

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA AVALIAÇÃO DO RISCO DE FATALIDADE RELACIONADO A SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

BRAULIO ROBERTO DE MELO COUTINHO; IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES; SANDRO DE CASTRO ASSIS
UFMG(*) UFMG CEMIG-D

RESUMO

O artigo apresenta uma discussão sobre a aplicação do método probabilístico para análise de risco em malhas de aterramento de subestações. Na abordagem probabilística, a possibilidade de uma fatalidade associada ao sistema de aterramento é calculada em função das probabilidades de coincidência e de fibrilação. Inicialmente, a metodologia determinística vigente é citada e, em seguida, a abordagem probabilística é apresentada através de artigos publicados. Por fim, memórias de cálculos de subestações foram avaliadas sob a perspectiva probabilística. Os resultados mostram que a metodologia de avaliação de risco apresenta-se como uma ótima ferramenta para quantificar o perigo e permitir ao projetista tomar decisões com maior segurança.

PALAVRAS-CHAVE

Subestações, Sistema de aterramento e Análise de Risco de fatalidade

1.0 - INTRODUÇÃO

A expansão do sistema elétrico tem provocado o aumento do nível de curto-circuito das subestações fazendo com que as malhas de aterramento precisem ser reavaliadas e, em muitos casos, aprimoradas para garantir a segurança das pessoas. Ativos localizados em áreas urbanas, onde o crescimento físico da geometria da malha pode não ser possível, tem se tornado um grande desafio para os profissionais da área. Em alguns casos, o risco de adensamento da malha ou até mesmo a necessidade de desligamento do ativo para execução da obra, podem se tornar uma barreira na adequação do sistema de aterramento.

Outra dificuldade para os projetistas de sistemas de aterramento é a diminuição da área disponível para construção das malhas, pois a tendência das grandes concessionárias é a utilização de arranjos físicos mais compactos que utilizam equipamentos de manobra isolados com SF₆. A redução do pátio afeta diretamente a área disponível para construção do sistema de aterramento.

Diante do novo cenário apresentado, o projetista, em busca de minimizar os riscos associados ao aterramento, geralmente encontra dificuldades para controlar os potenciais perigosos, seja na construção de uma subestação nova com área reduzida, na expansão de uma subestação existente, ou até mesmo na análise de superação de ativos [1].

Atualmente, os critérios estabelecidos por algumas normas, como “NBR 15751: Sistema de aterramento de subestações – requisitos” [2] e “IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” [3], utilizam parâmetros determinísticos para o projeto de uma malha de aterramento. O objetivo é garantir que os potenciais que apareçam devido à ocorrência de um curto-circuito máximo fase-terra estejam abaixo dos valores limites de segurança para as tensões de toque e de passo.

Em diversos casos, as técnicas convencionais podem indicar que os potenciais perigosos da malha estão controlados de forma efetiva, ou podem não ser suficientes para prover segurança de pessoal em função das restrições físicas na instalação avaliada. Nessa perspectiva, conforme indicado pela brochura técnica do CIGRE/CIGRE, “749: *Substation earthing system design optimisation through the application of quantified risk analysis*” [4], existe uma tendência na literatura onde o dimensionamento de um sistema de aterramento passa sobretudo pela verificação e cálculo do risco de um acidente ocasionado pelo surgimento de um potencial perigoso em uma subestação.

Cabe destacar que um acidente relacionado ao sistema de aterramento de uma subestação é considerado um evento de alto impacto e de baixa probabilidade. Por isso, há necessidade de se quantificar o risco envolvido, uma vez que

a ocorrência de um acidente depende de uma combinação de eventos. Algumas diretrizes técnicas internacionais mais atuais abordam a análise probabilística para o projeto de aterramento de uma subestação.

Diante dos novos desafios destacados, o trabalho apresenta a metodologia probabilística para análise de segurança de malhas de aterramento de subestações. O risco de fatalidade é calculado através das probabilidades de coincidência e de fibrilação. A primeira é definida como a possibilidade de ocorrer uma coincidência de uma pessoa estar em contato com um objeto aterrado durante a elevação do potencial da malha, já a probabilidade de fibrilação quantifica o risco de uma pessoa sofrer fibrilação ventricular caso seja submetida a uma diferença de potencial.

Para ilustrar, parâmetros típicos de subestações são apresentados e o risco de fatalidade é calculado para diversos cenários. O tempo de atuação da proteção, a quantidade de faltas/ano, a tensão aplicada no circuito do choque e o tempo de contato de uma pessoa com um ativo aterrado são verificados através de uma análise de sensibilidade com o intuito de permitir ao leitor a percepção da influência das variáveis na quantificação do risco de fatalidade.

Os resultados mostram que para alguns cenários simulados o risco de fibrilação é elevado, porém, a probabilidade de coincidência por ser baixa acaba atenuando de forma significativa o risco de um acidente fatal, tornando a subestação com um risco de fatalidade menor que 1 em 1 milhão.

Em síntese, o artigo apresenta uma importante contribuição à discussão sobre projetos de malhas de aterramento com o objetivo de aumentar o leque de possibilidades de avaliação da superação de malhas existentes, futuras ampliações em subestações ou até mesmo construção de novas subestações em áreas reduzidas.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

Inicialmente contextualiza-se a abordagem determinística, utilizada atualmente no mercado brasileiro, e num segundo momento os principais conceitos da abordagem probabilística são apresentados.

