

Joana Ventura da Silva

**ANÁLISE DE MALHAS DE ATERRAMENTO ATRAVÉS DE
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Joana Ventura da
Análises de malhas de aterramento através de
simulação numérica / Joana Ventura da Silva ;
orientador, Adroaldo Raizer, 2018.
74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

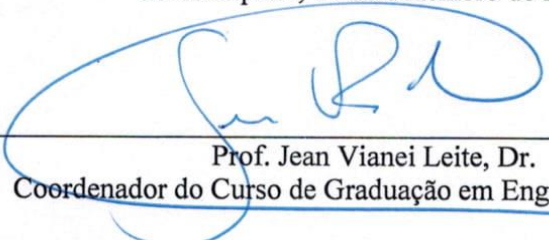
1. Engenharia Elétrica. 2. Resistência de
aterramento. 3. Simulação numérica. 4. Sistemas de
aterramento. I. Raizer, Adroaldo. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Joana Ventura da Silva

Análise de Malhas de Aterramento Através de Simulação Numérica

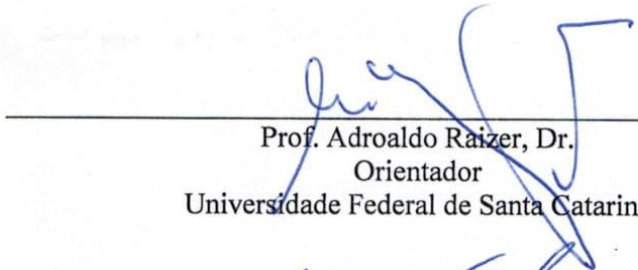
Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 14 de dezembro de 2018.

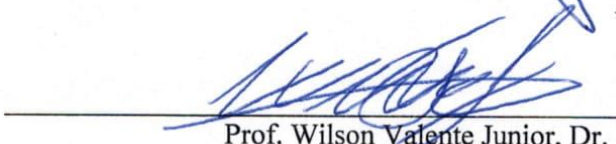


Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Wilson Valente Junior, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Marcos Telló, Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família, em especial aos meus pais, João e Inês, aos meus irmãos, Lucas e João Vitor, e a minha madrinha Paula, por todo o apoio e compreensão durante essa jornada.

Agradeço especialmente ao meu professor e orientador Dr. Adroaldo Raizer, por acreditar no meu potencial, pelos ensinamentos durante a graduação e pela atenção na execução desse trabalho e durante todo o meu período de Iniciação Científica no MagLab/Gemco.

Agradeço a minha amiga Larissa Rosa Ávila, que desde o começo da graduação me acompanha. Muito obrigada por todos os momentos que passamos juntas.

Agradeço a minha amiga Kassia Toccolini, por todas as nossas discussões, amizade, e por se fazer sempre presente.

Agradeço especialmente ao Mikael Pontes Fonseca, pelo auxílio despendido na realização de ensaios e pela sua contribuição a este trabalho.

Agradeço a toda a equipe do MagLab, em especial a Taiane Pereira dos Reis e Thiago Schmoeller. Taiane, muito obrigada por nossas conversas e momentos distração. Thiago, muito obrigada pelo auxílio e por nossas discussões a respeito deste trabalho.

Agradeço também ao Polo, em especial a equipe do Polomag, por todo o aprendizado, pela amizade e pelas boas risadas.

Agradeço aos amigos que me acompanham desde o tempo do ensino médio no IFSC, Lara, Tauã, Luiz Fernando e Marcio, muito obrigada por essa amizade, onde o tempo não interfere.

Por fim, agradeço aos meus professores e aos meus amigos que fiz durante a graduação, em especial a minha turma, 13.2, por fazerem dessa etapa um pouquinho mais fácil.

Faça as coisas o mais simples que você puder,
porém não se restrinja às mais simples.
(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de uma malha de aterramento de acordo com sua resistência. O aterramento está atrelado a dois fatores fundamentais: o desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado, e a questões de segurança para seres vivos e proteção de equipamentos. Para isso, o sistema de aterramento deve possuir uma capacidade de condução elevada, uma configuração que possibilite o controle do gradiente de potencial elétrico e um baixo valor de impedância ou resistência de aterramento. Algumas aplicações necessitam que a resistência de aterramento possua um valor muito reduzido, como é o caso da utilização em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, em subestações de energia. Nesta última aplicação, o estudo e análise da malha de aterramento é uma etapa fundamental para o desempenho do sistema. Uma malha eficiente não é apenas responsável por viabilizar um caminho com baixa impedância para a proteção do sistema elétrico em casos de surto, mas também garantir que as tensões de toque e de passo estejam dentro de limites estabelecidos por norma. Nesse contexto, uma boa forma de analisar a resistência de aterramento é através da modelagem numérica. Neste trabalho, com o auxílio do *software* de simulação ANSYS Maxwell 3D, é determinada a resistência de um sistema de aterramento através do método de elementos finitos (MEF). Os resultados obtidos através das simulações são comparados a métodos analíticos e ao método da modelagem por linhas de transmissão (TLM).

Palavras-chave: Resistência de Aterramento. Simulação Numérica. Sistemas de Aterramento.

ABSTRACT

This work aims to analyze the performance of a ground mesh according to its resistance. Grounding is related to two fundamental factors: the performance of the system to which the grounding is connected, and safety issues for living beings and equipment protection. In order to ensure its quality, the grounding system must have a high conduction capacity, a configuration that allows the control of the electrical potential gradient and a low impedance ground resistance value. Some applications require that the ground resistance be very low, as is the case for use in lightning protection systems, and in power substations. In this last application, the study and analysis of the ground mesh is a fundamental step for the performance of the system. An efficient mesh is not only responsible for enabling a path with low impedance to protect the electrical system in outbreak cases, but also to ensure that the touch and step voltages are within set limits. In this context, a good way of analyzing ground resistance is through numerical modeling. In this work, the resistance of a grounding system is determined by the finite element method (FEM) with the aid of a simulation software. The results obtained through simulations are compared to the analytical methods and the transmission line method (TLM).

Keywords: Grounding Resistance. Numerical Simulation. Grounding Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solo estratificado – (a) perfil real (b) perfil aproximado.....	30
Figura 2 - Arranjo de Wenner	31
Figura 3 - Penetração na profundidade “a”	32
Figura 4 - Resistividade do solo	33
Figura 5 - Resistividade e espessura da primeira camada	34
Figura 6 - Estratificação do solo.....	34
Figura 7 - Malha de aterramento dos estudos de caso 1 e 5	36
Figura 8 - Malhas de aterramento dos estudos de caso 2 e 3.....	37
Figura 9 - Malha de aterramento do caso 4	37
Figura 10 - Método da queda de potencial	38
Figura 11 - Curva característica da resistência de aterramento para eletrodos colineares.....	39
Figura 12 - Modelo de estratificação do solo implementado	48
Figura 13 - Excitação no centro da malha	49
Figura 14 - <i>Sink</i> na primeira camada do solo	50
Figura 15 - <i>Sink</i> na segunda camada do solo.....	50
Figura 16 - Casca semiesférica (dV)	51
Figura 17 - Malha de elementos finitos	54
Figura 18 - Malha de elementos finitos em corte	54
Figura 19 - Malha de elementos finitos na malha de aterramento.....	55
Figura 20 - Malha de elementos finitos na casca semiesférica.....	55
Figura 21 - Campo elétrico no estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m..	57
Figura 22 - Densidade de corrente no estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m.....	57
Figura 23 - Curva de resistência no estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m.....	58
Figura 24 - Campo elétrico no estudo de caso 2: Malha 5 m x 10 m....	59
Figura 25 - Densidade de corrente no estudo de caso 2: Malha 5 m x 10 m.....	59
Figura 26 - Curva de resistência no estudo de caso 2: Malha 5 m x 10m	60
Figura 27 - Campo elétrico no estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m .	60
Figura 28 - Densidade de corrente no estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m.....	61
Figura 29 - Curva de resistência no estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m.....	61
Figura 30 - Campo elétrico no estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m	62
Figura 31 - Densidade de corrente no estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m	62

Figura 32 - Curva de resistência no estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m	63
Figura 33 - Campo elétrico no estudo de caso 5: Malha 10 m x 10 m..	64
Figura 34 - Densidade de corrente no estudo de caso 5: Malha 10 m x 10 m	64
Figura 35 - Curva de resistência Estudo de caso 5: 10 m x 10 m	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da estratificação do solo.....	42
Tabela 2 - Medidas da resistência de aterramento.....	43
Tabela 3 - Resistências de aterramento calculadas.....	43
Tabela 4 - Erro relativo percentual dos valores obtidos pelos métodos de cálculo em relação ao valor medido	44
Tabela 5 - Dados das simulações	56
Tabela 6 - Resistência de aterramento simulada pelo MEF	65
Tabela 7 - Erro relativo percentual dos valores obtidos pelo MEF em relação ao valor medido	66
Tabela 8 - Comparação entre métodos	68
Tabela 9 - Erro relativo percentual entre o MEF e os demais métodos.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FEM	<i>Finite Element Method</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
TLM	<i>Transmission Line Method</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
ρ	Resistividade	Ωm
a	Distância entre as hastes no método de Wenner	m
b	Profundidade das hastes no método de Wenner	m
ρ_m	Resistividade média	Ωm
ρ_a	Resistividade aparente	Ωm
ρ_1	Resistividade da primeira camada	Ωm
ρ_2	Resistividade da segunda camada	Ωm
α	Fator α no cálculo da resistividade	-
r	Raio do círculo com área equivalente a da malha de aterramento	m
a_1	Profundidade da primeira camada do solo	m
h	Profundidade da malha de aterramento	m
A	Área ocupada pela malha de aterramento	m^2
R	Resistência de aterramento	Ω
L_t	Comprimento total dos condutores	m
L_c	Comprimento total dos cabos	m
L_h	Comprimento total das hastes	m
dA	Distância da margem da malha de aterramento ao eletrodo auxiliar de corrente no método da queda de potencial	m
dV	Distância da margem da malha de aterramento ao eletrodo de potencial no método da queda de potencial	m
R_{medido}	Resistência de aterramento medida pelo método da queda de potencial	Ω

R_{ABNT}	Resistência de aterramento calculada pelo método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013)	Ω
R_{Sverak}	Resistência de aterramento calculada pelo método de Sverak	Ω
R_{TLM}	Resistência de aterramento obtida pelo método numérico TLM	Ω
R_{MEF}	Resistência de aterramento obtida pelo método de elementos finitos	Ω
ϵ_r	Permissividade relativa	-
σ	Condutividade elétrica	S/m
N	Coefficiente da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013)	.
V	Tensão da fonte	V
t	Tempo discretizado	s
ΔV	Diferença de potencial entre a malha de aterramento e dV	V
V_{malha}	Tensão média na malha de aterramento	V
V_{dV}	Tensão média em dV	V
\mathbf{J}	Densidade superficial de corrente	A/m ²
\mathbf{E}	Campo elétrico	V/m
I	Corrente que flui entre a malha de aterramento e dA	A
ds	Parcela infinitesimal da superfície da casca semiesférica	m ²

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO E CÁLCULOS DA RESISTIVIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	29
2.1	INTRODUÇÃO	29
2.2	RESISTIVIDADE DO SOLO.....	30
2.2.1	Processo de estratificação do solo	30
2.2.1.1	Método de Wenner.....	31
2.2.1.2	Método simplificado para a estratificação do solo em duas camadas	33
2.2.1.3	Método para a definição da resistividade aparente do solo...	34
2.3	MALHAS DE ATERRAMENTO	36
2.4	PROCESSOS DE MEDIDA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	38
2.4.1	Método da queda de potencial	38
2.4.2	Métodos de cálculo para a resistência de aterramento	40
2.4.2.1	Método da resistência de aterramento aproximada da NBR 15751:2013.....	40
2.4.2.2	Método de Laurent e Nieman.....	40
2.4.2.3	Método de Sverak	41
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
2.5.1	Procedimento de estratificação do solo	42
2.5.2	Procedimentos de obtenção da resistência de aterramento	42
2.6	CONCLUSÃO	44
3	MODELAGEM DO SISTEMA DE ATERRAMENTO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	45
3.1	INTRODUÇÃO	45
3.2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	46
3.3	MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	47

3.3.1	Configuração do solo.....	47
3.3.2	Configurações da malha de aterramento	48
3.3.3	Excitações e condições de contorno.....	48
3.3.4	Modelo de cálculo utilizado	51
3.3.5	Malha de elementos finitos.....	53
3.3.6	Dados computacionais das simulações.....	55
3.3.7	Resultados das simulações	56
3.3.7.1	Estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m.....	56
3.3.7.2	Estudo de caso 2: Malha 5 m x 10 m.....	58
3.3.7.3	Estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m.....	60
3.3.7.4	Estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m.....	62
3.3.7.5	Estudo de caso 5: 10 m x 10 m.....	63
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
3.5	CONCLUSÃO.....	66
4	COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES	67
4.1	INTRODUÇÃO.....	67
4.2	COMPARAÇÕES	67
4.3	DISCUSSÕES	69
4.4	CONCLUSÃO.....	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico desperta o interesse de diversos pesquisadores, sendo fruto de longas evoluções, devido a sua importância em dois fatores fundamentais: o desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado, e as questões de segurança para seres vivos e proteção de equipamentos. (VISACRO FILHO, 2002) (ALÍPIO, 2008)

Segundo a NBR 15749:2009 (ABNT, 2009), aterramento pode ser definido como qualquer ligação intencional, por meio de um condutor elétrico, entre uma parte eletricamente condutiva e a terra. O aterramento pode ser constituído de formas variadas dependendo da sua aplicação. Dentro das configurações comumente utilizadas, podem-se destacar as hastes verticais, os cabos contrapesos e as malhas de aterramento. (OLIVEIRA, 2016)

As malhas de aterramento serão o foco deste trabalho e possuem papel importante nas subestações de energia elétrica. Seu estudo e análise é algo que traz grandes preocupações aos engenheiros, pois é a etapa inicial do processo de construção de uma subestação. (PIRES, 2016)

O objetivo da malha de aterramento, assim como nas demais configurações, é controlar a tensão dentro de limites prescritos em normas. Para isso, o sistema de aterramento deve fornecer um caminho para a circulação de corrente que permite a detecção de uma conexão indesejada entre condutores vivos e a terra. Esse controle diminui as interferências eletromagnéticas e permite maior segurança perante choques elétricos. Todavia, o sistema de aterramento deve possuir uma capacidade de condução elevada, uma configuração que possibilite o controle do gradiente de potencial elétrico e um baixo valor de impedância. (ABNT, 2009) (SOUZA JR, 2007) (VISACRO FILHO, 2002)

A oposição à passagem de cargas elétricas a terra é chamada de impedância de aterramento. Em alguns casos, em baixas frequências, pode-se ter um comportamento resistivo, onde pode-se designar a impedância de aterramento como resistência de aterramento. (VISACRO FILHO, 2002)

Algumas aplicações necessitam que o valor da resistência de aterramento possua um valor muito reduzido, como é o caso da utilização em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, conforme apresentado em (ALÍPIO, 2008), e em subestações de energia, de acordo com (PIRES, 2016).

