

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JADER LINS POMPEU

ROBERT NICOLLAS DE CAMARGO WITT

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE EM MALHAS DE ATERRAMENTO
ANTE A UTILIZAÇÃO DE TERRÔMETROS DE ALTA FREQUÊNCIA

CURITIBA

2018

JADER LINS POMPEU
ROBERT NICOLLAS DE CAMARGO WITT

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE EM MALHAS DE ATERRAMENTO
ANTE A UTILIZAÇÃO DE TERRÔMETROS DE ALTA FREQUÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Edemir Luiz Kowalski

Coorientador: M.Sc. Diogo Biasuz Dahlke

CURITIBA
2018

À minha família, em especial aos meus avós, José Maria Zanardini de Camargo e Hedwiges Camargo, mãe, Nina Camargo e tia, Tereza Camargo, os quais me proporcionaram toda a base para que eu pudesse me concentrar apenas em meus estudos e todo seu amor incondicional.

À minha namorada e companheira Samira Yousseif, com quem tenho contado incondicionalmente em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas, sem os quais a jornada da graduação teria sido massivamente mais árdua e amarga.

Robert Camargo

Aos meus pais, Ivânia e Juarez Pompeu, pelas incansáveis horas de apoio e incondicional amor que recebi durante toda a vida.

A minha namorada Jaqueline Cupini, pois nossos corações estão conectados, mesmo se estamos distantes.

E aos meus amigos Felipe, Rafael, Thiago e Wendy. Sem os quais a graduação provavelmente teria sido mais fácil.

Jader Lins

AGRADECIMENTOS

É inviável mencionar e agradecer todas as pessoas das quais aprendemos durante toda a vida e a quem somos profundamente gratos. Porém em especial durante o período de realização deste trabalho tivemos o privilégio de nos beneficiar de incontáveis discussões acerca do tema de aterramentos elétricos dos estudiosos e brilhantes tutores Alexandre Costa, Henry Salamanca, Luis Gamboa, Otavio Shiono, e Pedro Block, que nos auxiliaram a organizar as ideias e, conseqüentemente, a moldar este trabalho.

Agradecemos ao LACTEC pela infraestrutura disponibilizada e pelo quadro de excelência montado, que formam um ambiente pujante de pesquisa e desenvolvimento científico.

Injusto seria não agradecer também aos nossos colegas de graduação que de alguma forma contribuíram especificamente com este trabalho, como Matheus Gidalti pela prontidão e companheirismo em prestar ajuda na dura tarefa de remover do solo um dos eletrodos ensaiados com uma boa dose de criatividade. E aos colegas de estágio Gilson de Castro e Pedro Roesler pelos estalos e dicas que diversas vezes salvaram o dia.

Por fim, devemos registrar nossa gratidão a duas figuras centrais deste trabalho. Primeiramente ao nosso professor e orientador Dr. Edemir Luiz Kowalski que definitivamente elevou a qualidade de nossa monografia e pelas cobranças, quase que diárias, não permitindo com que perdêssemos o foco na qualidade e robustez científica.

E ao nosso coorientador Msc. Diogo Biasuz Dahlke, que sempre demonstrou devoção e entusiasmo com este trabalho. A ele somos agradecidos por sua erudição bibliográfica e pelas estimulantes discussões dos temas trabalhados.

**O DESTINO DOS NÃO CONFORMISTAS:
“VOCÊ É — DIR-LHE-ÃO — UM INOVADOR PERIGOSO,
UM UTÓPICO, UM TEÓRICO, UM SUBVERSIVO,
VOCÊ ESTÁ ABALANDO AS BASES SOBRE
AS QUAIS REPOUSA A SOCIEDADE.”
(FRÉDÉRIC BASTIAT, 1850, P.16)**

RESUMO

Este trabalho apresenta estudos experimentais acerca da distribuição de corrente em eletrodos de aterramento. Foram estudados modelos em escala reduzida e através da amostragem de ensaios com terrômetros de baixa frequência e de alta frequência, sempre com atenção a questões de segurança e eliminação de riscos envolvidos em cada ensaio. Paralelamente, foram realizadas simulações através dos softwares *COMSOL* e *MATLAB* para verificar possíveis influências indesejadas nas amostragens obtidas em campo e verificações acerca dos modelos em escala reduzida aplicados. São discutidos temas acerca do comportamento em baixa e alta frequência dos eletrodos, bem como os métodos para se calcular a sua impedância de aterramento. Considerações fundamentais sobre as diferenças entre a impedância em corrente contínua, no domínio da frequência e impulsiva são abordadas. Por fim, os resultados das amostragens obtidas corroboram com a ideia de que todo método tem sua limitação e é imprescindível que estas sejam trazidas a luz e debatidas.

Palavras-chave: Aterramento. Frequência. Corrente. Eletrodo. Escala. Simulação.

ABSTRACT

This work presents experimental studies about the current distribution in grounding electrodes. We studied reduced scale models and through the sampling of tests with low frequency and high frequency terrometers, always paying attention to the safety and risk elimination issues involved in each test. At the same time, simulations were carried out using the *COMSOL* and *MATLAB* software to verify possible undesirable influences in the samplings obtained in the field and verifications about the reduced scale models applied. Subjects are discussed about the low and high frequency behavior of the electrodes as well as the methods for calculating their grounding impedance. Fundamental considerations about the differences between impedance in direct current, frequency domain and impulsive are addressed. Finally, the results of the samplings obtained corroborate with the idea that every method has its limitation and it is imperative that these are brought to light and debated.

Keywords: Grounding. Frequency. Current. Electrode. Scale. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- CIRCUITO EQUIVALENTE DO ZED-METER.....	20
FIGURA 2	- ESQUEMÁTICO DE UMA LT ARTIFICIAL	21
FIGURA 3	- CORRENTES INDUZIDAS E RESIDUAL EM TORRES DE TRANSMISSÃO.....	23
FIGURA 4	- MODELO DE DRUDE.....	27
FIGURA 5	- COMPORTAMENTO DA PRIMEIRA E SEGUNDA DESCARGA.....	31
FIGURA 6	- CIRCUITO EQUIVALENTE.....	36
FIGURA 7	- REPRESENTAÇÃO PI SEM EFEITO CAPACITIVO.....	36
FIGURA 8	- REGIÕES DE COMPORTAMENTO INDUTIVO E CAPACITIVO DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO.....	38
FIGURA 9	- COMPORTAMENTO DE UM ELETRODO DE ATERRAMENTO.....	39
FIGURA 10	- CONFIGURAÇÃO DOS ELETRODOS NO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL.....	41
FIGURA 11	- ÁREAS DE RESISTÊNCIA EFETIVA (SOBREPOSTAS).....	42
FIGURA 12	- ÁREAS DE RESISTÊNCIA EFETIVA (NÃO SOBREPOSTAS).....	42
FIGURA 13	- ARRANJO DE WENNER.....	43
FIGURA 14	- PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO ELETRODO DE ATERRAMENTO.....	45
FIGURA 15	- DISPOSIÇÃO DOS ELETRODOS DO MÉTODO DOS 3 PONTOS...	45
FIGURA 16	- RESULTADO DO ENSAIO DE APROFUNDAMENTO DE HASTE DE 41 ATÉ 5087 Hz.....	47
FIGURA 17	- RESULTADO DO ENSAIO DE APROFUNDAMENTO DE HASTE EM 25.000 Hz.....	47
FIGURA 18	- CONFIGURAÇÃO DO ELETRODO HORIZONTAL.....	48
FIGURA 19	- ENSAIO DE ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO.....	49
FIGURA 20	- RESISTIVIDADE MÉDIA DO SOLO.....	49
FIGURA 21	- SOLO ESTRATIFICADO.....	50
FIGURA 22	- LINHAS DE REFERÊNCIA.....	50
FIGURA 23	- POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 1.1.....	51
FIGURA 24	- POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 1.2.....	51
FIGURA 25	- POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 3.....	52
FIGURA 26	- POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 5.1.....	52

FIGURA 27 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQÜÊNCIAS DE 200 E 1000 HZ.....	53
FIGURA 28 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQÜÊNCIAS DE 5000 E 6000 HZ.....	54
FIGURA 29 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQÜÊNCIAS DE 8 E 20 KHZ.....	54
FIGURA 30 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQÜÊNCIAS DE 40 E 60 KHZ.....	55
FIGURA 31 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQÜÊNCIAS DE 80 E 100 KHZ.....	55
FIGURA 32 - RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E A CORRENTE DE UM CIRCUITO L.....	56
FIGURA 33 - LOCALIZAÇÃO DOS ELETRODOS E ORIENTAÇÃO DAS MEDIÇÕES.....	58
FIGURA 34 - GEOMETRIA SIMULADA NO COMSOL.....	59
FIGURA 35 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COBRE DA BIBLIOTECA DO COMSOL.....	61
FIGURA 36 - ELETRODO DE ATERRAMENTO (E_g).....	61
FIGURA 37 - ELETRODO AUXILIAR DE CORRENTE (E_c).....	62
FIGURA 38 - ELEMENTOS FINITOS.....	62
FIGURA 39 - DENSIDADE DE CORRENTE.....	63
FIGURA 40 - POTENCIAL ELÉTRICO DE SUPERFÍCIE NO EIXO X.....	63
FIGURA 41 - POTENCIAL ELÉTRICO DE SUPERFÍCIE NO EIXO Y.....	64
FIGURA 42 - SIMULAÇÃO NO MATLAB.....	65
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO DOS POTENCIAIS PERPENDICULARES ENTRE SIMULAÇÕES	66
FIGURA 44 - COMPARAÇÃO DOS POTENCIAIS PARALELOS AO ELETRODO.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DA PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO ELETRODO DE ATERRAMENTO.....	46
TABELA 2 - IMPEDÂNCIA E PROPORÇÃO ENTRE CORRENTES.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATL	- <i>Artificial Transmission Lines</i> - Linhas de Transmissão Artificiais
C1	- Ponto sobre o qual está localizado o eletrodo sob teste
C2	- Ponto sobre o qual está localizado o eletrodo auxiliar de corrente
Cobei	- Comitê Brasileiro de Eletricidade
ddp	- Diferença de potencial
E_c	- Eletrodo auxiliar de corrente
E_g	- Eletrodo de aterramento
F_c	- Frequência característica
FRS	- Primeira descarga (raio)
I_0	- Corrente que circula entre os eletrodos E_c e E_g
I_{AB}	- Corrente induzida entre as torres A e B
I_{BC}	- Corrente induzida entre as torres B e C
IEEE	- Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IEEE Std	- IEEE <i>Standard</i> - Norma IEEE
I_P	- Valor de pico da corrente descarregada no sistema de aterramento
I_T	- Corrente injetada
$I_{(\omega)}$	- Corrente em função da frequência angular
l_c	- Comprimento crítico
LT	- Linha de transmissão
MATLAB	- <i>Matrix Laboratory</i> - Software Computacional
NBR	- Norma Brasileira
P1	- Ponto sobre o qual está localizado o eletrodo sob teste
P2	- Ponto sobre o qual está localizado o eletrodo auxiliar de potencial
R_M	- Valor de resistência medido
R_S	- Valor de resistência simulado
R_T	- Resistência de aterramento
SRS	- Segunda descarga e descargas subsequentes (raio)
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
V_P	- Valor de pico da tensão gerada no ponto de descarga
V_{PP}	- Amplitude “pico-a-pico” da tensão senoidal
V_T	- Potencial em relação ao terra remoto no ponto de injeção de corrente

- $V_{(\omega)}$ - Potencial em função da frequência angular
- Z_g - Valor medido da impedância de aterramento
- Z_P - Impedância Impulsiva
- $Z_{(\omega)}$ - Impedância em função da frequência angular

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	- Micro (10^{-6})
Ω	- Ohm - unidade de resistência elétrica
ω	- Ômega - frequência angular (rad/s)
σ	- Sigma - condutividade elétrica de um material
ρ	- Rho - resistividade elétrica de um material
%	- Porcentagem
π	- Pi
\int	- Integral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	RELEVÂNCIA.....	18
2	ESTADO DA ARTE.....	19
2.1	MÉTODO ZED (ZED-METER).....	19
2.2	MÉTODO ATL.....	21
2.3	MÉTODO DA CORRENTE RESIDUAL.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
3.2	IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO.....	25
3.2.1	Impedância em Corrente Contínua.....	27
3.2.2	Impedância no Domínio da Frequência.....	28
3.2.3	Impedância Impulsiva.....	30
3.3	CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA EM ATERRAMENTOS.....	32
3.3.1	Caracterização das condições de risco.....	32
3.3.1.1	Potencial de Passo.....	32
3.3.1.2	Potencial de Toque.....	33
3.3.1.3	Potencial Transferido.....	34
3.3.2	Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.....	34
3.3.3	Precauções Durante Medições de Resistência de Terra.....	35
3.4	MODELOS EM ESCALA REDUZIDA.....	35
3.5	COMPORTAMENTO DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO EM RELAÇÃO A FREQUÊNCIA.....	37
3.6	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	39
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1	MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL.....	41
4.2	MÉTODO DE WENNER.....	43
4.3	MODELOS EM ESCALA.....	44
4.3.1	Modelo em Escala Reduzida com Alto Efeito Capacitivo.....	44

4.3.2	Modelo em Escala Real com Haste de Aterramento.....	46
4.3.2.1	Ensaio de Impedância de Aterramento em Função do Aprofundamento de uma Haste.....	46
4.3.3	Modelo em Escala Reduzida com Eletrodo Horizontal.....	48
4.3.3.1	Validação do Modelo em Escala Reduzida com Eletrodo Horizontal.....	48
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
5.1	VARREDURA EM FREQUÊNCIA E OSCILOGRAFIA NO ELETRODO HORIZONTAL.....	53
5.2	SIMULAÇÕES.....	58
5.2.1	Simulação no <i>COMSOL</i>	59
5.2.2	Simulação no <i>MATLAB</i>	64
5.2.3	Comparação Entre as Simulações.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXO 1 – ATA CE-03:102.01 COBEI/ABNT.....	72
	ANEXO 2 - ESPECIFICAÇÃO DO ALICATE DE CORRENTE I30S.....	75
	ANEXO 3 – ESPECIFICAÇÃO DO ALICATE DE CORRENTE SR759.....	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Por diversas razões técnicas e de segurança, instalações elétricas devem ser aterradas. O aterramento dessas instalações é realizado através da ligação de estruturas metálicas, pertencentes a instalação, à terra. Nesse sentido, uma pequena impedância é fornecida entre o neutro do sistema elétrico e o solo condutor, o que garante que a tensão no neutro será baixa sob todas as condições. (MELIOPOULOS, 1988)

Os sistemas de aterramento devem ser interpretados como elementos promotores de uma transição amigável entre os mais diversos sistemas de energia elétrica e o solo. Em caso de ocorrência de alguma falta extraordinária, de descargas atmosféricas ou quaisquer distúrbios indesejáveis que causem risco a segurança das instalações são estes um dos principais sistemas acionados. (ARAÚJO *et al*, 2007).

Para uma análise eficiente de sistemas de aterramento é essencial que se conheçam as vantagens e limitações de todo método empregado na realização de medições da resistência de aterramento e do levantamento do comportamento elétrico dos eletrodos envolvidos, sob diferentes condições de frequência. Neste trabalho a análise da distribuição de corrente de alta frequência através de eletrodos de aterramento servirá para que se possa levantar os efeitos eletromagnéticos envolvidos e verificar suas influências nos resultados de medições realizadas com terrômetros de alta frequência.

Diferentes métodos podem ser aplicados na análise de sistemas de aterramento para se manter a eficiência e confiabilidade desse tipo de instalação. Para isso é necessário estar atento as vantagens e limitações de cada diferente método. (DAWALIBI, 1998).

Através dessa premissa, a avaliação dos valores de resistência de aterramento fornecidas por terrômetros de alta frequência, que são equipamentos que se utilizam da injeção de uma corrente de onda periódica com frequências muito acima de 60 Hz, é necessária, pois para estes casos o acoplamento indutivo e capacitivo entre os condutores que compõe o sistema de aterramento pode

apresentar respostas diferentes dos apresentados por equipamentos de baixa frequência.

Segundo DAWALIBI (1998), os casos que necessitam da avaliação da resposta à frequência geralmente são associados a problemas relacionados a descargas atmosféricas e transientes devido ao chaveamento de bancos de capacitores.

Nesse sentido ao ser analisada a densidade de corrente nos eletrodos de aterramento pode-se extrair conclusões fundamentais sobre a influência da utilização de altas frequências nos dados relativos a resistência de aterramento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A análise da distribuição de corrente nos condutores que formam malhas de aterramento, feita através de simulação no *software* multifísico *COMSOL* e no *software MATLAB*, analisando os valores simulados de potenciais na superfície. Paralelamente a isso, medições da resistência de aterramento serão realizadas com diferentes modelos de terrômetros, de modo a analisar a distribuição de corrente e a observar o comportamento de cada tipo de eletrodo com relação a diferentes frequências e em variadas configurações.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Revisão Bibliográfica: Pesquisa envolvendo a revisão da literatura, levantamento de normas aplicáveis e legislações locais, com objetivo de fundamentar o desenvolvimento do trabalho.
- b) Estudos Simulados: Elaboração de simulações no *software* *COMSOL* de malhas de aterramento para análise da distribuição de corrente em suas quadrículas.

- c) Estudos em Modelos em Escala Reduzida: Modelagem, Construção e Medição com a instrumentação adequada de um sistema de aterramento em escala reduzida.
- d) Análise de Resultados: Através dos dados obtidos e do levantamento bibliográfico realizar estudo acerca da resistência de aterramento fornecida por terrômetros de alta frequência.

1.3 RELEVÂNCIA

A análise dos resultados apresentados por terrômetros de alta-frequência através de uma abordagem que possibilita a verificação dos efeitos eletromagnéticos envolvidos tem relevância para o arcabouço de conhecimentos que ampara os profissionais que atuam na obtenção de dados relativos ao aterramento de linhas de transmissão ou malhas de subestações.

Além disso, o trabalho trata de tema bastante atual que faz parte da revisão da “ABNT NBR 15749 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento” discutida pela comissão de aterramentos elétricos que faz parte do Cobei (Comitê Brasileiro de Eletricidade) ata registrada sob o número CE-03:102.01 disponível no ANEXO 1, onde os resultados fundamentais deste trabalho podem contribuir para refinar o entendimento das vantagens e limitações dos equipamentos envolvidos nos procedimentos de alta frequência em áreas energizadas.

A ABNT NBR 15749 de 2009, porém foi revisada em julho de 2018, e contempla assuntos que se mostram muito relevantes para este trabalho, catalogando em norma a medição de resistência (impedância) de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.

Ressalta-se que a impedância de aterramento é um fator extremamente relevante para a definição de um sistema, e que é a variável que deve ser analisada mais cuidadosamente, pois representa onde acontece a conexão entre o sistema elétrico e a terra.

Atualmente, para altas-frequências, existem alguns métodos descritos na literatura que abordam o tema de medição de impedâncias de aterramento, e que são aplicados na prática. Estes serão apresentados e descritos no capítulo 2, Estado da Arte.

2 ESTADO DA ARTE

Os sistemas de aterramento, por serem parte essencial de sistemas elétricos, contam com grande número de publicações referentes a técnicas e ferramentas da área, como materiais construídos especificamente para auxiliar nessas medições, além de instrumentos de medição direcionados para esse fim. Neste capítulo serão apresentadas algumas das pesquisas e materiais mais recentes relacionadas a essa temática.

A eletricidade faz parte de nossas indústrias e dia-a-dia tornando-se um item considerado básico para o desenvolvimento econômico e da qualidade de vida da sociedade. Como resultado dessa importância, as instalações elétricas cresceram em números impressionantes, bem como inúmeros problemas associados a confiabilidade de operação, qualidade de energia, questões econômicas e de segurança.

A qualidade do aterramento, seja em subestações ou torres de linhas de transmissão, é um elemento fundamental para a operação segura dos equipamentos bem como das pessoas que operam estas ou circulam próximas a elas. A medição das propriedades do aterramento muitas vezes deve ser realizada com os equipamentos energizados, implicando em riscos aos técnicos que realizam estas medidas. Nas últimas décadas, a utilização de softwares especialistas, tem tomado uma importância dentro deste cenário, pois elimina os riscos associados à medida física propriamente dita

Dentro desse escopo onde os sistemas de aterramento apresentam grande importância, existem diversas metodologias para se verificar e analisar as impedâncias de aterramento.

