

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Braulio Roberto de Melo Coutinho

**AValiação de Malhas de Aterramento de Subestações:
uma abordagem probabilística do risco de fatalidades**

Belo Horizonte

2021

Braulio Roberto de Melo Coutinho

**AVALIAÇÃO DE MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES:
uma abordagem probabilística do risco de fatalidades**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte

2021

C871a	<p>Coutinho, Braulio Roberto de Melo.</p> <p>Avaliação de malhas de aterramento de subestações [recurso eletrônico]: uma abordagem probabilística do risco de fatalidades / Braulio Roberto de Melo Coutinho. - 2021.</p> <p>1 recurso online (xv, 99 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ivan José da Silva Lopes.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f.95-99.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Correntes elétricas – Aterramento – Teses. 3. Subestações elétricas – Teses. I. Lopes, Ivan José da Silva. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Letícia Alves Vieira - CRB-6/2337
Biblioteca Prof. Mário Werneck - Escola de Engenharia da UFMG

"Avaliação de Malhas de Aterramento de Subestações: Uma Abordagem Probabilística do Risco de Fatalidades"

Braulio Roberto de Melo Coutinho

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de agosto de 2021.

Por:



Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG) - Orientador

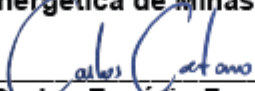
Jose Osvaldo Saldanha
Paulino:34331840620

Assinado de forma digital por Jose Osvaldo
Saldanha Paulino:34331840620
Dados: 2021.08.31 21:10:20 -03'00'

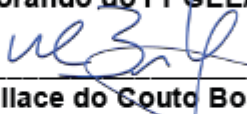
Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Sandro de Castro Assis
(Companhia Energética de Minas Gerais/CEMIG-D)



Prof. Dr. Carlos Ermidio Ferreira Caetano
(Pós-Doutorando do PPGE/UFMG)



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela dádiva da vida e por me permitir lutar pelos meus sonhos.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Roberto Coutinho e Eliana M. Coutinho, por serem a maior fonte de inspiração e apoio que tenho na vida. Se cheguei até aqui, foi por que eles me ensinaram não apenas com palavras, mas com exemplos, que o caminho através dos livros é gratificante!

Agradeço ao meu amor, Luciana L. Rosas! Sem ela, certamente não teria conseguido vencer essa batalha. Tive a felicidade de contar com seu apoio e companheirismo em todos os momentos.

Quero registrar também meu agradecimento ao amigo Antônio Oswaldo S. Batista, que junto ao meu pai, são as duas grandes referências que tenho na engenharia e que me ensinaram tudo sobre o universo das subestações.

Registro meu agradecimento ao engenheiro Sandro de Assis. Durante minha vida profissional, eu tive a oportunidade de estudar aterramento e de trabalhar com projetos de malhas de subestações. Mas a abordagem específica dessa dissertação foi uma sugestão preciosa do Sandro.

Agradeço ao Engenheiro Peter De Lore (Ausgrid), pelo apoio na utilização do software Argon.

Registro a minha gratidão ao professor Porfírio Cabaleiro por ter me incentivado a fazer o mestrado e pelo apoio dado nos momentos difíceis.

Agradeço também aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG que contribuíram de forma significativa em minha formação. Em especial, ao José Osvaldo Saldanha e Wallace do Couto Boaventura.

Por fim, agradeço ao professor Ivan José da Silva Lopes, a quem tive a honra de tê-lo como orientador. Um professor de extrema qualidade, que direcionou com muita sabedoria minha caminhada no programa e tornou a realização desse sonho possível.

“A vida tem mais de espetacular do que de trivial”

Roberto Coutinho

RESUMO

O trabalho apresenta uma discussão sobre a aplicação do método probabilístico para análise de risco em sistemas de aterramento de subestações, em comparação ao método determinístico para projeto de malhas. Na abordagem probabilística, os potenciais perigosos que podem surgir em decorrência de um curto-circuito, não são apenas comparados com tensões máximas admissíveis e sim, transformados em uma análise de risco. Para determinar o risco de fatalidade associado ao sistema de aterramento, é necessário calcular as probabilidades de coincidência e de fibrilação. A probabilidade de coincidência é definida como a possibilidade de uma pessoa estar em contato com algum ativo ou em alguma região que possa apresentar uma diferença de potencial durante a ocorrência de uma falta fase-terra. A probabilidade de fibrilação estima a possibilidade de a vítima sofrer fibrilação ventricular caso seja submetida a uma tensão de passo ou toque. Para debater o assunto, o trabalho inicialmente contextualiza a metodologia vigente através da apresentação dos principais pontos da “*NBR 15751: Sistema de aterramento de subestações – requisitos*”. Em seguida, a abordagem probabilística é apresentada através de revisão de artigos publicados nos últimos anos e normas internacionais sobre o assunto. Um estudo de caso é então apresentado contemplando um projeto real de uma malha de aterramento de duas subestações de 138 kV que compartilham um mesmo pátio. O projeto é desenvolvido sob a perspectiva determinística e, posteriormente, diversas análises de risco são feitas através da abordagem probabilística. Por fim, um conjunto de subestações existentes também é avaliado 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. Outra constatação é que subestações com tempo de atuação da proteção alto, podem apresentar um risco de fibrilação elevado, porém, devido à baixa probabilidade de coincidência, o risco de fatalidade fica dentro do nível aceitável pelos padrões internacionais.

Palavras-chave: Subestações, Sistema de aterramento e Risco de fatalidade.

ABSTRACT

This work presents a discussion about the application of the probabilistic method for risk analysis in substation grounding systems, in comparison to the deterministic method for mesh design. In the probabilistic approach, the dangerous potentials that may occur as a result of a short circuit, are not only compared with maximum allowable voltages, but transformed into a risk analysis. To determine the risk of fatality associated to grounding system, it is necessary to calculate the probabilities of coincidence and fibrillation. The probability of coincidence is defined as the possibility of a person being exposed to a grounded asset or being in a region that may have a potential difference during the occurrence of a ground fault. The probability of fibrillation estimates the likelihood that the victim will suffer ventricular fibrillation if subjected to step or touch voltage. To debate the subject, the work first contextualizes the current methodology through the presentation of the main points of "*NBR 15751: Substation earthing system - requirements*". Then, the probabilistic approach is presented through a review of articles published in recent years and international standards that treat the subject. A case study contemplating a real design of a grounding grid for two 138 kV substations sharing the same yard, is then presented. The project is developed from a deterministic perspective and, subsequently several risk analysis are made through the probabilistic approach. Finally, a set of existing substations under the probabilistic approach is also assessed. The results show that risk assessment methodology presents itself as a great tool to quantify the danger and allow the designer to make decisions with greater security. Another finding is that substations with higher clearing time may present a higher risk of fibrillation, however, due to the low probability of coincidence, the risk of fatality is within the international standards acceptable level.

Keywords: Substations, Grounding system and Fatality risk.

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Percurso da corrente de sequência zero [Retirado de 17]	23
3.1 - Fluxograma das etapas de projeto de uma malha de aterramento [Retirado de 22]	28
3.2 - Resistividade sob influência da salinidade do solo [Retirado de 04]	29
3.3 - Resistividade sob influência da temperatura do solo [Retirado de 04]	30
3.4 - Resistividade sob influência da umidade do solo [Retirado de 04]	30
3.5 - Medição através do método de Wenner [Retirado de 04]	31
3.6 - Direções dos pontos de medição [Retirado de 04]	33
3.7 - Curva $\rho(a) \times a$ [Adaptado de 18]	34
3.8 - Curva $M(a=h) \times K$ [Retirado de 18]	35
3.9 - Estratificação do solo [Retirado de 18]	36
3.10 - Solo equivalente em duas camadas [Retirado de 18]	37
3.11 - Resistividade aparente para um solo em duas camadas [Retirado de 02]	39
3.12 - Projeto inicial da malha [Retirado de 18]	40
3.13 - Circuito equivalente para tensão de passo [Retirado de 02]	43
3.14 - Circuito equivalente para tensão de toque [Retirado de 02]	44
3.15 - Avaliação de risco probabilística integrada no processo geral de análise e desenvolvimento do sistema de aterramento. [Adaptado de 13]	53
3.16 - Cenários de probabilidade de coincidência [Adaptado de 09]	54
3.17 - Procedimento para calcular os limites de tensão [Adaptado de 09]	58
3.18 - Curvas de probabilidade de fibrilação [Retirado de 33]	59
3.19 - Curvas de probabilidade de fibrilação [Retirado de 09]	60
3.20 - Fluxograma para cálculo da probabilidade de fibrilação [Adaptado de 09]	66
3.21 - Superfície de probabilidade acumulativa de fibrilação ventricular em função da corrente corporal e da duração do choque [Retirado de 07]	67
4.1 - Interface principal do software SE Ground – NSA Consultoria [38]	72
4.2 - Interface principal do software Argon – Safety Assessment Process [35]	73
4.3 – Arranjo eletromecânico planta das subestações	74
4.4 – Diagrama unifilar básico das subestações	74
4.5 - Eixos para medição de resistividade do solo	76
4.6 - Resistividade aparente do solo gerado pelo software Resist [37]	76
4.7 - Geometria da malha simulada no software SEGround [38]	80
4.8 - Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 01 da Figura 4.5	81
4.9 - Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 02 da Figura 4.5	81
4.10 - Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 07 da Figura 4.5	82
4.11 - Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 08 da Figura 4.5	82
4.12 - Pcoincidência variando o contato médio e quantidade de contatos por ano	84

4.13 - Pcoincidência variando o tempo de proteção e a quantidade de faltas/100km/ano	85
4.14 - Gráfico Pfibrilação - tempo (s) x tensão aplicada (V). Adaptada de [09].....	86
4.15 - Pfibrilação para diferentes tensões de toque de segurança em função do tempo de atuação da proteção.....	89
4.16 - Tensão de toque para uma corrente de malha de 450 A	95
4.17 - Tensão de toque para uma corrente de malha de 900 A	96
4.18 – Pfibrilação em função do aumento da corrente de malha	97
4.19 – Pfibrilação para valor de máxima tensão de toque desenvolvida para I_{CHCD}	100
4.20 – Pfibrilação para valor de máxima tensão de toque admissível para I_{CHCD}	100
4.21 – Compartivo da Pfibrilação gerado pela máxima tensão de toque desenvolvida e pela máxima tensão de toque admissível para I_{CHCD}	101
4.22 – Pfibrilação considerando V_{TCD} para diferentes tempos de atuação da proteção	102
4.23 - Pcoincidência necessária para atingir a Pfatalidade máxima de 1 em 1000000 considerando a Pfibrilação da tabela 4.3.....	103
4.24 - Pfibrilação comparando solo natural e o uso de revestimento de uma camada de 10 cm de brita (3000 $\Omega.m$)	104

LISTA DE TABELAS

3.1 - Resistividade em função do tipo de material [Adaptado de 04].....	29
3.2 - Controle de medição [Adaptado de 18]	33
3.3 - Limites de corrente elétrica suportados pelos seres humanos [Retirado de 02].....	45
3.4 - Resistividade do material de revestimento (ρ_s) [Retirado de 02].....	46
3.5 - Métodos de redução de coincidência [Adaptado de 09].....	56
3.6 - Índices de desligamento por nível de tensão [Adaptado de 26].....	56
3.7 - Descrição dos limites da curva de corrente do corpo [Adaptado de 21]	60
3.8 - Fator corrente cardíaca para diferentes caminhos [Adaptado de 21]	62
3.9 - Impedâncias corporais totais Z_t para um caminho de corrente de mão para mão, 50 / 60 Hz, para grandes áreas de superfície de contato em condições secas [Adaptado de 21]	63
3.10 - Circuito percorrido pela corrente e fator relativo a impedância do corpo humano [Adaptado de 28].....	64
3.11 - Comparativo do risco de fibrilação entre [03, 34 e 35] [Adaptado de 11].....	69
3.12 - Limite alvo para probabilidade de fatalidade individual [Adaptado de 04].....	70
3.13 - Níveis de risco fatalidade (valores médios aproximados) [Adaptado de 07].....	71
4.1 - Medições para determinação da resistividade ($\Omega.m$)	75
4.2 - Pfibrilação máxima para cada eixo considerando configuração do caso base	87
4.3 - Pfibrilação para diferentes tensões de toque de segurança em função do tempo de atuação da proteção.....	88
4.4 - Pfibrilação para diferentes eixos, tensões de toque e tempos de atuação da proteção	88
4.5 - Pfatalidade para Vapl 460 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	90
4.6 - Pfatalidade para Vapl 500 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	91
4.7 - Pfatalidade para Vapl 520 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	91
4.8 - Pfatalidade para Vapl 540 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	91
4.9 - Pfatalidade para Vapl 560 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	91
4.10 - Pfatalidade para Vapl 600 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	92
4.11 - Pfatalidade para Vapl 638 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano	92
4.12 - Pfatalidade para 1 Desligamento / km 100 / ano.....	93
4.13 - Pfatalidade para 5 Desligamentos / km 100 / ano	93
4.14 - Pfatalidade para 10 Desligamentos / km 100 / ano	93
4.15 - Pfatalidade para 20 Desligamentos / km 100 / ano	93
4.16 - Pfatalidade para 30 Desligamentos / km 100 / ano	94
4.17 - Pfibrilação em função do aumento da corrente de malha	96
4.18 - Dados de projetos de aterramento de subestações de Minas Gerais (Resistividade do solo, resistência de malha e corrente de malha)	98
4.19 - Dados de projetos de aterramento de subestações de Minas Gerais (GPR, potenciais de toque e passo máximos permitidos e desenvolvidos)	99

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – Espaçamento entre hastes do método de Wenner (m)
- A – Área ocupada pela malha de aterramento (m²)
- b – Raio do disco metálico estabelecido para o pé humano (m)
- BF – Fator relativo a impedância do corpo humano em função do percurso da corrente
- CRF – Fator de redução de coincidência
- C1 – Curva correspondente a 1% de probabilidade de fibrilação
- C2 – Curva correspondente a 5% de probabilidade de fibrilação
- C3 – Curva correspondente a 50% de probabilidade de fibrilação
- C4 – Curva correspondente a 95% de probabilidade de fibrilação
- C_S – Fator de redução de acordo com a espessura da camada de recobrimento
- C₁ – Eletrodo de corrente para medição de resistência através do método de Wenner
- C₂ – Eletrodo de corrente para medição de resistência através do método de Wenner
- d_i – Espessura da i-ésima camada do solo (m)
- d₁ – Espessura da primeira camada do solo (m)
- d_N – Diâmetro dos condutores (m)
- D – Espaçamento entre condutores (m)
- e_a – Espaçamento entre os condutores verticais (m)
- e_b – Espaçamento entre os condutores horizontais (m)
- f_d – Duração média da falta (s)
- f_n – Quantidade de ocorrência de faltas por ano
- E_{PCD} – Máxima tensão de passo permissível para corrente de curta duração (V)
- E_{PLD} – Máxima tensão de passo permissível para corrente de longa duração (V)
- E_{TCD} – Máxima tensão de toque permissível para corrente de curta duração (V)
- E_{TLD} – Máxima tensão de toque permissível para corrente de longa duração (V)
- F – Fator de corrente cardíaca
- h – Espessura da primeira camada de solo (m)
- h_s – Espessura da camada de revestimento superficial (m)
- H – Profundidade da malha (m)
- I_b(t, %pop) – Corrente corporal suportável em função do tempo de duração e da probabilidade de ocorrência na população
- I_{cc1φ} – Máxima corrente de curto-circuito fase-terra (A)
- I_{cc3φ} – Máxima corrente de curto-circuito trifásica (A)
- I_{CHCD} – Corrente de choque de curta duração (A)
- I_{CHLD} – Corrente de choque de longa duração (A)
- I_{CH} – Corrente corporal corrigida com o fator “F” (A)
- I_M – Corrente injetada na malha (A)
- I_{MCD} – Máxima corrente de malha de curta duração (A)
- I_{MLD} – Máxima corrente de malha de longa duração (A)

$I_{\text{permitida}}$ – Corrente permitida utilizada na probabilidade de fibrilação (A)
 $I_{\text{possível}}$ – Corrente possível calculada para determinado cenário na probabilidade de fibrilação (A)
 I_{REF} – Corrente de referência relativa ao trajedo mão esquerda para um ou ambos os pés (A)
 k – Constante para converter a base de tempo de um ano em segundos
 K – Coeficiente de relação entre ρ_1 e ρ_2
 K_M – Fator geométrico utilizado nos cálculos de tensão de toque desenvolvida
 K_S – Fator geométrico utilizado nos cálculos de tensão de passo desenvolvida
 L_t – Comprimento total de condutores enterrados (m)
 $M_{(a=h)}$ – Coeficiente para determinação da espessura de ρ_1
 n – Quantidade de camadas a serem reduzidas
 n_C – Quantidade de condutores paralelos em uma determinada direção;
 n_h – Quantidade de hastes utilizadas
 N_a – Quantidade de condutores colocados na vertical
 N_b – Quantidade de condutores colocados na horizontal
 p – Profundidade do eletrodo (m)
 p_d – Duração média da exposição ao risco (s)
 p_n – Quantidade de contatos/exposições ao risco por ano
 $P_{\text{coincidência}}$ – Probabilidade de ocorrência de um ou mais eventos que podem gerar um risco em um intervalo de tempo
 $P_{\text{fatalidade}}$ – Probabilidade de uma pessoa vir a óbito
 $P_{\text{fibrilação}}$ – Probabilidade de uma pessoa entrar em processo de fibrilação ventricular após ser submetida a uma diferença de potencial
 P_1 – Eletrodo de tensão para medição de resistência através do método de Wenner
 P_2 – Eletrodo de tensão para medição de resistência através do método de Wenner
 r – Raio de um círculo equivalente a área que será ocupada pela malha (m)
 R – Resistência preliminar de aterramento da malha
 $R_b(V_{pt}, \%pop)$ – Resistência do corpo humano em função da tensão de toque aplicada e da probabilidade de ocorrência na população
 R_{CH} – Resistência do corpo humano (Ω)
 R_m – Resistência terminal da subestação (Ω)
 R_{med} – Resistência do solo medida para um dado espaçamento (Ω)
 R_{series} – Resistência em série adicionada ao circuito de choque como por exemplo luvas e calçados.
 R_t – Resistência média de aterramento dos pés dos suportes das torres da LD (Ω)
 R_M – Resistência da malha de aterramento (Ω)
 R_{MP} – Resistência mútua entre os dois pés (Ω)
 R_p – Resistência própria de cada pé em relação ao terra remoto (Ω)
 t – Tempo máximo de circulação da corrente (s)
 t_h – Tamanho da haste utilizadas (m)
 t_1 – Momento inicial do contato/exposição ao risco

t_2 – Momento inicial da falta

T – Intervalo de tempo considerado no cálculo de probabilidade de coincidência (anos)

V_{apl} – Tensão aplicada no cálculo da probabilidade de fibrilação (V)

V_{TCD} – Tensão de toque desenvolvida para corrente de curta duração (V)

V_{TLD} – Tensão de toque desenvolvida para corrente de longa duração (V)

V_{PCD} – Tensão de passo desenvolvida para corrente de curta duração (V)

V_{PLD} – Tensão de passo desenvolvida para corrente de longa duração (V)

$Z_{equivalente}$ – Impedância equivalente da LD conectada a SE pelo método do Ladder infinito (Ω)

Z_{eq} – Impedância equivalente dos cabos para-raios (Ω)

$Z_{impedância\ do\ circuito}$ – Impedância do circuito de choque utilizada na probabilidade de fibrilação (Ω)

Z_l – Impedância própria do cabo para-raios por vão (Ω)

Z_p – Impedância própria do cabo para-raios (Ω/km)

Z_t – Impedância total do corpo humano para um caminho de corrente de mão a mão (Ω)

α – Fator para cálculo da resistividade aparente

ρ – Resistividade do solo para um dado espaçamento entre hastes ($\Omega.m$)

ρ_a – Resistividade aparente do solo ($\Omega.m$)

ρ_{eq} – Resistividade equivalente do solo ($\Omega.m$)

ρ_i – Resistividade da i-ésima camada do solo ($\Omega.m$)

ρ_s – Resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega.m$)

ρ_1 – Resistividade da primeira camada do solo ($\Omega.m$)

ρ_2 – Resistividade da segunda camada do solo ($\Omega.m$)

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALARP – As Low As Reasonably Practicable
CIGRE – Conseil International Des Grands Réseaux Électriques
CIRED – International Conference on Electricity Distribution
ENA – Energy Networks Association
ETA – Event Tree Analysis
FMEA – Failure Modes and Effect Analysis
FTA – Fault Tree Analysis
GPR – Ground Potential Rise
HAZOP – Hazards and Operability Study
HSE – Health and Safety Executive
IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
IEC – International Electrotechnical Commission
LD – Linha de distribuição
NBR – Norma Técnica Brasileira
NR – Norma Regulamentadora
ONS – Operador Nacional do Sistema
SE – Subestação
SEP – Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Relevância e motivação	17
1.2	Objetivos	20
1.3	Organização do texto	21
2	REVISÃO BIBILOGRÁFICA	22
2.1	Considerações Iniciais	22
2.2	Projeto de uma malha de aterramento	24
2.3	Perspectiva histórica do método probabilístico	25
2.4	Considerações finais do capítulo	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	Introdução	27
3.2	Método Determinístico	27
3.2.1	Resistividade do Solo	28
3.2.2	Medição de resistividade do solo	31
3.2.3	Estratificação do solo.....	34
3.2.4	Resistividade aparente	37
3.2.5	Geometria básica da malha	39
3.2.6	Cálculo da resistência de aterramento.....	41
3.2.7	Segurança Pessoal.....	42
3.2.7.1	<i>Tensões permissíveis</i>	43
3.2.7.2	<i>Cálculo da tensão de passo</i>	45
3.2.7.3	<i>Cálculo da tensão de toque</i>	47
3.2.7.4	<i>Cálculo das máximas tensões desenvolvidas</i>	48
3.2.8	Considerações finais.....	50
3.3	Método Probabilístico	51
3.3.1	Probabilidade de coincidência	54
3.3.2	Probabilidade de fibrilação.....	57
3.3.2.1	<i>Curvas de probabilidade de fibrilação</i>	58
3.3.2.2	<i>Avaliação da configuração do circuito de choque</i>	61

3.3.2.3	<i>Efeito da impedância do corpo humano</i>	62
3.3.2.4	<i>Cálculo da probabilidade de fibrilação</i>	64
3.3.2.5	<i>Comparação de risco de fibrilação</i>	68
3.3.3	Probabilidade de fatalidade	69
3.4	Considerações finais do capítulo	71
4	ESTUDO DE CASOS	72
4.1	Introdução	72
4.2	Subestação Nova	73
4.2.1	Método determinístico	75
4.2.2	Método Probabilístico	83
4.2.2.1	<i>Cálculo da probabilidade de coincidência</i>	83
4.2.2.2	<i>Cálculo da probabilidade de fibrilação</i>	86
4.2.2.3	<i>Cálculo da probabilidade de fatalidade</i>	90
4.3	Subestação Existente – Aumento de curto-circuito	94
4.4	Análises de parâmetros típicos de subestações de 138 kV	97
4.5	Considerações finais do capítulo	105
5	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE	106
5.1	Introdução	106
5.2	Conclusões	106
5.3	Proposta de continuidade	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e motivação

A expansão do sistema elétrico para suprir o aumento de carga traz consigo inúmeros desafios técnicos, econômicos e sociais. Nesse ambiente, destacam-se as subestações elétricas do sistema de potência. Para o desenvolvimento de um projeto de uma subestação nova, ampliação de uma subestação existente ou até mesmo a verificação da vida útil de ativos de uma subestação, o estudo da malha de aterramento figura entre os itens de extrema importância a serem analisados.

O sistema de aterramento de uma subestação tem como uma das principais finalidades criar um ambiente seguro às pessoas [01]. Atualmente, os critérios estabelecidos por algumas normas, como por exemplo a “*NBR 15751: Sistema de aterramento de subestações – requisitos*” [02] e “*IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*” [03], utilizam parâmetros determinísticos para a elaboração do 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 tensões de toque e passo.

Em um projeto de uma malha de aterramento, é necessário que se conheça as características elétricas do solo da área da instalação. Para isso, existem técnicas consagradas de medição de resistividade e modelagem do solo, como o método elaborado por Frank Wenner citado na “*NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo*” [04]. Na etapa seguinte, após o conhecimento dos parâmetros elétricos do solo, o projetista da malha de aterramento define uma geometria básica. As características físicas do reticulado são calculadas em função de várias premissas, como a área da subestação, o arranjo eletromecânico dos equipamentos, a distribuição de corrente que escoará pela malha em decorrência de um curto-circuito, o surgimento de potenciais perigosos de toque e passo, dentre outras.

Por ser uma metodologia com diversas variáveis, em um projeto de uma malha de aterramento de uma subestação nova, o engenheiro responsável possui flexibilidade para encontrar a solução técnica e econômica mais adequada. Consegue-se assim, maior grau de confiabilidade do ativo, além de ter a possibilidade

de prever uma expansão da malha, considerando no projeto a topologia futura da subestação (aumento de pátio, criação de novos *bays*, instalação de novos transformadores, aumento do nível de curto-circuito, etc).

Já em uma subestação existente, o projetista se depara com a necessidade de constantes obras de melhorias nas instalações. A expansão do sistema elétrico tem elevado os níveis de curto-circuito das subestações. Portanto, a malha de aterramento precisa ser reavaliada e, em muitos casos, aprimorada para garantir a segurança das pessoas. Ativos localizados em áreas urbanas, onde o crescimento físico da geometria da malha em muitos casos não é 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 para adequação no sistema de aterramento.

O ONS, Operador Nacional do Sistema, através de um compilado de relatórios técnicos [05], apresenta uma metodologia para verificar a superação dos ativos de uma subestação. Um capítulo deste relatório é dedicado à análise do sistema de aterramento. Como destacado em [05], a principal causa de superação da malha é o aumento do nível de curto-circuito da instalação gerando elevação das tensões de passo e toque acima dos valores de segurança no pátio e na região circunvizinha da subestação. As suportabilidades térmica e mecânica dos condutores de aterramento no solo e rabichos de equipamentos e estruturas também podem ser comprometidas devido ao aumento do nível de curto-circuito da instalação.

O relatório destaca ainda que muitas subestações brasileiras projetadas antes do ano 2000 apresentam, em suas memórias de cálculos, critérios rígidos de projetos em função das normas da época. Portanto, mesmo que haja um aumento no curto-circuito da instalação, é possível que, após verificação por um engenheiro especializado, a malha de aterramento ainda atenda aos requisitos de segurança das normas atuais.

Outro desafio importante para os projetistas de sistemas de aterramento, conforme destacado por Assis et al [06], é a diminuição da área disponível para construção das malhas. A tendência das grandes concessionárias é a utilização de arranjos físicos mais compactos que utilizam equipamentos de manobra isolados a SF₆. A redução do pátio afeta diretamente a área disponível para construção do sistema de aterramento.

Neste novo cenário, o projetista de sistemas de aterramento poderá encontrar dificuldades para controlar os potenciais perigosos, seja na construção da malha de aterramento de uma subestação nova com área reduzida, na expansão de uma subestação existente ou até mesmo na análise de superação de ativos.

As técnicas convencionais, em muitos casos, podem indicar que os potenciais perigosos da malha foram controlados de forma efetiva, ou então, não serem suficientes para controlar os potenciais perigosos em função das restrições físicas da instalação avaliada. Nessa perspectiva, conforme indicado pela brochura técnica do CIGRE/CIRED, “749: *Substation earthing system design optimisation through the application of quantified risk analysis*” [07], existe uma tendência em que o dimensionamento de um sistema de aterramento precisa passar pela verificação e cálculo do risco real de um acidente ocasionado pelo surgimento de um potencial perigoso em uma subestação.

Ainda destacado por [07], um acidente envolvendo um sistema de aterramento de uma subestação é considerado um evento de alto impacto e de baixa probabilidade, por isso há necessidade de discutir sobre a quantificação do risco envolvido, uma vez que a ocorrência de um acidente depende de uma combinação de eventos. Algumas diretrizes técnicas internacionais mais atuais [08], [09] e [10], trazem uma abordagem probabilística para o projeto de aterramento de uma subestação.

Bale e Tocher [11] trazem um importante debate entre os métodos determinístico e probabilístico. Os autores questionam se o método determinístico pode implicar numa falsa eliminação de risco ao tratar a avaliação de segurança de forma binária e apontam o método probabilístico como uma ferramenta mais flexível e transparente. Acreditam que assim seja possível reduzir o risco a níveis aceitáveis, e não criar a sensação de que o risco foi de fato eliminado. Para Brown [12], a metodologia baseada em risco permite ao projetista identificar melhor os pontos fracos do sistema de aterramento e assim, encontrar uma solução que tenha uma perspectiva mais segura e econômica do que o modelo convencional.

Porém, ainda não há um consenso na literatura sobre a utilização de uma avaliação probabilística de riscos associada ao sistema de aterramento. Conforme elucidado por Dimopoulos et al [13], a metodologia deve ser utilizada como um segundo estágio da avaliação do sistema de aterramento, ou seja, quando o

procedimento determinístico do primeiro estágio exigir medidas econômicas caras ou até mesmo impraticáveis. Este trabalho reforça também que a avaliação determinística deve ser utilizada como padrão para as novas instalações e que a abordagem probabilística seja aplicada para reavaliação da segurança de subestações existentes quando a mesma demandar reforço na malha.

No Brasil, algumas normas de engenharia, como por exemplo a “*NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas*” [14], já utilizam métodos probabilísticos como forma de análise de risco. Coelho [15], em sua dissertação, apresentou uma reflexão sobre a mensuração do risco ocasionado por descargas atmosféricas em plantas petroquímicas durante uma atividade específica de manutenção. Apesar de disciplinas da engenharia correlacionadas começarem a considerar o tema, no caso do sistema de aterramento, a análise probabilística ainda não é um recurso de avaliação presente na diretriz normativa brasileira [02].

É importante destacar que, sob a perspectiva legal, a norma regulamentadora brasileira “*NR-10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade*” [16] estabelece que em instalações elétricas devem ser adotadas medidas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais, mediante técnicas de análise de risco com o objetivo de se garantir a segurança e a saúde no trabalho.

Diante dos novos desafios apresentados, o trabalho faz uma análise sobre as duas metodologias, buscando contribuir para discussão de projetos de malhas de aterramento e aumentar o leque de possibilidades para a avaliação da superação de malhas existentes, futuras ampliações ou até mesmo construção de novas subestações.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo investigar a aplicação do método probabilístico na análise de sistemas de aterramento de subestações. Com isso, busca contrapor a nova abordagem ao método determinístico vigente na norma brasileira, e verificar os riscos associados ao projetar uma malha de subestação utilizando a perspectiva determinística.

Para alcançar este objetivo busca-se:

- Apresentar a metodologia probabilística para quantificar o risco real ao qual uma pessoa pode ficar exposta em função de uma elevação de potencial que possa ocorrer em uma malha de aterramento;
- Verificar o impacto dos parâmetros utilizados no cálculo de risco de fatalidade de um projeto de malha;
- Analisar até que ponto a combinação de fatores pode de fato reduzir a probabilidade de um acidente em subestação.

1.3 Organização do texto

A dissertação é composta por cinco capítulos, incluindo este. No Capítulo 2, o escopo do trabalho é definido através de considerações sobre a importância do aterramento no SEP (Sistema Elétrico de Potência). Uma breve perspectiva histórica sobre a abordagem probabilística é apresentada e, na sequência, uma definição de um projeto de uma malha de aterramento, objeto de estudo dessa dissertação, é estabelecida.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento teórico sobre o tema e traz um resumo dos objetivos e parâmetros das principais normas sobre o assunto. Características e considerações das metodologias determinística e probabilística para projetos de malhas são então discutidas.

No Capítulo 4, são apresentadas simulações para análise de sensibilidade dos parâmetros mais importantes da abordagem probabilística que estão relacionados a um projeto de malha de aterramento. Um estudo de caso aplicando o método determinístico e posteriormente a quantificação do risco através do método probabilístico é apresentado. Adicionalmente, é feita uma análise do impacto do aumento da corrente de malha em relação ao risco de fibrilação humana. Por fim, um conjunto de malhas de aterramento de subestações existentes são avaliadas através da abordagem probabilística.

O Capítulo 5 traz as conclusões e considerações sobre os estudos de caso, apresentando as vantagens e as dificuldades ao utilizar o método probabilístico, e por fim, propostas de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

O aterramento elétrico “[...] consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo.” (VISACRO, 1998, p. 1) [01]. O aterramento é composto basicamente de conexões elétricas para ligar um ponto do circuito aos eletrodos de aterramento, que são corpos metálicos colocados no solo.

No SEP, um sistema de aterramento elétrico possui diversas funções. Primeiro, ele tem como objetivo proporcionar um caminho de escoamento de descargas atmosféricas para a terra. Além disso, o aterramento produz uma resistência mais baixa possível para correntes de falta à terra. Nos potenciais produzidos pelas correntes de falta, é necessário que os potenciais perigosos que irão surgir fiquem dentro de um limite de segurança, de forma a evitar acidentes envolvendo seres humanos. O aterramento eficaz faz com que equipamentos de proteção atuem mais rapidamente nas falhas, e serve também para dissipar as cargas estáticas geradas nas carcaças de equipamentos.

