



A Importância do Estudo de Curto Circuito na Definição da Vestimenta

Por Leandro Toniello

Quando se trata de projeto, operação e manutenção de sistemas elétricos de potência, a preocupação com a segurança deve ser uma prioridade. Não só os projetistas devem implementar garantias para proteger equipamentos e processos, mas também devem avaliar os riscos associados às pessoas.

Neste contexto, o principal objetivo desse artigo é, por meio de um exemplo prático, alertar os profissionais das áreas de segurança do trabalho e elétrica para os perigos e equívocos que estão acontecendo no mercado no que tange à determinação da energia incidente para a definição da vestimenta de proteção.

Muitos profissionais, no intuito de calcular a energia incidente para a definição das vestimentas de proteção, estão dimensionando-as utilizando planilhas encontradas e compartilhadas na internet.

Ditas planilhas não estão necessariamente fornecendo cálculos errados, porém os cálculos de curto circuito para determinação da energia incidente exigem o valor da corrente de curto em pontos específicos do sistema, além do tempo de atuação da proteção para eliminar a corrente de arco elétrico.

O problema está justamente na definição do valor de curto circuito e do tempo de atuação da proteção utilizados, pois esses valores estão sendo fixados sem a realização dos devidos estudos de curto circuito e seletividade (muitas vezes pela falta de informação do sistema).

Sendo assim, esse artigo irá apresentar a importância de se realizar o devido estudo de curto circuito na

determinação da energia incidente (ao invés de assumir um valor predeterminado) e o quanto o erro pode ser sensível em determinados sistemas, podendo inclusive levar a uma especificação equivocada de vestimenta, colocando em risco a vida do trabalhador.

Considere um sistema elétrico alimentado em 13,8 kV pela concessionária U1 com corrente de curto circuito trifásica de 25 kA e com relação de X/R igual a 8. O transformador de entrada T1, tem potência nominal de 1,5 MVA, impedância de 5%, conexões em delta-estrela-solidamente aterrado, relação de transformação de 13,8/0,48 kV e alimenta a Barra 2 através de 5 cabos por fase de 120 mm² e 50 metros de comprimento.

A Barra 2 está em um quadro de distribuição fechado e tem corrente nominal de 2000 A e corrente de curto circuito simétrico suportável por 1 segundo de 50 kA.

O disjuntor DJ é do fabricante ABB, modelo E3N e disparador eletrônico SACE PR113. A corrente nominal é de 2000 A e apresenta capacidade de interrupção de 50 kA conforme norma ANSI. O diagrama unifilar do circuito em análise é apresentado na Figura 1.

Valor Curto Circuito na Barra 2

Na ausência do valor de curto circuito no ponto específico onde se deseja calcular a energia incidente, os responsáveis pelos cálculos por vezes vêm adotando

os valores da suportabilidade do barramento ou do disjuntor como o valor de curto circuito. Tal fato ocorre devido a considerarem como premissa que uma corrente de curto circuito mais elevada resulta em uma energia incidente mais alta.

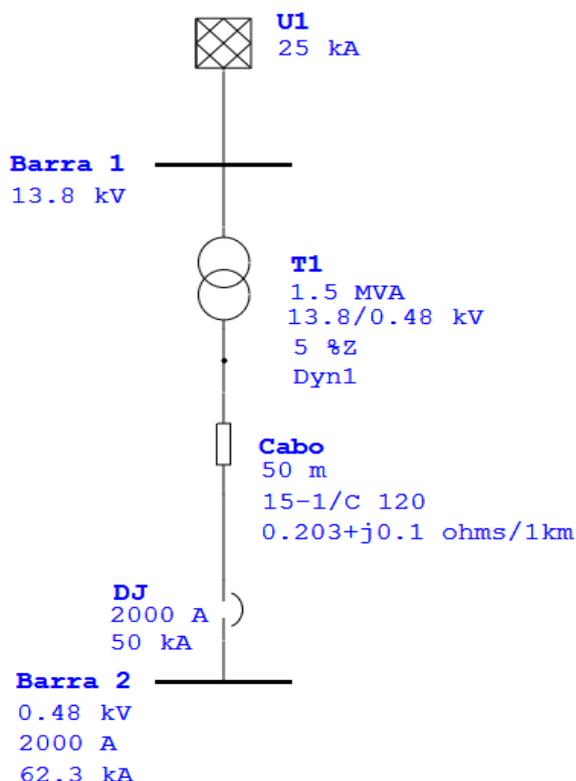


Figura 1 - Diagrama Unifilar

Neste contexto, será realizado o cálculo da corrente de arco e conseqüentemente da energia incidente, com base no valor de curto circuito assumido como o de suportabilidade da Barra 2 de 50 kA.