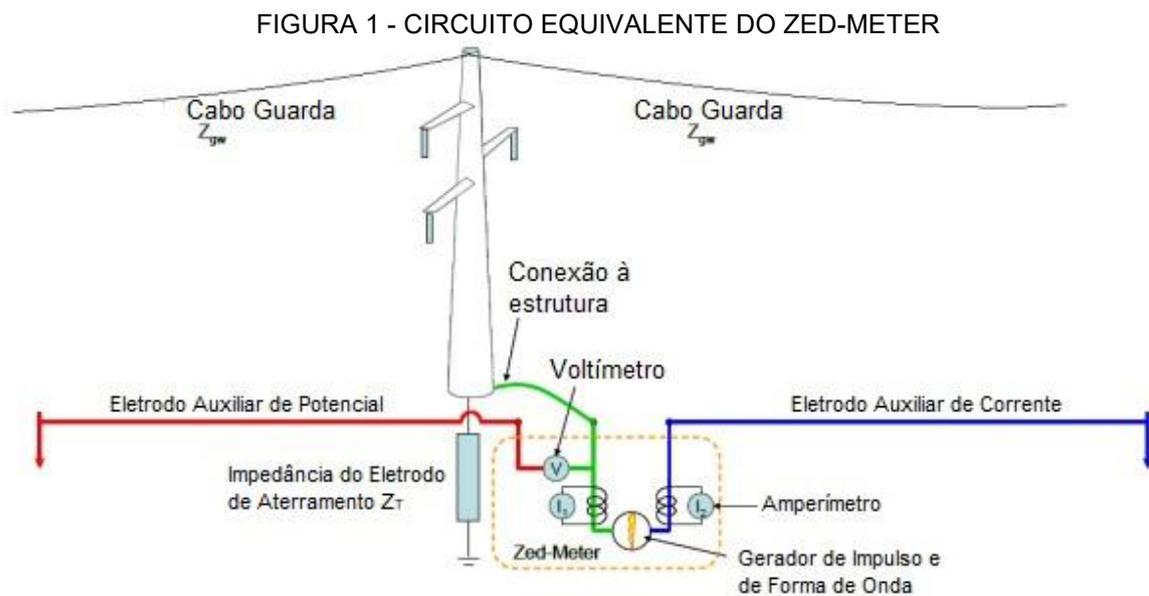
2.1 MÉTODO ZED (*ZED-METER*)

O método Zed foi desenvolvido em um período de quatorze anos e aplicado em centenas de estruturas de transmissão (CHISHOLM *et al.*, 2017). Nesse método o instrumento *Zed-Meter* é acoplado à base de uma torre e um par de conexões estabelecidas com fios sobre o solo. Essas conexões se dão através do voltímetro do aparelho, ligado a um eletrodo auxiliar de potencial e do gerador de impulsos do

instrumento, ao qual são conectados um eletrodo auxiliar de corrente, e um condutor, que é conectado ao pé da torre.

O instrumento mede a impedância de aterramento de linhas de transmissão e difere dos métodos convencionais por não necessitar da remoção ou isolamento de cabos blindados e por fornecer o valor da impedância de aterramento mais relevante para eventos atmosféricos e não a resistência na frequência industrial. (BOLOGNA, 2014).

A filosofia por trás dessa metodologia se baseia no fato de que sob descargas atmosféricas o estresse máximo ao qual os isoladores são submetidos ocorre antes que as torres adjacentes tenham a chance de reagir e ajudar no escoamento da corrente de surto. Considera-se o tempo de $2 \mu\text{s}$ em ambos os sentidos propagação e que a torre mais próxima esteja a 300 m de distância ou além. A FIGURA 1 mostra a representação do circuito equivalente do método Zed.



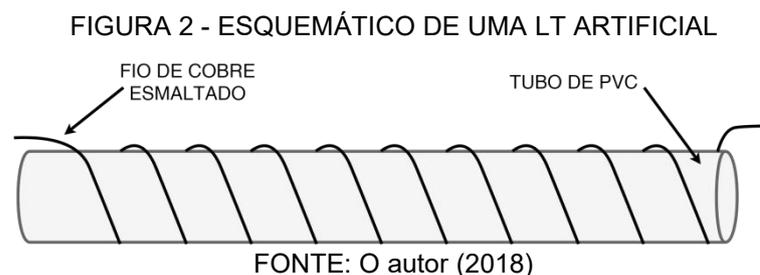
FONTE: Adaptado de BOLOGNA (2014)

Em baixas frequências a impedância de aterramento medida em uma torre específica é o equivalente do paralelismo de todas as torres adjacentes devido a interligação via cabos guarda (cabos aéreos equipotencializados com a terra instalados no ponto mais alto das torres ou estruturas equivalentes. Um exemplo pode ser visto na FIGURA 1 identificado como Cabo Guarda). Essa impedância combinada das estruturas vizinhas é usualmente muito menor que a do eletrodo de terra de interesse o que leva a uma medição não acurada.

Como a janela de medição através do método Zed consiste num tempo onde a onda de potencial aplicada em uma estrutura ainda não propagou-se até as torres vizinhas o valor medido é apenas do eletrodo de interesse. Uma segunda medição também é feita em outra janela de tempo e leva em consideração a impedância da vizinhança.

2.2 MÉTODO ATL

Outro método comumente utilizado é o ATL (*artificial transmission lines*), ou linhas de transmissão artificiais, também conhecido por “condutores de baixa velocidade”. Este método tem por objetivo, reduzir consideravelmente as distâncias necessárias para posicionar os condutores necessários, facilitando as medições da impedância de aterramento. Cada unidade de ATL consiste em um condutor curto formado por fios enrolados em um tubo de material isolante que, para sinais impulsivos com frequências representativas elevadas, é capaz de fornecer um valor de impedância satisfatoriamente aproximado. Unidades desse tipo foram utilizadas para simular LTs (Linhas de Transmissão) de comprimentos extensos, na qual cada unidade se constitui de um trecho de linha, possuindo resistência, indutância e capacitância própria. Um esquemático de como é constituída uma ATL é ilustrado na FIGURA 2.



A princípio, o uso de unidades de ATL pode ser capaz de reduzir drasticamente as distâncias necessárias para o condutor de corrente durante medições de impedância de terra de cabos contrapeso, em outras palavras, uma equipotencialização torres de transmissão, através da qual é feita a interligação dos aterramentos individuais de cada estrutura, em LTs. Entretanto, a aplicação destas requer a necessidade de uma avaliação mais detalhada, em termos da condição de

sua extremidade distante, se conectada ao solo por hastes auxiliares de corrente, ou em aberto, cada qual contribuindo com implicações distintas. (NETO, 2017).

Em adição, verifica-se que o simples aterramento da extremidade das unidades de ATL não caracteriza uma prática simplificadora, pois ela mesma implica em novas dificuldades na medição, provenientes das reflexões positivas da onda de corrente no ponto de aterramento.

Acredita-se que o uso de unidades de ATL auxiliando nas medições, possa ser efetivo em arranjos típicos de linhas de transmissão, desde que sejam observados alguns cuidados para evitar as dificuldades decorrentes da mudança da forma de onda da corrente pelo tipo de aplicação. Em experimentos realizados, verificou-se ainda a necessidade do uso de um número mínimo de unidades para assegurar erros reduzidos nos resultados.

2.3 MÉTODO DA CORRENTE RESIDUAL

Outro método eficiente para medir a impedância de aterramentos, especificamente para torres de linhas de transmissão, é o de corrente residual. A caracterização e o melhor entendimento das correntes residuais, que circulam do fio terra ao sistema de aterramento através das estruturas das torres de transmissão, promovem o desenvolvimento de diferentes métodos de medição da resistência de aterramento.

Um desses métodos é baseado no uso da corrente residual como fonte de injeção de corrente nas medições da resistência de aterramento. Este método permite uma melhor análise do sistema de aterramento das torres de transmissão através da análise dos fenômenos que originam essa corrente residual. (SALAMANCA *et al*, 2016).

Quando deseja-se realizar a medição de impedância de aterramento em torres as quais possuem suas ligações à terra juntamente com as de outras torres, pelo mesmo sistema, procura-se proceder sem realizar a desconexão das torres dos sistema, sendo portanto, nesse caso, o método de corrente residual o mais indicado.

Este método é uma das aplicações do método de queda de potencial, tendo como característica própria, a medição de uma corrente que resulta de outras duas, por isso o nome “residual”. As correntes que originam a corrente residual são

residual representa uma opção melhor para os casos em que há solos com alta resistividade. (SALAMANCA *et al*, 2016).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um sistema de aterramento é importante para a manutenção de uma operação confiável do sistema elétrico de potência, proteção de equipamentos e para assegurar a segurança de pessoas e trabalhadores em instalações elétricas. (MA e DAWALIBI, 1998).

Conceitualmente, um aterramento elétrico consiste em uma ligação proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico e de corpos metálicos) ao solo. Ao empregar um sistema de aterramento na prática, este deve ser constituído de componentes básicos, sendo: as conexões elétricas que ligam o sistema ao eletrodo de aterramento, o(s) eletrodo(s) de aterramento (haste(s) metálica(s) enterrada(s) no solo), e a terra que os envolve (solo). (VISACRO, 2002).

O presente trabalho propõe a investigação da distribuição de correntes em sistemas de aterramento afim de auxiliar na discriminação da aplicabilidade e grau de confiabilidade dos resultados obtidos através de terrômetros de alta frequência.

Estudos realizados nas últimas décadas apontam para a forte dependência da permissividade e da resistividade do solo em relação a diferentes condições de frequência. Contudo, até a atualidade, ainda não chegou-se em um resultado conclusivo em termos quantitativos pois, a relação dessas grandezas não se apresenta linear, devido às mais variadas resistividades de solo existentes, nem em um modelo matemático capaz de traduzir essa dependência de uma maneira concisa.

Por esse motivo, mostra-se necessário abordar com mais cuidado a dependência dos parâmetros do solo em relação a frequência.

3.2 IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

O conceito de impedância amplamente utilizado é a oposição de um circuito elétrico a passagem de corrente senoidal alternada definida originalmente no domínio da frequência.

Uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual exercendo influência na capacidade de condução de corrente para o solo. A

associação de cada um desses fatores resulta na chamada impedância de aterramento.

Pela teoria de linhas de transmissão, em circuitos de baixa frequência e por consequência sinais com grande comprimento de onda os efeitos indutivos e capacitivos são muito pequenos podendo-se desprezá-los e mesmo assim produzir modelos que produzem resultados com precisão suficiente para ser uma boa aproximação das leis fundamentais do eletromagnetismo. (GAMITO e OLESKOVICZ, 2014).

Para baixas frequências, geralmente próximas a frequência industrial (50/60Hz), os efeitos reativos associados ao eletrodo de aterramento podem ser desprezados e neste caso a resistência de aterramento (R_T) pode ser definida como a razão entre a elevação de potencial em relação ao terra remoto (V_T) desenvolvida no ponto de injeção de corrente e a corrente injetada (I_T). (ALÍPIO, 2008). Sendo isso representado conforme a equação 1.

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} \quad (1)$$

Já para aplicações de alta frequência, como em telecomunicações, o efeito capacitivo e a reatância indutiva ao longo dos condutores e eletrodos são considerados, principalmente nos solos que possuem alta resistividade. Para cada valor de frequência uma impedância complexa deve ser definida, conforme a equação 2.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2)$$

onde:

Z = Impedância (Ω)

V = Tensão (V)

I = Corrente (A)

ω = Frequência angular (rad/s)

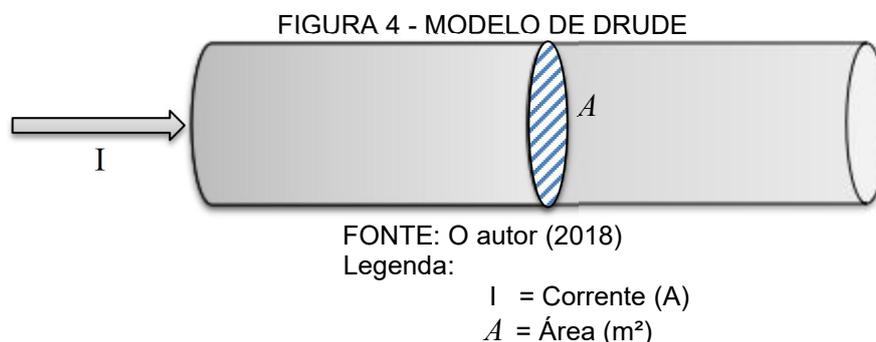
Tais efeitos se fazem presentes também, para ondas impulsivas, como as provenientes de descargas atmosféricas, pois, a frequência nesse tipo de onda em descargas é muito elevada. O valor da resistência de aterramento obtida pela razão entre tensão e corrente tomada nas caudas das ondas fornece uma estimativa da impedância de aterramento. (NETO, 2017).

3.2.1 Impedância em Corrente Contínua

Os elétrons, em um corpo são mantidos sempre em um estado de movimentação aleatória, sem nenhuma resultante média em alguma direção até o momento em que esse corpo é submetido a uma diferença de potencial.

A partir do momento em que o corpo é submetido a uma diferença de potencial (ddp), um campo elétrico é criado e atua gerando uma movimentação de elétrons (corrente elétrica) em um sentido preferencial.

O modelo de Drude (1900) conforme a FIGURA 4, descreve em detalhe, o processo da condução elétrica nos metais, e fornece uma estimativa do valor da resistência e da condutividade em termos de propriedades intrínsecas dos metais, como sua condutividade elétrica, comprimento e área de secção transversal. De acordo com a variação da corrente num condutor com um campo elétrico aplicado, os materiais ôhmicos (imensa maioria dos metais) obedecem a Lei de Ohm. (BUFÁICAL, 2004).



Este modelo consistiu na descrição microscópica da condução metálica em termos de um gás de elétrons livres, que se movem através de uma rede de íons positivos relativamente fixos. O modelo do elétron livre, como é conhecido, prediz com bastante sucesso a lei de Ohm, porém, não obtém completo sucesso na tentativa de interpretar outras propriedades observadas nos metais. (PÉREZ, 2000)

Quando uma ddp é aplicada nas extremidades de um condutor, uma corrente é induzida a circular por esse material. Numericamente, essa ddp corresponde a corrente induzida, multiplicada pela resistência do material em questão. Para Drude, os elétrons de valência, responsáveis por formarem a corrente elétrica nesse condutor, são vistos como um gás eletrônico e os íons que contêm os núcleos são vistos como centros espalhadores fixos.

A resistência do material depende de fatores geométricos: da forma e do tamanho do condutor. Assim, é conveniente definir uma grandeza denominada de condutividade, que depende somente do material do condutor. A experiência mostra que a condutância de uma série de fios de um dado material é diretamente proporcional à área A de sua seção reta e é inversamente proporcional ao seu comprimento L . Drude conclui, portanto, que a condutividade de um material pode ser calculada através da equação 3. (PÉREZ, 2000).

$$\left(\frac{I}{A}\right) = \sigma \left(\frac{V}{L}\right) \quad (3)$$

onde:

I = Intensidade da corrente elétrica induzida;

A = Área de seção transversal;

σ = Condutividade elétrica do material;

V = Tensão (ddp) aplicada nas extremidades do condutor;

L = Comprimento do condutor.

3.2.2 Impedância no Domínio da Frequência

Para medir a impedância de aterramento sem a interferência de circuitos próximos, é necessário utilizar frequências acima da frequência industrial associadas com filtros passa-banda que removam as frequências indesejadas e permitam a passagem apenas da banda de interesse.

É com essa premissa que os equipamentos comerciais foram desenvolvidos. Entretanto, o valor da resistência de aterramento medido em altas frequências (frequências muito superiores a frequência industrial) pode ser bastante distinto do valor medido em baixa frequência.

A análise do comportamento da impedância de aterramento no domínio da frequência assume um papel de grande relevância, pois torna possível o conhecimento das características condutivas, capacitivas e indutivas do aterramento.

Na região de baixas frequências, o módulo da impedância é constante e o ângulo de fase tende a zero. Essas características são comumente associadas ao conceito de resistência de aterramento. Para frequências baixas a reatância indutiva mostra-se ínfima enquanto que a reatância capacitiva mostra-se muito elevada. Observa-se também, ainda, nessa faixa de frequência, que o módulo da impedância é reduzido quase que na mesma proporção em que o comprimento do eletrodo é aumentado, até um determinado valor, a partir do qual essa redução deixa de ser significativa. (LIMA, 2010).

No mesmo sentido, LIMA (2010) também destaca o comportamento da impedância na região de alta-frequência, onde fica evidente que a resposta do aterramento possui ambas as características, tanto capacitiva quanto indutiva. Isto pode ser verificado observando-se o ângulo da impedância que assume valores ora positivos, ora negativos. Chama também a atenção, o fato de que a resposta do aterramento constituído por eletrodos de menor comprimento apresenta características preponderantemente capacitivas. Assim, na medida em que o comprimento do eletrodo aumenta a resposta passa a ter características indutivas que chegam a ser dominantes para eletrodos de comprimentos maiores.

Tal característica pode ser entendida considerando o fato de que, apesar da capacitância total de um eletrodo aumentar com o aumento do comprimento, a capacitância por unidade de comprimento, de forma contrária, diminui. Além disso, a indutância por unidade de comprimento aumenta à medida que o eletrodo torna-se maior.

Após muitos pesquisadores se depararem com o problema do comportamento transitório de sistemas de aterramento, foram realizadas pesquisas mais aprofundadas nesse sentido, utilizando diferentes solos, frequências e tamanhos de eletrodo.

A partir disso, descobriu-se que os eletrodos de aterramento com comportamento capacitivo têm uma performance efetiva para altas frequências, enquanto que eletrodos com comportamento indutivo têm uma performance mais

mais satisfatória para a mesma condição de frequência quando a frequência característica do sistema (F_c) assumir um valor de magnitude mais elevada.

Geralmente, para reduzir tensões transitórias entre pontos e, conseqüentemente o risco de potencial de toque e de passo, deseja-se que o caminho percorrido pela corrente seja minimizado. Para sistemas de aterramento mais simplificados, deve-se seguir “regras” simples como utilizar eletrodos de menor comprimento com comportamento predominantemente capacitivo, além do cuidado para se posicionar corretamente o ponto descarga da corrente próximo ao meio da malha de aterramento, evitando sempre as bordas. (GRCEV, 1998).

3.2.3 Impedância Impulsiva

Como dito no capítulo 3.2 a impedância de aterramento é composta de capacitâncias e indutâncias além da resistência de aterramento. Pode-se então, classificar a impedância de aterramento de acordo com o efeito mais predominante, ou seja, é possível que a impedância de terra seja mais predominantemente capacitiva do que indutiva e vice-versa.

O comportamento de um sistema de aterramento sob condições de descarga atmosférica determina o grau de proteção fornecido pelo mesmo.

Quando uma corrente é descarregada para um sistema de aterramento, sua impedância impulsiva é definida como a razão do valor de pico de tensão gerada no ponto, pelo valor de pico da corrente. São fatores que influenciam a impedância impulsiva: forma e tamanho do eletrodo, o espaçamento entre os eletrodos, magnitude, forma e ponto de injeção da corrente, além das características do solo. Assim como em outras configurações a impedância impulsiva é influenciada pela indutância presente no eletrodo. (GUPTA e THAPAR, 1980).

Pode-se, a partir desse conceito, definir uma equação matemática que rege esse comportamento, esta está apresentada em equação 4.

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (4)$$

onde:

Z_p = Impedância Impulsiva;

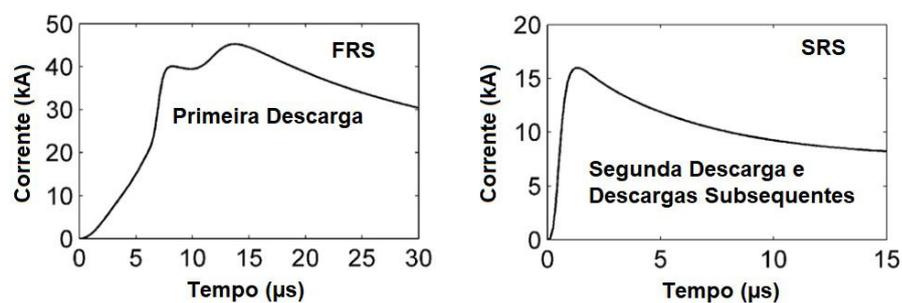
V_p = Tensão de Pico;

I_p = Corrente de Pico.

No passado, essa razão era conhecida por “resistência de aterramento impulsiva”. Com a evolução dos estudos nesse sentido, tal termo foi substituído por “impedância impulsiva”, já se mostra presente uma defasagem entre tensão e corrente de pico e que a mesma é originada por efeitos reativos (capacitivo e indutivo). Ao usar o termo “resistência”, implica-se em picos de tensão e corrente simultâneos, o que na prática não se mostra verdadeiro. (VISACRO, 2018).

Com o objetivo de usar o conceito de impedância impulsiva como uma representação concisa de eletrodos de aterramento atuando em aplicações de proteção a descargas elétricas, Visacro realizou experimentos, analisou a resposta da forma de onda e notou que tal resposta apropriava-se de duas características distintas principais, podendo dividir-se em: FRS (*first return-stroke*), que refere-se à primeira descarga e SRS (*subsequent return-strokes*), que refere-se à segunda e às demais descargas, sendo que FRS refere-se a primeira análise à resposta do eletrodo a descarga elétrica e SRS refere-se às respostas subsequentes. Essa divisão pode ser vista de maneira mais clara na FIGURA 5.

FIGURA 5 - COMPORTAMENTO DA PRIMEIRA E SEGUNDA DESCARGA



FONTE: Adaptado de VISACRO FILHO (2018)

A partir disso, pode-se afirmar que utilizando-se da impedância obtida no gráfico FRS, obtém-se um valor bastante similar àquele fisicamente conhecido para representar eletricamente um eletrodo de aterramento. (VISACRO, 2018).

3.3 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA EM ATERRAMENTOS

Para se caracterizar algumas condições básicas de segurança, é necessária a abordagem de alguns conceitos fundamentais sobre o tema.

A segurança em aterramentos é pareada através das aplicações fundamentais de aterramentos elétricos: a proteção à vida humana e dos demais seres vivos e o desempenho do sistema elétrico.

Uma primeira motivação básica para a implantação de sistemas de aterramento é a questão da segurança de pessoas. Casos de sistemas de proteção contra descarga atmosférica (para-raios) e de carcaças de motores, onde as conexões com a terra são projetadas especificamente para constituir um fator de segurança (VISACRO, 2002).