Os sistemas de transmissão e de distribuição de energia geralmente são solidamente aterrados (as sobretensões nas fases, que não estão em falta, apresentam valores de no máximo 1,4x o valor da tensão fase-terra). As correntes de sequência zero retornam para o transformador da subestação pelos caminhos metálicos (neutros de alimentador de média tensão e cabos para-raios das linhas de transmissão e de distribuição), mas parte dessa corrente retorna via malha de aterramento podendo provocar uma elevação perigosa de potencial. A Figura 2.1 apresenta os diversos caminhos percorridos pelas correntes de sequência zero em um exemplo de uma falta em uma linha de transmissão.

Em caso de curto-circuito, uma corrente de grande intensidade eleva consideravelmente o valor do potencial da malha. A elevação do potencial gera riscos para as pessoas que estiverem em contato com a instalação. Para minimizar esse risco, é feito um estudo para garantir as condições de segurança de tensões de toque e passo, bem como o potencial transferido metalicamente para outras instalações.

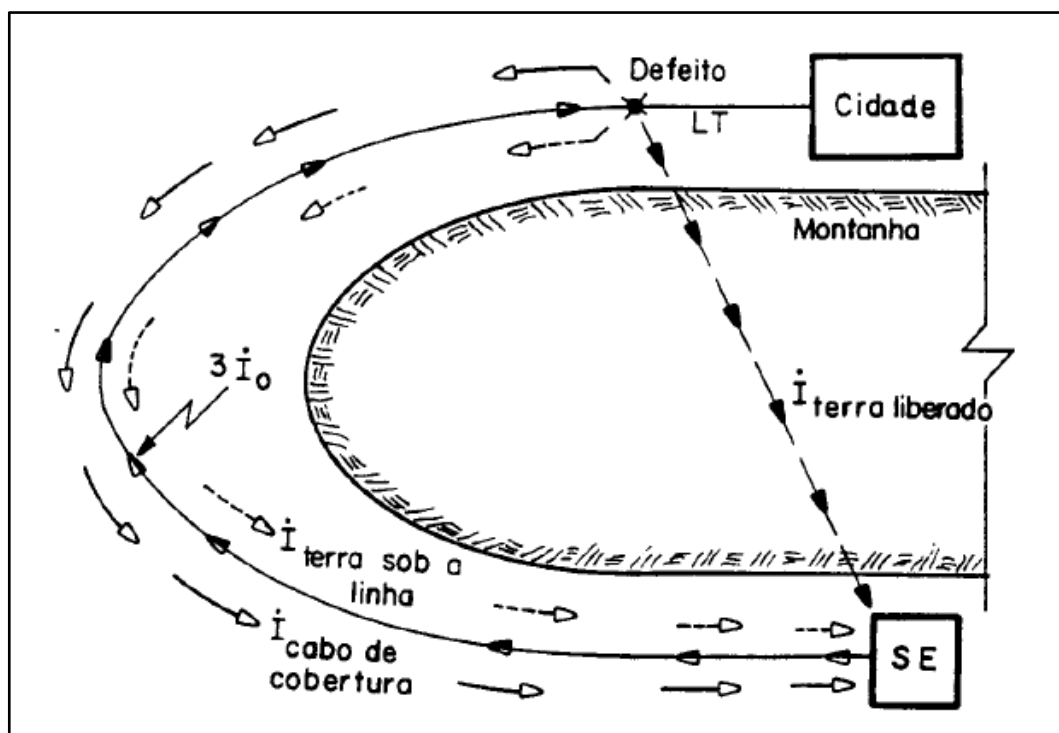


Figura 2.1 – Percurso da corrente de sequência zero [Retirado de 17]

Ambiente do objeto de estudo, a subestação é definida pela NBR 15751 [02] como a parte do sistema de potência concentrada em um local específico e que possui dispositivos de manobra, controle e proteção. Conta também com construções civis e estruturas de montagem, podendo incluir transformadores, conversores e outros equipamentos.

Nesse contexto, destacam-se dois tipos diferentes de instalação. O primeiro tipo é a subestação seccionadora, também conhecida como subestação de manobra ou de chaveamento. Serve para interligar redes que estão com o mesmo nível de tensão. O outro tipo é a subestação transformadora que serve para converter a tensão de suprimento para um valor maior ou menor. Neste grupo, pode-se mencionar o caso específico da subestação distribuidora que diminui a tensão para o nível de distribuição primária. Esse tipo de instalação pode pertencer à concessionária ou a grandes consumidores.

Para o desenvolvimento deste trabalho, é definida como objeto de interesse uma subestação de uma concessionária que geralmente está próxima dos centros de cargas. Portanto, as regras de segurança e os controles de riscos devem ser rígidos.

2.2 Projeto de uma malha de aterramento

A NBR 15751 [02] estabelece que o sistema de aterramento de uma subestação é tipicamente constituído pela sua malha de aterramento e por todos os elementos metálicos a ela conectados, tais como cabos para-raios, aterramentos de torres e postes de linhas de transmissão e subtransmissão, blindagem de cabos de energia, neutro multiterrado de linhas de distribuição e malhas de aterramento de subestações vizinhas.

Para Kindermann e Campagnolo [18], a localização de uma subestação deve ser definida de acordo com o centro geométrico de cargas e a disponibilidade de terreno. É necessário também, verificar se a aquisição do espaço é economicamente viável e se o local é livre de inundações. Além disso, observa-se que, na perspectiva do sistema de aterramento, uma subestação não pode comprometer a segurança da população.

Em um projeto de uma malha de aterramento em uma subestação, Visacro [01] destaca que o objetivo principal é garantir a proteção das pessoas contra efeitos danosos à saúde causados pela corrente de curto-circuito. Kindermann e Campagnolo [18] observam que é importante verificar os potenciais que surgem na superfície quando ocorre o curto-circuito máximo entre fase e terra no local de aterramento. Esses potenciais deverão ser inferiores aos máximos potenciais de passo e toque que uma pessoa pode suportar, sem que ocorra a fibrilação ventricular, que é a perda da capacidade do coração de bombear o sangue.

Outro ponto de destaque na concepção do sistema de aterramento de uma subestação nova, é levar em consideração futuras ampliações e conseqüentemente o aumento do curto-circuito máximo entre fase e terra, uma vez que a reforma e ampliação de uma malha de aterramento é sempre um trabalho caro e perigoso. Por fim, é importante observar se a malha de aterramento que será instalada suportará os esforços mecânicos e térmicos à qual será submetida.

A síntese do projeto de aterramento descrito acima refere-se a metodologia tradicional para projetos de aterramento, na qual o projetista faz uma análise dos parâmetros envolvidos de forma determinística, com o objetivo de atender critérios de segurança para um pior cenário.

Porém, nos últimos anos, um viés probabilístico para análise de sistemas de aterramento tem surgido para otimizar projetos, minimizar custos e, principalmente, quantificar o risco real de um acidente em função de uma elevação de potencial em uma subestação.

2.3 Perspectiva histórica do método probabilístico

Conforme indicado em [07], as diretrizes para projetos de sistemas de aterramento de subestações são tradicionalmente conservadoras. Estabelecem condições determinísticas, normalmente considerando o pior cenário, para conseguir estabelecer um limite de tensão de segurança desejado. Porém, Carman [19] afirma que mesmo que o projeto de aterramento seja denominado determinístico, ele é na realidade um projeto probabilístico. A natureza inerente de um projeto de aterramento assume ou ignora funções de probabilidade em todas as tomadas de decisões.

Alguns países, em função dos fatores probabilísticos que envolvem uma solicitação do sistema de aterramento e dos riscos de um acidente, introduziram uma perspectiva probabilística de análise em suas diretrizes técnicas.

Em 2013, um grupo do CIGRE, formado por 22 engenheiros especialistas em aterramentos, começou um trabalho para elaboração de uma brochura técnica [07] sobre a implementação da quantificação de riscos na análise de sistemas de aterramento. A brochura, publicada em 2018, relaciona os principais trabalhos que contribuíram para a compreensão dos parâmetros envolvidos no sistema de aterramento e para a introdução de uma filosofia probabilística em algumas normas internacionais.

Em 1960, na Austrália, foi quantificado o risco para equipes de telecomunicações em função das tensões máximas permitidas em circuitos de telecomunicações. Em 1970, a Finlândia incorporou uma análise probabilística para situações relativas aos solos com alta resistividade e presença de neve em determinada época do ano.

Em 1974, a IEC trouxe dados fisiológicos humanos da suportabilidade probabilística do corpo humano à corrente de fibrilação. Na Alemanha, em 1976, em função da baixa probabilidade de uma pessoa estar exposta durante uma solicitação

do sistema de aterramento, foi permitido que na elaboração de um projeto fosse utilizado 70% do valor da corrente de curto-circuito.

Na década de 80, a Austrália realizou estudos probabilístico, para verificar tensões de toque toleráveis em estruturas da distribuição e transmissão e conseqüentemente a fatalidade por fibrilação ventricular.

Posteriormente, nos anos 2000, Reino Unido, Nova Zelândia e Austrália implementaram uma abordagem probabilística em suas normas de aterramento. O Reino Unido desenvolveu um anexo para a norma BS EN 50522 [20] que permitia que o projetista fizesse uma análise de risco baseado nos dados fisiológicos da IEC 60479-1 [21] e de perfis de riscos utilizando metodologia de Monte Carlo. Já em 2003, a Nova Zelândia apresentou *“Guide to power system earthing practice”* [10] contemplando a metodologia de análise de risco para sistemas de aterramento. Posteriormente a Energy Networks Association consolidou os estudos da Austrália e Nova Zelândia na norma *“EG-0: Power system earthing guide. Part 1: Management Principles”* [9].

2.4 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou os conceitos básicos e as principais funcionalidades do aterramento para o SEP. Destacou o papel do aterramento no controle dos potenciais perigosos que irão surgir em decorrência de um curto-circuito. Delimitou, como objeto de análise, o sistema de aterramento de subestações de transformação da distribuição. Por fim, apresentou uma breve perspectiva história sobre a evolução de trabalhos relativos ao sistema de aterramento que estão diretamente ligados à abordagem probabilística de análise de risco.

Apresentados os conceitos iniciais, o capítulo a seguir explicará a abordagem determinística vigente na norma brasileira e a abordagem probabilística para análise e projeto de sistemas de aterramentos.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Esse capítulo apresenta o desenvolvimento teórico dos procedimentos utilizados para análise e desenvolvimento de um projeto de aterramento. Os principais aspectos das metodologias consideradas determinística e probabilística para projetos de malhas são discutidos.

Inicialmente, é apresentada a abordagem determinística, utilizada na norma “*NBR 15751: Sistema de aterramento de subestações – requisitos*” [02] e, na sequência, a abordagem probabilística, presente na norma “*EG-0: Power system earthing guide. Part 1: Management Principles*” [09].

3.2 Método Determinístico

Em um projeto de uma malha de aterramento de subestação, a NBR 15751 [02] estabelece as seguintes etapas a serem cumpridas:

- 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 dos níveis de curto-circuito atual e futuro;
- f) Cálculo da resistência da malha proposta inicialmente;
- g) Definição da geometria básica da malha (*mesh*);
- h) Estudo de distribuição da corrente de curto-circuito;
- i) Determinação da corrente malha-solo e da elevação de potencial da malha;
- j) Cálculo das tensões de toque e passo de segurança (curta e longa duração);
- 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 3.1 sintetiza a sequência de atividades para elaboração de uma malha.

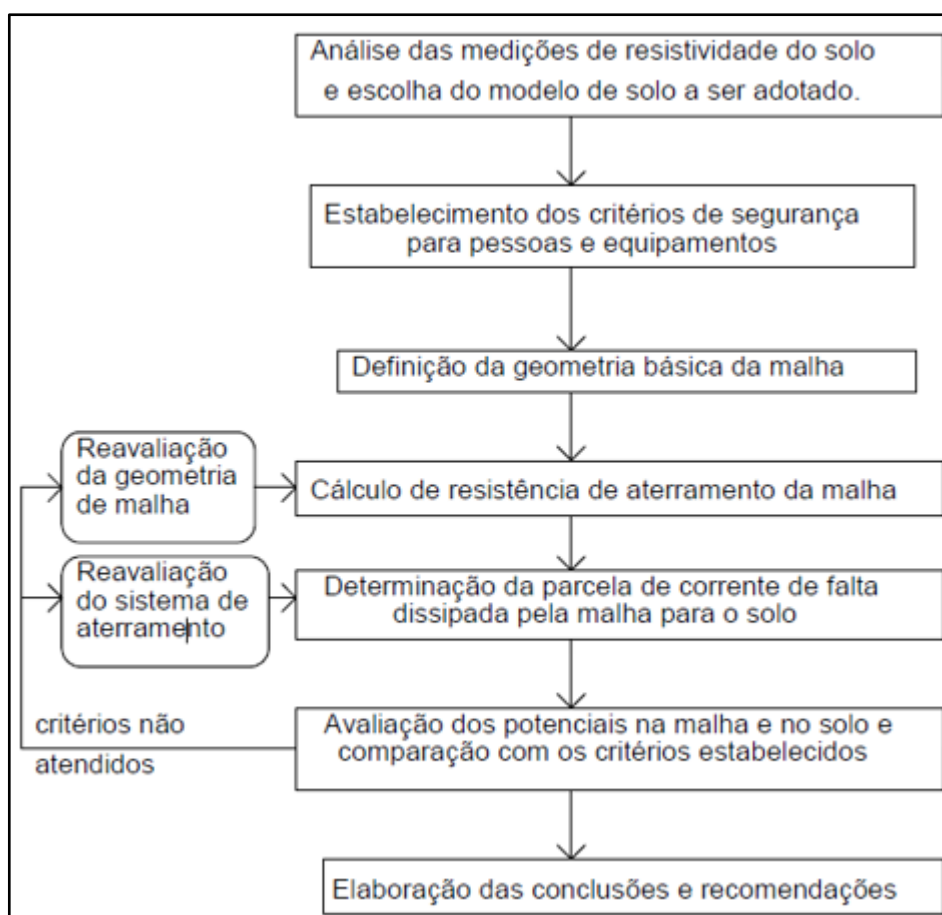


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de projeto de uma malha de aterramento [Retirado de 22]

3.2.1 Resistividade do Solo

Um parâmetro importante na elaboração do projeto de aterramento é o conhecimento das características elétricas do solo. Existem vários fatores que influenciam no valor da resistividade, como por exemplo, umidade, salinidade e temperatura. O valor da resistividade do solo também pode ser alterado devido à contaminação e compactação do solo. Normalmente, o terreno onde será implantada a malha de aterramento, é formado por um solo que possui diversas camadas com valores de resistividades diferentes. Assim, é necessário investigar a camada superficial e camadas mais profundas da região onde será construída a malha de aterramento.

A Tabela 3.1 da NBR 7117 [04] mostra a faixa de variação do valor de resistividade de alguns tipos de materiais mais comuns.

Tipos de materiais	Faixa de resistividades ($\Omega.m$)
Água do mar	menor que 10
Alagadiços, limo, húmus, lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5000
Calcário	500 – 5000
Areia	1000 – 8000
Granito	1500 – 10000
Basalto	A partir de 10000
Concreto	Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1000 Seco: 3000 – 2000000

Tabela 3.1 – Resistividade em função do tipo de material [Adaptado de 04]

Na Figura 3.2, é possível ver que quanto maior a concentração de sal no solo, menor a resistividade. Já o solo em condições de baixa temperatura, apresenta valores elevados de resistividade conforme indicado na Figura 3.3.

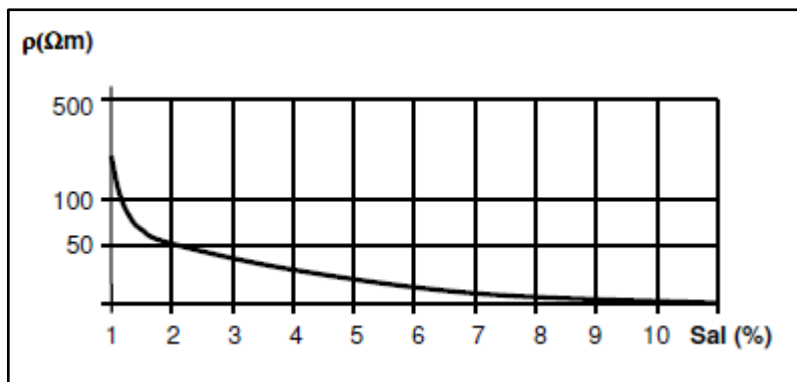


Figura 3.2 – Resistividade sob influência da salinidade do solo [Retirado de 04]

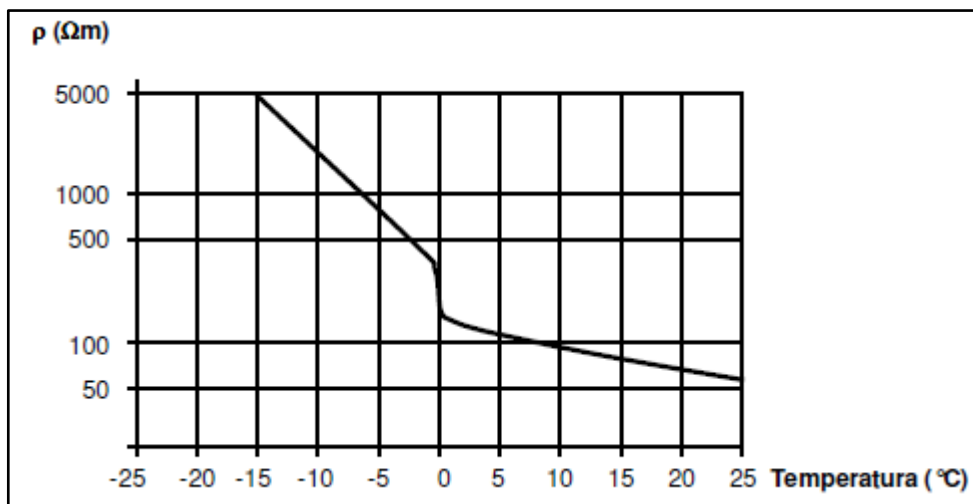


Figura 3.3 – Resistividade sob influência da temperatura do solo [Retirado de 04]

Por fim, a Figura 3.4 apresenta a relação entre a umidade do solo e a resistividade. O decaimento da curva mostra que a resistividade do solo diminui com o aumento da umidade. Esse parâmetro é importante porque o valor da resistividade está diretamente ligado aos períodos de seca e chuva da região onde será instalada a malha.

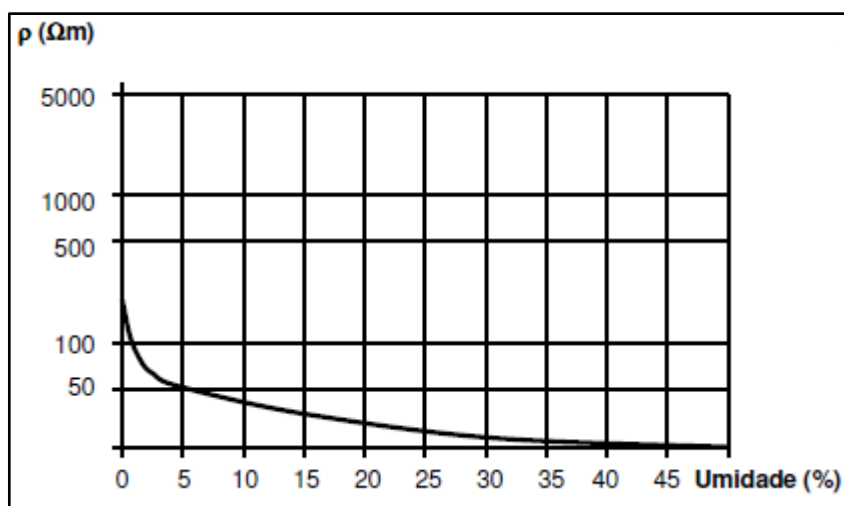


Figura 3.4 – Resistividade sob influência da umidade do solo [Retirado de 04]

Para a análise do solo, é necessário que a variação sazonal do clima seja levada em consideração para que o projeto da malha contemple a situação onde o solo irá apresentar um valor de resistividade mais elevado.

3.2.2 Medição de resistividade do solo

Para conhecer os parâmetros de interesse do solo onde será instalada a malha, é necessária a medição da resistividade do terreno. O levantamento dos valores é obtido através de medições realizadas em campo baseadas em métodos de prospecção geelétricos.

Um dos métodos de medição indicado em [03] e também detalhado em [04] é o método dos quatro eletrodos, com arranjo de Wenner. Este processo consiste na instalação de quatro eletrodos alinhados e dispostos em relação ao ponto central de medição e espaçados entre si de uma mesma distância “a”. Os eletrodos devem ser cravados firmemente no solo, todos a uma mesma profundidade “p”, conforme indicado na Figura 3.5.

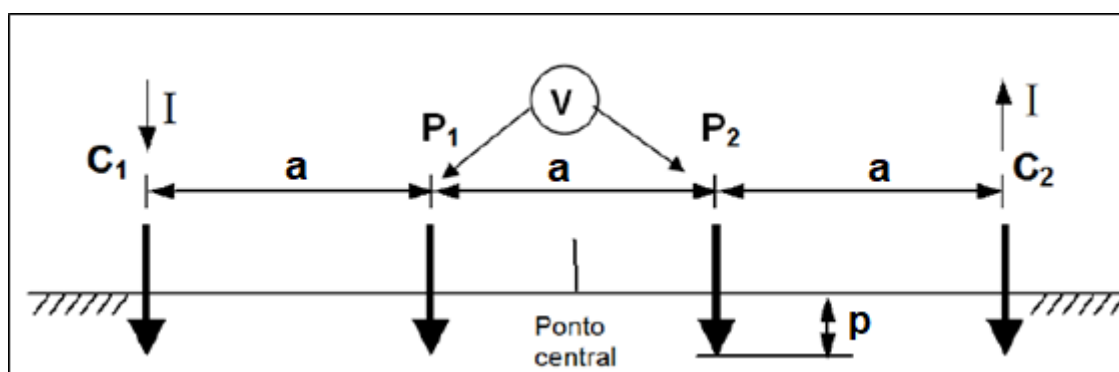


Figura 3.5 – Medição através do método de Wenner [Retirado de 04]

Através dos dois eletrodos externos “C₁” e “C₂”, faz-se circular uma corrente “I”, e entre os eletrodos internos “P₁” e “P₂” mede-se a tensão “V”.

Da relação entre a tensão e a corrente “V/I”, obtém-se a resistência “R” em Ω , a partir da qual é calculado o valor da resistividade do solo, até uma profundidade desejada para o projeto.

O método, de acordo com [18], considera que aproximadamente 58% da distribuição da corrente que passa entre as hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes. Portanto, para efeito do método de Wenner, considera-se a profundidade do solo a ser verificada equivalente ao espaçamento “a” entre as hastes de medição.

Conforme [04], o valor da resistividade do solo é calculado com base na seguinte expressão:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times a \times R_{med}}{1 + \frac{2 \times a}{\sqrt{a^2 + 4 \times p^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + p^2}}} \quad (\Omega.m), \quad (3.1)$$

onde:

- ρ – Resistividade do solo para um dado espaçamento entre hastes ($\Omega.m$);
- R_{med} – Resistência do solo medida para um dado espaçamento entre hastes (Ω);
- a – Espaçamento entre hastes (m);
- p – Profundidade do eletrodo (m).

Para o caso de $d > 20p$ a equação pode ser simplificada para:

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R_{med} \quad (\Omega.m). \quad (3.2)$$

Através do método de Wenner, é necessário que seja feita a medição para vários espaçamentos entre eletrodos, onde a distância entre os eletrodos é proporcional à profundidade da medição. Dessa forma é possível observar como a resistividade do solo varia em relação à profundidade.

A Norma NBR 7117 [04] recomenda que o espaçamento dos eletrodos em cada medição deve variar entre os valores 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 m. A quantidade de medições e a localização dos eixos de medição dependerão da geometria da área onde será construída a malha, o tipo de relevo e as dificuldades de medição impostas por barreiras físicas ou ruídos eletromagnéticos.

A Figura 3.6 extraída da NBR 7117 [04] apresenta a quantidade mínima de eixos de medição em função da área do terreno. Sendo:

- (a) área do terreno $\leq 1000 \text{ m}^2$;
- (b) $1000 \text{ m}^2 < \text{área do terreno} \leq 2000 \text{ m}^2$;
- (c) $2000 \text{ m}^2 < \text{área do terreno} \leq 5000 \text{ m}^2$;
- (d) $5000 \text{ m}^2 < \text{área do terreno} \leq 10000 \text{ m}^2$;
- (e) $10000 \text{ m}^2 < \text{área do terreno} \leq 20000 \text{ m}^2$;

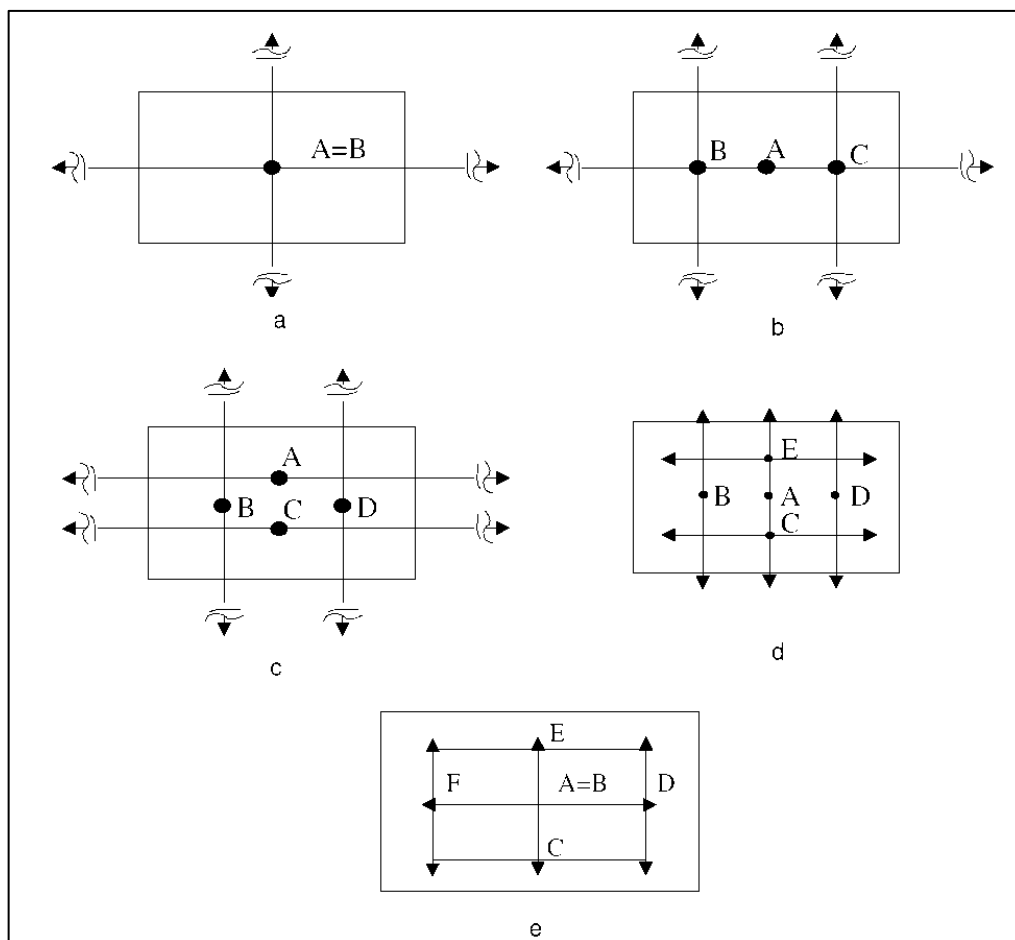


Figura 3.6 – Linhas de medição A, B, C, D, E e F [Retirado de 04]

No final dessa etapa, os dados obtidos devem ser colocados de forma organizada conforme indicado na Tabela 3.2.

Espaçamento (a)	1ª Leitura de Resistência	1º Cálculo de Resistividade	N Leituras de Resistência	N Cálculos de Resistividade	Valor médio de Resistividade
(m)	(Ω)	($\Omega.m$)	(Ω)	($\Omega.m$)	($\Omega.m$)
1					
2					
4					
8					
16					

Tabela 3.2 – Controle de medição [Adaptado de 18]

O valor médio da resistividade para cada espaçamento deve ser calculado através da soma dos dados de cada medição dividido pelo número de medições. Cada valor medido deve ser confrontado com o valor da resistividade média. Caso haja um desvio superior a 50%, o valor deverá ser descartado e a média recalculada. O critério

de eliminação de medidas deverá ser feito com cautela, sendo que, em alguns casos, é preciso refazer a medição ou considerar determinada área como região independente para efeito de modelagem do solo.

3.2.3 Estratificação do solo

Após as medições descritas no item anterior, é preciso que os valores sejam interpretados. Para essa análise, Kindermann e Campagnolo descrevem o método simplificado de estratificação do solo em duas camadas [18].

Inicialmente, conforme indicado na Figura 3.7, traça-se uma curva média " ρ " ($\Omega.m$) em função do espaçamento " a " (m) obtida pelo método de Wenner. A curva deve ser prolongada até interceptar o eixo das ordenadas para determinar o valor de " ρ_1 " ($\Omega.m$) definida como a resistividade da primeira camada do solo. Então, traça-se a assíntota no final da curva até os eixos das ordenadas. O ponto interceptado indicará o valor de resistividade da segunda camada " ρ_2 " ($\Omega.m$).

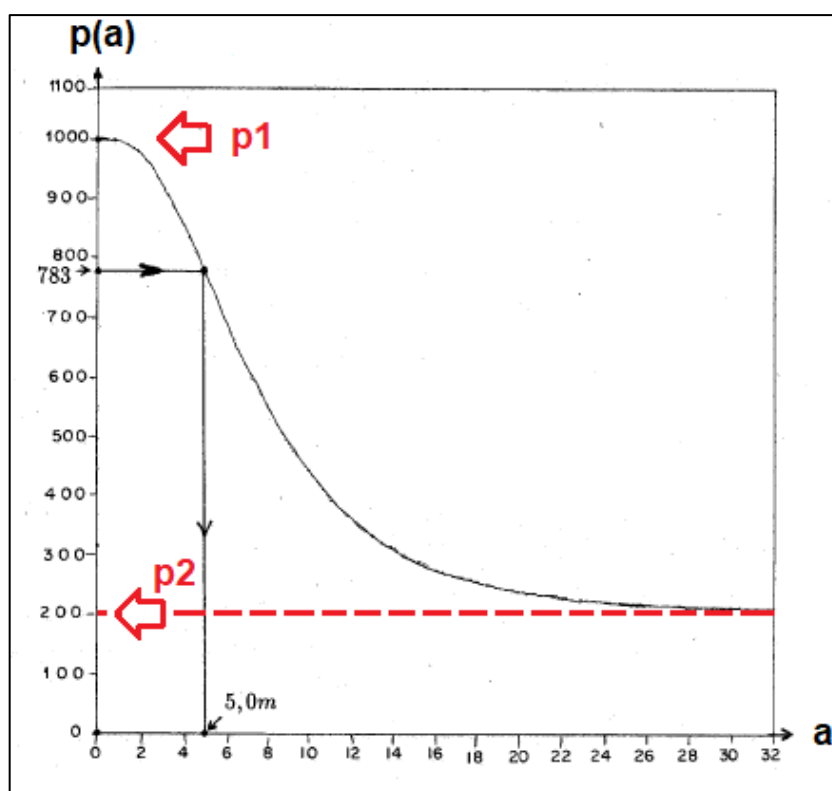


Figura 3.7 – Curva $\rho(a)$ x a [Retirado de 18]

Através da equação (3.3), calcula-se o coeficiente “K”:

$$K = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (3.3)$$

O próximo passo é determinar o valor de “M(a=h)” através do valor “K” calculado e do gráfico da Figura 3.8. Através da equação (3.4), o valor de $\rho(a=h)$ é calculado:

$$\rho(a=h) = \rho_1 \times M(a=h) \quad (3.4)$$

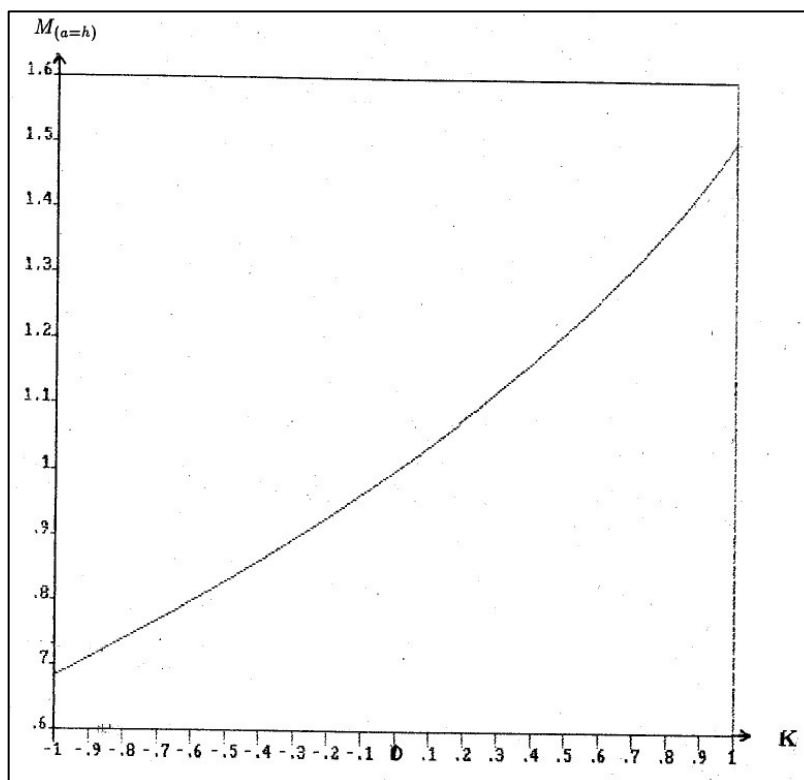


Figura 3.8 – Curva M(a=h) x K [Retirado de 18]

Com o valor de “ $\rho(a=h)$ ”, é preciso voltar a curva “ ρ ” ($\Omega.m$) x “espaçamento” (m) e localizar a espessura “h” real da primeira camada. Assim, é possível definir um modelo do solo conforme a ilustrado na Figura 3.9.