RELATÓRIO DE CURTO CIRCUITO

Falta trifásica na barra: Barra 2
 Tensão de pré falta= 0.480 kV
 100.00 % do kV nominal da barra (0.480 kV)
 = 100.00 % da base (0.480 kV)

| Contribuição | | 1/2 Ciclo | | | | |
|--------------|------------|--------------|----------|---------------|-------------|-------------------|
| Da Barra ID | À Barra ID | % V Da Barra | kA Ativa | kA Imaginário | Imag. /Real | kA Sim. Magnitude |
| Barra 2 | Total | 0.00 | 9.397 | -27.640 | 2.9 | 29.194 |
| Bus2 | Barra 2 | 22.96 | 9.397 | -27.640 | 2.9 | 29.194 |
| Barra 1 | Bus2 | 96.03 | 9.397 | -27.640 | 2.9 | 29.194 |

Tabela 1 - Resultado do Estudo de Curto Circuito na Barra 2

Para a elaboração do cálculo de curto circuito na Barra 2 será utilizado o software de simulação de sistemas de potência ETAP módulo Short Circuit Analysis conforme a norma ANSI C37. O resultado obtido para

um curto circuito trifásico na Barra 2 em 480 V é de 29,194 kA conforme apresentado na Tabela 1.

Cálculo da Corrente de Arco Elétrico e Energia Incidente

A determinação da corrente de arco elétrico, para todos os casos, utilizará a equação (1) da norma IEEE 1584 com tensão inferior a 1000 V.

Os valores da distância entre condutores (GAP) e fator x de distância na Barra 2 (Quadro de Distribuição) seguem os valores típicos da Tabela 4 da norma IEEE 1584.

Calculando a corrente de arco elétrico para a corrente de curto circuito assumida de 50 kA, tem-se 24,063 kA conforme apresentado na Figura 2.

Utilizando o valor de curto circuito calculado e apresentado na Tabela 1, tem-se uma corrente de arco elétrico de 15,37 kA conforme apresentado na Figura 3.

A curva de proteção do disjuntor foi extraída do manual do fabricante do equipamento e os ajustes podem ser visualizados no coordenograma da Figura 4.

Verificando os tempos, para a eliminação do arco elétrico, na curva de atuação do disjuntor DJ (coordenograma da Figura 4) para as correntes de arco de 24,063 kA (Icc = 50 kA) e 15,37 kA (Icc = 29,194 kA), tem-se os tempos em 0,12 e 2,743 segundos, respectivamente.

Utilizando os valores das correntes de arco elétrico e tempo da atuação da proteção definidos anteriormente, pode-se realizar o cálculo da energia incidente, conforme equação (6) da norma IEEE 1584.

Para o valor de curto circuito assumido de 50 kA, tem-se uma corrente de arco de 24,063 kA, sendo essa corrente eliminada em 0,12 segundos. Com isso, tem-se uma energia incidente de 6,535 cal/cm² conforme é apresentado na Figura 2.

Já pelo valor de curto circuito calculado de 29,194 kA, tem-se uma corrente de arco de 15,37 kA, sendo essa corrente eliminada em 2,743 segundos e gerando uma energia incidente de 92,005 cal/cm², conforme apresentado na Figura 3.

Com os valores de energia incidente é possível definir a classe de vestimenta de proteção que o trabalhador deverá utilizar. **Erro! Fonte de referência**

não encontrada. apresenta a classificação dos níveis de vestimenta conforme a NFPA 70E 2015.