Outra motivação básica para a instalação de sistemas de aterramento é o bom funcionamento dos sistemas elétricos e a proteção de equipamentos.

3.3.1 Caracterização das condições de risco

Com o objetivo de compreender as condições que oferecem riscos à segurança em aterramentos, caracterizam-se certas situações que exigem que cuidados sejam observados.

Quando partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, podendo ocasionar diversos efeitos indesejáveis ao indivíduo, expondo-o à riscos.

No que concerne a situações de risco, quando há corrente fluindo pelo eletrodo de aterramento, é possível caracterizar situações comuns que dão origem aos denominados potencial de passo, potencial de toque e potencial transferido, cada qual oferecendo riscos específicos. (VISACRO, 2002).

3.3.1.1 Potencial de Passo

Uma situação que merece atenção é a denominada potencial de passo (ou tensão de passo), que pode vir a ocorrer em certas situações, como por exemplo, após o sistema de aterramento ter conduzido uma corrente intensa proveniente de uma descarga atmosférica, induzindo assim na superfície do solo, potenciais

significativamente diferentes com distância de aproximadamente um metro entre eles.

Segundo a norma ABNT NBR 15749 (2009), o potencial de passo aplicado a uma pessoa é definido como a tensão induzida na superfície do solo onde está situado um aterramento, adotando-se conservativamente uma distância de 1m entre seus pés.

Portanto, é necessário assegurar que o potencial de passo não ocorra em instalações que possuam aterramento elétrico. A maneira proposta por VISACRO, (2002, pg. 123), consiste em definir a configuração do aterramento com o adequado posicionamento dos eletrodos no solo, assegurando assim, que durante o fluxo da máxima corrente pelo aterramento, numa situação crítica como a máxima corrente de curto, por exemplo, os valores máximos de tais tensões sejam inferiores àqueles que poderiam causar no corpo correntes capazes de gerar efeitos patológicos.

3.3.1.2 Potencial de Toque

Outra situação que pede cuidado é a de geração do potencial de toque, sendo parecida com a do potencial de passo, com o agravante de que a corrente gerada pode atingir o coração, pois seu trajeto inicia em uma das mãos, fluindo até um dos pés.

O fato de se aterrar as partes metálicas de uma instalação gera a preocupação de se observar os riscos associados à tensão que aparece entre estas partes metálicas e a superfície do solo na vizinhança das mesmas, quando há o escoamento de uma corrente do sistema de aterramento para solo. Uma situação típica para este tipo de exposição ocorre quando um indivíduo situa-se em pé sobre o solo e toca simultaneamente nestas partes metálicas. A tensão aplicada sobre o mesmo é denominada potencial de toque. (NOGUEIRA, 2006).

Assim como na situação de potencial de passo, é proposto, como uma maneira de assegurar a não ocorrência deste fenômeno em instalações aterradas, a correta disposição dos eletrodos no solo, assegurando que tais potenciais gerados estejam abaixo daqueles que podem trazer riscos a quem transita pela área do aterramento.

3.3.1.3 Potencial Transferido

Existe também a condição que corresponde ao potencial transferido, onde condutores pertencentes a circuitos eletricamente isolados são energizados por indução. Se uma pessoa entrar em contato com tais circuitos, equipamentos conectados a esses ou mesmo com os elementos aterrados, poderá ser exposta à condição de potencial transferido.

O potencial transferido é uma variante da condição de toque, porém que associada a energização por indução em cabos isolados ou conectados ao aterramento, sendo “transferida” através dos mesmos para um ponto “distante” do aterramento (terra remoto), cuja tensão induzida no solo seja pouco representativa ou até mesmo desprezível. (NOGUEIRA, 2006).

Algumas práticas devem ser observadas para assegurar o não acontecimento desse evento, durante a execução do projeto de aterramento. Como o exemplo do seccionamento e do isolamento de toda e qualquer parte metálica não energizada, conectada aos eletrodos e que ultrapasse a região do aterramento, constituindo-se, portanto, num possível fator que transfira potência quando flui corrente pelo aterramento. (VISACRO, 2002).

3.3.2 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

Os choques resultam na passagem de corrente elétrica através do corpo de um indivíduo e, dependendo da intensidade da descarga e do tempo de exposição, pode ser fatal. Acidentes com choque elétrico possuem três elementos fundamentais: a parte viva, o corpo de máquinas elétricas que pode ser tocada (massa) e o elemento condutivo. (SILVA e FILHO, 2007).

Consideram-se dois tipos de exposição ao choque elétrico: o direto e o indireto. A exposição indireta é resultado de uma falha de isolamento do sistema elétrico ou aterramento. (COTRIM, 2003).

Os principais efeitos fisiológicos que uma corrente elétrica resultante de um choque produz no organismo humano são a tetanização, fibrilação ventricular, parada cardiorrespiratória e queimaduras. (CAMINHA, 1977).

A fibrilação ventricular é o estado de vibração irregular e desritmada das paredes dos ventrículos, com perda significativa ou completa de eficiência no

bombeamento de sangue do coração para o corpo. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 2002). Os fatores que apresentam maior probabilidade de causar fibrilação ventricular são os choques elétricos súbitos no coração, como nos casos de choques originados pelos potenciais de passo e transferido. (SILVA e FILHO, 2007).

Caso a vítima fique exposta ao choque durante um tempo significativo, poderá sofrer queimaduras já que a corrente elétrica em virtude do Efeito Joule é uma fonte de calor. (CAMINHA, 1977).

Isto posto, fica claro que o correto dimensionamento do sistema de aterramento é de fundamental importância para garantir a segurança da vida humana em instalações elétricas e que medidas preventivas durante medições em campo devem ser tomadas.

3.3.3 Precauções Durante Medições de Resistência de Terra

Há de se ressaltar a importância da manutenção da segurança dos profissionais que realizarão os procedimentos para a medição da resistência de terra.

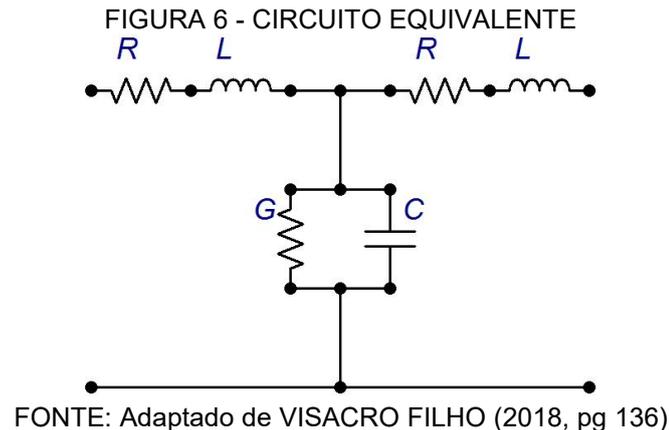
Segundo KINDERMANN e CAMPAGNOLO (2002, pg. 166), os seguintes itens devem ser observados para se efetuar adequadamente a medição de resistência de aterramento:

- › Não devem ser feitas medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade de ocorrência de raios;
- › Não tocar na haste e na fiação;
- › Não deixar que animais ou pessoas estranhas se aproximem do local;
- › Utilizar calçados e luvas de isolamento para executar as medições;
- › O terra a ser medido deve estar desconectado do sistema elétrico.

3.4 MODELOS EM ESCALA REDUZIDA

Os modelos em escala reduzida são úteis quando se tratam de elementos de grandes dimensões ou que exista algum impedimento físico ou financeiro relacionado aos objetos de estudo, e por isso é importante que alguns conceitos relacionados a modelagem de grandes malhas sejam levantados.

A impedância de aterramento pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo e pode ser representada de forma simplificada por meio de um circuito equivalente composto por indutores, capacitores e resistores. (VISACRO FILHO, 2002, pg 12). A FIGURA 6 mostra esse circuito equivalente.

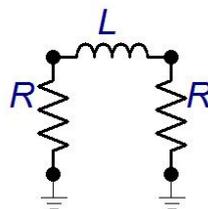


A FIGURA 6 é equivalente a parte de um eletrodo enterrado no solo. A corrente injetada neste eletrodo é parcialmente dissipada para o solo através dos componentes G e C e outra fração transferida para o comprimento do eletrodo.

Nesse tipo de modelagem a corrente longitudinal está associada a efeitos de natureza indutiva devido ao campo magnético produzido principalmente fora do condutor e, também, perdas de natureza resistiva, interna ao material. Já a corrente transversal está associada à dispersão de correntes condutivas e capacitivas para o solo. (LIMA, 2010).

Para a modelagem de malhas de aterramento é comum representar os condutores e hastes de aterramento por modelos PI considerando-se desprezível o efeito capacitivo dos condutores e hastes, conforme FIGURA 7. (GAMITO e OLESKOVICZ, 2014).

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO PI SEM EFEITO CAPACITIVO



FONTE: Adaptado de GAMITO e OLESKOVICZ (2014)

Nesse caso, as perdas para o solo são consideradas puramente resistivas através das componentes R e os efeitos da reatância capacitiva dos condutores utilizados no eletrodo de aterramento.

3.5 COMPORTAMENTO DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO EM RELAÇÃO A FREQUÊNCIA

A preocupação com o comportamento de eletrodos de aterramento em relação a frequência sempre é tema presente na literatura da área, pois é através desse tipo de análise que eventos como manobras em redes e descargas atmosféricas são analisados.

É possível verificar dois comportamentos distintos em eletrodos de aterramento, o de baixa frequência e o de alta frequência.

No comportamento de baixa frequência a impedância é aproximadamente constante e independente da frequência. Quando nesse tipo de situação é esperado que independente da frequência do equipamento que seja utilizado para realizar a medida da impedância de aterramento o resultado deve ser aproximadamente igual.

No comportamento de alta frequência, a impedância muda com relação a frequência. Ou seja, nestes casos o resultado obtido varia muito em relação a medida de baixa frequência.

Para se analisar esses casos é necessário o estabelecimento de um limiar que determine quando o eletrodo terá seu comportamento predominantemente de baixa ou de alta frequência.

Segundo (GRCEV, 1998), é possível determinar uma frequência característica (F_c) para cada comprimento crítico (ℓ_c) acima do qual a impedância de alta frequência é maior que a de baixa frequência através da equação 5.

$$\ell_c = 0,6 \cdot (\rho / F_c)^{0,43} \quad (5)$$

Na equação de Grcev, ρ representa a resistividade do solo. Para este trabalho após ser rearranjada a equação 5 pode-se a reescrever conforme a equação 6.

$$F_c = \rho \left(\frac{0,6}{\ell_c} \right)^{2,3} \quad (6)$$

Através da equação 6 é possível determinar a frequência característica (F_c) para eletrodos de aterramentos distintos.

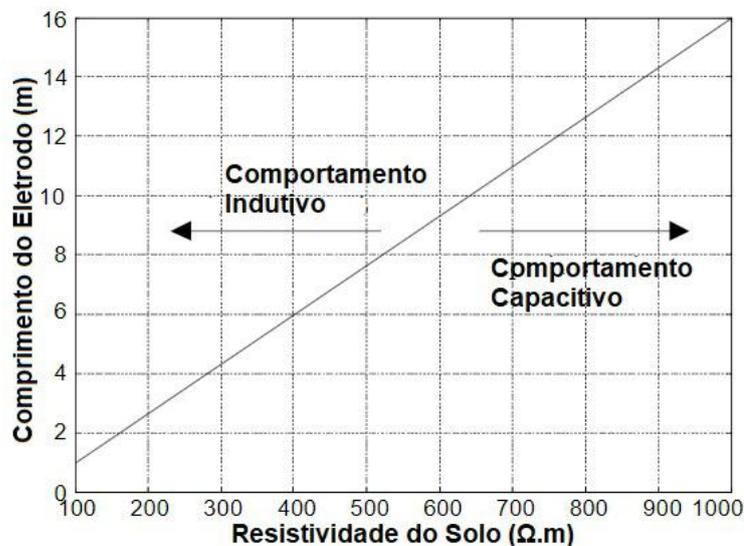
Um mesmo eletrodo, portanto pode ter diversas frequências características as quais são dependentes da resistividade do solo, do comprimento do eletrodo e do ponto de energização de corrente. O comprimento crítico desse modo deve ser considerado como sendo a distância entre o ponto de energização do eletrodo e o fim do eletrodo.

Conforme GRCEV (1998), a performance em alta frequência e para transitórios é melhorada ao se minimizar a distância que a corrente faz através do eletrodo, ou seja, ao se encurtar a distância percorrida pela corrente no eletrodo seja através da alteração do ponto de injeção ou pelo adensamento das quadrículas de uma malha o comportamento de alta frequência se altera.

Os eletrodos podem ainda apresentar o comportamento de alta frequência de duas formas bastante distintas.

A FIGURA 8 mostra as regiões indutivas e capacitivas. Essas duas regiões são intrínsecas ao eletrodo utilizado e dependem da geometria do mesmo.

FIGURA 8 - REGIÕES DE COMPORTAMENTO INDUTIVO E CAPACITIVO DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO

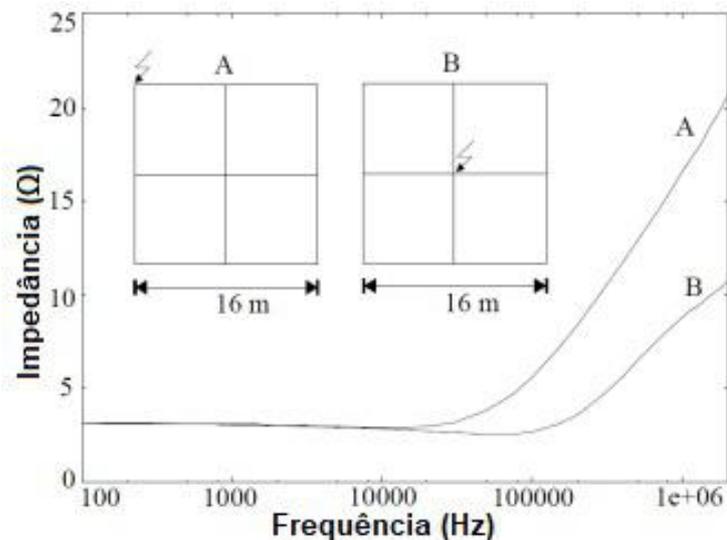


FONTE: Adaptado de GRCEV (1998)

A FIGURA 8 pode ser aproximada para o uso em eletrodos verticais, como hastes por exemplo. Ainda segundo GRCEV (1998), é sabido que eletrodos de aterramento verticais tem comportamentos parecidos com eletrodos horizontais apesar de que os verticais são mais eficientes que os horizontais tanto em baixa quanto em alta frequência.

Portanto, em resumo a FIGURA 9 ilustra o comportamento teórico esperado para eletrodos de aterramento relativo a frequência.

FIGURA 9 - COMPORTAMENTO DE UM ELETRODO DE ATERRAMENTO



FONTE: Adaptado de GRCEV (1998)

Assumindo um eletrodo com comportamento de alta frequência indutivo nota-se que alterando o ponto de injeção altera-se, portanto o comprimento crítico do eletrodo exemplo. Com isso desloca-se a frequência característica para valores mais altos. É possível verificar que para um mesmo eletrodo a frequência característica pode variar muito, modificando os valores medidos.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Existem no mundo, vários tipos de solo, como por exemplo, alguns solos de características mais arenosas, outros mais compactados, além de outras variadas influências. Esse conceito faz com que seja palpável a compreensão de que existem solos mais propícios do que outros, para receber um aterramento. Os solos com resistividade mais baixa, oferecerão mais permissividade para o escoamento de

correntes elétricas por eles, sendo assim mais indicados para receberem aterramentos.

São fatores que exercem influência sobre as características elétricas de um determinado solo, além da umidade e temperatura, o tipo do solo, ou a mistura de vários tipos, a estratificação, constituindo várias camadas distintas entre si, a compactação e a pressão do solo e sua composição química juntamente com a concentração de sais dissolvidos na água retida pelo mesmo. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 2002).

Para Portela (1999), o comportamento eletromagnético do solo é essencialmente linear, exceto para valores elevados de campo elétrico, que causam uma ionização significativa do meio. Ele afirma ainda, que o comportamento eletromagnético do solo apresenta significativa dependência da condutividade e da permissividade elétrica em relação à frequência.

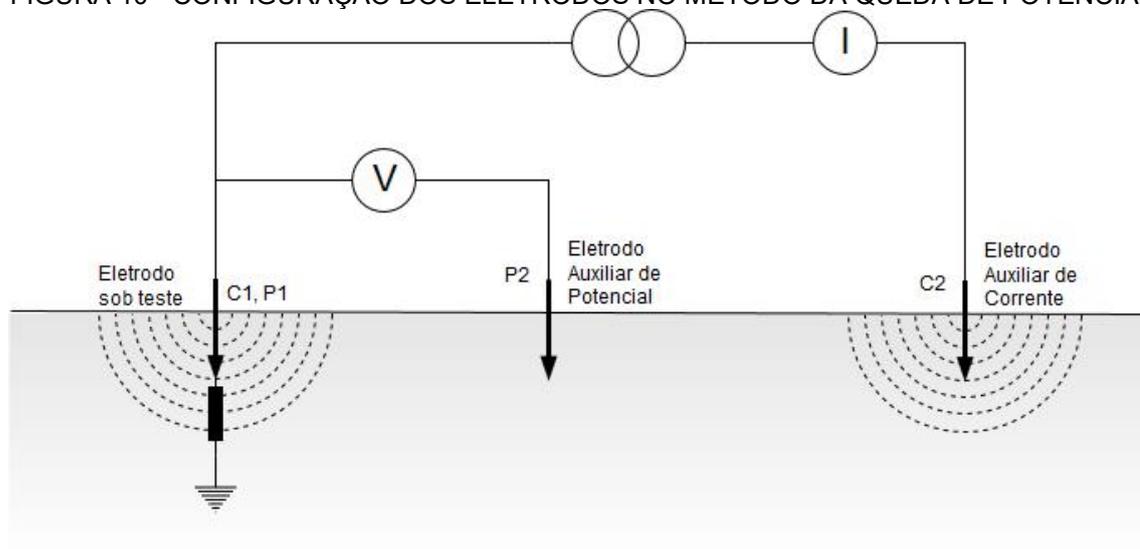
Particularmente, solos de baixa resistividade não dependem significativamente da frequência. Segundo experimentos realizados por VISACRO e ALÍPIO (2012), solos que possuem resistividade na faixa de aproximadamente 60 - 150 Ω .m, têm sua resistividade afetada em menos de 20% no intervalo de frequência entre 100 Hz e 1 MHz. Em contrapartida, solos com resistividade na faixa de 500 - 1000 Ω .m têm sua resistividade diminuída por volta de 45%, enquanto solos situados na faixa 4 - 10 k Ω .m, chegam numa redução de 80%, no mesmo intervalo de frequência.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL

O método da queda de potencial é também conhecido como método dos três pontos e é aplicado na medição de resistência de aterramento. Esse método faz uso de dois eletrodos auxiliares, um de potencial e outro de corrente. O terceiro ponto é o eletrodo sob teste. A FIGURA 10 mostra a disposição dos eletrodos.

FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO DOS ELETRODOS NO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL



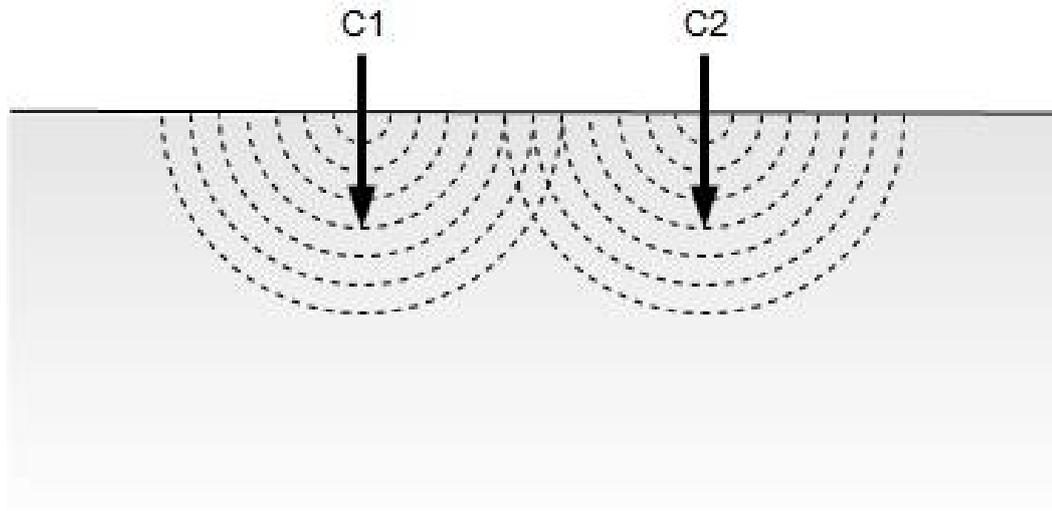
FONTE: GAMBOA (2014)

O método consiste basicamente em fazer circular uma corrente através da malha de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio de uma sonda ou eletrodo auxiliar de potencial. (ABNT NBR 15749:2009, 2009).

Paralelamente ao levantamento da impedância de aterramento, é possível medir a distribuição de corrente no sistema de aterramento, a impedância mútua entre instalações paralelas e tensões de toque e passo. (IEEE Std 81, 2012).

Os pontos de entrada e saída da corrente formam áreas de influência, conforme a FIGURA 11, que interferem na obtenção do valor verdadeiro da impedância de aterramento.

