



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTOR WANDERLEY ALBUQUERQUE

**MALHAS DE ATERRAMENTOS DE SUBESTAÇÕES:
avaliação da variação de parâmetros construtivos**

Recife
2023

VICTOR WANDERLEY ALBUQUERQUE

**MALHAS DE ATERRAMENTOS DE SUBESTAÇÕES:
avaliação da variação de parâmetros construtivos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexander Barros Lima

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Albuquerque, Victor Wanderley.

Malhas de aterramentos de subestações: avaliação da variação de parâmetros construtivos / Victor Wanderley Albuquerque. - Recife, 2023.

46 p. : il., tab.

Orientador(a): Alexander Barros Lima

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2023.

1. Subestação. 2. Tensão de toque. 3. Tensão de passo. 4. Corrente elétrica. 5. Resistência de aterramento. I. Lima, Alexander Barros. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

VICTOR WANDERLEY ALBUQUERQUE

**MALHAS DE ATERRAMENTOS DE SUBESTAÇÕES:
avaliação da variação de parâmetros construtivos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovado em: 11/05/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexander Barros Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Luiz Henrique Alves de Medeiros (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Lauro Rodrigo G. da Silva Lourenço Novo (Examinador Externo – UFPE)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado a todos que de alguma forma contribuíram para esta construção: a Deus, a minha família e ao meu Amor.

AGRADECIMENTOS

Imensamente grato a Deus pelo dom da vida, e por romper fronteiras, para realizar sonhos.

Quero agradecer ao meu pai, Francisco, a quem a vida fez engenheiro, sendo o meu maior referencial profissional, e à minha mãe, Elionai, que sempre me ensinou o caminho da fé, me aconselhando e carregando-me de joelhos. Agradeço a vida dos meus irmãos, Filipe e Pedro, que sempre me apoiaram em tudo, seja em obras ou palavras.

Agradeço àqueles que formam a minha segunda família, Eli e Nerice, meus sogros, e Eliabe, meu irmão na fé, pessoas que sempre estiveram em oração pelo meu sucesso.

Gratidão ao meu orientador, Prof. Alexander, a quem posso chamar de amigo, e que me guiou, me fazendo enxergar novos horizontes não imaginados anteriormente.

E, inesquecivelmente, todo o meu amor àquela por quem eu velejo céus e mar, Mitishaeli, minha futura esposa, minha incentivadora e companheira de sonhos e realizações.

“E nós sabemos que Deus coopera em tudo para o bem daqueles que o amam” (Rm 8, 28).

RESUMO

O dimensionamento de malhas de aterramento requer alta capacidade inventiva em observância das normas e padrões vigentes, visando atender os critérios estabelecidos de segurança. Para tal, é imprescindível analisar quais as condições ótimas de funcionamento de uma malha, e qual a corrente máxima suportada, em atendimento das tensões de toque e de passo, o que envolve o dimensionamento dos retículos e análise da efetividade das hastes de aterramento. As análises foram baseadas no padrão IEEE 80-2013, sendo avaliados os níveis de corrente suportada por malhas de dimensões diversas, a efetividade do uso de hastes, e a variação da resistência de aterramento. É realizada, também, uma verificação de equivalência de efetividade do uso de malhas com retículos de 2 m em comparação com malhas de retículos maiores com algumas hastes instaladas. Além disso, os custos do material nesses casos também são comparados.

Palavras-chave: Subestação; tensão de toque; tensão de passo; corrente elétrica; resistência de aterramento; malha reticulada.

ABSTRACT

The design of grounding grid requires a high inventive capacity in compliance with the norms and standards in force, aiming to meet the established safety criteria. To this end, it is essential to analyze the optimal conditions for the operation of a mesh, and what is the maximum current supported in compliance with the touch and step voltages, which involves sizing the meshes and analyzing the effectiveness of the grounding rods. The analyzes were based on the IEEE 80-2013 standard, evaluating the limit current levels supported by meshes of different sizes, the effectiveness of using rods, variation in grounding resistance. It is also performed an equivalence check of the effectiveness of using meshes with 2 m in comparison with larger meshes with some rods installed. Furthermore, the material costs in these cases are also compared.

Keywords: Substation; touch voltage; step voltage; electric current; grounding resistance; ground grid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo T de representação de um segmento de eletrodo e as componentes de corrente.....	16
Figura 2 – Segmento de eletrodo submetido a uma corrente de baixa frequência. ..	16
Figura 3 – Impedância de aterramento em decorrência de espectro de frequência vinculado a uma descarga atmosférica	18
Figura 4 – Modelo de solo homogêneo aproximado por fatias.....	18
Figura 5 – Perfil do potencial do solo	19
Figura 6 – Defeito com religamento.	21
Figura 7 – Representação gráfica da tensão de passo.	22
Figura 8 – Representação gráfica tensão de toque.....	24
Figura 9 – Representação das malhas de aterramento com e sem hastes.	25
Figura 10 – Gráfico Corrente-limite de malha <i>versus</i> resistividade de solo.....	29
Figura 11 – Hastes instaladas em todos nós da malha, com destaque para as posições A, B e C.....	30
Figura 12 – Gráfico das correntes-limites <i>versus</i> resistividade de solo para malhas, possuindo cabos de 70 mm ² e hastes de 3/4" e comprimento 3 m, retículo fixo de 2x2 m ²	30
Figura 13 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 20x20 m ²	38
Figura 14 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha 40x40 m ²	38
Figura 15 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 60x60 m ²	39
Figura 16 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 80x80 m ²	39
Figura 17 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 100x100 m ²	40
Figura 18 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 120x120 m ²	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características construtivas do aterramento.	17
Tabela 2 – Limites de corrente elétrica suportados pelos seres humanos.....	21
Tabela 3 – Malhas com condutores igualmente espaçados, $D=2$ m, e profundidade $h=0,5$ m	28
Tabela 4 – Correntes máximas, IG , considerando 1 haste por nó.	31
Tabela 5 – Ganho para resistividades variadas, malha de 120×120 m ² , retículo de 2×2 m ²	31
Tabela 6 – Ganho de corrente variando conforme dimensões de malha. Retículo fixo de 2×2 m ² , $\rho=100\Omega \cdot m$	32
Tabela 7 – Correntes máximas de malha de 20×20 m ² , comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e os com uma haste por nó ($D=3$ m, $D=4$ m, $D=5$ m).	33
Tabela 8 - Correntes máximas de malha de 20×20 m ² , comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e o com hastes ($D=4,6$ m).	34
Tabela 9 - Correntes máximas de malha de 20×20 m ² , comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e os com hastes ($D=3$ m, $D=4$ m, $D=5$ m), após variação do número de hastes.....	35
Tabela 10 - Correntes máximas de malha de 80×80 m ² , comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e os com hastes, uma haste por nó ($D=3$ m, $D=4$ m, $D=5$ m, $D=6$ m, $D=7$ m, $D=8$ m).	35
Tabela 11 - Correntes máximas de malha de 80×80 m ² , comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e os com hastes ($D=3$ m, $D=4$ m, $D=5$ m), após variação do número de hastes.....	36
Tabela 12 - Correntes máximas de malha de 80×80 m ² , comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e os com hastes ($D=6$ m, $D=7$ m, $D=8$ m), após variação do número de hastes.....	36
Tabela 13 – Retículos obtidos para as entradas $IG=3000A$, $\rho=250\Omega \cdot m$	41
Tabela 14 – Resistências de malha com e sem hastes de aterramento.	42
Tabela 15 - Resistências de malha com e sem hastes de aterramento.	42
Tabela 16 – Resistências calculadas, malha com dimensões 80×80 m ²	42
Tabela 17 - Resistências calculadas, malha com dimensões 80×80 m ²	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
NBR	Norma Técnica Brasileira
SE	Subestação
ρ	Resistividade elétrica do solo [$\Omega \cdot m$]
R	Resistência elétrica [Ω]
L	Indutância elétrica [H]
C	Capacitância elétrica [F]
G	Condutância elétrica [S]
Z	Impedância elétrica [Ω]
ΔV_i	Queda de potencial [V]
I	Corrente elétrica [A]
G_a	Ganho de corrente
R_g	Resistência de malha [Ω]
$R_{g'}$	Resistência de malha com o uso de hastes de aterramento [Ω]
R_{ch}	Resistência do corpo humano [Ω]
R_p	Resistência mútua entre dois pés distanciados em 1 m [Ω]
E_{tcd}	Tensão de toque permissível para corrente de curta duração [V]
E_p	Tensão permissível de passo para corrente de curta duração [V]
I_{chcd}	Corrente elétrica de curta duração [A]
I_{chld}	Corrente elétrica de longa duração [A]
I_G	Corrente máxima (limite) de malha sem o uso de hastes [A]
$I_{G'}$	Corrente máxima (limite) de malha com o uso de hastes [A]
ω	Frequência angular da corrente [rad/s]
L_T	Comprimento total de condutores da malha [m]
L_C	Comprimento total de cabos condutores da malha [m]
L_R	Comprimento total de hastes de aterramento [m]
K_i	Fator de correção, não uniformidade da dispersão de corrente
K_{ii}	Fator de correção, efeitos dos condutores na periferia da malha
K_m	Fator geométrico de malha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Geral.....	14
1.1.2	Específicos	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	INTRODUÇÃO.....	15
2.2	ATERRAMENTOS SUBMETIDOS A CORRENTES ELÉTRICAS: CARACTERÍSTICAS GERAIS	15
2.3	CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ATERRAMENTO	18
2.4	ASPECTOS DE SEGURANÇA EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS	20
2.4.1	Tensão de passo	22
2.4.2	Tensão de toque.....	23
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	25
3.1	LIMITES DE CORRENTE VERSUS RESISTIVIDADE DO SOLO	27
3.2	EFETIVIDADE DAS HASTES NA OTIMIZAÇÃO DA TENSÃO DE TOQUE (AUMENTO DA CORRENTE MÁXIMA DE MALHA COM O USO DE HASTES NAS MALHAS - GANHO).....	29
3.3	EFETIVIDADE DAS HASTES BASEADA NA DIMENSÃO DOS RETÍCULOS	32
3.4	DIMENSÕES ÓTIMAS DOS RETÍCULOS	37
3.5	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE MALHAS COM E SEM HASTES	41
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A expansão do sistema elétrico para suprir o aumento de carga é uma condição fundamental para o desenvolvimento econômico e social da sociedade moderna. Nesse sentido, destacam-se as subestações (SEs) elétricas de potência. É importante ressaltar que seja no projeto de uma nova SE, na ampliação de uma SE já existente ou ao longo da operação de uma SE, a malha de aterramento é considerada um dos itens de maior relevância a ser avaliada. Isso porque o aterramento é indispensável para a proteção de pessoas e equipamentos, provendo um caminho de baixa impedância para o escoamento de correntes elétricas por ocorrência de eventos como descargas atmosféricas e curto-circuitos [1,2]. Para alcançar tais objetivos, os aterramentos desses locais são projetados tendo como referência normas e padrões, nacionais e internacionais, sendo a NBR 15751:2013 [3] e o IEEE Std 80-2013 [4] os documentos mais utilizados.