2.1 Abordagem determinística

Em um projeto de uma malha de aterramento de subestação, a NBR 15751 estabelece etapas a serem cumpridas, sendo elas:

- a) Medição de resistividade;
- b) Modelagem e interpretação do solo;
- c) Conhecimento da configuração do sistema elétrico da subestação;
- d) Cálculo dos equivalentes dos neutros e dos cabos para-raios;
- e) Conhecimento da potência de curto-circuito atual e futura;
- f) Cálculo da resistência da malha proposta inicialmente;
- g) Estudo de distribuição da corrente de curto-circuito;
- h) Determinação da corrente malha-solo e da elevação de potencial da malha;
- i) Cálculo das tensões de toque e passo de segurança (curta e longa duração);
- j) Definição da geometria básica da malha (*mesh*);
- k) Simulações e verificação da segurança com programas digitais de cálculo pelo método do potencial constante, para a confirmação de todos os valores de segurança;

O fluxograma apresentado na Figura 1 sintetiza a sequência de atividades para elaboração de uma malha.

Na metodologia estabelecida na NBR 15751, os valores máximos para tensão de toque e passo, admissíveis a 99,5% das pessoas com o peso acima de 50 kg, são calculados considerando as correntes de curta e longa duração e o valor da impedância corporal de 1000 Ω . Para corrente de curta duração o valor admissível é calculado através da equação:

$$I_{CHCD} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} [A]$$

Conhecendo as tensões máximas admissíveis, cabe ao projetista desenvolver uma geometria da malha de aterramento da subestação para que os potenciais perigosos que possam surgir em decorrência de um curto circuito fiquem abaixo dos limites definidos.

Apesar dessa metodologia ser utilizada há bastante tempo, é importante destacar que a ocorrência de curto-circuito, a magnitude da corrente de malha, a duração da falta, a exposição do ser humano ao risco, a impedância do corpo humano e a intensidade de possíveis danos à saúde são fatores de natureza probabilística.

A brochura técnica do CIGRÉ [4] ainda destaca que na análise determinística não há distinção se a subestação está numa área rural, com baixo fluxo de pessoas, ou em um centro urbano. Não leva em conta a frequência de falhas da linha e também não considera a frequência de contatos ou exposição de pessoas com ativos sob a influência do sistema de aterramento.

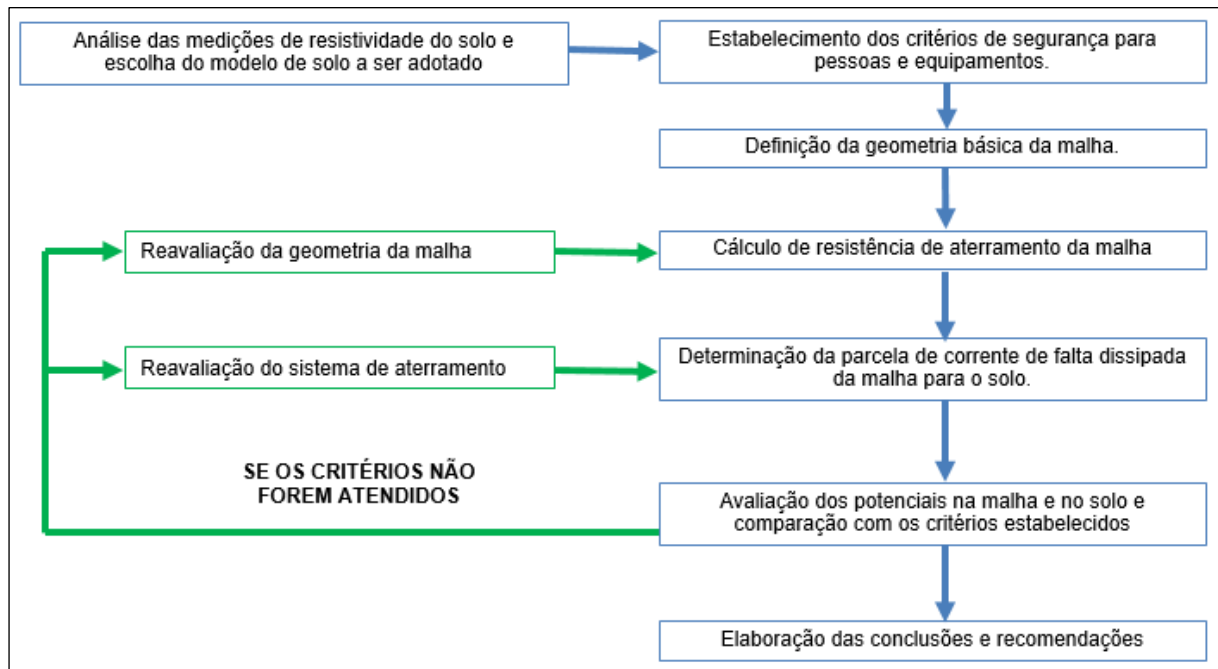


Figura 1 – Fluxograma das etapas de projeto de uma malha de aterramento [Adaptado de 5]

2.2 Abordagem probabilística

Nesta nova perspectiva é importante que o risco de fatalidade associado ao sistema de aterramento de uma subestação seja analisado. A metodologia descrita nesta seção é apresentada por Carman et al. [6].

