores termomagnéticos.

O tempo de interrupção da corrente de arco é a soma do tempo de sensibilização da proteção com o tempo de abertura física do equipamento. No caso de fusíveis, disjuntores termomagnéticos e relés associados com disjuntores ou contadores, com tempos diretos de atuação, a análise restringe-se às curvas de coordenação, que relacionam a corrente detectada pelo dispositivo com o tempo em que ele irá atuar.

Em casos onde se utiliza dispositivos com tempo de atuação definido, como por exemplo relés de detecção de arco, deve-se analisar o tempo de atuação na própria folha de dados fornecida pelo fabricante.

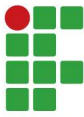
I. Calcular a energia incidente

Quando um modelo do sistema elétrico é desenvolvido, algumas variáveis devem ser levadas em consideração, como por exemplo, a compartimentalização do equipamento e a localização da falta. O modelo matemático para o cálculo de energia incidente foi normalizado para invólucros com dimensões fixas de 508×508×508 mm [4]. Portanto, para calcular a energia incidente para outros tamanhos de invólucros deve ser aplicado um fator de correção para o tamanho do invólucro (CF).

A exemplo da determinação da corrente de arco elétrico, para os cálculos de energia incidente, deve-se inicialmente determinar seus valores intermediários para diferentes níveis de tensão (V_{oc}) contidos no sistema e posteriormente interpola-los para assim encontrar o seu valor final.

1) Determinação da largura e altura equivalente:

Antes de entrar no cálculo da energia incidente, é preciso tratar sobre outro parâmetro importante. Os valores obtidos nos testes realizados pela IEEE para a elaboração dos modelos matemáticos foram obtidos baseados em invólucros com



dimensões de 508 mm x 508 mm x 508 mm. Para que os resultados sejam mais acurados, é necessário o cálculo de um fator de correção (*CF*). Esse foi um dos ganhos em relação à versão anterior da norma, que não considerava o arranjo dos condutores e as dimensões de seus invólucros [4].

Um conjunto de valores de altura e largura equivalentes é determinado com base na tensão do sistema, na configuração do eletrodo, na altura do compartimento e na largura. A profundidade não é considerada a menos que a largura e a altura sejam menores que 508 mm e que a tensão do sistema seja menor que 600 V. A profundidade é usada para classificar o tipo de invólucro como “Típico” ou “Raso” [4].

Para que o invólucro seja considerado “Raso”:

- A tensão do sistema deve ser inferior a 600 V;
- Altura e largura devem ser menores que 508 mm;
- A profundidade do invólucro deve ser inferior a 203,2 mm.

Caso alguma das condições acima não seja atendida deve-se considerar a configuração do tipo “típico” [4]. Dessa forma, pode-se calcular a largura e altura equivalente conforme abaixo:

$$L_{eq} = \left[(660,4 + (L - 660,4) \cdot \left(\frac{V_{OC} + A}{B} \right)) \right] \cdot 25,4^{-1} \quad (10)$$

$$H_{eq} = \left[660,4 + (H - 660,4) \cdot \left(\frac{V_{OC} + A}{B} \right) \right] \cdot 25,4^{-1} \quad (11)$$

onde:

- L_{eq} - largura equivalente do invólucro [mm];
- H_{eq} - altura equivalente do invólucro [mm];
- L - largura do invólucro [mm];
- H - altura do invólucro [mm];
- V_{OC} - tensão do sistema [kV];
- A - constante igual a 4 para eletrodos em arranjo VCB e 10 para arranjos VCBB e HCB;
- B - constante igual a 20 para eletrodos em arranjo VCB e 24 para arranjos VCBB e 22 para HCB.

A Tabela 6, adaptada, contida no Anexo 3, fornece em síntese as diretrizes para determinar a altura e a largura equivalentes do gabinete (H_{eq} e L_{eq}) para diferentes intervalos de dimensões de invólucro e configurações de eletrodo, mencionadas acima.

2) Determinação do tamanho equivalente do invólucro e o fator de correção do invólucro

O próximo parâmetro a ser determinado é o tamanho de invólucro equivalente, onde *EES* é o tamanho equivalente do invólucro obtido através da média aritmética entre a altura equivalente do invólucro e a largura equivalente do invólucro, dado:

$$EES = \frac{H_{eq} + L_{eq}}{2} \quad (12)$$

Com o valor de *EES*, é possível calcular o fator de correção (*CF*) para invólucros “Típicos”, dado por:

$$CF = b_1 \cdot EES^2 + b_2 \cdot EES + b_3 \quad (13)$$

e para invólucros “Rasos”, dado por:

$$CF = \frac{1}{b_1 \cdot EES^2 + b_2 \cdot EES + b_3} \quad (14)$$

onde:

- b_1 a b_3 - coeficientes fornecidos pela IEEE 1584-2018, Tabela 7, Anexo 3;
- CF* - fator de correção de tamanho do invólucro;
- EES* - tamanho de invólucro equivalente.

3) Determinação da energia incidente

Para o cálculo de energia incidente, inicialmente deve-se calcular seus valores intermediários para os níveis de tensão especificados de 600 V, 2700 V e 14300 V e posteriormente utilizar as equações de interpolação para se obter os valores finais de energia incidente.

Assim, a energia incidente para as tensões de circuito aberto padronizadas é dada por:

$$E_{Voc} = \frac{12,552}{50} T \cdot 10^{\left(k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arcVoc}}{C_2} + C_3 + k_{13} \cdot \log(I_{arcVoc}) \right)} \quad (15)$$

Em que:

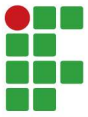
$$C_2 = k_4 \cdot I_{bf}^7 + k_5 \cdot I_{bf}^6 + k_6 \cdot I_{bf}^5 + k_7 \cdot I_{bf}^4 + k_8 \cdot I_{bf}^3 + k_9 \cdot I_{bf}^2 + k_{10} \cdot I_{bf} \quad (16)$$

$$C_3 = k_{11} \cdot \log(I_{bf}) + k_{12} \cdot \log(D) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \quad (17)$$

onde:

- E_{Voc} - energia incidente quando a tensão de circuito aberto V_{oc} é de 600 V, 2700 V, 14300 V ou ≤ 600 [J/cm²];
- T - tempo de duração do arco [s];
- G - distância típica entre condutores [mm];
- I_{arcVoc} - corrente de arco para tensão do sistema V_{oc} é de 600 V, 2700 V, 14300 V ou ≤ 600 [kA];
- I_{bf} - corrente de curto circuito trifásico simétrico [kA];
- k_1 a k_{13} - coeficientes fornecidos pela IEE 1584 -2018, Tabela 3 a 5 do Anexo 3.

Tendo em posse os valores intermediários, é possível interpolar o valor final de energia incidente, para um dado nível de tensão V_{OC} em kV, utilizando:



$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \cdot (V_{OC} - 2,7) + E_{2700} \quad (18)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \cdot (V_{OC} - 14,3) + E_{14300} \quad (19)$$

$$E_3 = \frac{E_1 \cdot (2,7 - V_{OC})}{2,1} + \frac{E_2 \cdot (V_{OC} - 0,6)}{2,1} \quad (20)$$

onde:

E_1 - primeiro termo da interpolação para tensão do sistema entre 600 V e 2700 V, [J/cm²];

E_2 - segundo termo da interpolação para tensão do sistema maior que 2700 V, [J/cm²];

E_3 - terceiro termo da interpolação para tensão do sistema menor que 2700 V, [J/cm²];

- Caso $600 V < V_{OC} \leq 2700 V$, $E = E_3$;
- Caso $V_{OC} > 2700 V$, $E = E_2$;
- Caso $V_{OC} \leq 600 V$, $E = E_{\leq 600}$.

Para converter o valor final de energia incidente de [J/cm²] para [cal/cm²], basta dividir E por 4,184.