O projeto de malhas de aterramento de SEs, é um procedimento que envolve diversas variáveis [3,4]. Em um projeto novo, é possível que já seja levado em conta futuras expansões da malha devido, por exemplo, ao aumento do pátio, instalação de novos transformadores, aumento do nível de curto-circuito. Já em uma SE em operação, o projetista se depara com a necessidade de constantes obras de melhorias das instalações devido, por exemplo, a expansão do sistema elétrico e o consequente aumento dos níveis de curto-circuito nas SEs. Nesses casos, a malha de aterramento precisa ser reavaliada e, muitas vezes, passa por procedimentos de atualização. Em áreas urbanas, a expansão das malhas tem apresentado um grande desafio técnico devido às limitações impostas pela pouca disponibilidade de área/espço, o que pode limitar significativamente a capacidade de melhoria e/ou adequação na malha de aterramento [5]. O uso de hastes juntamente com retículos menores é uma estratégia que pode ser utilizada. Este trabalho insere-se neste contexto, onde a efetividade deste recurso é avaliada.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar a efetividade do uso de retículos em conjunto com hastes em malhas de aterramento tendo como premissa o padrão IEEE 80-2013, que é a base para a ABNT NBR 15751.

1.1.2 Específicos

- Determinar os níveis máximos de corrente em malhas em condições diversas;
- Determinar a resistência de aterramento em vários cenários;
- Analisar a efetividade do uso de hastes em condições diversas;
- Verificar níveis admissíveis de tensão de toque e passo.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em 4 capítulos, incluindo este de introdução.

No Capítulo 2, inicia-se a revisão bibliográfica a partir da apresentação da resposta de aterramentos elétricos a correntes elétricas. No contexto de correntes de baixas frequências, são explanados os conceitos de resistência de aterramento e aspectos de segurança em aterramentos elétricos.

No Capítulo 3 são desenvolvidos estudos de limites de corrente em malhas de aterramento, efetividade das hastes, dimensões ótimas de retículos e cálculo de resistências de malha com e sem aplicação de hastes de aterramento.

No Capítulo 4 são realizadas as conclusões e propostas de continuidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

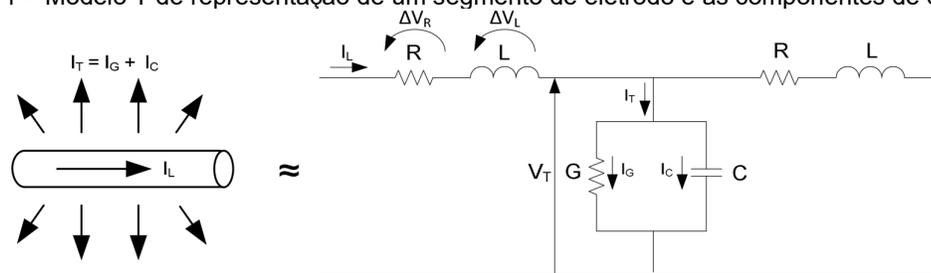
2.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da bibliografia que trata dos aspectos gerais relacionados a aterramentos elétricos, tais como a resposta de um aterramento a correntes elétricas, a caracterização da resistência de aterramento, condições normativas associadas à construção de malhas reticuladas.

2.2 Aterramentos submetidos a correntes elétricas: características gerais

Um aterramento é constituído por elementos condutores que são enterrados diretamente no solo (eletrodos), podendo assumir topologias diversas, dependendo das características da aplicação para a qual foram projetados. Para avaliar a resposta de um aterramento a correntes elétricas, é comum se utilizar um modelo conceitual simplificado que é baseado na teoria de circuitos. Nesse modelo, considera-se que uma conexão à terra apresenta efeitos de natureza resistiva, indutiva e capacitiva [1]. A Figura 1 ilustra o circuito equivalente de um segmento de eletrodo, onde se verifica que a corrente apresenta uma componente transversal que se dispersa no solo e outra longitudinal que propaga ao longo do eletrodo. Em relação a essa última parcela, longitudinal, são observadas perdas internas ao condutor e a ocorrência de um campo magnético estabelecido na região em volta dos caminhos de corrente. Tal condição é modelada, respectivamente, por meio de uma resistência (R) e de uma indutância (L). Ambas levam a uma queda de potencial ao longo do eletrodo à medida que a corrente propaga. Já a componente transversal, está associada a correntes de natureza condutiva e capacitiva que se dispersam para o solo. Segundo Alípio [6], essas correntes não dependem da geometria do eletrodo, mas apenas da frequência dessas, e da condutividade/permisividade elétrica do solo. Os efeitos transversais associados a essa corrente são modelados por meio de uma condutância (G) e de uma capacitância (C) em paralelo.

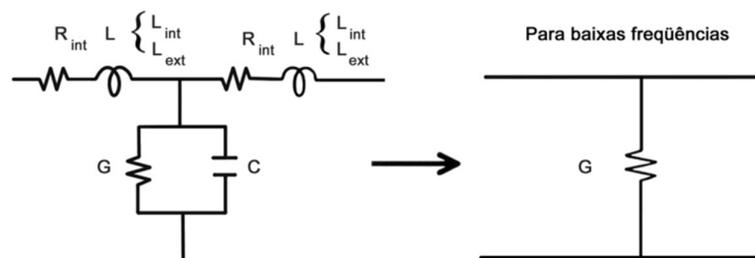
Figura 1 – Modelo T de representação de um segmento de eletrodo e as componentes de corrente.



Fonte: adaptado de [6].

Para sinais de baixas frequências, como é o caso da frequência industrial, os componentes reativos são desprezíveis. Além disso, as perdas longitudinais (R) são pouco significativas, sendo, também, desconsideradas, tornando o modelo mais simples. Nessas condições, o aterramento é modelado apenas por uma condutância, como mostra a Figura 2. Assim, a oposição à entrada de corrente para o solo é determinada pela chamada resistência de aterramento ($R_g = 1/G$). Segundo Visacro [1], a resistência de aterramento corresponde ao conjunto de condutâncias em paralelo e seu valor depende da geometria dos eletrodos e da resistividade do solo.

Figura 2 – Segmento de eletrodo submetido a uma corrente de baixa frequência.



Fonte: retirado de [1].

No modelo completo, contudo, a oposição à entrada e dispersão de corrente no solo é caracterizada por uma impedância (ver Figura 1). Neste caso, a impedância é definida para cada frequência de corrente na qual é submetida, onde [7,8]

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.1)$$

em que, Z é a impedância no ponto de injeção da corrente [Ω], V é a elevação de potencial desenvolvida [V], I é a corrente injetada [A] e ω é a frequência angular da corrente [rad/s]. Ressalta-se, ainda, que essa impedância também é chamada impedância harmônica [2].

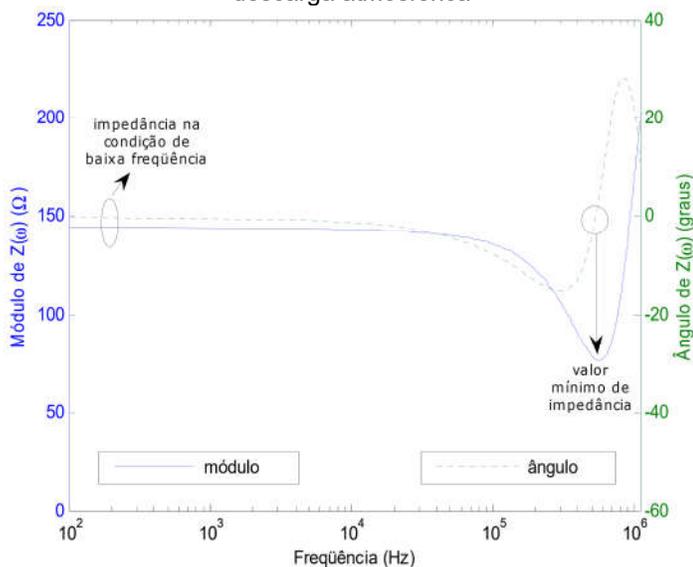
A influência exercida pela frequência em relação a impedância de um aterramento pode ser observada na Figura 3. Nela são apresentadas as curvas do módulo e do ângulo da impedância de um aterramento (características construtivas apresentadas na Tabela 1), verifica-se que para frequências inferiores a 20 kHz, o ângulo da impedância é, aproximadamente, zero. Para frequências superiores a esse valor o ângulo deixa de ser zero, indicando que os efeitos reativos passam a ser significativos [6]. Disso decorre a chamada região de baixa (<20 kHz) e região de alta frequência (>20 kHz). É importante ressaltar, contudo, que aterramentos com características construtivas diferentes, podem apresentar respostas distintas da apresentada, inclusive em relação a frequência limite.

Tabela 1 – Características construtivas do aterramento.

Especificações do eletrodo	
Tipo	Horizontal
Comprimento	5 m
Raio	0,7 cm
Profundidade	0,5 m
Especificações do solo	
Resistividade	2400 Ω .m
Permissividade relativa	15

Fonte: adaptado de [6]

Figura 3 – Impedância de aterramento em decorrência de espectro de frequência vinculado a uma descarga atmosférica

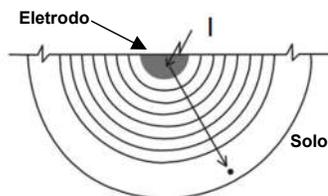


Fonte: retirado de [6].