FIGURA 11 - ÁREAS DE RESISTÊNCIA EFETIVA (SOBREPOSTAS)

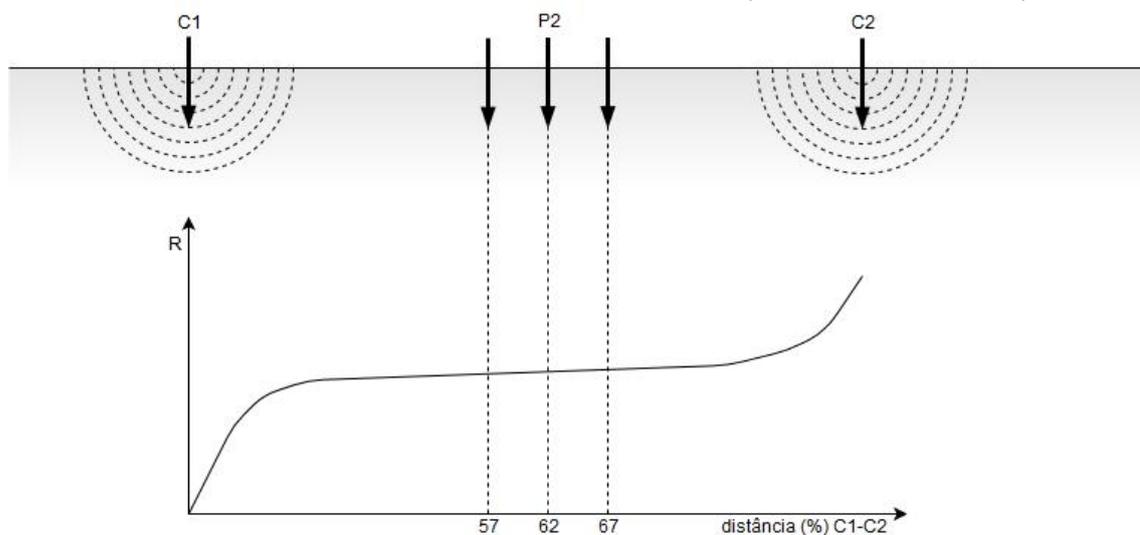


FONTE: GAMBOA (2014)

A região onde esses eletrodos não tem influência (não se sobrepõem) é conhecida como patamar. O patamar é atingido, segundo a ABNT 15749, quando o valor de impedância medido em um ponto e os valores medidos em 5% da distância entre C1 e C2 a direita e a esquerda desse ponto não ultrapassarem uma diferença de 10%.

Ao realizar medições do valor de resistência em diversas posições obtém-se a curva de resistência em relação a distância, conforme a FIGURA 12.

FIGURA 12 - ÁREAS DE RESISTÊNCIA EFETIVA (NÃO SOBREPOSTAS)



FONTE: GAMBOA (2014)

Para o levantamento da curva característica teórica da resistência de aterramento o eletrodo de potencial deve ser deslocado ao longo de uma direção

predefinida em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância entre os eletrodos C1 e C2 (FIGURA 12). (ABNT NBR 15749, 2009).

Preferencialmente o eletrodo de potencial deve ser estendido em um ângulo de 90° em relação ao eletrodo de corrente para minimizar o acoplamento mútuo entre seus condutores. (IEEE Std 81.2-1991, 1992).

Levando em consideração a configuração deste método a impedância do sistema de aterramento testado é expressa pela equação 7.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (7)$$

Onde:

Z = Impedância (Ω)

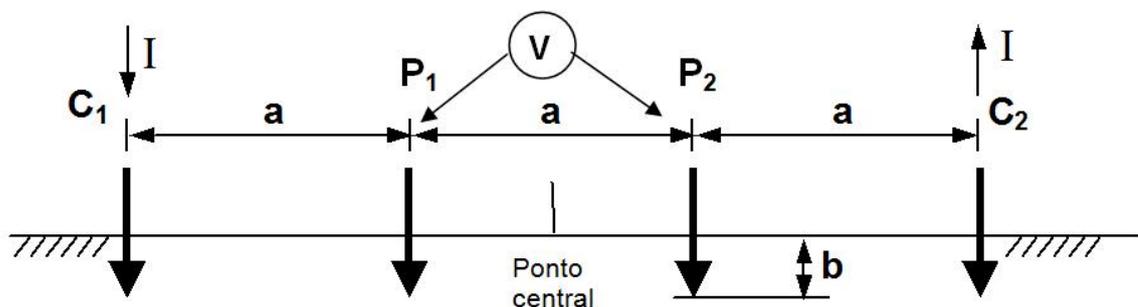
V = Tensão (V)

I = Corrente (A)

4.2 MÉTODO DE WENNER

Para analisar a resistividade de um solo em multicamadas utiliza-se o método de Wenner. O método consiste no cravamento de quatro hastes cilíndricas de cobre no solo, igualmente espaçadas por uma distância “ a ” e dispostas em linha, conforme a FIGURA 13.

FIGURA 13 - ARRANJO DE WENNER



FONTE: NBR 7117 (2011)

Pelo eletrodo C1 é injetada uma corrente no solo que retorna pelo terminal C2 e então se mede a tensão entre os eletrodos P1 e P2 do arranjo. A distância “ a ”

é igual entre todos os eletrodos e “ b ” a profundidade de cravamento das hastes. A resistividade do solo (ρ) em função de “ a ” e “ b ” é dada pela equação 8.

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (8)$$

Na prática a profundidade de cravação não deve exceder 10% da distância entre as hastes. Quando essa proposição for verdadeira a equação 8 pode ser simplificada conforme a equação 9.

$$\rho_{(a)} = 2\pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right) \quad (9)$$

Ao se obter os valores de resistividade do solo através de medições em campo deve-se segundo KINDERMANN (2002) e também segundo a ABNT NBR 7117 traçar a curva “ $\rho \times a$ ” excluindo-se as amostras que ultrapassem um desvio máximo de 50% da resistividade média calculada para cada distância “ a ”.

Após traçada a curva “ $\rho \times a$ ”, tem-se pelo prolongamento da curva o valor de ρ_1 e pelo traçado da assíntota ρ_2 .

4.3 MODELOS EM ESCALA

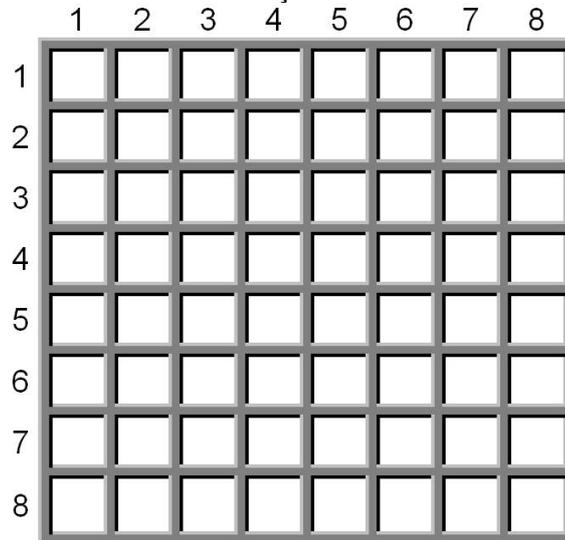
4.3.1 Modelo em Escala Reduzida com Alto Efeito Capacitivo

Inicialmente foi desenvolvida uma malha em escala reduzida com condutores pequenos que permanecia em contato com o solo por pequenas hastes metálicas com baixa penetração no solo.

Portanto, a impedância de aterramento dessa malha em escala reduzida tendia a ser capacitiva devido as suas pequenas dimensões e com valor muito alto devido ao pequeno contato entre ela e o solo.

Como representação inicial desse eletrodo de aterramento, a malha implementada tinha 64 quadrículas. Cada ramo de quadrícula continha duas hastes metálicas as quais faziam a interligação com o solo, conforme a FIGURA 14.

FIGURA 14 - PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO ELETRODO DE ATERRAMENTO



FONTE: O autor(2018)

Na malha da FIGURA 14, foi realizado o levantamento da resistência de aterramento, através do método dos três pontos, com dois terrômetros distintos. O primeiro terrômetro da AEMC modelo 6472 de baixa frequência (128 Hz) e o segundo da MEGABRAS modelo TM25m de alta frequência (25 kHz).

O método dos três pontos, conforme o capítulo 4.1 faz uso de três eletrodos, um de corrente, um de tensão e de uma conexão ao eletrodo aterrado. A disposição desses eletrodos foi feita conforme a FIGURA 15.

FIGURA 15 - DISPOSIÇÃO DOS ELETRODOS DO MÉTODO DOS 3 PONTOS



FONTE: Adaptado de Google (2018)

LEGENDA:
■ Eletrodo de corrente
■ Eletrodo de tensão
■ Conexão com a malha

A TABELA 1 mostra a resistência de aterramento medida através do ensaio realizado para ambos os terrômetros.

TABELA 1 - RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DA PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO ELETRODO DE ATERRAMENTO

Terrômetro	f (Hz)	R (Ω) a 5 cm	R (Ω) a 10 cm
AEMC	128	115	103
MEGABRAS	25000	>300	85

FONTE: O Autor (2018)

Observou-se, portanto, que a malha utilizada nessa configuração, era muito pequena, acarretando numa alta resistência e baixa condutividade de corrente elétrica. Outra característica que se fez presente, pelo motivo do tamanho da malha, foi o comportamento predominantemente capacitivo, o que tornou a análise inviável, já que objetiva-se a observação dos efeitos indutivos.

A partir disso, foi necessário o desenvolvimento de outros modelos em escala reduzida, com eletrodos mais longos que quando comparados ao inicialmente aplicado afim de observar efeitos indutivos.

4.3.2 Modelo em Escala Real com Haste de Aterramento

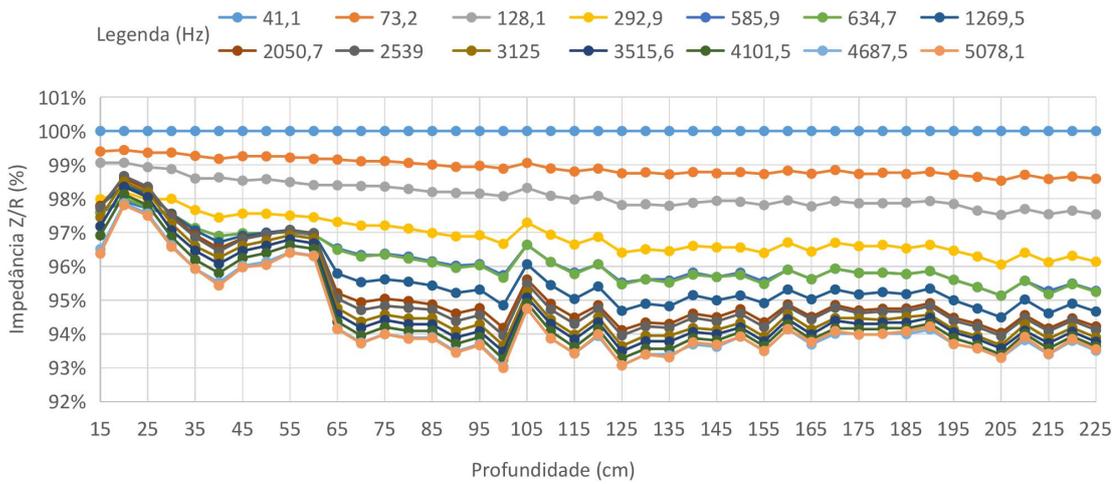
4.3.2.1 Ensaio de Impedância de Aterramento em Função do Aprofundamento de uma Haste

O ensaio consistiu na medição da impedância de aterramento de uma haste de cobre de 1,59 cm de diâmetro e 2,4 m de comprimento, a cada 5 cm de aprofundamento.

O objetivo do teste era a verificação dos efeitos indutivos e capacitivos com a mudança de frequência e para isso fora feito uma varredura de baixas frequências (de 41 Hz até 5087 Hz) e uma medição em alta frequência (25 kHz).

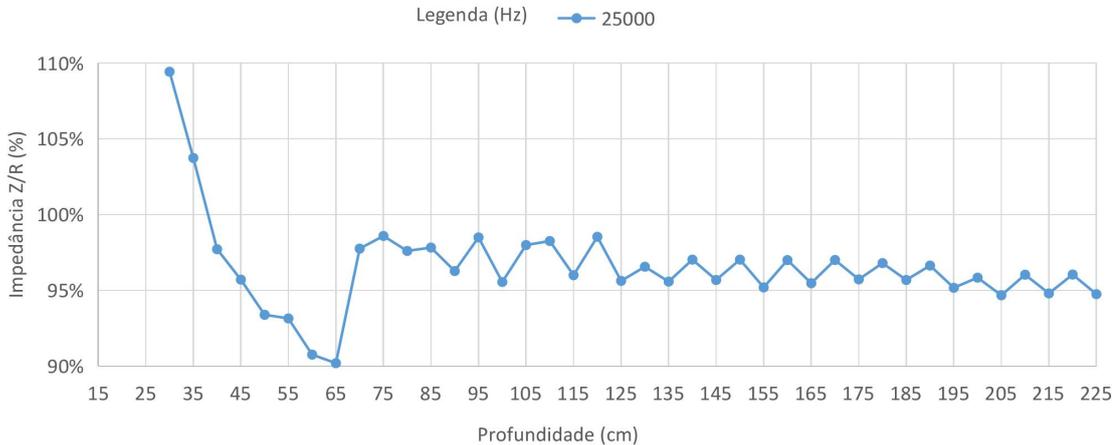
Os resultados obtidos podem ser normalizados pelo módulo da impedância harmônica que neste caso foi inferida como a impedância registrada pela menor frequência obtida (41,1 Hz) com a resistência de aterramento registrada para todas as demais frequências. Tanto a FIGURA 16 quanto a FIGURA 17 ilustram os resultados obtidos.

FIGURA 16 - RESULTADO DO ENSAIO DE APROFUNDAMENTO DE HASTE DE 41 ATÉ 5087 HZ



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 17 - RESULTADO DO ENSAIO DE APROFUNDAMENTO DE HASTE EM 25.000 HZ



FONTE: O autor (2018)

No ensaio de varredura em baixa frequência, com o terrômetro AEMC, uma maior convergência nos valores com frequência mais elevada, se deve pelos filtros anti-ruído do aparelho. Os resultados não apresentam grandes variações relativas ao aumento da frequência.

As medidas de impedância fornecidas pelo terrômetro de 25 kHz corroboram com essa análise, pois os valores fornecidos tanto pelo terrômetro de baixa frequência (128 Hz), quanto pelo de alta frequência (25 kHz), convergem. Sendo este valor de impedância, quantitativamente, por volta de 95% do valor da impedância normal adotada.

Feito isso e, ao analisar os resultados gráficos obtidos durante o ensaio, foi constatado que uma haste de cobre de 1,59 cm de diâmetro, possui ainda dimensões bastante reduzidas para a finalidade proposta, e que um cravamento

vertical no solo, acarreta em dificuldades práticas de manuseio, tanto para fixação do eletrodo, quanto para sua remoção. Com esse resultado e sua respectiva análise, decidiu-se que o próximo passo seria a realização de um ensaio em modelo em escala reduzida com um eletrodo longo, fixado horizontalmente no solo.

4.3.3 Modelo em Escala Reduzida com Eletrodo Horizontal

Para avaliar os efeitos eletromagnéticos de interesse foi construído um eletrodo horizontal de aterramento com um fio de cobre rígido nu de $2,5 \text{ mm}^2$. Este eletrodo, doravante denominado “Eletrodo Horizontal”, foi enterrado a uma profundidade média de 20 cm em um terreno coberto por grama cedido pelos institutos LACTEC, e que será utilizado posteriormente como malha para treinamento de métodos para medições de aterramento.

Para a análise do eletrodo horizontal foram criados pontos de acesso com cabos isolados, associados através de parafusos fendidos (*split bolt*). Estes acessos permanecem conectados ao eletrodo horizontal e são armazenados em tubos de PVC enterrados parcialmente no solo. No acesso localizado no centro do eletrodo, o tubo de PVC utilizado tem um diâmetro maior afim de permitir que sejam utilizados sensores de corrente do tipo janela aberta (alicates de corrente). Os sensores localizados nessas diferentes posições tem a capacidade de verificar a distribuição de corrente no eletrodo.

A FIGURA 18 esquematiza o eletrodo horizontal implementado e seus acessos de medição. O comprimento total do eletrodo é de 15 m e foi dividido em quatro parcelas de 3,75 m.

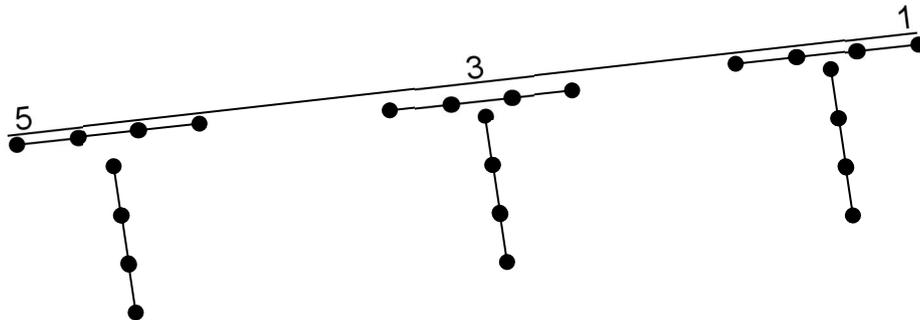


4.3.3.1 Validação do Modelo em Escala Reduzida com Eletrodo Horizontal

O ensaio para a validação do modelo em escala reduzida com eletrodo horizontal inclui a realização da estratificação do solo conforme o método de Wenner exposto no capítulo 4.2.

Em campo, o ensaio foi realizado em três pontos do solo. Como referência foi utilizado a mesma identificação dada ao eletrodo para indicar os pontos onde as medições foram realizadas. Para uma amostragem julgada necessária cada configuração foi repetida paralelamente e perpendicularmente ao sentido do eletrodo conforme indicado na FIGURA 19.

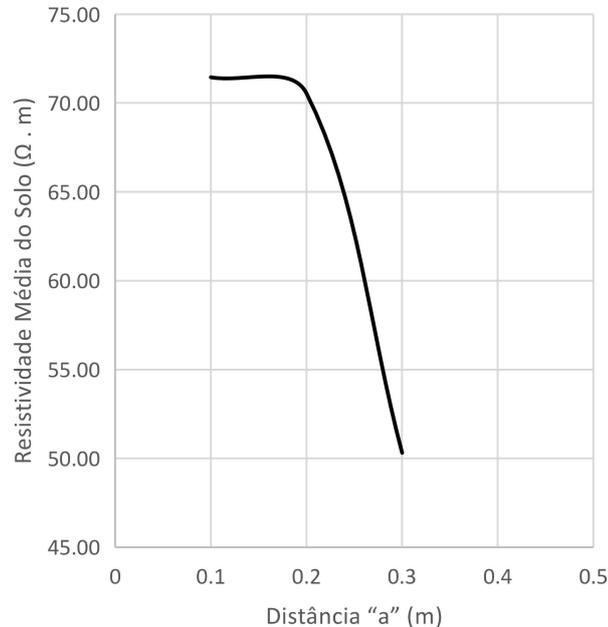
FIGURA 19 - ENSAIO DE ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO



FONTE: O autor (2018)

Foi utilizada como distância “ a ” múltiplos de 10 cm e calculadas as médias para cada distância foi traçada a curva de resistividade média do solo na FIGURA 20.

FIGURA 20 - RESISTIVIDADE MÉDIA DO SOLO

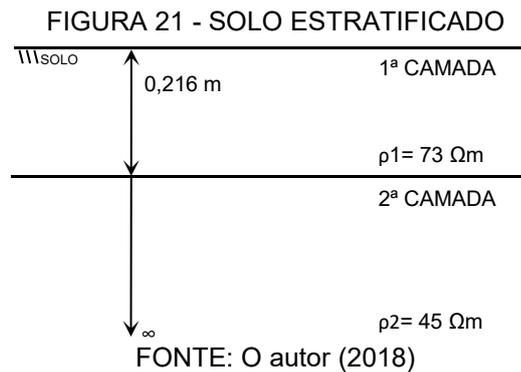


FONTE: O autor(2018)

Prolongando a curva, tem-se ρ_1 igual a 73 Ω .m. E traçando a assíntota, tem-se ρ_2 igual a 45 Ω .m. De posse desses dados pode-se então calcular o coeficiente de ρ_2 / ρ_1 igual a 0,62. Através da tabela A1 da NBR 7117 como o valor não está

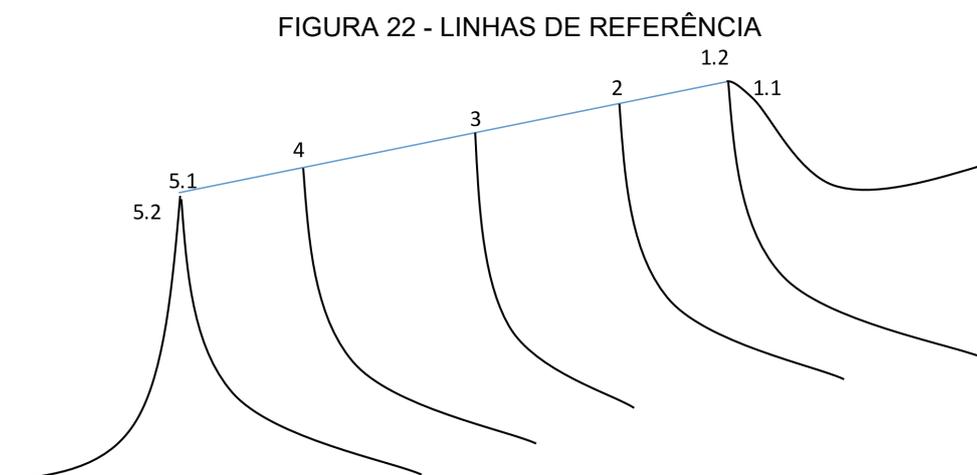
presente na tabela pode-se a partir de uma interpolação obter o valor da constante M_0 igual a 0,9150.