Em subestações de energia a resistência de aterramento é um dos principais fatores para a análise da segurança elétrica. Ela não é apenas responsável para estabelecer um caminho com baixa impedância para a proteção do sistema elétrico em casos de surto, mas também para garantir que as tensões de toque e de passo estejam dentro de limites estabelecidos. Portanto, faz-se necessário que um bom sistema de aterramento não possua um valor de resistência elevado. (PIRES, 2016) (ABNT, 2013)

Os valores da impedância e resistência de aterramento variam principalmente de acordo com a resistividade do solo e com a geometria da malha de terra. (VISACRO FILHO, 2002)

A resistência de aterramento é composta por três componentes fundamentais: a resistência própria dos condutores, a resistência de contato entre os condutores e a terra adjacente, e a resistência da terra circunvizinha. Este último componente é o principal responsável para a determinação do valor da resistência de aterramento, já que os demais possuem geralmente um valor muito reduzido ou desprezível. (VISACRO FILHO, 2002)

O solo, em geral, é um mau condutor elétrico, possuindo resistividade elevada quando comparado a condutores convencionais. Nos solos mais comuns, o valor da resistividade pode variar entre 5 Ωm a 20.000 Ωm . Além da geologia do solo, há fatores que influenciam na sua resistividade, como: umidade, salinidade, temperatura, compactação e acidez. (SOUZA JR, 2007)

Nesse contexto, uma boa forma de analisar a resistência de aterramento é através da modelagem numérica. Este trabalho tem como objetivo a determinação da resistência de um sistema de aterramento através do método de elementos finitos (MEF). Para isso será utilizado o *software* de simulação eletromagnética, ANSYS Maxwell. Os resultados obtidos através das simulações serão comparados à métodos analíticos e ao método da modelagem por linhas de transmissão (TLM).

Os valores de resistividade obtidos experimentalmente, de acordo com o modelo proposto pela NBR 7117:2012 (ABNT, 2012), serão utilizados no modelo de simulação. As simulações serão realizadas considerando cinco estudos de caso com quatro configurações de malhas de aterramento.

As malhas de aterramento serão formadas apenas por cabos condutores, não havendo hastes. Todas as malhas serão constituídas por cabos de cobre nu com seção de 95 mm² e o espaçamento constante de 2,5 m entre os cabos. Todas estarão enterradas a uma altura de 0,5 m da superfície do solo. A malha do estudo de caso 1 possui dimensão 10 m x

10 m, totalizando uma área de 100 m². A malha do estudo de caso 2 possui dimensão 5 m x 10 m, totalizando uma área de 50 m². A malha do estudo de caso 3 possui dimensão 2,5 m x 10 m, portanto com uma área de 25 m². E o estudo de caso 4 possui uma malha de dimensão 5 m x 5 m, com uma área de 25 m². O estudo de caso 5 possui dimensões semelhantes ao apresentado no caso 1, porém foi realizado em um local distinto.

O desenvolvimento deste trabalho foi delimitado da seguinte forma:

No Capítulo 2 serão apresentadas as metodologias utilizadas para a medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, além do método adotado para a medição da resistência de aterramento e seus resultados. Também, neste capítulo, são apresentados três métodos analíticos, o método previsto na norma NBR 15751:2013 (ABNT, 2013), o método de Laurent e Nieman e o método de Sverak.

O Capítulo 3 apresenta a simulação numérica utilizando o método de elementos finitos para a modelagem do sistema de aterramento. Neste capítulo são descritos o modelo utilizado, as condições de contorno, o método de cálculo e os resultados obtidos.

O Capítulo 4 é destinado à discussões e comparações entre os resultados obtidos nos Capítulos 2 e 3. Esses resultados também são comparados ao método da modelagem por linhas de transmissão (TLM).

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais deste trabalho.

2 METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO E CÁLCULOS DA RESISTIVIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

2.1 INTRODUÇÃO

Uma das etapas para a construção de uma malha de aterramento em uma subestação de energia elétrica é o estudo do solo, pois ele é o principal responsável pelo valor da resistência de aterramento. Nos sistemas de aterramento há três componentes fundamentais em sua resistência: a resistência própria dos condutores, a resistência de contato entre os condutores e a terra adjacente, e a resistência da terra circunvizinha. Os primeiros dois componentes possuem geralmente um valor muito reduzido ou desprezível, resultando na importância da componente provinda do solo. (VISACRO FILHO, 2002)

Uma forma de caracterizar o solo é através da sua estratificação. Como o solo, geralmente, não é homogêneo, formulações foram propostas para representá-lo. Os modelos usuais consistem em dividir o solo em camadas, com resistividades e profundidades distintas, para a obtenção de uma resistividade aparente que caracterize o solo como homogêneo. Diversos métodos estão previstos na NBR 7117:2012 (ABNT, 2012) para a estratificação do solo. Neste trabalho será utilizado o método Wenner.

A resistência de aterramento pode ser medida conforme os métodos apresentados na NBR 15749:2009 (ABNT, 2009). No presente trabalho será utilizado o método da queda de potencial para medir a resistência de cinco malhas de aterramento distintas. A NBR 15751:2013 (ABNT, 2013), que apresenta os requisitos de um sistema de aterramento em uma subestação, mostra modelos de cálculo para a resistência de aterramento utilizando a resistividade aparente obtida através da estratificação do solo.

Este capítulo, além de apresentar as metodologias utilizadas para a medição da resistividade e estratificação do solo, também apresentará as malhas de aterramento analisadas e o método de medição da resistência de aterramento. Os resultados obtidos para a resistência de aterramento serão comparados a dois métodos de cálculo, o método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) e o método de Sverak.

2.2 RESISTIVIDADE DO SOLO

A NBR 7117:2012 (ABNT, 2012) e (SOUZA JR, 2007) apresentam o conceito de resistividade elétrica do solo (ρ) como a resistência que pode ser vista entre as faces opostas de um volume cúbico, de arestas unitárias, composto por material retirado do solo. Portanto, sua unidade de medida é “ Ωm ”.

A resistividade do solo sofre influência de diversos fatores, tais como: composição do solo, salinidade, temperatura, compactação e acidez. O solo, em geral, é um mau condutor elétrico, possuindo resistividade elevada quando comparado aos condutores convencionais. Nos solos mais comuns, o valor da resistividade pode variar entre 5 Ωm a 20.000 Ωm . (SOUZA JR, 2007)

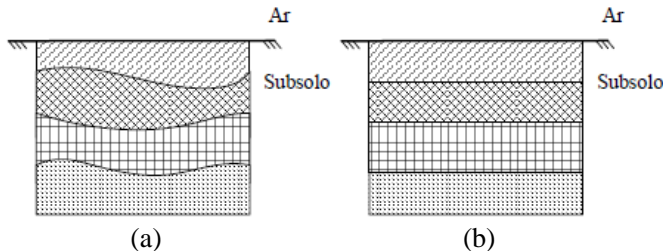
A medição da resistividade é realizada diretamente no local onde a malha de aterramento será construída e pode ser dada através de uma relação entre a resistência medida no solo. Para medir a resistência, basicamente se faz circular uma corrente entre dois eletrodos e é medido seu potencial elétrico. (PIRES, 2016)

2.2.1 Processo de estratificação do solo

Em um modelo de sistema de aterramento é necessária a informação da resistividade do solo. Uma forma de realizar uma aproximação do valor real é através da estratificação do solo.

O solo, geralmente, não é homogêneo, sendo formado por diversas camadas que possuem resistividades distintas. Estas camadas podem variar tanto na sua forma quanto na sua disposição, porém na maior parte dos casos, possuem um perfil horizontal e paralelo à superfície, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Solo estratificado – (a) perfil real (b) perfil aproximado



Fonte: (PIRES, 2016)

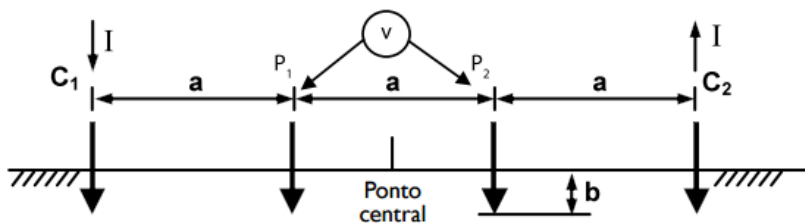
A estratificação do solo baseia-se nesse perfil para dividi-lo em camadas, determinando a resistividade de cada uma e a sua altura.

Existem diversos métodos para se obter a estratificação do solo, porém neste trabalho será utilizado apenas o método de Wenner.

2.2.1.1 Método de Wenner

No arranjo de Wenner, quatro eletrodos são igualmente espaçados em linha reta, cravados na mesma profundidade, e conectados a um terrômetro com cabos de cobre isolados. O primeiro (C1) e o último eletrodo (C2) são os eletrodos de corrente, e os eletrodos centrais (P1 e P2) são os eletrodos de tensão. O terrômetro faz com que uma corrente circule entre os terminais C1 e C2, e então mede a diferença de potencial entre os terminais P1 e P2. Com estes valores o equipamento consegue indicar o valor da resistência. O arranjo pode ser observado na Figura 2.

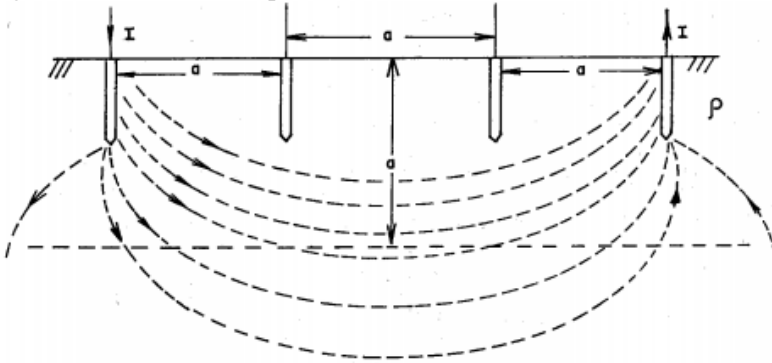
Figura 2 - Arranjo de Wenner



Fonte: (ABNT, 2012)

O método de Wenner considera que aproximadamente 58% da distribuição de corrente que passa entre as hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes. Como a corrente que atinge uma área maior que “ a ” também possui uma área de dispersão grande, este efeito pode ser desconsiderado. Portanto, o Método de Wenner considera que o valor da resistência lida no aparelho é relativo a uma profundidade “ a ” do solo. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 2002)

Figura 3 - Penetração na profundidade “a”



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 2002)

Para realizar as medições, o espaçamento recomendado “a” entre as hastes deve ser variado nos valores: 1 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 16 m e 32 m.

A resistividade em função da distância (a) e a profundidade das hastes (b) no solo é dada pela Fórmula de Palmer, (1):

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times R}{1 + \left(2a/\sqrt{a^2 + 4b^2}\right) - \left(a/\sqrt{a^2 + b^2}\right)} \quad (1)$$

Onde:

ρ – Resistividade do solo, em ohm x metro (Ωm);

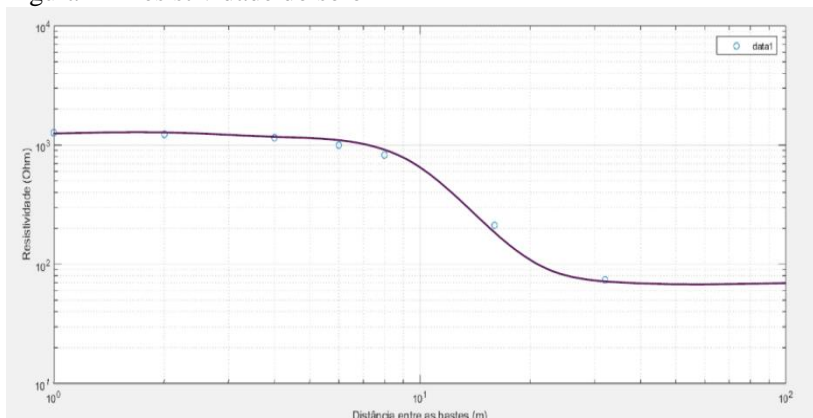
a – Distância entre as hastes, em metro (m);

b – Profundidade da haste, em metro (m);

R – Resistência lida pelo terrômetro, em ohm (Ω).

A partir dos valores calculados pela Fórmula de Palmer (1) é possível traçar um gráfico da resistividade pela distância entre as hastes, conforme o exemplo da Figura 4.