2.3 Caracterização da resistência do aterramento

Em análise da influência da resistência da terra circunvizinha a um eletrodo, é possível utilizar uma estilização que, de forma simplificada, aborda a constituição da resistência de aterramento. Para isso, considera-se um eletrodo hemisférico enterrado em um solo homogêneo e um conjunto de superfícies também hemisféricas por onde passa uma corrente elétrica (Figura 4).

Figura 4 – Modelo de solo homogêneo aproximado por fatias.



Fonte: adaptado de [1].

Além disso, quanto maior a superfície, menor será a resistência associada a respectiva superfície, de modo que [1]:

$$R_1 > R_2 > R_3 > \dots > R_n \quad (2.2)$$

sendo, R_1 a resistência associada à menor área (mais próxima do eletrodo) e as demais, estando associadas às respectivas áreas à medida que se afasta do eletrodo. Assim, a resistência do aterramento é definida pela soma das resistências associadas a cada uma das superfícies, como indicado na equação (2.3) [1].

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.3)$$

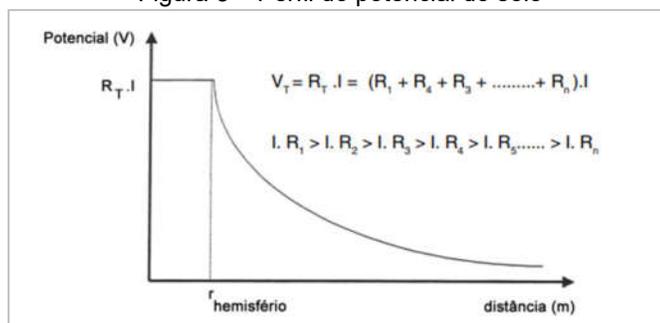
onde, R_g é a resistência de aterramento [Ω] e R_1, R_2, \dots, R_n , são os valores das resistências de cada superfície do solo [Ω].

A corrente elétrica que flui através do eletrodo, se distribui radialmente, sendo de igual valor para cada superfície (em direção ao infinito), o que garantirá que haja potenciais estabelecidos no solo. A tensão em cada superfície é determinada pela equação (2.4), decrescendo conforme se afasta do eletrodo, dado que o valor das resistências também decresce.

$$\Delta V_i = R_i \cdot I \quad (2.4)$$

Assim, quanto mais próximo do eletrodo, maior será a variação do potencial (Figura 5). Essa condição, também é válida para qualquer outro tipo de arranjo [1].

Figura 5 – Perfil do potencial do solo



Fonte: retirado de [1]

2.4 Aspectos de segurança em aterramentos elétricos

Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma determinada diferença de potencial, haverá a circulação da corrente elétrica, resultando em efeitos diversos para o indivíduo. Um primeiro aspecto fundamental é que tais efeitos são efetivamente determinados pela corrente e seu percurso pelo corpo humano, não apenas do nível do potencial que a originou. Devem ser avaliados muitos fatores como, percurso no corpo, intensidade e tempo de duração do choque, tipo de onda, frequência da corrente, valor da diferença de potencial, além das condições orgânicas do indivíduo [1].

No dimensionamento de um aterramento elétrico, é imprescindível a observância dos padrões de segurança, garantindo que as tensões produzidas, em virtude das correntes de falha, estejam dentro dos limites máximos permissíveis para as tensões de toque (*touch*) e de passo (*step*) [9].

Os potenciais toleráveis de passo e de toque são estabelecidos em função do tempo de eliminação do defeito (t) e da resistividade da camada superficial do solo. O tempo t será escolhido de forma conservativa, em consonância com a filosofia de proteção adotada, além das especificidades de cada equipamento de proteção em uso. Consideram-se dois casos:

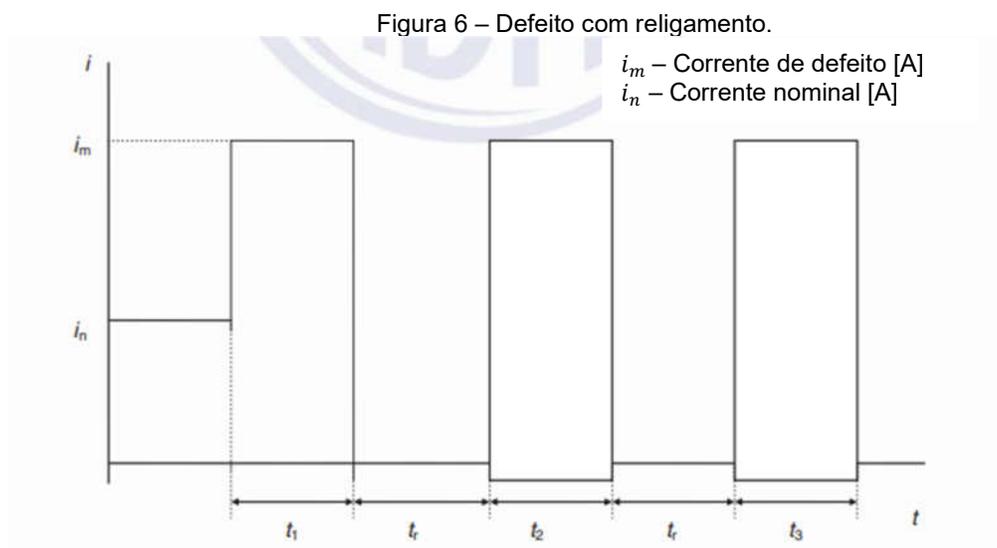
- Defeitos com duração determinada pelo sistema de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chcd}), conforme equação (2.6);
- Defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chcd}), conforme Tabela 2 [3].

A corrente de choque de curta duração é a corrente máxima, de não fibrilação cardíaca, isto para 99,5% das pessoas de 50 kg, num intervalo $0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$ [3]:

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.5)$$

onde, I_{chcd} é a corrente de choque de curta duração em ampères [A], e o valor de tempo t que é duração do choque é estabelecido pelo tempo máximo de eliminação da falta, baseado no dispositivo de proteção.

Caso haja um religamento automático para $t_r \leq 0,5 s$, em que t_r é tempo de religamento em segundos, o tempo a ser considerado deverá ser igual à soma dos tempos das faltas inicial e subsequentes, e caso $t_r > 0,5 s$, então o será considerado o maior tempo t registrado (Figura 6) [3].



Fonte: adaptado de [3].

A corrente de choque de longa duração é provocada por uma tensão de toque ou passo, por causa de uma corrente de defeito de longa duração. A I_{chcld} permissível será aquela que circula pelo corpo humano sem que provoque fibrilação (Tabela 2) [3].

Tabela 2 – Limites de corrente elétrica suportados pelos seres humanos

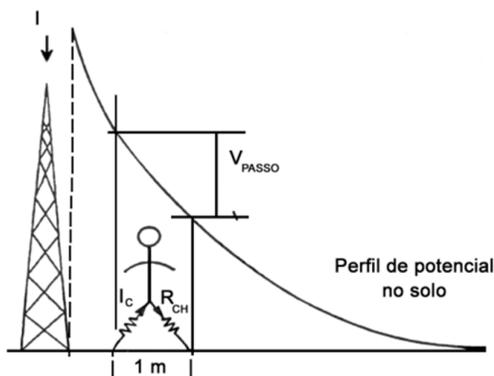
Corrente limite de largar de longa duração (I_{chcld})		
Porcentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99,5%	9 mA	6 mA
50%	16 mA	10,6 mA

Fonte: adaptado de [3]

2.4.1 Tensão de passo

Tensão de passo pode ser conceituada como a máxima diferença de potencial entre os pés, considerando uma distância de 1 m. Uma pessoa poderia estar submetida a tensão de passo (Figura 7), eventualmente, por estar próximo a região do aterramento, durante um fluxo de corrente através do mesmo [1].

Figura 7 – Representação gráfica da tensão de passo.



Fonte: retirado de [1].

Pode-se equacionar a máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano, em volts [V], conforme [3]:

$$E_p = [R_{ch} + 2 \cdot (R_p \cdot R_{mp})] \cdot I_{chcd} \quad (2.6)$$

onde

R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como 1000 Ω ;

R_p é a resistência própria de cada pé em relação ao terra remoto, em ohms [Ω];

R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés, em ohms [Ω];

I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração que é admissível pelo corpo humano, em ampères [A]. As resistências própria e mútua dos pés são dadas por [3]:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) \cdot C \quad (2.7)$$

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2\pi R_p} \right) \quad (2.8)$$

onde, b é igual a 0,083 m (raio do disco metálico – modelo estabelecido para o pé humano); d_p é a distância entre os dois pés, 1 m; ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo [$\Omega \cdot m$]. Caso não haja recobrimento, considera-se a resistividade da camada superficial do solo; C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, h_s [m], conforme equação:

$$C = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (2.9)$$

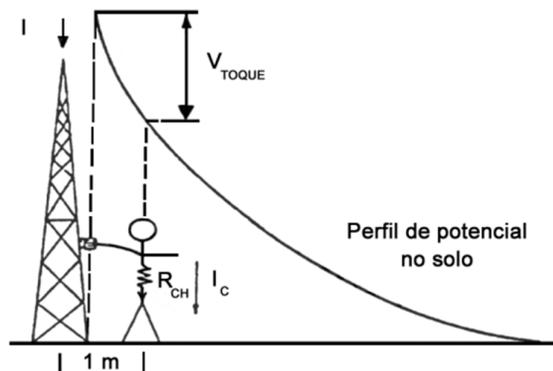
Conforme ABNT NBR 15751 [3], deve-se considerar R_{mp} desprezível, frente a R_p , obtendo-se [3]:

$$E_p = (R_{ch} + 6 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot I_{chcd} \quad (2.10)$$

2.4.2 Tensão de toque

Tensão de toque é definida como a máxima diferença de potencial entre mão e pés a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente nas proximidades do aterramento, havendo contato com alguma parte metálica ligada aos seus eletrodos, durante o fluxo de corrente elétrica através do aterramento, considerando que os pés estão afastados 1 m da estrutura tocada (ver Figura 8) [1].

Figura 8 – Representação gráfica tensão de toque.



Fonte: retirado de [1].