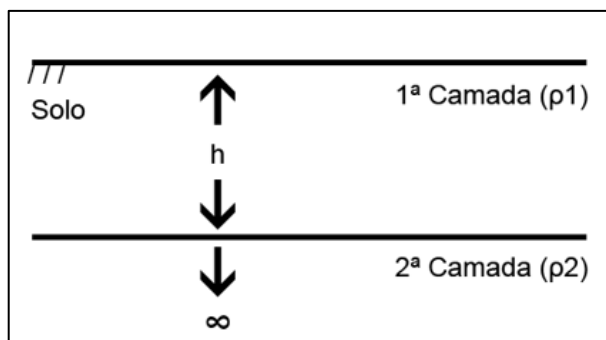


Figura 3.9 – Estratificação do solo [Retirado de 18]

Em alguns estudos, é possível identificar uma composição por três ou mais camadas. Para esse tipo de situação, existem outros métodos de modelagem do solo. Porém, tais abordagens não serão tratadas por não fazer parte do objetivo principal desse trabalho.

Como destacado por [01], na maior parte dos casos, os solos podem ser aproximados por um meio estratificado em duas camadas horizontais. Para subestações do SEP, a modelagem do solo em duas camadas costuma ser o suficiente.

Então, caso a estratificação do solo apresente várias camadas, deve-se calcular a resistividade equivalente do solo " ρ_{eq} ". Através da fórmula do paralelismo, o solo é reduzido em apenas duas camadas conforme as equações abaixo:

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n d_i/\rho_i}, \quad (3.5)$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (3.6)$$

onde:

- ρ_i – Resistividade da i-ésima camada ($\Omega.m$);
- n – Número de camadas reduzidas;
- d_i – Espessura da i-ésima camada (m).

Dessa forma, o solo equivalente poderá ser representado conforme indicação da Figura 3.10.

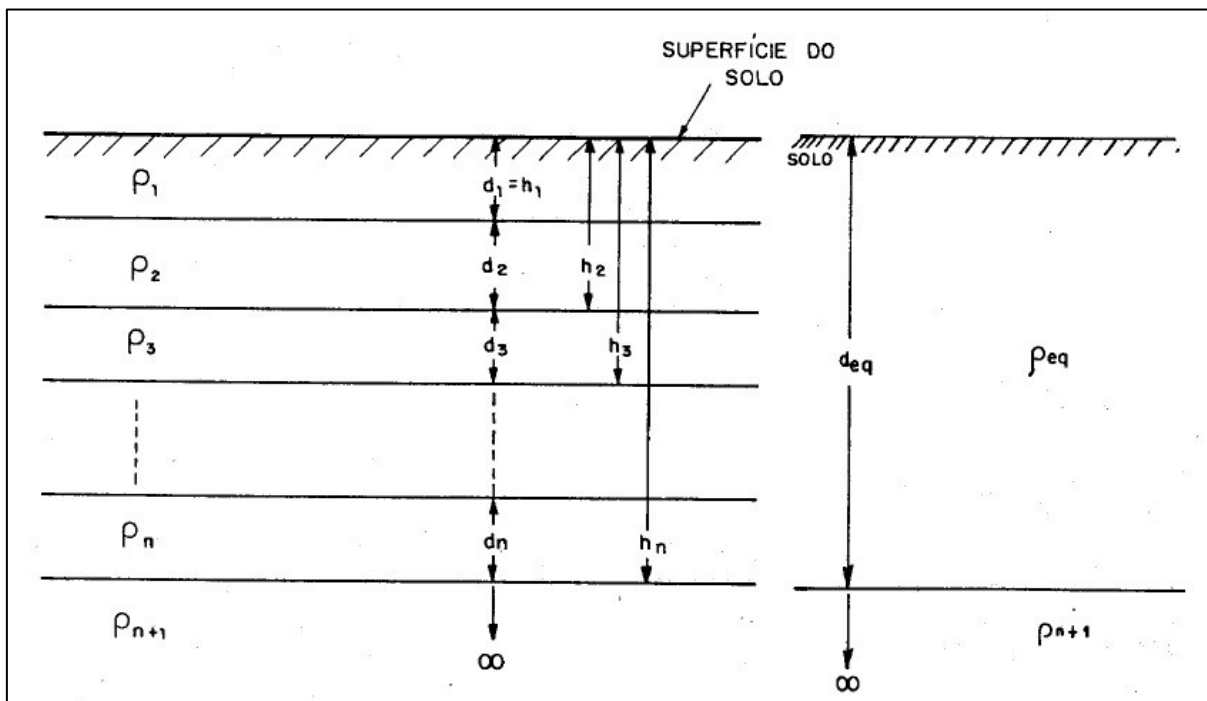


Figura 3.10 – Solo equivalente em duas camadas [Retirado de 18]

3.2.4 Resistividade aparente

A resistividade aparente é definida como "[...] a resistividade vista por um sistema de aterramento qualquer, em um solo com característica de resistividade homogênea ou estratificado em camadas, cujo valor é utilizado para o cálculo da resistência de aterramento desse sistema." (NBR 15751, 2009, p.3) [02].

Esse parâmetro é importante porque é através dele que o projeto da malha será desenvolvido. Portanto, para determinar o valor da resistividade aparente, são necessárias as seguintes etapas:

a) determinar o valor do raio "r" de um círculo equivalente a área que será ocupada pela malha:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \text{ (m)}, \quad (3.7)$$

- b) definir o valor da profundidade “H” da malha de aterramento;
 c) calcular o fator α onde, se $\rho_2 / \rho_1 < 1$ e $H / d_1 \geq 0,90$:

$$\alpha = \frac{r}{2 \times d_1 \times H}, \quad (3.8)$$

para as demais condições:

$$\alpha = \frac{r}{d_1}, \quad (3.9)$$

onde:

- ρ_1 – Resistividade da primeira camada do solo ($\Omega.m$);
- ρ_2 – Resistividade da segunda camada da solo ($\Omega.m$);
- d_1 – Espessura da primeira camada do solo (m);
- H – Profundidade da malha (m);
- r – Raio de um círculo equivalente a área que será ocupada pela malha (m).

d) determinar o valor de N, razão entre ρ_a e ρ_1 , através das curvas da Figura 3.11 e calcular o valor da resistividade aparente através da equação abaixo:

$$\rho_a = N \times \rho_1. \quad (3.10)$$

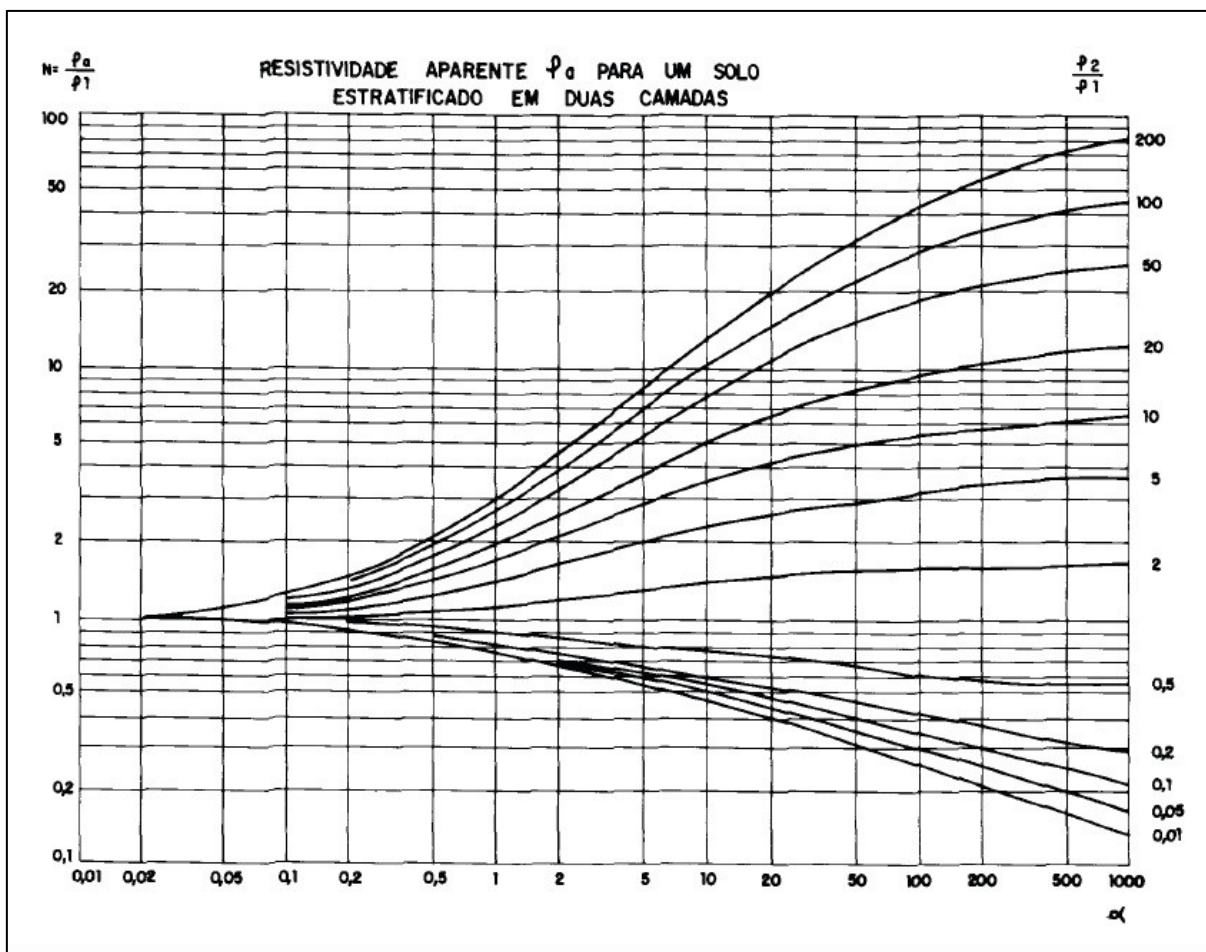


Figura 3.11 – Resistividade aparente para um solo em duas camadas [Retirado de 02]

3.2.5 Geometria básica da malha

Ao desenvolver o projeto de aterramento de uma subestação, deve-se considerar a condição de falta para a terra. Dessa forma, é definida a seção do condutor da malha que suportará os esforços térmicos e mecânicos ocasionados pela corrente de curto-circuito. A geometria da malha deve estar adequada para minimizar os potenciais de passo e toque no processo de dissipação de correntes.

A primeira etapa é considerar a área da SE que será abrangida pela malha e qual será o arranjo dos condutores. A área deve conter pelo menos o pátio da subestação. A disposição dos eletrodos deve levar em consideração os equipamentos e as construções contemplados na área, além do tipo do solo.

Como orientação, a NBR 15751 [02] define como característica básica da geometria da malha uma profundidade de enterramento mínima de 0,5 m. Em casos

especiais, quando a área possuir piso concretado ou substrato rochoso superficial, admite-se uma profundidade de 0,25 m.

A elaboração da malha de aterramento é um processo iterativo, ou seja, é necessário que o engenheiro comece um projeto inicial e depois verifique se os potenciais que irão surgir no solo em decorrência ao curto-circuito fase-terra estarão acima dos limites dos potenciais de toque e passo que irão surgir. A definição e o cálculo de tensão de toque e passo serão discutidos no item 3.1.7.

Como ponto de partida, Kindermann e Campagnolo [18] indicam que um espaçamento inicial entre os condutores deverá ter entre 5% a 10% do comprimento dos respectivos lados da malha. Na Figura 3.12, tem-se que a área da malha é dividida por subquadrados onde $e_a \cong e_b$. É importante destacar que normalmente em um projeto de aterramento de subestação, a geometria da malha apresenta espaçamentos desiguais entre os condutores.

Juntamente com os condutores horizontais, a NBR 15751 [02] sugere a utilização de hastes, condutores cravados no solo na posição vertical, para o desenvolvimento do projeto de malha de aterramento.

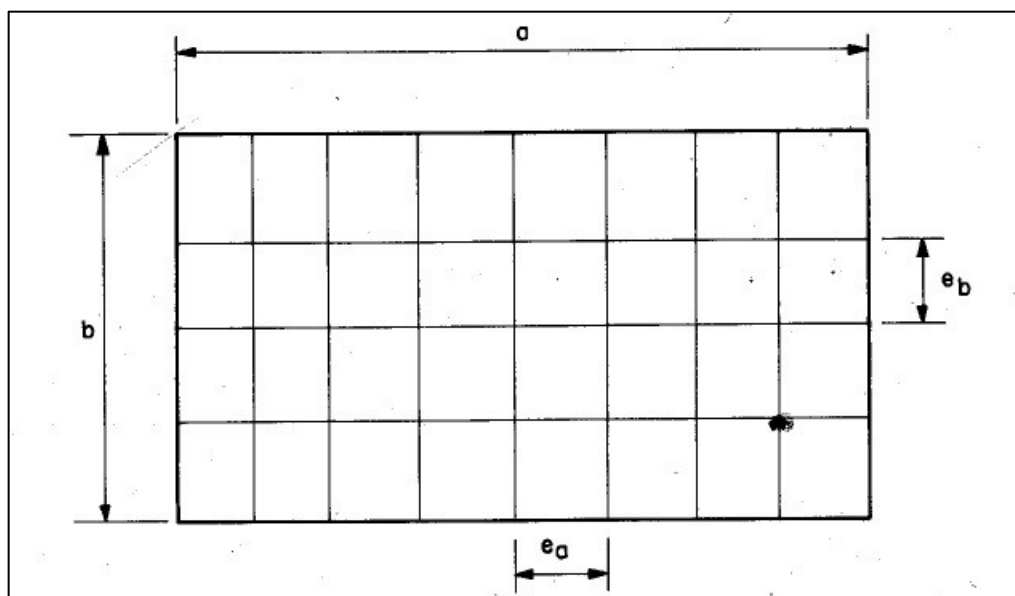


Figura 3.12 – Projeto inicial da malha [Retirado de 18]

O comprimento total da malha será definido pela soma dos condutores horizontais e das hastes envolvidos.

3.2.6 Cálculo da resistência de aterramento

Como parte do desenvolvimento do projeto, é realizado um cálculo preliminar do valor aproximado da resistência de aterramento da malha. Essa primeira análise é definida de acordo com a área que a malha ocupará e a resistividade aparente do solo, sendo essa relação dada pela equação:

$$R = \frac{\rho_a}{4r}, \quad (3.11)$$

onde:

- R – Resistência de aterramento (Ω);
- ρ_a – Resistividade aparente do solo ($\Omega.m$);
- r – Raio de um círculo equivalente à área do sistema de aterramento constituído pelos aterramentos horizontais (m).

O cálculo preliminar serve apenas como uma orientação inicial para o projeto. A resistência de aterramento deve ser calculada considerando-se a geometria inicial da malha e o comprimento dos condutores que serão enterrados.

A NBR 15751 [02] define duas equações para a realização do cálculo:

- malha enterrada a uma profundidade de até 0,25 m:

$$R = \frac{\rho_a}{4r} + \frac{\rho_a}{L_t}, \quad (3.12)$$

- malha enterrada a uma profundidade entre 0,25 m e 2,5 m:

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{L_t} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \times A}} \right) \times \left[1 + \left(\frac{1}{1 + H \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \right\}, \quad (3.13)$$

onde:

- L_t – Comprimento total de condutores enterrados (m);
- H – Profundidade da malha (m);
- A – Área ocupada pela malha (m^2).

Normalmente, a resistência de aterramento obtida inicialmente não terá o valor desejado. Assim, algumas medidas como acrescentar condutores em paralelo, aumentar o diâmetro e comprimento da haste, entre outras técnicas, podem ser utilizadas como alternativas para o projeto.

3.2.7 Segurança Pessoal

O objetivo principal de um sistema de aterramento em uma subestação é garantir que os níveis de tensão durante um curto-circuito fase-terra fiquem abaixo dos limites perigosos aos seres humanos.

Quando acontece um defeito no SEP, pode aparecer uma corrente de sequência zero que irá fluir pela malha de aterramento. Tais correntes elevam o potencial elétrico e, portanto, é necessário que o fenômeno seja minimizado para evitar que haja um choque elétrico.

O choque elétrico é definido como uma perturbação de natureza e efeitos diversos, que se manifesta no organismo humano quando este é percorrido por uma corrente elétrica. Conforme destacado em [18], a gravidade deste choque vai depender de uma série de fatores, dentre eles, a tensão elétrica, o caminho percorrido no corpo pela corrente, a intensidade da corrente, o tempo de duração do choque, a característica da corrente, a frequência, estado de umidade da pele e condições biológicas do indivíduo.

As consequências de um choque elétrico podem ir desde um simples formigamento, até levar a vítima a ter uma parada respiratória ou cardíaca, sendo esta última ocasionada pela fibrilação ventricular.

3.2.7.1 Tensões permissíveis

Por ser economicamente inviável projetar um sistema de aterramento de uma subestação que consiga minimizar todos os valores de diferenças de potencial, em locais onde há possibilidade de contato, são estabelecidos valores de correntes suportáveis pelo corpo humano para ter um projeto viável.

Para o desenvolvimento da malha, define-se tensão de passo como a diferença de potencial que pode surgir entre dois pontos do solo a um metro de distância um do outro. A Figura 3.13 retrata o circuito equivalente para a tensão de passo no corpo humano.

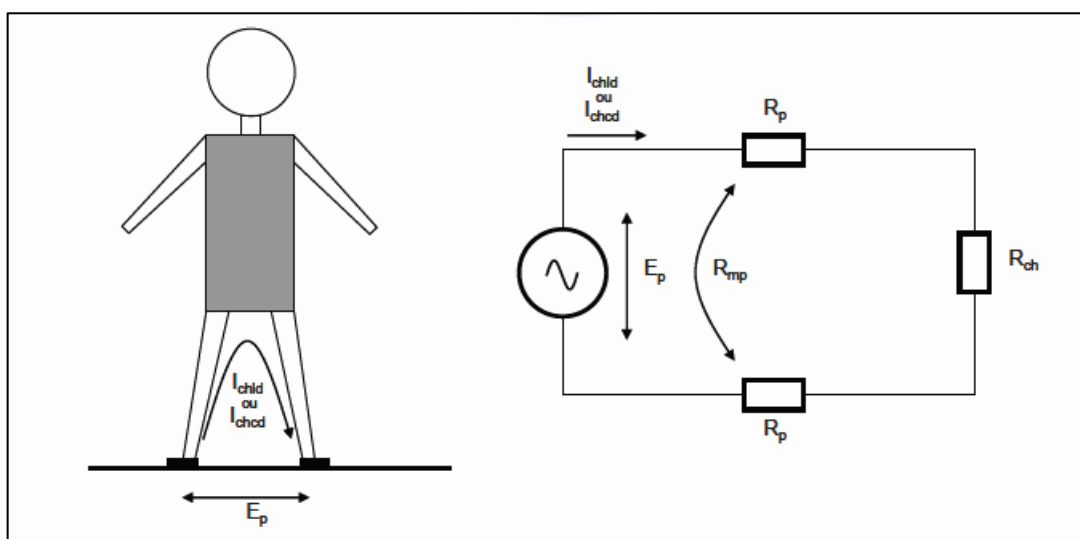


Figura 3.13 – Circuito equivalente para tensão de passo [Retirado de 02]

No circuito, " R_{CH} " é a resistência interna do corpo, " R_P " é a resistência própria de cada pé em relação ao terra remoto e " R_{MP} " é a resistência mútua entre os dois pés. Sendo assim, uma tensão " E_P " entre dois pontos no solo fará com que haja circulação de corrente elétrica através do circuito " $R_{CH} + 2R_P$ ". Portanto, essa corrente deverá ser mantida em um valor seguro para o ser humano.

Para a tensão de toque, considera-se a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica aterrada, situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 m da base da estrutura. O circuito equivalente é definido entre a mão e os pés conforme representado na Figura 3.14.

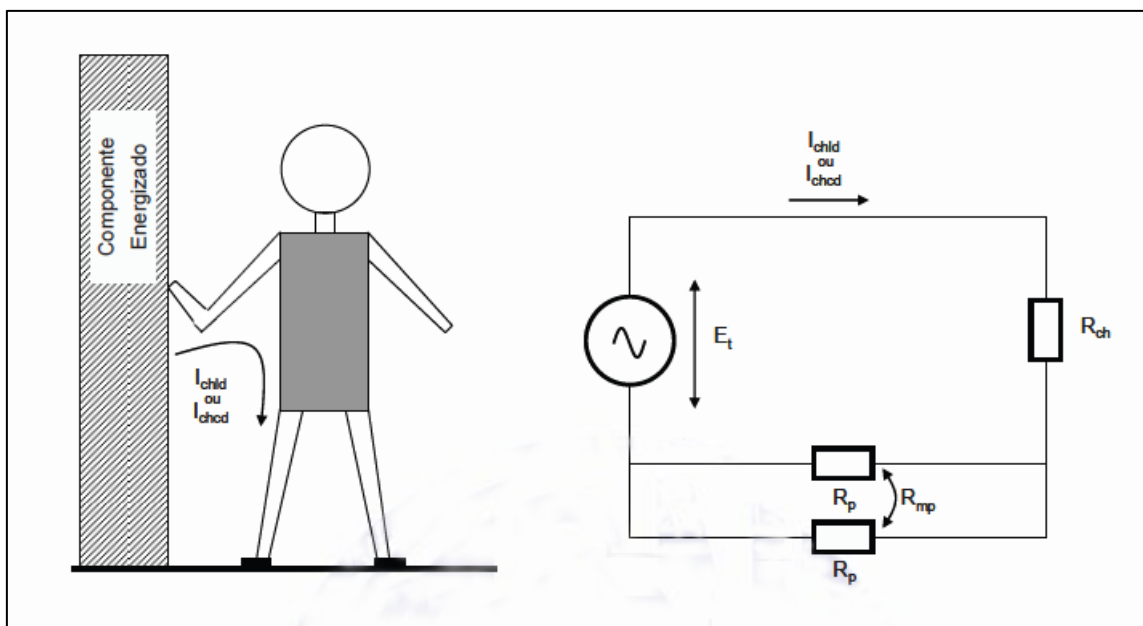


Figura 3.14 – Circuito equivalente para tensão de toque [Retirado de 02]

Na tensão de toque, " R_{CH} " continua sendo a resistência interna do corpo humano, desprezando-se nesse caso a resistência de contato da mão. Já " $R_p/2$ ", que está em série com " R_{CH} ", representa os dois pés em paralelo e, " R_{MP} " é a resistência mútua entre os pés.

A fim de definir parâmetros e critérios, a IEEE Std 80 [03] normalizou os valores das resistências mencionadas. O valor de " R_{CH} ", referente à resistência do corpo humano, é definido como 1000Ω , indiferentemente do caminho percorrido pela corrente no corpo humano. Já o valor de resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, e o valor de resistência mútua entre os dois pés, dependem do material considerado no revestimento da primeira camada do solo.

Outro parâmetro importante é a máxima corrente admissível que está ligada diretamente ao tempo de aplicação do choque. O intervalo de tempo é escolhido de acordo com a filosofia de proteção adotada no sistema que leva em consideração as características dos equipamentos utilizados. Para subestações de 138 kV, por exemplo, o valor de " t " utilizado nos cálculos costuma variar entre 0,5 s e 1 s, ou seja, esse é o tempo máximo para a eliminação da falta com base em dispositivos de proteção. Caso haja o religamento automático, é necessário considerar a somatória dos tempos da falta inicial e das possíveis faltas subsequentes.

A NBR 15751 [02] estabelece dois tipos de correntes de choque, sendo a primeira a corrente de choque de longa duração " I_{CHLD} ", provocada por uma tensão

de toque ou passo devido à circulação de uma corrente de longa duração. O valor máximo permitido será a corrente que não provocará fibrilação do coração, conforme a Tabela 3.3.

Corrente limite de longa duração		
Porcentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99,5 %	9 mA	6 mA
50 %	16 mA	10,6 mA

Tabela 3.3 – Limites de corrente elétrica suportados pelos seres humanos [Retirado de 02]

O segundo tipo é a corrente de choque de curta duração " I_{CHCD} ". Neste caso, é a corrente máxima de não fibrilação para 99,5 % das pessoas de 50 kg, considerando um intervalo de tempo de $0,03s \leq t \leq 3s$.

$$I_{CHCD} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ (A)} . \quad (3.14)$$

Uma diferença importante entre a NBR 15751 [02] e a IEEE Std 80 [03] é que a IEEE Std 80 permite o cálculo da corrente " I_{CHCD} " utilizando uma constante de 0,157 em vez de 0,116 em situações onde a subestação será acessada apenas por pessoas com a massa corporal mínima de 70 kg. Essa nova constante permite uma corrente de curta duração mais elevada e, por isso, os valores obtidos de máxima tensão de toque e passo permitidos serão maiores.

3.2.7.2 Cálculo da tensão de passo

Após a determinação das correntes máximas admissíveis, calcula-se as tensões de passo. Para tal cálculo, é utilizado o circuito da Figura 3.13. As máximas tensões de passo permissíveis para corrente de curta duração " E_{PCD} ", e para corrente de longa duração " E_{PLD} ", são calculadas através das equações:

$$E_{PCD} = [R_{CH} + 2 \times (R_P - R_{MP})] \times I_{CHCD} \text{ (V)} , \quad (3.15)$$

$$E_{PLD} = [R_{CH} + 2 \times (R_P - R_{MP})] \times I_{CHLD} \text{ (V)} , \quad (3.16)$$

onde:

- R_{CH} – Resistência do corpo humano, adotada como 1000 (Ω);
- R_P – Resistência própria de cada pé em relação ao terra remoto (Ω);
- R_{MP} – Resistência mútua entre os dois pés (Ω);
- I_{CHCD} – Máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano (A);
- I_{CHLD} – Máxima corrente de longa duração admissível pelo corpo humano (A).

As resistências própria " R_P " e mútua " R_{MP} " dos pés são obtidas a partir das seguintes equações:

$$R_P = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) \times C_s \text{ (}\Omega\text{)}, \quad (3.17)$$

$$R_{MP} = \left(\frac{\rho_s}{2\pi b} \right) \text{ (}\Omega\text{)}, \quad (3.18)$$

onde:

- b – Raio do disco metálico estabelecido para o pé humano no valor de 0,083 (m);
- ρ_s – Resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega.m$) Tabela 3.4;
- C_s – Fator de redução de acordo com a espessura da camada de recobrimento.

Material	Resistividade ($\Omega.m$)	
	Seco	Molhado
Brita nº 1, 2 ou 3	-	3000
Concreto	1200 a 280000	21 a 100
Asfalto	2×10^3 a 30×10^6	10×10^3 a 6×10^6

Tabela 3.4 – Resistividade do material de recobrimento (ρ_s) [Retirado de 02]

O fator de redução " C_s " aplicado no cálculo de " R_P ", serve para considerar a aplicação de uma camada de material com resistividade mais elevada do que a

primeira camada do solo. O material de recobrimento tem como objetivo aumentar a resistência de contato entre o solo e os pés, diminuindo, assim, a corrente que circulará através do corpo. Conforme método analítico de Thapar, Gerez e Kejriwal, apresentado em [03], o fator pode ser obtido através da equação simplificada abaixo:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s} \right)}{2 \times h_s + 0,09}, \quad (3.19)$$

onde:

- ρ_1 – Resistividade da 1ª camada ($\Omega.m$);
- ρ_s – Resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega.m$);
- h_s – Espessura da camada de revestimento superficial (m);

Como R_{MP} pode ser considerado desprezível em comparação a R_P , as equações para máximas tensões de passo admissíveis podem ser simplificadas para:

$$E_{PCD} = (R_{CH} + 6 \times \rho_s \times C_s) \times I_{CHCD} \text{ (V)}, \quad (3.20)$$

$$E_{PLD} = (R_{CH} + 6 \times \rho_s \times C_s) \times I_{CHLD} \text{ (V)}. \quad (3.21)$$

3.2.7.3 Cálculo da tensão de toque

Para o cálculo de tensão de toque, a NBR 15751 [02] estabelece o modelo da Figura 3.14. As máximas tensões de toque permissíveis para corrente de curta duração " E_{TCD} ", e longa duração " E_{TLD} ", são calculadas através das seguintes equações:

- para corrente de curta duração:

$$E_{TCD} = R_{CH} + \frac{(R_P + R_{MP})}{2} \times I_{CHCD} \text{ (V)}, \quad (3.22)$$

$$E_{TCD} = (R_{CH} + 1,5 \times \rho_s \times C_s) \times I_{CHCD} \text{ (V)}, \quad (3.23)$$

- para corrente de longa duração:

$$E_{TLD} = R_{CH} + \frac{(R_P + R_{MP})}{2} \times I_{CHLD} \text{ (V)}, \quad (3.24)$$

$$E_{TLD} = (R_{CH} + 1,5 \times \rho_s \times C_s) \times I_{CHLD} \text{ (V)}, \quad (3.25)$$

3.2.7.4 Cálculo das máximas tensões desenvolvidas

Nessa etapa, é importante verificar se os potenciais que a malha irá desenvolver caso haja um curto-circuito, estarão abaixo dos valores máximos permitidos para as tensões de toque e passo.

A NBR 15751 [02] adota uma metodologia simplificada para calcular os potenciais que irão se desenvolver em uma malha reticulada retangular. O ponto crítico de verificação de potencial, onde são encontrados os maiores valores de tensão de toque, costuma ser na periferia da malha, principalmente nos reticulados das quinas. Para tensão de passo, os maiores valores são encontrados fora da área da malha, próximo aos condutores periféricos. A utilização de hastes periféricas, dependendo das características elétricas do solo, pode afetar a distribuição de potencial na periferia da malha.

Máxima tensão de toque desenvolvida:

A metodologia apresentada na NBR 15751 [02] serve para determinar o valor da tensão de toque no centro dos reticulados que estão situados nas quinas da malha, onde ocorre a diferença de potencial entre a malha e o ponto da superfície do solo localizado no centro do reticulado.

As expressões para calcular a tensão de toque para as correntes de curta duração " V_{TCD} ", e longa duração " V_{TLD} ", são as seguintes:

$$V_{TCD} = \frac{\rho \times I_{MCD} \times K_M \times K_i}{L_t} \text{ (V)}, \quad (3.26)$$

$$V_{TLD} = \frac{\rho \times I_{MLD} \times K_M \times K_i}{L_t} \text{ (V)}, \quad (3.27)$$

$$K_M = \frac{1}{2 \times \pi} \left\{ \ln \left[\frac{D^2}{16 \times H \times d_N} + \frac{(D + 2 \times H)^2}{8 \times D \times d_N} - \frac{H}{4 \times d_N} \right] + \frac{K_{ii}}{\sqrt{1+H}} \times \left[\ln \left(\frac{8}{\pi (2n_C - 1)} \right) \right] \right\}, \quad (3.28)$$

onde:

- ρ – Resistividade do solo (solo homogêneo) ($\Omega.m$);
- L_t – Comprimento total dos condutores enterrados, podendo ser condutores horizontais e hastes de aterramento (m);
- I_{MCD} – Máxima corrente de malha de curta duração (A);
- I_{MLD} – Máxima corrente de malha de longa duração (A);
- K_M – Fator geométrico utilizado nos cálculos de tensão de toque;
- n_C – Número de condutores paralelos em uma determinada direção;
- D – Espaçamento entre os condutores (m);
- d_N – Diâmetro dos condutores (m);
- H – Profundidade da malha (m);
- $K_i = 0,656 + 0,172n_C$;
- $K_{ii} = 1$, se a malha possuir hastes de aterramento localizadas na periferia;
- $K_{ii} = (2n_C)^{-2/n_C}$, se a malha não possuir hastes de aterramento, ou somente algumas hastes localizadas fora da periferia da malha.

Máxima tensão de passo desenvolvida:

Para esse cálculo, a norma considera que a máxima tensão de passo é aquela encontrada a uma distância do condutor periférico igual à profundidade da malha. As expressões para calcular a tensão de passo para as correntes de curta duração " V_{PCD} ", e longa duração " V_{PLD} ", são as seguintes:

$$V_{PCD} = \frac{\rho \times I_{MCD} \times K_s \times K_i}{L_t} \text{ (V)}, \quad (3.29)$$

$$V_{PLD} = \frac{\rho \times I_{MLD} \times K_s \times K_i}{L_t} \text{ (V)}, \quad (3.30)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D + H} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n_c-2}) \right], \quad (3.31)$$

onde:

- I_{MCD} – Máxima corrente de malha de curta duração (A);
- I_{MLD} – Máxima corrente de malha de longa duração (A);
- K_s – Fator geométrico utilizado nos cálculos de tensão de passo.