Figura 4 - Resistividade do solo



Fonte: Da autora

2.2.1.2 Método simplificado para a estratificação do solo em duas camadas

Existem diversos métodos para a obtenção da estratificação do solo, conforme apresentado pela norma NBR 7117:2012 (ABNT, 2012), dentre eles foi escolhido o método simplificado. O método simplificado considera que o solo é formado por duas camadas horizontais e paralelas a superfície, permitindo que seja calculado o valor da resistividade média e assim definindo a espessura da primeira camada.

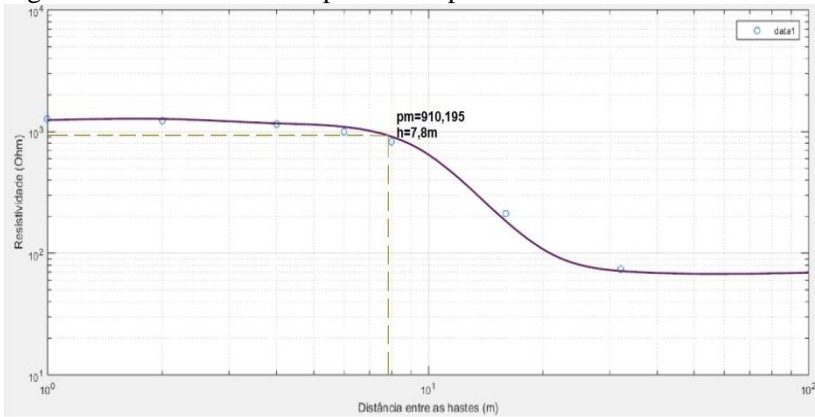
Prolongando a curva $\rho \times x$ a até encontrar o eixo das ordenadas, é encontrado o valor que indica a resistividade da camada superior do solo (ρ_1), pois a assíntota para pequenos espaços é típica da contribuição da primeira camada. (ABNT, 2012)

Traçando a assíntota e prolongando ao eixo das ordenadas, é encontrado o valor da resistividade da camada inferior do solo (ρ_2), pois para espaçamentos maiores existe a penetração de corrente na segunda camada caracterizando um solo distinto. (ABNT, 2012)

Pela relação entre a segunda e a primeira camada, através de valores tabelados na NBR 7117:2012 (ABNT, 2012), é possível determinar o fator que ao multiplicar pela resistividade da primeira camada (ρ_1), define a resistividade média do solo (ρ_m).

Com o valor de ρ_m é possível determinar a profundidade da primeira camada através do gráfico de resistividade, conforme mostra a Figura 5.

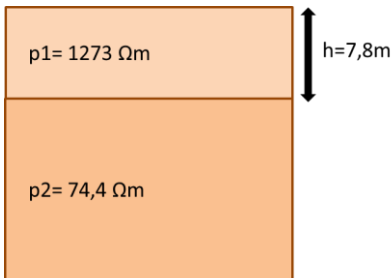
Figura 5 - Resistividade e espessura da primeira camada



Fonte: Da autora

Para este caso em exemplo, o solo pode ser caracterizado conforme a Figura 6.

Figura 6 - Estratificação do solo



Fonte: Da autora

2.2.1.3 Método para a definição da resistividade aparente do solo

Para o cálculo da resistência de uma malha de aterramento é necessária a definição da resistividade aparente do solo (ρ_a). Esta resistividade pode ser determinada a partir da resistividade da primeira camada (ρ_1), da resistividade da segunda camada (ρ_2) e da profundidade da primeira camada (a_1). (ABNT, 2013).

Primeiro é determinado o raio (r) de um círculo que possui uma área equivalente à área do sistema de aterramento, dado pela equação (2).

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

Onde:

r – Raio do círculo com área equivalente a da malha de aterramento, em metro (m);

A – Área da malha de aterramento, em metro² (m²).

Com a equação (2) e a profundidade da malha de aterramento (h), é determinado o fator α .

Caso a relação $\rho_2/\rho_1 < 1$ e $h/a_1 < 1$, deve-se utilizar a equação (3), para as demais condições a equação (4).

$$\alpha = \frac{r}{2 \times a_1 \times h} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{r}{a_1} \quad (4)$$

Onde:

α – Fator α ;

r – Raio do círculo com área equivalente a da malha de aterramento, dado pela equação (2), em metro (m);

a_1 – Profundidade da primeira camada do solo, em metro (m);

h – Profundidade da malha de aterramento, em metro (m).

A partir do valor de α obtido, com a relação entre as resistividades ρ_2/ρ_1 e com o auxílio das curvas da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) é possível determinar o coeficiente N . O valor da resistividade aparente (ρ_a) é definido pela equação (5):

$$\rho_a = N \times \rho_1 \quad (5)$$

Onde:

ρ_a – Resistividade aparente do solo, em ohm x metro (Ωm);

N – Coeficiente da norma NBR 15751:2013 (ABNT, 2013);

ρ_1 – Resistividade da primeira camada, em ohm x metro (Ωm).

2.3 MALHAS DE ATERRAMENTO

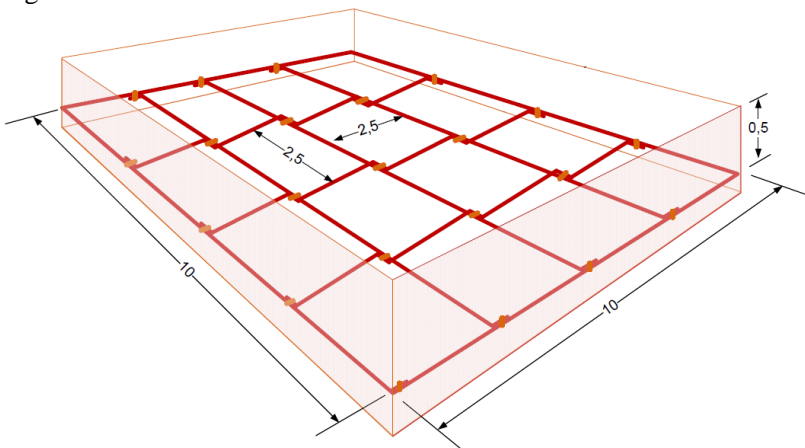
Malhas de aterramento são o foco deste trabalho. O conceito de malha de aterramento, de acordo com a NBR 15749:2009 (ABNT, 2009), é de um conjunto de condutores nus, interligados e enterrados no solo.

Em todos os estudos de caso, as malhas de aterramento são formadas apenas por cabos condutores, não havendo hastes. Todas as malhas são constituídas por cabos de cobre nu, com seção transversal de 95 mm^2 e com espaçamento constante de 2,5 m entre os cabos. Todas estão enterradas a uma profundidade de 0,5 m da superfície do solo.

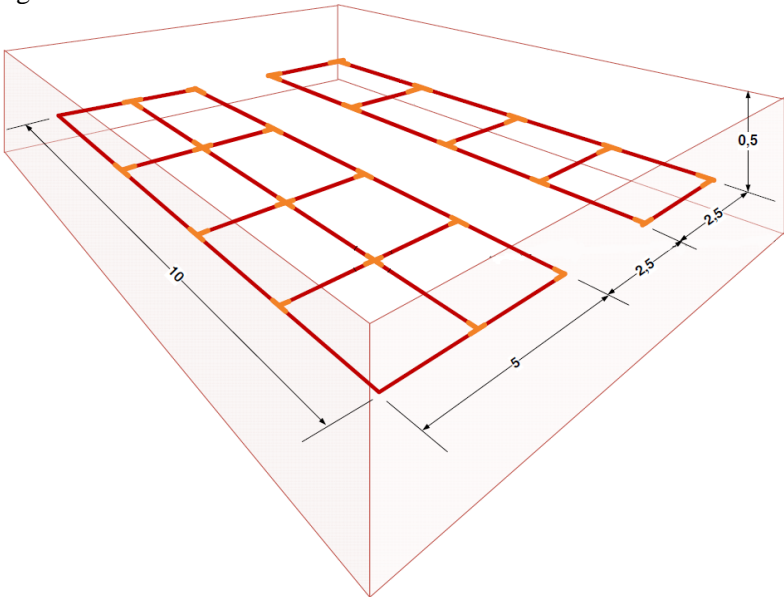
A malha do estudo de caso 1 possui dimensão 10 m x 10 m, totalizando uma área de 100 m^2 (Figura 7). A malha do estudo de caso 2 possui dimensão 5 m x 10 m, totalizando uma área de 50 m^2 (Figura 8). A malha do estudo de caso 3 possui dimensão 2,5 m x 10 m, portanto com uma área de 25 m^2 (Figura 8). E o estudo de caso 4 possui uma malha de dimensão 5 m x 5 m, com uma área de 25 m^2 (Figura 9). O estudo de caso 5 possui dimensões semelhantes ao apresentado no caso 1, porém foi realizado em um local distinto (Figura 7).

As malhas de aterramento analisadas nos estudos de caso entre 1 e 4 estão localizadas na Fazenda Experimental do Centro de Ciências Agrárias – CCA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O estudo de caso 5 não possui sua localização divulgada, por questões de confidencialidade.

Figura 7 - Malha de aterramento dos estudos de caso 1 e 5

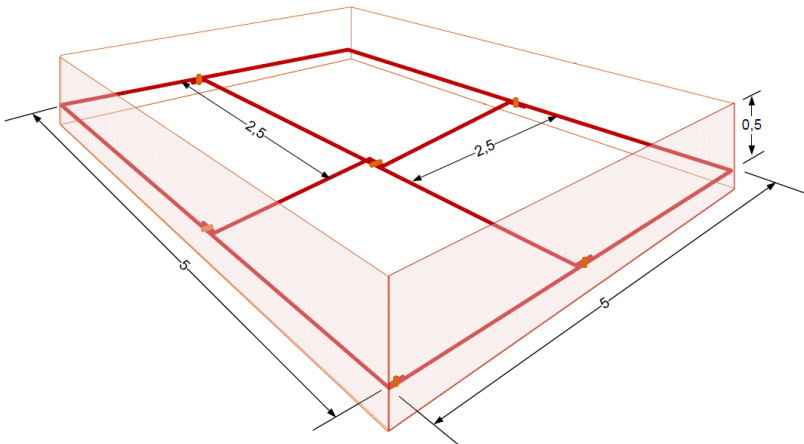


Fonte: (VALENTE, COELHO, *et al.*, 2015) Adaptado
Figura 8 - Malhas de aterramento dos estudos de caso 2 e 3



Fonte: (VALENTE, COELHO, *et al.*, 2015) Adaptado

Figura 9 - Malha de aterramento do caso 4



Fonte: (VALENTE, COELHO, *et al.*, 2015) Adaptado

2.4 PROCESSOS DE MEDIDA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

De forma geral, um sistema de aterramento deve ser caracterizado por uma impedância composta por uma resistência, uma capacitância e uma indutância. No entanto, em aplicações de baixa frequência os efeitos capacitivos e os de ionização do solo podem ser desconsiderados devido ao solo se comportar como uma resistência linear. (VISACRO FILHO, 2002)

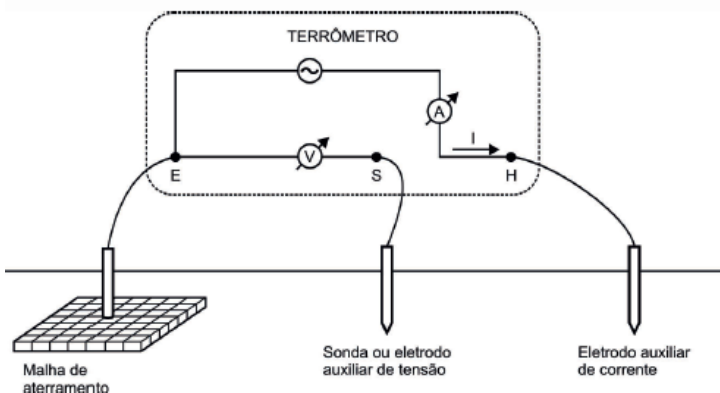
A oposição da passagem de corrente elétrica para o solo, através de um aterramento, é denominada “resistência de aterramento”. O valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela razão do potencial no sistema de aterramento, em relação a um ponto infinitamente afastado, pela corrente que se faz fluir entre o sistema e tal ponto. (VISACRO FILHO, 2002)

Existem diversos métodos para obter a resistência de aterramento, neste trabalho será utilizado o método da queda de potencial.

2.4.1 Método da queda de potencial

Este método consiste em fazer circular uma corrente pela malha de aterramento através de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o eletrodo de referência, por meio de uma sonda ou eletrodo auxiliar de tensão. A configuração deste circuito pode ser observada na Figura 10. (ABNT, 2009)

Figura 10 - Método da queda de potencial



Fonte: (ABNT, 2009)

Deslocando o eletrodo auxiliar de tensão ao longo de uma direção pré-definida a partir da margem da malha em intervalos regulares de 5 % da distância “ d_A ” (distância da margem da malha ao eletrodo auxiliar de corrente) é possível traçar o gráfico da resistência em função da distância.

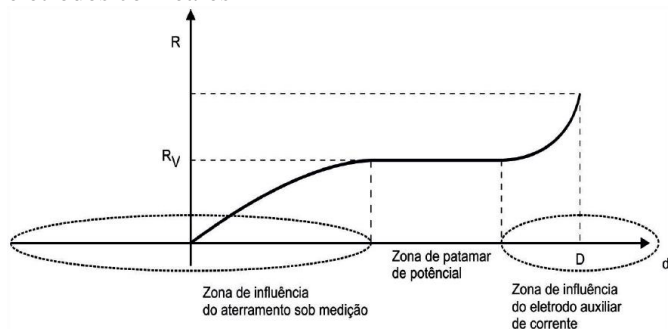
Nos casos em estudo, foi adotada a metodologia dos eletrodos auxiliares de tensão e corrente colineares, ou seja, com direção e sentido coincidentes. O trecho horizontal da curva (patamar) representa o valor da resistência de aterramento do sistema em ensaio, conforme pode ser observado na Figura 11. Na primeira parte da curva, a resistência de aterramento está sob influência da malha de aterramento, e na parte final está sob influência do eletrodo auxiliar de corrente utilizado para a medição.