A máxima tensão de toque permissível (E_{tcd}) pelo corpo humano é dada, em volts (V), nos casos de curta duração pela equação [3]:

$$E_{tcd} = R_{ch} + \left(\frac{R_p + R_{mp}}{2} \right) \cdot I_{chcd} \quad (2.11)$$

ou, ainda:

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot I_{chcd} \quad (2.12)$$

e longa duração:

$$E_{tld} = R_{ch} + \left(\frac{R_p + R_{mp}}{2} \right) \cdot I_{chld} \quad (2.13)$$

e, por fim:

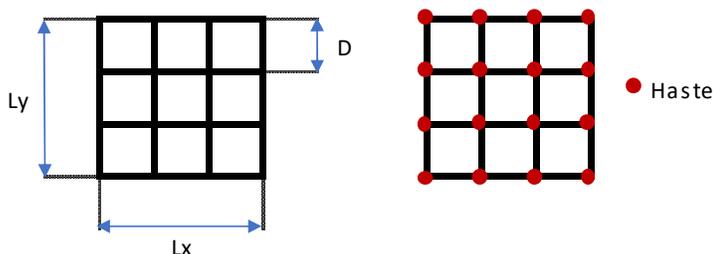
$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot I_{chld} \quad (2.14)$$

em que, E_{tcd} é máxima tensão de toque em curta duração em volts [V]; E_{tld} é máxima tensão de toque em longa duração em volts [V]; I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères [A]; I_{chld} é a máxima corrente de longa duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères [A]; e R_{ch} , R_p , R_{mp} , conforme legendas da equação (2.6).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O dimensionamento de malhas de aterramento visa atender critérios de tensão de toque e passo máximas, bem como prover caminhos para o escoamento de cargas a terra. O dimensionamento dos retículos e das hastes de aterramento de maneira adequada são imprescindíveis para que sejam atendidos os padrões mínimos de segurança. O padrão IEEE 80-2013, que é base para a NBR ABNT 15751, norteia o desenvolvimento desta seção, onde serão realizados estudos visando avaliar as condições ótimas para o uso dos retículos, além de apresentar avaliação da efetividade do uso de hastes nas malhas de aterramento. Visando otimizar a obtenção dos resultados, foram desenvolvidas planilhas no *Microsoft Excel*, onde foram inseridas as equações necessárias para as análises. As malhas em estudo são do tipo reticuladas de lados $L_x = L_y$ [m], com retículos quadrados de lado D [m] e hastes de 3 m de comprimento, quando utilizadas, instaladas nos nós e perpendicularmente à malha (ver Figura 9).

Figura 9 – Representação das malhas de aterramento com e sem hastes.



Fonte: próprio autor.

Os critérios que estabelecem as tensões de toque e de passo máximas permitíveis estão diretamente associadas à resistividade e à espessura da camada superficial, conforme equação (2.9). Considerando uma pessoa de massa 70 kg, corrente de curta duração, com tempo de atuação do sistema de proteção em 0,5 s, as equações (2.10) e (2.12) assumem os seguintes formatos, respectivamente [4]:

$$E_p = (R_{ch} + 6 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} \quad (3.1)$$

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} \quad (3.2)$$

A resistência de malha, é determinada por [4]:

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (3.3)$$

onde, R_g é a resistência da malha [Ω]; ρ é a resistividade do solo [Ωm]; L_T é o comprimento total de condutores da malha [m]; h é a profundidade da malha [m]; A é a área ocupada pela malha [m^2].

Avaliando as equações (3.1) e (3.2), verifica-se que o valor da tensão de passo máxima permissível é sempre maior que a da tensão de toque máxima permissível. Assim, no projeto da malha, basta que o critério da tensão de toque máxima seja atendido, por ser mais conservativo.

A tensão de toque desenvolvida na ocorrência de uma falta, segundo [4], é determinada por

$$E_t = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (3.4)$$

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (3.5)$$

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} \right) + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right) \quad (3.6)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (3.7)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (3.8)$$

$$K_h = \sqrt{1 + h} \quad (3.9)$$

onde, E_t é a tensão de toque desenvolvida [V]; I_G é a parcela da corrente de curto-circuito que é direcionada para a malha; L_M é o comprimento efetivo de eletrodo enterrado [m]; L_r é o comprimento individual das hastes [m]; L_R é o comprimento total da hastes [m]; L_C é comprimento total dos condutores horizontais à malha [m]; ρ é a resistividade aparente do solo [Ωm]; K_m é o fator geométrico; K_i é o fator de correção que leva em consideração a não-uniformidade da dispersão de corrente pelos condutores da malha; K_{ii} é fator de correção que leva em consideração condutores na periferia da malha; h é a profundidade da malha [m]; n é o número de condutores paralelos em uma determinada direção; d é o diâmetro do condutor da malha [m]; D é o espaçamento entre dois condutores paralelos (lado de um retículo quadrado) [m].

Nas análises desenvolvidas, foram consideradas malhas quadradas ($L_x = L_y$) com comprimentos laterais variando entre 20 m e 120 m e cabos condutores de seção 70mm^2 enterrados 0,5 m no solo, camada superficial de brita ($2500 \Omega m$) com ~ 10 cm de espessura.

3.1 Limites de corrente versus resistividade do solo

A corrente de malha máxima é determinada na condição em que $E_t = E_{tcd}$. Assim, essa corrente é determinada a partir da equação (3.4), de modo que

$$I_G = \frac{L_M \cdot E_{tcd}}{\rho \cdot K_m \cdot K_i} \quad (3.10)$$

Na Tabela 3, são apresentadas as correntes de malha limites para resistividades de solo variando entre $100 \Omega m$ e $10000 \Omega m$. Em todos os casos, o retículo é de 2 m ($D = 2m$). Os resultados indicam que, quanto maior for a dimensão da malha, maior será as capacidades de corrente das malhas. Isso acontece devido ao aumento do comprimento dos cabos da malha, L_M . De modo contrário, à medida que a resistividade do solo aumenta, a capacidade da corrente diminui. Isso ocorre porque a tensão máxima de toque irá, naturalmente, aumentar com a resistividade. Dessa forma, que a tensão de toque limite seja mantida, é necessário que a corrente de malha diminua. Como exemplo, cita-se a malha de $60m \times 60m$, que apresenta $I_{G(\rho=100 \Omega)} = 13,5 \text{ kA}$, e

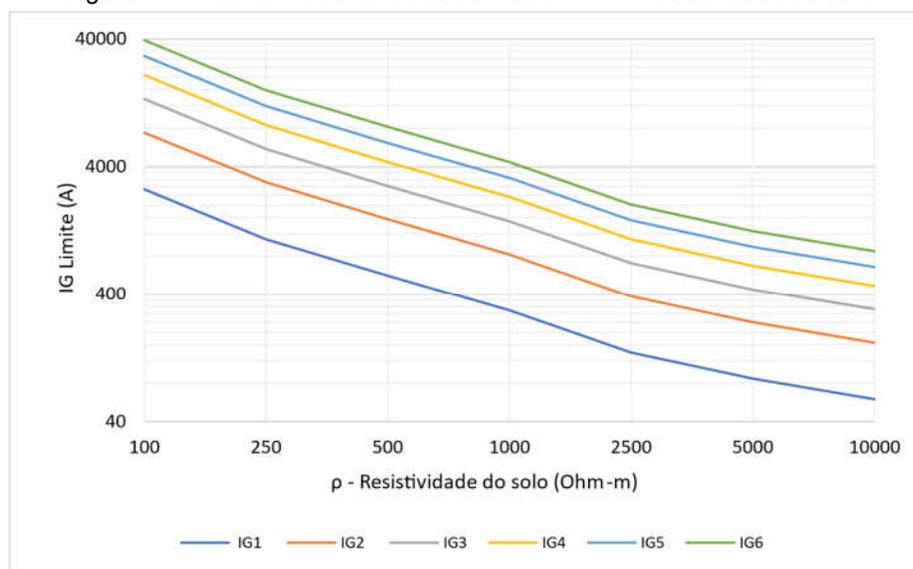
$I_{G(\rho=10k\Omega)} = 303,4 A$, evidenciando uma redução da capacidade de corrente em, aproximadamente, 98%. Portanto, corrente de malha limite é altamente dependente da resistividade do solo. Diante disso, é possível que a instalação de uma SE de alta potência e alta capacidade de correntes de curto-circuito seja inviabilizada nos casos em que o solo local apresenta alta resistividade. Assim, dependendo do nível da corrente de falha esperado para uma nova SE, é recomendado que a definição do local de instalação da SE seja acompanhada de uma sondagem geométrica do solo local.

Tabela 3 – Malhas com condutores igualmente espaçados, D=2 m, e profundidade h=0,5 m

	20x20 [m ²]	40x40 [m ²]	60x60 [m ²]	80x80 [m ²]	100x100 [m ²]	120x120 [m ²]
ρ [$\Omega \cdot m$]	I_{G1} [A]	I_{G2} [A]	I_{G3} [A]	I_{G4} [A]	I_{G5} [A]	I_{G6} [A]
100	2675,5	7407,1	13508,2	20834,5	29346,8	39049,8
250	1090,4	3018,8	5505,3	8491,2	11960,4	15914,8
500	562,0	1556,0	2837,7	4376,7	6164,9	8203,2
1000	297,9	824,6	1503,8	2319,5	3267,1	4347,4
2500	139,3	385,8	703,6	1085,1	1528,5	2033,9
5000	86,5	239,5	436,8	673,7	948,9	1262,7
10000	60,1	166,4	303,4	468,0	659,2	877,1

Fonte: próprio autor

Na Figura 10 são apresentadas, na forma gráfica, as curvas indicando a variação da corrente-limite (I_G) versus a resistividade do solo (ρ), considerando malhas de dimensões variando entre 20 m e 120 m de lado. As curvas evidenciam como I_G reduz muito rapidamente com o aumento da resistividade. Indicam, também, que quanto maior a dimensão da malha, maior é a capacidade de corrente I_G , contudo, esse aumento acontece em proporções cada vez menores. Assim, a aumento da malha devido a uma expansão de uma SE ativa não implica, necessariamente, em aumento significativo na sua capacidade de corrente I_G .

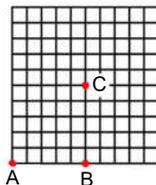
Figura 10 – Gráfico Corrente-limite de malha *versus* resistividade de solo

Fonte: próprio autor.