Para se estimar o risco anual, é preciso identificar as probabilidades de coincidência e de fibrilação. A primeira é definida como a probabilidade de uma pessoa entrar em contato com um ativo aterrado de uma subestação ou estar em uma região sob efeito da elevação de potencial do solo no momento exato da falha. Já a segunda, considera a probabilidade do coração de uma pessoa sofrer fibrilação ventricular ao ser exposto a uma corrente específica. A probabilidade de fatalidade é então calculada conforme equação abaixo:

$$P_{\text{fatalidade}} = P_{\text{coincidência}} \times P_{\text{fibrilação}}$$

A $P_{\text{coincidência}}$ depende da duração média da falta, da duração média da exposição da vítima ao risco, da quantidade de faltas por ano e quantidade de exposições da vítima por ano. Uma das formas de se calcular a probabilidade de coincidência é através da equação:

$$P_{\text{coincidência}} = \frac{f_n \times p_n \times (f_d + p_d) \times T}{k} \times \text{CRF},$$

Onde:

f_n é a quantidade de ocorrência de faltas por ano;

f_d é a duração média da falta em segundos;

p_n é a quantidade de exposições/presenças por ano;

p_d é a duração média da exposição em segundos;

T é o intervalo de tempo considerado no cálculo de probabilidade de coincidência em anos;

k é uma constante para converter a base de tempo de um ano em segundos;

CRF é o fator de redução da coincidência que pode ser aplicado em função de algum cenário específico da instalação, como por exemplo, barreiras de proteção, sinalização específica, controle de acesso, etc.

Já $P_{\text{fibrilação}}$ depende dos potenciais desenvolvidos na instalação, da distribuição probabilística relativa a tolerância do corpo humano à circulação de corrente em um determinado tempo, da distribuição probabilística da impedância do corpo humano em função da tensão aplicada, do caminho percorrido pela corrente, resistências em série consideradas do circuito do choque, configuração de contato e duração da falta à terra.

Essa probabilidade também pode ser calculada através da seguinte equação:

$$P_{\text{fibrilação}}(V_{\text{apl}}, t) = \sum_{n=1}^{n=100} \sum_{m=1}^{m=100} \left(\frac{-\frac{n}{100} \times \frac{m}{100} (I_{\text{pos}}(V_{\text{apl}}) > I_{\text{per}}(t))}{\frac{n}{100} \times \frac{m}{100}} \right)$$

Para cada valor de tensão aplicado V_{apl} , em determinado tempo “t”, uma corrente possível I_{pos} , em função do caminho percorrido pelo corpo, é calculada. Caso o valor da corrente calculada supere o valor da corrente permitida I_{per} , a ocorrência da fibrilação é contabilizada.

Observa-se que a corrente permitida também depende do tempo de exposição da vítima. Assim, o total de eventos de fibrilação pela quantidade de amostras coletadas representam o risco de fibrilação para o tempo específico de atuação da proteção e da tensão aplicada.

A combinação dessas duas probabilidades gera a $P_{\text{fatalidade}}$ e deve ser comparada, conforme indicado em [4], com os três níveis de classificação de risco para morte pública indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limite alvo para probabilidade de fatalidade individual [Adaptado de 4]

Probabilidade de fatalidade única	Classificação de risco para morte pública	Implicação resultante para tratamento de risco
$\geq 10^{-4}$	Risco alto ou intolerável	Evitar a ocorrência, independentemente dos custos.
10^{-4} a 10^{-6}	Região intermediária ou ALARP	Minimizar a ocorrência, a menos que a redução de riscos seja impraticável e os custos sejam desproporcionais à segurança obtida
$\leq 10^{-6}$	Risco baixo ou tolerável	Risco geralmente aceitável, no entanto, o tratamento de risco pode ser aplicado se o custo for baixo e/ou uma prática normalmente esperada

O objetivo inicial ao analisar o sistema de aterramento através da abordagem probabilística é que a probabilidade de fatalidade esteja na região onde o risco é baixo ou tolerável. Porém, na região intermediária (*Alarp* - *As Low As Reasonably Practicable*), o projeto é considerado aceitável, desde que práticas adicionais de segurança sejam adotadas para minimizar o risco.

3.0 – ESTUDO DE CASOS

Nesta seção, o trabalho apresenta uma análise dos parâmetros típicos extraídos de diversas memórias de cálculos de malhas de aterramento de subestações existentes do estado de Minas Gerais ao longo de 10 anos.

Destaca-se que todos os documentos foram desenvolvidos através da metodologia determinística, onde o objetivo principal é garantir que os potenciais perigosos fiquem abaixo dos valores de segurança para tensão de passo e toque. Portanto, as malhas aqui analisadas estão em conformidade com os critérios estabelecidos pelas normas vigentes, ou seja, os valores mais altos para tensões de toque e passo que surgiram nas simulações ficaram abaixo dos valores máximos admissíveis.