L. Determinar as distâncias de segurança de aproximação

Nesta etapa, determina-se a distância segura de aproximação do operador com os terminais (eletrodos) e condutores energizados para que em caso de arco o operador não seja submetido a uma energia incidente maior que 1,2 cal/cm² (5 J/cm²). Para calcular a distância segura de aproximação, inicialmente deve-se determinar os valores intermediários calculados a partir de:

$$AFB_{600} = 10^{\frac{k1+k2 \cdot (\log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc600}}{C2} + C4 + k1 \cdot (\log(I_{arc600}))}{-k12}} \quad (21)$$

$$AFB_{2700} = 10^{\frac{k1+k2 \cdot (\log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc2700}}{C2} + C4 + k13 \cdot (\log(I_{arc2700}))}{-k12}} \quad (22)$$

$$AFB_{14300} = 10^{\frac{k1+k2 \cdot (\log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc14300}}{C2} + C4 + k1 \cdot (\log(I_{arc14300}))}{-k12}} \quad (23)$$

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\frac{k1+k2 \cdot (\log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc}}{C2} + C4 + k1 \cdot (\log(I_{arc}))}{-k12}} \quad (24)$$

$$C4 = k11 \cdot \log(I_{bf}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{T}\right) \quad (25)$$

onde:

AFB_{600} - distância de segurança quando $V_{OC} = 600 V$, [mm];

AFB_{2700} - distância de segurança quando $V_{OC} = 2700 V$, [mm];

AFB_{14300} - distância de segurança quando $V_{OC} = 14300 V$, [mm];

$AFB_{\leq 600}$ - distância de segurança quando $V_{OC} \leq 600 V$, [mm];

T - tempo de duração do arco [s];

G - distância típica entre condutores [mm];

CF - valor 1 para as configurações VOA e HOA;

$k1$ a $k13$ - coeficientes fornecidos pela IEEE 1584 -2018, Tabela 3 a 5 do Anexo 3.

Calculado o valor intermediário, pode-se calcular o valor final utilizando:

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} \cdot (V_{OC} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (26)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} \cdot (V_{OC} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (27)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 \cdot (2,7 - V_{OC})}{2,1} + \frac{AFB_2 \cdot (V_{OC} - 0,6)}{2,1} \quad (28)$$

onde:

AFB_1 - primeiro termo da interpolação para tensão do sistema entre 600 V e 2700 V, [mm]

AFB_2 - segundo termo da interpolação para tensão do sistema maior que 2700 V, [mm];

AFB_3 - terceiro termo da interpolação para tensão do sistema menor que 2700 V, [mm];

V_{OC} - tensão do sistema [kV].

Nos casos em que a tensão do circuito for superior a 600 V e inferior a 2700 V, deve-se utilizar:

$$AFB = AFB_3. \quad (29)$$

Quando a tensão de circuito for superior a 2700 V, utiliza-se:

$$AFB = AFB_2. \quad (30)$$

Quando a tensão de circuito for inferior a 600 V, aplica-se:

$$AFB = AFB_{\leq 600}. \quad (31)$$

V. MÉTODOS E DISPOSITIVOS PARA A REDUÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE

A mitigação dos efeitos do arco voltaico para controlar a energia incidente deve ser encarada como caráter obrigatório em qualquer instalação elétrica, seja essa uma instalação nova ou uma instalação já existente e em operação. Existem inúmeras maneiras de mitigar os efeitos dos arcos voltaicos. De maneira geral, procura-se um método que de alguma maneira minimize uma das variáveis responsáveis por elevar o nível de energia incidente, que pode ser calculada pelos procedimentos apresentados na Seção IV.

Na Tabela III, são apresentados os métodos mais aplicados em subestações atualmente [7].

TABELA III
Medidas mitigatórias para os efeitos do arco voltaico

Tipo de proteção	Consequências Operador	Consequências Painel
Dispositivos limitadores de curto-circuito	Sem proteção	Sem proteção
EPIs	Proteção total	Sem proteção
Painel resistente a arco	Proteção total	Sem proteção
Operação à distância	Proteção total	Sem proteção
Relé de detecção de arco	Proteção total	Proteção total

Na grande maioria dos casos, a utilização individual de uma das medidas de mitigação dos efeitos do arco voltaico apresentadas na Tabela III não é o suficiente. A necessidade real de uma planta de média e baixa tensão é a proteção total do equipamento e também a proteção total dos operadores. Para alinhar esta necessidade, conforme a Tabela III, só é possível se utilizado algum método de detecção do arco voltaico.

Por esse motivo, a aplicação desses relés deve ser priorizada em um projeto que objetive reduzir os níveis de energia incidente. Entretanto, as cinco técnicas relacionadas na Tabela III podem ser aplicadas conjuntamente, o que aumenta consideravelmente o nível de segurança da instalação. Dentre os relés mais confiáveis e utilizados está o relé por sensoriamento óptico.

A. Dispositivos limitadores de curto-circuito

Uma das medidas para reduzir a ocorrência do arco elétrico e sua magnitude está na inclusão de alguns dispositivos que operam com o intuito de limitar as correntes de curto-circuito. As principais características destes dispositivos são a baixa impedância durante a operação normal e alta impedância durante o curto-circuito. Também é importante que a transição entre o modo de operação normal e o modo limitador seja rápida. Sob este aspecto, destacam-se duas possibilidades para redução das correntes de curto-circuito: a instalação de transformadores de alta impedância, que aumenta a impedância do circuito durante a falta, mas aumentam as perdas no transformador, redução da potência e aumento da quantidade dos transformadores, segregando as cargas em mais painéis e barramentos. A instalação de reatores de limitação, que são inseridos em série com o circuito e implicam em um acréscimo de impedância para o circuito durante a falta, porém, aumentando a queda de tensão no circuito em questão [8].

As ações mencionadas acima são soluções efetivas para a diminuição dos níveis da energia incidente, porém podem demandar recursos financeiros expressivos, um prazo razoável para sua implementação, além de intervenções mais dispendiosas na instalação, sendo melhor implementadas quando previstas no projeto inicial.

B. Equipamentos de proteção individual (EPI)

Para qualquer atividade, em qualquer área funcional, existem normas regulamentadoras para seleção de EPIs

(equipamentos de proteção individual), no caso de serviços com eletricidade a NR-10 [4], que define de maneira genérica os EPIs para serviços com eletricidade. Quando o assunto é proteção contra arco voltaico, deve-se obedecer ao especificado na NFPA-70E [9], que especifica o tipo de vestimentas e EPIs de acordo com o nível de energia incidente no determinado painel. No Anexo 2, é possível observar as exigências mínimas para vestimentas e EPIs de acordo com o valor obtido no cálculo de energia incidente.

Quando os operadores estão expostos a energias incidentes acima de 40 cal/cm², por não existir materiais que suportem tamanho calor, a norma exige que os trabalhos sob estas condições sejam executados com o painel desligado. Desta forma, a probabilidade de ocorrer um arco voltaico é praticamente zero.

Na Fig. 2, são apresentados alguns exemplos de vestimentas resistente a arco com categoria de risco que varia de um até quatro. A suportabilidade deste tipo de EPI deve ser de no mínimo 40 cal/cm² [9]. As condições de trabalho com este tipo de EPI são bastante prejudicadas, visto que o operador trabalha em uma condição desconfortável que não deve durar muito, pois as condições inapropriadas de trabalho podem levar ao erro. Alguns modelos deste tipo de equipamento de proteção são equipados com sistema de ventilação forçada para diminuir o desconforto e sensação de sufocamento gerados pela roupa.



Fig. 2. Exemplos de vestimentas de proteção. Fonte: [10].

C. Painel resistente a arco

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, tendo a possibilidade de atingir pessoas próximas ao local da ocorrência [7].

Para que o painel possa ser considerado resistente a arco interno, é necessário que ele seja submetido a testes conforme o disposto em algumas normas e guias técnicos. As normas e guias internacionais que descrevem as etapas de teste são a IEC TR 61641 e a IEC 60298 [13].

Ao atender aos critérios solicitados na norma, listados abaixo, são assegurados a integridade física dos operadores e demais pessoas que possam estar aos arredores do painel no instante que ocorrer um arco voltaico. Tais critérios incluem:

- Portas e tampas não deverão abrir;
- Não deverão ser provocadas, pelo arco, aberturas ou fendas acessíveis;
- Indicadores verticais não deverão ser inflamados;
- O sistema de aterramento não deverá ser afetado;
- Indicadores horizontais não poderão ser inflamados pelos gases quentes (altura do teto de no mínimo 3,6m do piso);
- Partes que podem representar perigo não devem ser projetadas para fora do painel.