3.2.8 Considerações finais

As etapas apresentadas na seção 3.2 e que fazem parte das normas brasileiras 15751 [02] e 7117 [04] constituem a metodologia clássica para modelagem do solo e controle de potenciais em sistemas de aterramento de subestações. É possível perceber que, em algumas etapas descritas, há uma natureza probabilística inerente, por mais que sejam adotados valores, em muitos casos conservadores, para a realização de cálculos.

Nesse contexto, a abordagem probabilística, que será discutida na próxima seção, busca considerar algumas perspectivas importantes para a avaliação do risco real de um acidente fatal em uma instalação em função de uma ocorrência de um curto-circuito monofásico. Parâmetros como resistência corporal e corrente mínima de fibrilação, passam a ser interpretados como uma função de probabilidade e não apenas como valor único.

A análise tradicional, onde a tensão de passo ou toque desenvolvida deverá estar abaixo da tensão máxima suportada, é substituída por um cálculo de probabilidade de fibrilação e de coincidência, resultando em um risco de fatalidade.

3.3 Método Probabilístico

O método probabilístico de análise de um sistema de aterramento é uma ferramenta importante para quantificar o risco de fatalidade em uma instalação. Alguns guias e diretrizes técnicas internacionais [08], [09] e [10] apresentam essa possibilidade para os projetos de aterramento. Vale ressaltar que a norma brasileira NBR 15751 [02], destinada aos sistemas de aterramentos de subestações acima de 1 kV, tendo sua primeira edição publicada em 2009 e revisada posteriormente em 2013, ainda não aborda tal metodologia e trabalha com o conceito de atender um conjunto de situações que geram o cenário de maior risco.

Porém, é importante destacar que a ocorrência de curtos-circuitos, a magnitude da corrente de malha e a duração da falta, além da presença de seres humanos expostos a uma determinada situação de risco e a intensidade do dano à saúde, são eventos de natureza probabilística.

Para Carman e Palmer [23], os projetos tradicionais costumam usar o mesmo critério de segurança, seja para lugares onde o fluxo de pessoas é baixo, como subestações em áreas rurais, ou para locais onde há um maior fluxo de pessoas, como subestações em centros urbanos ou áreas industriais. Os projetos tradicionais também ignoram as grandes variações na frequência de falhas do sistema e a frequência de contato de pessoas com ativos.

Dimopoulos *et al.* [24] afirmam que, ao analisar o aterramento de uma subestação, a maioria dos padrões verifica tensões nas quinas das malhas, região onde geralmente aparecem as maiores diferenças de potencial e que normalmente não possui objetos instalados que possam gerar risco de tensão de toque. Os autores observam também que, através de simulações computacionais, é possível ter uma visão mais realista de todos os potenciais que surgem dentro da malha, obtendo assim dados importantes para uma abordagem probabilística.

Reconhecendo essas limitações de análise por meio do modelo determinístico, algumas normas atuais de aterramento estão permitindo uma avaliação probabilística. Nessa abordagem, é calculado o risco de fatalidade cujo o resultado é produto de duas variáveis, sendo a primeira, a probabilidade de coincidência 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 de ocorrência da falta, e a

segunda variável considera a probabilidade do coração sofrer uma fibrilação ventricular ao ser exposto a uma corrente específica.

No trabalho desenvolvido por Carman *et al.* [25], que serviu de base para a elaboração da norma EG-0 [09], observou-se que um dos desafios da implementação da metodologia probabilística é que, para ela ser funcional, precisa ser prática, sem que sua utilização exija uma coleta excessiva de dados, ou até mesmo um tempo exagerado de análise. Destaca-se também que é importante que seja transparente nas suposições assumidas para evitar, assim, interpretações equivocadas.

A Figura 3.15 apresenta um fluxograma adaptado de Dimopoulos *et al.* [13]. Nele, as etapas do processo de avaliação e elaboração de um projeto de malha de aterramento são definidas em dois estágios: o primeiro estágio é destinado à abordagem tradicional através do método determinístico, onde é verificado se os potenciais que podem surgir em decorrência de um máximo curto-circuito estão abaixo dos limites toleráveis para tensões de passo e toque.

Já no segundo estágio, a avaliação probabilística é adicionada como uma ferramenta para avaliação de risco quando o primeiro estágio não é suficiente. O valor calculado é comparado a uma tabela ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) para verificar se o risco à segurança operacional está a um nível tão baixo quanto razoavelmente aceitável.

A metodologia descrita nesta seção é apresentada por Carman *et al.* [25], onde os potenciais de toque e de passo são verificados e transformados em um risco anual de fatalidade definido pela equação:

$$P_{\text{fatalidade}} = P_{\text{coincidência}} \times P_{\text{fibrilação}} \quad (3.32)$$

Conforme explicado a seguir, a abordagem probabilística é dividida em três partes, sendo elas: a probabilidade de coincidência ($P_{\text{coincidência}}$), a probabilidade de fibrilação ($P_{\text{fibrilação}}$) e a probabilidade de fatalidade ($P_{\text{fatalidade}}$). Os conceitos apresentados estão em conformidade com a metodologia discutida na norma EG-0 [09] e nos trabalhos apresentados por Carman [19, 23, 25 e 33].

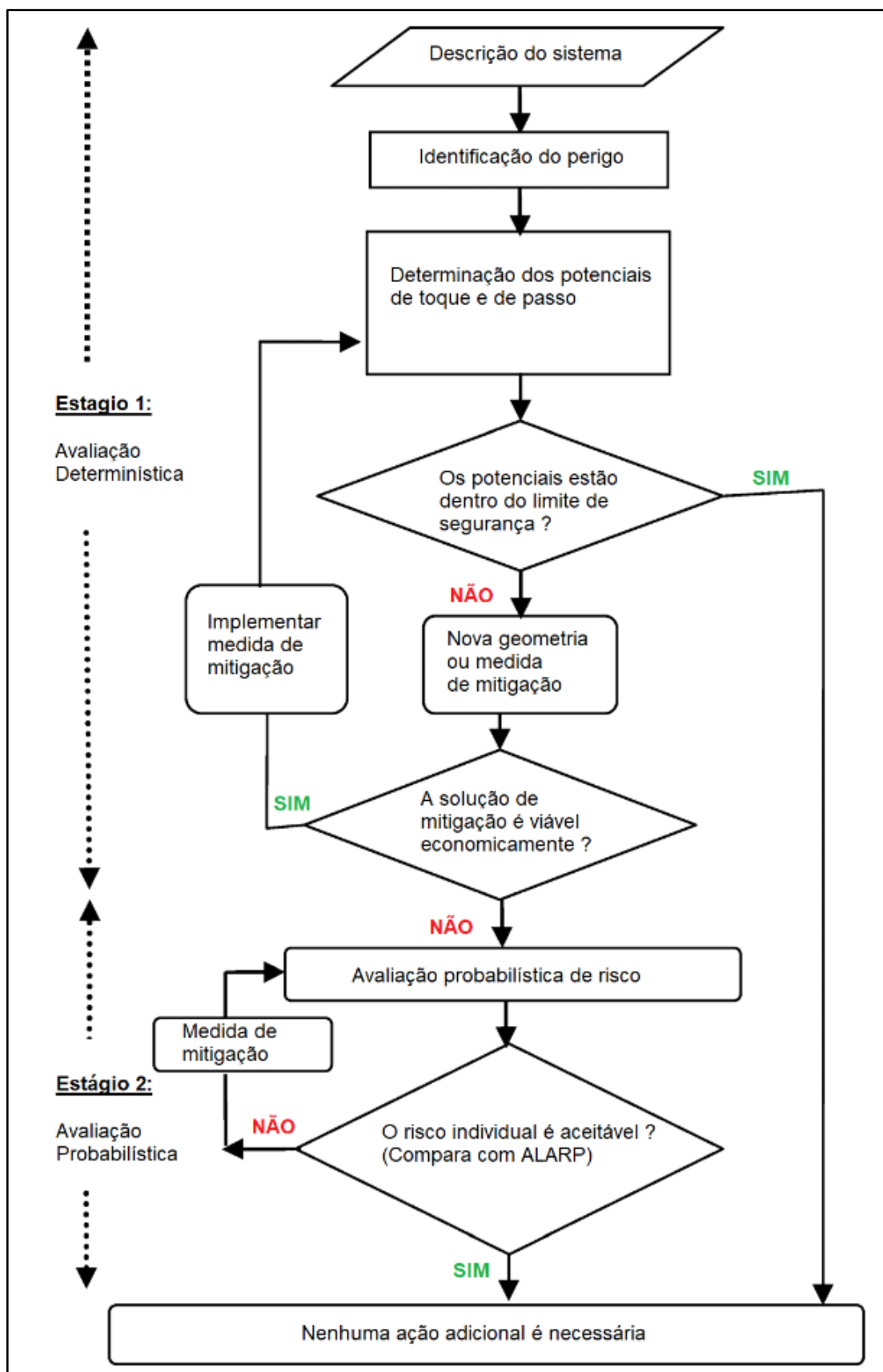


Figura 3.15 – Avaliação de risco probabilística integrada no processo geral de análise e desenvolvimento do sistema de aterramento. [Adaptado de 13]

3.3.1 Probabilidade de coincidência

A probabilidade de coincidência ou $P_{\text{coincidência}}$ é definida como a probabilidade de ocorrência de um ou mais eventos que podem gerar um determinado risco em um intervalo de tempo escolhido.

No ponto em questão associado à malha de aterramento, a probabilidade de coincidência depende da frequência de ocorrência de um curto-circuito e do tempo de atuação da proteção, além do tempo e da quantidade de vezes em que uma pessoa fica exposta ao risco. Normalmente, o intervalo de tempo utilizado na análise, é de um ano.

Na análise de coincidência, três situações podem ser definidas conforme indicado na Figura 3.16. Na situação (a) uma pessoa entra em contato com ativo aterrado durante a ocorrência da falta, em (b) há uma sobreposição total, ou seja, a falta acontece durante o tempo de contato e em (c) a pessoa já está em contato com o ativo aterrado quando a falta acontece.

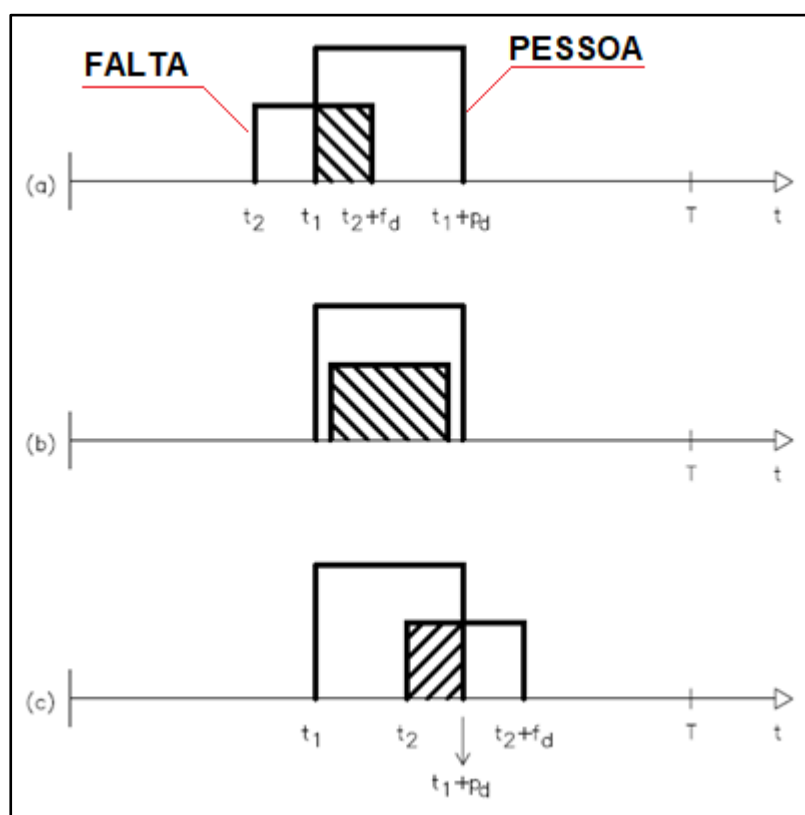


Figura 3.16 – Cenários de probabilidade de coincidência [Adaptado de 09]

Legenda:

- t_1 – Momento inicial do contato/exposição ao risco;
- t_2 – Momento inicial da falta;
- f_d – Duração média da falta (s);
- p_d – Duração média da exposição ao risco (s);
- $f_d < p_d$;
- T – Intervalo de tempo considerado no cálculo de Pcoincidência.

A referência [09] apresenta o desenvolvimento matemático através da distribuição de Poisson para descrever a probabilidade de ocorrência dos dois eventos. Como forma de aplicação da metodologia, a probabilidade de coincidência pode ser simplificada e traduzida na equação abaixo:

$$P_{\text{coincidência}} = \frac{f_n \times p_n \times (f_d + p_d) \times T}{k} \times \text{CRF}, \quad (3.33)$$

onde:

- f_n – Quantidade de ocorrência de faltas por ano;
- f_d – Duração média da falta (s);
- p_n – Quantidade de exposições/presenças por ano;
- p_d – Duração média da exposição (s);
- T – Intervalo de tempo considerado no cálculo de Pcoincidência [anos];
- k – Constante para converter a base de tempo de ano para segundos;
- CRF – fator de redução da coincidência (fator comportamental).

O CRF pode ser aplicado em função de cenários específicos das instalações, como por exemplo, barreiras de proteção, sinalização específica, controle de acesso, etc. [09]. A Tabela 3.5 apresenta alguns valores indicativos que servem para ilustrar como o fator de redução pode impactar na análise do risco de coincidência.

Método de redução de coincidência	Fator de redução de coincidência (CRF)
Instalação de barreiras físicas	0,1
Instalação de cobertura de isolamento	0,4
Restrição de acesso, EPI ou análise de risco da tarefa	0,5
Instalação de sinalização	0,8

Tabela 3.5 – Métodos de redução de coincidência [Adaptado de 09]

A precisão do cálculo da probabilidade de coincidência pode ser refinada quando é considerada a presença de grupos de trabalho na subestação e a variação da presença de profissionais em função da época do ano.

Conforme [09], estimar o tempo de duração do contato é uma tarefa difícil. Apesar de se conhecer as atividades realizadas na subestação, o padrão de comportamento do profissional é algo impreciso. Não é fácil conseguir das concessionárias dados reais sobre esse tipo de situação. Por isso, é importante que, durante o cálculo da probabilidade de coincidência, seja feita uma análise de sensibilidade da frequência e tempo de duração dos contatos.

Como referência para a taxa de ocorrência de faltas por ano, a Tabela 3.6, adaptada de [26], apresenta o número máximo de desligamentos/100 km/ano ocasionados por descargas atmosféricas. Ainda de acordo com [26], a busca por uma melhor qualidade de fornecimento de energia faz com que as concessionárias busquem valores bem inferiores aos indicados na tabela.

Em linhas acima de 100 kV, uma taxa de 0,1 a 1 desligamento/100km/ano, de acordo com [26], seria considerada boa e uma taxa entre 1 até 5 seria considerada média. Para linhas de 69 kV, até 5 desligamentos/100 km/ano seria considerada aceitável.

Nível de tensão de operação da linha (kV)	Número máximo de desligamentos: d (d/100km/ano)
69	10-15
138	10
230	5
345	2-3
500	1-2

Tabela 3.6 – Índices de desligamento por nível de tensão (isoladores: vidro ou porcelana) [Adaptado de 26]

Conforme apresentado em [27], 60% dos desligamentos, para tensões nominais entre 100 kV e 250 kV, são devidos ao curto-circuito fase-terra. Do total de

desligamentos, para linhas que operam com tensão nominal entre 100 kV e 150 kV, 75% dos curtos-circuitos fase terra são provocados por descargas atmosféricas.

3.3.2 Probabilidade de fibrilação

Outro aspecto importante na análise probabilística de um sistema de aterramento é a avaliação do risco de uma pessoa sofrer fibrilação ventricular após ser submetida a uma diferença de potencial. Porém, conforme indicado na Norma IEC 60479-1 [21], outros efeitos significativos, como por exemplo as contrações musculares, o aumento de pressão arterial, queimaduras superficiais e profundas, paralisia das vias respiratórias e lesões internas, podem ocorrer em função de um choque elétrico e, em alguns casos, até levar uma pessoa a morte. A especificação técnica [21] se aplica ao limiar da fibrilação ventricular, considerada a principal causa de morte por corrente elétrica.

Na análise probabilística, o limite da corrente de fibrilação deve ser convertido em um valor de tensão levando em consideração o caminho de circulação da corrente pelo corpo e, conseqüentemente, as impedâncias envolvidas. Esse valor de tensão deve ser comparado com as tensões que podem surgir em diferentes regiões da subestação.

Conforme destacado por Griffiths e Woodhouse [28], os parâmetros humanos utilizados na análise do risco de fibrilação são descritos através de uma distribuição probabilística e não podem, conforme indicado no método determinístico, ser caracterizados apenas como um único valor. A probabilidade de fibrilação é interpretada como a chance de um indivíduo selecionado de forma aleatória, com característica de impedância corporal aleatória, entrar em processo de fibrilação ventricular ao ser exposto a uma diferença de potencial.

A Figura 3.17, adaptada de [09], apresenta um fluxograma contemplando as etapas abordadas na sequência do trabalho que devem ser consideradas para calcular a probabilidade de fibrilação.

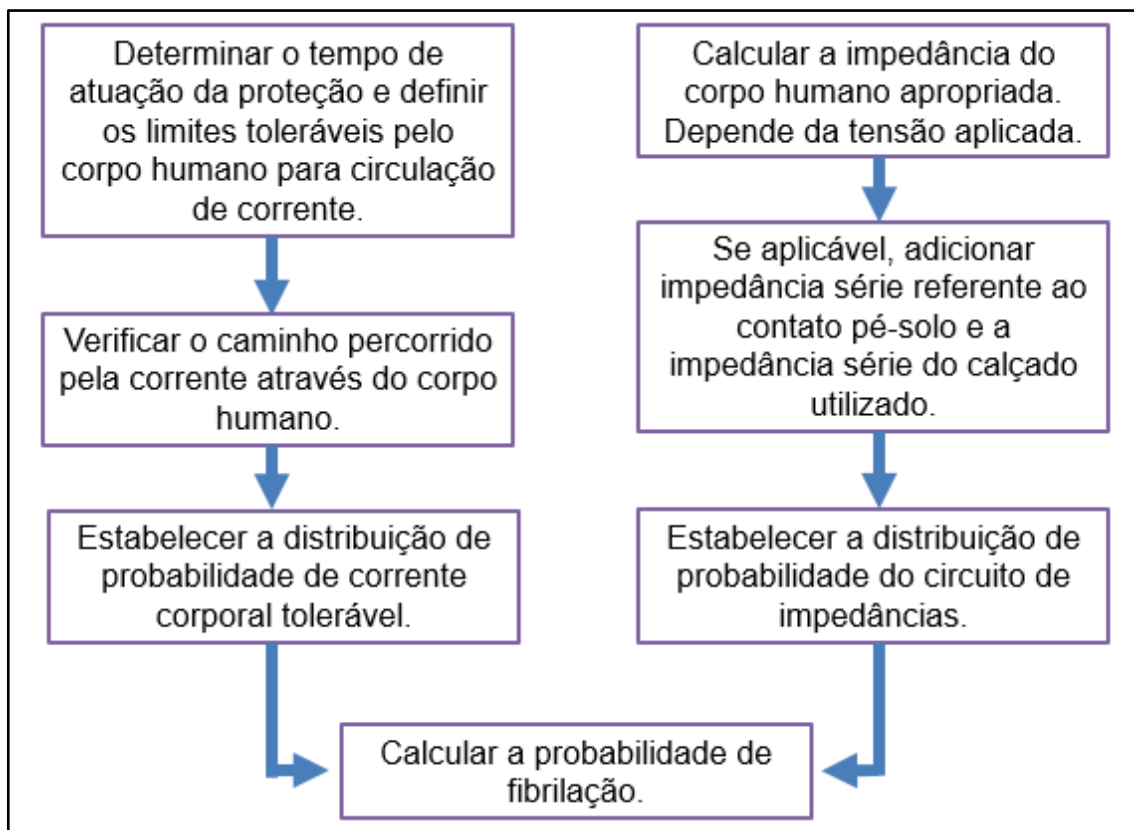


Figura 3.17 – Procedimento para calcular os limites de tensão [Adaptado de 09]

3.3.2.1 Curvas de probabilidade de fibrilação

Um primeiro ponto a ser analisado é qual o valor limite de corrente que levará uma pessoa a entrar em processo de fibrilação ventricular. Haddad e Warne destacam que, quando a corrente atinge um valor próximo a 50 mA, já é possível que ocorra a fibrilação ventricular [29]. Porém, o limite não depende apenas do valor da corrente. A duração do choque, o caminho percorrido pela corrente e a frequência influenciam diretamente na ocorrência ou não da fibrilação.

A NBR 17571 [02], conforme descrito no item 3.2.7.1, utiliza o fator de 0,116 em função do tempo de atuação da proteção para calcular a corrente máxima de curta duração para que não ocorra fibrilação ventricular para 99,5 % das pessoas de 50 kg. É interessante destacar que a Norma IEEE Std 80 [03] apresenta, além do fator de 0,116, o fator de 0,157. Esse segundo fator serve como uma alternativa para pessoas de 70 kg e deve ser utilizado em projetos onde o acesso ao local é controlado, como por exemplo, o pátio de uma subestação.

Os fatores citados acima são provenientes dos estudos de Dalziel e Lee [30, 31]. A equação 3.34, apresenta o valor da corrente mínima para fibrilação em função do peso corporal de uma pessoa (0,116 a 0,185) e do tempo de circulação da corrente, que pode variar entre 0,0083 a 5,0 s.

$$I_{\text{CHCD}} = \frac{0,116 \text{ a } 0,185}{\sqrt{t}} [\text{A}]. \quad (3.34)$$

A IEC 60749-1 [21], outra norma importante que debate os limites de fibrilação, foi baseada no trabalho de Biegelmeier e Lee [32]. Os parâmetros especificados na norma estão presentes em diversas diretrizes técnicas de projetos [09, 10, 34] fazendo parte da metodologia probabilística destacada pela brochura do CIGRE/CIREN [07].

A Figura 3.18, retirada de [33], apresenta as curvas adotadas pela IEC 60749-1 [21] correspondentes à probabilidade de fibrilação ventricular em função do tempo e da intensidade da corrente que circulará pelo corpo. Para comparação entre as metodologias, Carman [33] incluiu as retas que representam as equações de Dalziel para os fatores de 0,116 (50 kg) e 0,157 (70 kg) e que consideram o risco de fibrilação em 0,5%.

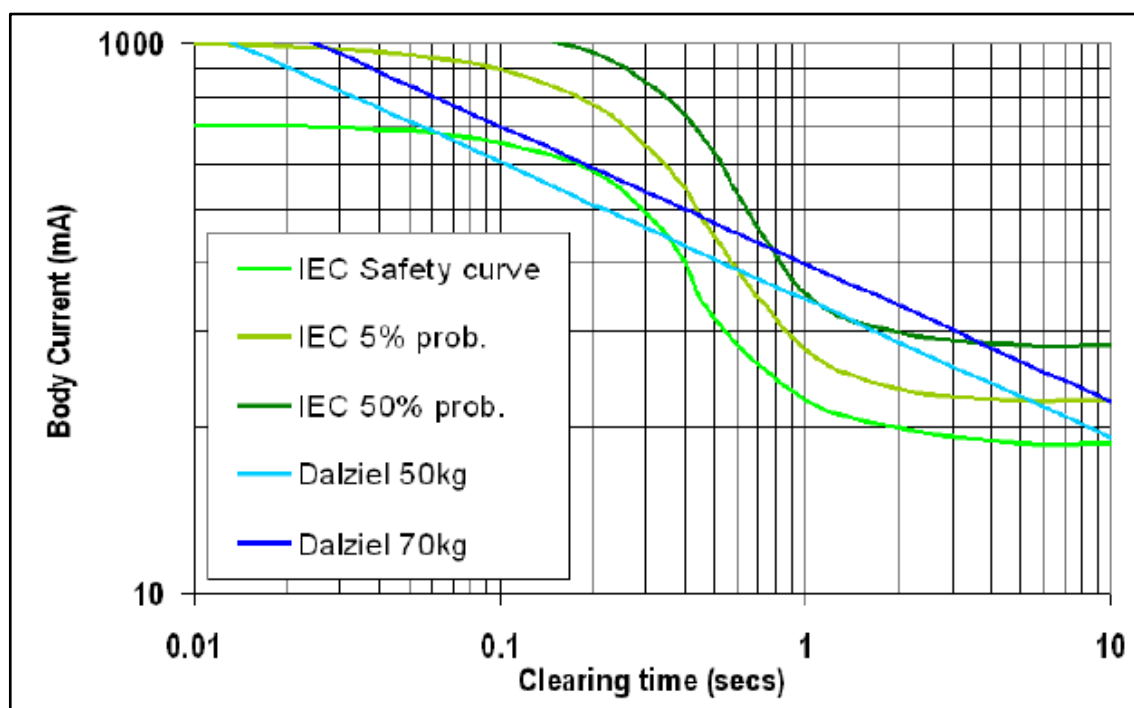


Figura 3.18 – Curvas de probabilidade de fibrilação [Retirado de 33]

As três curvas, adotada pela IEC 60749-1 [21], delimitam o risco em quatro regiões. A região abaixo da curva da “Safety Curve” é considerada uma área de risco desprezível. Entre a curva de “Safety Curve” e a curva “IEC 5% prob.” há um risco de fibrilação de até 5%. Na próxima região, o risco varia de 5% a 50% de probabilidade de fibrilação e por fim, a região à direita da curva “IEC 50% prob.” apresenta um risco superior a 50%.

Na norma EG-0 [09] uma curva relativa a 95% de chance de fibrilação pode ser encontrada. A Figura 3.19 apresenta as três curvas (“C1”, “C2” e “C3”) relativas à probabilidade de fibrilação que estão originalmente na norma IEC 60749-1 [21], mais a curva “C4”. Essa curva de 95% é importante para o cálculo probabilístico da fibrilação e será explicado na sequência do capítulo.

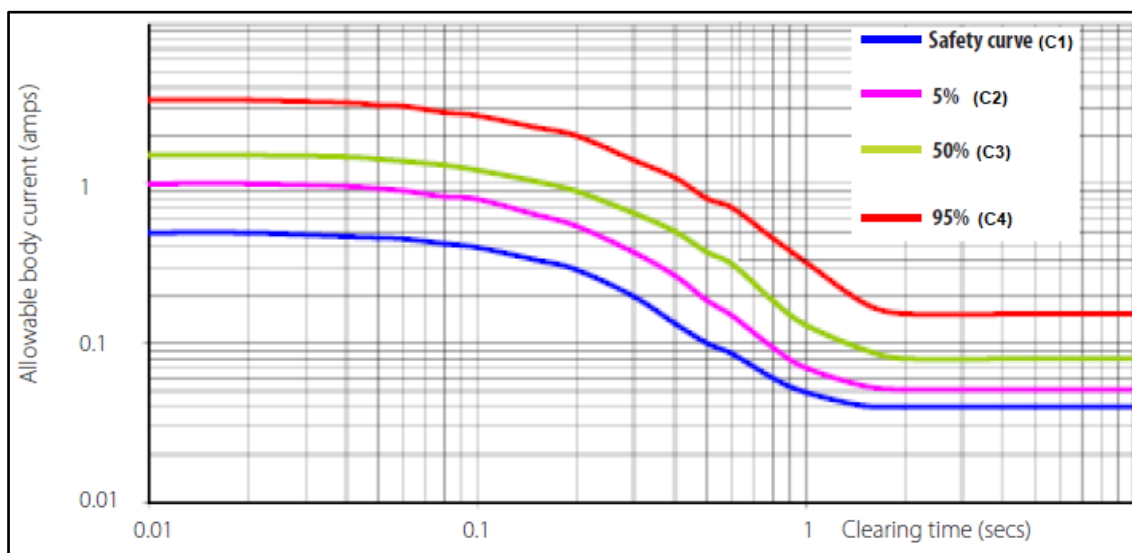


Figura 3.19 – Curvas de probabilidade de fibrilação [Retirado de 09]

A Tabela 3.7 apresenta os efeitos fisiológicos associados a cada região estabelecidas pelos limites das curvas “C1”, “C2”, “C3 e “C4”.

Limites	Efeitos fisiológicos
Acima da curva “C1”	Podem ocorrer efeitos fisiopatológicos, como parada cardíaca, parada respiratória e queimaduras ou outros danos celulares. Probabilidade de fibrilação ventricular cresce com um aumento da corrente e o tempo de duração.
“C1 – C2”	Probabilidade de fibrilação ventricular de até aproximadamente 5%
“C2 – C3”	Probabilidade de fibrilação ventricular de até aproximadamente 50%
“C3 – C4”	Probabilidade de fibrilação ventricular de até aproximadamente 95%
Além da curva “C4”	Probabilidade de fibrilação ventricular superior a 95%

Tabela 3.7 – Descrição dos limites da curva de corrente do corpo [Adaptado de 09]

Em [33], as equações relativas as curvas “C2”, “C3” e “C4, para análise da fibrilação, são apresentadas:

$$I_{C2} = \frac{929,857 - 87,698t^{0,5} + 3,33096t - 0,066177t^{1,5} + 0,00073641t^2}{1 - 0,13244t^{0,5} + 0,012013t - 0,00058515t^{1,5} + 0,0000113595t^2} \quad (3.35)$$

$$I_{C3} = \frac{1399,7 - 116,078t^{0,5} + 4,097775t - 0,08132t^{1,5} + 0,0009314t^2}{1 - 0,1157538t^{0,5} + 0,01039125t - 0,00049416t^{1,5} + 0,0000093319t^2} \quad (3.36)$$

$$I_{C4} = \frac{3546,9 - 154,29t^{0,5} + 2,2329t}{1 - 0,033567t^{0,5} + 0,001072t + 0,000059836t^{1,5}} \quad (3.37)$$

É importante destacar, que dependendo do tempo de exposição, o peso considerado da vítima e a metodologia adotada, as tensões de segurança calculadas podem apresentar diferenças significativas. Essas diferenças impactam em projetos com soluções bem distintas.

Griffiths *et al.* [28] observa que as linhas retas presentes na IEEE-80 [03] e as curvas em “S” apresentadas pela IEC 60749-1 [21] podem se cruzar várias vezes, o que torna complicado determinar qual padrão é mais conservador, uma vez que há uma relação de dependência com o tempo de atuação da proteção.

3.3.2.2 Avaliação da configuração do circuito de choque

No cálculo probabilístico, são levadas em consideração as diferentes formas de contato entre a vítima e o ativo da subestação. Para cada possibilidade de contato, há uma configuração específica do circuito de choque e um caminho específico para a circulação da corrente. A Tabela 3.8 apresenta o fator de corrente cardíaca “F”, que permite corrigir o valor da corrente corporal “ I_{CH} ”, quando o trajeto da corrente é diferente do definido pela “ I_{REF} ” (corrente de “mão esquerda para um pé ou ambos os pés”). O valor corrigido representa o mesmo risco de fibrilação do valor de referência.

$$I_{CH} = \frac{I_{REF}}{F} \quad (3.38)$$

Caminho da corrente	Fator F (Corrente cardíaca)
Mão esquerda para o pé esquerdo, pé direito ou ambos os pés	1,0
Ambas as mãos para ambos os pés	1,0
Mão esquerda para mão direita	0,4
Mão direita para o pé esquerdo, pé direito ou ambos os pés	0,8
De volta à mão direita	0,3
De volta à mão esquerda	0,7
Peito à mão direita	1,3
Peito à mão esquerda	1,5
Assento à mão esquerda, à direita ou às duas mãos	0,7
Pé esquerdo para pé direito	0,04

Tabela 3.8 – Fator corrente cardíaca para diferentes caminhos [Adaptado de 21]

Ao estimar a probabilidade de fibrilação, em uma situação onde a vítima seja acometida pela circulação de uma corrente do pé esquerdo para o pé direito (situação definida como tensão de passo), deve-se utilizar o fator de 0,04 para o cálculo. Na prática, significa que a corrente necessária para causar a mesma probabilidade de fibrilação de um cenário onde o caminho da corrente é da “mão esquerda para o pé”, é 25 vezes maior.

3.3.2.3 Efeito da impedância do corpo humano

Uma mudança importante da abordagem clássica para a abordagem probabilística é o valor da impedância do corpo humano. Conforme descrito anteriormente, a norma IEEE Std 80 definiu o corpo humano no circuito elétrico do “choque” como uma resistência de 1000 Ω . Porém, conforme explicado na IEC 60479-1 [21], as grandezas elétricas do corpo humano variam em função de diversos parâmetros, inclusive em função da tensão aplicada. Destaca-se também que pele, sangue, músculos, diversos tecidos e articulações apresentam uma impedância formada por elementos resistivos e capacitivos. O valor da impedância não é tão simples de ser definido. Depende de fatores como percurso e tempo de circulação da corrente, tensão a qual foi submetida, frequência, área de contato superficial, umidade da pele, temperatura e pressão exercida durante o contato. Portanto, são inúmeros parâmetros probabilísticos que dificultam estabelecer um valor único.

Dimoupolos *et al.* [24] observa que para frequência industrial, o circuito equivalente do corpo humano é predominantemente resistivo. Portanto, apenas a tensão aplicada, o caminho da corrente, umidade da pele e área de superfície de

contato impactam no valor da impedância corporal. É importante destacar que, para valores de tensão de toque acima de 1 kV, as condições externas de contato da pele são menos relevantes. A impedância total tende para o valor da impedância interna do corpo.