A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, os dados extraídos das memórias de cálculo analisadas. Para cada subestação (SE), os dados referentes a resistividade aparente (ρ_a), resistividades da primeira camada (ρ_1) e da segunda camada do solo (ρ_2), profundidade da primeira camada (h), espessura da camada de brita utilizada no pátio da subestação (h_s), resistência de malha calculada (R_M), corrente de malha (I_M), máxima tensão de toque permitida (E_{TCD}) e máxima tensão de toque desenvolvida (V_{TCD}) são apresentados.

Tabela 2 – Dados de projetos de aterramento de subestações de Minas Gerais

SE	ρ_a ($\Omega.m$)	ρ_1 ($\Omega.m$)	ρ_2 ($\Omega.m$)	h (m)	h_s (m)	R_M (Ω)	I_M (A)	E_{TCD} (V)	V_{TCD} (V)
01	134	157	83	9,3	0,10	1,21	3320	484	430
02	258	430	115	3,0	0,07	0,90	1170	465	230
03	473	270	1181	2,8	0,10	8,21	1300	495	460
04	486	360	705	4,20	0,06	3,57	660	433	270
05	771	3855	330	7,5	0,06	7,30	158	638	250
06	1440	3200	300	2,5	0,07	6,04	800	525	430
07	1530	1275	1630	1,6	0,10	9,10	370	544	400
08	1740	2485	250	10,5	0,07	6,85	510	608	550
09	1740	3000	300	7,3	0,07	3,90	710	864 *	640
10	1890	3150	1150	2,4	0,07	9,20	220	638	480
11	2000	2000	X	X	0,07	7,01	850	578	520
12	2085	2780	560	12,0	0,10	15,66	506	629	620
13	2863	4404	832	9,6	0,06	10,3	640	836 *	830
14	2891	5256	1216	3,25	0,07	5,10	360	864 *	860
15	3000	3000	X	X	0,10	13,37	1000	638	620

Em todos os casos, o tempo de atuação da proteção considerado foi de 1,0 segundo. Apenas nas subestações 11 e 15 os solos foram considerados do tipo homogêneo, nas demais subestações os solos foram estratificados em duas camadas.

Os valores identificados com um asterisco (*) na coluna " E_{TCD} " foram calculados considerando o fator de 0,157 da IEEE 80, utilizado para pessoas com peso superior a 70 kg. Os demais valores foram calculados utilizando o fator de 0,116, indicado para pessoas com o peso superior a 50 kg. Na coluna " V_{TCD} " os valores indicados referem-se aos máximos potenciais de toque e passo desenvolvidos nas simulações encontradas nas memórias de cálculo.

3.1 Probabilidade de fibrilação

Utilizando o software Argon [7], calculou-se a probabilidade de fibrilação associada para cada valor de tensão de toque máximo permitido e desenvolvido para corrente de curta duração. O tempo de atuação da proteção utilizado no cálculo foi de 1,0 s e foi considerado uma possível vítima utilizando calçado convencional. Optou-se por analisar apenas a tensão de toque, que geralmente costuma refletir a situação de maior risco, mas destaca-se que o procedimento é similar para tensão de passo.

A Figura 2 apresenta as probabilidades de fibrilação calculadas através da abordagem probabilística considerando as tensões de toque desenvolvida (V_{TCD}) e admissível (E_{TCD}). Destaca-se que a tensão de toque máxima permitida passa a não ser utilizada na análise na abordagem probabilística, apenas o potencial desenvolvido na subestação tem o risco verificado. Porém, neste trabalho optou-se por calcular a probabilidade de fibrilação considerando uma situação hipotética onde a tensão de toque desenvolvida alcance o valor máximo admissível estipulado pelo método determinístico.

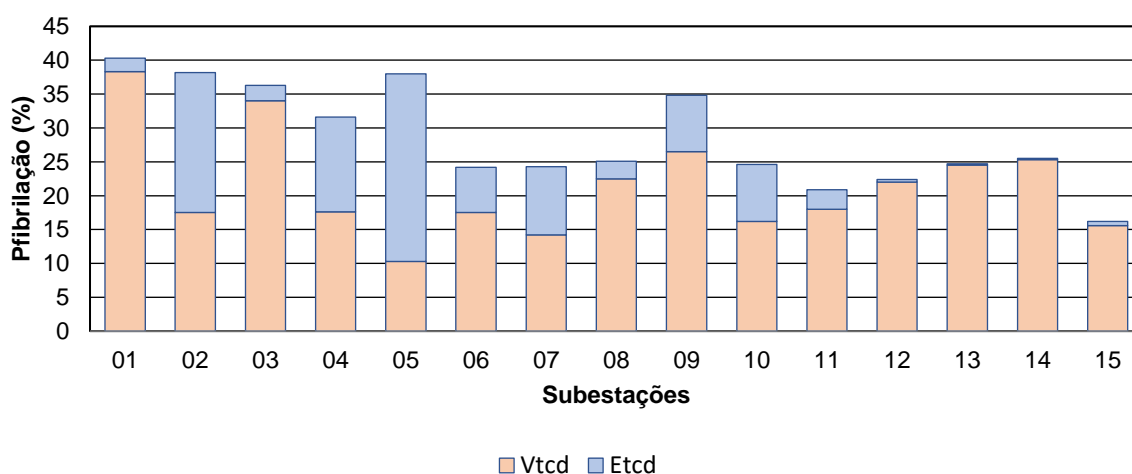


Figura 2 – Probabilidade de fibrilação considerando tensões de toque desenvolvida (V_{tcd}) e admissível (E_{tcd})

A probabilidade de fibrilação foi calculada considerando o solo natural da subestação. Conforme indicado em [8], a utilização de uma camada de revestimento de material de alta resistividade como a brita reduz o risco de fibrilação, sobretudo em solos com baixa resistividade. Esse benefício também está presente na metodologia determinística onde a tensão admissível considerada pode passar a ser mais elevada do que em solo natural.