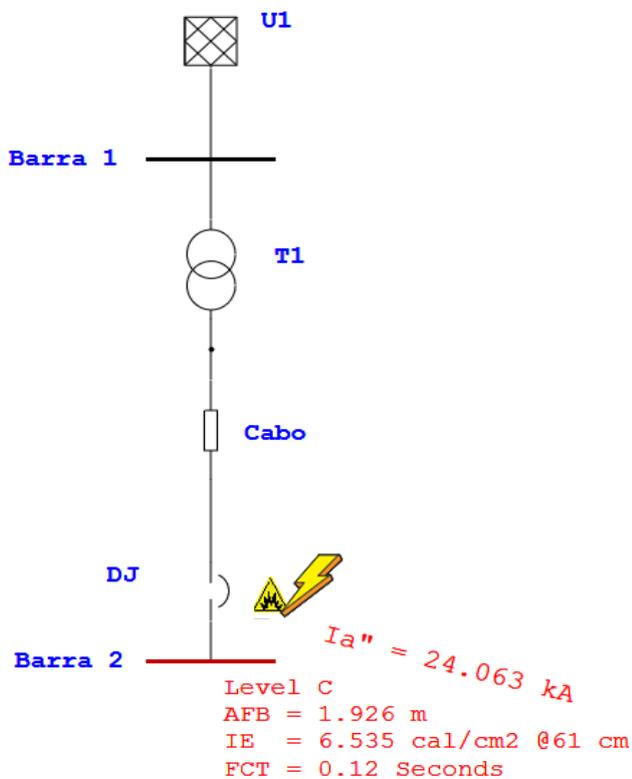


Figura 2 - Resultados para Icc Assumido de 50 kA

Com os valores de energia incidente é possível definir a classe de vestimenta de proteção que o trabalhador deverá utilizar. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a classificação dos níveis de vestimenta conforme a NFPA 70E 2015.

| Classificação Energia Incidente | |
|---------------------------------|--|
| Nível de Classificação | Energia Incidente (cal/cm ²) |
| Nível A | 2 |
| Nível B | 4 |
| Nível C | 8 |
| Nível D | 25 |
| Nível E | 40 |
| Nível F | 100 |
| Nível G | 120 |

Tabela 2 - Nível Energia Incidente conforme NFPA 2015

Verifica-se que os resultados dos valores de energia incidente calculados irão gerar classificações de vestimentas de proteção bem distintas onde, para o caso de utilização do valor de curto circuito assumido de 50 kA (estimado sem o devido cálculo), a vestimenta é Nível C e, com o valor de curto circuito calculado no ponto específico, a classe da vestimenta seria Nível F.

É importante ressaltar que o item 9.10.4 da norma IEEE 1584 diz que devido à dificuldade de se obter um valor preciso da corrente de arco elétrico, é necessário calcular um segundo valor de energia incidente considerando um valor menor (85%) da corrente de arco elétrico.