Hoje os painéis de média tensão, conjunto de manobra e controle de média tensão são regulamentados, principalmente, pelas normas ABNT NBR IEC 62271-200 e IEC 60298. [13], que exigem que os painéis com tensão nominal entre 1 kV e 52 kV possuam classificação de arco, isto é, devem ser resistentes a arco interno. Esta certificação garante maior robustez à estrutura do painel, bem como maior segurança ao operador.

Conforme a norma ABNT NBR IEC 62271-200, as condições supracitadas devem ser todas atendidas para um arco com duração mínima de um segundo. Outro ponto exigido em norma é a segregação dos compartimentos, ou seja, o painel deve ter compartimentos isolados para cada função do painel. A Fig. 3 representa um cubículo de média tensão com a compartimentação mais comum disponível no mercado. A separação dos compartimentos é indispensável em painéis para garantir que uma falha como um arco voltaico fique apenas no compartimento que lhe deu origem não danificando outros compartimentos e também garante o livre acesso sem a necessidade de desligar todo o painel para uma simples manutenção.

Por outro lado, esta forma construtiva dificulta operações como inspeção termográfica, monitoramento de arco (dependendo do método de detecção pode inviabilizar a aplicação) e dificulta até mesmo simples inspeções visuais.



Fig. 3. Cubículo de média tensão. Fonte: [14].

Em casos de painéis de BT, conforme exemplificado na Fig. 4, a forma construtiva resistente a arco não necessariamente é obrigatória. Quando aplicável, deve-se respeitar a norma IEC TR 61641, na qual a finalidade 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 as pessoas e os danos no próprio painel na ocorrência de um arco interno. A aplicação dos testes definidos nessa norma é voluntária e eles podem ser realizados por interesse do próprio fabricante do painel ou por meio de um acordo entre o fabricante e o usuário final.



Fig. 4. Centro de controle de motores (CCM). Fonte: [14].

D. Operação a distância

As operações a distâncias, ou remotas, têm se tornado uma tendência na linha de componentes de média tensão. Equipamentos que não existiam no mercado a poucos anos, ou não eram solicitados em obras novas, hoje começam a ser tratados como indispensáveis. Os principais equipamentos de manobra remota são:

- Inserção e extração de disjuntores e contadores de média tensão motorizados;
- Varas de manobras;
- Extensões nas fiações de comando dos elementos de manobra;
- Relés micro processados com redes de comunicação e sistemas supervisórios.

No entanto, todas estas alternativas apresentam uma diminuição nos riscos apenas em atividades rotineiras como comandos de abertura e fechamento local, ou de manutenção do próprio equipamento no caso da inserção e extração motorizada de disjuntores e contadores. Em casos que se faz necessária a presença do electricista de manutenção no painel para executar algum serviço ou reparo, a operação remota na maioria das vezes não é possível.

E. Detecção de arco voltaico por monitoramento 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. Os sensores mais utilizados para tal filosofia de proteção são obtidos através das subseções 1 e 2.

1) Sensores de arco

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. Este tipo de sensor possui um ponto focal, o que reduz a possibilidade do sensor atuar indevidamente devido a alguma luminosidade externa. Este tipo de sensor possui alta sensibilidade e sua faixa de captação pode abranger 4 m [6]. Em virtude do seu ângulo de atuação direcional, esses sensores são normalmente dedicados a um só compartimento do painel.

O sensor de fibra óptica realiza a detecção de luz através de toda a sua superfície, possuindo a vantagem de poder cobrir uma área extensa de um painel através de um enlace único. Porém, dada à extensão da fibra óptica, ela pode vir a sofrer danos devido a dobras e pressões, podendo inviabilizar sua utilização em alguns equipamentos. Para que a fibra óptica detecte a luz apenas em pontos definidos, a mesma deve ficar coberta em toda sua extensão, sendo exposta somente na área onde é desejada a detecção [10]. A imagem contida na Fig. 4, exemplifica a atuação conjunta entre os sensores e os relés de proteção sobre um determinado barramento.

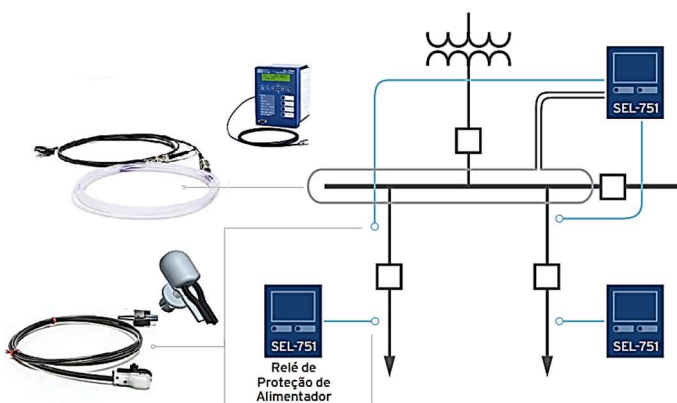


Fig. 4. Esquema de detecção para fibra óptica e sensor pontual. Fonte: [11].

2) Relés de proteção numérico com detecção de arco integrada

Os relés de proteção numéricos, conforme descrito previamente, podem possuir o recurso para detecção de arco,

sendo dotados de entradas opcionais para os sensores luminosos. A proteção pode ser combinada ainda com elementos para detecção de sobrecorrente de fase e neutro, garantindo uma atuação rápida e confiável do sistema de proteção durante eventos envolvendo arco elétrico [11].

Além da possibilidade de conexão dos sensores luminosos, outra característica importante deste relé 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 [11].

No relé utilizado neste estudo [11], são utilizadas as seguintes funções de sobrecorrente relacionadas à detecção de arco elétrico:

- 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 [11].

O exemplo desta lógica comparativa de sinais para a atuação sobre o relé é exemplificado na Fig. 5.

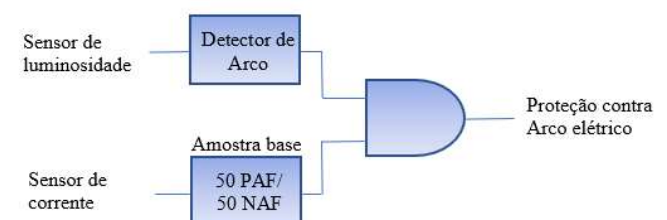


Fig. 5. Diagrama lógico de *trip* para detecção de arco elétrico. Fonte: Autor.

VI. SOFTWARE PARA CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE E ESPECIFICAÇÃO DO EPI

Esta seção propõe a aplicação de uma ferramenta gráfica desenvolvida para a determinação dos parâmetros calculados na Seção IV, de acordo com a IEEE 1584-2018. Consequentemente, 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:

- TAG ou nomenclatura do painel;
- Tensão de linha eficaz do sistema [kV];
- Corrente de curto-circuito trifásica simétrica [kA];
- Distância entre condutores [mm];
- Tempo total de arco [s];
- Tempo de arco mínimo [s];
- Distância de operação [mm];
- Altura do compartimento ou painel [mm];
- Largura do compartimento ou painel [mm];
- Profundidade do compartimento ou painel [mm];
- Configuração dos terminais [VCB, VCBB, HCB, VOA, HOA].

A interface do *software* desenvolvido, bem como os seus resultados no estudo de caso podem ser observados no Anexo 6. Onde a interface inicial e os resultados finais podem ser apresentados em três idiomas: português, inglês e espanhol.

VII. 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 4.

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 nos Anexos 4 e 5.

A. Características gerais da planta

Conforme o diagrama unifilar apresentado no Anexo 4, 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 Fig. 6. 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 [12].

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 IV, indica as principais características estruturais e mecânicas dos compartimentos estudados.