A Figura 3 apresenta uma análise da probabilidade de fibrilação considerando diferentes tempos de atuação da proteção para os potenciais desenvolvidos. O risco aumenta quando o tempo de atuação da proteção fica mais alto, ou seja, passa de 1,0 s para 1,5 s. Porém, quando o tempo de eliminação da falta fica mais baixo, passando para 0,5 s, a redução na probabilidade de fibrilação é mais significativa.

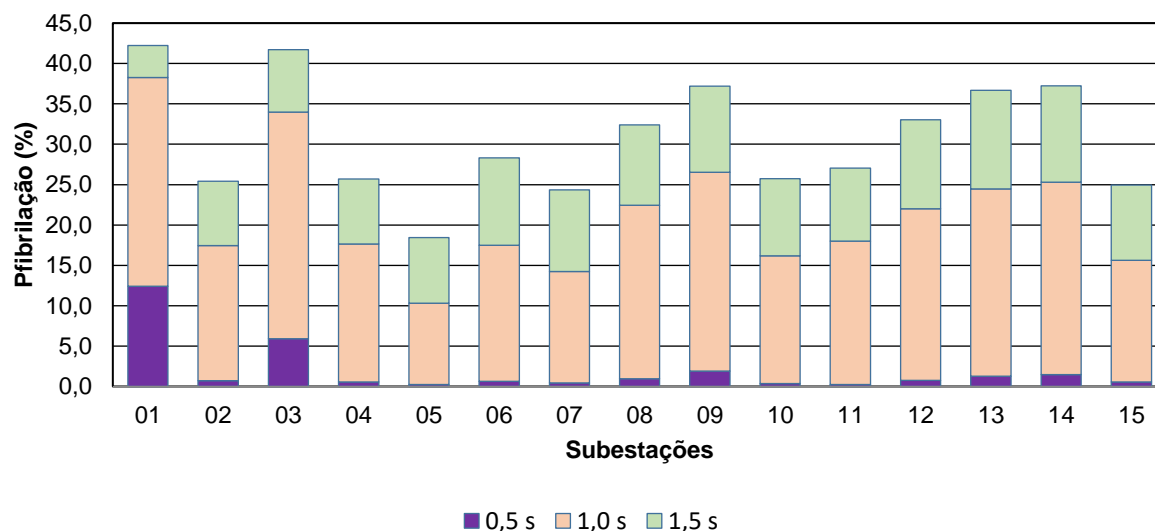


Figura 3 – Probabilidade de fibrilação considerando V_{tcd} para diferentes tempos de atuação da proteção

3.2 Probabilidade de coincidência

Uma forma de atenuar o risco de fatalidade em uma situação de probabilidade de fibrilação elevada é ter um cenário onde a probabilidade de coincidência seja consideravelmente baixa.

Estimar os parâmetros relativos ao comportamento humano dentro de uma instalação não é uma tarefa muito simples. Portanto, para que se tenha uma dimensão do impacto de cada variável, foram estabelecidos cenários hipotéticos.

Na premissa básica, um operador se locomove pelo pátio como parte da rotina de trabalho de inspeção e manutenção da subestação. Consequentemente, o operador está próximo de isoladores de pedestais, estruturas de suporte, equipamentos, cercas metálicas e portões de acesso. Considera-se então uma média de 100 contatos/ano em superfícies aterradas, sendo cada contato com um tempo médio de cinco segundos. A quantidade de faltas considerada para análise é de 5 desligamentos / ano. Não foi utilizado nenhum fator para redução de coincidência ($CRF = 1,0$). Sendo assim, a probabilidade de coincidência foi então calculada:

$$P_{\text{coincidência}} = \frac{5 \times 100 \times (1,0 + 5,0) \times 1}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 9,51 \times 10^{-5}$$

A partir do caso base, foram estabelecidos diferentes cenários. Considerou-se os parâmetros do caso base descrito acima e variou-se o tempo de contato médio (1, 5, 10, 15 e 30 segundos) e a frequência de contatos (5, 10, 100, 1000 e 2000 contatos/ano). A Figura 4 apresenta a evolução da probabilidade de coincidência em função da variação da quantidade de contatos por ano e do tempo médio de contato.