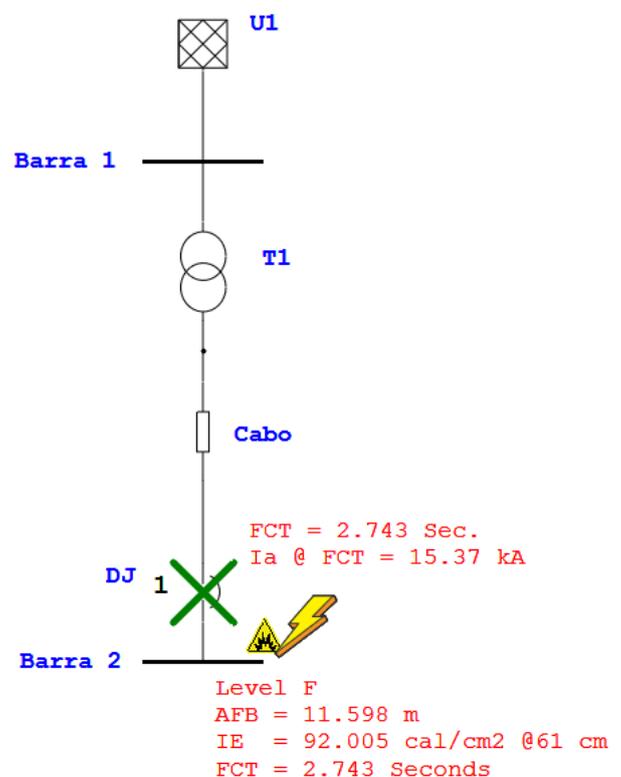
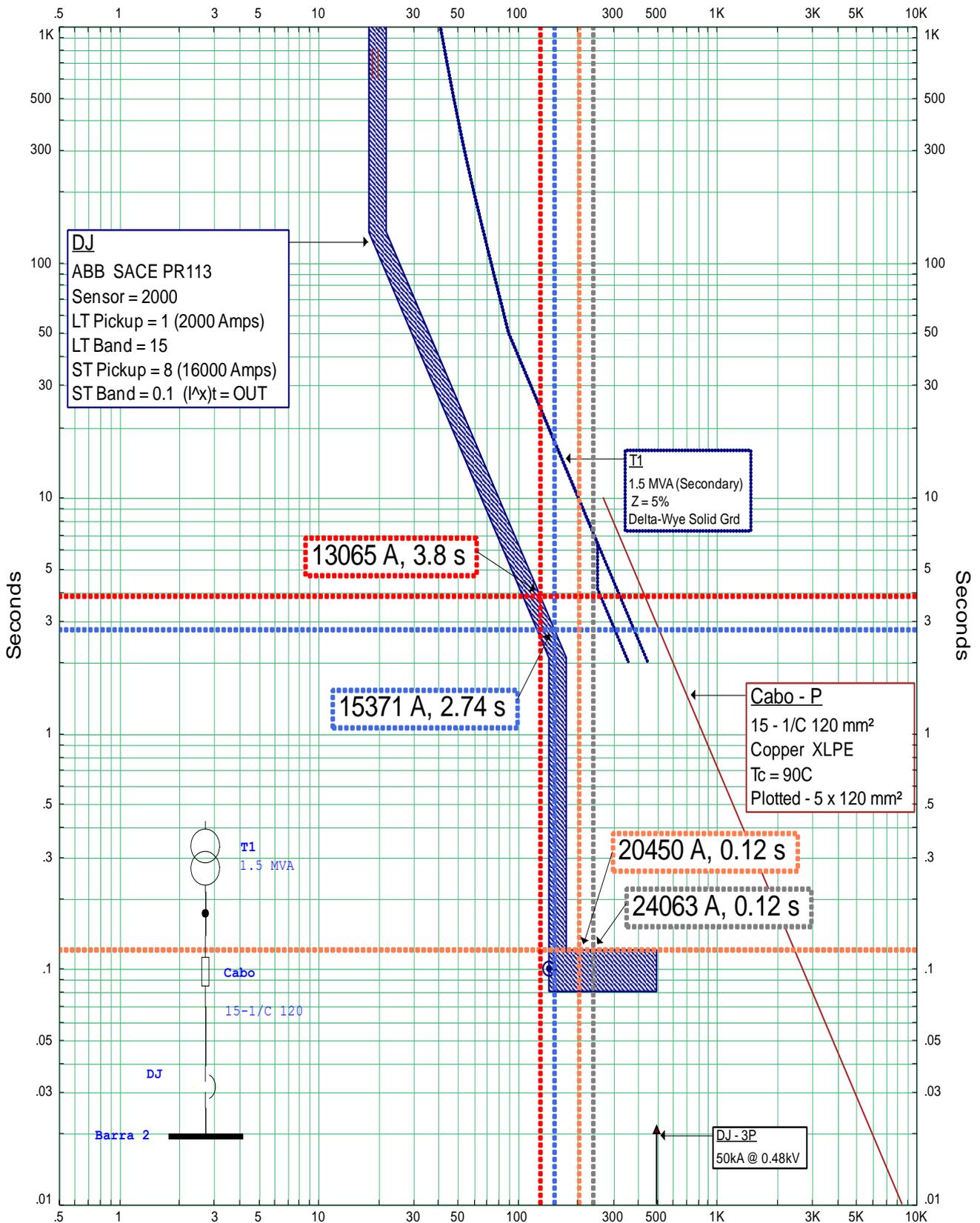


Figura 3 - Resultados para Icc Calculado

Para o caso da corrente de curto circuito simplesmente assumida (50 kA), o valor equivalente a 85% da corrente de arco elétrico, resultaria em 20,45 kA. Analisando a curva do disjuntor, verifica-se que a eliminação do arco elétrico permanece em 0,12 segundos. Assim sendo, chega-se uma energia incidente de 5,47 cal/cm², ou seja, valor menor que o valor anterior de 6,535 cal/cm².

