



X IEEE ESW-Brasil 2021

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

19 a 21 de outubro de 2021 – Virtual – on-line

RELEVÂNCIA DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO PARA O CONTROLE DA ENERGIA INCIDENTE – ESTUDO DE CASO

Filipe Resende
Vale S.A.

filipe.resende@vale.com

Henrique Fantoni
SM&A

henrique.fantoni@sma-eng.com.br

André Reis
Vale S.A.

andre.reis@vale.com

RESUMO

O nível de energia incidente de um ponto do sistema elétrico é função direta da corrente de curto-circuito nesse mesmo ponto. Esse conceito aparece de forma matemática nas principais metodologias de cálculo existentes. Dentre as muitas variáveis envolvidas na determinação da energia incidente, a corrente de curto-circuito tem uma relevância significativa, pois, essa é que definirá também a máxima pressão produzida pelo arco elétrico. Controlar os níveis de energia incidente trabalhando somente na duração do fenômeno pode implicar em condições de risco, sobretudo quando o tempo em que a corrente de curto-circuito permanece pode ser variável em determinados contextos. Esse trabalho apresenta alguns cenários em que o nível de energia incidente da instalação é significativamente afetado por fatores muitas vezes desconsiderados na análise, a saber: tempo de atuação de fusíveis, comprimento de cabos, atraso na atuação de disjuntores, entre outros. Esses fatores se tornam mais preponderantes à medida que a corrente de curto-circuito se eleva. Dessa forma, é interessante avaliar, desde a concepção do projeto, o impacto da corrente de curto-circuito nos níveis de energia incidente.

1.0 – INTRODUÇÃO

A avaliação dos riscos relativos ao arco elétrico, passa pelo cálculo dos níveis de energia incidente da instalação. Esses níveis irão subsidiar as medidas de controle dos riscos, seja no dimensionamento das vestimentas antichama, seja nos procedimentos de trabalho e capacitação dos profissionais. Contudo, a energia incidente num dado ponto do sistema elétrico representa, essencialmente, a energia térmica que irá atingir o colaborador, acumulada num dado intervalo de tempo. Outros efeitos provenientes do arco elétrico,

também nocivos ao ser humano, não podem ser avaliados conhecendo apenas o nível de energia incidente da instalação, tais como, ondas de pressão, ruído de alta intensidade, projeção de estilhaços e projeção de componentes. Uma avaliação de risco abrangente deve levar em conta também esses fatores.

2.0 – CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE

A metodologia para o cálculo da energia incidente mais empregada nas instalações industriais é o padrão *IEEE-1584:2018 Guide for Performing Arc-flash Hazard Calculations* [1]. Segundo o padrão, a energia incidente é proporcional à corrente de curto-circuito e à duração do arco elétrico. Apesar das diferenças entre os métodos de cálculo disponíveis, essa relação de proporcionalidade se dá entre todas metodologias.

O valor final da energia incidente em um painel elétrico envolve ainda muitas outras variáveis segundo [1], nível de tensão, distância de trabalho, dimensões do compartimento, orientação dos barramentos, espaçamento entre as fases. Contudo, a corrente de curto-circuito tem um papel preponderante no cálculo, uma vez que essa também irá determinar a duração do arco elétrico, caso o arco seja extinto pela proteção de sobrecorrente convencional. Importante lembrar que a corrente de arco elétrico é função da corrente de curto-circuito franco.

Uma vez que a energia incidente é proporcional às duas grandezas, nota-se que é possível diferentes valores de corrente e tempo produzirem os mesmos valores de energia incidente. A tabela 1 mostra alguns exemplos. Vê-se também que é possível obter níveis de energia incidente mais altos em situações onde a corrente de curto-circuito seja mais baixa, bastando que o tempo seja suficientemente mais longo. Se forem consideradas as outras variáveis, conforme [1], a

1/6

RELEVÂNCIA DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO PARA O CONTROLE DA ENERGIA INCIDENTE – ESTUDO DE CASO

análise torna-se ainda mais sofisticada, a configuração dos barramentos, vertical ou horizontal, tem um impacto bastante relevante no valor final da energia incidente.