TABELA IV
Características gerais da compartimentação

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

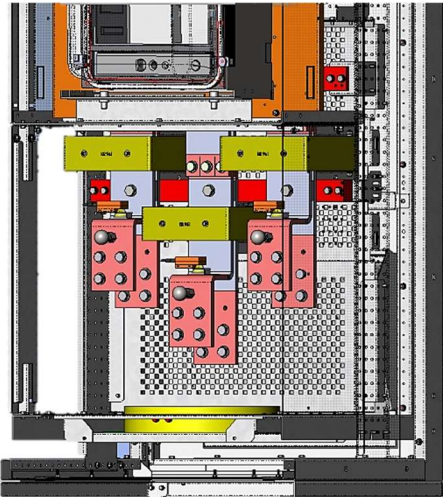


Fig. 6. Compartimentação a ser estudada. Fonte: [14].

B. 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 V, 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 4.

TABELA V
Energia incidente com sistema de proteção convencional por corrente

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 ²	3,39 cal/ cm ²	33,46 cal/ cm ²
Categoria EPI	3	1	4

Para a instalação em análise nesse trabalho, foram consideradas críticas as instalações com energia incidente maior ou igual a 8 cal/cm², nas quais correspondem a utilização da categoria de risco grau 3, segundo [3], conforme descrito na Subseção B, da Seção V. É imprescindível proteger o trabalhador com vestimenta adequada, com nível de proteção no mínimo igual à energia incidente da instalação. 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 V, 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.

C. Análise de resultados e proposta 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 no decorrer da Seção V, 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 [12]. 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 VI
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 ²	0,49 cal/ cm ²	3,98 cal/ cm ²
Categoria EPI	1	0	1

Ao analisar as Tabelas V e VI, fica 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 consequentemente 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 do fato, do operador poder 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 [9] 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.

VIII. 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.

Sendo este o objetivo geral deste trabalho, 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.

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. A revisão de 2018 da norma IEEE 1584 tornou sua forma de cálculo muito mais robusta se comparada com a versão de 2002, que era modelada em grande parte por equações com poucas constantes, linearizadas a partir dos ensaios realizados, e agora, são realizadas interpolações para adaptar os parâmetros dos sistemas em análise aos sistemas onde foram realizados os ensaios.

Com o intuito de viabilizar o cálculo de energia incidente e tornar a obtenção dos resultados de maneira mais prática foi desenvolvido 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 e mantendo 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.

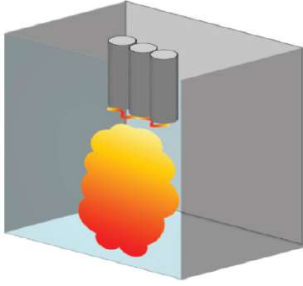

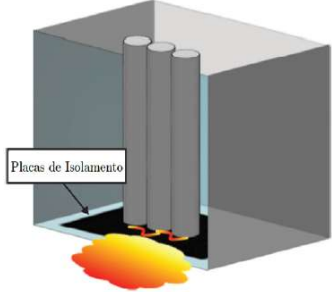

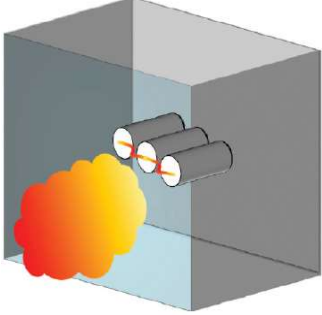
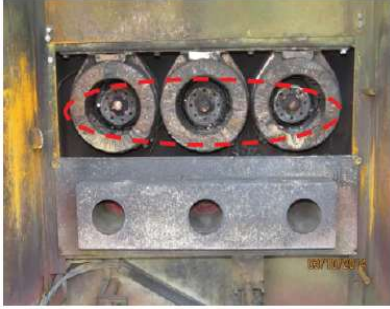
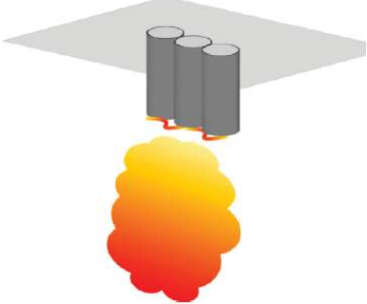

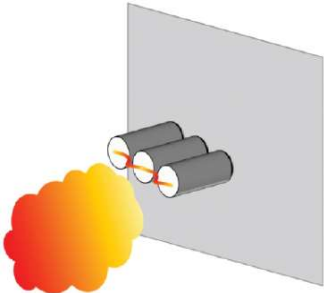

Alguns estudos podem ser desenvolvidos com o exposto neste trabalho para fornecer maior abrangência nos estudos de energia incidente e para o aumento da segurança das instalações contra os perigos de arcos elétricos. Abaixo são citadas algumas sugestões de temas para trabalhos futuros:

- Análise de energia incidente através de outras metodologias de cálculo;
- Estudo sobre abordagens de arco elétrico em sistemas de corrente contínua e as proteções utilizadas para esse tipo de cenário;
- Estudo sobre como o uso de painéis resistentes a arco e a manipulação das distâncias entre os barramentos e eletrodos pode afetar os valores de energia incidente e o grau de proteção conferido pelos EPIs e vestimentas (ATPV- *Arch Thermal Performance Value*) necessário para as vestimentas dos trabalhadores;
- Análise do comportamento do arco e dos níveis de energia incidente com configurações dos eletrodos ao ar livre.

REFERÊNCIAS

- [1] A. B. Almeida, Jr. Catelani, C. Luiz. “Aterramento temporário: A medida provisória usada em redes elétricas desenergizadas protege o trabalhador” in *Revista Proteção*, ed. 195, 2008.
- [2] R. H. LEE, The other electrical hazard: electric arc blast burns. “IEEE Transactions on Industry Applications”, v. IA-18, p. 246-251, May/June-1982.
- [3] R. L. Doughty, T. E. Neal, and H. L. Floyd, “Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1, pp. 257–269, Jan./Feb. 2000.
- [4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 1584, IEEE - Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. 2018.
- [5] R. Rüdénberg, “Electrical shock waves in power systems: traveling waves in lumped and distributed circuit elements” Harvard University Press, 1968.
- [6] J. J. B. d. Souza e J. G. Pereira, NR-10 Comentada - Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10., São Paulo: LTR, 2008.
- [7] A. R. S QUEIROZ.”IEEE 1584 os métodos para cálculo de energia incidente e distância segura de aproximação”. in *O setor elétrico*, vol1, n.110. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wpcontent/uploads/documentos/fasciculos/Ed76_fasc_arco_eletrico_cap5.pdf
- [8] A. M. MONTEIRO, Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller). Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [9] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION NFPA 70E, Standard for electrical safety in the workplace. 1999
- [10] A. R. S QUEIROZ,.”Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico”, Dissertação de mestrado em Ciências – Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, 2011.
- [11] SEL, Schweitzer Engineering Laboratories. “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 . Acesso em: 23 ago. 2020
- [12] ABB, Asea Brown Boveri. “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
- [13] ABNT, NBR IEC 62271-200:2007 Conjunto manobra e controle de alta- tensão em invólucro metálico para tensões acima de 1kV até e inclusive 52kV, Rio de Janeiro,2007.
- [14] *Painéis elétricos. Segurança para seus processos. Modularidade para seus projetos.* 1ed, WEG, Jaraguá do Sul, 2021.

ANEXO 1

Configuração dos Terminais	Configuração dos Terminais em Teste	Configuração dos Terminais em Equipamentos
<p>Condutores verticais; Terminais em caixa metálica; Enclausurado; (VCB)</p>		
<p>Condutores verticais; Terminais terminados em barreira isolante em caixa metálica; Enclausurado; (VCBB)</p>		
<p>Condutores horizontais; Terminais em caixa metálica; Eletrodos em ar livre (HCB);</p>		
<p>Condutores verticais; Terminais ao ar livre (VOA);</p>		
<p>Condutores horizontais; Terminais ao ar livre (HOA);</p>		

Anexo 1: Configuração dos eletrodos de acordo com a IEEE 1584-2018.