3.2 Efetividade das hastes na otimização da tensão de toque (aumento da corrente máxima de malha com o uso de hastes nas malhas - ganho)

Como apresentado na seção 3.1, os limites máximos de corrente de malha são fortemente influenciados pela resistividade do solo. Em certos casos, sobretudo devido ao constante aumento das cargas, surge a necessidade de readequação da capacidade de operação de uma SE. Diante disso, torna-se necessário readequar, também, a malha de aterramento. A dificuldade surge, por exemplo, quando a SE está localizada em áreas urbanas adensadas. Neste caso, como o aumento da dimensão da malha, muitas vezes, não é possível, torna-se necessário avaliar o uso de alguma outra técnica, como o uso de hastes conectadas à malha. Esse, também, pode ser um procedimento adotado em projetos de novas SEs, na expectativa de expansões futuras. Assim, nesta seção, o uso deste recurso é avaliado. Para fins de análises, serão consideradas hastes de $\frac{3}{4}$ " , 3 m de comprimento, instaladas em cada um dos nós da malha. Na Figura 11 é apresentada uma malha de 20m x 20m, com retículos de 2 m, destacando-se apenas as hastes das posições A, B e C, perpendiculares à malha.

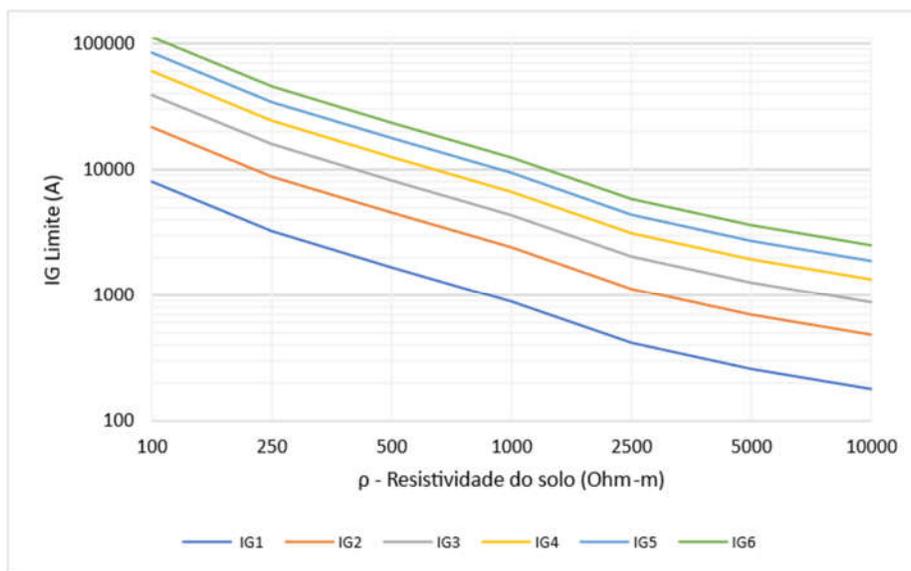
Figura 11 – Hastes instaladas em todos nós da malha, com destaque para as posições A, B e C.



Fonte: feito pelo autor

Na Figura 12, são apresentadas as curvas indicando a variação da corrente-limite (I_G) versus a resistividade do solo (ρ), considerando malhas de dimensões variando entre 20 m e 120 m de lado. As curvas indicam a mesma tendência de variação observada em malhas sem hastes, havendo um aumento da corrente com o aumento da malha e redução da corrente com o aumento da resistividade. Além disso, quanto maior a dimensão da malha, maior é a capacidade de corrente I_G , contudo, esse aumento acontece em proporções cada vez menores.

Figura 12 – Gráfico das correntes-limites *versus* resistividade de solo para malhas, possuindo cabos de 70 mm² e hastes de 3/4" e comprimento 3 m, retículo fixo de 2x2 m²



Fonte: próprio autor.

Na Tabela 4 são apresentados os valores das correntes considerando as várias dimensões de malhas e de resistividade do solo. Esses valores serão utilizados para determinar o ganho com o uso das hastes em relação a malha sem hastes. A análise é feita a seguir.

Tabela 4 – Correntes máximas, I_G , considerando 1 haste por nó.

	20x20 [m ²]	40x40 [m ²]	60x60 [m ²]	80x80 [m ²]	100x100 [m ²]	120x120 [m ²]
ρ [$\Omega \cdot m$]	I_{G1} [A]	I_{G2} [A]	I_{G3} [A]	I_{G4} [A]	I_{G5} [A]	I_{G6} [A]
100	7988,4	21596,2	39016,5	59884,6	84152,8	111906,7
250	3255,7	8801,6	15901,3	24406,1	34296,7	45607,8
500	1678,1	4536,7	8196,2	12580,0	17678,0	23508,2
1000	889,3	2404,3	4343,7	6666,9	9368,6	12458,4
2500	416,1	1124,8	2032,1	3119,0	4383,0	5828,5
5000	258,3	698,3	1261,6	1936,4	2721,1	3618,6
10000	179,4	485,1	876,4	1345,1	1890,2	2513,6

Fonte: próprio autor.

Para fins de análise, será considerado o parâmetro denotado ganho (G_a), determinado pela relação entre as correntes máximas de malha com hastes e correntes máximas de malhas sem hastes, conforme equação abaixo:

$$G_a = \frac{I_{G'}}{I_G} \quad (3.11)$$

em que G_a é o ganho; $I_{G'}$ é a corrente máxima de malha com hastes [A], I_G é a corrente máxima de malha sem hastes [A]. Os resultados apresentados na Tabela 5 são para uma malha com lado de 120 metros. Os dados indicam que o ganho é independente da resistividade do solo, ou seja, mantém-se constante qualquer que seja a resistividade do solo.

Tabela 5 – Ganho para resistividades variadas, malha de 120x120 m², retículo de 2x2 m²

ρ [$\Omega \cdot m$]	$I_{G'}$ [A]	I_G [A]	Ganho
100	111906,7	39049,8	2,86
250	45607,8	15914,8	2,86
500	23508,2	8203,2	2,86
1000	12458,4	4347,4	2,86
2500	5828,5	2033,9	2,86
5000	3618,6	1262,7	2,86
10000	2513,6	877,1	2,86

Fonte: próprio autor.

Dado que o ganho não varia com a resistividade, é feita, então, uma avaliação da influência da dimensão da malha, mantendo-se constante a resistividade do solo (ver Tabela 6). Os resultados mostram que o ganho é constante, qualquer que seja a dimensão da malha. De modo geral, então, as hastes aumentam a capacidade de corrente da malha, contudo, esse aumento é determinado por um fator constante, independentemente da dimensão da malha e da resistividade do solo.

Tabela 6 – Ganho de corrente variando conforme dimensões de malha.
Retículo fixo de 2x2 m², $\rho=100\Omega\cdot m$

Dimensões em m ²	Ganho
20x20	2,985
40x40	2,915
60x60	2,888
80x80	2,874
100x100	2,867
120x120	2,865

Fonte: próprio autor.

3.3 Efetividade das hastes baseada na dimensão dos retículos

Nesta seção é realizada uma verificação comparativa de efetividade. A comparação acontece tendo como referência malhas com retículos de 2 m. As demais malhas apresentam retículos maiores, além de terem hastes de aterramento instaladas. O objetivo é identificar a equivalência entre essas malhas. Os casos avaliados consideram as malhas de 20x20 m² e 80x80 m². É importante ressaltar que, o posicionamento das hastes não exerce influência direta na capacidade de corrente, apenas o comprimento total das hastes, conforme equação (3.10).

Na Tabela 7, são apresentados os resultados para a malha de 20x20 m², onde $I_{G(2m)}$ é a corrente-limite para a malha com retículo de 2 m e sem nenhuma haste. Nas demais colunas da tabela, são apresentadas as correntes-limite para os casos em que os retículos são, respectivamente, de 3 m ($I_{G(3m)}$), 4 m ($I_{G(4m)}$) e 5 m ($I_{G(5m)}$), com hastes instaladas em todos os nós. Realizando o cálculo do ganho de corrente, percebe-se que há duas situações mais vantajosas, em capacidade, que a opção de retículo de 2 m. Para D=3 m, há um aumento da capacidade em 71%, enquanto para D=4 m o aumento é de 18%. Já para D=5 m, há uma redução de 10% da capacidade

em relação a D=2 m. Como o objetivo identificar uma equivalência de efetividade relativa à malha de D=2m sem hastes, foram realizados ajustes a partir das malhas de retículos 3 e 4 m, variando a dimensão dos retículos.

Tabela 7 – Correntes máximas de malha de 20x20 m², comparação entre o caso sem hastes (D=2 m) e os com uma haste por nó (D=3 m, D=4 m, D=5 m).

ρ [$\Omega \cdot m$]	Sem hastes	Com hastes		
	$I_G (D=2 m)$ [A]	$I_G (D=3 m)$ [A]	$I_G (D=4 m)$ [A]	$I_G (D=5 m)$ [A]
100	2675,45	4565,82	3157,32	2413,15
250	1090,39	1860,81	1286,78	983,48
500	562,03	959,14	663,26	506,93
1000	297,85	508,31	351,50	268,65
2500	139,35	237,81	164,45	125,69
5000	86,51	147,64	102,09	78,03
10000	60,09	102,56	70,92	54,20
Ganho:		1,71	1,18	0,90

Fonte: próprio autor.