Tabela 1 – Exemplo de níveis iguais de energia incidente para diferentes valores de I_{bf} e Δt . Dados para simulação: 480 V, configuração fechada, largura 508 mm, altura 508 mm, separação entre as fases de 25 mm, configuração dos eletrodos VCB, distância de trabalho 457 mm. Fonte [2]

I_{bolted} kA	I_{arcing} kA	Arc Duration Cycles (ms)	Incident Energy cal/cm ²
20	15.30	138.0	4.98
40	27.34	73.3	4.98
60	34.12	56.7	4.98
80	37.61	50.0	4.98

3.0 – RELEVÂNCIA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DO SISTEMA

Atualmente, não se tem um modelo matemático que permita quantificar todos os efeitos do arco elétrico. Não obstante, algumas considerações podem ser feitas acerca desses efeitos, em especial, sobre a máxima pressão gerada durante o evento. Destaca-se que os efeitos como a projeção de componentes e estilhaços, estão associados às ondas de pressão geradas durante o arco elétrico [3].

De acordo com o modelo proposto por Crawford [4], bem como testes realizados em [5] a pressão gerada por um arco elétrico é, analogamente à energia incidente, proporcional à corrente de curto-circuito. Contudo o pico de pressão ocorre já no primeiro ciclo da corrente de curto [6], dificultando a interrupção do fenômeno antes que a máxima pressão ocorra. A figura 1 mostra a evolução da pressão, gerada dentro de um volume fechado, ao longo do tempo. Nota-se que o pico de pressão ocorreu próximo de 10 ms, tempo esse inferior a um ciclo em 60 Hz.

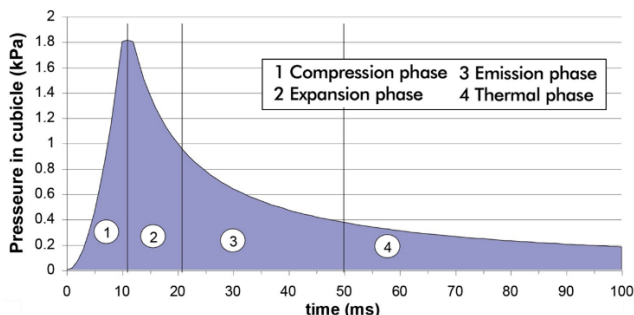


Figura 1 – Evolução da pressão em um compartimento fechado. Fonte [7]

3.1 – EXEMPLO 1

Um caso particular de avaliação da energia incidente e que merece destaque é um cenário onde se tenha um nível de curto-circuito elevado com rápida atuação da proteção. Apesar da possibilidade de manter, em alguns casos, os níveis de energia incidente controlados para altas correntes de curto-circuito, alguns pontos de atenção são relevantes. A figura 2 apresenta dois sistemas distintos.

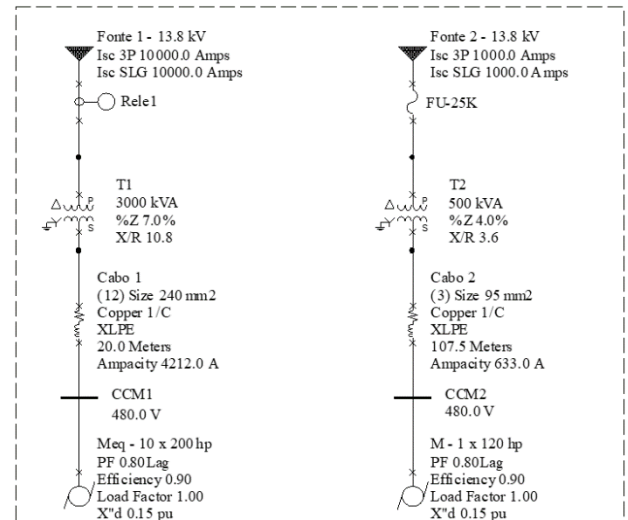


Figura 2 – Níveis de energia incidente em dois CCMs distintos

Os CCMs apresentam níveis de curto-circuito bastante diferentes. A corrente de falta trifásica no CCM1 vale 57,6 kA, ao passo que no CCM2 a corrente vale 7,95 kA. Essa diferença se dá por conta de quatro fatores principais, potência de curto-circuito da fonte, potência dos transformadores, seção e comprimento dos cabos e a contribuição dos motores para corrente de curto. Destaca-se que o CCM1 alimenta dez motores, enquanto o CCM2 alimenta somente um motor.