ANEXO 2

Energia incidente (cal/cm ²)	Categoria de risco	Vestimenta de proteção e EPI
≤1,2	0	Vestimenta de proteção, fibra natural não tratada (algodão não tratado, lã, nylon, seda ou mistura desses materiais), com gramatura mínima de 152 g/ cm²
		Calça e camisa de manga comprida de algodão não tratado (1 camada)
		Capacete, Óculos de segurança
		Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)
		Luvas isolantes de borracha com luvas de sobrepor de couro
		Botina isolante de couro com solado de borracha
> 1,2 ≤ 4,0	1	Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm²
		Calça e camisa de manga comprida ou macacão confeccionados com tecido FR (1 camada)
		Protetor facial resistente a arco
		Capacete, óculos de segurança e Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)
		Luvas isolantes de borracha com luvas de sobrepor de couro
		Botina isolante de couro com solado de borracha
> 4,0 ≤ 8,0	2	Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm²
		Calça e camisa de manga comprida ou macacão confeccionados com tecido FR (1 camada com gramatura superior a classe 1)
		Protetor facial resistente a arco
		Capacete, óculos de segurança e Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)
		Luvas isolantes de borracha com luvas de sobrepor de couro
		Botina isolante de couro com solado de borracha
> 8,0 ≤ 25	3	Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 25 cal/cm²
		Roupa interna de algodão mais calça e camisa comprida ou macacão ou calça e capa confeccionados com tecido FR (2 camadas + tecido de algodão)
		Protetor facial resistente a arco
		Capacete, óculos de segurança e Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)
		Luvas isolantes de borracha com luvas de sobrepor resistentes a arco
		Botina isolante de couro com solado de borracha
> 25 ≤ 40	4	Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 40 cal/cm²
		Roupa interna de algodão mais calça e camisa comprida ou macacão ou calça e capa confeccionados com tecido FR (3 camadas + tecido de algodão)
		Protetor facial resistente a arco
		Capacete, óculos de segurança e Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)
		Luvas isolantes de borracha com luvas de sobrepor resistentes a arco
		Botina isolante de couro com solado de borracha
> 40	SEM CATEGORIA	Categoria de roupa não existente

Anexo 2: Grau de EPI de acordo com o nível de energia incidente

ANEXO 3

Tabela 1 - Coeficientes para a Equação (1)

E.C. / V_{oc}	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$	$k7$	$k8$	$k9$	$k10$	
VCB	600 V	-0.04287	1.035	0.083	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	0.0065	1.001	0.024	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005795	1.015	-0.011	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
VCBB	600 V	-0.017432	0.98	-0.05	0	0	-5.767E-09	2.524E-06	-0.00034	0.01187	1.013
	2 700 V	0.002823	0.995	-0.0125	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
	14 300 V	0.014827	1.01	-0.01	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	0.004003	0.9825
HCB	600 V	0.054922	0.988	-0.11	0	0	-5.382E-09	2.316E-06	-0.000302	0.0091	0.9725
	2 700 V	0.001011	1.003	-0.0249	0	0	4.859E-10	-1.814E-07	9.128E-06	-0.0007	0.9881
	14 300 V	0.008693	0.999	-0.02	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839
VOA	600 V	0.043785	1.04	-0.18	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	-0.02395	1.006	-0.0188	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005371	1.0102	-0.029	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
HOA	600 V	0.111147	1.008	0.24	0	0	-3.895E-09	1.641E-06	0.000197	0.002615	1.1
	2 700 V	0.000435	1.006	0.038	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	9.128E-06	-0.0007	0.9981
	14 300 V	0.000904	0.999	-0.02	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981

Tabela 2 - Coeficientes para a Equação (9)

E.C.	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$	$k7$
VCB	0	-0.0000014269	0.000083137	-0.0019382	0.022366	-0.12645	0.30226
VCBB	1.138e-06	-6.0287e-05	0.0012758	-0.013778	0.080217	-0.24066	0.33524
HCB	0	-3.097e-06	0.00016405	-0.0033609	0.033308	-0.16182	0.34627
VOA	9.5606E-07	-5.1543E-05	0.0011161	-0.01242	0.075125	-0.23584	0.33696
HOA	0	-3.1555e-06	0.0001682	-0.0034607	0.034124	-0.1599	0.34629

Tabela 3 - Coeficientes para a Equação (15), (16), (17), (21), (24), (25)

600 V	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$	$k7$	$k8$	$k9$	$k10$	$k11$	$k12$	$k13$
VCB	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.957
VCBB	3.068459	0.26	0.098107	0	0	-5.767E-09	0.000002524	-0.00034	0.01187	1.013	-0.06	-1.809	1.19
HCB	4.073745	0.344	-0.370259	0	0	-5.382E-09	0.000002316	-0.000302	0.0091	0.9725	0	-2.03	1.036
VOA	0.679294	0.746	1.222636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.997
HOA	3.470417	0.465	-0.261863	0	0	-3.895E-09	0.000001641	-0.000197	0.002615	1.1	0	-1.99	1.04

Tabela 4 - Coeficientes para a Equação (15), (16), (17), (22)

2700 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	2.40021	0.165	0.354202	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.569	0.9778
VCBB	3.870592	0.185	-0.736618	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.742	1.09
HCB	3.486391	0.177	-0.193101	0	0	4.859E-10	-1.814E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9881	0.027	-1.723	1.055
VOA	3.880724	0.105	-1.906033	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.515	1.115
HOA	3.616266	0.149	-0.761561	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981	0	-1.639	1.078

Tabela 5 - Coeficientes para a Equação (15), (16), (17), (23)

14 300 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	3.825917	0.11	-0.999749	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.568	0.99
VCBB	3.644309	0.215	-0.585522	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.677	1.06
HCB	3.044516	0.125	0.245106	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839	0	-1.655	1.084
VOA	3.405454	0.12	-0.93245	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.534	0.979
HOA	2.04049	0.177	1.005092	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	0.0007	0.9981	-0.05	-1.633	1.151

Tabela 6 - Diretrizes para determinar a largura e altura equivalente

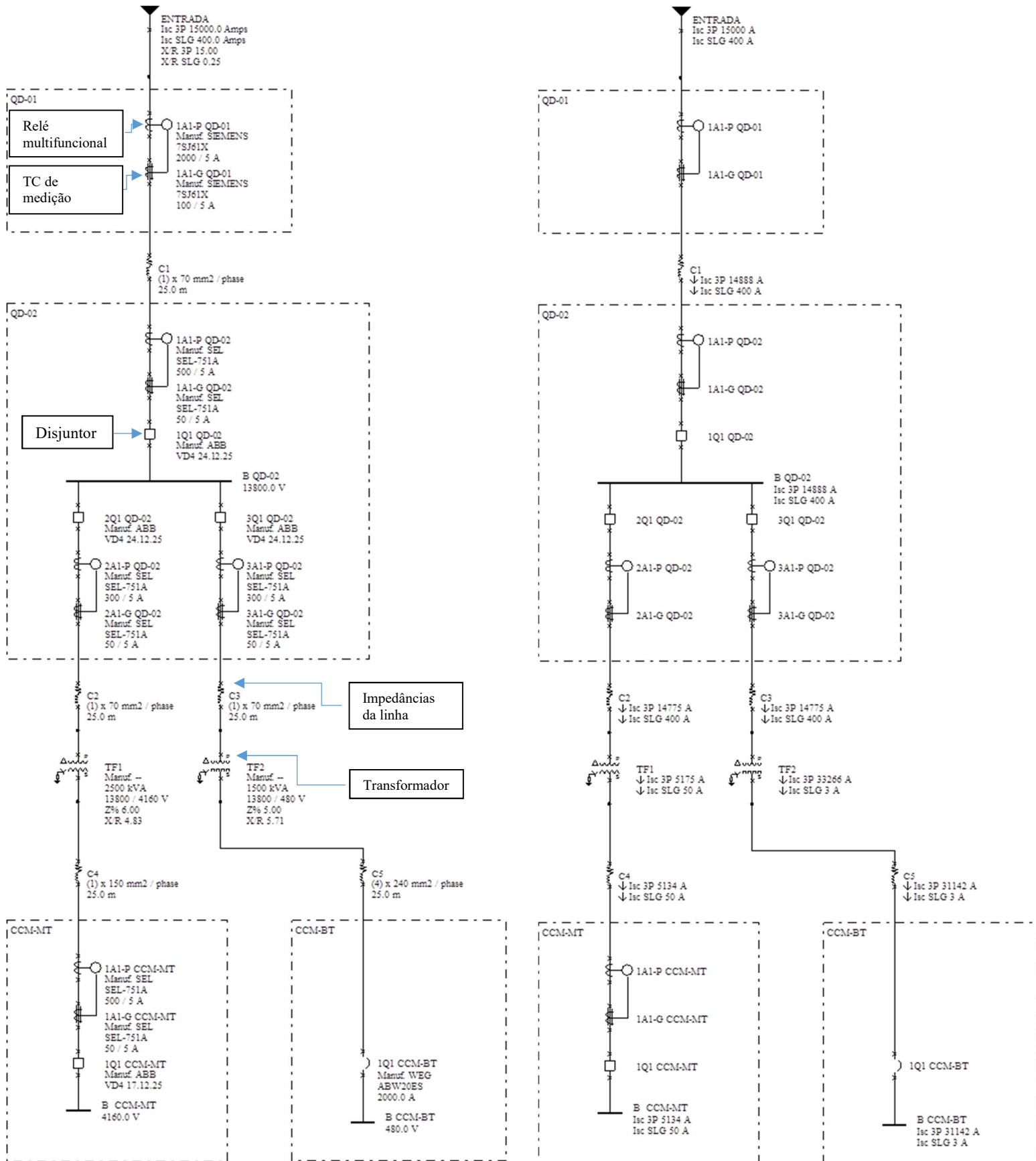
E.C.	Range	<508 (mm)	≥508 and ≤660.4 (mm)	>660.4 and ≤1244.6 (mm)	>1244.6 (mm)
VCB	Width ₁	= 20 (if Typical) = 0.03937 × Width (if Shallow*)	= 0.03937 × Width	obtained from Equation (10) and actual Width	obtained from Equation (10) with Width = 1244.6 mm
	Height ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow*)	= 0.03937 × Height	= 0.03937 × Height	= 49
VCBB	Width ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Width (if Shallow*)	= 0.03937 × Width	obtained from Equation (10) and actual Width	obtained from Equation (10) with Width = 1244.6 mm
	Height ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow*)	= 0.03937 × Height	obtained from Equation (11) and actual Height	obtained from Equation (11) with Height = 1244.6 mm
HCB	Width ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Width (if Shallow*)	= 0.03937 × Width	obtained from Equation (10) and actual Width	obtained from Equation (10) with Width = 1244.6 mm
	Height ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow*)	= 0.03937 × Height	obtained from Equation (11) and actual Height	obtained from Equation (11) with Height = 1244.6 mm