E portanto multiplicando-se $M (a = h)$ pelo valor de ρ_1 obtém-se o valor de ρ_m de 66,80 $\Omega \cdot m$. Com esse valor levado a curva “ $\rho \times a$ ” temos que a profundidade da primeira camada é de 0,216 m. Isto posto graficamente temos a FIGURA 21.



O eletrodo horizontal com as características levantadas de solo e com as de geometria expostas no capítulo 4.3.3 tem sua frequência característica (F_c) igual a igual a 27,4 kHz, determinada através da equação 6.

Para finalmente realizar o levantamento das curvas de potencial estabeleceu-se um padrão para cada ponto possível para ser realizados medições. A FIGURA 22 apresenta estas curvas de referência.



FONTE: O autor (2018)

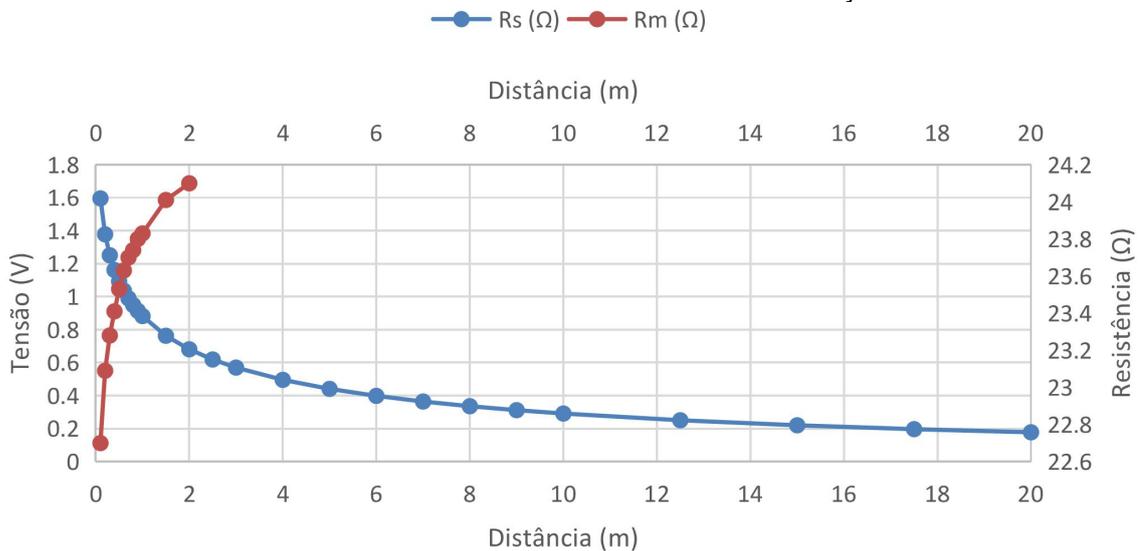
As medições realizadas podem ser comparadas com os resultados de simulações no *MATLAB*. Por questões de entendimento e para que o texto fique

mais fluido os resultados da simulação do *MATLAB* serão antecipados neste ponto, maiores detalhes sobre a simulação estão contidos no capítulo 5.3.2.

Nos gráficos R_s é o valor de resistência simulado e R_m o valor de resistência medido no ensaio. As curvas são inversas, pois na simulação o gráfico fornecido é de tensão, porém, a corrente simulada é de 1 A, ou seja, a tensão é equivalente a resistência conforme a lei de Ohm.

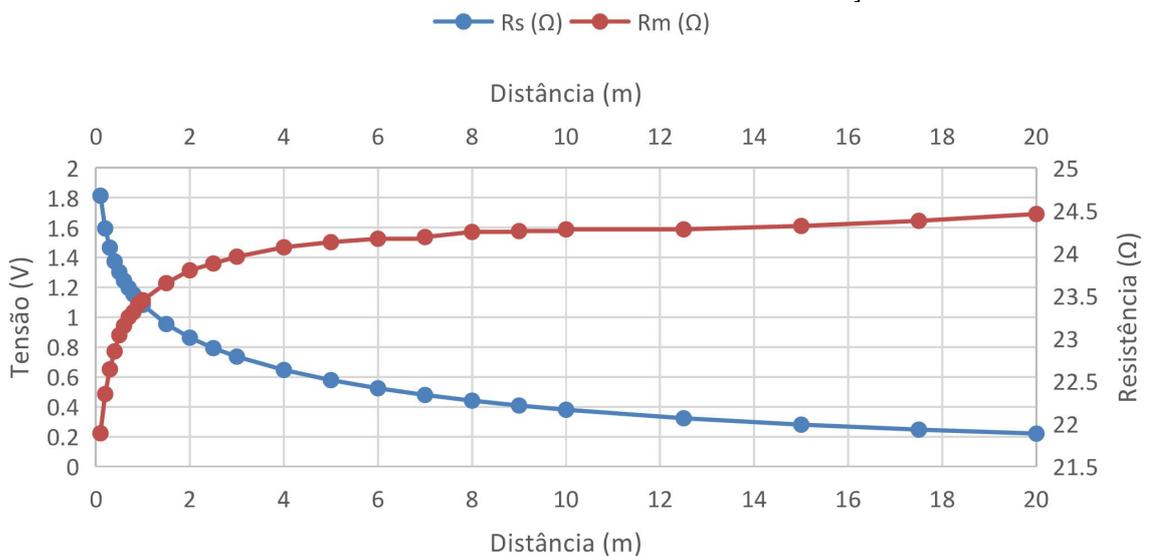
Entre a FIGURA 23 e a FIGURA 26 são apresentados os resultados medidos em cor vermelha e os simulados em cor azul.

FIGURA 23 - POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 1.1



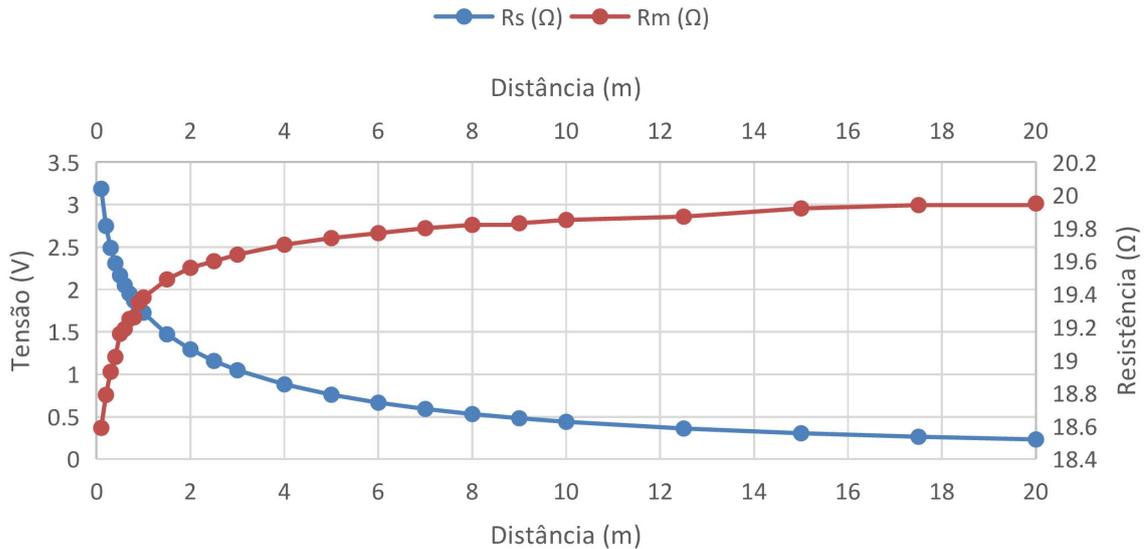
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 24 - POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 1.2



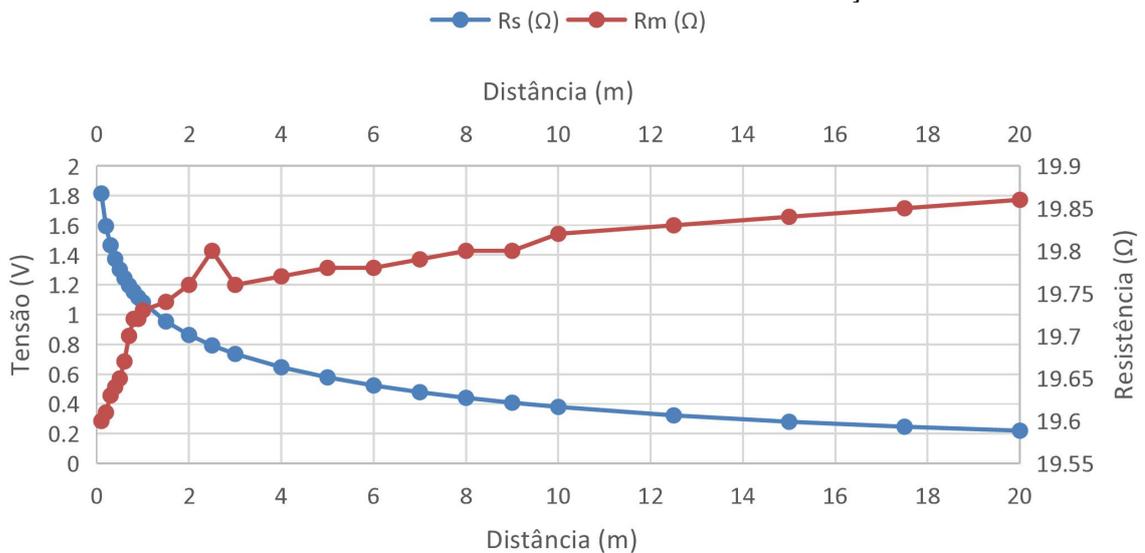
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 25 - POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 3



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 26 - POTENCIAL DE SUPERFÍCIE NA POSIÇÃO 5.1



FONTE: O autor (2018)

Com estes resultados é possível afirmar que este eletrodo é compatível como terreno disponível, pois, o patamar de potencial, local fictício relativo ao eletrodo aterrado onde a influencia do eletrodo auxiliar de corrente e do eletrodo medido não influenciam na medida de resistência vista pelo terrômetro, foi alcançado até mesmo antes dos 20 m disponíveis. Esta afirmação pode ser feita devido aos critérios expostos no capítulo 4.1

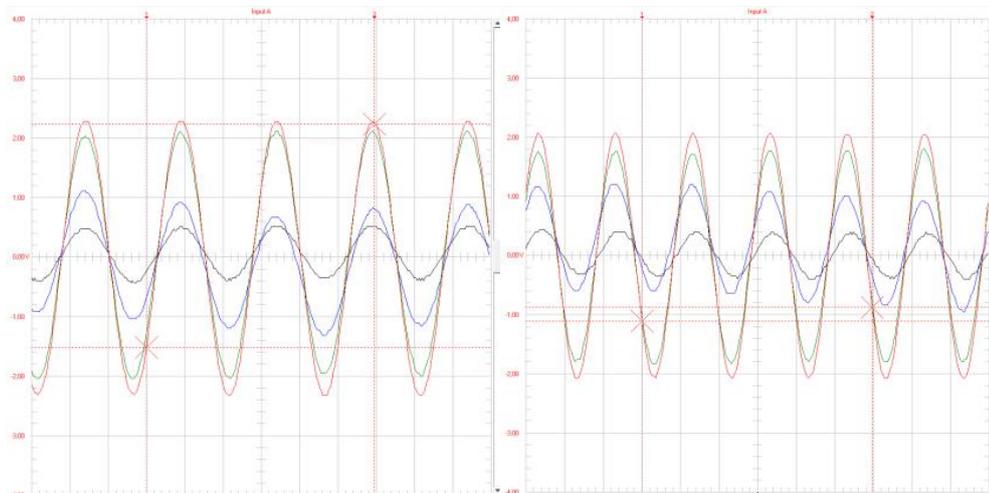
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 VARREDURA EM FREQUÊNCIA E OSCIOLOGRAFIA NO ELETRODO HORIZONTAL

O ensaio realizado objetivava visualizar o defasamento entre a tensão e a corrente. Foram introduzidos dois sensores de corrente do tipo janela aberta (alicate), um no início do condutor horizontal que monitorava a corrente injetada no eletrodo e outro em seu centro. A tensão no patamar também foi monitorada, bem como a forma de tensão injetada através de um gerador de sinais. As cores utilizadas na FIGURA 27 para representar essas grandezas são, verde (corrente injetada), preto (corrente no centro do eletrodo), azul (tensão no patamar) e vermelho (tensão injetada através de um gerador de sinais). O sinal aplicado tinha 3 Vpp de amplitude e sua frequência variava conforme o interesse. Foram utilizadas frequências da ordem de 100 Hz até 100 kHz.

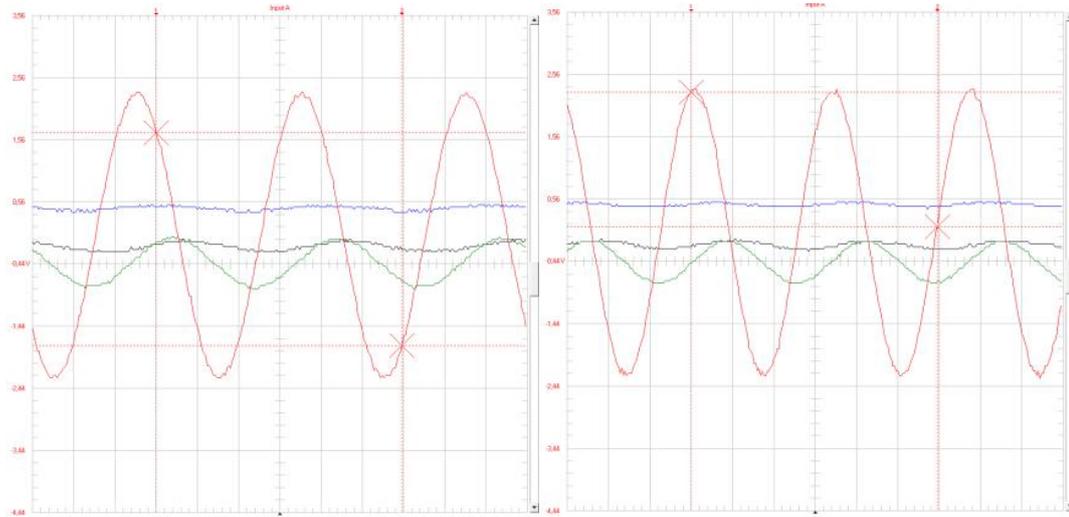
Entre a FIGURA 27 e a FIGURA 31 são mostradas oscilografias do ensaio realizado no eletrodo horizontal. A onda em vermelho corresponde a forma de onda da tensão aplicada no eletrodo de aterramento. Na cor azul é obtida no eletrodo auxiliar de potencial localizado no patamar. Em preto a corrente que atravessa o centro do eletrodo horizontal enquanto que o sinal em verde a corrente que é injetada no eletrodo.

FIGURA 27 - OSCIOLOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQUÊNCIAS DE 200 E 1000 HZ



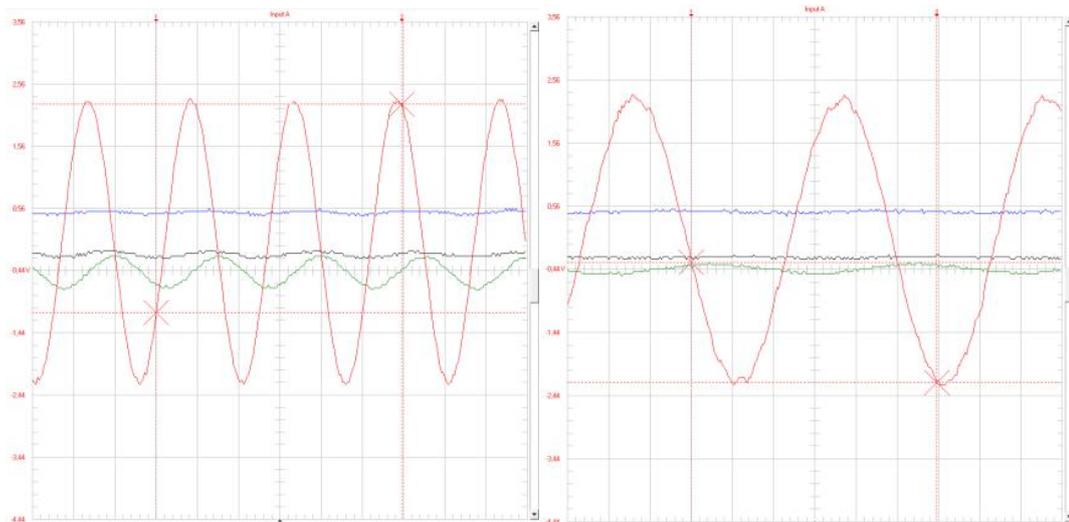
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 28 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQUÊNCIAS DE 5000 E 6000 HZ



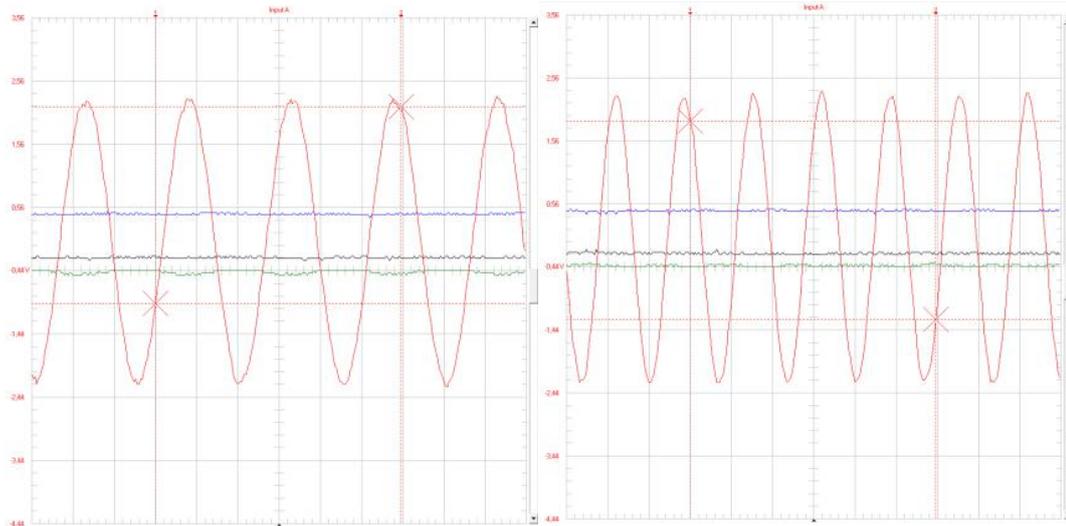
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 29 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQUÊNCIAS DE 8 E 20 KHZ



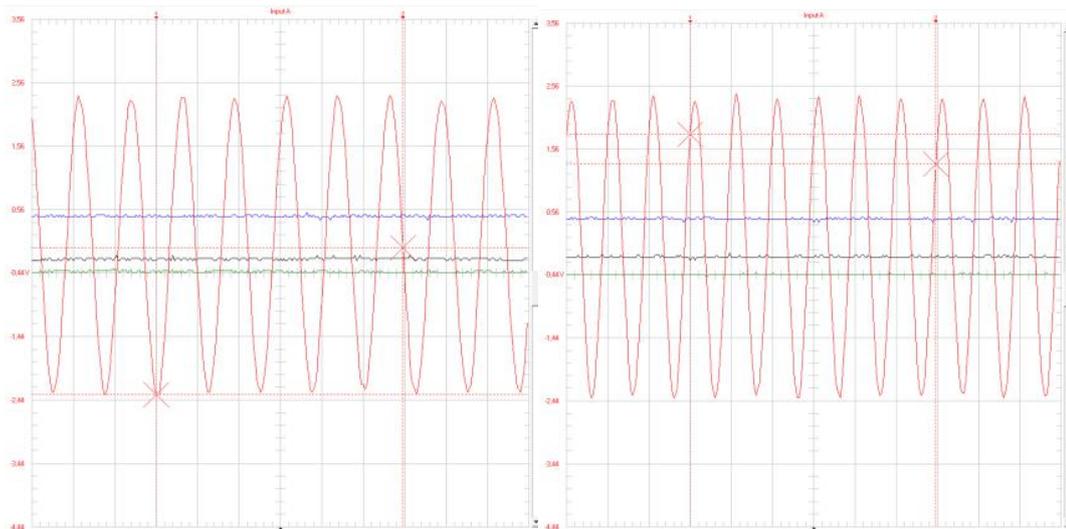
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 30 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQUÊNCIAS DE 40 E 60 KHZ



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 31 - OSCILOGRAFIA DO ELETRODO HORIZONTAL PARA AS FREQUÊNCIAS DE 80 E 100 KHZ



FONTE: O autor (2018)

Na FIGURA 27 é possível visualizar uma modulação em baixa frequência que pode ser fonte de ruídos e muito provavelmente advém dos diversos outros eletrodos que circundam o terreno utilizado no trabalho.