Para avaliar a energia incidente em cada um dos CCMs é necessário conhecer os tempos de eliminação do arco, ou seja, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção. Nesse caso, será considerado o tempo de atuação da proteção à montante dos CCMs para definir a energia incidente. A proteção primária dos transformadores é feita por um relé de proteção para o transformador T1 e por um elo fusível para o transformador T2. Para esse caso, considerou-se a atuação do relé de proteção de 20 ms e do disjuntor de 60 ms. Para o transformador T2 utilizou-se um elo fusível de 25K, sendo o tempo de atuação relativo à curva superior do fusível (*clearing time*). Os demais dados para realizar o cálculo foram inseridos no software e estão apresentados na tabela 2 e na tabela 3, juntamente com os níveis de energia incidente

RELEVÂNCIA DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO PARA O CONTROLE DA ENERGIA INCIDENTE – ESTUDO DE CASO

encontrados para cada um dos CCMs. Foram considerados os dados típicos para as dimensões do compartimento, espaçamento entre fases (gap) e para a distância de trabalho. Foi seguido o padrão IEEE-1584:2018 para determinar os níveis de energia incidente.

Avaliando a tabela 1, nota-se que a diferença dos níveis de curto-circuito entre os CCMs é compensada pela duração do evento em cada um dos casos. Para o CCM1 o arco elétrico durou 80 ms, enquanto para o CCM2 o tempo de atuação do fusível foi 591,8 ms, sete vezes mais lento que o conjunto relé/disjuntor. Dessa forma, o nível de energia incidente se mostrou o mesmo para os dois casos, 6,96 cal/cm². Se for considerado um acréscimo de 40 ms para os dois casos, passa-se a ter uma duração de 120 ms para o CCM1 e 631,8 ms para o CCM2. Com os novos tempos, os níveis de energia incidente passam a ser 9,73 cal/cm² e 7,43 cal/cm² para o CCM1 e CCM2, respectivamente. Vale destacar que os aumentos

foram de 39,8 % e 6,75 %, indicando que o nível de energia incidente no CCM1 é mais sensível às variações de tempo que o CCM2.

Uma análise sobre a pressão gerada nos dois casos permite afirmar, ainda que sem o cálculo do valor exato, que para o CCM1 o pico de pressão é superior ao CCM2. Uma vez que nos dois casos o tempo de extinção do arco é superior a um ciclo, pode-se dizer que ambos os CCMs experimentaríamos o máximo valor de pressão produzido por um arco real. Considerando a relação de proporcionalidade com a corrente, é possível afirmar que a pressão produzida no CCM1 será cerca de sete vezes a pressão gerada no CCM2.

Embora uma análise inicial mostre que os dois painéis possuem o mesmo nível de energia incidente, é possível constatar que o CCM1 tem pelo menos duas desvantagens significativas, maior sensibilidade da energia incidente em função de pequenas variações de tempo e um pico de pressão muito superior quando comparado ao CCM2.

Tabela 2 – Resultado dos níveis de energia incidente para o CCM1 e CCM2

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tot (sec.)	Equip Type	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm ²)
CCM1	Relé1	0.48	57.62	33.59	42.17	24.58	0.02	0.0600	MCC	VCB	305	356	254	25	1373	457	6.96
CCM2	FU-25K	0.48	7.95	5.28	7.95	5.28	0.5918	0.0000	MCC	VCB	305	356	254	25	1374	457	6.96

Tabela 3 – Resultado dos níveis de energia incidente para o CCM1 e CCM2 considerando um atraso de 40 ms

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tot (sec.)	Equip Type	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm ²)
CCM1	Relé1	0.48	57.62	33.59	42.17	24.58	0.02	0.1000	MCC	VCB	305	356	254	25	1694	457	9.73
CCM2	FU-25K	0.48	7.95	5.28	7.95	5.28	0.5918	0.0400	MCC	VCB	305	356	254	25	1431	457	7.43