Tabela 7 - Coeficientes para a Equação (13), (14)

Box type	E.C.	b_1	b_2	b_3
Typical	VCB	-0.000302	0.03441	0.4325
	VCBB	-0.0002976	0.032	0.479
	HCBB	-0.0001923	0.01935	0.6899
Shallow	VCB	0.002222	-0.02556	0.6222
	VCBB	-0.002778	0.1194	-0.2778
	HCBB	-0.0005556	0.03722	0.4778

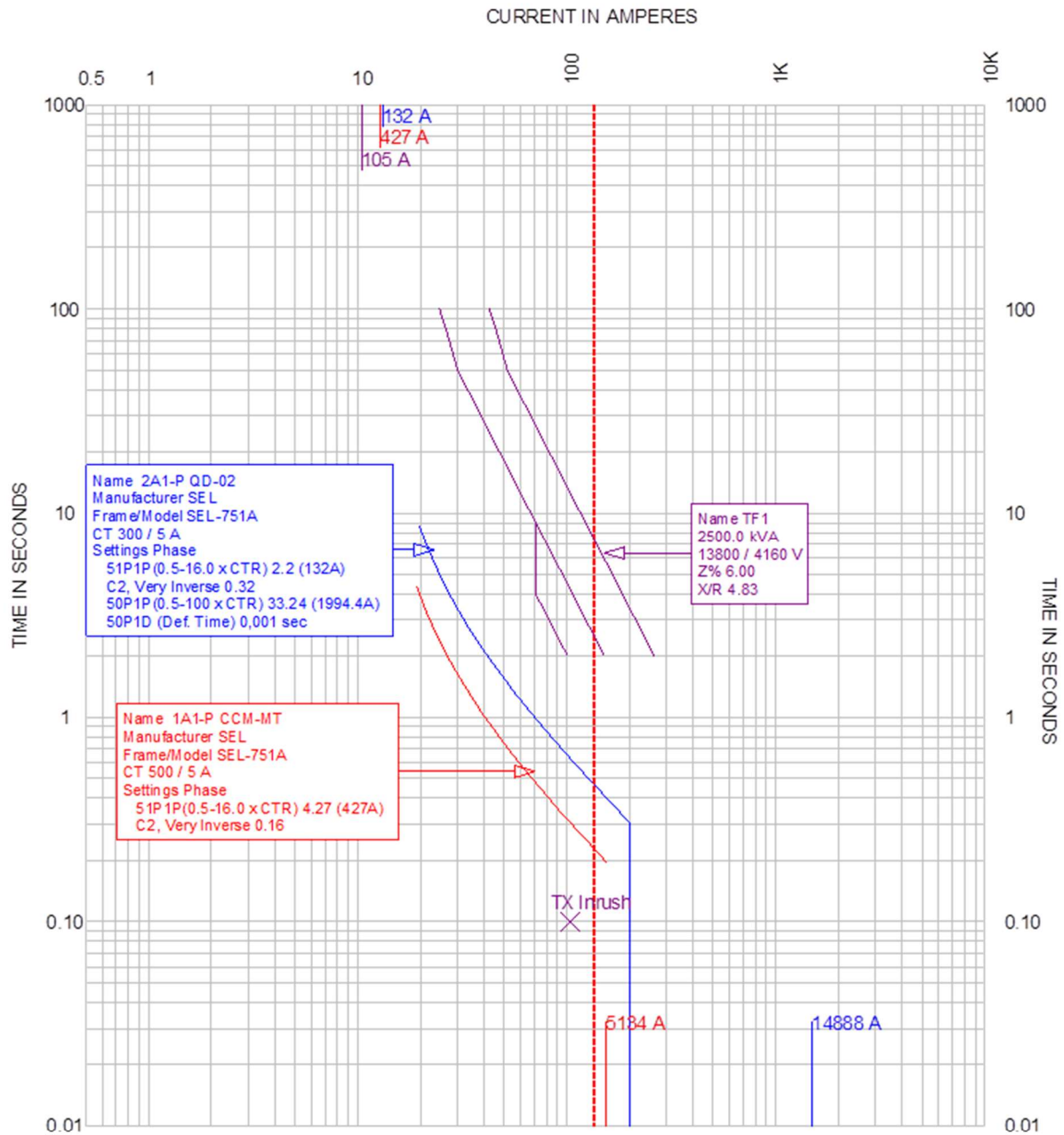
Anexo 3: Coeficientes de cálculo presentes na IEEE 1584-2018.