Amps X 100 Barra 2 (Nom. kV=0.48, Plot Ref. kV=0.48)



Amps X 100 Barra 2 (Nom. kV=0.48, Plot Ref. kV=0.48)

Figura 4 - Curva do Disjuntor DJ

Por outro lado, para o caso da corrente de curto circuito devidamente calculada (29,194 kA), com 85% da corrente de arco elétrico, tem-se 13,065 kA. Essa corrente será eliminada pelo disjuntor em 3,8 segundos (conforme Figura 4) e resultará em uma energia incidente de 106,8 cal/cm² conforme apresentado na Figura 5.

A nova energia incidente leva a uma alteração de vestimenta de proteção, a qual passaria p para o Nível G conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

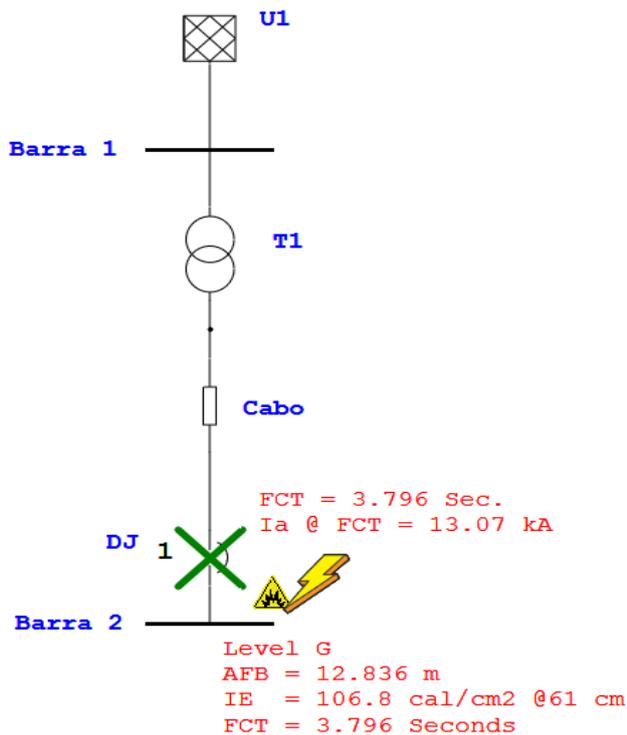


Figura 5 - Resultados para 85% de Ia utilizando o Icc calculado

Cálculo do Limite de Aproximação

Cabe destacar que a norma IEEE 1584 define o limite de aproximação sendo a distância entre o ponto de arco e o trabalhador, onde a energia incidente pode causar uma queimadura de 2º grau na pele humana. O valor da energia para causar uma queimadura de 2º grau na pele humana é definido sendo 1,2 cal/cm².

Será utilizada a equação (8) da IEEE 1584 para calcular distância/limite de aproximação.

Para o caso onde é assumido o valor de curto circuito (50 kA), tem-se uma distância de aproximação de 1,9 metros. Na Figura 6 essa distância é identificada como D₁.

Já no caso onde o valor de curto circuito é calculado no ponto específico (29,194 kA), são necessários dois cálculos para o limite de aproximação, um para 100% e outro para 85% da corrente de arco resultando, respectivamente, em 11,6 e 12,8 metros identificadas, na Figura 6, como sendo D₂ e D₃, respectivamente.