Para a verificação do patamar, o eletrodo auxiliar de corrente deve estar a uma distância de pelo menos três vezes a maior dimensão do sistema, dada pela diagonal da malha de aterramento.

Para garantir que não há influências do sistema de aterramento sob o eletrodo de corrente, os valores medidos variando-se 10 % a posição da haste de potencial (d_V) em torno do ponto de medição não devem variar mais de 2 %. Assim é verificado se o valor de resistência medido é compatível com a sua localização. (VISACRO FILHO, 2002)

Segundo (VISACRO FILHO, 2002), o valor correto da distância do eletrodo de corrente (d_A) é de 3 a 4 vezes a diagonal da malha e a distância do eletrodo de potencial (d_V) em 62 % da distância de d_A . Além disso, a grande maioria das curvas apresentam um patamar em d_V para distâncias de 20 a 70 % de d_A .

Figura 11 - Curva característica da resistência de aterramento para eletrodos colineares



Fonte: (ABNT, 2013)

2.4.2 Métodos de cálculo para a resistência de aterramento

2.4.2.1 Método da resistência de aterramento aproximada da NBR 15751:2013

A NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) fornece um método analítico para um valor aproximado o valor da resistência de aterramento. Este método é dado em função da resistividade do solo e da área ocupada pela malha. O valor da resistência de aterramento é expresso pela equação (6).

$$R = \frac{\rho_a}{4r} \quad (6)$$

Onde:

R – Resistência de aterramento, em ohm (Ω);

ρ_a – Resistividade aparente do solo, em ohm x metro (Ωm);

r – Raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento, dado por (2), em metro (m).

2.4.2.2 Método de Laurent e Nieman

A norma IEEE STD 80-2013 (IEEE, 2013) apresenta o método proposto por Laurent e Nieman (6). Este método adiciona um termo na fórmula (6), que leva em consideração o comprimento dos condutores para o cálculo da resistência de aterramento.

$$R = \frac{\rho_a}{4r} + \frac{\rho_a}{L_t} \quad (7)$$

Onde:

R – Resistência de aterramento, em ohm (Ω);

ρ_a – Resistividade aparente do solo, em ohm x metro (Ωm);

r – Raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento, dado por (2), em metro (m);

L_t – Comprimento total dos condutores, em metro (m).

Para o cálculo de L_t deve ser utilizada a equação (8):

$$L_t = L_c + 1,15 \times L_h \quad (8)$$

Onde:

L_c – Comprimento total dos cabos, em metro (m);

L_h – Comprimento total das hastes, em metro (m);

($L_h = 0$ quando da ausência de hastes).

O segundo termo da equação (7) representa o fato de que a resistência de aterramento será maior quando depender do comprimento de condutores ao invés de uma placa metálica, utilizada na Sessão 2.4.2.1. A diferença entre as equações (6) e (7) tende a diminuir com o aumento do comprimento dos cabos. No limite, com o comprimento dos cabos tendendo ao infinito, a resistência de aterramento, dada pelas fórmulas (6) e (7), será a mesma. (IEEE, 2013)

Porém, segundo a NBR 15751:2013 (ABNT, 2013), este método deve ser utilizado apenas para malhas enterradas a uma profundidade máxima de 0,25 m. Como todos os estudos de caso possuem malhas com uma profundidade de 0,50 m, deve-se adotar o procedimento de cálculo conhecido como método de Sverak, que será apresentado na próxima seção.

2.4.2.3 Método de Sverak

O método de Sverak consiste em expandir a equação (6) levando em consideração a profundidade da malha de aterramento. (IEEE, 2013)

$$R = \rho_a \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (9)$$

Onde:

R – Resistência de aterramento, em ohm (Ω);

ρ_a – Resistividade aparente do solo, em ohm x metro ($\Omega.m$);

r – Raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento, dado por (2), em metro (m);

L_t – Comprimento total dos condutores, dado pela equação (7), em metro (m);

h – Profundidade da malha de aterramento, em metro (m);

A – Área da malha de aterramento, em metro² (m²).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.5.1 Procedimento de estratificação do solo

De acordo com o procedimento apresentado na seção 2.2.1 e utilizando o método de Wenner, é possível obter a estratificação do solo. Os valores encontrados para cada estudo de caso podem ser observados na Tabela 1. Nesta tabela, ρ_1 é referente a resistividade da primeira camada, ρ_2 a segunda camada, a_1 a profundidade da primeira camada e ρ_a a resistividade aparente, que considera o solo como homogêneo.

O local das análises nos estudos de caso entre 1 e 4 é a Fazenda Experimental do Centro de Ciências Agrárias – CCA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e apresentam valores característicos da região. O estudo de caso 5 não possui sua localização divulgada, por questões de confidencialidade.

Tabela 1 - Resultados da estratificação do solo

Estudo de caso	Dimensões da malha	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	a_1 (m)	ρ_a (Ωm)
1	10 m x 10 m	845	144	3	592
2	5 m x 10 m	1069	207	4	855
3	2,5 m x 10 m	1069	207	4	855
4	5 m x 5 m	1069	207	4	855
5	10 m x 10 m	750	295	9	675

Fonte: Da autora

2.5.2 Procedimentos de obtenção da resistência de aterramento

Para a obtenção dos valores medidos da resistência das malhas de aterramento, utiliza-se o procedimento descrito na seção 2.4.1, o método da queda de potencial com eletrodos colineares. A partir dos gráficos obtidos, podem-se extrair os valores nos patamares para as resistências de aterramento em todos os estudos de caso. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Medidas da resistência de aterramento

Estudo de caso	Dimensões da malha	R _{medido} (Ω)
1	10 m x 10 m	14
2	5 m x 10 m	38
3	2,5 m x 10 m	55
4	5 m x 5 m	74
5	10 m x 10 m	23,3

Fonte: Da autora

A partir dos métodos de cálculo apresentados na seção 2.4.2, o método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) e o método de Sverak, foram obtidos os valores em cada estudo de caso. Os valores podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistências de aterramento calculadas

Estudo de caso	Dimensões da malha	R _{ABNT} (Ω)	R _{Sverak} (Ω)
1	10 m x 10 m	26,21	29,95
2	5 m x 10 m	53,59	66,59
3	2,5 m x 10 m	75,79	90,98
4	5 m x 5 m	75,79	93,18
5	10 m x 10 m	29,91	34,18

Fonte: Da autora

Como o método de Sverak leva em consideração o comprimento dos cabos que compõem o sistema de aterramento, não considerando a malha de aterramento como uma placa metálica, como conceitua o método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013), tem-se um valor de resistência maior. Este valor tenderá a ser igual quanto maior o comprimento dos cabos que compõem o sistema.

Os valores das resistências de aterramento podem ser comparados através do erro relativo percentual, considerando o valor medido como valor de base.

$$Erro = \frac{|R_{medido} - R|}{R_{medido}} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

Erro – Erro relativo percentual;

R_{medido} – Resistência de aterramento medida pelo método da queda de potencial, em ohm (Ω);

R – Resistência de aterramento pelos demais métodos, em ohm (Ω).

Tabela 4 - Erro relativo percentual dos valores obtidos pelos métodos de cálculo em relação ao valor medido

Estudo de caso	Dimensões da malha	Erro _{ABNT} (%)	Erro _{Sverak} (%)
1	10 m x 10 m	87,21	113,93
2	5 m x 10 m	41,03	75,24
3	2,5 m x 10 m	37,80	65,42
4	5 m x 5 m	2,42	25,92
5	10 m x 10 m	28,37	46,70

Fonte: Da autora

2.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias de medição e cálculo, tanto para a resistividade do solo, quanto para a resistência de aterramento.

Os valores obtidos com a estratificação do solo foram considerados normais para a região, apesar do método de medição ser sujeito a interferências externas.

Para a resistência de aterramento, os modelos de cálculos corresponderem a uma boa estimativa. No entanto, estes modelos possuem simplificações, como, por exemplo, a utilização da resistividade aparente (ρ_a) do solo, e o fato de não considerarem o acoplamento mútuo dos campos elétricos em seus cálculos.

Neste cenário, uma forma de obter uma melhor aproximação é através dos métodos numéricos. No próximo capítulo serão apresentados e avaliados os estudos de caso através de uma simulação numérica que utiliza o método de elementos finitos (MEF) no *software* de simulação ANSYS Maxwell 3D.

3 MODELAGEM DO SISTEMA DE ATERRAMENTO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

3.1 INTRODUÇÃO

Assim como citado em (SILVA, 2006) e em (MARTINHO, 2009), a segurança de seres vivos e a proteção de equipamentos encontram-se entre os principais motivos para o estudo de sistemas de aterramento. Tais preocupações vêm desde um período anterior ao contemporâneo, onde o uso de computadores para a aplicação de métodos numéricos ainda não era difundida. Deste modo, a alternativa para o tratamento desses problemas na época era puramente analítica.

Atualmente podemos utilizar formulações numéricas, apoiadas a um modelo eletromagnético, para obter uma representação mais adequada dos fenômenos físicos envolvidos em problemas de aterramento. (MARTINHO, 2009)

O método de elementos finitos é uma das técnicas mais aplicadas para o cálculo da dispersão de campos eletromagnéticos em problemas de engenharia. De uma forma geral, este método consiste na divisão da geometria de um problema em pequenos elementos, onde cada elemento representa um domínio contínuo do problema. Essa técnica permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples. (SILVA, 2006)

De acordo com (VALENTE, COELHO, *et al.*, 2015), o *software* ANSYS Maxwell 3D pode ser utilizado para a análise de fenômenos eletromagnéticos de baixas frequências em sistemas de aterramento obtendo resultados satisfatórios.

O *software* ANSYS Maxwell 3D utiliza o método de elementos finitos (MEF) em seus cálculos, e quando comparado a outros métodos de simulação, este método apresenta uma estimativa adequada. Quando comparado a métodos analíticos possui uma melhor aproximação, pois métodos analíticos não são capazes de capturar o efeito de acoplamento mútuo dos eletrodos na malha de aterramento. (VALENTE, COELHO, *et al.*, 2015)

Neste capítulo será apresentada a metodologia de acordo com as configurações utilizadas no procedimento de simulação e cálculo utilizando o *software* ANSYS Maxwell 3D. Os resultados obtidos nas simulações serão discutidos e comparados aos valores medidos no Capítulo 2.

3.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Problemas que envolvem a distribuição de campos elétricos, magnéticos e alguns fenômenos da física mecânica, obedecem a equações diferenciais parciais de segunda ordem, cuja solução analítica é, em muitos casos, de difícil obtenção. Como modelos empíricos e aproximações nem sempre representam de forma adequada o comportamento de uma estrutura, novas técnicas começaram a surgir a partir do final da Segunda Guerra Mundial. (BASTOS, 2004)

O método de elementos finitos (MEF) surgiu na década de 50, porém somente a partir da década de 70 passou a ser amplamente empregado em problemas eletromagnéticos. (BASTOS, 2004)

O MEF propõe que a geometria do problema seja submetida a divisões em pequenas partes, denominadas de “elementos finitos”. A divisão da geometria em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples. A divisão em elementos deve respeitar as fronteiras dos materiais. (BASTOS, 2004)

Os elementos finitos podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Eles são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos os elementos e nós dá-se o nome de malha.

Em virtude de a geometria ser dividida em elementos, as equações matemáticas que regem o comportamento físico não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão do método de elementos finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise. (BASTOS, 2004)

Basicamente a análise pelo método de elementos finitos envolve quatro etapas: a discretização do domínio em um número finito de elementos, a obtenção das equações que regem um elemento típico, a conexão de todos os elementos no domínio e a resolução do sistema de equações obtido. (SADIKU, 2004)

O MEF é um método diferencial que conduz a sistemas de matrizes esparsas possibilitando o uso de algoritmos iterativos de solução de alto desempenho. Um problema do método é que ao tratar de problemas com fronteiras abertas, deve-se efetuar um truncamento no domínio, o que pode ocasionar um impacto na solução se este não for

realizado de forma correta, no entanto há formas de tratar esse problema. (SILVA, 2006)

3.3 MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O *software* ANSYS Maxwell foi escolhido para a modelagem do sistema de aterramento. Este *software* utiliza o método de elementos finitos e pode ser utilizado tanto para modelos em 2D quanto para modelos 3D. Ele é capaz de resolver diversos tipos de problemas eletromagnéticos, na forma estática, transiente, em corrente contínua e com correntes induzidas, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

O modelo do sistema implementado foi baseado nas obras de (VALENTE, COELHO, *et al.*, 2015) e (BRENNNA, FOIADELLI, *et al.*, 2018), buscando replicar o método de medição da queda de potencial apresentado na seção 2.4.1.

Neste trabalho foi considerado um modelo semiesférico para representar o solo. As malhas de aterramento são alocadas no centro da semiesfera de acordo com a sua profundidade.

3.3.1 Configuração do solo

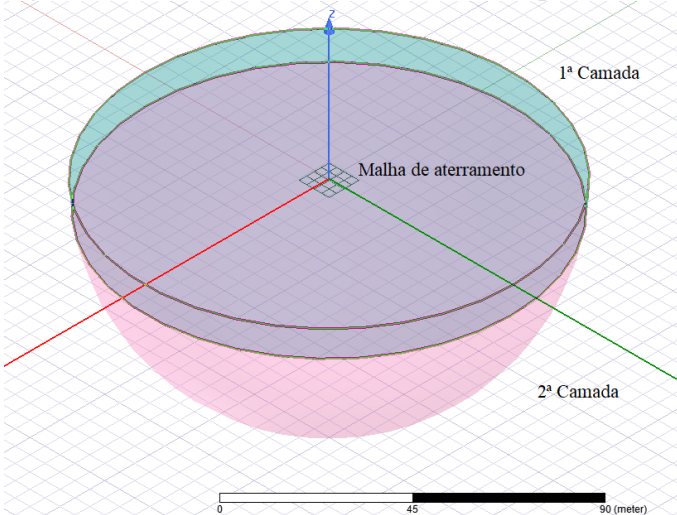
Um dos parâmetros de entrada do modelo de simulação é a configuração do solo. Ele deve ter a sua composição de acordo com um modelo de estratificação adequado.