Como referência para o cálculo da impedância corporal, [21] disponibiliza valores de impedância do corpo humano em função da tensão de toque para diversas situações, sendo elas:

- Área da região de contato (100 mm², 1000 mm² e 10000 mm²)
- Estado do contato (seco, úmido e úmido com teor de sal)

A Tabela 3.9 apresenta os valores de impedâncias para a condição de tensão de toque, considerando o percurso da corrente de mão até mão, área de contato de 1000 mm² e seca. As impedâncias correspondem aos valores estatísticos não excedidos por 5%, 50% e 95% da população.

Tensão de toque	Valores para as impedâncias corporais totais Z _t (Ω) que não são excedidos para X% da população		
	5%	50%	95%
V			
25	1750	3250	6100
50	1375	2500	4600
75	1125	2000	3600
100	990	1725	3125
125	900	1550	2675
150	850	1400	2350
175	825	1325	2175
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Valor assintótico = Z interna	575	775	1050

Tabela 3.9 – Impedâncias corporais totais Z_t para um caminho de corrente de mão para mão, 50/60 Hz, para grandes áreas de superfície de contato em condições secas [Adaptado de 21]

Em [24], é apresentado um fator para calcular a distribuição da resistência do corpo humano de acordo com qualquer caminho. Para isso, utiliza-se a equação abaixo e o fator BF indicado na Tabela 3.10.

$$R_{CH} = R_{CH \text{ (mão para mão)}} \times BF \quad (3.39)$$

Caminho da corrente		Fator BF - Fator relativo ao corpo
Da (o) / Das	Para	
Mão esquerda	Pé esquerdo	1
Mão esquerda	Pé direito	1
Mão direita	Pé esquerdo	1
Mão direita	Pé direito	1
Mão esquerda	Mão direita	0,8
Mão direita	Ambos os pés	0,75
Mão esquerda	Ambos os pés	0,75
Ambas as mãos	Ambos os pés	0,5
Nádegas	Mão esquerda	0,56
Nádegas	Mão direita	0,56
Nádegas	Ambos os pés	0,33
Costas	Mão direita	0,52
Costas	Mão esquerda	0,52
Peito	Mão direita	0,52
Peito	Mão esquerda	0,52
Pé direito	Pé esquerdo	0,275

Tabela 3.10 – Circuito percorrido pela corrente e fator relativo a impedância do corpo humano.
[Adaptado de 28]

3.3.2.4 Cálculo da probabilidade de fibrilação

O cálculo da probabilidade de fibrilação ($P_{\text{fibrilação}}$) depende da tensão aplicada, da impedância do corpo ao longo do caminho percorrido pela corrente, das resistências em série do circuito do choque, da configuração de contato e da duração da falta à terra. Para a tensão de toque através da abordagem probabilística, Carman [33] apresenta a seguinte equação:

$$V_{\text{pt}} = i_b[(t, \% \text{pop}) / F] \times \{R_{\text{series}} + [R_b(V_{\text{pt}}, \% \text{pop}) \times \text{BF}]\}, \quad (3.40)$$

onde:

- $R_b(V_{pt}, \%pop)$ – Resistência do corpo humano em função da tensão de toque aplicada e da probabilidade de ocorrência na população;
- $I_b(t, \%pop)$ – Corrente corporal suportável em função do tempo de duração e da probabilidade de ocorrência na população;
- F – Fator de corrente cardíaca;
- BF – Fator relativo ao corpo humano;
- R_{series} – Resistência em série adicionada ao circuito de choque como por exemplo luvas e calçados.

Para calcular a probabilidade de fibrilação em uma situação de tensão de toque ou de passo, a diferença de potencial aplicada deve ser comparada à capacidade de uma pessoa de resistir aos efeitos nocivos da corrente. A Figura 3.20 apresenta um fluxograma com as etapas a serem consideradas durante uma rotina de cálculos de probabilidade de fibrilação.

Conforme indicado no fluxograma, para um dado valor de tensão aplicado no corpo humano (máxima tensão que irá surgir na instalação em decorrência de um curto-circuito) e o tempo de circulação da corrente no corpo da vítima (definido pelo tempo de atuação da proteção), é possível a criação de distribuições de probabilidade para impedância corporal e para corrente suportável.

A Figura 3.21, mostra um exemplo de uma superfície de probabilidade cumulativa de fibrilação ventricular em função da corrente corporal e do tempo de duração do choque, desenvolvida com base nos dados da IEC 60479 [21].

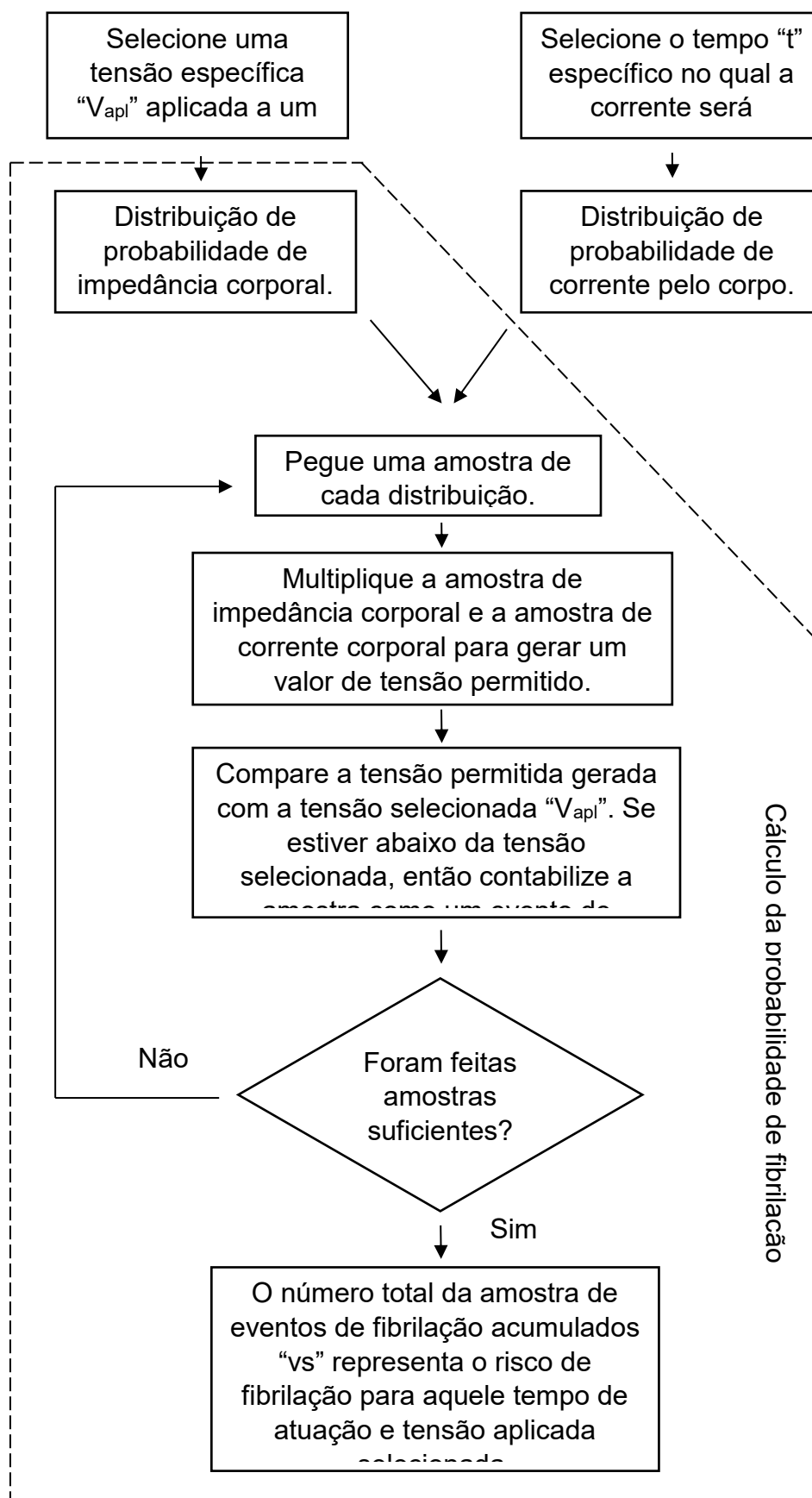


Figura 3.20 – Fluxograma para cálculo da probabilidade de fibrilação [Adaptado de 09]

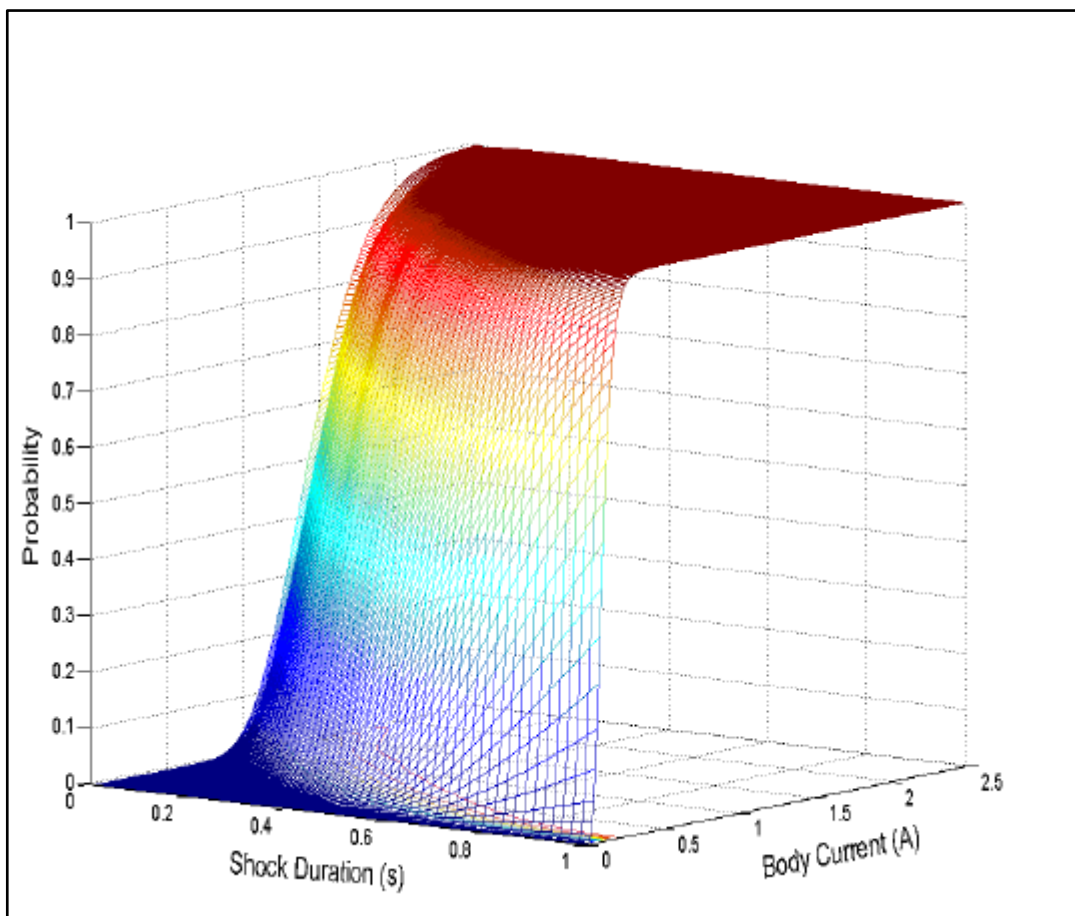


Figura 3.21 – Superfície de probabilidade acumulativa de fibrilação ventricular em função da corrente corporal e da duração do choque. [Retirado de 07]

Em [07], diversas curvas de tensão aplicada pelo tempo da falta foram desenvolvidas para determinar a probabilidade de fibrilação. Em [09] é apresentado uma metodologia para o cálculo probabilístico da fibrilação através das equações 3.41 e 3.42.

A probabilidade de fibrilação pode ser calculada para um valor de tensão aplicado e um tempo específico de atuação da proteção, comparando então as duas funções de distribuição acumulada.

$$I_{\text{possível}} = \frac{V_{\text{apl}}}{Z_{\text{impedância do circuito}}} \quad (3.41)$$

$$P_{\text{fibrilação}}(V_{\text{apl}}, t) = \sum_{n=1}^{n=100} \sum_{m=1}^{m=100} \left(\frac{-\frac{n}{100} \times \frac{m}{100} (I_{\text{pos}}(V_{\text{apl}}) > I_{\text{per}}(t))}{\frac{n}{100} \times \frac{m}{100}} \right) \quad (3.42)$$

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

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 equação 3.42 estabelece o somatório das combinações possíveis de probabilidades quando " I_{pos} " for maior que " I_{per} ", dividido pela quantidade total de combinações possíveis de probabilidades.

3.3.2.5 Comparação de risco de fibrilação

A Tabela 3.11, adaptada do artigo de Bale e Tocher [11], apresenta uma comparação entre os riscos de fibrilação considerados quando utilizado os critérios estabelecidos pela IEC 61936 [34], pela IEEE Std 80 [03] e EG-0 [09].

Os autores consideraram uma pessoa descalça em uma subestação onde o solo possui resistividade de $50 \Omega.m$. Para cada valor de tempo de atuação da proteção, uma tensão de toque máxima permitida foi calculada. Essa tensão aplicada gera uma probabilidade de fibrilação de 0,5% de acordo com a IEEE Std 80 e de 5% de acordo com IEC 61936. Utilizando o software Argon – Safety Assessment Process [35] calcularam então o risco de fibrilação para cada cenário de acordo com a metodologia da EG-0 [09].

A diferença entre as metodologias é bastante significativa. Um dos motivos para essa diferença relevante, conforme explicado anteriormente, é que a metodologia determinística considera a impedância do corpo humano sendo o valor fixo de 1000Ω e não como uma função de probabilidade.

Observa-se que metodologias clássicas desconsideram os parâmetros probabilísticos envolvidos em todas as etapas da ocorrência e que em alguns casos podem gerar uma probabilidade de fibrilação não aceitável.

Tempo de atuação da proteção (s)	IEEE Std 80			IEC 61936		
	Tensão aplicada (V)	Pfibrilação (%)	Pfibrilação Argon (%)	Tensão aplicada (V)	Pfibrilação Argon (%)	Pfibrilação calculada (%)
0,01	-	-	-	783	5,0	24,6
0,02	-	-	-	762	5,0	24,2
0,03	720	0,5	21,5	745	5,0	24,2
0,04	624	0,5	11,4	729	5,0	24,3
0,05	558	0,5	6,6	717	5,0	24,9
0,06	509	0,5	4,3	700	5,0	24,7
0,07	471	0,5	3,0	687	5,0	24,7
0,08	441	0,5	2,2	675	5,0	24,9
0,09	416	0,5	1,7	662	5,0	24,9
0,1	394	0,5	1,4	651	5,0	25,2
0,2	279	0,5	0,6	537	5,0	28,2
0,3	228	0,5	0,8	413	5,0	19,8
0,4	197	0,5	1,5	307	5,0	12,9
0,5	176	0,5	3,5	218	5,0	9,3
0,6	161	0,5	8,1	176	5,0	11,5
0,7	149	0,5	14,3	149	5,0	14,3
0,8	139	0,5	19,6	132	5,0	16,2
0,9	131	0,5	23,7	121	5,0	17,7
1,0	125	0,5	26,8	117	5,0	21,3
2,0	88	0,5	18,5	94	5,0	24,3
3,0	72	0,5	9,0	90	5,0	24,7

Tabela 3.11 – Comparativo do risco de fibrilação entre [03, 34 e 35] [Adaptado de 11]

3.3.3 Probabilidade de fatalidade

As probabilidades de fibrilação e de coincidência descritas anteriormente servem como base para o cálculo do risco de fatalidade. Na análise probabilística de um sistema de aterramento, é necessário que o risco de fatalidade calculado seja comparado ao valor de risco considerado aceitável.

Conforme apresentado por Da Silva [36], existem ferramentas de “Visualização de Informação” utilizadas no sistema elétrico que servem de instrumento de suporte para tomada de decisão no processo de “Gerenciamento de Risco” em diversos tipos de atividades. No trabalho, o autor cita a FMEA (*Failure Modes and Effect Analysis*), utilizada para apoiar as ações dos analistas de risco em processos de manutenção, a FTA (*Fault Tree Analysis*), aplicada em um sistema de distribuição elétrica para calcular a probabilidade de falha em um sistema de monitoramento de subestações, a ETA (*Event Tree Analysis*) utilizada em análises de sistema de proteção, o HAZOP (*Hazards and Operability Study*) utilizado para avaliar o risco de um projeto elétrico de uma planta de produção de gás e a ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) utilizado para análise do risco associado ao sistema de aterramento.

Carman *et al.* [25], define a probabilidade de fatalidade como o produto das probabilidades de coincidência e de fibrilação.

$$P_{\text{fatalidade}} = P_{\text{coincidência}} \times P_{\text{fibrilação}} \quad (3.43)$$

Em [07], como forma de análise do resultado de $P_{\text{fatalidade}}$, considera-se o risco dividido em três níveis conforme Tabela 3.12. O objetivo é fazer com que o risco sempre esteja na região verde onde ele é baixo ou tolerável. Porém, na região intermediária ALARP, o projeto pode ser aceitável, desde que práticas adicionais sejam adotadas para minimizar o risco.

Probabilidade de fatalidade única	Classificação de risco para morte pública	Implicação resultante para tratamento de risco
$\leq 10^{-6}$	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
10^{-6} a 10^{-4}	Região intermediária ou ALARP	Deve minimizar a ocorrência, a menos que a redução de riscos seja impraticável e os custos sejam desproporcionais à segurança obtida
$\geq 10^{-4}$	Risco alto ou intolerável	Deve evitar a ocorrência, independentemente dos custos.

Tabela 3.12 – Limite alvo para probabilidade de fatalidade individual [Adaptado de 07]

Quando a probabilidade de coincidência, normalmente a primeira condição a ser calculada, está na região de risco baixo ou tolerável, o risco de fibrilação passa a ser desprezível. Porém, quando o risco de coincidência é significativo, o risco de fibrilação precisa ser avaliado para garantir que o risco global de fatalidade esteja em um nível tolerável.

Em subestações, onde o acesso é controlado e os profissionais utilizam equipamentos de segurança, é provável que a região intermediária de risco seja aceitável em um projeto. Porém, as premissas envolvidas nos cálculos e as medidas de mitigação dos riscos devem ser registradas com clareza na memória de cálculo do sistema de aterramento.

Para fins de comparação, a Tabela 3.13 apresenta valores de risco de fatalidade para diferentes atividades de acordo a agência britânica “*HSE - Health and Safety Executive*” [07]. O intuito de disponibilizar essa tabela na dissertação é apenas uma referência para o leitor.

Atividade	Risco de fatalidade associado por ano
Risco de morte considerando cinco horas de escalada solo todo fim de semana	10^{-2}
Risco de morte devido a um acidente de trabalho em atividades de alto risco da indústria, como por exemplo a mineração	10^{-3}
Risco geral de morte devido a um acidente de trânsito	10^{-4}
Risco de morte em um acidente de trabalho nas áreas mais seguras da indústria	10^{-5}
Risco geral de morte em um incêndio ou explosão de gás em residência	10^{-6}
Risco de morte por descarga atmosférica	10^{-7}

Tabela 3.13 – Níveis de risco fatalidade (valores médios aproximados) [Adaptado de 07]

3.4 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou as principais informações sobre as abordagens determinística e probabilística para análise e desenvolvimento de projetos de sistemas de aterramento. Na primeira parte, parâmetros como medição de resistividade, modelagem do solo, definição da geometria básica da malha, cálculo dos potenciais máximos de segurança e potenciais máximos desenvolvidos em decorrência de um curto circuito foram apresentados. No segundo momento, os parâmetros presentes na abordagem probabilística foram discutidos. Na nova perspectiva, a segurança da malha é avaliada através de uma análise de risco de fatalidade, onde são considerados as probabilidades de coincidência e de fibrilação.

As principais diferenças entre a abordagem probabilística em relação a metodologia determinística estão na utilização de um conjunto de funções de probabilidade e não mais valores definidos para impedância do corpo humano ou corrente suportável pelo corpo humano.

No próximo capítulo um projeto de malha de aterramento utilizando a metodologia determinística é desenvolvido e posteriormente os riscos são analisados através da abordagem probabilística.

4 ESTUDO DE CASOS

4.1 Introdução

Após a fundamentação teórica, este capítulo apresenta um estudo de casos com o objetivo de exemplificar a aplicação das metodologias determinística e probabilística. Para isso, na seção 4.2, analisa-se um projeto de um sistema de aterramento de uma subestação nova de 138 kV sob a ótica das duas abordagens.

Os softwares comerciais Resist [37] e SEGround [38], desenvolvidos pela NSA Consultoria, serviram de ferramenta para modelagem do solo, definição da geometria da malha e cálculo de potenciais que surgiriam na subestação em decorrência de uma falta. A Figura 4.1 apresenta a tela principal de simulação do software [38].

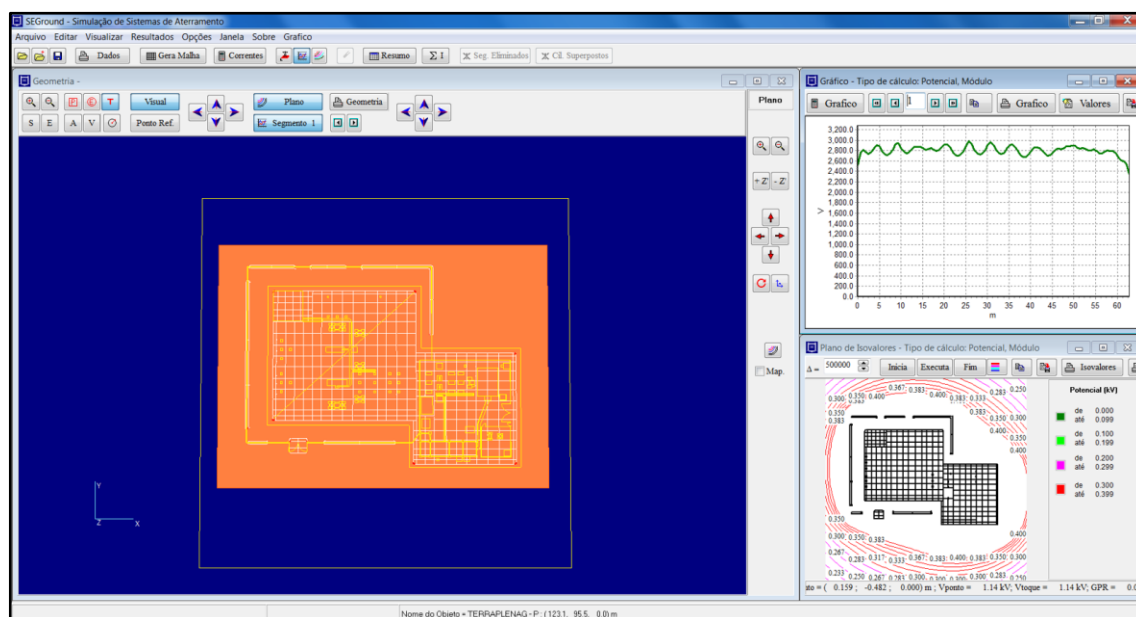


Figura 4.1 – Interface principal do software SE Ground – NSA Consultoria [38]

Na sequência, utiliza-se a abordagem probabilística para quantificar as probabilidades de coincidência, fibrilação e fatalidade associadas ao sistema de aterramento projetado através do método determinístico. Diversos cenários são analisados considerando variações no tempo de exposição ao risco, no tempo de atuação da proteção e na quantidade de faltas.

Na seção 4.3, avalia-se o aumento da probabilidade de fibrilação em função de uma possível elevação do nível de curto-circuito na subestação analisada na seção 4.2. Por fim, na seção 4.4, é apresentada uma análise dos parâmetros típicos de projetos existentes de um conjunto de subestações de 138 kV através da abordagem probabilística.

Para determinação dos riscos associados aos projetos, são realizadas simulações utilizando o software Argon – Safety Assessment Process [35], elaborado pela ENA – Energy Networks Association. O software é considerado atualmente a principal ferramenta para análise probabilística e está citado tanto na brochura técnica do Cigré [07], quanto na EG-0 [09]. A Figura 4.2 apresenta a tela principal do programa.

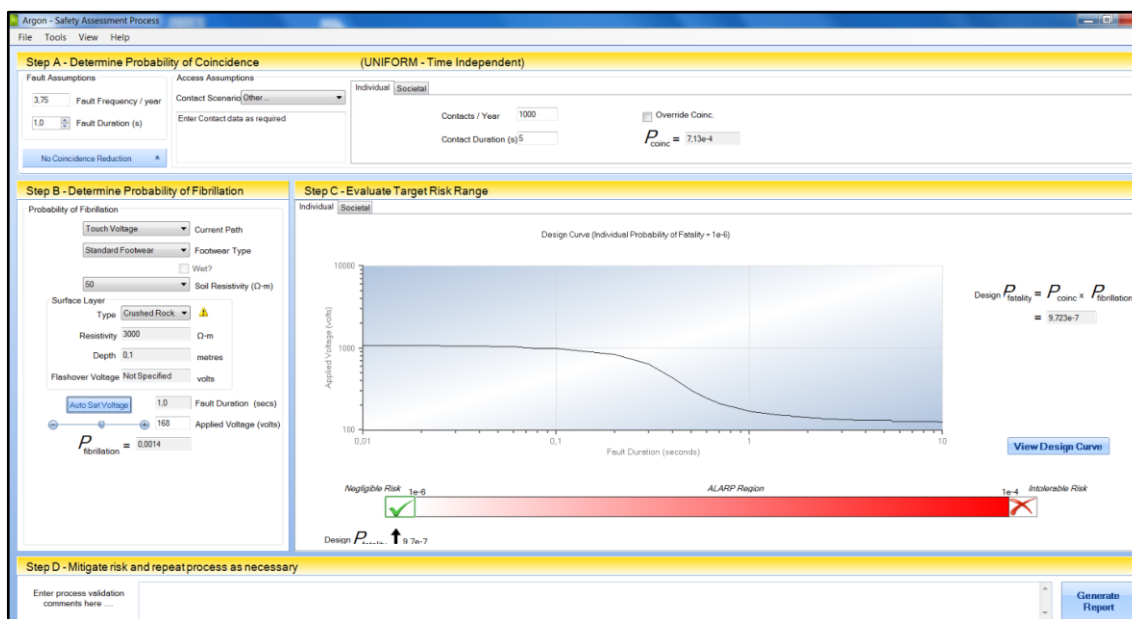


Figura 4.2 – Interface principal do software Argon – Safety Assessment Process [35]

4.2 Subestação Nova

Nesta sessão é apresentado um caso real de duas subestações que compartilham o mesmo pátio, sendo uma subestação chaveadora, propriedade de uma concessionária de distribuição de energia, e uma subestação elevadora de propriedade de um complexo de geração de energia solar. Pela proximidade das duas subestações, optou-se por elaborar um projeto único de malha de aterramento.

A subestação possui uma malha de aterramento (que ocupa uma área de 3.730 m²), duas linhas de 138 kV (interligando a subestação chaveadora às subestações “A” e “B”), alimentadores de 34,5 kV (interligando a subestação elevadora aos setores de geração da usina fotovoltaica), um transformador elevador 34,5 - 138 kV e corrente total de curto-circuito fase-terra de 2,86 kA. A Figura 4.3 apresenta o arranjo eletromecânico dos pátios e a Figura 4.4 apresenta o diagrama unifilar básico equivalente das subestações.

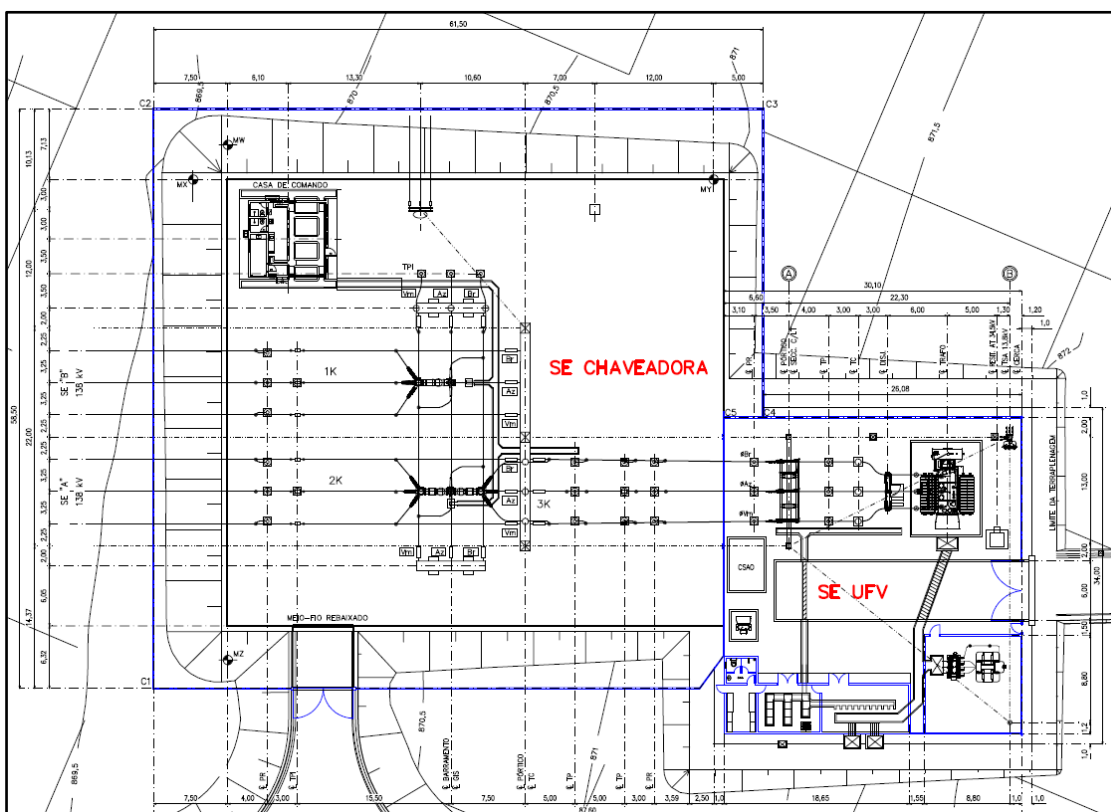


Figura 4.3 – Arranjo eletromecânico planta das subestações

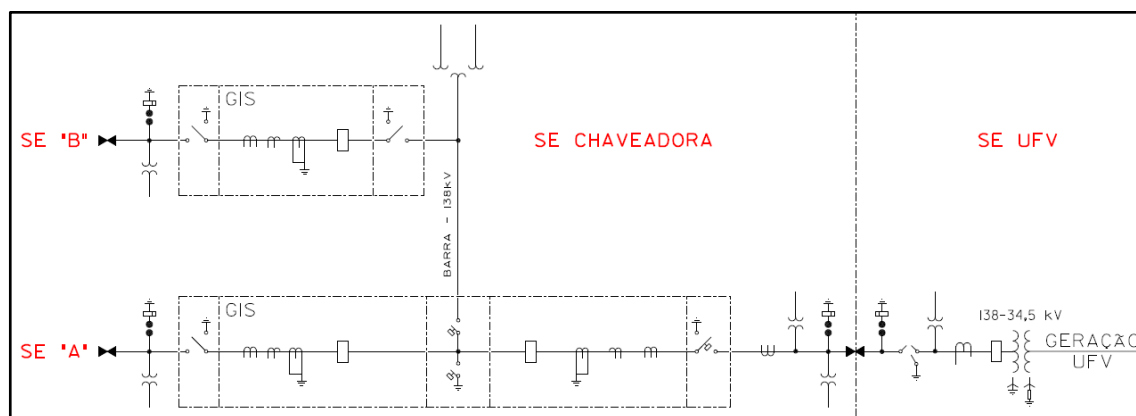


Figura 4.4 – Diagrama unifilar básico das subestações

Com os dados clássicos do projeto em mãos, avalia-se se há risco efetivo na subestação. Ou seja, mesmo com a coerência entre as etapas de medição de resistividade, projeto e verificação da malha, investiga-se se é possível afirmar que o ambiente é seguro de acordo com a abordagem probabilística.

Analisa-se também se poderá existir uma situação de risco em decorrência de uma falta para terra, conforme sugere a linha probabilística ou se o projeto proposto resultou em uma malha bem dimensionada em favor da segurança.

4.2.1 Método determinístico

O projeto de malha escolhido para exemplificar a discussão foi desenvolvido utilizando as diretrizes estabelecidas em [02], além das solicitações técnicas da concessionária proprietária do ativo da subestação chaveadora.

Após as definições dos estudos de viabilidade, escolha do terreno, locação da subestação pelas equipes de projetos eletromecânico e civil, e a execução da terraplanagem do pátio, foi realizada a medição de resistividade do solo conforme [04].

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das medições realizadas pelo método de Wenner. Os valores entre parênteses não foram considerados na modelagem do solo por apresentarem um desvio superior a 50% em relação ao valor médio das medições realizadas. Alguns eixos, identificados na Figura 4.5, não foram verificados por limitação física do espaço da área da subestação.