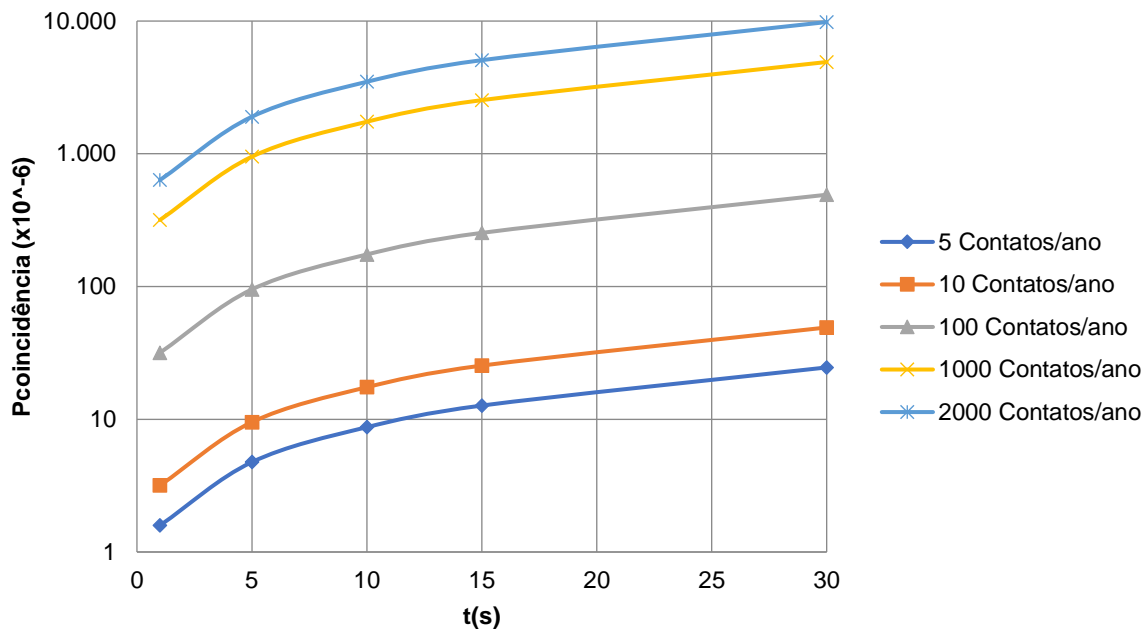


Figura 4 – Probabilidade de coincidência variando o tempo de contato médio e quantidade de contatos por ano

Nessa análise, o comportamento das curvas é facilmente entendido. O risco de tocar uma estrutura durante um curto-circuito no sistema aumenta à medida que a exposição do profissional aumenta, ou seja, o profissional estabelece uma quantidade de contatos maior e/ou aumenta o tempo de contato. Em uma leitura simplificada, as curvas inferiores do gráfico podem representar o risco associado a profissionais que fazem visitas técnicas ou inspeções, e as curvas superiores do gráfico podem representar profissionais de manutenção ou obra.

Na segunda análise, considerou-se os parâmetros do caso base e verificou-se o impacto das variações no tempo de atuação da proteção (0,03 a 3,0 s) e na quantidade de faltas (1 a 15 faltas/ano). A Figura 5 apresenta os resultados para probabilidade de coincidência.

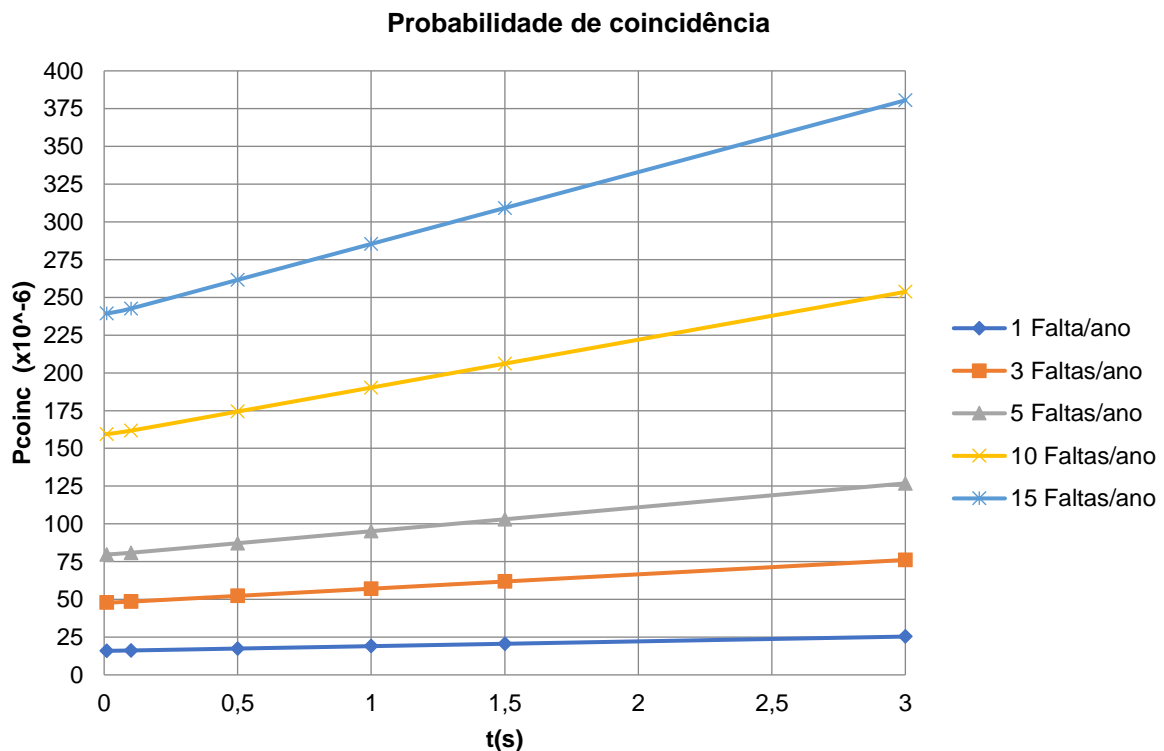


Figura 5 – Probabilidade de coincidência em função do tempo de proteção e da quantidade de faltas/ano