Neste trabalho, o solo foi representado de acordo com o modelo de estratificação apresentada no Capítulo 2, na seção 2.2.1. Para cada estudo de caso utilizou os dados da Tabela 1, tanto para as resistividades da primeira e segunda camada (ρ_1 e ρ_2), como para a profundidade da primeira camada (a_1).

Foi considerado um solo com permissividade relativa $\epsilon_r = 36$. De acordo com o valor utilizado nos modelos de (SILVEIRA, 2002).

O raio de cada semiesfera foi considerado quatro vezes maior que a diagonal da malha de aterramento, tamanho suficiente para que não houvesse interferências no procedimento de cálculo da resistência de aterramento.

Figura 12 - Modelo de estratificação do solo implementado



Fonte: Da autora

3.3.2 Configurações da malha de aterramento

As malhas de aterramento foram configuradas de acordo com as suas dimensões reais, de acordo com os modelos apresentados no Capítulo 2, na seção 2.3.

No *software* ANSYS Maxwell 3D, o material utilizado para a caracterização da malha de aterramento é o cobre, da própria biblioteca do *software*. Esse material possui uma permissividade relativa igual $\epsilon_r = 1$ e uma condutividade elétrica $\sigma = 5,80 \times 10^7$ S/m.

3.3.3 Excitações e condições de contorno

Em todos os casos de estudo, a malha de aterramento foi excitada no seu centro com uma tensão alternada senoidal com valor de pico de 311 V (Figura 13). O valor da tensão foi escolhido arbitrariamente, pois não interfere no cálculo da resistência de aterramento, conforme poderá ser observado na próxima seção, 3.3.4.

Para reproduzir as medidas do método da queda de potencial, descrito no Capítulo 2, foi utilizada uma frequência de 1047 Hz, próxima a faixa comumente utilizada por terrômetros.

A fonte de excitação pode ser descrita pela equação (9):

$$V(t) = 311\text{sen}(2\pi \times 1047 \times t) \quad (9)$$

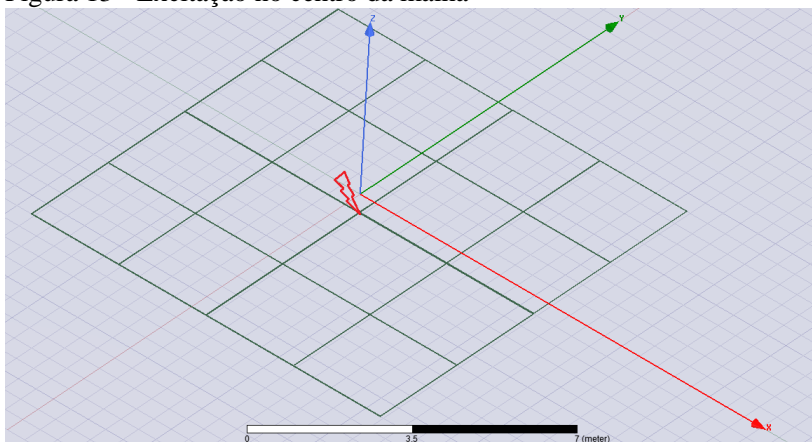
Onde:

V – Tensão da fonte, em volt (V);

t – Tempo discretizado, em segundo (s).

Nas simulações, devido a capacidade computacional, foi utilizado um tempo de simulação de 2 ms, discretizado em 0,1 ms, tempo suficiente para que fosse atingido o regime permanente.

Figura 13 - Excitação no centro da malha



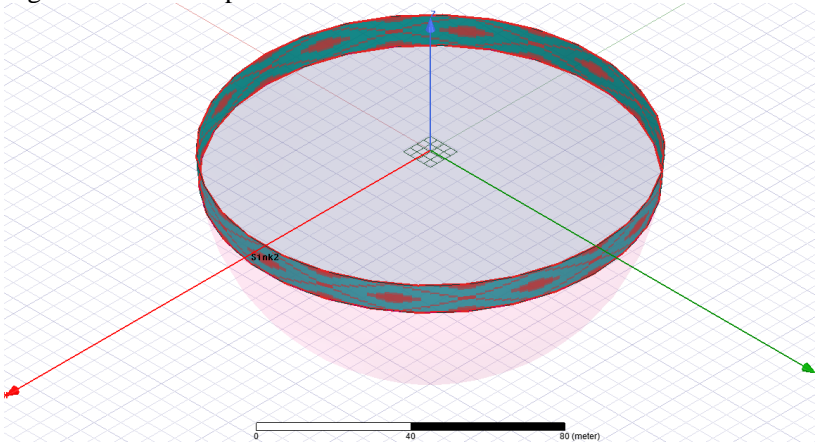
Fonte: Da autora

As superfícies externas das semiesferas são definidas pela condição *sink*. Esta condição é utilizada de modo a garantir uma única solução para o sistema matricial do método de elementos finitos e evitar erros de truncamento. Esta condição pode ser vista como um “sumidouro” de corrente, permitindo que todo o fluxo de corrente seja conduzido para a superfície e saia de forma normal a ela. Portanto, o somatório de correntes que flui pela superfície e o injetado pela fonte deve ser igual a zero.

Com o critério de verificação da condição *sink*, foi realizado um estudo de caso aplicando a condição de contorno de Dirichlet, onde é especificado o valor que a solução da equação diferencial parcial deve possuir no contorno do domínio. Neste caso, foi considerado que os raios das semiesferas, que caracterizam o solo, são dez vezes maiores que a diagonal da malha de aterramento. Então é aplicada uma tensão

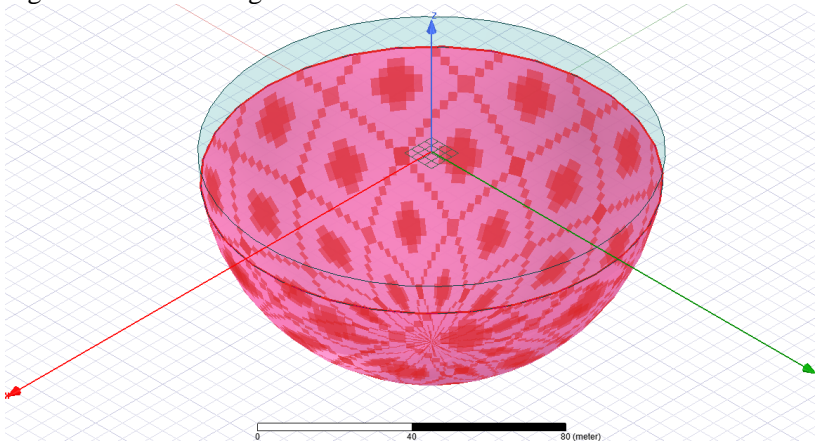
com o valor de 0 V nas superfícies externas das semiesferas. Neste método foram obtidos os mesmos valores encontrados anteriormente pela condição de contorno *sink*, para a resistência de aterramento. Porém, neste caso é necessário um maior desempenho computacional. Por este motivo foi escolhido aplicar a condição *sink* nas superfícies externas das semiesferas.

Figura 14 - *Sink* na primeira camada do solo



Fonte: Da autora

Figura 15 - *Sink* na segunda camada do solo



Fonte: Da autora

O *software* ANSYS Maxwell 3D considera, por *default*, a condição natural na interface entre objetos. Ou seja, a componente normal do vetor de indução elétrica (\mathbf{D}) na fronteira se altera de acordo com a densidade de carga na superfície da fronteira.

Também é considerada, por *default*, a condição de Neumann definida nas fronteiras dos limites externos da área de simulação. Nessa região, o vetor campo elétrico (\mathbf{E}) é tangencial a fronteira e o fluxo não pode cruzá-la. Ou seja, o campo elétrico (\mathbf{E}) e a variação da diferença de potencial (V) na direção normal à superfície serão nulos.

3.3.4 Modelo de cálculo utilizado

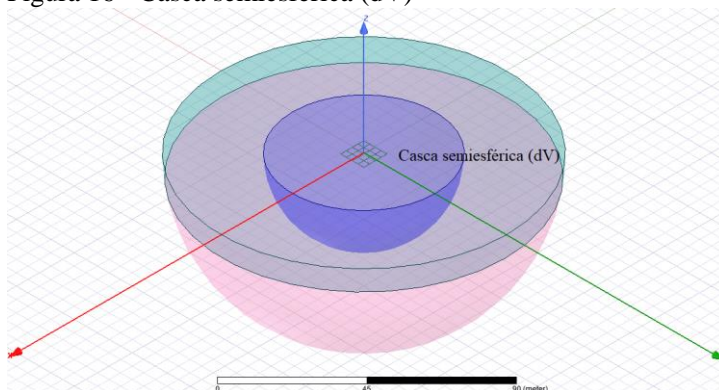
Para o cálculo da resistência de aterramento buscou-se replicar o cálculo utilizado no método da queda de potencial, aplicado nas medições em campo.

De acordo com (VISACRO FILHO, 2002), o valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela relação entre a queda de potencial entre a tensão aplicada na malha de aterramento e o eletrodo de potencial (dV) pelo fluxo de corrente entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente (dA).

Para a obtenção das curvas de resistência de aterramento o método a seguir foi aplicado mantendo dA fixo em 4 vezes a diagonal da malha e variando dV em frações de dA .

Para a representação de dV foi utilizada uma casca semiesférica de espessura desprezível e sem material definido. Esta casca semiesférica terá seu raio variado de acordo com as frações de dA .

Figura 16 - Casca semiesférica (dV)



Fonte: Da autora

Com a excitação aplicada ao centro do malha, é calculada a tensão média em toda a superfície ocupada pela malha de aterramento. A tensão em dV também é calculada pela média da tensão em sua área. Portanto a diferença de potencial entre a malha e dV é dada por (10):

$$\Delta V = V_{malha} - V_{dV} \quad (10)$$

Onde:

ΔV – Diferença de potencial entre a malha de aterramento e dV , em volt (V);

V_{malha} – Tensão média na malha de aterramento, em volt (V);

V_{dV} – Tensão média em dV , em volt (V).

Sabendo da relação entre o campo elétrico (\mathbf{E}) e o vetor de densidade superficial de corrente (\mathbf{J}) dada por (11), a Lei de Ohm:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

Onde:

\mathbf{J} – Densidade superficial de corrente, em ampère / metro² (A/m²);

σ – Condutividade elétrica, em siemens / metro (S/m);

\mathbf{E} – Campo elétrico, em volt / metro (V/m).

A partir da densidade superficial de corrente, pode-se calcular a corrente que flui da malha de aterramento até dA . Como o fluxo de corrente obedece as condições de contorno impostas pelo *sink*, a partir de uma integral de superfície é possível obter o seu valor. Para isso, foi escolhido realizar a integração na mesma casca esférica onde é calculado dV .

$$I = \int \mathbf{J} ds \quad (12)$$

Onde:

I – Corrente que flui entre a malha de aterramento e dA , em ampère (A);

\mathbf{J} – Densidade superficial de corrente, em ampère / metro² (A/m²);

ds – Parcela infinitesimal da superfície da casca semiesférica, metro² (m²).

Logo, de acordo com (VISACRO FILHO, 2002), em baixas frequências pode-se utilizar a relação dada por (13) para o cálculo da resistência de aterramento.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (13)$$

Onde:

R – Resistência de aterramento, em ohm (Ω);

ΔV – Diferença de potencial entre a malha de aterramento e dV , em volt (V);

I – Corrente que flui entre a malha de aterramento e dA , em ampère (A).

3.3.5 Malha de elementos finitos

O *software* utiliza elementos triangulares e tetraédricos para os cálculos, onde o tamanho da malha de elementos finitos foi especificado de acordo com o tamanho máximo para cada componente do modelo.

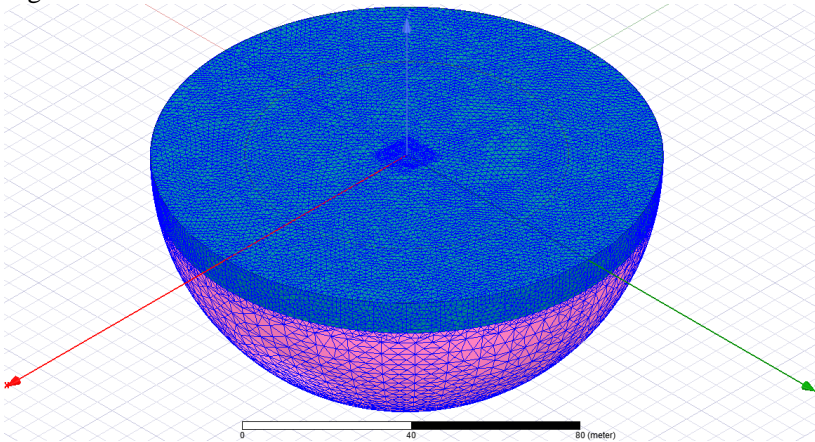
A malha de aterramento foi definida com elementos de tamanho máximo de 50 mm. A primeira camada com elementos de 2 m e a segunda camada com elementos de 5 m.

A casca semiesférica, por não haver espessura, possui uma malha de elementos finitos triangulares, sendo especificada por uma função especial “*surface approximation*”. Nesta função é definida a resolução da malha de elementos finitos para superfícies curvas, onde foi escolhida uma malha fina, ou seja, com maior quantidade de elementos, portanto uma malha mais densa que a regularmente utilizada pelo *software*.