Eixo	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m
E	3274	1693	924	933	(4011)
C	3561	2040	1249	871	478
D	2765	2017	(600)	(3450)	42,2
X	3287	1441	1340	1805	-
F	4357	(3532)	1758	-	-
B	2017	1345	2015	-	-
A	3926	2728	1864	-	-
Média	3312	1877	1525	1205	262

Tabela 4.1 – Medições para determinação da resistividade ($\Omega.m$)

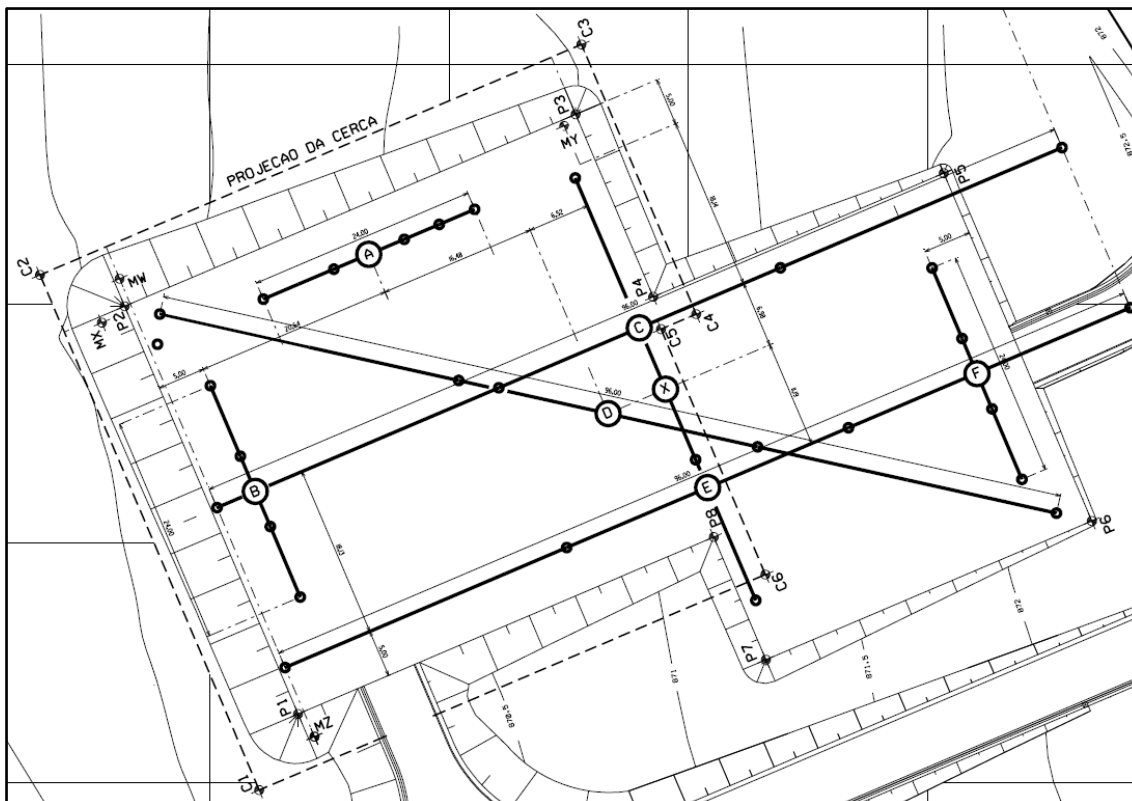


Figura 4.5 – Eixos para medição de resistividade do solo

Utilizando o software Resist [37], obteve-se uma estratificação em duas camadas conforme indicado na Figura 4.6.

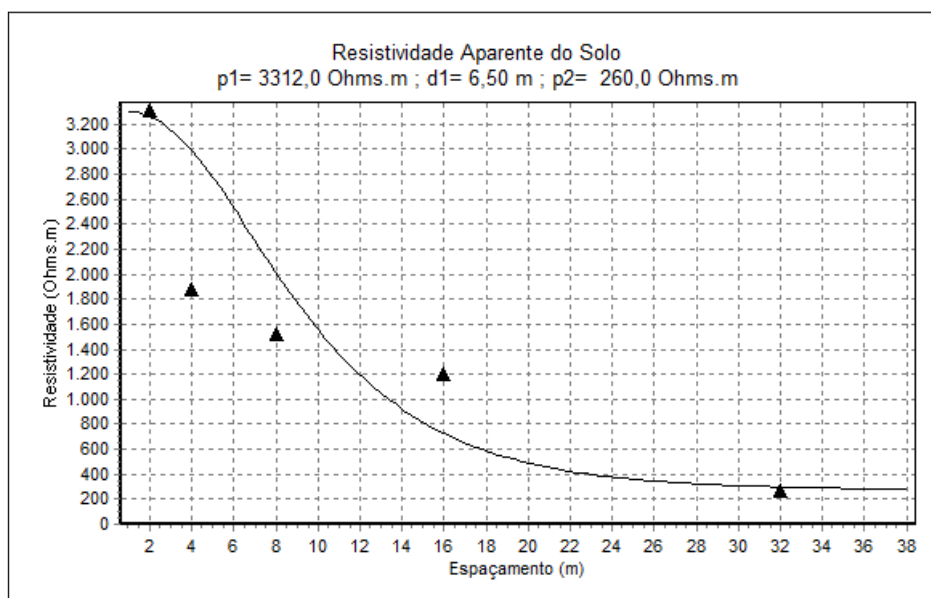


Figura 4.6 – Resistividade aparente do solo gerado pelo software Resist [37]

O Resist [37], apropriado para modelagem da resistividade do solo, utiliza o método de estratificação do solo em duas camadas conforme explicado no item 3.2.3. Além disso, o software também permite a modelagem em três camadas utilizando o Método de Yokogawa descrito em [18].

Para o desenvolvimento do projeto da malha da subestação, foram consideradas as contribuições das duas linhas trifásicas de 138 kV para divisão de corrente. O cálculo da impedância equivalente foi realizado através da metodologia Ladder infinito [39], conforme equação abaixo:

$$Z_{\text{equivalente}} = \frac{Z_l}{2} + \sqrt{\frac{Z_l^2}{4} + Z_l \times R_t}, \quad (4.1)$$

onde:

- R_t – Resistência média de aterramento dos pés dos suportes das torres da linha de distribuição (LD);
- Z_l – Impedância própria do cabo para-raios em Ω por vão.

Para a LD 1 – Interligada a subestação “A”:

- Comprimento do trecho: 37,6 km;
- R_t – Resistência média de aterramento dos pés dos suportes das torres da LD = 60 Ω ;
- R_m – Resistência terminal da SE = 5 Ω ;
- Vão médio: 300 m;
- Número de vãos: 126;
- Número de estruturas: 125;
- Tipo de cabo para-raios: 5/16” HS (duplo);
- Impedância própria Ω /km de dois cabos 5/16” HS:
 $Z_p = 2,2115 + j1,3754 \Omega$ /km;
- Cálculo da impedância equivalente da LD 1 vista da subestação:
 $Z_{\text{eq1}} = 6,9324 + j2,0979 \Omega$ (7,2487 | 16,84 ° Ω).

Para a LD 2 – Interligada a subestação “B”:

- Comprimento do trecho: 32,5 km;
- R_t – Resistência média de aterramento dos pés dos suportes das torres da LD = 60 Ω ;
- R_m – Resistência terminal da SE = 5 Ω ;
- Vão médio: 300 m;
- Número de vãos: 109;
- Número de estruturas: 108;
- Tipo de cabo para-raios: 5/16” HS (duplo);
- Impedância própria Ω /km de dois cabos 5/16” HS:
 $Z_p = 2,2115 + j1,3754 \Omega/\text{km}$;
- Cálculo da impedância equivalente da LD 2 vista da subestação:
 $Z_{eq2} = 6,9339 + j2,0984 \Omega (7,2445 | 16,84^\circ \Omega)$;

O equivalente dos cabos para-raios é então calculado pelo paralelo de Z_{eq1} e Z_{eq2} :

$$Z_{eq1} // Z_{eq2} = 3,4666 + j1,0491 \Omega .$$

Os valores máximos de curtos-circuitos na barra de 138 kV da subestação foram fornecidos pela concessionária através de estudo específico de proteção.

- $I_{cc1\phi} = 2,866 |-69^\circ \text{ kA}$;
- $I_{cc3\phi} = 3,247 |-69^\circ \text{ kA}$.

Sendo assim, antes de verificar o aumento do potencial do sistema de aterramento, tensão de passo e tensão de toque, é necessário calcular a corrente de retorno à terra real, que será uma parcela da corrente total da falta à terra.

Para a análise do surgimento dos potenciais perigosos da subestação, foi considerado o curto-circuito fase-terra de 2,866 kA. A ligação do transformador é estrela nos enrolamentos de 138 e 34,5 kV. No enrolamento de 138 kV o neutro foi

conectado diretamente à malha, já no enrolamento de 34,5 kV o neutro foi conectado à malha via um resistor de aterramento. Portanto, para um curto-circuito fase terra na barra de 138 kV, haverá contribuição das linhas de transmissão das subestações A (0,728 | 133° kA) e de B (0,446 | 116° kA), perfazendo um total de 1,162 kA (1,162 | -53,44° kA).

O curto-circuito fase-terra total na barra é de 2,866 | -69° kA. A diferença do curto-circuito fase-terra total na barra para as contribuições da SE "A" e da SE "B" circulará metalicamente entre o curto-circuito e a bucha "H0" do transformador, não contribuindo para a elevação de potencial de toque e passo da malha, visto que a fonte está dentro da própria subestação.

Para fins de distribuição de corrente, foi considerado o valor de " I_t " igual a 1,162 kA referente à contribuição do sistema da concessionária, que efetivamente retornará às fontes externas pelos caminhos metálicos e a malha de aterramento da subestação conjunta. A corrente " I_m " que circula entre a malha de aterramento (gradeado de cobre) e a terra circunvizinha é determinada por uma divisão de corrente entre o circuito da resistência da malha de aterramento e a impedância equivalente dos cabos para-raios " Z_{eq} ". O valor da resistência da malha " R_m " de 7,14 Ω foi calculada através de simulação no software SE Ground [38].

Nota: o software SE Ground, de acordo com o fabricante, utiliza o método das resistências $[R][I] = [V]$ e considera a distribuição não uniforme de corrente nos elementos que compõe o aterramento. Para análise da matriz utiliza o método de eliminação de Gauss com particionamento da matriz.

$$I_m = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_m} \times I_t$$

$$I_m = \frac{(3,466 + j1,0491)}{(3,4666 + j1,0491) + 7,14} \times 1,162 \text{ kA}$$

$$I_m = \frac{3,6219}{10,7619} \times 1,162 \text{ kA}$$

$$I_m = 391 \text{ A}$$

Para melhor análise, em vez de se avaliar apenas os piores casos de tensão de passo e toque, dados pelas equações tradicionais das normas, foi utilizado o software

SE Ground [38] para simular toda a área da malha a fim de determinar, com maior precisão, as magnitudes de tensão às quais uma pessoa poderá ser submetida em decorrência de uma elevação de potencial da malha.

O valor da corrente considerada para os cálculos de GPR (*Ground Potential Rise*) foi de 450 A (considerando uma margem de expansão). O GPR obtido foi de 3,2 kV.

As tensões de passo e toque máximas admissíveis pelo ser humano foram calculadas de acordo com [02], que destaca que, a corrente máxima de não fibrilação, para 99,5% das pessoas de 50 kg, no intervalo de tempo 0,03 a 3,0 s é dado por $I_{chcd} = 0,116/\sqrt{t}$ (A).

Na elaboração do projeto em questão, adotou-se o tempo de atuação da proteção fornecido pela concessionária de 1,0 s. Foi calculada uma tensão de toque máxima admissível de 638 V considerando a utilização de cobertura de 10 cm de brita no pátio da subestação.

A Figura 4.7 apresenta a geometria básica da malha simulada e os eixos para medição de potenciais perigosos (tensão de toque).

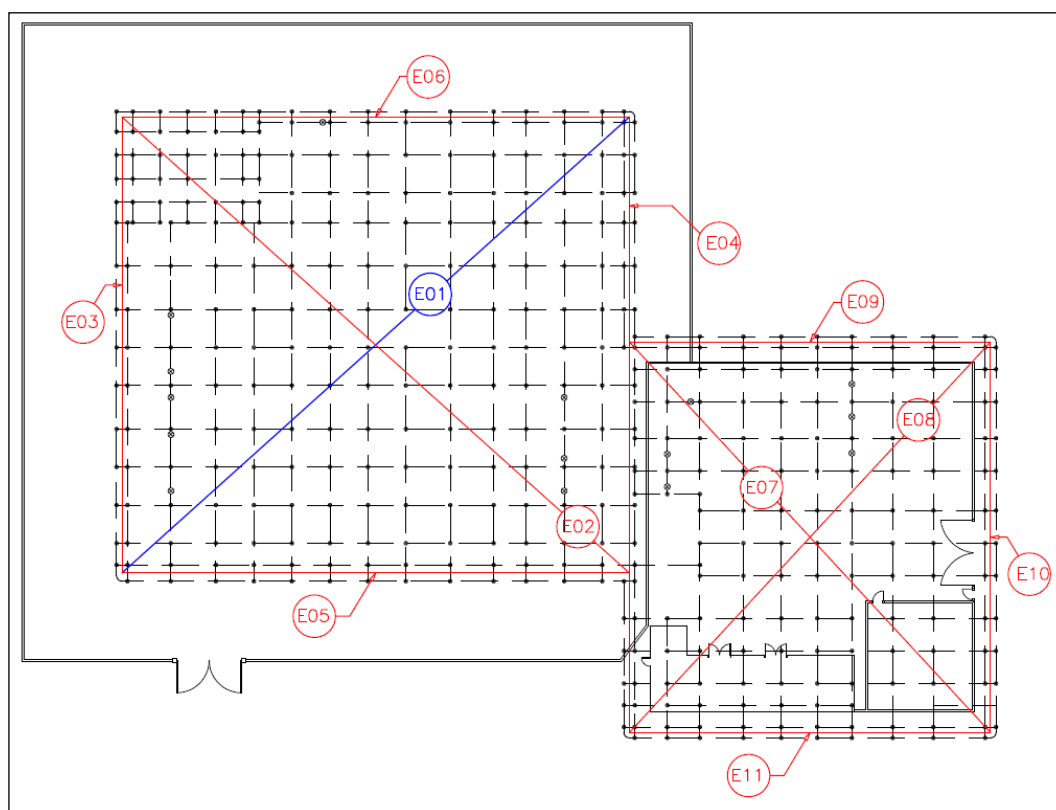


Figura 4.7 – Geometria da malha simulada no software SEGround [38]

Foram traçados diversos eixos para verificação dos potenciais perigosos. Para ilustrar, as Figuras 4.8 a 4.11 apresentam a evolução dos potenciais para os eixos E01, E02, E07 e E08 respectivamente. A linha vermelha indica o valor máximo (638 V) permitido para tensão de toque, considerando o revestimento em brita.

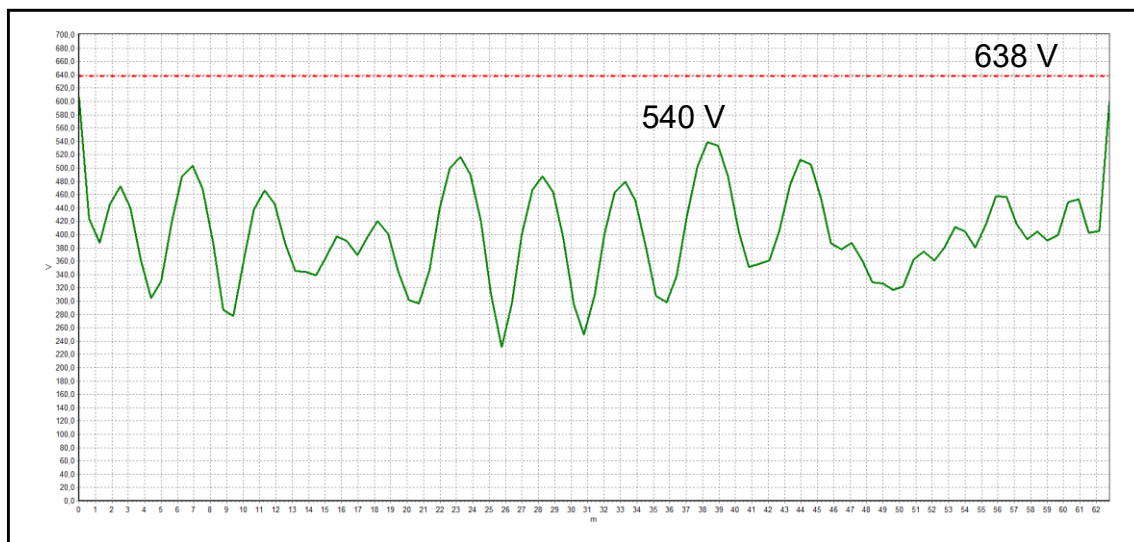


Figura 4.8 – Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 01 da Figura 4.5

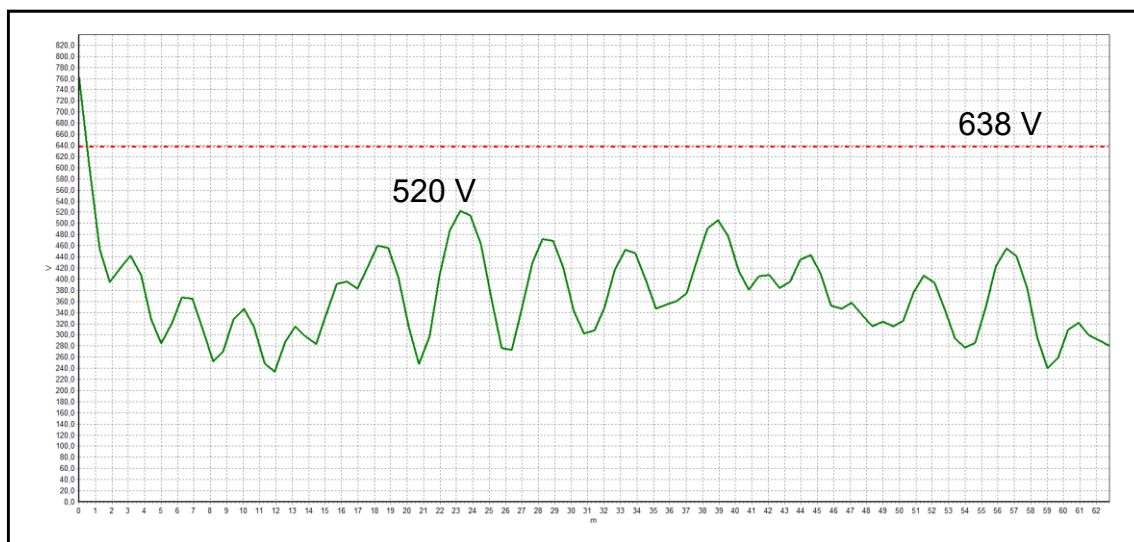


Figura 4.9 – Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 02 da Figura 4.5

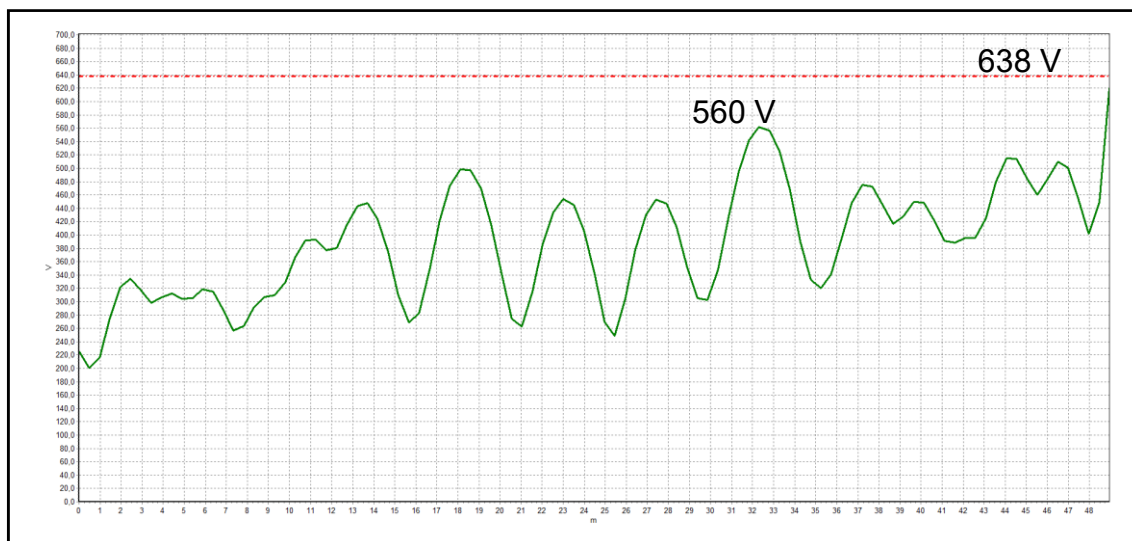


Figura 4.10 – Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 07 da Figura 4.5

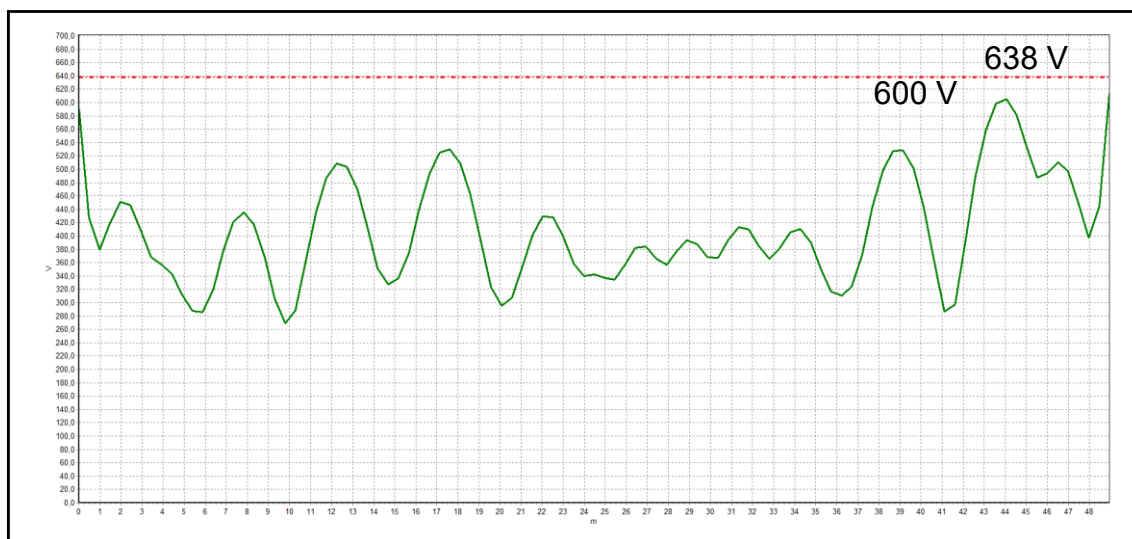


Figura 4.11 – Tensão de toque para corrente de curta-duração para o eixo 08 da Figura 4.5

Os demais eixos, não plotados, também ficaram abaixo do valor de tensão de toque máxima admissível de acordo com a metodologia determinística. É possível observar, que dentro da região da malha de aterramento, onde há risco de tensão de toque, os potenciais ficaram abaixo da tensão máxima permitida. Já na região da periferia da malha, onde não há estrutura ou equipamento, mesmo que a curva verde supere a linha vermelha, não seria uma situação de risco para uma pessoa. Portanto, de acordo com a abordagem determinística, a malha encontra-se adequadamente dimensionada.

4.2.2 Método Probabilístico

Verifica-se a seguir o risco de fatalidade no projeto conforme descrito no item 3.2. É importante destacar que a coleta de dados, sobretudo atrelados a parâmetros comportamentais de equipes de trabalho da subestação ou de terceiros, nem sempre é uma tarefa fácil. Já sobre o desempenho de linhas de transmissão existentes, em alguns casos, é possível obter dados estatísticos com concessionárias proprietárias dos ativos.

Porém, como o intuito do trabalho é identificar o impacto das variáveis consideradas no método probabilístico, um caso base foi estabelecido arbitrariamente e então, os parâmetros envolvidos foram analisados dentro de uma faixa provável de situações.

4.2.2.1 Cálculo da probabilidade de coincidência

No caso base analisado, o operador está usando calçado de segurança e locomovendo-se pelo pátio como parte da rotina de trabalho de inspeção e manutenção de uma subestação. Consequentemente, o operador está próximo de isoladores de pedestais, estruturas de suporte, equipamentos, cercas metálicas e portões de acesso.

Conforme destacado em [07], o comportamento humano é difícil de estimar, por isso uma análise de sensibilidade a partir de um caso base será considerada. A referência [09] apresenta situações possíveis que servem como ponto de partida para se estabelecer o número de contatos/ano e o tempo médio de contato. Os cenários apresentados, que não se aplicam a uma rotina dentro de uma subestação, utilizam uma variação de 10 até 2000 contatos e um tempo médio de contato de 4,0s.

Para o caso base do trabalho, será considerado uma média de 1000 contatos/ano em superfícies aterradas, sendo cada contato com um tempo médio de 4,0 s. Uma investigação mais detalhada poderia verificar a probabilidade de contato específica por região da subestação, sobretudo em equipamentos e estruturas que demandam manutenção mais frequente.

A quantidade de faltas da “LD 1” considerada é de 10 desligamentos/100 km/ano, valor extraído da Tabela 3.6. Para “LD 2”, com intuito

de diminuir a quantidade de variáveis na análise, foi considerado que desempenho da linha não impactará na análise de risco da subestação. Não foi utilizado nenhum fator CRF para redução de coincidência.

É importante destacar que a variação na quantidade de desligamentos que será apresentada no decorrer do trabalho permite ao leitor entender o impacto da contribuição de outros eventos que proporcionam curto-circuito fase-terra. Não cabe aqui aprofundar em dados específicos de desempenho de linha e motivos que levam a ocorrência de curto circuito fase-terra.

Sendo assim, a probabilidade de coincidência foi então calculada:

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

$$P_{\text{coincidência}} = \frac{3,76 \times 1000 \times (1,0 + 4,0) \times 1}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 5,96 \times 10^{-4}$$

A partir do caso base, foram estabelecidos diferentes cenários de simulação. Considerou-se os parâmetros do caso base descrito acima e variou-se o tempo de contato médio (1, 2, 4, 6 e 10 segundos) e a frequência de contatos (10, 100, 1000, 2500 e 5000 contatos/ano). O gráfico da Figura 4.12 apresenta a evolução da probabilidade de coincidência em função da variação da quantidade de contatos por ano e do tempo médio de contato.

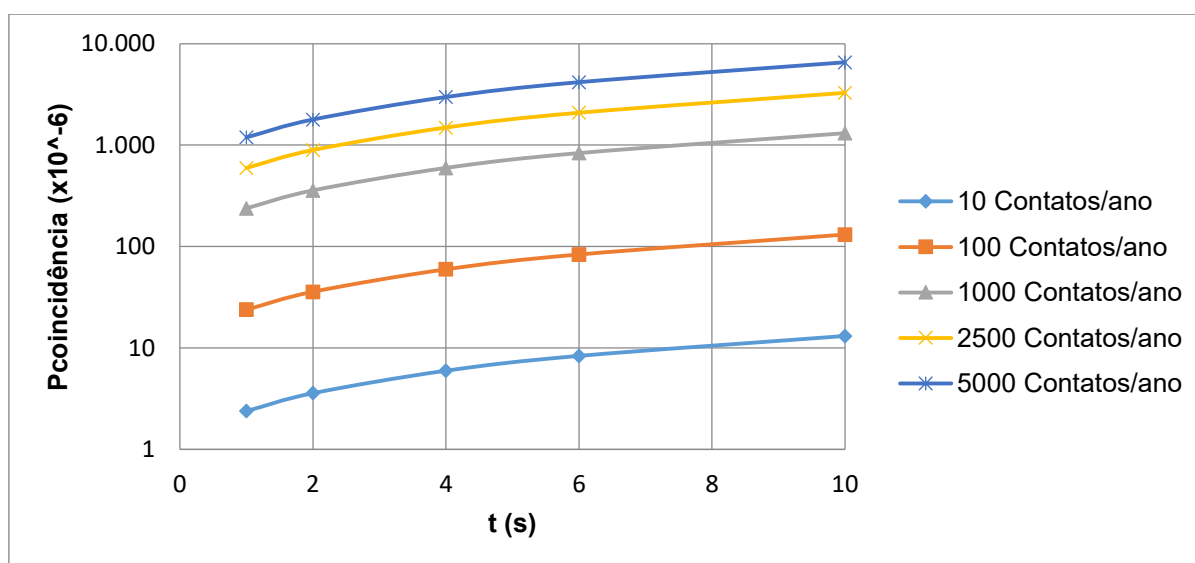


Figura 4.12 – Pcoincidência variando o contato médio e quantidade de contatos por ano

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, foram consideradas variações no tempo de atuação da proteção entre 0,03 e 3,0 s e na quantidade de desligamentos entre 1 e 30 desligamentos / 100 km / ano. O gráfico da Figura 4.13 apresenta a evolução da probabilidade em função da variação dos parâmetros.

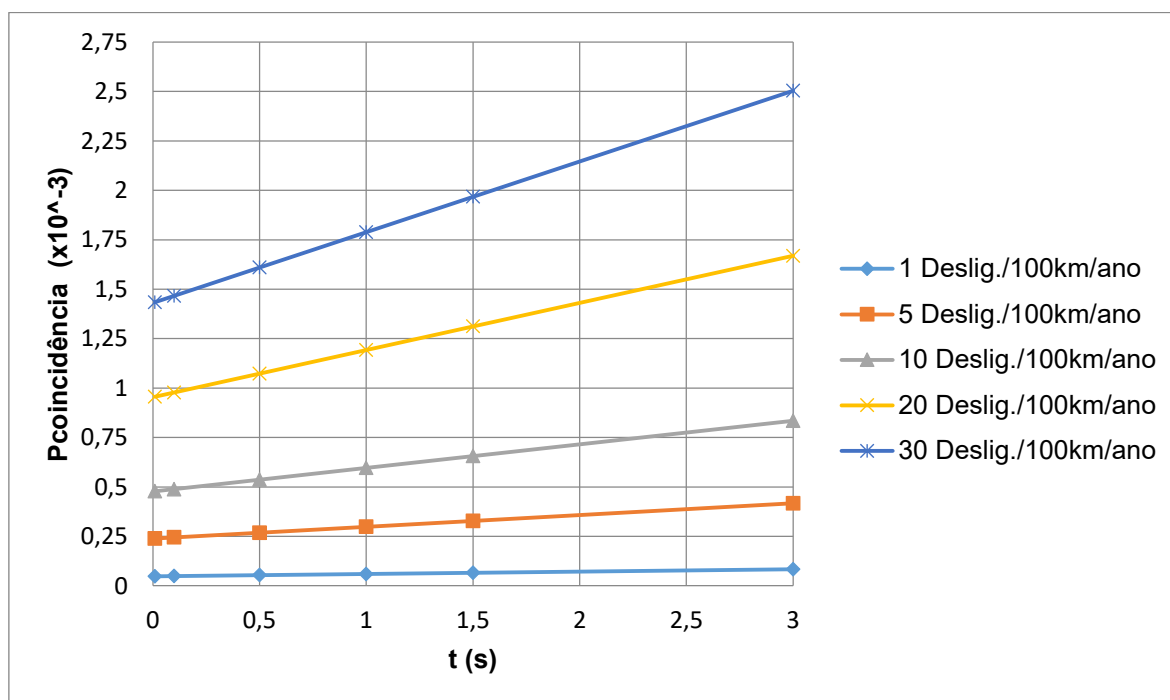


Figura 4.13 – Pcoincidência variando o tempo de proteção e a quantidade de faltas/100km/ano

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. O 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.

4.2.2.2 Cálculo da probabilidade de fibrilação

Em uma situação de análise de risco, quando a probabilidade de coincidência é superior a 10^{-6} , valor este que, conforme indicado na Tabela 3.12, marca o início da região onde o risco deixa de ser tolerável, é necessário que o engenheiro calcule a probabilidade de uma pessoa sofrer uma fibrilação ventricular caso seja submetida a uma diferença de potencial.

Para o caso base, a análise da probabilidade de fibrilação foi feita inicialmente utilizando curvas apresentadas em [09]. Foi considerado a subestação revestida com uma camada de brita com resistividade de 3000 Ω .m.