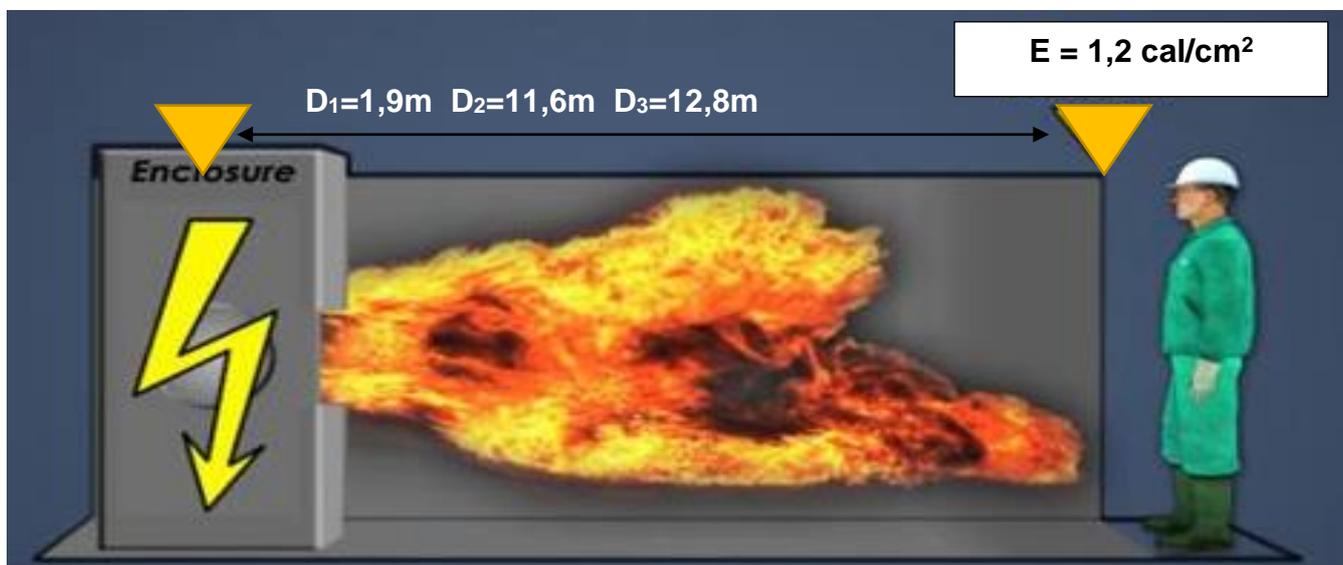


Figura 6 - Distâncias para o Limite de Aproximação

Comparação dos Resultados

Com as simulações realizadas, pode-se realizar a comparação, apresentada na Tabela 3, para determinar a classe da vestimenta do operador conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

| CASO | Icc (kA) | Energia Incidente (cal/cm ²) | Distância Limite (m) | Ia (kA) | Tempo (s) | Nível de Energia |
|------------------------|----------|--|----------------------|---------|-----------|------------------|
| Icc Assumido | 50 | 6,53 | 1,9 | 24,063 | 0,12 | Nível C |
| Icc Calculado | 29,194 | 92,005 | 11,6 | 15,371 | 2,743 | Nível F |
| Icc Calculado (Ia=85%) | 29,194 | 106,83 | 12,8 | 13,065 | 3,796 | Nível G |

Tabela 3 - Comparação entre os resultados obtidos

Conclusão

Com os resultados obtidos das simulações, pode-se concluir que a utilização de um valor de curto circuito mais elevado não resulta, necessariamente, em um maior valor de energia incidente. Pelo contrário, verificou-se que, nos casos simulados para o sistema apresentado, um valor mais elevado de curto circuito resultou em uma menor energia incidente.

Cabe destacar que foi obtida uma diferença da energia incidente de mais de 16 vezes entre o caso considerando o valor de curto circuito previamente assumido e o caso com valor calculado no ponto específico.

Se a definição da vestimenta de proteção ocorresse com base na primeira simulação, do valor de curto circuito previamente assumido (estimado), seria definida como de Nível C, que suportaria até 8 cal/cm². Ou seja, o trabalhador poderia receber uma energia incidente de 106 cal/cm² executando uma operação a 61 cm do quadro, resultando em danos e consequências possivelmente catastróficas.

Vale ressaltar ainda que, em uma comparação entre os casos com valor de curto circuito estimado e calculado, o limite de aproximação aumentou mais de 6 vezes passando, respectivamente, de 1,9 para 12,8 metros.

Mostra-se evidente a necessidade de utilizar técnicas para mitigar o valor da energia incidente para esse sistema, de maneira a reduzir a classificação da vestimenta de proteção e conseqüentemente o limite de aproximação ao quadro.