3.1 – EXEMPLO 2

A relevância da corrente de curto-circuito pode ser também percebida quando um sistema passa por uma alteração. A figura 3 apresenta o diagrama unifilar de parte de um sistema elétrico industrial. O painel é alimentado por um transformador de 1000 kVA e fornece energia para um motor de 500 cv e cinco motores de 75 cv. O coordenograma apresentado na figura 4 está relacionado com o sistema elétrico apresentado na figura 3. A curva roxa indica a corrente de partida (8.In) somada com a corrente nominal dos demais motores da barra. A curva vermelha indica a suportabilidade térmica e mecânica do transformador, a curva verde indica a suportabilidade dos cabos de baixa tensão e a curva azul representa os ajustes do relé de proteção. A

curva tracejada em azul indica a corrente de curto-circuito no painel. O coordenograma foi elaborado na tensão de 13,8 kV.

A tabela 4 apresenta o nível de energia incidente do painel elétrico. A metodologia aplicada foi também conforme o padrão IEEE-1584:2018. Foram considerados valores típicos para as dimensões do painel, espaçamento entre as fases e distância de trabalho. A energia incidente encontrada foi de 8,87 cal/cm². Para a corrente de arco que sensibiliza o relé, o tempo de atuação é de 250 ms e o tempo de abertura do disjuntor no primário do transformador de 50 ms. Vale destacar que as correntes fornecidas pelos motores contribuem para elevar a corrente de curto-circuito total, bem como para elevar a energia incidente no ponto, contudo, não influenciam no tempo de atuação dos relé de proteção, uma vez que não passam pelo TC de proteção.