Há uma consideração importante a ser feita relativa aos sensores de corrente utilizados nesse levantamento. O sensor de corrente no início do condutor (posição 1 conforme a FIGURA 18) tem como característica a boa resposta em frequência conforme especificado no ANEXO 2 enquanto que o sensor utilizado no centro do condutor (posição 3) era de núcleo ferro magnético e que portanto

apresenta distorções na fase, mas não na amplitude da medição, conforme a sua especificação no ANEXO 3.

O erro de fase na alicate de núcleo ferromagnético é de até 10° em frequências até 500 Hz, já o da alicate i30S responde com um erro de até 15° para frequências de até 100 kHz.

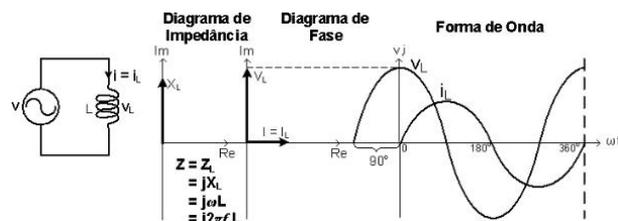
Conforme esperado por estas limitações relacionadas as características da resposta em frequência das alicates pode-se observar na FIGURA 27 que ambas as correntes (curvas nas cores preto e verde) estão em fase.

Ainda na FIGURA 27 as tensões medidas estão em fase com as correntes, característica de circuitos puramente resistivo. Isso se deve, pois em baixas frequências os efeitos reativos são desprezíveis. É por esse motivo que medidas em baixa frequência quando realizadas trabalham com o conceito de resistência de aterramento. As aproximações teóricas para modelos em escala reduzida discutidas no capítulo 3.4 se comprovam, também na amostragem obtida neste trabalho, justificadas .

Ambas as alicates conseguem realizar medidas com acurácia a partir de 1 mA. O limite superior de corrente que ambas as alicates conseguem ler estão em níveis muito acima do que é seguro em ensaios de aterramento.

Na FIGURA 28 há um claro defasamento entre a corrente injetada no eletrodo em relação a tensão da fonte típico de circuitos com característica indutiva. Os diagramas da FIGURA 32 exemplificam o comportamento esperado de um circuito constituído apenas por um indutor e fonte. O modelo estudado não pode ser aproximado para apenas um indutor, mas claramente apresenta um comportamento predominantemente indutivo.

FIGURA 32 - RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E A CORRENTE DE UM CIRCUITO L



FONTE: Museu das Comunicações (2018)

O que caracteriza um circuito puramente indutivo é o defasamento entre corrente e tensão de 90° . Por inspeção é possível afirmar que a amostragem

levantada não apresenta esta defasagem característica de circuitos puramente indutivos, pois há interações com componentes resistivas e capacitivas características do solo. A diferença entre as fases de tensão e corrente observadas são menores que 90° , mas sempre a tensão está atrasada em relação a corrente.

Nas figuras não é possível visualizar a escala de cada uma das formas de onda, porém após o tratamento dos dados brutos exportados do osciloscópio foi possível organizar os dados conforme a TABELA 2, que mostra os valores calculados para a impedância de aterramento do eletrodo horizontal e a proporção entre a corrente injetada e a corrente medida no centro do eletrodo.

TABELA 2 - IMPEDÂNCIA E PROPORÇÃO ENTRE CORRENTES

Frequência (Hz)	Impedância (Ω)	Proporção entre Correntes
200	20,50	1,93
1000	21,81	2,02
5000	40,43	3,29
6000	47,00	3,33
8000	54,33	2,79
20000	57,50	5,33
40000	51,11	6,00
60000	66,43	3,50
80000	67,14	3,50
100000	66,00	3,75

FONTE: O autor (2018)

A corrente em baixa frequência esperada no centro do eletrodo é duas vezes menor que a injetada e isto pode ser observado nas primeiras medidas. Após a frequência ser elevada em alguns kHz esta proporção varia em torno de três vezes e ao se aproximar da frequência característica do eletrodo horizontal a proporção está em cerca de cinco vezes e continua a crescer conforme o aumento da frequência até finalmente o valor de seis vezes na casa dos 40 kHz.

Após os 40 kHz as leituras relacionadas a corrente amostrada no centro já não são confiáveis, pois a amplitude medida é próxima a precisão do alicate de corrente e a frequência já está muito acima da frequência nominal indicada.

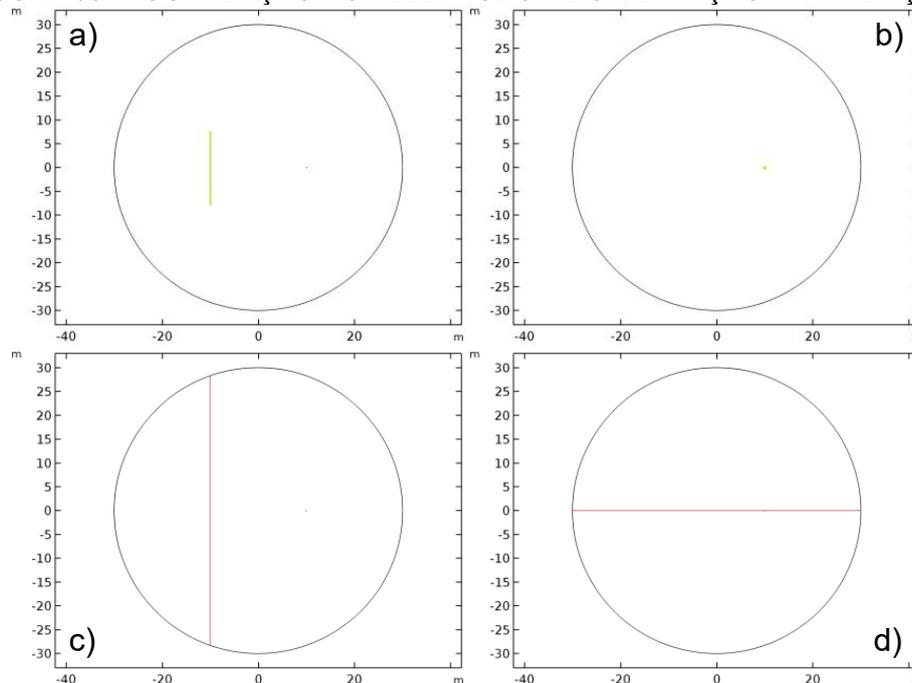
A impedância de aterramento do eletrodo horizontal levantada através do ensaio de validação apresentado no capítulo 4.3.3.1 apontou uma impedância de aterramento entre 19Ω e 25Ω . Através dos valores eficazes de tensão no eletrodo sob teste em relação ao terra remoto, e dos da corrente injetada é possível efetuar o mesmo cálculo que terrômetros comerciais fazem por meio da equação 1. Os resultados destes cálculos constam na TABELA 2.

Os resultados dessa amostragem mostram os valores medidos para resistência de aterramento com uma variação de até 3,28 vezes. Fica evidente, portanto a influência da frequência nos valores medidos para resistência de aterramento acima da frequência característica do eletrodo.

5.2 SIMULAÇÕES

A orientação das medições simuladas é mostrada na FIGURA 33 bem como a localização dos eletrodos. Foi adotado como referência a simulação feita no *COMSOL* e os dados obtidos no *MATLAB* transladados afim de que pudessem ser impressos num mesmo plano.

FIGURA 33 - LOCALIZAÇÃO DOS ELETRODOS E ORIENTAÇÃO DAS MEDIÇÕES



FONTE: O autor (2018)

Legenda: (a)Localização Eg (b)Localização Ec
(c)Simulação no eixo Y (d)Simulação no eixo X

5.2.1 Simulação no COMSOL

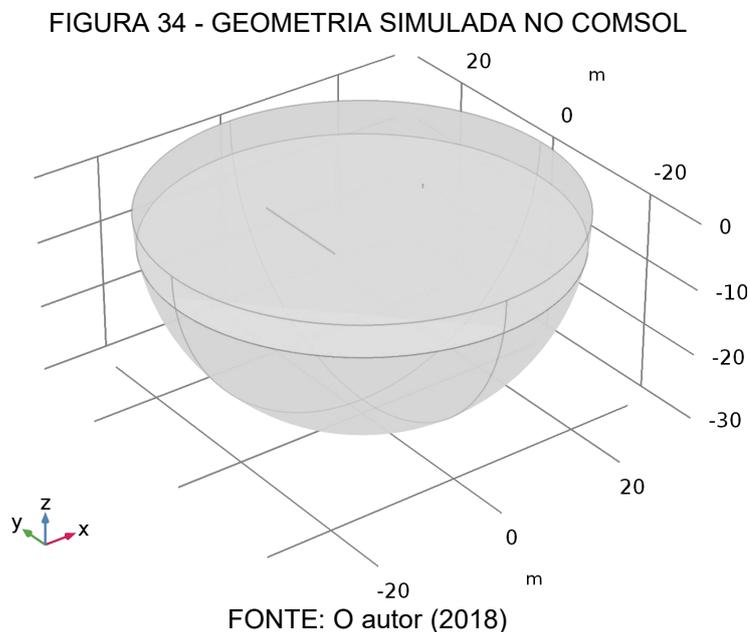
No COMSOL foi estipulado uma camada externa de solo a uma distância suficiente para que não houvesse interferência com relação as interações dos eletrodos de corrente e o de interesse.

O eletrodo de aterramento (E_g) tem como dimensões 15 m e foi colocado a uma profundidade de 0,2 m - tal qual o realizado em campo - e deslocado no eixo X em 10 m para a posição -10.

O eletrodo auxiliar de corrente (E_c) tem como dimensões 0,5 m e foi totalmente enterrado. Também foi deslocado no eixo X em 10 m, porém desta vez para a posição 10.

O solo simulado é homogêneo e tem sua resistividade igual a 30 Ωm . Teve como dimensões uma semiesfera de 30 m de diâmetro.

Em síntese a FIGURA 34 é capaz de aglutinar essas informações e mostrar a geometria simulada no COMSOL.



O COMSOL trabalha com domínios, contornos, materiais e condições físicas. Dentro da simulação foi adicionado o módulo físico *Electric Currents* que adiciona todo o equacionamento eletromagnético para o modelo. Como definições do modelo foi estipulado a todos os domínios a condição de conservação de correntes. Outra condição adicionada a todos os domínios do modelo foi a de isolamento elétrica, esta

por sua vez é administrada pelo próprio *software*. Uma terceira condição aplicada a todos os domínios foi a de valores iniciais, onde a condição escolhida foi a de 0 V.

Para que houvesse uma corrente circulando entre os eletrodos E_g e E_c foi aplicado a condição Potenciais Flutuantes. A equação 10 é utilizada nessa condição para um estudo estacionário.

$$\int_{\partial\Omega} -n \cdot J dS = I_0 \quad (10)$$

A corrente por unidade de área denominada densidade de corrente (J) tem como unidade o A/m². Na equação tem-se ainda o vetor unitário normal n à superfície dS .

A densidade de corrente J e a densidade de carga não são quantidades independentes. Elas estão relacionadas em cada ponto por uma equação diferencial, a chamada equação da continuidade. Esta relação tem sua origem no fato de a carga não poder ser criada, nem destruída. O sinal negativo ocorre porque n é a normal para fora e é desejável considerar I_0 positivo quando o fluxo líquido de carga é do exterior do volume para seu interior. (REITZ *et al.*, 1982)

A corrente I_0 é a entrada para essa condição. Foi estabelecido que no eletrodo E_g seria injetada uma corrente de 1 A. Como a condição de conservação de correntes está associada a todos os domínios é necessário que seja indicado, através da mesma condição, que toda essa corrente deve retornar a fonte através do eletrodo E_c , que portanto deverá ter I_0 igual a -1 A.

O meio que essa corrente circulará é um solo com condutividade elétrica de 1/30 S/m e permissividade relativa igual a 1. Outras características do solo tais como a condutividade térmica, capacidade térmica à pressão constante, entre outras, são comandadas pelo próprio equacionamento do modelo. A semiesfera como um todo constitui o domínio do solo, porém seus limites, ou seja, a casca da semiesfera, constitui uma condição de contorno. Nesta casca é onde fica localizado o terra remoto da simulação e por isso tem seu valor de potencial fixo em 0. No *software* é adicionado um domínio constituído apenas pela casca e então fixado a este domínio a o valor de tensão de 0 V.

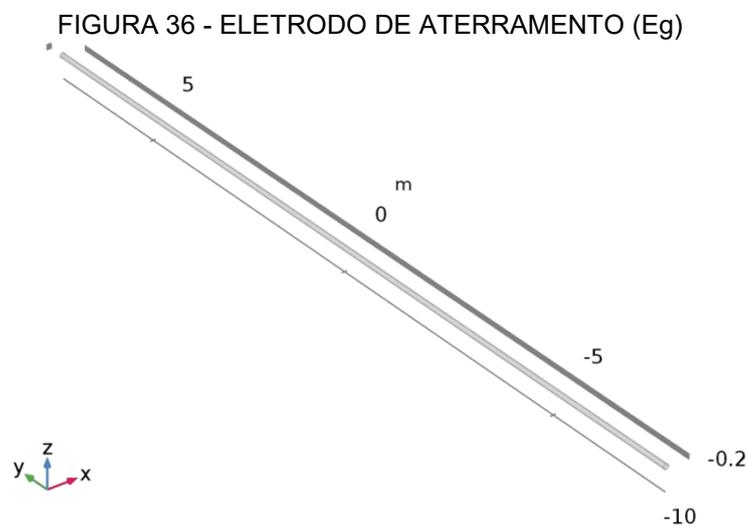
O eletrodo E_g simulado teve estabelecido em seu domínio o material cobre já previamente contido na biblioteca de materiais do *COMSOL*. Suas características principais estão expostas na FIGURA 35.

FIGURA 35 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COBRE DA BIBLIOTECA DO COMSOL

Property	Name	Value	Unit	Property group
Relative permeability	mur	1	1	Basic
Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/m]	S/m	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg.K)	Basic
Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic
Surface emissivity	epsilon_rad	0.5	1	Basic
Density	rho	8700[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
Thermal conductivity	k	400[W/(m*K)]	W/(m.K)	Basic
Reference resistivity	rho0	1.72e-8[ohm*m]	Ω·m	Linearized resistivity
Resistivity temperature coefficient	alpha	3.9e-3[1/K]	1/K	Linearized resistivity
Reference temperature	Tref	273.15[K]	K	Linearized resistivity

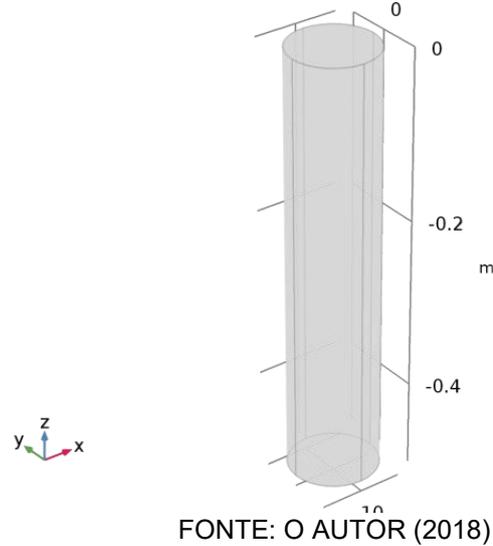
Fonte: O autor (2018)

O eletrodo E_g em si tem como dimensões 15 m de comprimento e foi posicionado a 20 cm da superfície. Em detalhe o eletrodo E_g pode ser visto na FIGURA 36. Seu centro está localizado no ponto (-10,0).



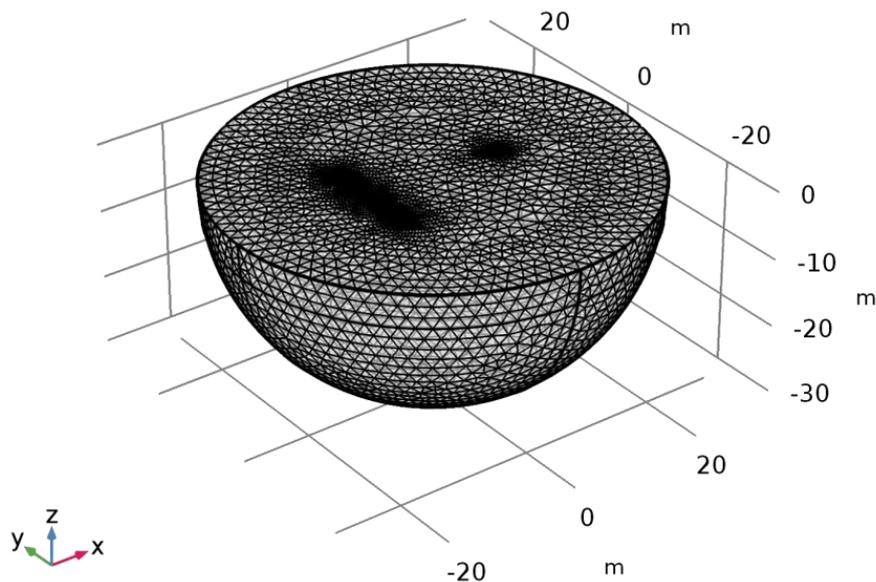
FONTE: O autor (2018)

O eletrodo E_c também teve seu domínio associado ao mesmo material do E_g . Porém suas dimensões são mais reduzidas e equivalentes a hastes auxiliares utilizadas comumente em medições de aterramento. A FIGURA 37 mostra em detalhe o eletrodo E_c .

FIGURA 37 - ELETRODO AUXILIAR DE CORRENTE (E_c)

Através do método dos elementos finitos o *software* divide as formas, nele denominados domínios, em milhares de partes triangulares denominadas elementos. No *COMSOL* é possível escolher a densidade com que esses elementos aparecem na geometria. Para esta simulação onde o eletrodo de aterramento é bastante fino a malha escolhida deve ser fina da mesma forma. O programa conta com uma verificação interna quando a malha está mal dimensionada para a geometria do problema. Na FIGURA 38 é possível ver os elementos finitos na geometria do problema. Estes elementos foram estipulados conforme a opção *Super-Fine*.

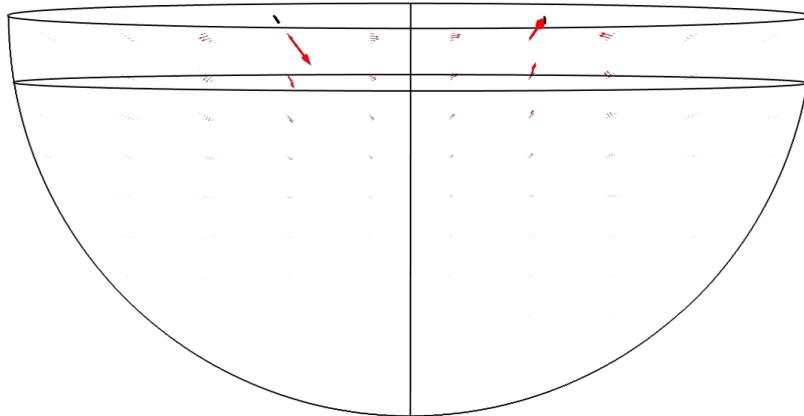
FIGURA 38 - ELEMENTOS FINITOS



FONTE: O autor (2018)

O resultado da simulação que nos fornece dados para verificar se as dimensões da geometria estão adequadas é o de densidade de corrente no solo, conforme a FIGURA 39. Nela pode-se verificar que a corrente circula predominantemente através do domínio de solo de um eletrodo ao outro e não pela casca do elemento. Caso isso não fosse verdadeiro seria necessário aumentar o raio da semiesfera do domínio de solo.