O valor de $P_{\text{fibrilação}}$ foi extraído do gráfico da Figura 4.14 através do ponto de interseção das retas do tempo de atuação da proteção (eixo “x”) e do valor de tensão aplicado (eixo “y”). No exemplo específico a fibrilação está entre a curva $P=0,35$ e $P=0,08$. Utilizando o software Argon [35], para o valor de segurança de 638 V, obtido no projeto determinístico, o risco quantificado foi de:

$$P_{\text{fibrilação}} = 0,3208$$

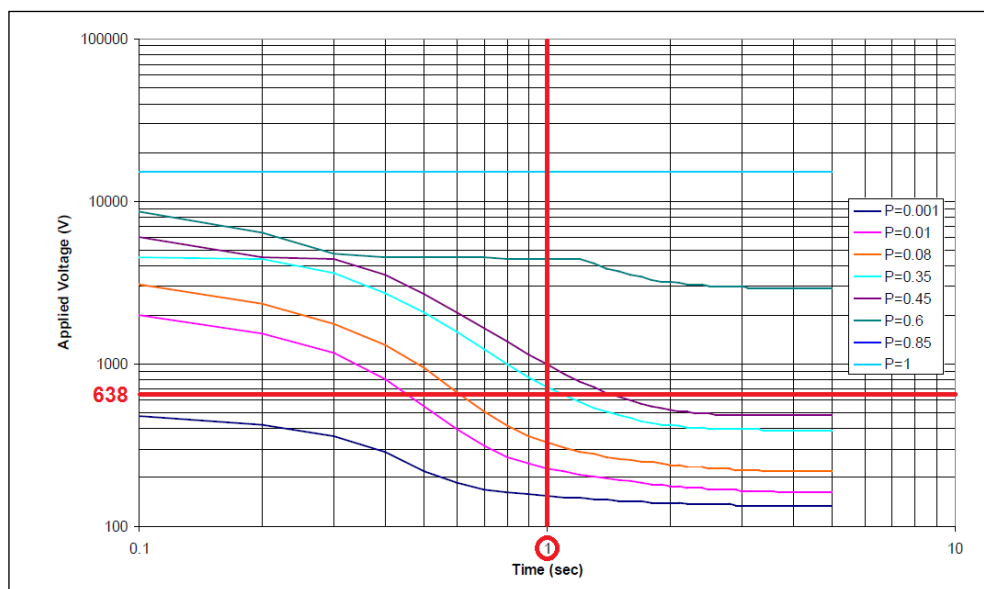


Figura 4.14 – Gráfico $P_{\text{fibrilação}}$ - tempo (s) x tensão aplicada (V). Adaptada de [09]

Ao analisar o desempenho da malha para os diversos eixos definidos na SE, obteve-se de cada gráfico gerado na simulação, o maior valor de diferença de potencial que uma pessoa pode se submeter em cada região da subestação.

A Tabela 4.2 mostra o risco máximo de fibrilação calculado considerando a configuração do caso base aplicada a cada eixo de cálculo apresentado na Figura 4.7. É importante destacar que não há equipamentos ou estruturas na periferia da malha e, portanto, o risco de tensão de toque passa a ser, em muitos casos, desprezível nessa região.

	Eixos	V_{TCD} (V)	P_{fibrilação} (%)
A	04	460	24,62
B	03 e 05	500	26,81
C	02 e 10	520	27,60
D	01	540	28,35
E	06, 07, 09 e 11	560	29,10
F	08	600	30,62
G	Vtoquemax	638	32,08

Tabela 4.2 – P_{fibrilação} máxima para cada eixo considerando configuração do caso base

Conforme explicado no capítulo 3, a probabilidade de fibrilação depende do tempo de exposição do ser humano a uma diferença de potencial. Essa exposição é limitada pelo tempo de atuação de proteção do sistema. Quanto maior o tempo de circulação da corrente, maior a probabilidade de fibrilação ventricular.

Algumas concessionárias, como CHESF [40] e CPFL [41], exigem que a malha de aterramento de subestação de sistema de 138 kV seja projetada considerando o tempo de atuação da proteção de 0,5 s. Porém, empresas como a CEMIG [42] solicitam que seja utilizado em projetos de subestações novas de 138 kV o tempo de 1,0 s. O valor escolhido para o caso base será de 1,0 s, porém, outros valores também serão verificados.

A Tabela 4.3 apresenta novos valores de tensões máximas de toque para diferentes tempos de proteção, considerando um cenário onde a tensão de toque máxima é definida pelo método determinístico. Para cada valor de tempo de atuação da proteção, um valor de tensão de toque máxima foi calculado considerando uma pessoa de 50 kg e uma pessoa de 70 kg. A probabilidade de fibrilação foi calculada para cada cenário hipotético, onde a tensão máxima de segurança é alcançada em função de alguma falta.

t	50 kg		70 kg	
	E _{TCD} (V)	P _{fibrilação} (%)	E _{TCD} (V)	P _{fibrilação} (%)
0,03	3683,5	8,79	4985,4	33,69
0,1	2017,5	1,09	2730,6	3,28
0,5	902,3	6,68	1221,2	17,45
1,0	638,0	32,08	863,5	40,47
1,5	520,9	37,82	705,0	48,72
3,0	368,3	32,20	498,5	46,09

Tabela 4.3 – Pfibrilação para diferentes tensões de toque de segurança em função do tempo de atuação da proteção

É importante destacar que no cálculo da probabilidade de fibrilação, a intensidade da tensão aplicada e o intervalo de tempo em que a corrente circulará pelo corpo humano, contribuem para o cálculo do risco associado. Como pode ser observado, mesmo que o tempo de exposição da vítima seja reduzido consideravelmente, se o valor da tensão aplicada for muito elevado, o risco pode ser até mais severo do que em uma situação onde o tempo de exposição é maior e o valor da tensão aplicada é menor.

Na condição de 70 kg, onde o tempo de proteção considerado foi de 0,03 s, o risco foi de 33,69 %. Praticamente dez vezes maior do que o segundo cenário onde o tempo de atuação da proteção considerado foi de 0,1 s e o risco calculado foi de 3,28%. Essa mesma situação ocorre entre os tempos de atuação de fibrilação de 1,5 s e 3,0 s, onde o risco de fibrilação do primeiro cenário, devido ao maior valor de tensão aplicado, é maior do que o segundo cenário.

Na sequência, são apresentadas as probabilidades de fibrilação associadas para cada eixo do projeto em função da variação do tempo de atuação de proteção. A Tabela 4.4 sintetiza os resultados:

Eixos		Pfibrilação (%)						
		V _{TCD} (V)	Tempo de atuação da proteção (s)					
			0,03	0,1	0,5	1,0	1,5	3,0
A	04	460	0,0902	0,0991	0,44	24,62	33,37	42,23
B	03 e 05	500	0,0995	0,0999	0,71	26,81	36,32	46,21
C	02 e 10	520	0,0999	0,0999	0,84	27,60	37,76	47,64
D	01	540	0,0999	0,0999	0,97	28,35	39,17	48,65
E	06, 07, 09 e 11	560	0,0999	0,0999	1,10	29,10	40,58	49,35
F	08	600	0,0999	0,1000	1,36	30,62	43,40	49,94

Tabela 4.4 – Pfibrilação máxima para diferentes eixos, valores de tensão de toque e tempos de atuação da proteção

O gráfico da Figura 4.15 apresenta a evolução da probabilidade de fibrilação para cada eixo em função do aumento do tempo de resposta do sistema de proteção. É possível perceber um aumento mais acentuado quando o tempo de atuação da proteção varia entre 0,5 e 1,0 s. Entre 1,0 e 3,0 s o risco continua aumentando, porém, com uma menor inclinação. Quando a proteção atua abaixo de 0,5 segundo o risco fica mais próximo de zero.

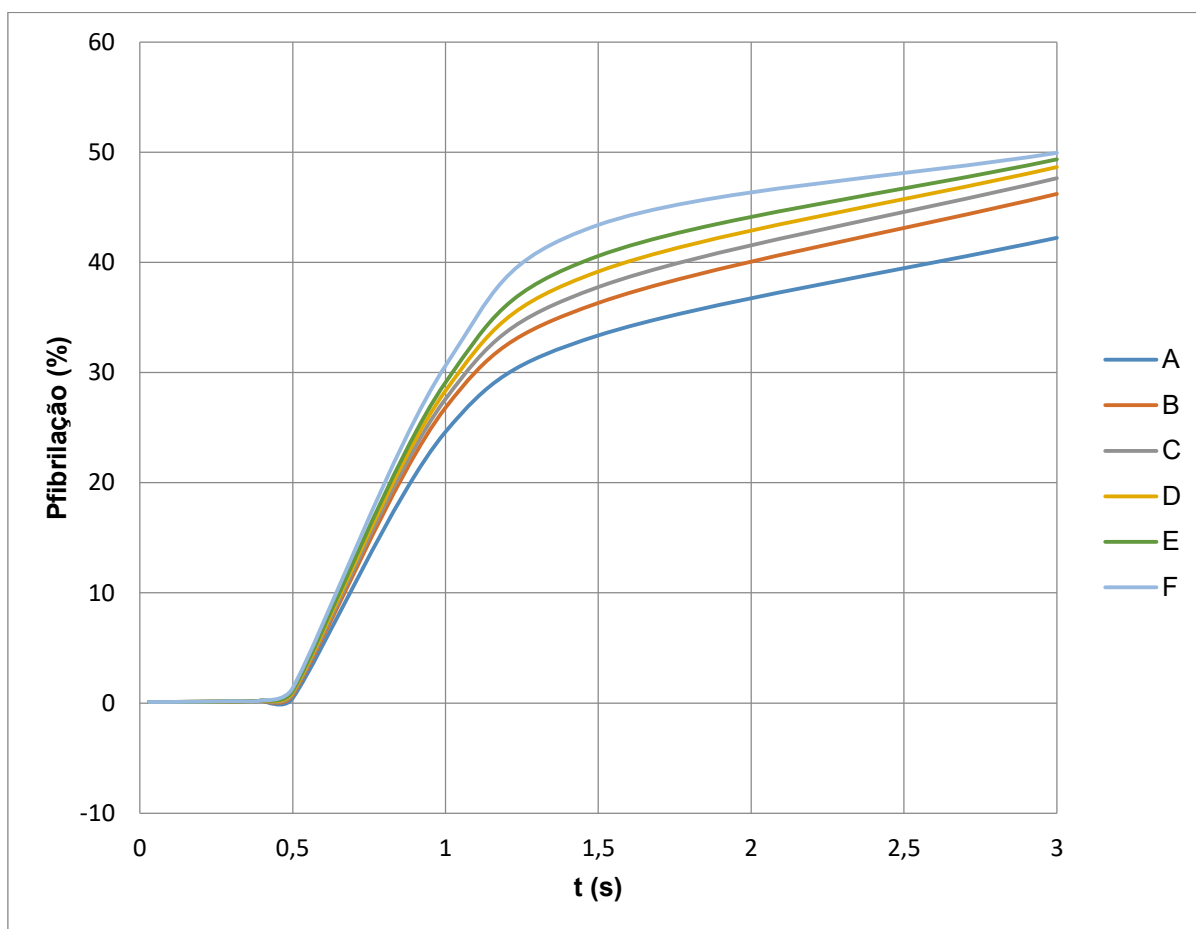


Figura 4.15 – Pfibrilação para diferentes tensões de toque de segurança em função do tempo de atuação da proteção

As curvas A, B, C, D, E e F se comportam da mesma maneira. O risco de fibrilação cresce em função do aumento do valor de tensão aplicado. No caso específico, entre o menor valor de tensão aplicada (curva A) e o maior valor de tensão aplicado (curva F) há uma diferença de 140 V. No tempo de 1 s, a probabilidade de fibrilação da curva F é 24% maior do que a curva A. Em 1,5 s essa diferença chega a 30%.

4.2.2.3 Cálculo da probabilidade de fatalidade

Conforme descrito no item 3.3.1, a probabilidade de fatalidade é definida pelo produto da probabilidade de coincidência pela probabilidade de fibrilação. Na prática, é o risco de uma pessoa estar em contato com um ativo aterrado durante uma falta e, conseqüentemente, sofrer uma fibrilação ventricular.

Para cada cenário simulado nos itens anteriores, uma probabilidade de fatalidade foi calculada. Esse valor foi então analisado de acordo com as três regiões definidas na tabela 3.12, sendo elas, a região de risco alto ou intolerável ($\geq 10^{-4}$), região intermediária ($10^{-4} \leq x \leq 10^{-6}$) e região de risco baixo ou tolerável ($\leq 10^{-6}$).

As probabilidades de fibrilação de cada eixo da subestação apresentadas na Tabela 4.2 foram analisadas considerando as diferentes probabilidades de coincidência conforme gráfico apresentado na Figura 4.12. Para cada eixo, foi selecionado o valor máximo de tensão e calculado a probabilidade de fibrilação. Na probabilidade de coincidência, foi considerado o caso base, variando apenas o número de contatos por ano e o tempo médio de contato.

As Tabelas 4.5 a 4.11 apresentam a probabilidade de fatalidade para cada valor de tensão máximo aplicado em um cenário distinto. Os resultados identificados em verde apresentam uma condição de segurança satisfatória, resultados em azul estão na região onde cabe uma abordagem aprofundada para mitigação do risco e os resultados em amarelo estão na região onde o risco é intolerável.

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 460 V					
p _d – Contato médio (s)	p _n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	5,87E-07	5,87E-06	5,87E-05	1,47E-04	2,94E-04
2 s	8,81E-07	8,81E-06	8,81E-05	2,20E-04	4,40E-04
4 s	1,47E-06	1,47E-05	1,47E-04	3,67E-04	7,34E-04
6 s	2,05E-06	2,05E-05	2,05E-04	5,14E-04	1,03E-03
10 s	3,23E-06	3,23E-05	3,23E-04	8,07E-04	1,61E-03

Tabela 4.5 – Pfatalidade para Vapl 460 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 500 V					
p_d – Contato médio (s)	p_n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	6,39E-07	6,39E-06	6,39E-05	1,60E-04	3,20E-04
2 s	9,59E-07	9,59E-06	9,59E-05	2,40E-04	4,79E-04
4 s	1,60E-06	1,60E-05	1,60E-04	4,00E-04	7,99E-04
6 s	2,24E-06	2,24E-05	2,24E-04	5,59E-04	1,12E-03
10 s	3,52E-06	3,52E-05	3,52E-04	8,79E-04	1,76E-03

Tabela 4.6 – Pfatalidade para Vapl 500 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 520 V					
p_d – Contato médio (s)	p_n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	6,58E-07	6,58E-06	6,58E-05	1,65E-04	3,29E-04
2 s	9,87E-07	9,87E-06	9,87E-05	2,47E-04	4,94E-04
4 s	1,65E-06	1,65E-05	1,65E-04	4,11E-04	8,23E-04
6 s	2,30E-06	2,30E-05	2,30E-04	5,76E-04	1,15E-03
10 s	3,62E-06	3,62E-05	3,62E-04	9,05E-04	1,81E-03

Tabela 4.7 – Pfatalidade para Vapl 520 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 540 V					
p_d – Contato médio (s)	p_n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	6,76E-07	6,76E-06	6,76E-05	1,69E-04	3,38E-04
2 s	1,01E-06	1,01E-05	1,01E-04	2,54E-04	5,07E-04
4 s	1,69E-06	1,69E-05	1,69E-04	4,23E-04	8,45E-04
6 s	2,37E-06	2,37E-05	2,37E-04	5,92E-04	1,18E-03
10 s	3,72E-06	3,72E-05	3,72E-04	9,30E-04	1,86E-03

Tabela 4.8 – Pfatalidade para Vapl 540 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 560 V					
p_d – Contato médio (s)	p_n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	6,94E-07	6,94E-06	6,94E-05	1,73E-04	3,47E-04
2 s	1,04E-06	1,04E-05	1,04E-04	2,60E-04	5,20E-04
4 s	1,73E-06	1,73E-05	1,73E-04	4,34E-04	8,67E-04
6 s	2,43E-06	2,43E-05	2,43E-04	6,07E-04	1,21E-03
10 s	3,82E-06	3,82E-05	3,82E-04	9,54E-04	1,91E-03

Tabela 4.9 – Pfatalidade para Vapl 560 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 600 V					
p _d – Contato médio (s)	p _n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	7,30E-07	7,30E-06	7,30E-05	1,83E-04	3,65E-04
2 s	1,10E-06	1,10E-05	1,10E-04	2,74E-04	5,48E-04
4 s	1,83E-06	1,83E-05	1,83E-04	4,56E-04	9,13E-04
6 s	2,56E-06	2,56E-05	2,56E-04	6,39E-04	1,28E-03
10 s	4,02E-06	4,02E-05	4,02E-04	1,00E-03	2,01E-03

Tabela 4.10 – Pfatalidade para Vapl 600 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade – Vapl = 638 V					
p _d – Contato médio (s)	p _n – Contatos / ano				
	10	100	1000	2500	5000
1 s	7,65E-07	7,65E-06	7,65E-05	1,91E-04	3,82E-04
2 s	1,15E-06	1,15E-05	1,15E-04	2,87E-04	5,74E-04
4 s	1,91E-06	1,91E-05	1,91E-04	4,78E-04	9,56E-04
6 s	2,68E-06	2,68E-05	2,68E-04	6,69E-04	1,34E-03
10 s	4,21E-06	4,21E-05	4,21E-04	1,05E-03	2,10E-03

Tabela 4.11 – Pfatalidade para Vapl 638 V, t = 1s e 10 Desligamentos / 100 km / ano

A partir dos resultados, é possível perceber que apenas a coluna relativa a 10 contatos/ano apresentou situações em que o risco de fatalidade pode ser considerado aceitável. A medida que a tensão aplicada na análise aumenta, o risco também aumenta em todas as combinações. Situações onde a quantidade de contatos/ano é acima de 1000, o risco associado é praticamente inaceitável para os valores de tensões desenvolvidos na subestação em função de uma solicitação do sistema de aterramento.

Na tabela 4.11, onde o valor de tensão utilizado na análise é a máxima tensão de toque permitida pelo método determinístico, é possível verificar que dos 25 cenários simulados, apenas um apresentou uma probabilidade de fatalidade tolerável, 10 situações demandariam medidas adicionais de análise e controle para minimizar o risco e 14 situações estão dentro da faixa onde a probabilidade de fatalidade é inaceitável.

Numa segunda análise, foram calculadas diversas probabilidades de fatalidade considerando os valores máximos de tensão encontrados nos eixos simulados para diferentes cenários de faltas / 100 km / ano e tempos de atuação da proteção. As tabelas 4.12 a 4.16 apresentam os resultados:

Probabilidade de fatalidade					
t proteção (s)	1 Desligamento / km 100 / ano				
	460 V	500 V	540 V	560 V	600 V
0,03 s	4,31E-08	4,76E-08	4,78E-08	4,78E-08	4,78E-08
0,1 s	4,84E-08	4,88E-08	4,88E-08	4,88E-08	4,89E-08
0,5 s	2,36E-07	3,81E-07	5,20E-07	5,90E-07	7,30E-07
1,0 s	1,47E-05	1,60E-05	1,69E-05	1,73E-05	1,83E-05
1,5 s	2,19E-05	2,38E-05	2,57E-05	2,66E-05	2,85E-05
3,0 s	3,52E-05	3,86E-05	4,06E-05	4,12E-05	4,17E-05

Tabela 4.12 – Pfatalidade para 1 Desligamento / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade					
t proteção (s)	5 Desligamentos / 100 km / ano				
	460 V	500 V	540 V	560 V	600 V
0,03 s	2,16E-07	2,38E-07	2,39E-07	2,39E-07	2,39E-07
0,1 s	2,42E-07	2,44E-07	2,44E-07	2,44E-07	2,44E-07
0,5 s	1,18E-06	1,90E-06	2,60E-06	2,95E-06	3,65E-06
1,0 s	7,34E-05	7,99E-05	8,45E-05	8,67E-05	9,13E-05
1,5 s	1,09E-04	1,19E-04	1,28E-04	1,33E-04	1,42E-04
3,0 s	1,76E-04	1,93E-04	2,03E-04	2,06E-04	2,08E-04

Tabela 4.13 – Pfatalidade para 5 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade					
t proteção (s)	10 Desligamentos / 100 km / ano				
	460 V	500 V	540 V	560 V	600 V
0,03 s	4,31E-07	4,76E-07	4,78E-07	4,78E-07	4,78E-07
0,1 s	4,84E-07	4,88E-07	4,88E-07	4,88E-07	4,89E-07
0,5 s	2,36E-06	3,81E-06	5,20E-06	5,90E-06	7,30E-06
1,0 s	1,47E-04	1,60E-04	1,69E-04	1,73E-04	1,83E-04
1,5 s	2,19E-04	2,38E-04	2,57E-04	2,66E-04	2,85E-04
3,0 s	3,52E-04	3,86E-04	4,06E-04	4,12E-04	4,17E-04

Tabela 4.14 – Pfatalidade para 10 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade					
t proteção (s)	20 Desligamentos / 100 km / ano				
	460 V	500 V	540 V	560 V	600 V
0,03 s	8,63E-07	9,51E-07	9,55E-07	9,55E-07	9,55E-07
0,1 s	9,69E-07	9,77E-07	9,77E-07	9,77E-07	9,78E-07
0,5 s	4,72E-06	7,62E-06	1,04E-05	1,18E-05	1,46E-05
1,0 s	2,94E-04	3,20E-04	3,38E-04	3,47E-04	3,65E-04
1,5 s	4,38E-04	4,76E-04	5,14E-04	5,32E-04	5,69E-04
3,0 s	7,05E-04	7,71E-04	8,12E-04	8,24E-04	8,34E-04

Tabela 4.15 – Pfatalidade para 20 Desligamentos / 100 km / ano

Probabilidade de fatalidade					
t proteção (s)	30 Desligamentos / 100 km / ano				
	460 V	500 V	540 V	560 V	600 V
0,03 s	1,29E-06	1,43E-06	1,43E-06	1,43E-06	1,43E-06
0,1 s	1,45E-06	1,47E-06	1,47E-06	1,47E-06	1,47E-06
0,5 s	7,08E-06	1,14E-05	1,56E-05	1,77E-05	2,19E-05
1,0 s	4,40E-04	4,79E-04	5,07E-04	5,20E-04	5,48E-04
1,5 s	6,56E-04	7,15E-04	7,71E-04	7,98E-04	8,54E-04
3,0 s	1,06E-03	1,16E-03	1,22E-03	1,24E-03	1,25E-03

Tabela 4.16 – Pfatalidade para 30 Desligamentos / 100 km / ano

Por se tratar de uma malha de aterramento com distância entre condutores praticamente homogênea, os potenciais máximos desenvolvidos ao longo da malha foram relativamente próximos, com uma variação entre 460 V e 600 V. Portanto, dentro de um determinado tempo de atuação da proteção, não há uma variação significativa entre os riscos desenvolvidos para cada eixo. A principal diferença observada é no aumento da probabilidade de fatalidade em função do aumento do tempo de atuação da proteção e na piora no desempenho da linha.

Se a subestação apresentar o tempo de atuação da proteção em 0,5 s e apenas 1 desligamento/100 km/ ano a probabilidade de fatalidade será satisfatória. Caso a quantidade de desligamentos chegue ao valor de 5 desligamentos/100 km/ano a probabilidade de fatalidade ainda estaria baixa, apesar de começar a entrar numa região intermediária de análise.

Uma constatação importante, é que o tempo de atuação em 1,0 s pode gerar uma probabilidade de fatalidade inaceitável dependendo do desempenho da linha.

4.3 Subestação Existente – Aumento de curto-circuito

Uma aplicação interessante para a metodologia probabilística é a verificação da superação de ativos. Como destacado em [05], a principal causa de superação da malha é o aumento do nível de curto-circuito da instalação que pode gerar elevação nas tensões de passo e toque acima dos valores de segurança no pátio e na região circunvizinha da subestação.

Todo aumento de curto-circuito de uma subestação ocasionado pela mudança de topologia do sistema, como por exemplo a entrada de uma fonte próxima, demanda uma reavaliação no cálculo de distribuição de corrente para apurar o valor da corrente que irá fluir pela malha de aterramento da subestação.

Em alguns casos, a mudança de topologia do sistema gera aumento no nível de curto-circuito na SE, mas também traz o benefício do surgimento de novos caminhos para escoamento da corrente, como por exemplo a entrada de novas linhas de transmissão com cabos para-raios de baixa impedância. Sendo assim, a corrente de malha não irá acompanhar proporcionalmente o aumento da corrente de curto-circuito da instalação.

Caso não haja alteração nas impedâncias envolvidas no sistema de aterramento e a corrente que circulará pela malha aumentar, o GPR e, conseqüentemente, os potenciais perigosos envolvidos, também irão aumentar proporcionalmente. Porém, o risco de fibrilação associado a elevação do curto-circuito não será proporcional a esse aumento.

Para exemplificar, a mesma subestação do item 4.2 foi utilizada na análise. A Figura 4.16 mostra os potenciais desenvolvidos para tensão de toque em função de uma corrente injetada de 450 A. Na Figura 4.17 a corrente injetada na malha foi de 900 A. A linha tracejada na cor vermelha, indicando o valor de 638 V, determina a tensão de toque máxima admissível pelo método determinístico.

O potencial desenvolvido ao longo do eixo hipotético traçado na subestação, conforme o esperado, dobrou de valor em relação ao aumento da corrente.

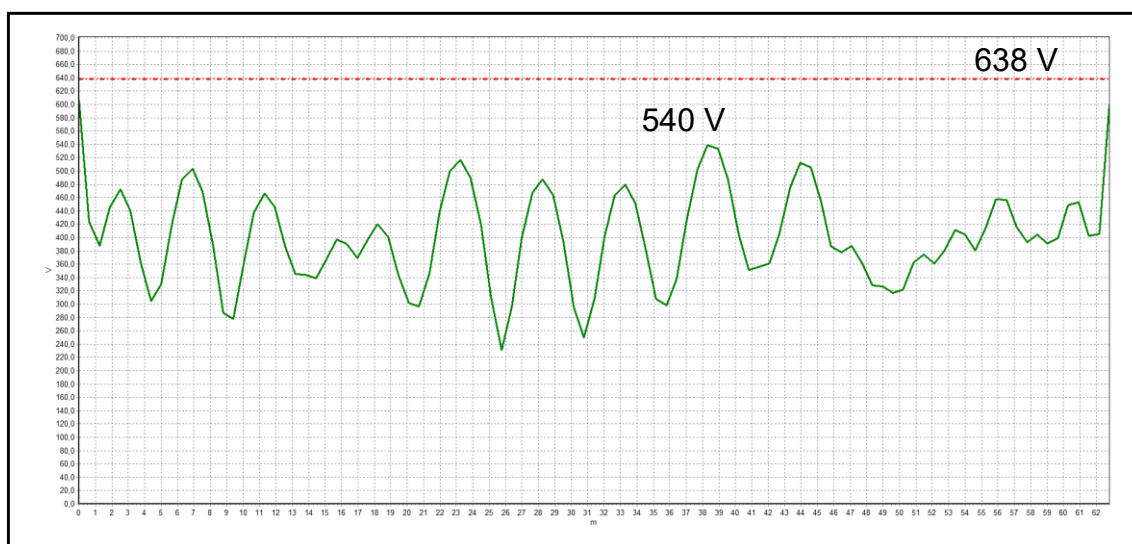


Figura 4.16 – Tensão de toque para uma corrente de malha de 450 A

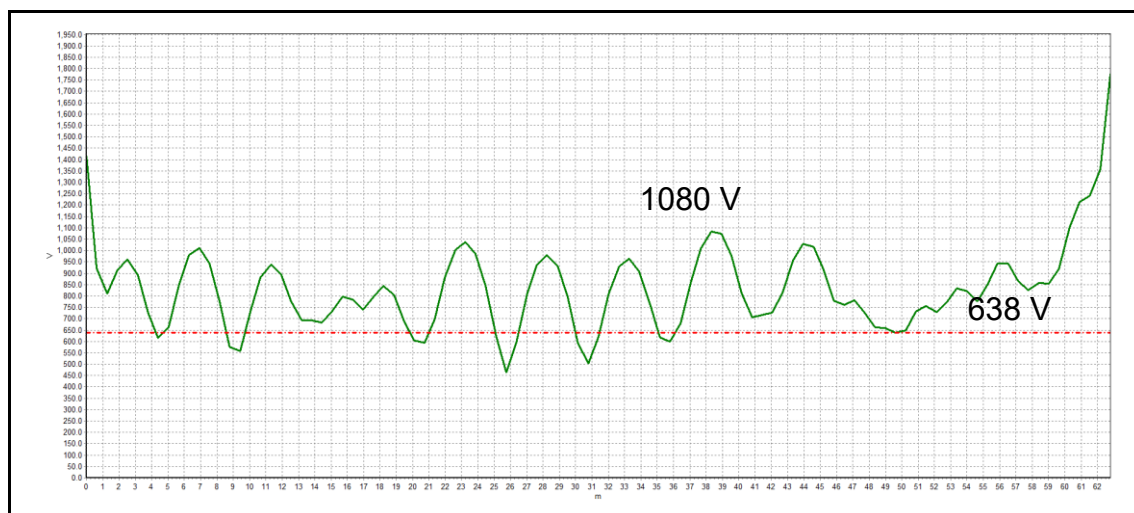


Figura 4.17 – Tensão de toque para uma corrente de malha de 900 A

A Tabela 4.17 apresenta o cálculo da probabilidade de fibrilação para tensão de toque em função do aumento da corrente de malha. No cenário escolhido para análise o tempo de atuação da proteção é de 1,0 s e a vítima está utilizando calçado de segurança.

Im (A)	Vapl (V)	Pfibrilação (%)	Im (A)	Vapl (V)	Pfibrilação (%)
135	162	0,14	765	918	42,47
180	216	0,72	810	972	44,42
225	270	2,28	855	1026	46,22
270	324	7,39	900	1080	47,69
315	378	14,69	945	1134	48,74
360	432	21,84	990	1188	49,47
405	486	26,21	1035	1242	49,88
450	540	28,35	1080	1296	50,03
495	594	30,40	1125	1350	50,07
540	648	32,46	1170	1404	50,07
585	702	34,54	1215	1458	50,08
630	756	36,53	1260	1512	50,12
675	810	38,51	1305	1566	50,17
720	864	40,49	1350	1620	50,22

Tabela 4.17 – Pfibrilação em função do aumento de corrente de malha

A Figura 4.18 sintetiza a evolução do risco de fibrilação em função da variação da corrente que circulará pela malha. Numa análise determinística, caso haja o aumento de curto-circuito, o engenheiro apenas verificaria se os potenciais desenvolvidos estariam abaixo da tensão máxima permitida. Mas ao analisar o risco, é possível perceber que a elevação do curto pode implicar num aumento significativo do risco.

Quando a corrente de curto-circuito passa de 225 A para 450 A, o risco de fibrilação aumenta em aproximadamente 12 vezes. Porém, caso a corrente dobre novamente de valor e passe para 900 A, o risco aumenta apenas 1,6 vezes.

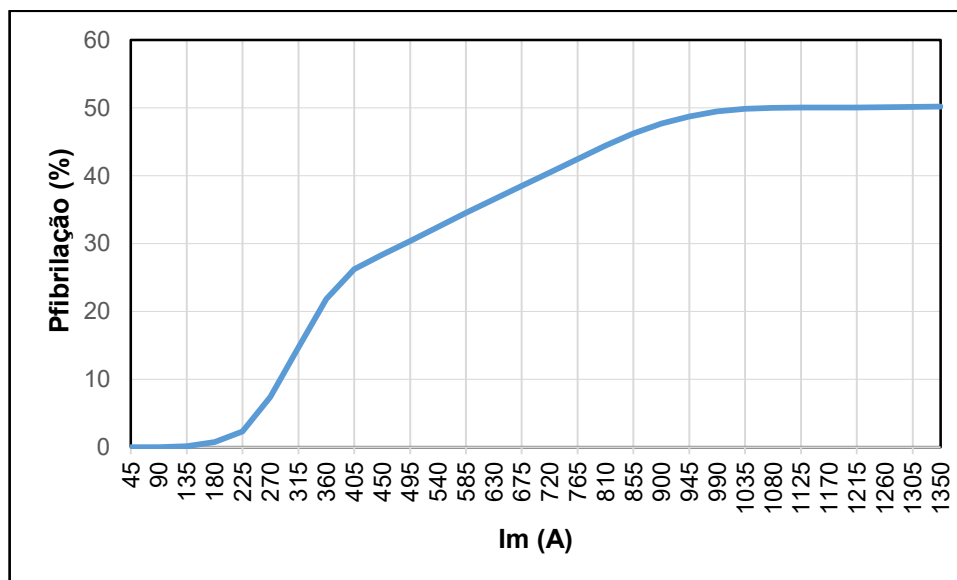


Figura 4.18 – Pfibrilação em função do aumento da corrente de malha

Sendo assim, em uma análise probabilística é possível identificar melhor o impacto que irá trazer um aumento do curto-circuito da subestação em relação aos riscos associados ao sistema de aterramento.

4.4 Análises de parâmetros típicos de subestações de 138 kV

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. O autor teve acesso a esses documentos durante sua vida profissional como engenheiro projetista de subestações. É importante destacar 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 tensões de passo e toque. Portanto, as malhas aqui analisadas atendiam aos critérios estabelecidos pelas normas vigentes da época em que foram elaboradas.

As Tabelas 4.18 e 4.19 apresentam, de forma resumida, os dados extraídos das memórias de cálculos analisadas, sendo:

- ρ_1 – Resistividade da primeira camada do solo ($\Omega.m$);
- ρ_2 – Resistividade da segunda camada do solo ($\Omega.m$);
- ρ_a – Resistividade aparente do solo ($\Omega.m$);
- h – Espessura da primeira camada de solo (m);
- h_s – Espessura da camada de revestimento superficial (m);
- R_M – Resistência da malha [Ω];
- I_M – Corrente injetada na malha (A);
- GPR – Elevação de potencial da malha (V);
- E_{TCD} – Máxima tensão de toque permissível para corrente de curta duração (V);
- E_{PCD} – Máxima tensão de passo permissível para corrente de curta duração (V);
- V_{TCD} – Tensão de toque desenvolvida para corrente de curta duração (V);
- V_{PCD} – Tensão de passo desenvolvida para corrente de curta duração (V).