ANEXO 4



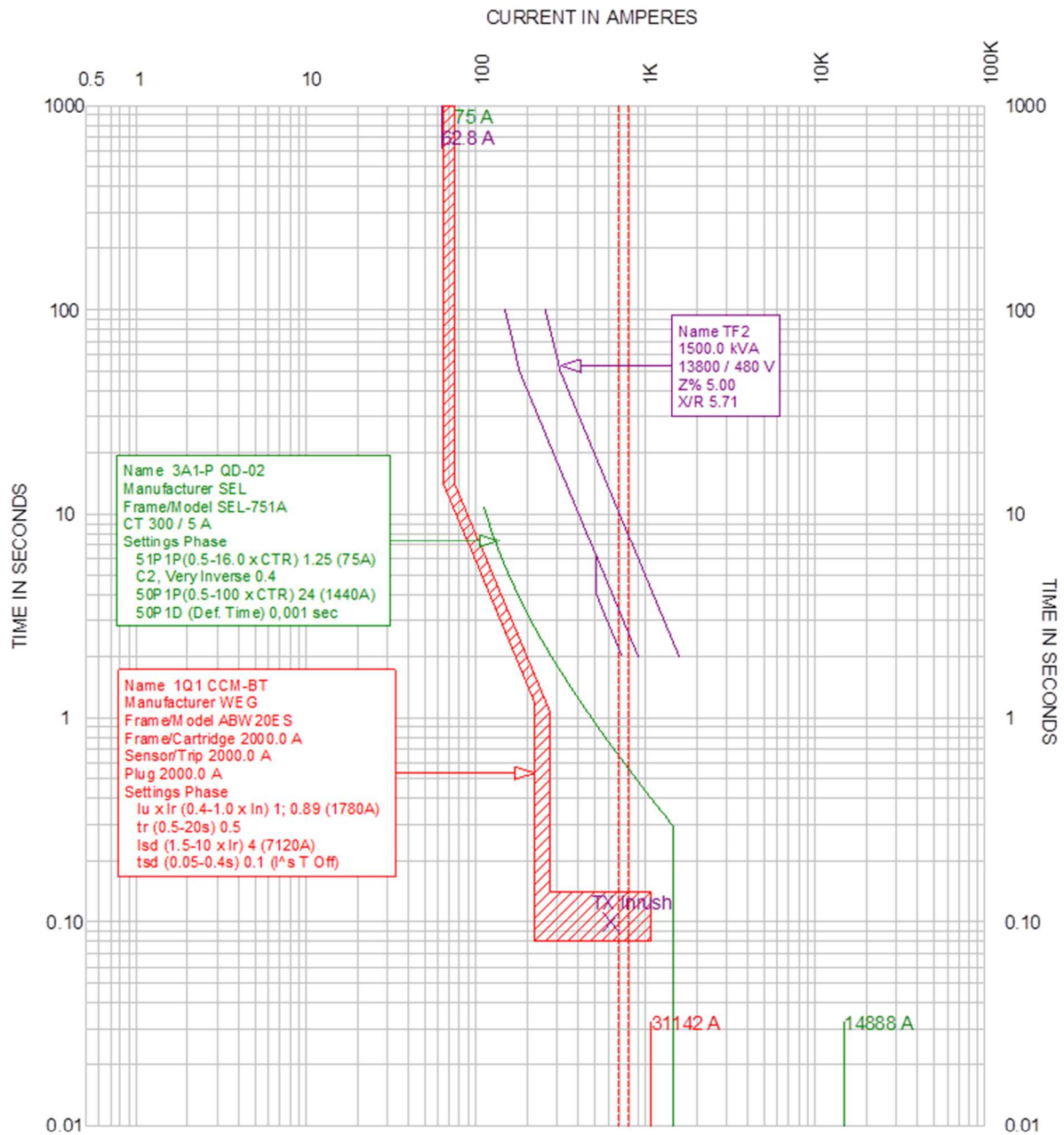
Anexo 4: Unifilar da subestação do estudo de caso.

ANEXO 5



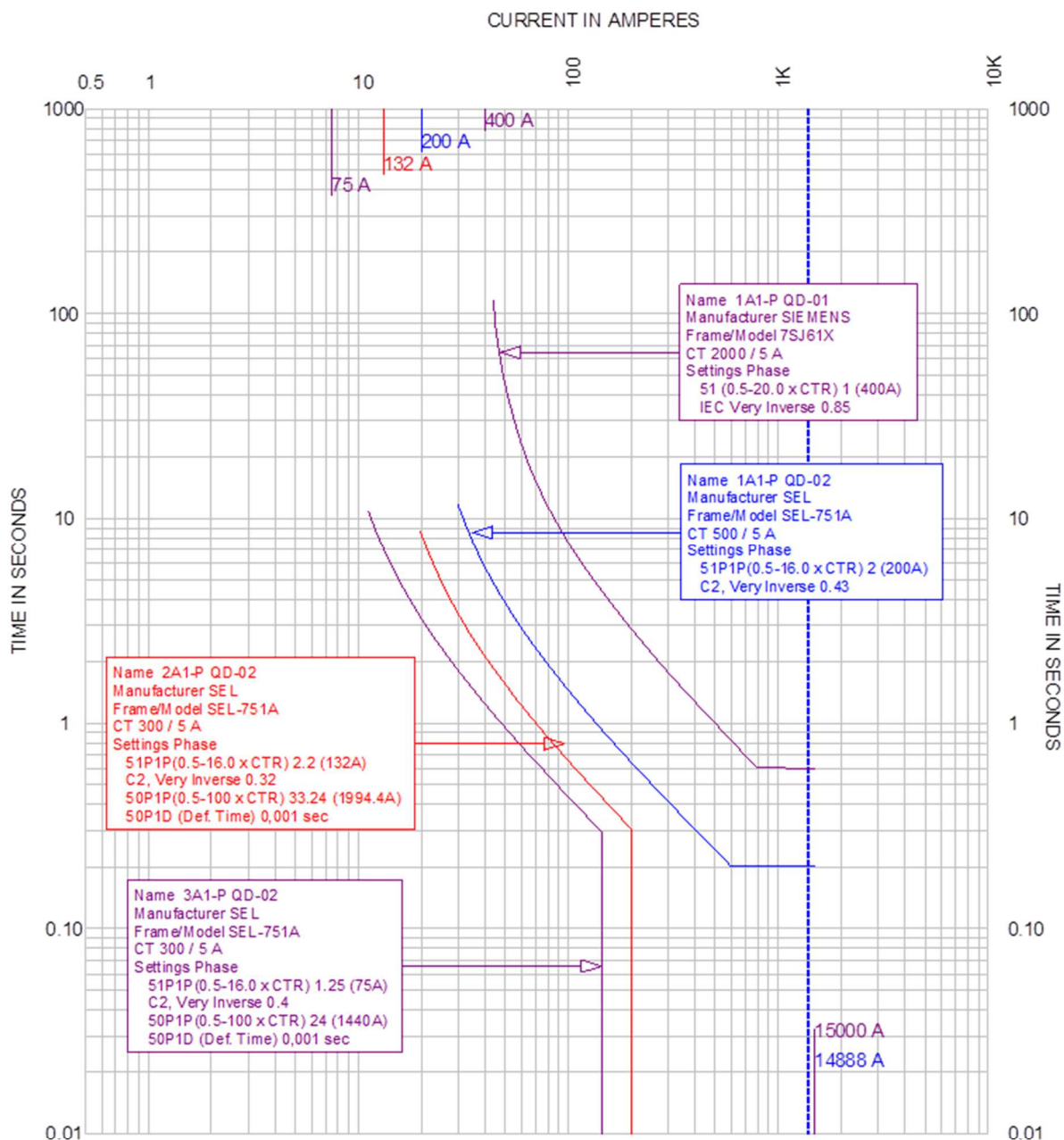
TCC Name: TF1	Current Scale x10
Online:	Reference Voltage: 13800
August 17, 2020 2:53 PM	SKM Systems Analysis, Inc.

Anexo 5.1: Coordenogramas para estudo de seletividade (2A1)



TCC Name: TF2 Online: August 17, 2020 2:54 PM	Current Scale x1 Reference Voltage: 13800 SKM Systems Analysis, Inc.
---	--

Anexo 5.2: Coordenogramas para estudo de seletividade (3A1)



TCC Name: QD-01 - QD-02
 Oneline:
 August 17, 2020 2:56 PM

Current Scale x10
 Reference Voltage: 13800
 SKM Systems Analysis, Inc.

Anexo 5.3: Coordenogramas para estudo de seletividade (1A1)

ANEXO 6

PERIGO

RISCO DE ARCO ELÉTRICO E CHOQUE ELÉTRICO

OBEDEECER O PROCEDIMENTO ESPECÍFICO DA EMPRESA E NR-10 PARA INTERVENÇÃO EM APINÉL ENERGIZADO

DADOS DE ENTRADA

TAG DO PAINEL: QD02

V _{oc} (kV)	13,8	TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA
I _{br} (kA)	14,89	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA SIMÉTRICA
G (mm)	152	DISTÂNCIA ENTRE CONDUTORES
ta (s)	0,675	TEMPO TOTAL DE ARCO
t _a min (s)	0,675	TEMPO DE ARCO MÍNIMO
D (mm)	914,4	DISTÂNCIA DE OPERAÇÃO
A (mm)	592	ALTURA DO COMPARTIMENTO OU PAINEL
L (mm)	568	LARGURA DO COMPARTIMENTO OU PAINEL
P (mm)	722	PROFUNDIDADE DO COMPARTIMENTO OU PAINEL
E.C.	VCB	CONFIGURAÇÃO DOS TERMINAIS

RESULTADOS

I _{arc} (kA)	13,90	CORRENTE DE ARCO
I _{arc} min (kA)	13,73	CORRENTE DE ARCO MÍNIMA
E (cal/cm ²)	13,93	ENERGIA INCIDENTE
AFB (mm)	4366	LIMITE DE APROX. SEGURA AO ARCO ELÉTRICO
CATEGORIA DE RISCO	3	

ATENÇÃO: A ALTERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS, AJUSTE DE RELÉS OU CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA INVÁLIDAM OS VALORES CALCULADOS E ESPECIFICAÇÃO DE EPI.