É perceptível que quanto mais próximo da malha de aterramento o *software* tende a diminuir o tamanho dos elementos para uma maior precisão nos cálculos, isso é dado pelo próprio *software* que utiliza uma malha adaptativa de cálculo.

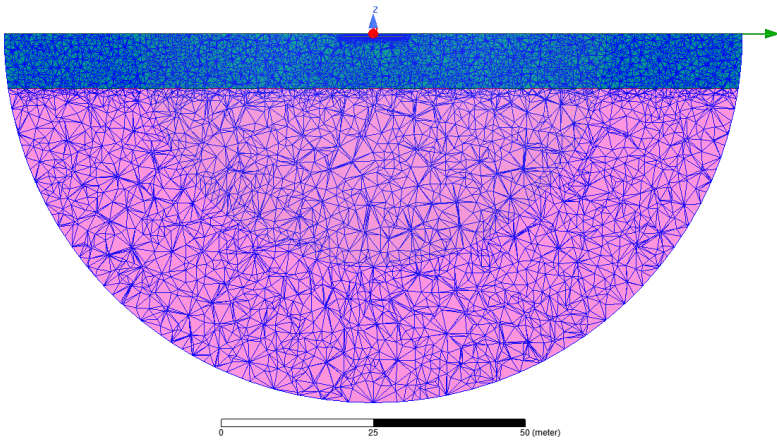
A malha de elementos finitos da primeira e da segunda camada do solo podem ser conferidas na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 - Malha de elementos finitos



Fonte: Da autora

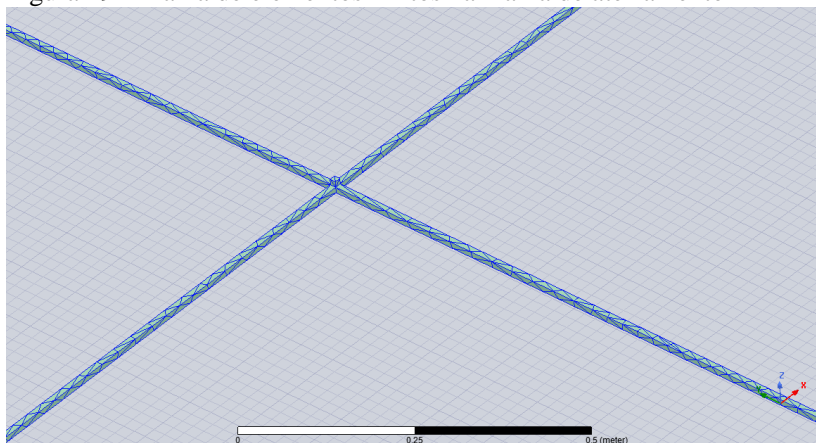
Figura 18 - Malha de elementos finitos em corte



Fonte: Da autora

A malha de elementos finitos da malha de aterramento pode ser observada na Figura 19. Pode ainda ser observada a diferença entre os tamanhos dos elementos entre a malha de elementos finitos que compõe a malha de aterramento e as malhas que compõe o solo.

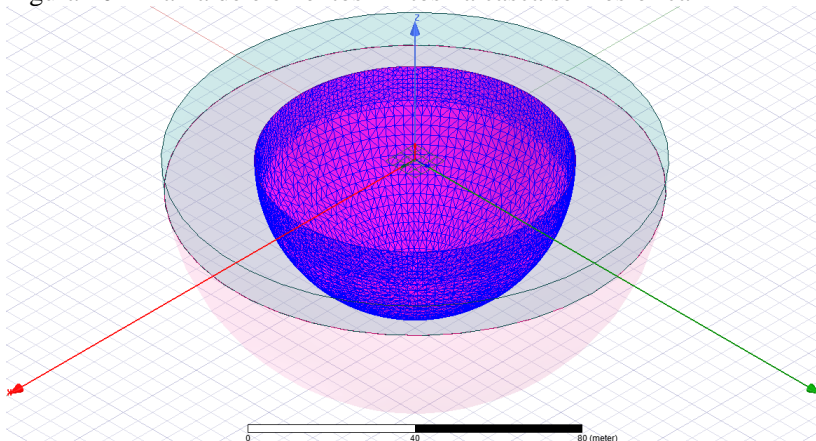
Figura 19 - Malha de elementos finitos na malha de aterramento



Fonte: Da autora

A malha de elementos finitos na casca semiesférica pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 - Malha de elementos finitos na casca semiesférica



Fonte: Da autora

3.3.6 Dados computacionais das simulações

Com as configurações descritas nas seções anteriores deste capítulo, podem ser extraídos alguns dados computacionais das simulações. Cabe destacar que as simulações foram realizadas utilizando

o *software* ANSYS Maxwell em sua versão 19.2. Foi utilizada a ferramenta de HPC, onde a interface gráfica utiliza um computador e os cálculos são realizados em outro.

O computador com a interface gráfica possui as seguintes características: processador Intel Core i7 – 5500U CPU @ 2,40 GHz memória RAM 8 GB e placa de vídeo AMD Radeon R7 M260 com 2 GB de memória.

O computador de cálculo possui as seguintes características: processador Intel Xeon Gold 6126 CPU @ 2,60 GHz e memória RAM 128 GB.

Na Tabela 5 são apresentados os dados das simulações, como a duração e quantidade de elementos na malha de elementos finitos.

Tabela 5 - Dados das simulações

Estudo de caso	Dimensões da malha	Tempo de simulação	Quantidade de elementos
1	10 m x 10 m	26 h 49 min 48 s	768915
2	5 m x 10 m	12 h 11 min 58 s	403414
3	2,5 m x 10 m	06 h 22 min 17 s	319664
4	5 m x 5 m	03 h 18 min 10 s	188197
5	10 m x 10 m	30 h 45 min 56 s	945675

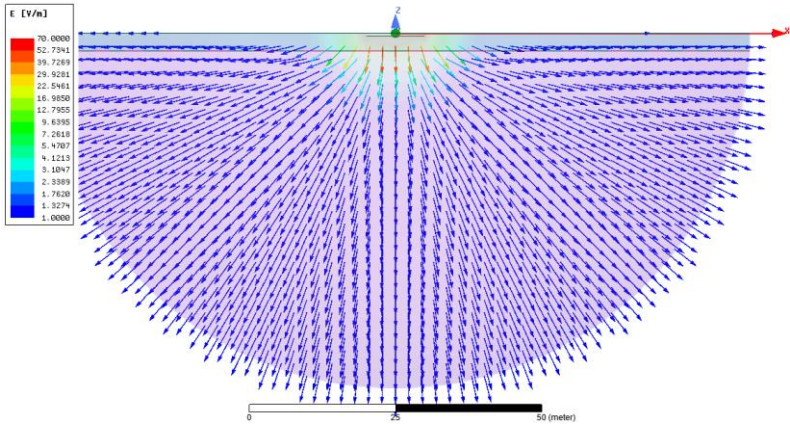
Fonte: Da autora

3.3.7 Resultados das simulações

3.3.7.1 Estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m

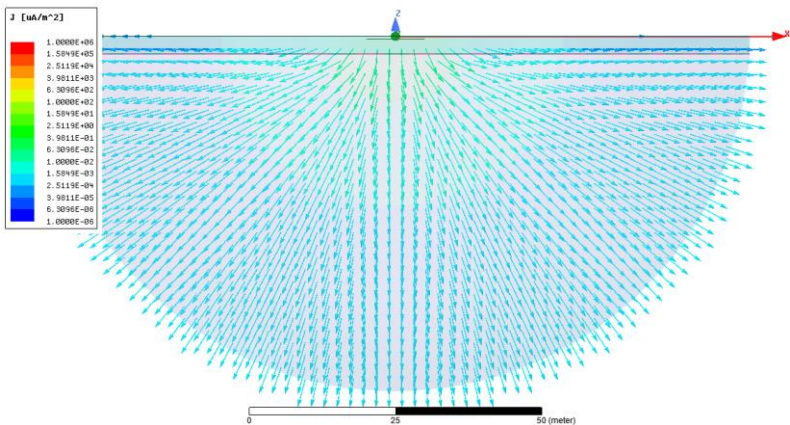
Nas figuras a seguir, Figura 21 e Figura 22, serão apresentados os resultados para o campo elétrico, \mathbf{E} , a densidade de corrente, \mathbf{J} , no instante de 2 ms de simulação no estudo de caso 1. A condição de contorno *sink*, aplicada ao modelo, pode ser verificada nessa figura, onde \mathbf{J} é normal a superfície externa.

Figura 21 - Campo elétrico no estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m



Fonte: Da autora

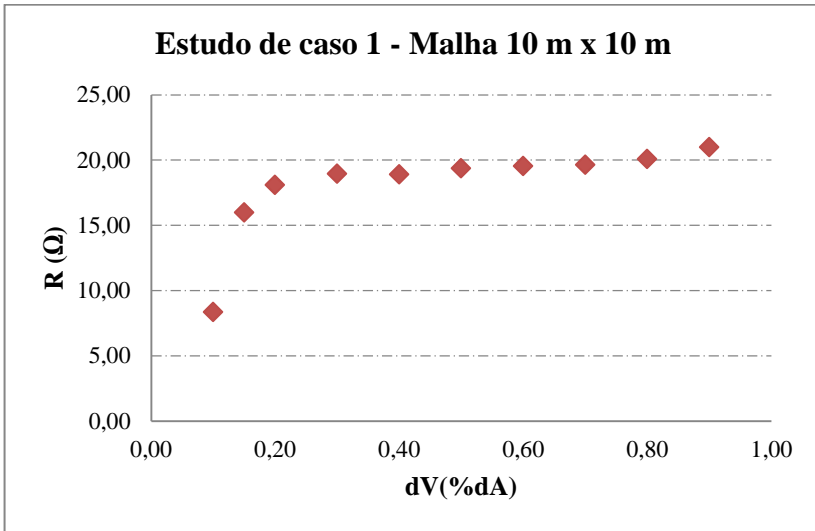
Figura 22 - Densidade de corrente no estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m



Fonte: Da autora

A curva de resistência obtida variando dV em percentagens de dA pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - Curva de resistência no estudo de caso 1: Malha 10 m x 10 m

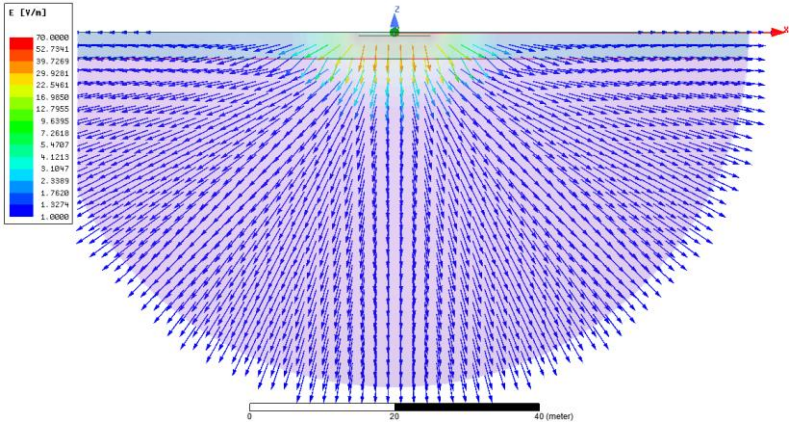


Fonte: Da autora

3.3.7.2 Estudo de caso 2: Malha 5 m x 10 m

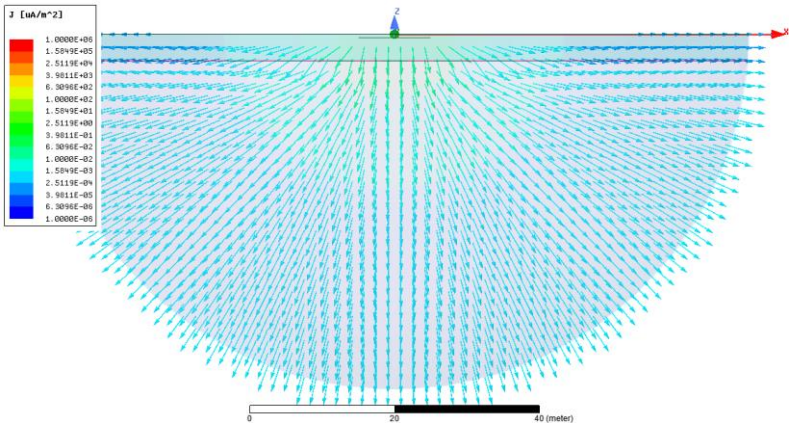
Nas figuras a seguir, Figura 24 e Figura 25, serão apresentados os resultados para o campo elétrico, \mathbf{E} , a densidade de corrente, \mathbf{J} , no instante de 2 ms de simulação no estudo de caso 2. A condição de contorno *sink*, aplicada ao modelo, pode ser verificada nessa figura, onde \mathbf{J} é normal a superfície externa.

Figura 24 - Campo elétrico no estudo de caso 2: Malha 5 m x 10 m



Fonte: Da autora

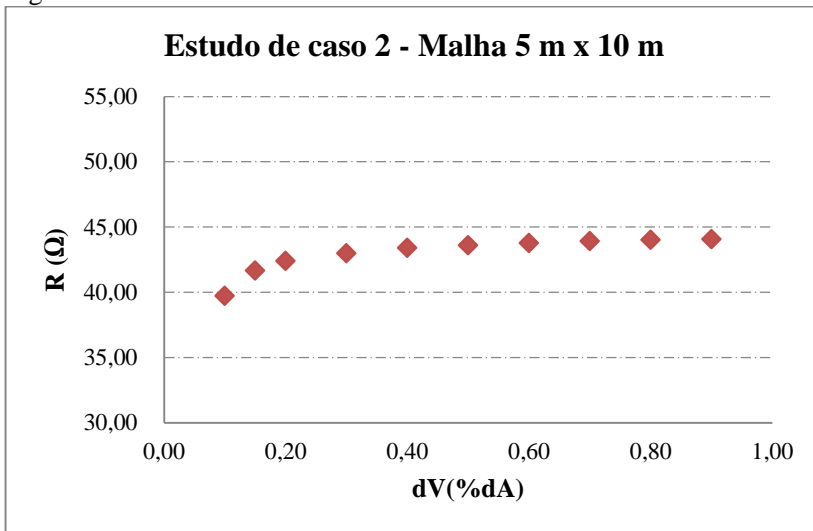
Figura 25 - Densidade de corrente no estudo de caso 2: Malha 5 m x 10 m



Fonte: Da autora

A curva de resistência obtida variando dV em percentagens de dA pode ser observada na Figura 26.