Sendo assim, é de vital importância certificar-se de todas as situações e condições operacionais do sistema em análise para determinar todas as correntes de curto circuito e todas as energias incidentes. Com este

procedimento, pode-se de fato analisar o pior caso, verificar a necessidade de medidas para mitigar a energia incidente e definir a classificação correta da vestimenta de proteção a ser utilizada pelo trabalhador na execução das suas atividades.

Como demonstrado no presente artigo, os estudos de curto circuito, proteção e seletividade são de fundamental importância para a elaboração do estudo de energia incidente e definição da vestimenta de proteção. Esses estudos devem ser atualizados periodicamente, a fim de certificar os procedimentos de segurança e para proteção humana e de equipamentos.

Cumprir salientar que, como o tema em análise é extremamente técnico e bastante sensível ao tratar de possíveis consequências severas à saúde dos trabalhadores, faz-se necessária uma discussão mais aprofundada incluindo a criação de Grupo de Trabalho específico para definição de diretrizes e padronização de critérios para realização dos estudos com a participação efetiva de especialistas em Engenharia de Segurança e em Engenharia Elétrica junto ao governo (Ministério do Trabalho e Emprego), outros especialistas e sociedade (Trabalhadores).

Por fim, em se tratando de assunto de alta técnica e especialização, é de suma importância que as orientações técnicas ao Ministério do Trabalho sejam impositivas, evitando o interesse profissional específico, ou seja, o atendimento de conveniências de quaisquer especialistas que porventura prestem serviços dessa natureza num mercado ainda carente de informação, especialmente no que se refere ao fiel cumprimento dos preceitos da NR 10 e instruções complementares específicas para o SEP.

Referências Bibliográficas

Sobre ETAP

ETAP é líder no mercado e tecnologia em software de modelagem, projeto, análise, otimização, monitoramento, controle e automação para sistemas de potência elétrica. Vem fornecendo soluções corporativas há 30 anos e amplamente utilizadas para sistemas de geração, transmissão, distribuição, industriais, de transporte e de baixa tensão. Fundada em 1986, a ETAP está sediada em Irvine, Califórnia, EUA, com mais de 70 escritórios no mundo, inclusive no Brasil localizado em Ribeirão Preto - SP.

Sobre Autor

Leandro Toniello é engenheiro eletricitista graduado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, pós-graduado em Gestão de Projetos e Engenharia de Segurança do Trabalho. Atua em simulação e análise de sistemas de potência há 18 anos e atualmente é Gerente de Negócios na ETAP Brasil Automação e professor universitário na Faculdade Anhanguera.

ABNT. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. São Paulo: ABNT, 2003.

BUSSMANN Electrical Protection Handbook: Selecting Protective Devices Based On the National Electrical Code. USA: Cooper Bussman, 1998.

ETAP. **Enterprise Transient Analysis Program**: Short Circuit Analysis. Versão 16.2. ed. Irvine CA: ETAP, 2018.

IEEE STD 1584. **IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations**. Nova York: IEEE, 2002.

IEEE STD 551. **IEEE Recommended Practice for Calculation Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems**. New York: IEEE, 2006.

KINDERMANN, G. **Curto Circuito**. 4 Edição. ed. Florianópolis - SC: Geraldo Kindermann, 2007.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MTE. **NR 10**: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasil: MTE, 2016.

MTE/SIT/DSST. **Manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção contra os efeitos do arco létrico e do fogo repentino**. Brasil: MTE, 2012.

NASCIMENTO, S. L. D. C. **Introdução ao Cálculo de Curto-Circuito em Sistemas Elétricos Industriais**. 1 Edição. ed. Porto Alegre - RS: Editora da UFRGS, 2013.

NFPA 70E. **"Standart for Electrical Safety in the Workplace"**. Quincy: NFPA, 2015.

ROEPER, R. **Correntes de curto-circuito em redes trifásicas**. 6 Edição. ed. São Paulo - SP: Livraria Nobel S.A., 1991.

SOUZA, J. B. D.; PEREIRA, J. G. **Manual de Auxílio na Interpretação e Aplicação da nova NR-10**. São Paulo: LTR Editora, 2006.