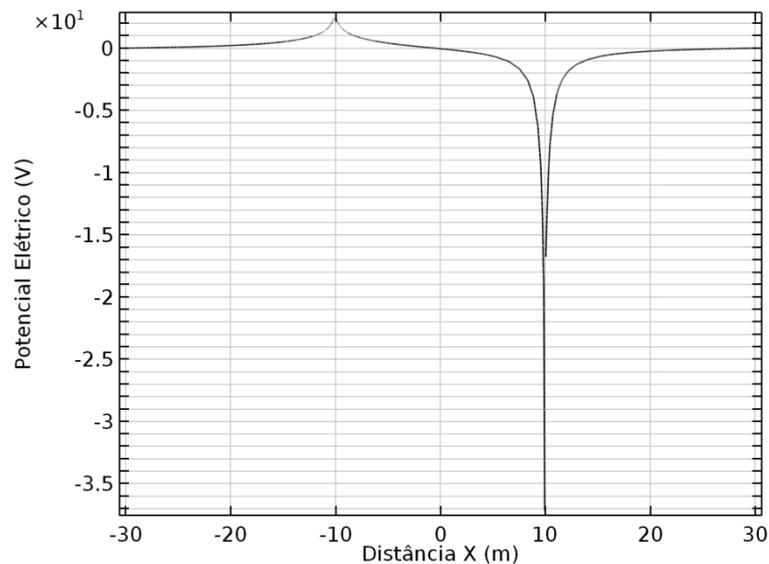
FIGURA 39 - DENSIDADE DE CORRENTE



FONTE: O autor (2018)

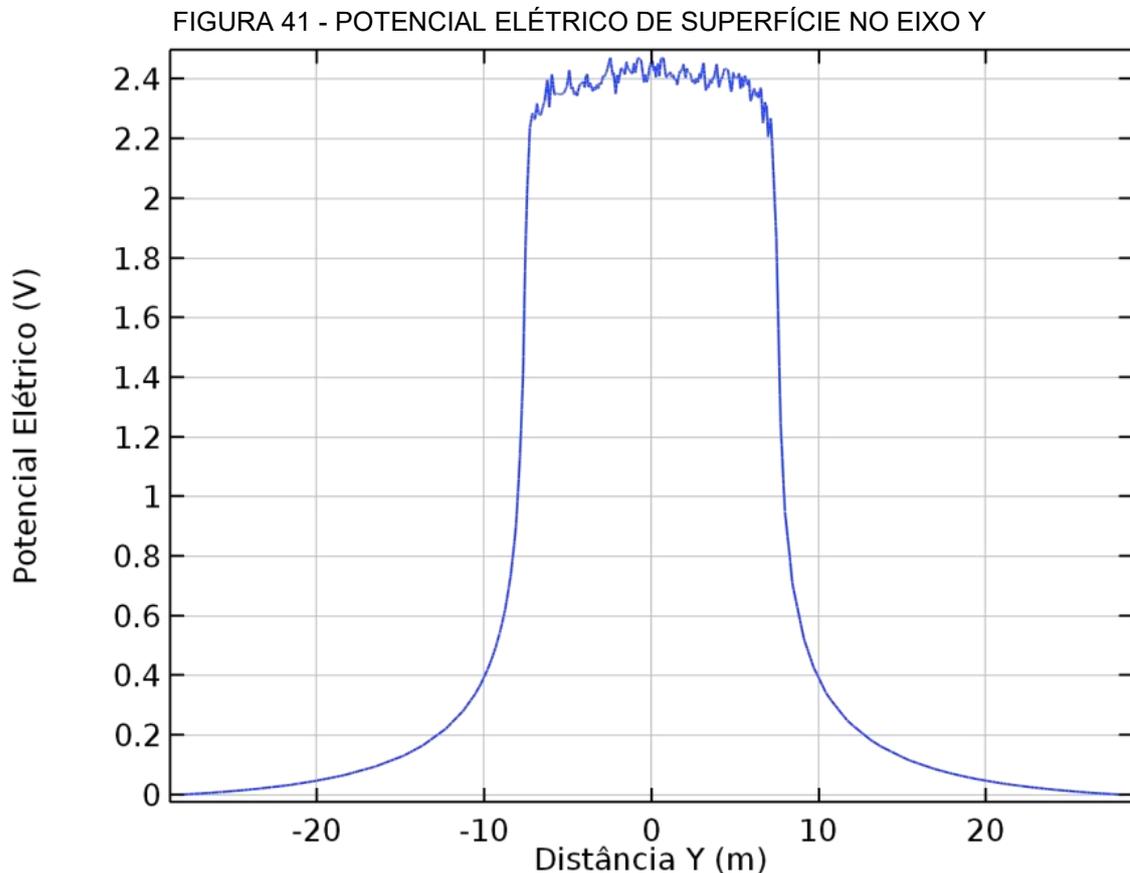
A FIGURA 40 apresenta o resultado simulado para o eixo X, esta simulação pode ser comparada ao ensaio de validação do modelo em escala reduzida com eletrodo horizontal do capítulo 4.3.3.1.

FIGURA 40 - POTENCIAL ELÉTRICO DE SUPERFÍCIE NO EIXO X



FONTE: O autor (2018)

A FIGURA 41 mostra a curva de potencial de superfície no eixo Y e pode ser comparada ao resultado simulado no *MATLAB*.



FONTE: O autor (2018)

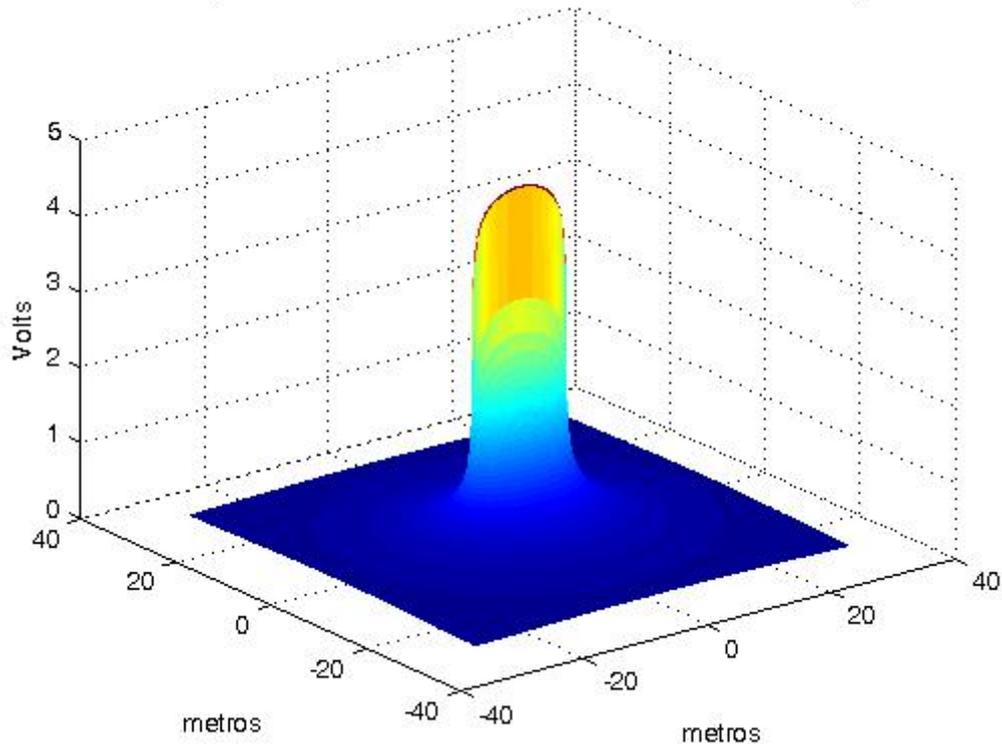
5.2.2 Simulação no *MATLAB*

No *MATLAB* foi simulado em uma superfície de 30 m² um eletrodo de 15 m enterrado a uma profundidade de 20 cm com um solo de 30 Ωm.

Essa simulação foi utilizada para averiguar possíveis influências de outras malhas nos arredores do eletrodo horizontal. Para tal o ensaio de validação deveria conter resultados muito aproximados aos da simulação. A queda no potencial de superfície verificada nesta simulação ainda dentro dos limites do eletrodo pode ser explicada pela equação aplicada. O relevante a se notar nesta simulação é que é possível claramente ver que o potencial de superfície cai mais rapidamente no sentido ortogonal ao do eletrodo sob teste. As linhas equipotenciais formadas são no formato de um elipsóide. A FIGURA 42 apresenta o resultado da simulação.

FIGURA 42 - SIMULAÇÃO NO MATLAB

Potenciais para 1 eletrodo horiz. L = 15 m, P = 0,2 m, 30 ohm.m, para 1 A



FONTE: O autor (2018)

Segundo GAMBOA (2014), a equação 11 utilizada na simulação, visa o cálculo da elevação de potenciais na superfície do solo, V , em cada ponto (x,y) de um condutor horizontal de comprimento L , enterrado a uma profundidade P .

$$V_{xy} = \frac{\rho_a \cdot I}{2\pi L} \ln \left(\frac{|X| + \frac{L}{2} + \sqrt{\left[\left(|X| + \frac{L}{2} \right)^2 + P^2 + |Y|^2 \right]}}{|X| - \frac{L}{2} + \sqrt{\left[\left(|X| - \frac{L}{2} \right)^2 + P^2 + |Y|^2 \right]}} \right) \quad (11)$$

Onde:

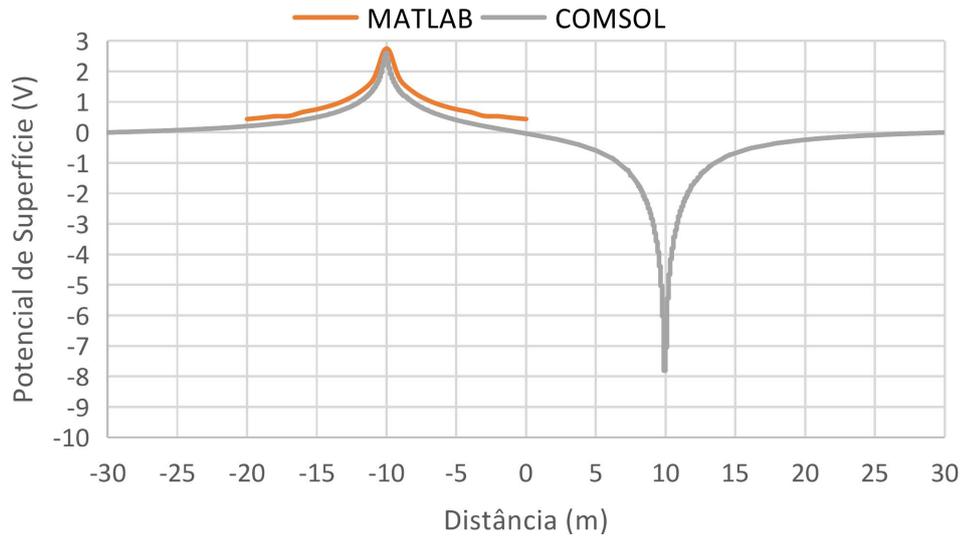
$\rho_a (\Omega m)$ é a resistividade aparente do solo;

$I (A)$ é a corrente injetada no eletrodo.

5.2.3 Comparação Entre as Simulações

A FIGURA 43 nos mostra que para o plano geral as simulações estão muito próximas. Nela podem ser vistos dois picos, o positivo relativo ao eletrodo aterrado (E_g) e o negativo e de maior amplitude ao eletrodo auxiliar de corrente (E_c).

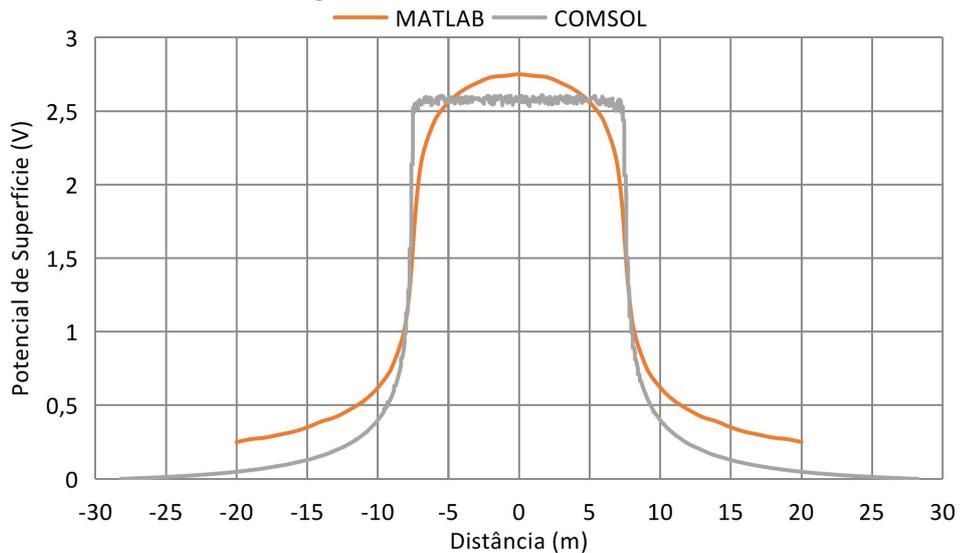
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO DOS POTENCIAIS PERPENDICULARES ENTRE SIMULAÇÕES



FONTE: O autor (2018)

Na FIGURA 44 a comparação é relativa ao eixo paralelo ao eletrodo. Na simulação do COMSOL o potencial de superfície é constante sobre o eletrodo enquanto o do MATLAB forma uma elipse.

FIGURA 44 - COMPARAÇÃO DOS POTENCIAIS PARALELOS AO ELETRODO



FONTE: O autor (2018)

Isso se deve, pois a simulação feita no *MATLAB* é essencialmente geométrica em duas dimensões devido a sua equação enquanto que o *COMSOL* leva em conta uma geometria tridimensional e interações entre materiais.

Apesar das diferenças ambas as simulações se mostram precisas e colaboram para o entendimento e verificação de diversas questões neste trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi pautado em analisar a distribuição de corrente em malhas de aterramento através de uma série de ensaios com eletrodos de aterramentos no solo, avaliando-se o comportamento de diferentes métodos de aterramento, através de um estudo detalhado dos valores de impedâncias de aterramento fornecidas através de ensaios com diferentes terrômetros. Os ensaios foram realizados com diferentes tipos de eletrodos em um mesmo solo, dispostos de maneiras distintas durante os ensaios, afim de se obter um número satisfatório de amostragem.

A utilização de diferentes terrômetros possibilitou a comparação entre os valores distintos fornecidos por eles sob diferentes condições de frequência e de caminhos percorridos pela corrente injetada no solo, ou seja, diferentes densidades de corrente no eletrodo aterrado.

Através da análise dos diferentes comportamentos apresentados nos resultados dos ensaios é possível concluir que a medição em alta frequência apresenta - como esperado conforme a teoria - valores discrepantes dos de baixa frequência e o número de variáveis que influem no quão diferente esse valor será é muito grande e requer uma análise bastante minuciosa do solo, da geometria do eletrodo e das características da corrente injetada no eletrodo aterrado. O que nos leva a uma discussão altamente sensível sobre a revisão da ABNT NBR 15749, onde nos parece razoável a implementação de algum método matemático para que se possa verificar o comprimento crítico e a frequência característica dos eletrodos de aterramento para as mais variadas geometrias possíveis. Gerando assim um método que pode ter seus dados confrontados através de um critério de falibilidade. É relevante salientar que, portanto, deve-se considerar que uma medição é feita em alta frequência toda vez que a frequência utilizada ultrapasse a frequência característica (F_c) de qualquer eletrodo e solo)

Assim como disseram MA e DAWALIBI (1998) relativamente a métodos computacionais, as discussões e conclusões obtidas neste trabalho podem ser utilizadas como referência para se decidir qual método deverá ser aplicado para se ter uma análise eficiente e apurada para aterramentos.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram encontradas limitações acerca das dimensões do terreno disponível e da frequência de equipamentos disponíveis durante o período de realização dos ensaios. Para trabalhos futuros eletrodos horizontais com maiores dimensões que não puderam ser realizadas neste trabalho devido a limitação das dimensões do terreno poderiam ser aplicados para que pudessem ser verificados efeitos de reflexão no eletrodo para impulsos e características do solo levantadas. Neste mesmo eletrodo medidas em corrente contínua poderiam ser efetuadas.

Eletrodos capacitivos podem ser explorados porém estes necessitam de equipamentos com frequências mais elevadas.

Um método para que se possa tabelar os valores de frequência característica e de comprimento crítico para as geometrias mais comumente encontradas em instalações elétricas poderia ser desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, H. X., OLIVEIRA R. M. S., SALAME, Y. C. e SOBRINHO, C. L. S. S. Propostas de Novas Técnicas Para Redução do Potencial de Passo. Belém: UFPA, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15749:2009: Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- CAMINHA, A. C. Introdução à proteção dos sistemas elétricos. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1977.
- CHISHOLM, W. A., MARTIN-STURMEY, K., SODERMAN, C. P., BESKE, B. D., BOLOGNA, F.F. Measured Effects of Adjacent Towers on Transient Earthing Impedance. Johannesbug: Earthing Africa - Symposium & Exhibition, 2017.
- COTRIM, A. A. M. Instalações elétricas. 4ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- F. Bologna, "Zed-Meter: Basic Operation". África do Sul: Proceedings of ESKOM Workshop, 2014.
- GAMBOA, L. R. A. Sistemas de Aterramento, Fundamentos e Ensaio. Curitiba: LACTEC, 2014.
- GRCEV, L. Improved Earthing System Design Practices for Reduction of Transient Voltages. Macedônia: CIGRÉ, 1998.
- GUPTA, B. R. e THAPAR, B. Impulse Impedance of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Chandigarh, Índia: IEEE, 1980.
- IEEE. IEEE 81-2012 - IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York: IEEE, 2012.
- KINDERMANN, G. e CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento Elétrico. Florianópolis: UFSC, 2002.
- LIMA, A. B. Método Para Cálculo da Impedância de Malhas de Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão. Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- MA, J. e DAWALIBI, F. P. Modern Computational Methods For the Design and Analysis of Power System Grounding. Montreal: IEEE, 1998.
- MELIOPOULOS, A. P. S. Power System Grounding and Transients, An Introduction. Atlanta: Marcel Dekker, 1988.
- NETO, T. V. Investigação de Metodologias para Avaliação da Resposta de Aterramento de Linhas de Transmissão. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

- NOGUEIRA, R. L. S. Análise de Sistemas de Aterramento Sob Solicitações Impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.
- PAPALEXOPOULOS, A. D. e MELIOPOULOS, A. P. Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. São Francisco: 1987.
- PÉREZ, C, A, S. O Modelo de Elétron Livre de Drude Completa 100 Anos. Passo Fundo: UPF, 2000.
- PORTELA, C. Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatability. Rio de Janeiro: 1999.
- REITZ, R. J.; MILFORD, J. F. e CHRISTY, W.R. Fundamentos da Teoria Eletromagnética. Rio de Janeiro: Editora Campus 3^aed., 1982.
- SALAMANCA, H. L. L., BLOCK, P. A. B., RETORTA, F. S., DAHLKE, D. B., GAMBOA, L. R. A., BEE, R. T. e AQUINO, T. F. Residual Current Method of Grounding Resistance Measurement in Transmissions Towers with Earth Wire - Part 1: Study of Residual Current in Transmition Towers. Curitiba: 2016.
- SILVA, T. A. F. e FILHO, S. C. S. Um estudo sobre os efeitos da eletricidade no corpo humano sob a égide da saúde e segurança do trabalho. *Exacta*, São Paulo: 2007.
- TAKASHIMA, T., NAKAE, T., e ISHIBASHI, R. High Frequency Characteristics of Impedances to Ground And Field Distributions of Ground Electrodes. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Kanazawa: 1981.
- VISACRO FILHO, S. Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento. São Paulo: Artliber Editora, 2002.
- VISACRO FILHO, S. The Use of Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. São Paulo: 2018.

ANEXO 1 – ATA CE-03:102.01 COBEI/ABNT

ABNT/CB-03
Comitê Brasileiro de Eletricidade



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
FORO NACIONAL DE NORMALIZAÇÃO
CERTIFICADORA DE PRODUTOS E SISTEMAS

ATA DE REUNIÃO

CE-03:102.01 - COMISSÃO DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

ATA DA 6ª REUNIÃO 2018

DATA: 19/07/2018

INÍCIO: 09h:30mm

TÉRMINO: 16:00h

LOCA: Av. Paulista 1439- 6º andar – Sala 4 - São Paulo - SP

COORDENADOR: João H. Zancanela

SECRETÁRIO: Hirofumi Takayanagi

1 PARTICIPANTES

1.1 PRESENTES

(P) Produtor (C) Consumidor (N) Neutro

Entidade	Representante	Telefone	E-mail	Classe
Consultora	Rosane M. Ribas	(43)99975-0513	romaribas@gmail.com	
Enertec Engenharia	Marcio A. Figueiredo	(11)3259-0509	enertec@uol.com.br	2
Enertec Engenharia	Sergio R.Oliveira	(11)3259-0508	serenergia@bol.com.br	2
Fastweld	Rinaldo J. Botelho	(11)99911-1780	rinaldo@fastweld.com.br	5
INTELLI	João Henrique Zancanela	(16)3820-1622	jhz@intelli.com.br	5
JMV Consult	Hirofumi Takayanagi	(11) 99977-0740	hiro.taka@hotmail.com	2
Megabras	Luis Alberto Petroruti	(11)99449-6663	lap@megabras.com.br	5
Sota Cons e Proj Ltda	Carlos Alberto Sotille	(11) 98911-5725	capasotille@gmail.com	2

1.2 AUSENTES JUSTIFICADOS

(P) Produtor (C) Consumidor (N) Neutro

Entidade	Representante	Telefone	E-mail	Classe
	Helio Massanobu sugimoto	(11)99625-5041	helio.sugimoto@yahoo.com.br	
CEMIG	Luis Fernando Dias	(31)3506-2130 / (31)99336-6269	fdias@cemig.com.br	3
PAIOL Engenharia	Paulo Edmundo Freire	(19)99388-0753	paulofreire@paiolengenharia.com.br	2

2 EXPEDIENTE

2.1. Lida e aprovada a ata da 5ª Reunião sem ressalvas:

3. Pendencias



3.1. ABNT NBR 7117 - Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo

3.1.1 Conforme solicitação do Sr. Paulo Edmundo, coordenador do GT, estamos passando para o segundo semestre de 2018, a revisão do texto da norma ABNT NBR 7117 partes 1 e 2

3.2. ABNT NBR 15751 - Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos.

3.2.1 Proposta para a alteração do título da norma

- **De**
Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos
- **Para**
Sistemas de aterramento em instalações acima de 1 KV — Requisitos

3.3. ABNT NBR 7117 - Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo

3.3.1. No tocante a solicitação da CE em manter a numeração da norma ABNT NBR 7117 e, alterar o título da **Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo** para **Medição dos parâmetros do solo**, será verificado junto ao COBEI as alternativas para viabilizar a manutenção do número da norma e desmembrar a mesma em:

- ✓ **Requisitos Gerais**
- ✓ **Parte 1 - Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo**
- ✓ **Parte 2 - Medição da Resistividade térmica do solo**

4. DISCUSSÃO DO GRUPO DE TRABALHO

4.1. ABNT NBR 15751 – Sistema de Aterramentos de Subestações - Requisitos Gerais

4.1.1. Revisão da norma NBR 15751- Parte 1 – Sistema de Aterramentos de Subestações - Requisitos Gerais

- Erratas;
- Valores permissíveis de segurança;
- Considerações Gerais;
- Melhoria de Aterramento de Equipamentos.