RELEVÂNCIA DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO PARA O CONTROLE DA ENERGIA INCIDENTE – ESTUDO DE CASO

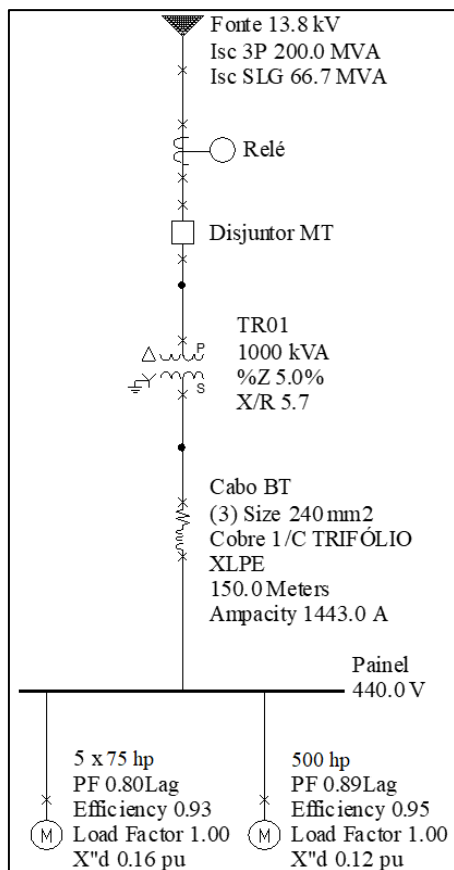


Figura 3 – Diagrama unifilar de parte de um sistema elétrico industrial

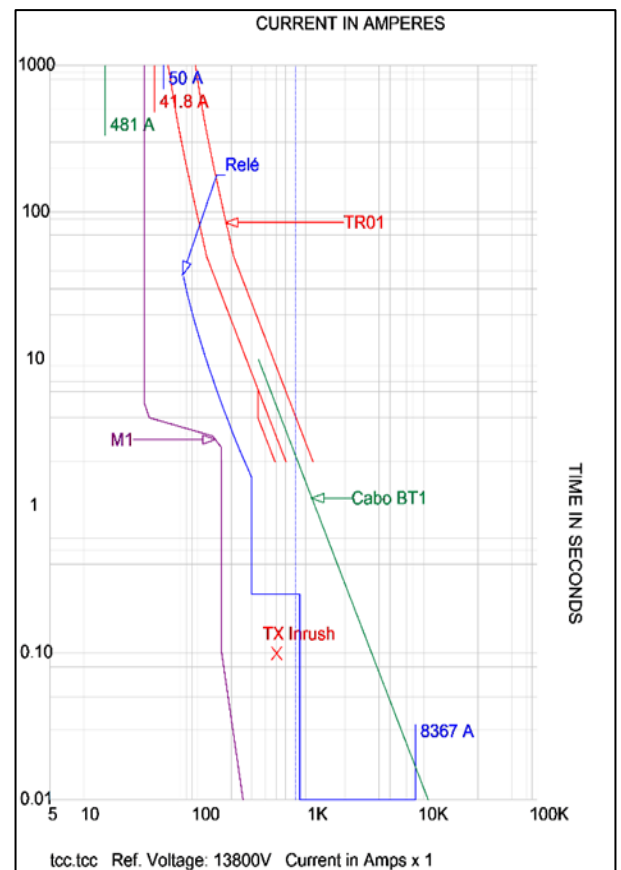


Figura 4 – Coordenograma do sistema elétrico (motores, relé de proteção, transformador, cabos)

Tabela 4 – Resultado do nível de energia incidente para o painel de 440 V

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Equip Type	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm ²)
Painel	Relé	0.44	22.55	16.50	15.07	11.03	0.25	0.0500	PNL	VCB	305	356	254	25	1598	457	8.87

Para atender uma condição operacional da planta, foi necessário separar os motores de 75 cv do motor de 500 cv. Dessa forma, foi mantido o motor de 500 cv no painel existente e instalado um outro painel elétrico para alimentar os motores de 75 cv, foi mantido também o transformador existente e os cabos de alimentação já instalados. Os cabos utilizados na instalação são de cobre, seção 240 mm², isolamento em XLPE, 0,6/1 kV, método de instalação B1. A ampacidade dos cabos nessa condição é de 481 A por condutor. Assim, foram utilizados dois cabos por fase (2 x 240 mm²) para a alimentação do motor de 500 cv e um cabo por fase (1 x 240 mm²) para a alimentação do novo painel. Destaca-se que o somatório das correntes nominais dos cinco motores de 75 cv é 484 A, valor

ligeiramente superior a ampacidade do cabo (481 A), contudo, a condição de operar os cinco motores ao mesmo tempo não ocorre na prática. A figura 5 mostra o diagrama unifilar do sistema após a separação das cargas.

Após essa alteração, pode-se imaginar que não há alterações no risco, sob a ótica da energia incidente. Contudo, para o painel existente, tem-se uma redução da corrente de curto-circuito e consequentemente uma alteração no tempo de atuação da proteção, no caso de arco elétrico no painel. A tabela 5 mostra a alteração no nível de energia incidente em função da nova corrente de curto-circuito. Nota-se que o valor foi bastante alterado em função da modificação do sistema, passando de 8,87 cal/cm² para 38,1 cal/cm².

RELEVÂNCIA DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO PARA O CONTROLE DA ENERGIA INCIDENTE – ESTUDO DE CASO

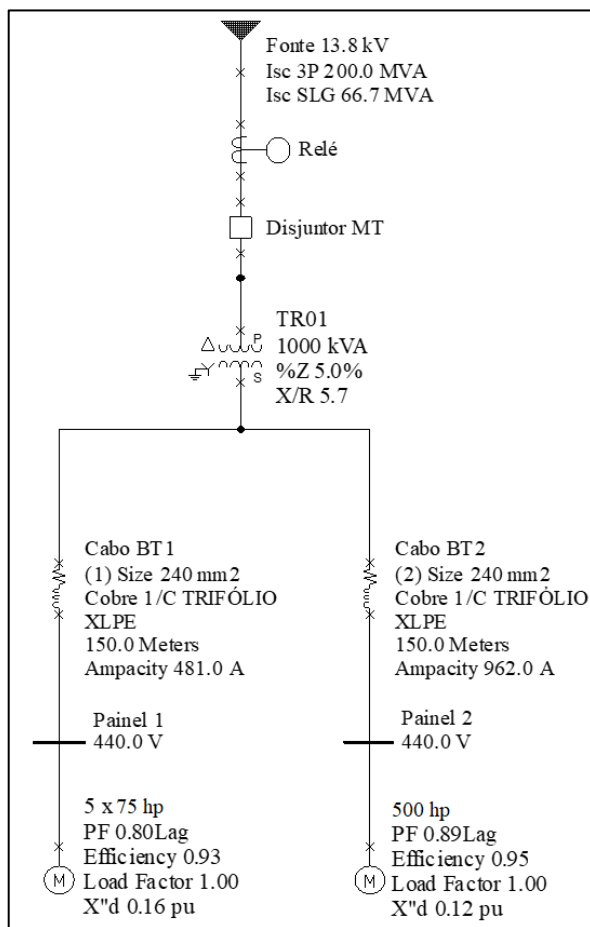


Figura 5 – Diagrama unifilar do sistema após a separação das cargas.