Linhas de transmissão/distribuição que apresentam uma quantidade elevada de faltas por ano e que possuem o tempo de atuação de proteção mais lento geram riscos significativos aos profissionais, aumentando consideravelmente a probabilidade de coincidência. Este gráfico serve como um importante indicativo de que medidas para melhoria no desempenho da linha e otimização no sistema de proteção da subestação podem resultar em um ganho significativo de segurança no sistema de aterramento da subestação.

3.3 Probabilidade de fatalidade

Por fim, a probabilidade de fatalidade é calculada e comparada com os valores indicados na Tabela 1. Para ilustrar, apenas as subestações 01 e 05, que apresentaram respectivamente o maior e o menor risco associado à probabilidade de fibrilação, foram verificadas.

Nas Tabelas 3 e 4 as probabilidades de fatalidade foram calculadas considerando variações na quantidade de contatos/ano e no tempo médio de contato. Cada combinação foi colorida de acordo com as três regiões de classificação de risco definidas na Tabela 1.

Tabela 3 – Probabilidade de Fatalidade ($t = 1,0$ s, 5 faltas/ano)

p_d (s)	Probabilidade de Fatalidade – SE 1					Probabilidade de Fatalidade – SE 5				
	p_n – Contatos / ano					p_n – Contatos / ano				
	5	10	100	1000	2000	5	10	100	1000	2000
1 s	4,5E-07	9,1E-07	9,1E-06	9,1E-05	1,8E-04	1,2E-07	2,5E-07	2,5E-06	2,5E-05	4,9E-05
5 s	1,7E-06	3,3E-06	3,3E-05	3,3E-04	6,7E-04	4,5E-07	9,0E-07	9,0E-06	9,0E-05	1,8E-04
10 s	3,2E-06	6,4E-06	6,4E-05	6,4E-04	1,3E-03	8,6E-07	1,7E-06	1,7E-05	1,7E-04	3,4E-04
15 s	4,7E-06	9,4E-06	9,4E-05	9,4E-04	1,9E-03	1,3E-06	2,5E-06	2,5E-05	2,5E-04	5,1E-04
30 s	9,2E-06	1,8E-05	1,8E-04	1,8E-03	3,7E-03	2,5E-06	5,0E-06	5,0E-05	5,0E-04	1,0E-03

Na Tabela 3, o tempo de atuação da proteção é 1,0 s. Observa-se que os cenários com uma quantidade elevada de contatos e com tempo de contato significativo geraram um risco de fatalidade inaceitável.

Tabela 4 – Probabilidade de Fatalidade ($t = 0,5$ s, 5 faltas/ano)

p_d (s)	Probabilidade de Fatalidade – SE 1					Probabilidade de Fatalidade – SE 5				
	p_n – Contatos / ano					p_n – Contatos / ano				
	5	10	100	1000	2000	5	10	100	1000	2000
1 s	1,5E-07	3,0E-07	3,0E-06	3,0E-05	5,9E-05	3,1E-09	6,2E-09	6,2E-08	6,2E-07	1,2E-06
5 s	5,4E-07	1,1E-06	1,1E-05	1,1E-04	2,2E-04	1,1E-08	2,3E-08	2,3E-07	2,3E-06	4,5E-06
10 s	1,0E-06	2,1E-06	2,1E-05	2,1E-04	4,1E-04	2,2E-08	4,3E-08	4,3E-07	4,3E-06	8,7E-06
15 s	1,5E-06	3,1E-06	3,1E-05	3,1E-04	6,1E-04	3,2E-08	6,4E-08	6,4E-07	6,4E-06	1,3E-05
30 s	3,0E-06	6,0E-06	6,0E-05	6,0E-04	1,2E-03	6,3E-08	1,3E-07	1,3E-06	1,3E-05	2,5E-05

Na Tabela 4, o tempo de atuação da proteção considerado foi de 0,5 s. A subestação 1 apresenta leve melhora em relação a configuração anterior, porém o risco associado continua na região intermediária da classificação de risco, o que na prática demandaria medidas adicionais de mitigação. Para a subestação 5, o risco de fatalidade diminuiu consideravelmente.

Na Tabela 5, a probabilidade de fatalidade foi calculada considerando variação no tempo de atuação da proteção e na quantidade de faltas/ano.