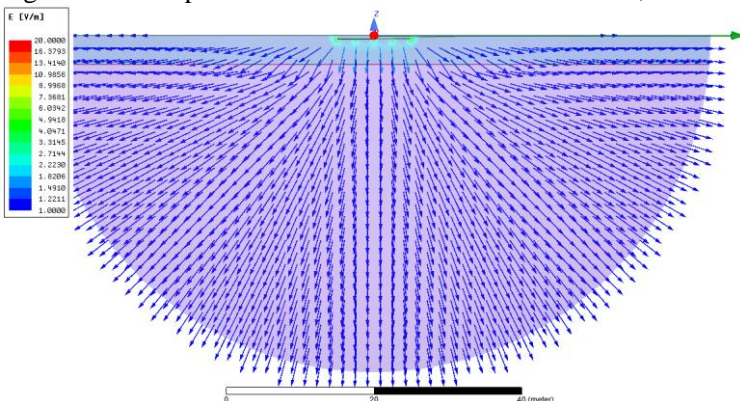
Figura 26 - Curva de resistência no estudo de caso 2: Malha 5 m x 10m



3.3.7.3 Estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m

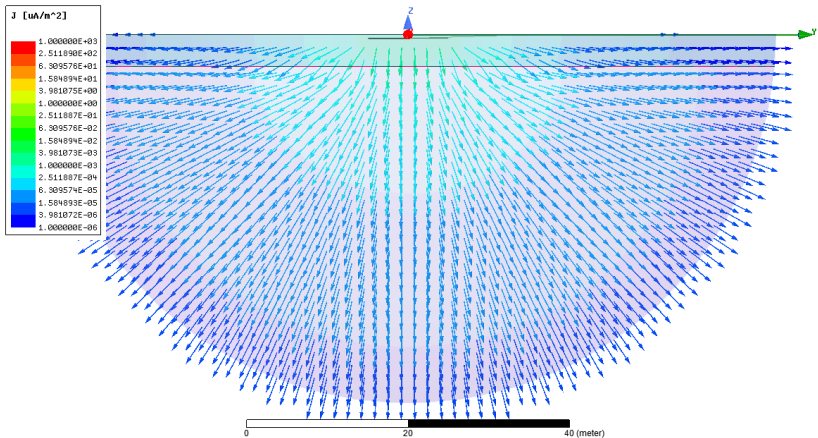
Nas figuras a seguir, Figura 27 e Figura 28, serão apresentados os resultados para o campo elétrico, \mathbf{E} , a densidade de corrente, \mathbf{J} , no instante de 2 ms de simulação. A condição de contorno *sink*, aplicada ao modelo, pode ser verificada nessa figura, onde \mathbf{J} é normal a superfície externa.

Figura 27 - Campo elétrico no estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m



Fonte: Da autora

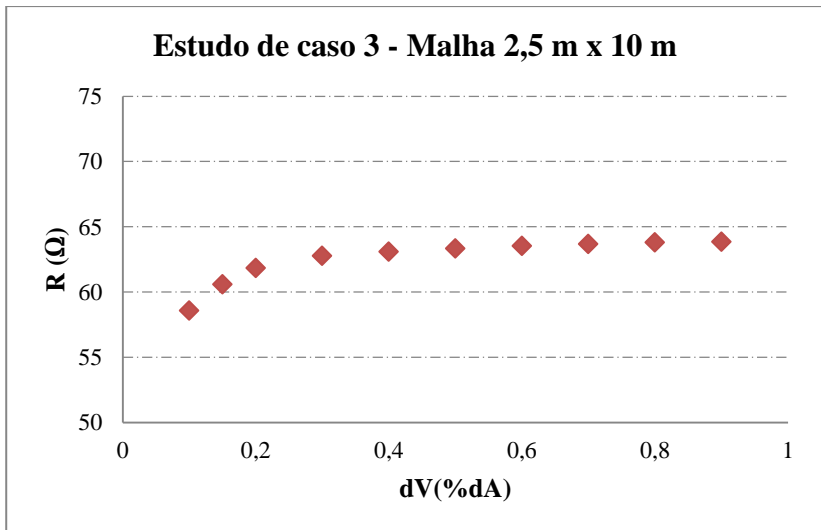
Figura 28 - Densidade de corrente no estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m



Fonte: Da autora

A curva de resistência obtida variando dV em percentagens de dA pode ser observada na Figura 29.

Figura 29 - Curva de resistência no estudo de caso 3: Malha 2,5 m x 10 m

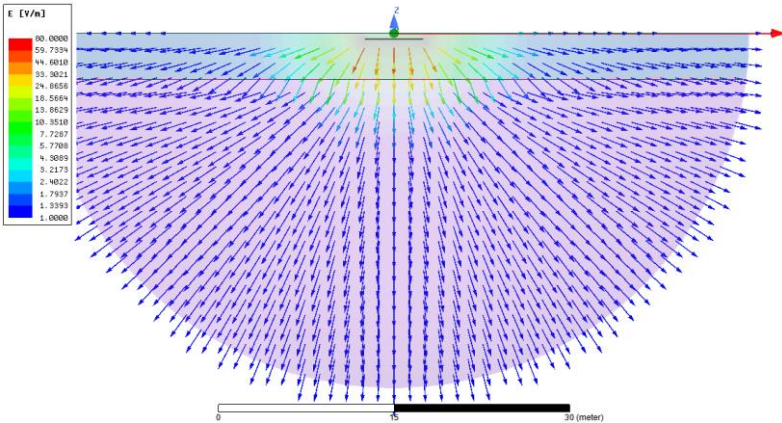


Fonte: Da autora

3.3.7.4 Estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m

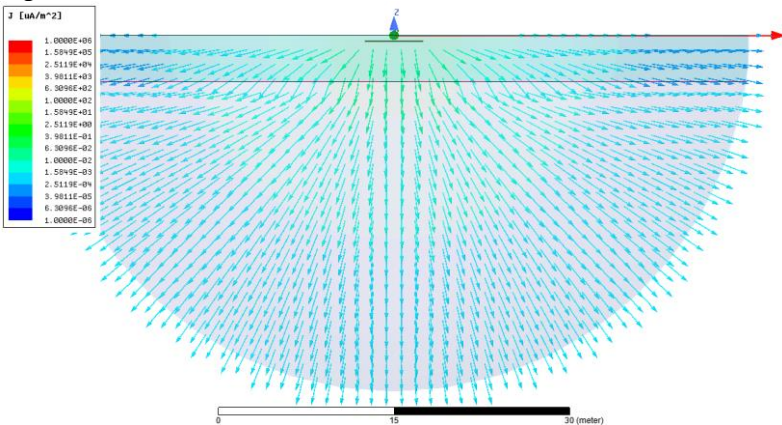
Nas figuras a seguir, Figura 30 e Figura 31, serão apresentados os resultados para o campo elétrico, \mathbf{E} , a densidade de corrente, \mathbf{J} , no instante de 2 ms de simulação. A condição de contorno *sink*, aplicada ao modelo, pode ser verificada nessa figura, onde \mathbf{J} é normal a superfície externa.

Figura 30 - Campo elétrico no estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m



Fonte: Da autora

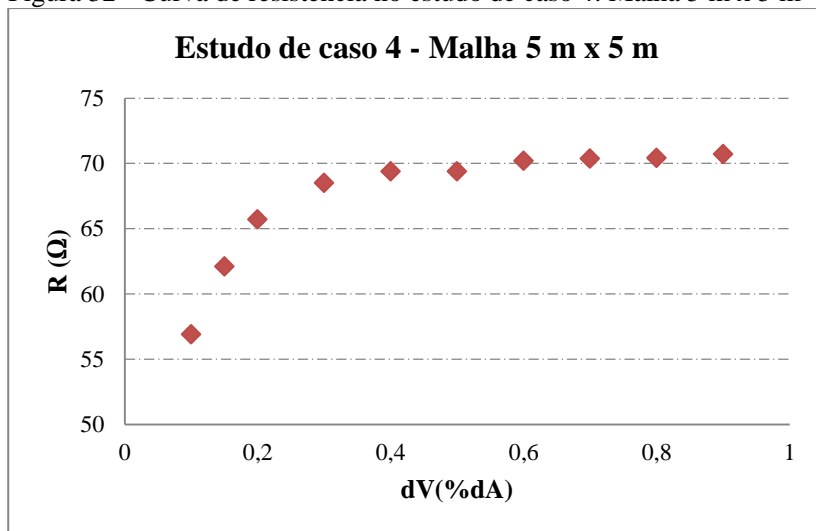
Figura 31 - Densidade de corrente no estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m



Fonte: Da autora

A curva de resistência obtida variando dV em percentagens de dA pode ser observada na Figura 32.

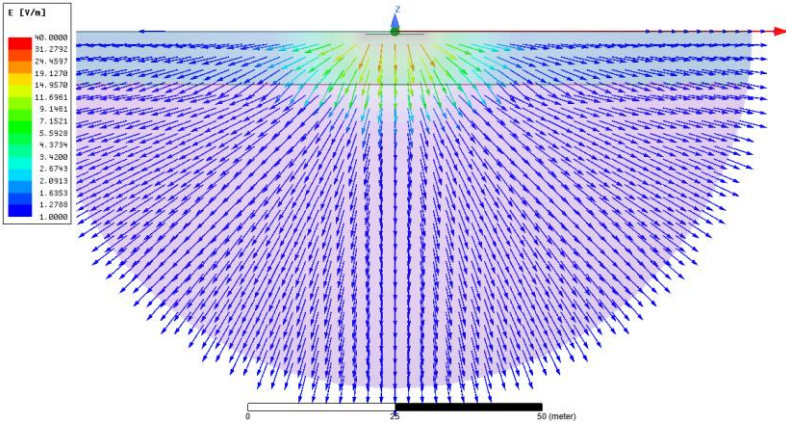
Figura 32 - Curva de resistência no estudo de caso 4: Malha 5 m x 5 m



3.3.7.5 Estudo de caso 5: 10 m x 10 m

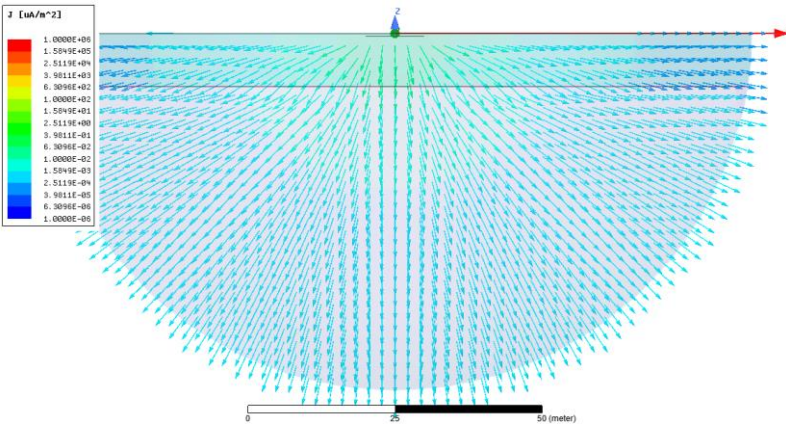
Nas figuras a seguir, Figura 33 e Figura 34, serão apresentados os resultados para o campo elétrico, \mathbf{E} , a densidade de corrente, \mathbf{J} , no instante de 2 ms de simulação. A condição de contorno *sink*, aplicada ao modelo, pode ser verificada nessa figura, onde \mathbf{J} é normal a superfície externa.

Figura 33 - Campo elétrico no estudo de caso 5: Malha 10 m x 10 m



Fonte: Da autora

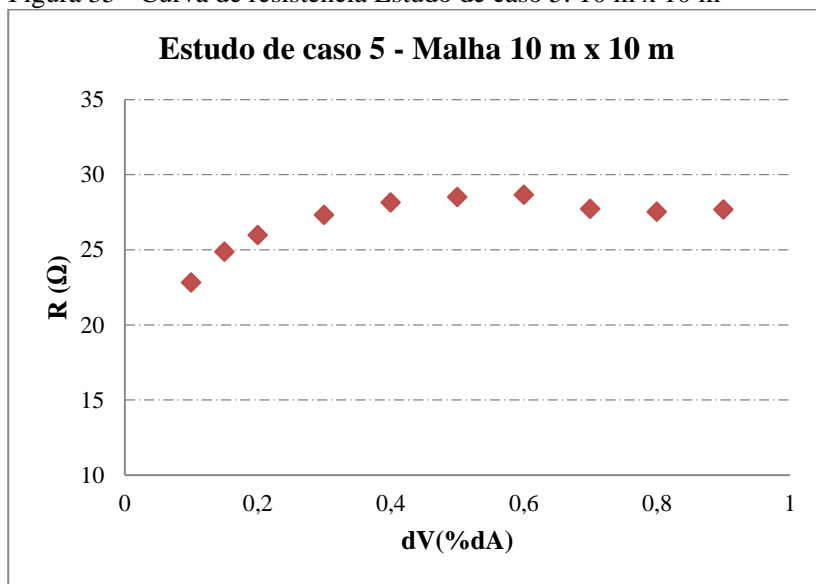
Figura 34 - Densidade de corrente no estudo de caso 5: Malha 10 m x 10 m



Fonte: Da autora

A curva de resistência obtida variando dV em percentagens de dA pode ser observada na Figura 35.