Utilizando análises iterativas, verificou-se que uma malha com D=4,6 m e uma haste por nó apresenta a mesma efetividade de uma malha com D=2 m sem hastes, como mostram os dados apresentados na Tabela 8. Os cálculos foram realizados utilizando a equação (3.10), variando-se iterativamente o parâmetro D e sendo considerado uma haste por nó. Foram, também, considerados os seguintes parâmetros: D=4,6 m; d=0,01 m; h=0,5 m; n=5,34; $K_{ii}=1$ (uso de hastes) e $\rho=100 \Omega \cdot m$. Nessas condições, foram obtidos os seguintes valores:

- $K_h = \sqrt{1 + 0,5} = 1,22$
- $K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 1,43$
- $K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{4,6^2}{16 \cdot 0,5 \cdot 0,01} \right) + \frac{(4,6+2 \cdot 0,5)^2}{8 \cdot 4,6 \cdot 0,01} - \frac{0,5}{4 \cdot 0,01} \right) + \frac{1}{\sqrt{1+0,5}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot 5 - 1)} \right) = 0,75$
- $L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R = 213,91 + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{3}{28,28} \right) \right] \cdot 85,79 = 358 m$

Dessa forma, a corrente de malha I_G é de 2633,33 A (ver Tabela 8). Além disso, para essas condições, o número de hastes é 30 (número de nós). Para as demais

resistividades consideradas na Tabela 8, os procedimentos adotados foram os mesmos. Nessa tabela, também são apresentados os custos de cada uma das malhas, em valores atuais obtidos na internet. É importante observar que a malha de retículo maior ($D=4,6$ m) seria mais vantajosa financeiramente, havendo redução de custo de ~25%, considerando apenas o comprimento total dos cabos condutores (L_C) e das hastes de aterramento (L_R). Para o cálculo do custo foram considerados cabos de aço cobreado de 70 mm^2 , com o valor de R\$40,00/m e as hastes de aterramento de $\frac{3}{4}$ " x 3 m, por R\$ 150,00 a unidade. Portanto, ambas apresentam a mesma efetividade, contudo, a malha com retículos de 4,6 m e 30 hastes tem um custo de material menor.

Tabela 8 - Correntes máximas de malha de $20 \times 20 \text{ m}^2$, comparação entre o caso sem hastes ($D=2$ m) e o com hastes ($D=4,6$ m).

	Sem hastes	Com hastes
ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]	$I_G (D=2 \text{ m})$ [A]	$I_G (D=4,6 \text{ m})$ [A]
100	2675,45	2663,33
250	1090,39	1085,45
500	562,03	559,49
1000	297,85	296,50
2500	139,35	138,72
5000	86,51	86,12
10000	60,09	59,82
Ganho:		1,00
L_C [m]	440,00	217,80
L_R [m]	0,00	90,00 (30 un)
Custo (R\$)	17600,00	13162,00

Fonte: próprio autor.

Uma outra forma de analisar a efetividade das hastes, é manter os retículos todos fixos, e variar apenas a quantidade de hastes nas malhas de retículos de 3 m, 4 m e 5 m. Variando o número de hastes, será possível determinar as situações em que cada malha atenda aos mesmos padrões de tensão de toque e corrente de malha máxima, tais como a malha de retículos de $2 \times 2 \text{ m}^2$. É possível dimensionar malhas de retículos maiores e com adição de hastes de aterramento (Tabela 9), por um custo ainda inferior aos da malha de $I_G (D=4,6 \text{ m})$ da Tabela 8. Isso pode ser observado na Tabela 9, em que o ajuste direto do número de hastes, para um retículo fixo de lado igual a 5 m, mostrou ser a opção menos custosa, em aproximadamente 30%, em re-

lação à malha de retículo de lado igual a 2 m (Tabela 9). O que mostra ser mais eficiente, nessas condições, variar diretamente o número de hastes a realizar o ajuste fino das dimensões dos retículos, via planilha de cálculo.

Tabela 9 - Correntes máximas de malha de 20x20 m², comparação entre o caso sem hastes (D=2 m) e os com hastes (D=3 m, D=4 m, D=5 m), após variação do número de hastes.

	Sem hastes	Com hastes		
ρ [$\Omega \cdot m$]	$I_G (D=2 m)$ [A]	$I_G (D=3 m)$ [A]	$I_G (D=4 m)$ [A]	$I_G (D=5 m)$ [A]
100	2675,45	2666,25	2666,56	2674,25
250	1090,39	1086,63	1086,76	1089,90
500	562,03	560,10	560,17	561,78
1000	297,85	296,83	296,87	297,72
2500	139,35	138,87	138,89	139,29
5000	86,51	86,21	86,23	86,47
10000	60,09	59,89	59,90	60,07
Ganho:		1,00	1,00	1,00
L_C [m]	440,00	306,67	240,00	200,00
L_R [m]	0,00	27 (9 hastes)	69 (23 hastes)	96 (33 hastes)
Custo (R\$)	17600,00	13616,67	13050,00	12800,00

Fonte: próprio autor.

Ao considerar uma malha de área total 80x80 m², superior à do exemplo anterior, observa-se que ao variar retículos e número de hastes, visando ganho de corrente, permanece mais vantajoso financeiramente, a utilização de retículos superiores a D=2 m, após inserção de hastes de aterramento (Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12). Isso pode ser observado, através da malha com hastes de retículo D=8 m, que apresenta diminuição de custo em aproximadamente 40%, em relação a malha inicial de retículo D=2 m (Tabela 12).

Tabela 10 - Correntes máximas de malha de 80x80 m², comparação entre o caso sem hastes (D=2 m) e os com hastes, uma haste por nó (D=3 m, D=4 m, D=5 m, D=6 m, D=7 m, D=8m).

	Sem hastes	Com hastes					
ρ [$\Omega \cdot m$]	$I_G (D=2 m)$ [A]	$I_G (D=3 m)$ [A]	$I_G (D=4 m)$ [A]	$I_G (D=5 m)$ [A]	$I_G (D=6 m)$ [A]	$I_G (D=7 m)$ [A]	$I_G (D=8 m)$ [A]
100	20834,55	32186,13	22020,38	16871,36	13777,80	11713,39	10235,02
250	8491,17	13117,54	8974,46	6875,96	5615,18	4773,82	4171,31
500	4376,71	6761,34	4625,82	3544,17	2894,30	2460,63	2150,07
1000	2319,48	3583,24	2451,50	1878,27	1533,86	1304,04	1139,45
2500	1085,14	1676,38	1146,91	878,73	717,60	610,08	533,08

	Sem hastes	Com hastes					
ρ [$\Omega \cdot m$]	$I_G (D=2 m)$ [A]	$I_G (D=3 m)$ [A]	$I_G (D=4 m)$ [A]	$I_G (D=5 m)$ [A]	$I_G (D=6 m)$ [A]	$I_G (D=7 m)$ [A]	$I_G (D=8 m)$ [A]
5000	673,70	1040,76	712,04	545,55	445,51	378,76	330,96
10000	467,98	722,95	496,61	378,96	309,47	263,10	229,89
Ganho:		1,54	1,06	0,49	0,66	0,56	0,49

Fonte: próprio autor.

Tabela 11 - Correntes máximas de malha de 80x80 m², comparação entre o caso sem hastes (D=2 m) e os com hastes (D=3 m, D=4 m, D=5 m), após variação do número de hastes.

	Sem hastes	Com hastes		
ρ [$\Omega \cdot m$]	$I_G (D=2 m)$ [A]	$I_G (D=3 m)$ [A]	$I_G (D=4 m)$ [A]	$I_G (D=5 m)$ [A]
100	20834,55	20898,98	20787,24	20805,46
250	8491,17	8517,43	8471,89	8479,32
500	4376,71	4390,25	4366,77	4370,60
1000	2319,48	2326,66	2314,22	2316,24
2500	1085,14	1088,50	1082,68	1083,63
5000	673,70	675,78	672,17	672,76
10000	467,98	469,42	466,91	467,32
Ganho:		1,00	1,00	1,00
L_C [m]	6560,00	4426,67	3360,00	2720,00
L_R [m]	0,00	510 (170 hastes)	1130 (377 hastes)	1470 (490 hastes)
Custo (R\$):	262400,00	202566,67	190900,00	182300,00

Fonte: próprio autor.

Tabela 12 - Correntes máximas de malha de 80x80 m², comparação entre o caso sem hastes (D=2 m) e os com hastes (D=6 m, D=7 m, D=8 m), após variação do número de hastes.

	Sem hastes	Com hastes		
ρ [$\Omega \cdot m$]	$I_G (D=2 m)$ [A]	$I_G (D=6 m)$ [A]	$I_G (D=7 m)$ [A]	$I_G (D=8 m)$ [A]
100	20834,55	20872,40	20917,19	20828,92
250	8491,17	8506,60	8524,85	8488,88
500	4376,71	4384,66	4394,07	4375,53
1000	2319,48	2323,70	2328,68	2318,86
2500	1085,14	1087,12	1089,45	1084,85
5000	673,70	674,92	676,37	673,52
10000	467,98	468,83	469,83	467,85
Ganho:		1,00	1,00	1,00
L_C [m]	6560,00	2293,33	1988,57	1760,00
L_R [m]	0,00	1680 (560 hastes)	1815 (605 hastes)	1890 (630 hastes)
Custo (R\$):	262400,00	175733,33	170292,86	164900,00

Fonte: próprio autor

Após a inserção de hastes, além de obter equivalência entre malhas, no que se diz respeito a capacidade de corrente, também haverá a diminuição de custos e materiais (Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12), o que é consideravelmente importante e vantajoso para aplicações industriais.

3.4 Dimensões ótimas dos retículos

A análise de dimensões ótimas de retículos visa compreender, graficamente, como obter de forma excelente o lado [m] do retículo quadrado que melhor compõe o *design* da malha, sem hastes, respeitando os limites de tensão de toque, tendo como entradas a corrente máxima de malha [A] e a resistividade do solo [$\Omega \cdot m$]. Para esse estudo, foram plotadas curvas que mostram o comportamento de malhas de dimensões variando entre 20x20 e 120x120, em m².

O procedimento de análise das curvas para nortear o projeto de malha de aterramento depende diretamente do estudo da resistividade do solo e dos dados de corrente. Caso o valor de corrente de malha calculado seja superior às disponíveis em determinado gráfico, faz-se necessário verificar as curvas de uma malha de maior dimensão. Feito isso, é possível realizar a escolha das dimensões de malha corretas e o melhor retículo cruzando os dois dados de entrada, determinando-se, assim, a curva que corresponde ao comprimento do retículo quadrado. Assim, para o caso em que $I_G = 3000 \text{ A}$ e $\rho = 250 \Omega m$, verifica-se que uma malha de 20x20 m² (Figura 13) não atenderia para nenhuma das possibilidades listada de retículos, sendo necessário utilizar uma malha de dimensões imediatamente superiores, como a de 40x40 m², com um retículo de D=2 m (Figura 14). Observa-se também que para todas as malhas ensaiadas que quanto maior a dimensão do retículo, menor a capacidade de corrente.