Tabela 5 – Resultado do nível de energia incidente para o painel de 440 V após a alteração do sistema

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time/Tol (sec.)	Equip Type	Electrode Config	Box Width (mm)	Box Height (mm)	Box Depth (mm)	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (mm)	Working Distance (mm)	Incident Energy (cal/cm ²)
Painel 2	Relé	0.44	17.10	11.09	12.60	8.18	1.95	0.0500	PNL	VCB	305	356	254	25	3981	457	38.1

5.0 – CONCLUSÃO

Os riscos associados ao arco elétrico estão presentes em muitas atividades realizadas pelos trabalhadores que interagem com o sistema elétrico. Definir as medidas de controle adequadas passa pelo cálculo dos níveis de energia incidente nos equipamentos. Dentre as muitas variáveis envolvidas no cálculo, a corrente de curto-circuito tem um papel preponderante na análise de risco, uma vez que essa corrente é que irá definir também o tempo de atuação da proteção. Vale destacar que a corrente de curto-circuito também irá definir a máxima pressão produzida pelo arco elétrico, sendo que o pico de pressão ocorre já no primeiro ciclo da corrente de curto-circuito. Dessa forma, ainda que se tenha baixos níveis de energia incidente, é

possível que a pressão produzida pelo arco ofereça risco aos colaboradores.

O exemplo 1 mostrou como a corrente de curto-circuito pode influenciar demasiadamente os níveis de energia incidente, produzindo um aumento de 39,8 % no seu valor para um acréscimo de 40 ms no tempo de atuação. Destaca-se que os disjuntores podem apresentar atraso na sua atuação depois de algum tempo já em operação.

O exemplo 2 mostrou o impacto na energia incidente ao se fazer uma alteração relativamente simples na instalação elétrica. A redução da corrente de curto-circuito no painel, ao suprimir um cabo por fase, foi suficiente para levar o tempo de atuação do relé para a parte inversa da curva, aumentando bastante o tempo de atuação do relé e consequentemente a energia incidente.

RELEVÂNCIA DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO PARA O CONTROLE DA ENERGIA INCIDENTE – ESTUDO DE CASO

Embora a energia incidente seja função de muitas variáveis, conforme o modelo apresentado no padrão IEEE-1584:2018, deve-se ter bastante atenção com os níveis de curto-circuito no ponto avaliado. Alternativas para mitigar o problema seria trabalhar com tempo definido para uma ampla faixa de corrente, de forma a assegurar um mesmo tempo de atuação para variações na corrente de curto-circuito. Outra medida bastante eficiente é o uso dos relés de proteção dedicados para detecção de arco elétrico. Conceber um sistema onde as correntes de curto-circuito não sejam elevadas é também uma boa prática de projeto.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE Std 1584-2018 - IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, 2018.

[2] Phillips, Jim. “More Than Just One Number: Understanding incident energy calculations”, *Electrical Contractor Magazine*, 2021.

[3] R. H. Lee, "Pressures Developed by Arcs". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-23, no. 4, Julho 1987, pg. 760 – 763.

[4] Crawford, Clark; Doughty, R. “Motor terminal box explosions due to faults”. *IEEE Transactions Industry Applications*, vol. 29, no. 1, janeiro/fevereiro 1993, pg. 72 – 81.

[5] Hoagland, Hugh; Maurice, Claude; Haines, Andrew; Maurice, André. “Arc Flash Pressure Measurement by Physical Method, Effect of Metal Vapor on Arc Blast”. *IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*, 2016

[6] Lang, Mike; Jones, Ken. “Exposed to the Arc Flash Hazard”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, janeiro/fevereiro 2015, pg. 51 – 61.

[7] Johnson, Bryan. *Standards and the development of MV switchgear rated for arc flash protection*. Acessado em 20/05/2021 de: <https://www.ee.co.za/article/standards-and-the-development-of-mv-switchgear-rated-for-arc-flash-protection.html>