Subestação	Data	ρ_a	ρ_1	ρ_2	h	h_s	R_M	I_M
		($\Omega.m$)	($\Omega.m$)	($\Omega.m$)	(m)	(m)	[Ω]	(A)
01	03/10/18	134	157	83	9,3	0,10	1,21	3320
02	30/09/12	258	430	115	3,0	0,07	0,90	1170
03	21/10/19	473	270	1181	2,8	0,10	8,21	1300
04	25/05/20	486	360	705	4,20	0,06	3,57	660
05	20/06/12	771	3855	330	7,5	0,06	7,30	158
06	19/10/17	1440	3200	300	2,5	0,07	6,04	800
07	22/12/11	1530	1275	1630	1,6	0,10	9,10	370
08	20/02/19	1740	2485	250	10,5	0,07	6,85	510
09	12/03/13	1740	3000	300	7,3	0,07	3,90	710
10	22/06/12	1890	3150	1150	2,4	0,07	9,20	220
11	15/07/18	2000	2000	X	X	0,07	7,01	850
12	02/05/18	2085	2780	560	12,0	0,10	15,66	506
13	15/03/12	2863	4404	832	9,6	0,06	10,3	640
14	06/06/19	2891	5256	1216	3,25	0,07	5,10	360
15	11/07/17	3000	3000	X	X	0,10	13,37	1000

Tabela 4.18 – Dados de projetos de aterramento de subestações de Minas Gerais
(Resistividade do solo, resistência de malha e corrente de malha).

Em todos os documentos, o tempo de atuação da proteção considerado foi de 1,0 segundo e o revestimento da primeira camada do pátio foi a brita. Os solos das

subestações foram estratificados em duas camadas, exceto nas subestações 11 e 15 onde os solos foram considerados do tipo homogêneo.

Na Tabela 4.19, os valores identificados com um asterisco (*) nas colunas " E_{TCD} " e " E_{PCD} " foram calculados considerando o fator de 0,157, 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. Os valores identificados com dois asteriscos (**) na coluna " E_{PCD} " foram calculados considerando uma região de solo natural, ou seja, sem aplicação do revestimento da brita. Nas colunas " V_{TCD} " e " V_{PCD} " os valores indicados referem-se aos máximos potenciais de toque e passo desenvolvidos nas simulações encontradas nas memórias de cálculo.

Subestação	GPR (V)	E_{TCD} (V)	V_{TCD} (V)	E_{PCD} (V)	V_{PCD} (V)
01	4010	484	430	1587	480
02	1050	465	230	415 **	140
03	10680	495	460	1621	480
04	2350	433	270	367 **	260
05	1150	638	250	2204	220
06	4834	525	430	1752	500
07	3320	544	400	1003	250
08	3470	608	550	1845	580
09	2740	864 *	640	2983 *	550
10	1980	638	480	2204	250
11	5720	578	520	1508	480
12	7922	629	620	2167	1180
13	6600	836 *	830	3181 *	1000
14	1820	864 *	860	3774 *	500
15	13370	638	620	2204	900

Tabela 4.19 – Dados de projetos de aterramento de subestações de Minas Gerais
(GPR, potenciais de toque e passo máximos permitidos e desenvolvidos)

Para cada valor de tensão de toque e tensão de passo máximo desenvolvido para corrente de curta duração, foi calculada a probabilidade de fibrilação utilizando o software Argon [35]. O tempo de atuação da proteção utilizado no cálculo foi de 1,0 s e foi considerado que a vítima utilizava calçado convencional pisando em solo natural. A Figura 4.19 apresenta os resultados para tensão de toque máxima desenvolvida.

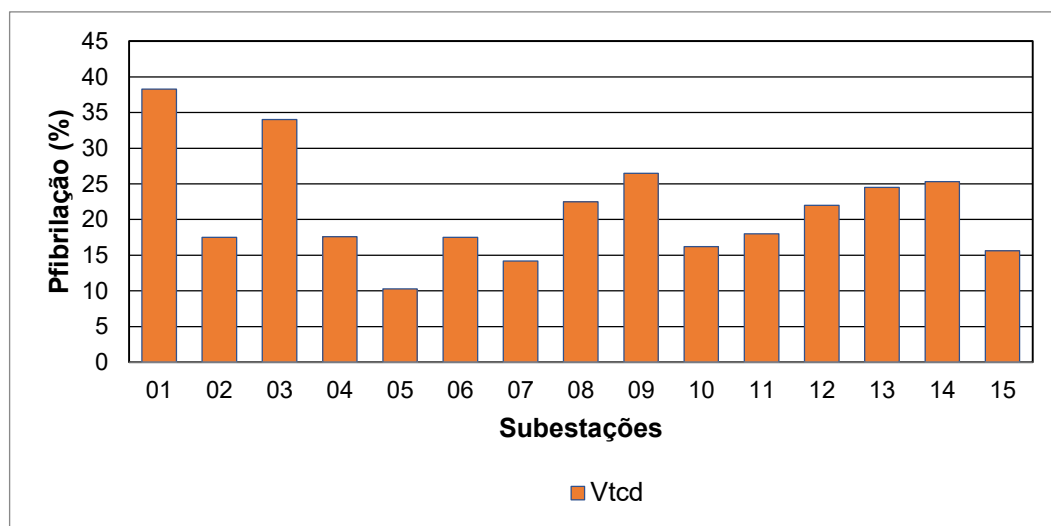


Figura 4.19 – Pfibrilação para valor de máxima tensão de toque desenvolvida para I_{CHCD} .

Devido ao tempo de atuação da proteção utilizado ser lento, as probabilidades de fibrilações associadas ficaram elevadas. A SE 01, que possui um solo de baixa resistividade e alto valor de tensão de toque desenvolvido, apresentou a pior probabilidade de fibrilação com o valor de 38,3 %.

Ao analisar a tensão de passo, foi identificado que só há risco de fibrilação em situações onde o solo apresenta baixa resistividade e a tensão aplicada é superior a 900 V. O risco de fibrilação foi desprezível em todos os casos simulados, portanto, o resultado obtido foi de 0% para as subestações listadas.

A Figura 4.20 apresenta o risco de fibrilação considerando uma situação hipotética de elevação de potencial até o valor máximo permitido no cálculo determinístico.

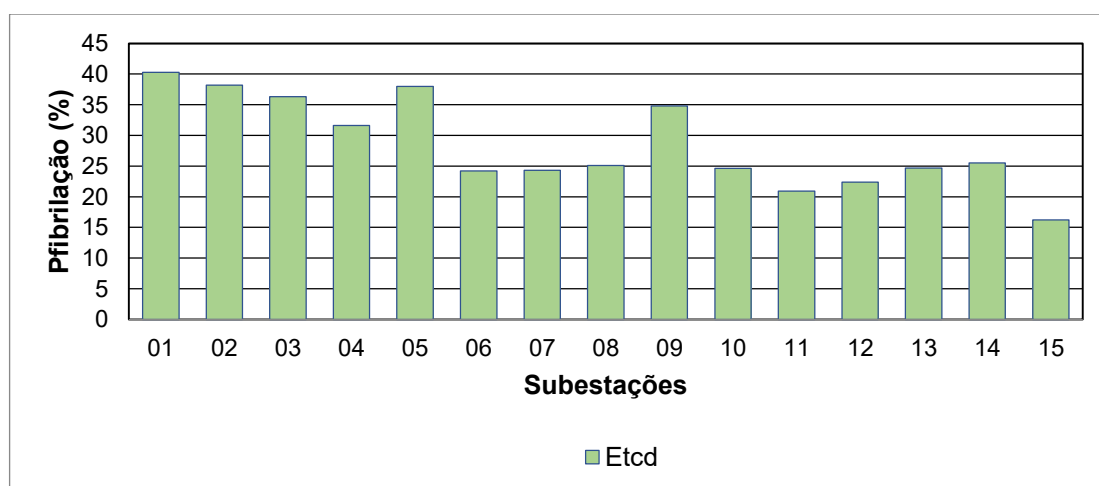


Figura 4.20 – Pfibrilação para valor de máxima tensão de toque admissível para I_{CHCD} .

O risco cresce com o aumento da tensão aplicada. Na subestação 01, o risco chegaria próximo a 40% para tensão de toque. A subestação 05, apresentou uma elevação no risco de fibrilação considerável, de 10,3% para 38,0 %. Para tensão de passo, apenas a SE 01 apresentaria risco de 0,053%, praticamente desprezível, caso a tensão de passo desenvolvida atingisse o valor de tensão de passo máxima permitida.

A Figura 4.21 apresenta um comparativo entre as tensões de toque máxima desenvolvida e máxima admissível para todas as subestações.

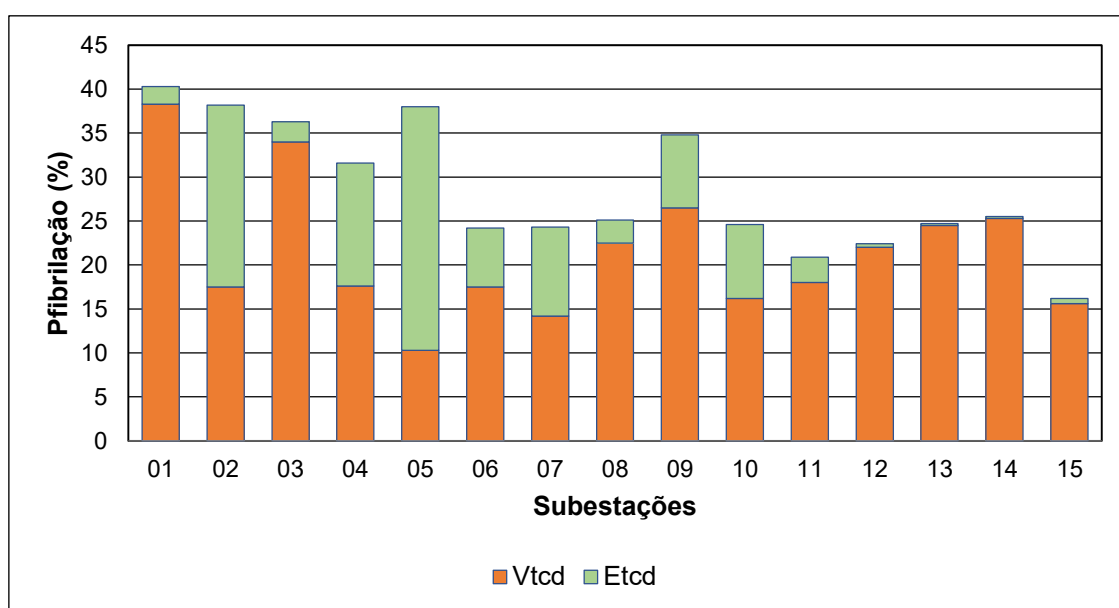


Figura 4.21 – Comparativo da P de fibrilação gerado pela máxima tensão de toque desenvolvida e pela máxima tensão de toque admissível para I_{CHCD} .

A Figura 4.22 apresenta uma análise da probabilidade de fibrilação considerando diferentes tempos de atuação da proteção para os potenciais desenvolvidos em cada subestação.

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.

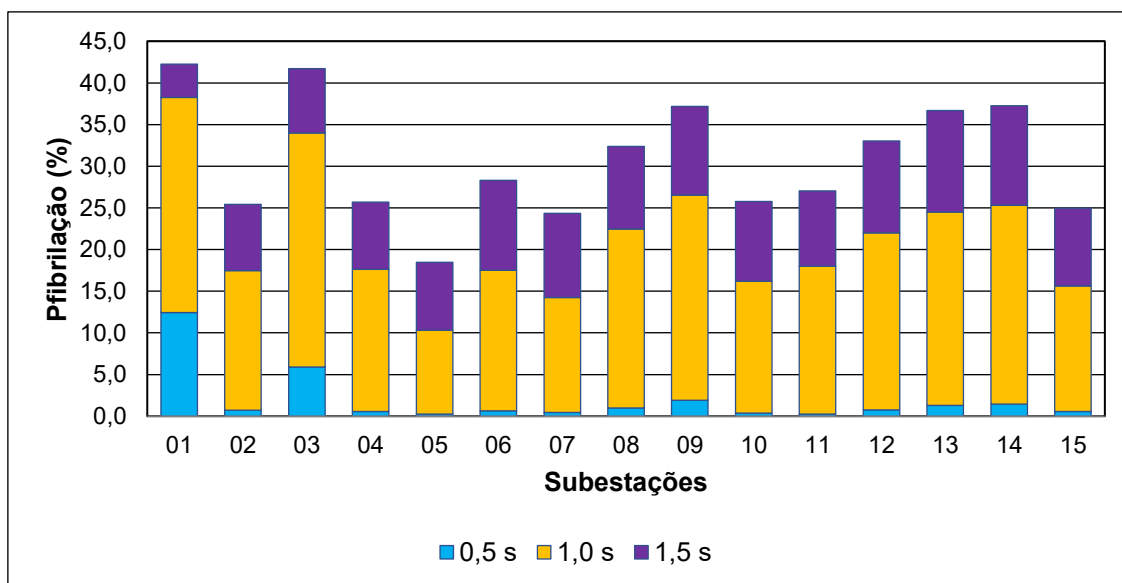


Figura 4.22 – P fibrilação considerando V_{TCD} para diferentes tempos de atuação da proteção

Para se alcançar uma condição de risco aceitável, ou seja, o risco de fatalidade menor que 1 em um milhão, é importante que a probabilidade de fibrilação seja atenuada pela probabilidade de coincidência.

$$P_{\text{fatalidade}} \leq 10^{-6}$$

$$P_{\text{coincidência}} = \frac{10^{-6}}{P_{\text{fibrilação}}}$$

A Figura 4.23 apresenta os valores necessários de probabilidade de coincidência para que o risco de fatalidade seja aceitável para as tensões de toque aplicadas na Tabela 4.3.

Através dos resultados apresentados, é possível afirmar que as subestações 01 e 03 precisam garantir uma baixa probabilidade de coincidência para que o risco de fatalidade esteja na região considerada aceitável. Em contrapartida, a subestação 15, por apresentar uma baixa probabilidade de fibrilação, poderá ter uma probabilidade de coincidência elevada que mesmo assim garantirá que a probabilidade de fatalidade fique dentro da região onde o risco é considerado aceitável.

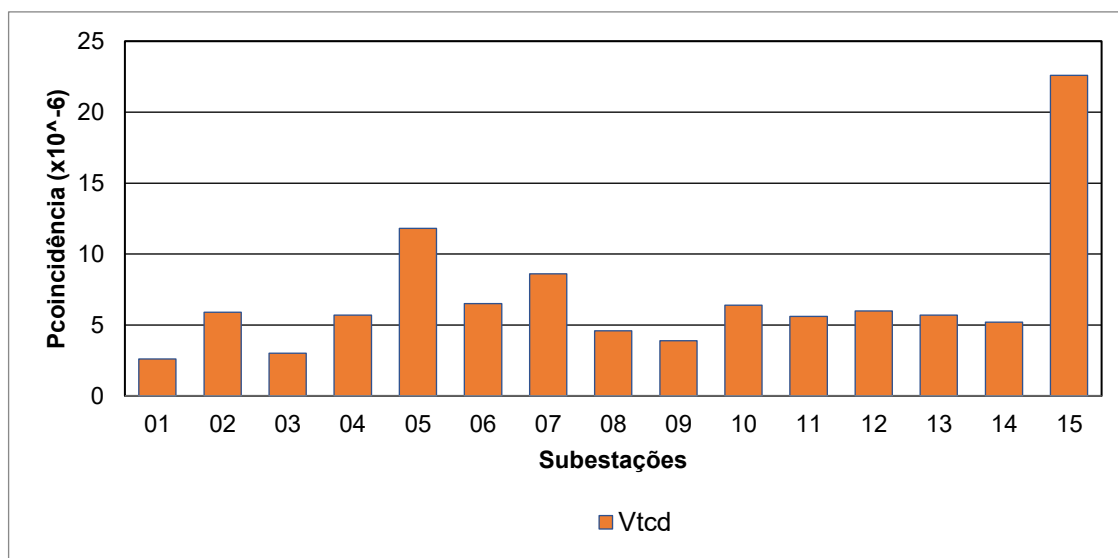


Figura 4.23 – Pcoincidência (x 10⁻⁶) necessária para atingir a Pfatalidade máxima de 1 em 1000000 considerando a Pfibrilação da tabela 4.3

Na prática, significa que parâmetros como desempenho das linhas e até mesmo a quantidade de contatos, que podem ser traduzidos como atividades de operação ou manutenção na subestação, devam ser os menores possíveis para atingir uma baixa probabilidade de coincidência.

Por outro lado, as subestações que apresentam uma resistividade superior a 2000 $\Omega.m$ podem ter maior flexibilidade nos parâmetros relativos à coincidência. Mesmo assim, nestas subestações, o risco de fatalidade será baixo.

Consideração sobre o uso da brita:

O software, na versão utilizada, não permite simular cenários onde o solo apresenta resistividade aparente superior a 50 $\Omega.m$ e está revestido por uma camada de material de alta resistividade. Conforme informações do desenvolvedor, a ferramenta utiliza dados de fibrilação pré-calculados, uma vez que esse cálculo probabilístico demanda muito tempo para ser executado.

Como visto no método determinístico, há um benefício na segurança significativo ao inserir um material de resistividade elevada em série com os pés da vítima.

Para exemplificar a aplicação do software, o gráfico da Figura 4.24 apresenta a probabilidade de fibrilação para tensão de toque considerando a resistividade do solo da subestação em 5 $\Omega.m$ e 50 $\Omega.m$. A tensão de toque aplicada variou entre 230 V a 860 V.

Probabilidade de fibrilação foi calculada inicialmente em solo natural, e posteriormente revestida com uma camada de 10 cm de brita, com resistividade de 3000 $\Omega.m$.

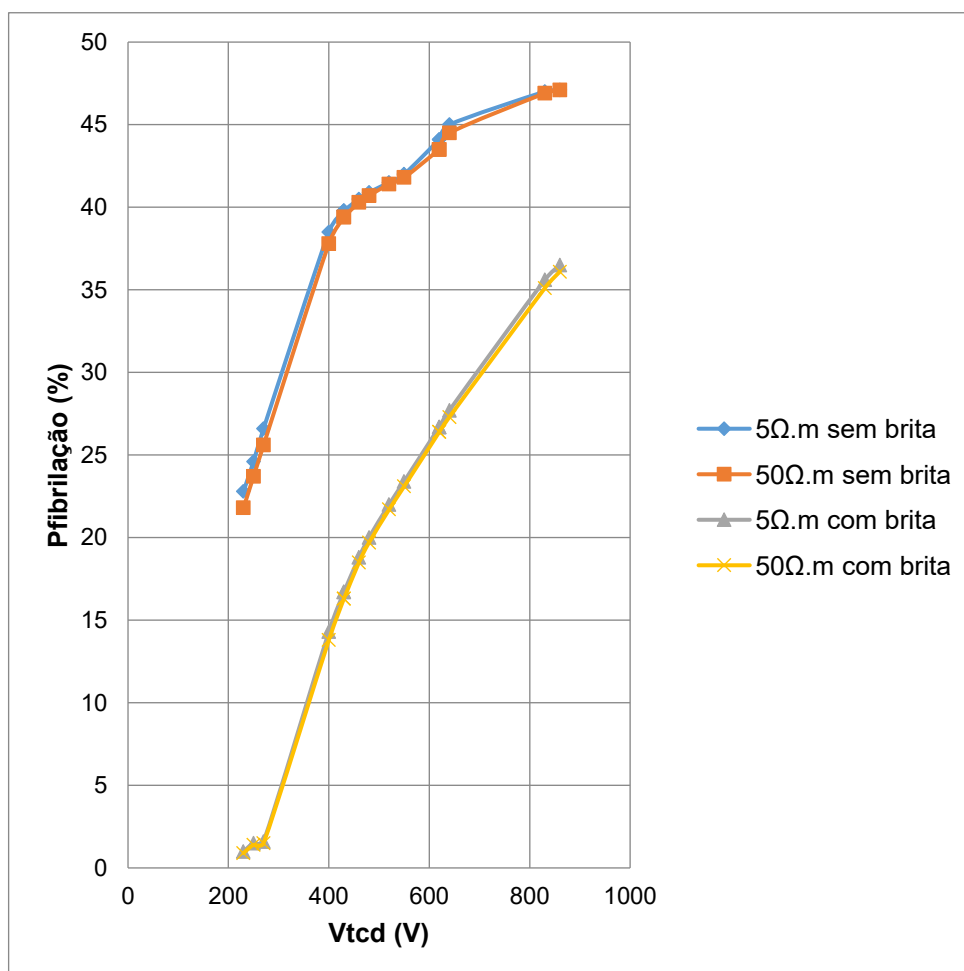


Figura 4.24 – Pfibrilação comparando solo natural e o uso de revestimento de uma camada de 10 cm de brita (3000 $\Omega.m$)

O benefício do revestimento pode ser facilmente verificado através do gráfico. Quanto menor for a resistividade da primeira camada do solo em relação a resistividade da cobertura aplicada, menor será o fator " C_s ". Este irá impactar diretamente na corrente que circulará pelo corpo da pessoa, minimizando assim a probabilidade de fibrilação.

4.5 Considerações finais do capítulo

Através das simulações apresentadas, foi possível perceber a importância de analisar não apenas os parâmetros tradicionais do método determinístico, como tensão de passo e toque, envolvidos na seguridade do sistema de aterramento, mas também considerar parâmetros comportamentais que impactam diretamente na probabilidade de coincidência.

A análise determinística pode, em alguns casos, implicar numa falsa eliminação do risco. Conforme simulado, em alguns casos, o risco de fatalidade passou a ser aceitável, não pela baixa probabilidade de fibrilação, e sim pela remota probabilidade de coincidência.

O tempo de atuação da proteção, na análise probabilística, passa a ser um parâmetro de altíssima relevância, por ser o único parâmetro que afeta diretamente na probabilidade de fibrilação e na probabilidade de coincidência. Portanto, em muitos casos, a adequação no sistema de proteção pode ser a maneira mais eficaz para minimizar os riscos do sistema de aterramento.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

5.1 Introdução

Apesar de ser uma atividade bastante consolidada na engenharia, a elaboração de um novo projeto ou verificação de uma malha de aterramento existente continua 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. Ampliar a malha existente ou até mesmo adensar o gradeado, podem não ser medidas tecnicamente ou economicamente viáveis.

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. Outra vantagem destacada na literatura é que a quantificação do risco serve como um fator facilitador na comunicação sobre a seguridade da instalação com pessoas que não estão no meio técnico.

O desafio a respeito da nova abordagem é aprimorar a compreensão e o estudo dos parâmetros probabilísticos, principalmente as variáveis comportamentais de frequência e tempo médio de contato. As análises envolvidas precisam considerar condições operacionais realistas.

É importante destacar que os critérios determinísticos utilizados para elaboração de malhas podem exibir probabilidades de fibrilação não toleráveis. Principalmente em locais onde o tempo de atuação da proteção é alto.

Como citado na literatura “As avaliações de risco não devem se basear na premissa de que, como nenhum acidente foi relatado no passado, nenhum acidente ocorrerá no futuro” [07].

5.2 Conclusões

Conforme demonstrado no estudo de casos do Capítulo 4, o projetista, ao utilizar a metodologia probabilística, pode através de uma análise de sensibilidade de parâmetros calcular o risco de fatalidade e observar em quais pontos a subestação está vulnerável.

A ideia é não mais avaliar se a malha de aterramento da subestação está segura sob uma perspectiva binária, onde basta a diferença de potencial desenvolvida estar abaixo da tensão máxima permitida, e sim conseguir identificar os pontos fracos que envolvem o sistema de aterramento e trabalhar em melhorias em prol da segurança de maneira mais eficaz. Em muitos casos, a solução viável para minimizar o risco está em ajustar o tempo de atuação da proteção ou em buscar maneiras de se melhorar o desempenho das linhas que conectam a subestação. Não necessariamente, a melhoria na segurança precisa passar pelo aumento ou adensamento da malha.

É importante entender que os parâmetros envolvidos em um cálculo de malha de aterramento são probabilísticos e, portanto, a avaliação precisa ser feita dentro de uma gama de possibilidades. A resistividade do solo, por exemplo, é modelada e definida como um valor único, mas na verdade possui uma faixa de valores que podem variar durante o ano, pois a resistividade depende de condições climáticas que mudam de acordo com a época do ano.

Na análise do risco de fatalidade, um ponto de extrema importância é o tempo de atuação da proteção. Conforme observado nos diversos cálculos realizados, o tempo de atuação da proteção é a única variável que impacta diretamente nas probabilidades de coincidência e na probabilidade de fibrilação.

O tempo de 1,0 segundo, usualmente utilizado de forma conservadora para proteção de subestações de 138 kV, pode criar um ambiente de risco significativo. Instalações consideradas até então seguras, podem apresentar uma probabilidade de fatalidade elevada se a probabilidade de coincidência não conseguir atenuar de forma significativa a probabilidade de fibrilação, que no caso estudado, é para um tempo de 1,0 s.

5.3 Proposta de continuidade

De acordo com as publicações recentes, há um forte indicativo de que as normas de aterramento que ainda não contemplem a análise probabilística de risco comecem a considerar tal metodologia em suas futuras revisões.

Toda metodologia discutida neste trabalho precisa de uma análise mais profunda sobre a base probabilística envolvida nos cálculos, principalmente sobre os métodos de amostragem utilizados. É importante discutir, por exemplo, qual método de

amostragem aleatória seria mais apropriado para representar com maior fidelidade a ocorrência de um evento de uma falta e, conseqüentemente, a elevação de potencial de uma malha de aterramento.

Outro ponto muito sensível em todo projeto de aterramento é a distribuição de corrente de curto-circuito. Existem métodos estabelecidos para calcular a corrente que circulará pela malha, mas alguns parâmetros e condições são simplificadas ou desprezadas. Uma investigação no impacto dessas adaptações no risco associado ao sistema de aterramento poderia trazer ganhos significativos aos projetos.

É importante destacar que, para ser possível a implantação dessa metodologia na norma brasileira, é necessário que projetistas e concessionárias disponham de uma ferramenta robusta para executar os cálculos probabilísticos dos riscos de fatalidade.

O software utilizado nesse trabalho para análise de risco associado ao sistema de aterramento, apesar de ser um programa recente e com ótimas possibilidades de análise, apresenta algumas limitações referentes a práticas de projetos em subestações. Não é possível considerar na análise, um solo com resistividade superior a $50 \Omega.m$ com uma camada de revestimento de brita, por exemplo.

Seria interessante também, estabelecer uma correlação entre o curto-circuito da subestação e o risco de fatalidade associado. Para verificação da superação do ativo, o principal indicativo é a análise do curto-circuito que irá, de fato, circular pela malha.

Por fim, fazer uma análise de risco considerando a periodicidade de eventos como ocorrências de manutenção ou de falhas de linhas. Alguns desses fatores estão associados a períodos típicos, ou seja, o risco pode ser mais severo para determinada época ou condição do ano e mais brando em outros. Tal análise permitiria por exemplo, estabelecer manutenções ou obras em épocas onde historicamente a linha apresentasse melhor desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[01] VISACRO, Silvério. **Aterramentos Elétricos**. 2ª Edição. Belo Horizonte. Editora Alphagraphics, 1998.

[02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751: Sistema de aterramento de subestações – requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

[03] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. **IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York: IEEE, 2013.

[04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

[05] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão**. N° 0048/2014 – Revisão 1 – Fevereiro/2015

[06] ASSIS, Sandro, TEIXEIRA, Andre, FILHO, Edino, NEVES, Henrique, PEREIRA, Farley e COUTINHO, Braulio. **Subestações Compactas em áreas urbanas: Soluções para as Interferências Eletromagnéticas**. XXV Seminário Nacional de Transmissão e Produção de Energia Elétrica. Belo Horizonte, novembro, 2019

[07] CIGRE/CIRED. **Substation earthing system design optimisation through the application of quantified risk analysis**. Reference TB749, JWG B3:35. December 2018.

[08] AUSTRALIA STANDARDS. **AS 2067: Substations and high voltage installations exceeding 1 kV a.c.** 2016

[09] ENERGY NETWORKS ASSOCIATION. **EG-0: Power system earthing guide. Part 1: Management Principles.** Version 1 - May 2010.

[10] NEW ZELAND ELECTRICITY NETWORKS. **Guide to power system earthing practice.** June 2009.

[11] BALE, J. M. and TOCHER, W. J. V. **Is Deterministic Design Risk Free? How Design Options Differ Between Deterministic & Risk Based Processes.** IEEE - Down to Earth Conference (DTEC). Hunter Valley, NSW, Australia, 2016.

[12] BROWN, M. **Risk Based Approach to Substation Earthing for SA Power Networks.** IEEE - Down to Earth Conference (DTEC). Melbourne, Australia, 2018.

[13] DIMOPOULOS, GRIFFITHS, HARID, HADDAD, AINSLEY, GUO and MPOFU. **Proposal for Probabilistic Risk Assessment in Grounding Systems and Its Application to Transmission Substations.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 27, N° 4, October 2013.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

[15] COELHO, Guilherme H. L. **“Estudo sobre Sistema de proteção contra descargas atmosféricas em plantas petroquímicas em situação de manutenção: Análise de risco”.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Brasil, 2011.

[16] NORMA REGULAMENTADORA N° 10. **NR-10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade.** Portaria SEPRT, n.º 915, de 30 de julho de 2019.

[17] KINDERMANN, G. **Curto-Circuito.** 2ª edição. Porto Alegre. Editora Sagra Luzzatto, 1996

- [18] KINDERMANN, G. e CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 4ª edição. Porto Alegre. Editora Sagra Luzzatto, 1998
- [19] CARMAN WD. **Touch voltage is not enough - meeting our duty of care**. IEEE PES Down to Earth Conference (DTEC). Hunter Valley, NSW, Australia. September, 2016.
- [20] BS EN 50522. **Earthing of power installations exceeding 1kV a.c.** October 2012
- [21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 60479-1 **“Effects of current on human beings and livestock. Part 1: General aspects.”** – Edition 4.1 2016-07
- [22] SOTILLE, Carlos, ALEIXO, Alexandre, MODENA, Jobson, FREIRE, Edmundo e VALLONE, Pedro. **Aterramento de Subestações – Nova Norma NBR-15751/2009**. São Paulo. ENIE, 2010.
- [23] CARMAN, W. and PALMER, S. **“Earthing design incorporating risk quantification – An expensive overhead or key decision-making tool?”**. 25th International Conference on Electricity Distribution, Paper n° 1750. Madrid, 03 – 06 June, 2019.
- [24] DIMOPOULOS, GRIFFITHS, HARID, HADDAD, AINSLEY, GUO and MPOFU. **“Probability Surface Distributions for Application in Grounding Systems Safety Assessment”**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 27, N° 4, October 2012.
- [25] 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
- [26] VISACRO, Silvério. **Descargas Atmosféricas: Uma abordagem de engenharia**. 1ª Edição. Belo Horizonte. Editora Artliber, 2005.

- [27] ASSIS, Sandro de C. **“Avaliação de risco de rompimento de cabos para-raios instalados em linhas de transmissão”**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Brasil, 2017.
- [28] GRIFFITHS, I. and WOODHOUSE, D. **A Calculation Framework for Quantifying the Probability of Ventricular Fibrillation of Rare Events**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, pp. 2052 – 2059, 2017
- [29] A. HADDAD, and D. WARNE. **Advances in High Voltage Engineering**. IET Power and Energy Series 40. London United Kingdom, 2007.
- [30] DALZIEL, C. F., **“Electric shock hazard”** IEEE Spectrum, pp. 41–50, Feb. 1972.
- [31] DALZIEL, C. F., and LEE, W. R., **“Reevaluation of lethal electric currents”** IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA-4, no. 5, pp. 467–476, Oct. 1968.
- [32] BIEGELMEIER, G., and LEE, W.R., **“New Considerations on the Threshold of Ventricular Fibrillation for A. C. Shocks at 50-60 Hz”** Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 127, no. 2, Part A, pp. 103–110, March, 1980.
- [33] CARMAN WD. **Earthing Shock Safety Design Standards: Where have they come from? Where are they going?**. IEEE PES Down to Earth Conference (DTEC). Hunter Valley, NSW, Australia. September, 2016.
- [34] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 61936-1 **“Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part1: Common rules.”** – Edition 2.0 2010-08
- [35] ENERGY NETWORKS ASSOCIATION, **Argon safety assessment software**, (Aust.). www.ena.asn.au

[36] DA SILVA, Mário. M. **“Visualização do risco como meio de suporte à tomada de decisão: uma abordagem através de ferramentas de gerenciamento de risco”**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, Brasil, 2016.

[37] NSA Consultoria e Informática Ltda. **Resist**. Versão 3.5: 2008

[38] NSA Consultoria e Informática Ltda. **SE Ground**. Versão 1.2: 2008

[39] ENDRENYI, J. **“Analysis of transmission tower potentials during ground faults”**. IEEE Transactions on Power Apparatus and System. 1274-1283, 1967.

[40] COMPANHIA HIDRELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. **301-CHESF-ET-PJ-EM – Projetos eletromecânicos de subestações**. Recife-PE. Abril, 2019.

[41] CPFL ENERGIA. **GED-4313 – Norma Técnica: Subestação – Conexão aos Sistemas Elétricos de Subtransmissão da CPFL**. São Paulo-SP. Janeiro, 2020.

[42] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **22.000-PE/LS-3146a – Requisitos Técnicos Para Implantação das Instalações de Subtransmissão**. Belo Horizonte-MG. Junho, 2012.