Figura 13 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 20x20 m²

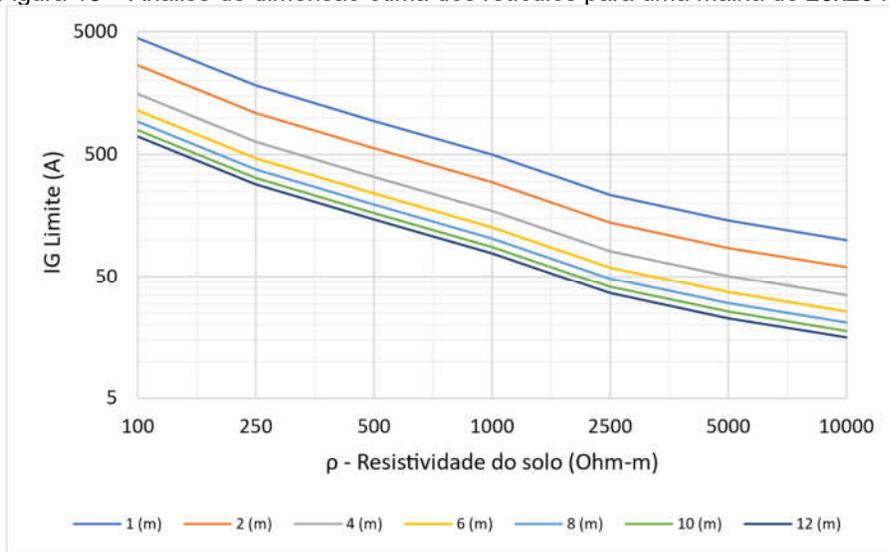


Figura 14 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha 40x40 m²

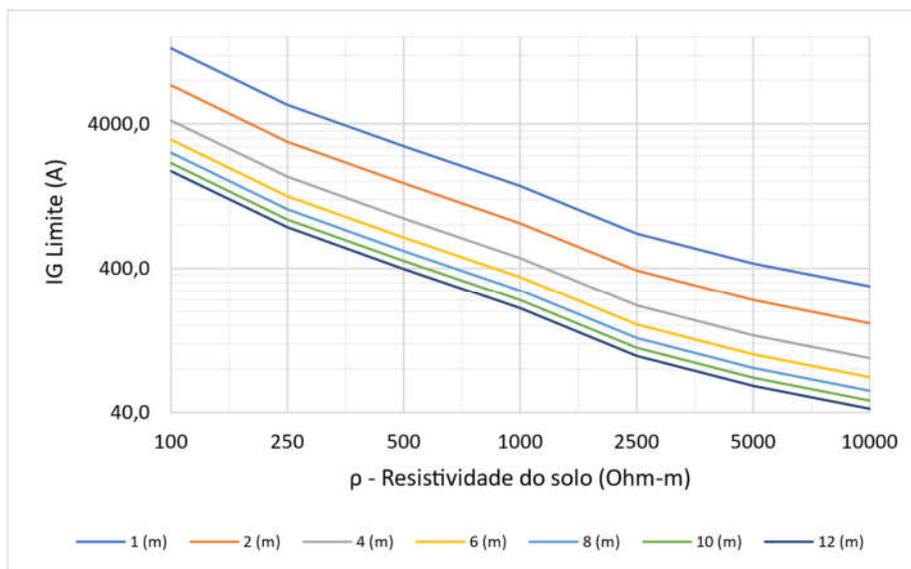
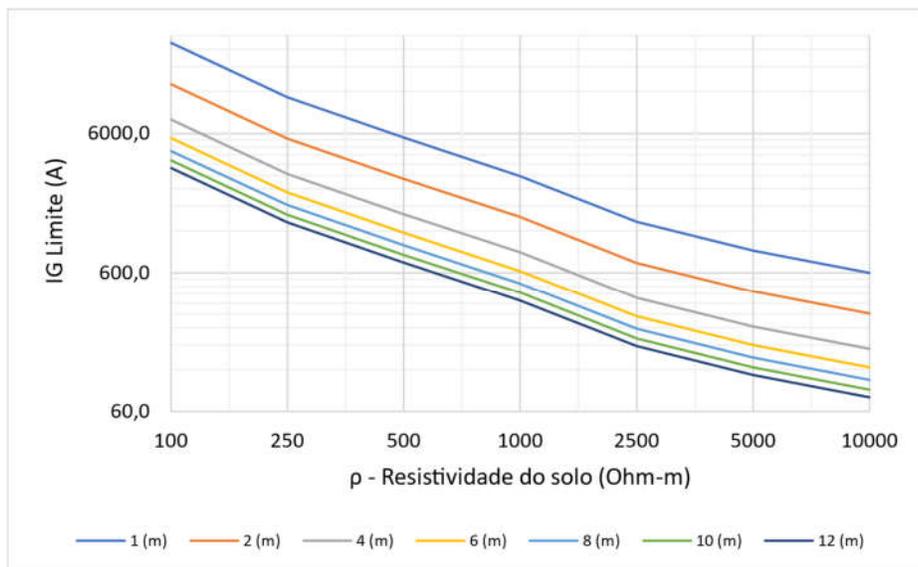
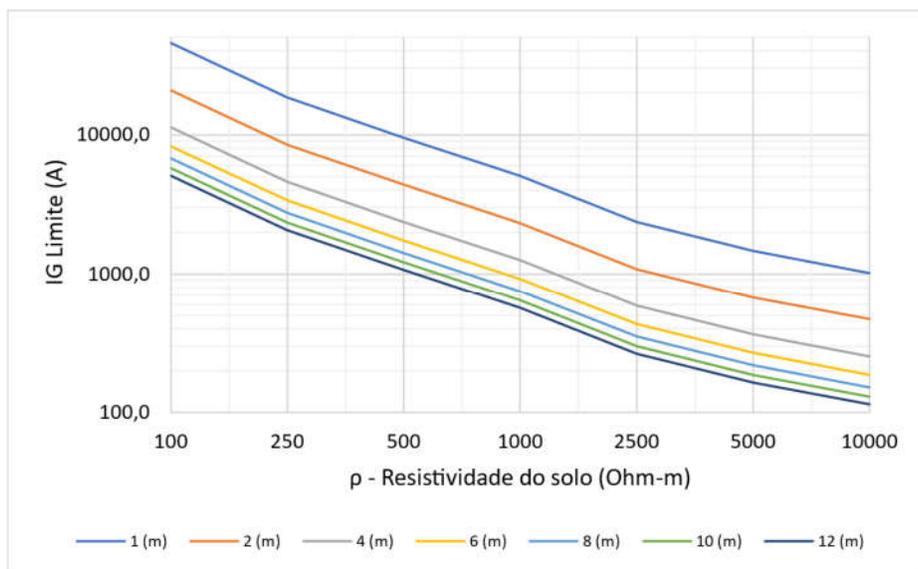


Figura 15 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 60x60 m²



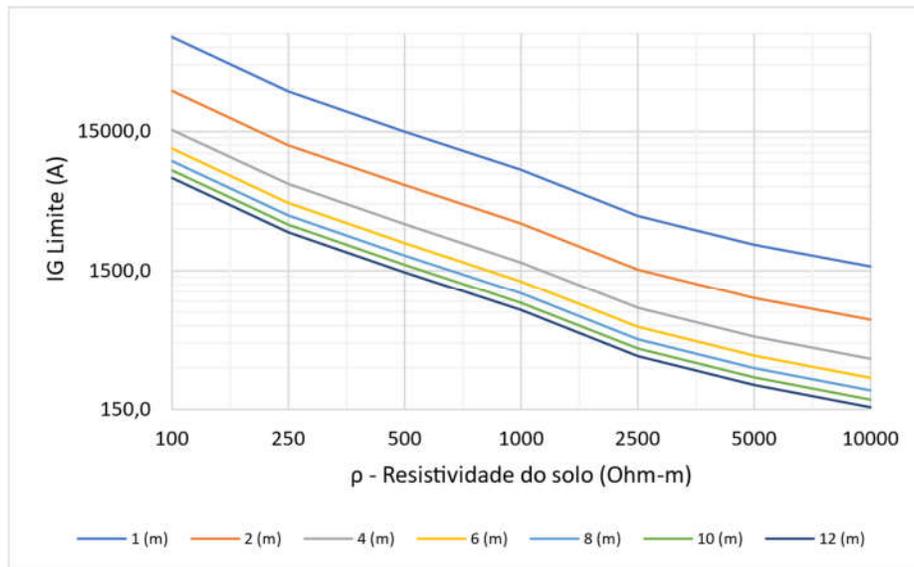
Fonte: próprio autor.

Figura 16 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 80x80 m²



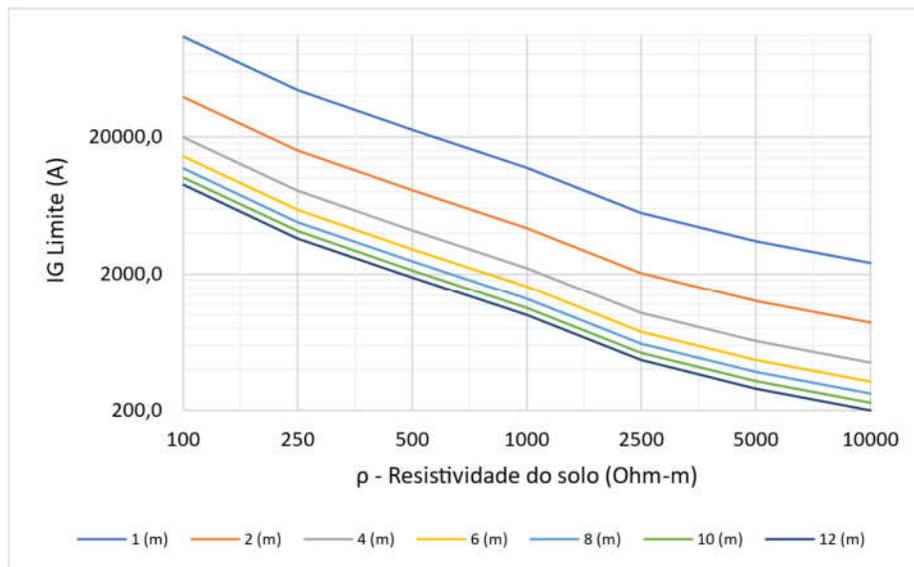
Fonte: próprio autor.