Figura 35 - Curva de resistência Estudo de caso 5: 10 m x 10 m



Fonte: Da autora

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Assim como realizado na metodologia de medição pelo método da queda de potencial, apresentado na seção 2.4.1, foi obtido a resistência de aterramento das curvas apresentadas na seção anterior, 3.3.7. O resultado pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência de aterramento simulada pelo MEF

Estudo de caso	Dimensões da malha	R_{MEF} (Ω)
1	10 m x 10 m	19,54
2	5 m x 10 m	43,77
3	2,5 m x 10 m	63,53
4	5 m x 5 m	70,20
5	10 m x 10 m	28,64

Fonte: Da autora

Conforme os métodos de cálculo apresentados na seção 2.5.2, o resultado obtido através de simulação numérica pode ser comparado ao valor medido. Os resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Erro relativo percentual dos valores obtidos pelo MEF em relação ao valor medido

Estudo de caso	Dimensões da malha	R_{medido} (Ω)	R_{MEF} (Ω)	Erro _{MEF} (%)
1	10 m x 10 m	14	19,54	39,57
2	5 m x 10 m	38	43,77	15,18
3	2,5 m x 10 m	55	63,53	15,51
4	5 m x 5 m	74	70,20	5,14
5	10 m x 10 m	23,3	28,64	22,92

Fonte: Da autora

De acordo com o esperado, o erro relativo percentual ficou, em média, menor que o erro dos métodos apresentados no Capítulo 2, obtendo uma melhor aproximação para a resistência de aterramento. Este comportamento é devido ao modelo adotado e ao procedimento de cálculo, onde foi considerado o solo formado por duas camadas distintas e a capacidade de capturar o efeito de acoplamento mútuo dos eletrodos na malha de aterramento.

3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias e resultados, para a estimativa da resistência de aterramento utilizando o *software* de simulação numérica ANSYS Maxwell 3D, baseado no método de elementos finitos (MEF).

As curvas de resistência de aterramento apresentaram um comportamento adequado ao esperado, assemelhando-se com as curvas do método de medição da queda de potencial (seção 2.4.1).

Quando comparado aos valores medidos, o modelo apresentado neste capítulo mostra uma melhor aproximação para a resistência de aterramento do que os métodos de cálculo apresentados no Capítulo 2.

No próximo capítulo será realizada uma comparação e uma discussão geral entre os métodos apresentados neste trabalho.

4 COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as comparações e discussões entre os resultados obtidos através dos métodos analíticos e do método numérico utilizando elementos finitos. Os resultados obtidos também serão comparados ao método numérico TLM, porém como este método não foi desenvolvido neste trabalho são desconhecidas as configurações adotadas e o estudo de caso 5 não possui resultado.

O método do TLM é um método diferencial, onde é necessário discretizar o tempo e as dimensões do espaço em estudo. Ele consiste na modelagem de campos eletromagnéticos por circuitos elétricos, mais especificamente por circuitos de linhas de transmissão. O método do TLM parte do princípio de Huygens para a propagação de ondas, fazendo a implementação discreta deste princípio. (FACCIONI FILHO, 1997)

Ainda neste capítulo serão apresentadas as considerações finais deste trabalho.

4.2 COMPARAÇÕES

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos entre os diferentes métodos apresentados neste trabalho para cada estudo de caso. Os métodos analíticos e o método de medição são apresentados no Capítulo 2. O método de elementos finitos é apresentado no Capítulo 3, neste método é utilizado o valor de resistência encontrado nos patamares das curvas.

O erro relativo percentual entre o método de elementos finitos (MEF) e os demais métodos podem ser observados na Tabela 9. Para o cálculo do erro foi utilizado a equação (14).

$$Erro = \frac{|R_{MEF} - R|}{R} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

Erro – Erro relativo percentual;

R_{MEF} – Resistência de aterramento pelo método de elementos finitos, em ohm (Ω);

R – Resistência de aterramento pelos demais métodos, em ohm (Ω).

Tabela 8 - Comparação entre métodos

Estudo de caso	Dimensões da malha	R_{ABNT} (Ω)	R_{Sverak} (Ω)	R_{Medido} (Ω)	R_{TLM} (Ω)	R_{MEF} (Ω)
1	10 m x 10 m	26,21	29,95	14,00	20,00	19,54
2	5 m x 10 m	53,59	66,59	38,00	38,00	43,77
3	2,5 m x 10 m	75,79	90,98	55,00	58,00	63,53
4	5 m x 5 m	75,79	93,18	74,00	76,00	70,20
5	10 m x 10 m	29,91	34,18	23,30	-	28,64

Fonte: Da autora

Tabela 9 - Erro relativo percentual entre o MEF e os demais métodos

Estudo de caso	Dimensões da malha	Erro $_{ABNT}$ (%)	Erro $_{Sverak}$ (%)	Erro $_{Medido}$ (%)	Erro $_{TLM}$ (%)
1	10 m x 10 m	25,45	34,76	39,57	2,30
2	5 m x 10 m	18,32	34,27	15,18	15,18
3	2,5 m x 10 m	16,18	30,17	15,51	9,53
4	5 m x 5 m	7,38	24,66	5,14	7,63
5	10 m x 10 m	4,25	16,21	22,92	-

Fonte: Da autora

4.3 DISCUSSÕES

Métodos analíticos são de suma importância para o cálculo da resistência de aterramento. São de fácil aplicação, não dependem de desempenho computacional e permitem uma estimativa adequada do valor da resistência de aterramento. Apesar disso, são mais susceptíveis a erro quando comparados a métodos numéricos. Isto pode ser observado na Tabela 8, onde os valores dos métodos analíticos se distanciam mais do valor medido do que os métodos numéricos.

Os estudos de caso 3 e 4 apresentam duas malhas distintas, porém com a mesma área e estratificação do solo. No método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) tem-se o mesmo valor de resistência para ambas as configurações, pois é levada em consideração apenas a área da malha. O método de Sverak, mesmo levando em consideração o comprimento dos condutores que compõem a malha de aterramento e a profundidade da malha, também apresenta um valor bastante próximo. Porém, os valores medidos se diferem de forma acentuada, e este efeito pode ser capturado pelos métodos numéricos do TLM e do MEF.

Diferente dos métodos analíticos, que consideram o solo formado apenas por uma camada com uma resistividade aparente (ρ_a), os métodos numéricos utilizam a estratificação do solo em duas camadas (ρ_1 e ρ_2), uma melhor aproximação. Além disso, através dos métodos numéricos é possível capturar o efeito do acoplamento mútuo dos campos eletromagnéticos.

O principal fator que altera a resistência de aterramento é a estratificação do solo. Os valores de resistividade da primeira e da segunda camada influenciam de forma significativa no seu valor. Um dos problemas encontrados durante a realização deste trabalho foi a aplicação do método de Wenner.

O método de Wenner para a estratificação do solo é sujeito a interferências, portanto é necessária a identificação de que os valores medidos sejam correspondentes a valores reais. Ou seja, que as medidas realizadas sejam isentas de interferências externas.

O modelo de simulação implementado, que utiliza o método de elementos finitos (MEF), mostrou-se adequado para o cálculo da resistência de aterramento. Através das curvas de resistência é possível notar o comportamento esperado, de acordo com o perfil obtido nos processos de medição utilizando o método da queda de potencial. Outro aspecto importante é a proximidade dos valores com método do TLM, onde o erro percentual ficou abaixo de 16 % para todos os estudos de

caso. Quando comparado aos valores medidos, este método também se mostra adequado. No estudo de caso 1, onde possuímos um erro percentual maior, 39,57 %, temos uma variação entre medida e simulado de menos de 6Ω . Cabe destacar que a propagação do erro dos equipamentos e as incertezas de medição não foram levadas em consideração para o cálculo.

4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as comparações entre os métodos de obtenção da resistência de aterramento. Ainda neste capítulo foram discutidas as diferenças entre metodologias empregadas.

No método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) tem-se o mesmo valor de resistência para malhas de aterramento que ocupam uma mesma área, mesmo com configurações diferentes. O método de Sverak, mesmo levando em consideração o comprimento dos condutores que compõem a malha de aterramento e a profundidade da malha, também apresenta um valor bastante próximo. Porém, os valores medidos se diferem de forma acentuada, e este efeito foi capturado pelos métodos numéricos do TLM e do MEF.

Com a comparação dos resultados, é demonstrado que o modelo utilizado para a análise da resistência de aterramento através do método de elementos finitos (MEF) é coerente para a determinação do seu valor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram estudados e analisados métodos para a obtenção da resistência de uma malha de aterramento, com o foco em um modelo de simulação numérica. Para isto, foram realizados cinco estudos de caso distintos. Os resultados obtidos com o modelo de simulação foram comparados as seguintes metodologias: de medição, pelo método da queda de potencial; de cálculo, pelo método aproximado da NBR 15751:2013 (ABNT, 2013) e pelo método de Sverak; e pelo método numérico do TLM.

No Capítulo 2 foram descritas e discutidas as metodologias de medição e cálculo, tanto para a resistividade do solo, quanto para a resistência de aterramento. No qual, os valores obtidos com a estratificação do solo foram considerados adequados para a região. Para a resistência de aterramento os modelos de cálculo correspondem a uma boa estimativa. No entanto, estes modelos possuem simplificações, como, por exemplo, a utilização da resistividade aparente (ρ_a) do solo, e o fato de não considerarem o acoplamento mútuo dos campos elétricos em seus cálculos.

O Capítulo 3 apresentou o cálculo da resistência de aterramento utilizando o *software* de simulação numérica ANSYS Maxwell 3D, que é baseado no método de elementos finitos (MEF). Com o modelo de simulação implementado foi possível a obtenção das curvas de resistência de aterramento. De acordo com o esperado, estas curvas se assemelham com as curvas do método de medição da queda de potencial (seção 2.4.1).

No Capítulo 4 foram analisados e comparados os valores obtidos para as resistências de aterramento através dos métodos citados no Capítulo 2 e Capítulo 3, além do método numérico do TLM. Ainda neste capítulo foi discutida a influência do modelo de estratificação do solo, principal responsável pelo valor da resistência de aterramento.

De acordo com o analisado no decorrer deste trabalho, o modelo de simulação implementado, utilizando método de elementos finitos (MEF), apresenta resultados satisfatórios, condizentes com os valores calculados e medidos. Quando comparado ao modelo de simulação que utiliza o método do TLM, seu erro relativo percentual ficou abaixo de 16 %. Quando comparado a valores medidos, desprezando as incertezas de medição e propagação de erros, temos um valor menor que 6Ω para o maior erro relativo percentual calculado. Portanto, conforme demonstrado pelos resultados obtidos o modelo apresentado é coerente para a determinação da resistência de aterramento.

Como já citado anteriormente, o principal fator que altera a resistência de aterramento é a estratificação do solo. Os valores de resistividade da primeira e da segunda camada influenciam de forma significativa no seu valor. Um dos problemas encontrados durante a realização deste trabalho foi a incerteza se os dados obtidos com a estratificação do solo representavam o seu valor real. O método de Wenner utilizado é sujeito a interferências, portanto é necessária a identificação de que os valores medidos sejam correspondentes a valores reais. Portanto, para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento ou análise de um método diferente para a obtenção da estratificação do solo que seja menos susceptível a interferências externas.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15749:2009** **Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 2009.

ABNT. **NBR 7117:** 2012 Medição de resistividade e determinação da estratificação do solo. 2ª. ed. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012.

ABNT. **NBR 15751:** 2013 Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos. 2ª. ed. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013.

ALÍPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e frequência.** Dissertação (Dissertação em Modelagem Matemática e Computacional) - CEFET/MG. Belo Horizonte, 2008.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia:** estática e quase-estática. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2004.

BRENNAN, M. et al. Particular Grounding Systems Analysis using FEM Models. **2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, Milan, 13-16 Maio 2018.

FACCIONI FILHO, M. **O Método de Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e Aplicações em Compatibilidade Eletromagnética (EMC).** Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) UFSC. Florianópolis. 1997.

IEEE. **IEEE STD 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding.** New York: IEEE, 2013.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico.** 5ª. ed. Florianópolis: [s.n.], 2002.

MARTINHO, L. B. **Contribuições à modelagem de sistemas de aterramento pelo método dos elementos finitos no regime**

harmônico. Dissertação (Dissertação em Engenharia, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas) USP. São Paulo. 2009.

OLIVEIRA, M. L. D. F. **Estudo de aterramentos elétricos em baixas frequências utilizando o método sem malha.** Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - CEFET-MG UFSJ. Belo Horizonte. 2016.

PIRES, T. G. **Cálculo de Parâmetros de Malhas de Aterramento em Geometrias Não Convencionais.** Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica e de Computação) -UFG. Goiânia. 2016.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo.** 3^a. ed. New York: Bookman, 2004.

SILVA, V. C. **Método de elementos finitos aplicado à solução de problemas de aterramento elétrico.** Tese (Tese do Curso de Professora Livre Docente, Departamento de Engenharia de Energia e Automações Elétricas) USP. São Paulo. 2006.

SILVEIRA, J. L. **Modelagem numérica 3D de problemas de compatibilidade eletromagnética utilizando o método TLM-TD.** Tese (Tese em Engenharia Elétrica) UFSC. Florianópolis. 2002.

SOUZA JR, E. D. S. **Simulação, em ambiente computacional, do método de Wenner e obtenção da resistência de aterramento usando FDTD.** Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - UFPA. Belém. 2007.

VALENTE, W. et al. Ground Impedance Assessment Employing Earth Measurements, Numerical Simulations, and Analytical Techniques. **015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)**, Balneário Camboriú, 28 Setembro 2015.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento.** São Paulo: Artliber, 2002. ISBN CDD-621.31923.