4.2. Solicitar junto a secretaria do COBEI as normas

- ABNT NBR 15749 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento em formato DOC;
- ABNT NBR IEC ABNT NBR IEC 61400 -1 Aerogeradores Parte 1 Requisitos de Projeto;
- IEC 61024-1-2:1998, Protection of structures against lightning – Part 1-2: General principles – Guide B – Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems.

4.3. Revisão da ABNT NBR 15749 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.

ABNT/CB-03
Comitê Brasileiro de Eletricidade



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
FORO NACIONAL DE NORMALIZAÇÃO
CERTIFICADORA DE PRODUTOS E SISTEMAS

4.3.1. O Sr. Sotille deverá apresentar até a próxima reunião o anexo “G” incluindo os procedimentos em alta frequência em áreas energizadas, visando com essa inclusão, alterar o status do anexo de “informativo” para “normativo”

5. Revisão do texto do projeto de norma da CE 03.102.001.009/3 - Sistema de Aterramento Monofilar com Retorno pela Terra – MRT

5.1. Como não recebemos a manifestação das Distribuidoras, o projeto de revisão da norma, “**Sistema de Aterramento Monofilar com Retorno pela Terra – MRT**” será reenviada para análise e comentários das Distribuidoras até a próxima reunião, considerando que, a mesma será tratada como parte da norma ABNT NBR 16527 – Aterramento para Sistema de Distribuição.

5.2. Para a análise e comentários dos textos do projeto de revisão da norma, solicitamos considerar:

5.2.1. Os textos destacados em vermelho deverão ser reavaliados;

5.2.2. Os textos destacados em azul, deverão ser avaliados pelas Distribuidoras;

5.2.3. Os textos destacados em preto e de consenso da CE.

Nota: Cabe ressaltar que, concretizando o consenso da norma MRT ser tratado como parte da norma NBR 16527, todos os desenhos referentes a estruturas das redes de distribuição, os equipamentos, bem como os textos e as tabelas referentes aos dimensionamentos elétricos, mecânicos dos condutores e das estruturas, não serão contemplados na norma MRT.

6. OUTROS ASSUNTOS

6.1. - Esta ata encontra-se no livelink pelo seguinte caminho: livelink/comitês técnicos/003-ABNT-03-Eletricidade/aterramentos elétricos/atas/atas de 2018.

7. PRÓXIMA REUNIÃO

7.1. DATA: 30/08/2018

7.2. LOCAL: FIESP, Av. Paulista 1313 – 7º andar, Sala 1 - São Paulo - SP

7.3 HORÁRIO – 09h:00m às 17:00h

7.4. ORDEM DO DIA

- Aprovação da Ata da 6ª Reunião de 2018;
- Análise das considerações dos textos do projeto de norma da CE 03.102.001.009/3 - Sistema de aterramento monofilar com retorno pela terra – MRT, encaminhadas para comentários;
- Análise do anexo “G” da norma NBR 15749.

ANEXO 2 - ESPECIFICAÇÃO DO ALICATE DE CORRENTE I30S

FLUKE® i30s/i30 AC/DC Current Clamps Instruction Sheet

Safety Instructions

Please read this section carefully. It will make you familiar with the most important safety instructions for handling your product. In this instruction sheet, a **Warning** identifies conditions and actions that pose hazard(s) to the user. A **Caution** identifies conditions and actions that may damage the calibrator or the test instruments.

Warning

The i30s and i30 may only be used and handled by **qualified personnel**. To avoid personal injury, follow these precautions:

- To avoid electric shock, use caution during installation and use of this product; high voltages and currents may be present in circuit under test.
- Do not use the product if damaged. Always connect probe to display device before it is installed around the conductor.
- Always ensure the probe is removed from any live electric circuit, and leads are disconnected before removing the battery cover.
- Use the Current Probe only as specified in the operating instructions; otherwise the current probe's safety features may not protect you.
- Adhere to local and national safety codes. Individual protective equipment must be used to prevent the shock and arc blast injury where hazardous live conductors are exposed.
- Do not hold the Current Probe anywhere beyond the tactile indicator.
- Before each use, inspect the Current Probe. Look for cracks or missing portions of the Current Probe housing or output cable insulation. Also look for loose or weakened components. Pay particular attention to the insulation surrounding the jaws.
- Use caution when working with voltages above 60 V dc, 30 V ac rms or 42 V ac peak. Such voltages pose a shock hazard.
- Use of this equipment is designed to protect against transients in equipment in fixed equipment installations, such as distribution panels, feeders and short branch circuits, and lighting systems in large buildings.

Introduction

The i30s AC/DC Current Clamp has been designed for use with oscilloscopes and DMMs for accurate, non-intrusive measurement of both AC, DC, and complex waveform currents. The i30 AC/DC Current Clamp has been designed for use with DMMs only. Using advanced Hall Effect technology the i30s can accurately measure currents with a resolution of 1 mA from 5 mA to 30 A over the frequency range of DC to 100 kHz. These features make it a powerful tool for use in inverters, switch mode power supplies, industrial controllers and other applications requiring current measurements and/or waveform analysis.

Symbols

The table below lists the symbols used on the product and/or in this manual.

Symbol	Description
	Do not dispose of this product as unsorted municipal waste. Contact Fluke or a qualified recycler for disposal.
	Important Information. See manual.
	Double insulation.
	Do not apply around or remove from the HAZARDOUS LIVE conductors.
	Conforms to Canadian Standards Association.
	Complies with the relevant European standards.

- Use of this equipment in a manner not specified herein may impair the protection provided by the equipment.
- CAT III equipment is designed to protect against the transients in the equipment in fixed equipment installations, such as distribution panels, feeders and short branch circuits, and the lighting systems in large buildings.

Specifications

Electrical Characteristics

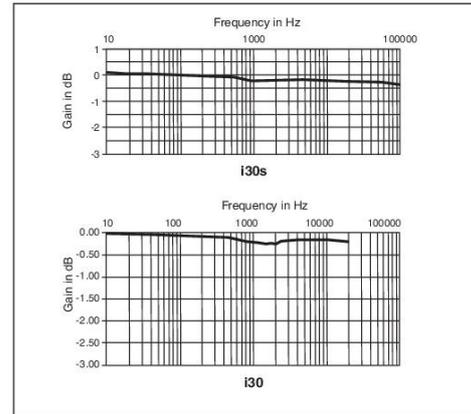
All accuracies stated at 23°C ± 1°C

Current range	20 A AC _{RMS} or DC
Measuring range	± 30 A
Overload capacity	500 A
Output sensitivity	100 mV/A
Accuracy (at 25 °C)	± 1 % of reading ± 2 mA
Resolution	± 1 mA
Typical output noise level	200 μV _{RMS}
Load impedance	> 100 k Ohms ≤ 100 pF
Conductor position sensitivity	± 1 % relative to center reading
Frequency range	
i30s	DC to 100 kHz (0.5 dB)
i30	DC to 20 kHz (0.5 dB)
di / dt following	20 A / μs
Response time	Better than 1 μs
Temperature coefficient	± 0.01 % of reading / °C
Operating humidity:	15 to 85 % (non condensing)C
Altitude:	2000 m
Power supply	9 V Alkaline, NEDA 1604/PP3 IEC 6LR61
Working voltage (see <i>Safety Standards</i>)	300 V AC _{RMS} or DC
Battery life	30 hours, low battery indicator

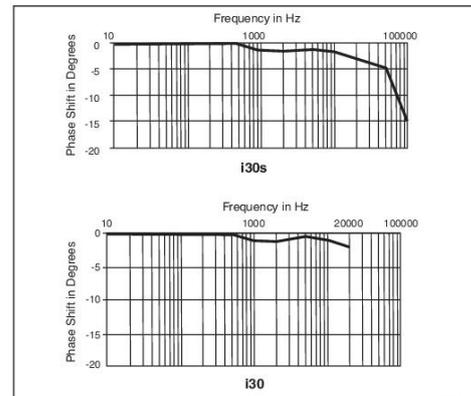
General Characteristics

Maximum conductor size	19 mm diameter
Output cable and connections:	
i30s	2 m cable terminated with a BNC connector (50 Ohms) supplied with a 4 mm safety adaptor
i30	1.5 m cable terminated with a dual 4 mm banana safety plug
Output zero	Manual adjust via thumbwheel
Operating temperature range	0 to +50 °C
Storage temperature range (with battery removed)	-20 to +85 °C
Weight	290 g

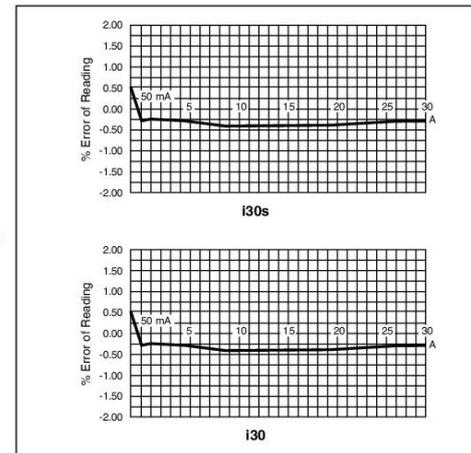
Typical Performance Plots



Typical Frequency Response



Typical Frequency Response



Typical Accuracy Curve

Safety Standards

BS EN 61010-1: 2001

BS EN 61010-2-032: 2002

BS EN 61010-031: 2002

CSA C22.2 No. 1010.1

300 V_{RMS} Category III, Pollution degree 2

Use of the probe on uninsulated conductors is limited to 300 V AC_{RMS} or DC and frequencies below 1 kHz.

EMC Standards

BS EN 61326: 1998 +A1, A2, and A3.

ANEXO 3 – ESPECIFICAÇÃO DO ALICATE DE CORRENTE SR759

AC Current Probe Model SR759

User Manual

DESCRIPTION

The SR759 (Catalog #2116.33) is designed for use in industrial environments. The ergonomic design allows it to easily attach to cables or small bus bars. The “circular” jaws guarantee a very good accuracy and low phase shift. The probe has four measurement ranges with the highest range measuring to 1000Arms continuous and is compatible with any AC Voltmeter, multimeter, or other voltage measurement instrument that has the following features: Range and resolution capable of displaying 1mV of output per amp of measured current; Voltmeter accuracy of 0.75% or better to take full advantage of the accuracy of the probe; Input impedance of $\geq 10M\Omega$.

WARNING

The safety warnings are provided to ensure the safety of personnel and proper operation of the instrument. Read the instruction completely.

- Use caution on any circuit: potentially high voltages and currents may be present and may pose a shock hazard.
- Do not use the probe if damaged. Always connect the current probe to the measuring device before it is connected around the conductor
- Do not use on non-insulated conductor with a potential to ground greater than 600V CAT III pollution 2. Use extreme caution when clamping around bare conductors or bus bars.
- Before each use, inspect the probe; look for cracks in housing or output cable insulation.
- Do not use clamp in wet environment or in locations that hazardous gases exist.
- Do not use the probe anywhere beyond the tactile barrier.

INTERNATIONAL ELECTRICAL SYMBOLS



This symbol signifies that the current probe is protected by double or reinforced insulation. Use only factory specified replacement parts when servicing the instrument.



This symbol signifies CAUTION! and requests that the user refer to the user manual before using the instrument.



This is a type A current sensor. This symbol signifies that application around and removal from HAZARDOUS LIVE conductors is permitted.

DEFINITION OF MEASUREMENT CATEGORIES

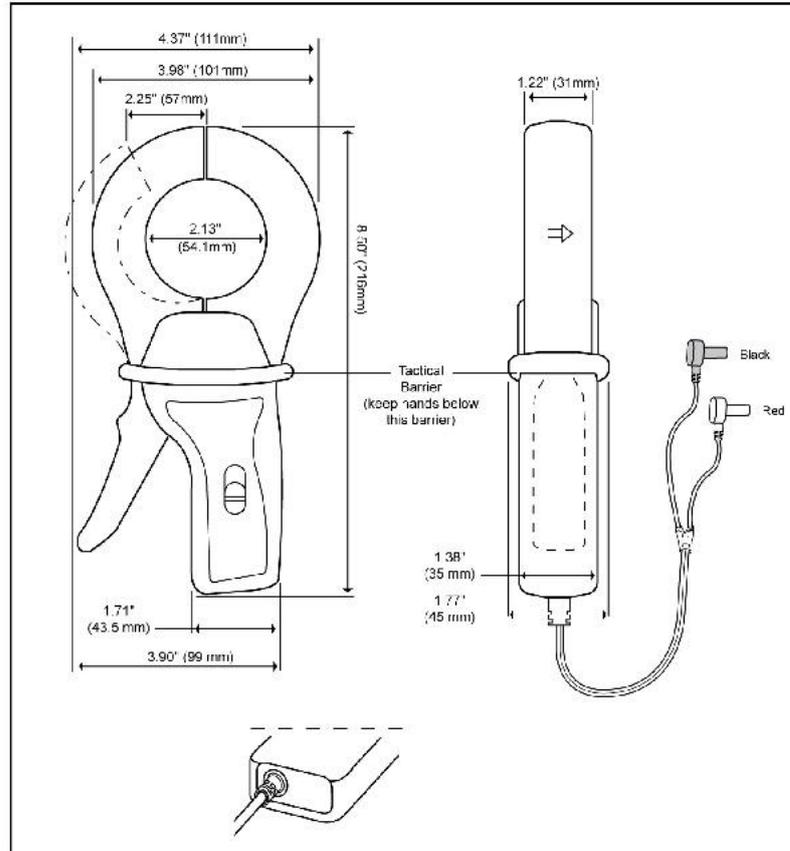
CAT IV: For measurements performed at the primary electrical supply (<1000V) such as on primary overcurrent protection devices, ripple control units, or meters.

CAT III: For measurements performed in the building installation at the distribution level such as on hardwired equipment in fixed installation and circuit breakers.

CAT II: For measurements performed on circuits directly connected to the electrical distribution system. Examples are measurements on household appliances or portable tools.

RECEIVING YOUR SHIPMENT

Upon receiving your shipment, make sure that the contents are consistent with the packing list. Notify your distributor of any missing items. If the equipment appears to be damaged, file a claim immediately with the carrier and notify your distributor at once, giving a detailed description of any damage.



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Current Range:

0.1 to 1000AAC, continuous cycle with frequency $\leq 500\text{Hz}$

Output Signal: 1mVAC/AAC (1VAC at 1000A)

Accuracy and Phase Shift*:

1A Range

Primary Current	Accuracy %	Phase Shift
0.001 to 0.01A	3% + 1mV	Not Specified
0.01 to 0.1A	$\leq 3\% + 1\text{mV}$	Not Specified
0.1 to 1A	$\leq 0.7\% + 1\text{mV}$	$\leq 10^\circ$
1 to 1.2A	$\leq 0.7\% + 1\text{mV}$	$\leq 10^\circ$

10A Range

Primary Current	Accuracy %	Phase Shift
0.01 to 0.1A	1% + 0.2mV	Not Specified
0.1 to 1A	$\leq 0.5\% + 0.2\text{mV}$	$\leq 5^\circ$
1 to 10A	$\leq 0.5\%$	$\leq 2^\circ$
10 to 12A	$\leq 0.5\%$	$\leq 2^\circ$

100A Range

Primary Current	Accuracy %	Phase Shift
0.1 to 1A	1% + 0.2mV	Not Specified
1 to 10A	$\leq 0.5\% + 0.2\text{mV}$	$\leq 2^\circ$
10 to 100A	$\leq 0.3\%$	$\leq 1^\circ$
100 to 120A	$\leq 0.2\%$	$\leq 1^\circ$

1000 A Range

Primary Current	Accuracy %	Phase Shift
1 to 10A	1% + 0.2mV	Not Specified
10 to 100A	$\leq 0.5\% + 0.2\text{mV}$	$\leq 2^\circ$
100 to 1000A	$\leq 0.2\%$	$\leq 1^\circ$
1000 to 1200A	$\leq 0.2\%$	$\leq 1^\circ$

*Reference conditions: 23°C \pm 3°K, 20 to 75% RH, 48 to 65Hz, external magnetic field < 40A/m, no DC component, no external current carrying conductor, test sample centered. Load impedance 10M Ω

Overload: 1200A for 15 min on, 30 min off

Accuracy: Per IEC 185

Frequency Range: 30Hz to 3kHz; current derating above 500Hz using the formula:
$$\frac{1000 A}{2 \times F} \times 1$$
 (in kHz)

Load Impedance: 100kΩ min

Working Voltage: 600V CAT III

Common Mode Voltage: 600V CAT III

Influence of Adjacent Conductor: < 1mA/AAC

Influence of Conductor in Jaw Opening: 0.3% of Reading

Influence of Frequency:
 1mV/A Range: < 1% R from 10Hz to 1kHz
 10mV/A Range: < 1.5% R from 10Hz to 3kHz
 100mV/A Range: < 2% R from 10Hz to 3kHz
 1000mV/A Range: < 2% R from 30Hz to 1kHz

Open Voltage: 8V peak max.

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Operating Temperature: 14° to 122°F (-10° to 50°C)

Storage Temperature: -4° to 158°F (-20° to 70°C)

Influence of Temperature: < 0.15% per 10°K

Influence of Humidity: From 10 to 90%: 0.1%

Jaw Opening: 2.25" (57mm) max

Maximum Conductor Size: 2.05" (52mm)

Envelope Protection: IP 40 (IEC 529)

Drop Test: 1 m (IEC 68-2-32)
 100 g (IEC 68-2-27)

Vibration:
 5 to 15Hz, 0.15mm (IEC 68-2-6)
 15 to 25Hz, 1mm
 25 to 55Hz, 0.25mm

Polycarbonate Material:

Handles: ABS Grey and Lexan 500R, Red: UL94V0
 Jaws: Lexan 500R, Red: UL94V0

Dimensions: 4.37 x 8.50 x 1.77" (111 x 216 x 45mm)

Weight: 1.21 lbs (550g)

Output: SR759: 5 ft (1.5m) lead with safety 4mm banana plug

SAFETY SPECIFICATIONS



Electrical: Double insulation or reinforced insulation between the primary or secondary and the outer case of the handle conforms to IEC 1010-2-032.

Common Mode Voltage: 600V Category III, Pollution Degree 2

Dielectric Strength: 5550V, 50/60Hz between primary, secondary and the outer case of the handle

Electromagnetic Compatibility:
 EN 50081-1 Class B
 EN 50082-2 Electrostatic discharge IEC 1000-4-2
 Radiated field IEC 1000-4-3
 Fast transients IEC 1000-4-4
 Magnetic field at 50/60 Hz IEC 1000-4-8

ORDERING INFORMATION

AC Current Probe SR759Cat #2116.33

Accessories:
 Banana plug adapter (to non-recessed plug)Cat #1017.45

OPERATION

Please make sure that you have already read and fully understand the WARNING section on page 1.

Making Measurements with the AC Current Probe Model SR759

- Connect the black and red terminals to the 2VAC range of your DMM or voltage measuring instrument. Select the appropriate current range (1000/1V). Clamp the probe around the conductor to be tested with the arrow pointed toward the load. Read the value display on the DMM and multiply it by the probe ratio selected. (e.g. If reading = 185mV, the current flowing through the probe is $185 \times 1000 = 185,000\text{mA} = 185\text{A}$ when 1mV/A range is selected.)
- For best accuracy, avoid if possible, the proximity of other conductors which may create noise.

Tips for Making Precise Measurements

- When using a current probe with a meter, it is important to select the range that provides the best resolution. Failure to do this may result in measurement errors.
- Make sure that probe jaw mating surfaces are free of dust and contamination. Contaminants cause air gaps between the jaws, increasing the phase shift between primary and secondary. It is very critical for power measurement.

MAINTENANCE

Warning:

- For maintenance use only original replacement parts.
- To avoid electrical shock, do not attempt to perform any servicing unless you are qualified to do so.
- To avoid electrical shock and/or damage to the instrument, do not get water or other foreign agents into the probe.

Cleaning: To ensure optimum performance, it is important to keep the probe jaw mating surfaces clean at all times. Failure to do so may result in error in readings. To clean the probe jaws, use very fine sand paper (fine 600) to avoid scratching the jaw then gently clean with a soft oiled cloth.

REPAIR AND CALIBRATION

You must contact our Service Center for a Customer Service Authorization number (CSA#). This will ensure that when your instrument arrives, it will be tracked and processed promptly. Please write the CSA# on the outside of the shipping container.

Chauvin Arnoux[®], Inc. d.b.a. AEMC[®] Instruments
 15 Faraday Drive • Dover, NH 03820 USA
 (800) 945-2362 (Ext. 360) • (603) 749-6434 (Ext. 360) • repair@aemc.com

(Or contact your authorized distributor)

NOTE: All customers must obtain a CSA# before returning any instrument.

TECHNICAL AND SALES ASSISTANCE

If you are experiencing any technical problems, or require any assistance with the proper use or application of this instrument, please contact our technical hotline:

(800) 945-2362 (Ext. 351) • (603) 749-6434 (Ext. 351) • techsupport@aemc.com

LIMITED WARRANTY

The current probe is warranted to the owner for a period of **two** years from the date of original purchase against defects in manufacture. This limited warranty is given by AEMC[®] Instruments, not by the distributor from whom it was purchased. This warranty is void if the unit has been tampered with, abused or if the defect is related to service not performed by AEMC[®] Instruments.

Full warranty coverage and product registration is available on our website at: www.aemc.com/warranty.html

Please print the online Warranty Coverage Information for your records.