Figura 17 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 100x100 m²



Fonte: próprio autor.

Figura 18 – Análise de dimensão ótima dos retículos para uma malha de 120x120 m²



Fonte: próprio autor.

Reproduzindo as mesmas entradas de corrente de malha e resistividade do solo do exemplo anterior, para todos os gráficos dessa seção (Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18) percebe-se que o aumento da área total da malha

terá influência importante na dimensão dos retículos obtidos (Tabela 13), uma vez que o aumento da área total promove também o aumento da capacidade de corrente, conforme visto na seção 3.1, o que permite para áreas totais maiores, a obtenção de retículos de dimensões maiores (Tabela 13).

Tabela 13 – Retículos obtidos para as entradas $I_g=3000A$, $\rho=250\Omega\cdot m$.

Dimensões de malha	Retículos obtidos (D)
20x20 m ²	Não atende a nenhuma condição
40x40 m ²	2 m
60x60 m ²	4 m
80x80 m ²	8 m
100x100 m ²	12 m
120x120 m ²	12 m

Fonte: próprio autor.

3.5 Variação da resistência de aterramento de malhas com e sem hastes

Neste estudo, foram calculadas as resistências de malhas quadradas, com lados variando entre 20 m e 120 m, respectivamente. As resistências de malha foram calculadas considerando cabos condutores de 70 mm² e hastes de aterramento de 3/4" x 3 m. Conforme Tabela 14 e Tabela 15, as resistências são inversamente proporcionais às dimensões de malha e diretamente proporcionais às resistividades do solo. As resistências de malha com hastes ($R_{g'}$), uma haste por nó, apresentam variações desprezíveis em relação às malhas sem hastes (R_g). Isso alarma a necessidade de não limitar a análise e desenvolvimento de um projeto de malha de aterramento aos valores de resistência de malha. A colocação de hastes de aterramento pode aumentar consideravelmente a capacidade de corrente, conforme visto na Tabela 5, mas a efetividade dessas não poderá ser totalmente evidenciada sem que haja o cálculo da corrente máxima de malha e as análises de tensão máxima de toque e passo.

Tabela 14 – Resistências de malha com e sem hastes de aterramento.

ρ [$\Omega \cdot m$]	20x20 m ²		40x40 m ²		60mx60 m ²	
	R_g [Ω]	R_g' [Ω]	R_g [Ω]	R_g' [Ω]	R_g [Ω]	R_g' [Ω]
100	2,351	2,248	1,148	1,122	0,759	0,747
250	5,877	5,620	2,870	2,804	1,897	1,868
500	11,755	11,241	5,740	5,609	3,794	3,736
1000	23,509	22,482	11,480	11,217	7,588	7,471
2500	58,773	56,204	28,699	28,043	18,971	18,678
5000	117,546	112,409	57,398	56,087	37,942	37,356
10000	235,091	224,817	114,796	112,174	75,885	74,711

Fonte: próprio autor.

Tabela 15 - Resistências de malha com e sem hastes de aterramento.

ρ [$\Omega \cdot m$]	80x80 m ²		100x100 m ²		120x120 m ²	
	R_g [Ω]	R_g' [Ω]	R_g [Ω]	R_g' [Ω]	R_g [Ω]	R_g' [Ω]
100	0,567	0,560	0,452	0,448	0,376	0,373
250	1,417	1,400	1,130	1,120	0,940	0,933
500	2,833	2,800	2,261	2,239	1,880	1,866
1000	5,667	5,600	4,521	4,479	3,761	3,731
2500	14,167	14,001	11,303	11,197	9,402	9,329
5000	28,333	28,002	22,606	22,394	18,805	18,657
10000	56,666	56,004	45,213	44,788	37,610	37,314

Fonte: próprio autor.

Em análise da Tabela 16 e da Tabela 17 , verifica-se que para uma malha de área total fixa, a variação das dimensões dos retículos e inserção de hastes de aterramento, provocam variações desprezíveis nos valores de resistência de malha. Conforme exemplos da Tabela 16 e da Tabela 17, quando o ganho de corrente for unitário, as diferentes configurações da malha não só terão mesmos níveis de corrente máxima de malha, como também mesmos níveis de resistência, atendendo aos limites de tensão de toque (2.4), e por conseguinte, tensão de passo [4].

Tabela 16 – Resistências calculadas, malha com dimensões 80 x 80 m².

ρ [$\Omega \cdot m$]	Sem hastes		Com hastes	
	$R_g (D=2 m)$ [Ω]	$R_g' (D=3 m)$ [Ω]	$R_g' (D=4 m)$ [Ω]	$R_g' (D=5 m)$ [Ω]
100	0,567	0,572	0,574	0,575
250	1,417	1,429	1,434	1,438
500	2,833	2,858	2,868	2,876
1000	5,667	5,717	5,737	5,753

	Sem hastes	Com hastes		
ρ [$\Omega \cdot m$]	$R_g (D=2 m)$ [Ω]	$R_{g'} (D=3 m)$ [Ω]	$R_{g'} (D=4 m)$ [Ω]	$R_{g'} (D=5 m)$ [Ω]
2500	14,167	14,292	14,342	14,382
5000	28,333	28,584	28,684	28,764
10000	56,666	57,167	57,369	57,528
Ganho:		1,00	1,00	1,00
L_C [m]	6560,00	4426,67	3360,00	2720,00
L_R [m]	0,00	510 (170 hastes)	1130 (377 hastes)	1470 (490 hastes)
Custo (R\$):	262400,00	202566,67	190900,00	182300,00

Fonte: próprio autor.

Tabela 17 - Resistências calculadas, malha com dimensões 80 x 80 m².

	Sem hastes	Com hastes		
ρ [$\Omega \cdot m$]	$R_g (D=2 m)$ [Ω]	$R_{g'} (D=6 m)$ [Ω]	$R_{g'} (D=7 m)$ [Ω]	$R_{g'} (D=8 m)$ [Ω]
100	0,567	0,577	0,578	0,579
250	1,417	1,441	1,444	1,447
500	2,833	2,883	2,889	2,894
1000	5,667	5,766	5,777	5,788
2500	14,167	14,415	14,443	14,470
5000	28,333	28,829	28,885	28,941
10000	56,666	57,658	57,771	57,881
Ganho:		1,00	1,00	1,00
L_C [m]	6560,00	2293,33	1988,57	1760,00
L_R [m]	0,00	1680 (560 hastes)	1815 (605 hastes)	1890 (630 hastes)
Custo (R\$):	262400,00	175733,33	170292,86	164900,00

Fonte: próprio autor.

Por fim, a inserção de hastes também promoverá a diminuição de custos e materiais (Tabela 15, Tabela 16), o que se mostra uma solução interessante comercialmente, e sobretudo, sustentável.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

É imprescindível ao projeto e desenvolvimento de malhas de aterramento, o estudo de fatores que venham a otimizar a compreensão de tais instalações, sobretudo a observância dos padrões de segurança vigentes, seguindo todos os procedimentos alinhados pela associação brasileira de normas técnicas.

Neste trabalho, foram apresentados estudos de dimensão ótima de retículos e da efetividade das hastes para malhas de aterramento. É importante ressaltar que não se pode reduzir o conceito de segurança, qualidade e capacidade de uma malha, a unicamente a resistência de aterramento como principal fator de projeto, a análise é muito mais complexa.

Nos estudos efetuados, é possível enxergar que para o atendimento aos padrões normatizados, é de suma importância a análise não só sob o horizonte da resistência, como também dos níveis máximos permitidos de tensão de passo e de toque, diretamente vinculados à corrente máxima de malha, bem como a resistividade do solo e o comprimento total dos condutores a serem empregados na construção da malha.

No dimensionamento de malhas de aterramentos, a capacidade de corrente é inversamente proporcional às dimensões do retículo, ou seja, quanto maiores os retículos, menor a capacidade. Contudo, a adição de hastes de aterramento à malha aumenta consideravelmente a corrente limite. Sendo o ganho de corrente, que é razão entre as correntes com e sem o uso de hastes, respectivamente, constante em relação à resistividade do solo.

A resistência de malha é diretamente proporcional à resistividade do solo e inversamente proporcional à área total da malha (retículo fixo). Vale ressaltar que pouco varia com a inserção de hastes, contudo, verifica-se que a colocação dessas pode garantir o desenvolvimento de malhas com retículos de dimensões maiores, por um custo consideravelmente mais baixo, em relação a malhas de retículos de área inferior, ainda sim, cumprindo os padrões requeridos de segurança.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se:

- análise de efetividade de hastes de aterramento, quando submetidas a correntes de altas frequências;

- obtenção de dimensões ótimas de retículos via código implementado em *software*;

REFERÊNCIAS

1. FILHO, S. V. **Aterramentos Elétricos**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2002.
2. SEGANTINI, R. C. **Comportamento de Malhas de Aterramento de Subestação de Energia frente a Descargas Atmosféricas: Ênfase na Avaliação de Técnicas de Melhoria do Desempenho Impulsivo por meio de Múltiplos Pontos de Injeção de Corrente**. Belo Horizonte-MG: CEFET-MG, 2018.
3. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistemas de aterramentos de subestações - Requisitos. **ABNT NBR 15751**, jul. 2013.
4. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Safety in AC Substation. **IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000)**, p. 92-142, Dec. 2013.
5. COUTINHO, B. R. D. M. **Avaliação de Malhas de Aterramento de Subestações: uma abordagem probabilística do risco de fatalidades**. [S.l.], p. 116. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2021.
6. ALÍPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional)**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educacao Tecnologica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2008.
7. LINS POMPEU, J.; DE CAMARGO WITT, R. N. **Análise da distribuição de corrente em malhas de aterramento ante a utilização de terrômetros de alta frequência**. UFPR. Curitiba, p. 81. 2018.
8. BARROS LIMA, A. **Método para o cálculo da impedância de aterramento de torres de linhas de transmissão**. UFMG. Belo Horizonte, p. 124. 2010.
9. COSTA, P. **PROJETO E DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO (ESTUDO DE CASO)**. Recife-PE: DEE/UFPE, Abr.2021.