PERIGO

RISCO DE ARCO ELÉTRICO E CHOQUE ELÉTRICO

OBEDEECER O PROCEDIMENTO ESPECÍFICO DA EMPRESA E NR-10 PARA INTERVENÇÃO EM PAINEL ENERGIZADO

DADOS DE ENTRADA

TAG DO PAINEL:

V _{oc} (kV)	<input type="text"/>	TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA
I _{br} (kA)	<input type="text"/>	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA SIMÉTRICA
G (mm)	<input type="text"/>	DISTÂNCIA ENTRE CONDUTORES
ta (s)	<input type="text"/>	TEMPO TOTAL DE ARCO
t _a min (s)	<input type="text"/>	TEMPO DE ARCO MÍNIMO
D (mm)	<input type="text"/>	DISTÂNCIA DE OPERAÇÃO
A (mm)	<input type="text"/>	ALTURA DO COMPARTIMENTO OU PAINEL
L (mm)	<input type="text"/>	LARGURA DO COMPARTIMENTO OU PAINEL
P (mm)	<input type="text"/>	PROFUNDIDADE DO COMPARTIMENTO OU PAINEL
E.C.	<input type="text"/>	CONFIGURAÇÃO DOS TERMINAIS

RESULTADOS

I _{arc} (kA)	<input type="text"/>	CORRENTE DE ARCO
I _{arc} min (kA)	<input type="text"/>	CORRENTE DE ARCO MÍNIMA
E (cal/cm ²)	<input type="text"/>	ENERGIA INCIDENTE
AFB (mm)	<input type="text"/>	LIMITE DE APROX. SEGURA AO ARCO ELÉTRICO
CATEGORIA DE RISCO	<input type="text"/>	

ATENÇÃO: A ALTERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS, AJUSTE DE RELÉS OU CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA INVÁLIDAM OS VALORES CALCULADOS E ESPECIFICAÇÃO DE EPI.

PDF EM PORTUGUÊS PDF EM INGLÊS PDF EM ESPANHOL

DANGER

ARC-FLASH AND ELECTRICAL SHOCK HAZARD

INPUT DATA

TAG: TCC-IFSC

V _{oc} (kV)	4,16	RATED OPERATIONAL VOLTAGE
I _{br} (kA)	5,13	SYMMETRICAL THREE-PHASE SHORT-CIRCUIT CURRENT
G (mm)	104	GAP BETWEEN CONDUCTORS
ta (s)	0,535	TOTAL ARC TIME
t _a min (s)	0,545	MINIMUM ARC TIME
D (mm)	914,4	OPERATIONAL DISTANCE
A (mm)	480	COMPARTMENT OR PANEL HEIGHT
L (mm)	690	COMPARTMENT OR PANEL WIDTH
P (mm)	380	COMPARTMENT OR PANEL DEPTH
E.C.	VCB	TERMINAL CONFIGURATION

RESULTS

I _{arc} (kA)	4,52	ARC CURRENT
I _{arc} min (kA)	4,41	MINIMUM ARC CURRENT
E (cal/cm ²)	3,38	INCIDENT ENERGY
AFB (mm)	1770	ELECTRIC ARC SAFE APPROACH LIMIT
RISK CATEGORY	1	

WARNING: CHANGES IN EQUIPMENT SETTINGS OR SYSTEM CONFIGURATION WILL INVALIDATE THE CALCULATED RESULTS AND PPE REQUIREMENTS

PELIGRO

PELIGRO DE DESCARGA ELÉCTRICA Y ARCO ELÉCTRICO

DATOS DE ENTRADA

TAG: TCC-IFSC

V _{oc} (kV)	0,48	TENSIÓN NOMINAL DEL SISTEMA
I _{br} (kA)	31,14	CORRIENTE SIMÉTRICA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO
G (mm)	25	DISTANCIA ENTRE CONDUCADORES
ta (s)	0,635	TIEMPO TOTAL DEL ARCO
t _a min (s)	0,735	TIEMPO DE ARCO MÍNIMO
D (mm)	457,2	DISTANCIA DE FUNCIONAMIENTO
A (mm)	480	ALTURA DEL COMPARTIMENTO O PANEL
L (mm)	690	ANCHO DEL COMPARTIMENTO O PANEL
P (mm)	380	PROFUNDIDAD DEL COMPARTIMENTO O PANEL
E.C.	VCB	CONFIGURACIÓN TERMINAL

RESULTADOS

I _{arc} (kA)	22,71	CORRIENTE DE ARCO
I _{arc} min (kA)	19,91	CORRIENTE DE ARCO MÍNIMA
E (cal/cm ²)	33,45	ENERGÍA INCIDENTE
AFB (mm)	3669	LIMITE DE APROX. SEGURA AO ARCO ELÉTRICO
CATEGORÍA DE RIESGO	4	

ATENCIÓN: EL CAMBIO DEL EQUIPO, EL AJUSTE DEL RELÉ O LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA NO VÁLIDOS LOS VALORES CALCULADOS Y LA ESPECIFICACIÓN DEL EPI.

Anexo 6: Resultados e interface dos estudos de caso de energia incidente

EDUARDO PAULI

**ESTUDO E APLICAÇÃO DA NORMA IEEE 1584-2018 PARA CÁLCULO DE ENERGIA
INCIDENTE EM PAINÉIS INDUSTRIAIS COM FOCO NA PREVENÇÃO DE ARCOS ELÉTRICOS**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 17 de agosto de 2021

Prof. Dr. Arthur Garcia Bartsch
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Prof. Msc. Eduardo Evangelista
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Prof. Msc. John Jefferson Antunes Saldanha
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau



Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)
Certificado de assinatura gerado em 19/08/2021 às 11:54:56 (GMT -3:00)

TermoDeAprovacao_TCC_EngEletrica_IFSC_JGS_RAU_17082021_EduardoPauli.pdf

 ID única do documento: #dc6f8d19-adf2-4c13-acf3-071145a22491

Hash do documento original (SHA256): b9d2189dc88d775f3be0a57193e2c895d9a9a13f65b07b22e03c6da897b9ef75

Este Log é exclusivo ao documento número #dc6f8d19-adf2-4c13-acf3-071145a22491 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

Assinaturas (3)

- ✓ **Eduardo Evangelista (Participante)**
Assinou em 20/08/2021 às 10:04:51 (GMT -3:00)
- ✓ **John Jefferson Antunes Saldanha (Participante)**
Assinou em 19/08/2021 às 12:33:37 (GMT -3:00)
- ✓ **Arthur Garcia Bartsch (Participante)**
Assinou em 19/08/2021 às 15:58:49 (GMT -3:00)

Histórico completo

Data e hora

19/08/2021 às 12:33:37
(GMT -3:00)

Evento

John Jefferson Antunes Saldanha (Autenticação: e-mail john.saldanha@ifsc.edu.br; IP: 131.100.95.17) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

19/08/2021 às 11:55:03
(GMT -3:00)

Arthur Garcia Bartsch solicitou as assinaturas.

Data e hora

Evento

20/08/2021 às 10:04:51
(GMT -3:00)

Eduardo Evangelista (Autenticação: e-mail eduardo@ifsc.edu.br; IP: 177.54.4.62) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

19/08/2021 às 15:58:49
(GMT -3:00)

Arthur Garcia Bartsch (Autenticação: e-mail arthur.bartsch@ifsc.edu.br; IP: 179.223.196.136) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

20/08/2021 às 10:04:51
(GMT -3:00)

Documento assinado por todos os participantes.