Tabela 5 – Probabilidade de Fatalidade ($p_d = 5$ s, $p_n = 100$)

t (s)	Probabilidade de Fatalidade – SE 1					Probabilidade de Fatalidade – SE 5				
	Faltas / ano					Faltas / ano				
	1	3	5	10	15	1	3	5	10	15
0,5 s	2,2E-06	6,5E-06	1,1E-05	2,2E-05	3,2E-05	4,5E-08	1,4E-07	2,3E-07	4,5E-07	6,8E-07
1,0 s	7,3E-06	2,2E-05	3,6E-05	7,3E-05	1,1E-04	2,0E-06	5,9E-06	9,8E-06	2,0E-05	2,9E-05
1,5 s	8,7E-06	2,6E-05	4,4E-05	8,7E-05	1,3E-04	3,8E-06	1,1E-05	1,9E-05	3,8E-05	5,7E-05

Na subestação 1, apenas na coluna de 15 faltas / ano o risco ficou na região considerada inaceitável. Na subestação 5, o desempenho da linha não afeta significativamente o risco de fatalidade associado.

4.0 – CONCLUSÕES

Apesar de ser uma atividade bastante consolidada na engenharia, a elaboração de um novo projeto ou a verificação de uma malha de aterramento existente, continuam sendo um desafio para os engenheiros.

No atual cenário, as novas subestações estão sendo projetadas com pátios cada vez mais reduzidos e com elevados níveis de curto-circuito. Além disso, ativos com muito tempo de operação demandam adequações em suas malhas em situações desfavoráveis, onde ampliar a malha existente, ou até mesmo adensar, não é viável economicamente.

Portanto, a utilização da metodologia de avaliação de risco apresenta-se como uma ótima ferramenta para quantificar o perigo e permitir ao projetista tomar decisões com maior segurança. O desafio é aprimorar a compreensão e o estudo nos parâmetros probabilísticos, principalmente as variáveis comportamentais de frequência e tempo médio de contato.

É importante destacar que critérios determinísticos utilizados para elaboração de malhas podem exibir probabilidades de fibrilação não toleráveis. Subestações com tempo de atuação da proteção alto, podem apresentar um risco de fibrilação elevado, porém, devido a uma possível probabilidade de coincidência baixa, o risco de fatalidade pode ficar dentro do nível aceitável pelos padrões internacionais.

Por fim, como citado na literatura [4] *“As avaliações de risco não devem se basear na premissa de que, como nenhum acidente foi relatado no passado, nenhum acidente ocorrerá no futuro”*.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COUTINHO, Bráulio R. M. and LOPES, Ivan J. S. *“Design of substation grounding grid: a probabilistic approach and fatality risk assessment”*. GROUND2020/21 & 9th LPE. Belo Horizonte, Brazil - June, 2021.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- (3) THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York: IEEE, 2000.
- (4) CONSEIL INTERNAT RESEAUX ELECTR, *“Substation earthing system design optimisation through the application of quantified risk analysis”*. Reference 749, 2018.
- (5) SOTILLE, ALEIXO, MODENA, FREIRE e VALLONE, Pedro. Aterramento de Subestações – Nova Norma NBR-15751/2009. São Paulo. ENIE, 2010.
- (6) B. CARMAN, WOODHOUSE, BURKE and MITCHISON. *“Implementing a risk based approach to the earthing of power systems”*. EESA - Energy NSW 2008. Sydney, 29 – 31 October, 2008
- (7) ENERGY NETWORKS ASSOCIATION, Argon safety assessment software, (Aust.). www.ena.asn.au
- (8) COUTINHO, Bráulio R. M. *“Avaliação de malhas de aterramento de subestações: uma abordagem probabilística do risco de fatalidades”*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Brasil, 2021.

6.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Bráulio Roberto de Melo Coutinho - Nascido em 1985 em Belo Horizonte, MG. Engenheiro Eletricista formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) em 2015 e Mestre em Engenharia de Potência, Linha de Pesquisa Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia (CEQE), pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2021. Atua na área de projetos eletromecânicos e estudos de sistemas de aterramento de subestações na empresa BRMC Engenharia.



Ivan José da Silva Lopes - Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil. Professor Assistente (1992/2001), Professor Adjunto (2002/2009), Professor Associado (2010/2018). Graduação em Engenharia Elétrica (1987) e Mestre em Engenharia Elétrica (1990) pela UFMG, Ph.D. em Engenharia Elétrica e de Computação (2001) pela University of Waterloo, Canadá. Áreas de atuação: Sistemas Elétricos de Potência, Engenharia de Alta Tensão e suas aplicações, Materiais Dielétricos e Isolamento Elétrico, e Compatibilidade Eletromagnética. Membro do IEEE desde 1997.



Sandro de Castro Assis - Engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado pela UFMG (2006 - 2017). Possui extensão universitária em gerenciamento em projeto de P&D pela PUC-MG (2009) e especialização em Gestão de Negócios pela Fundação Dom Cabral (FDC - 2021). Engenheiro sênior de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da CEMIG Distribuição e professor do IEC PUC Minas no curso de Transmissão e Distribuição. Experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão de Energia Elétrica, Estudos Elétricos em SEP. Membro CIGRE CE-C4 - Desempenho de Sistemas Elétricos, CE-B3 – Subestações, CE-B2 – Linhas de Transmissão. Possui mais de 40 artigos (<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4731672E0>).