

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE A RESPOSTA
DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FRENTE A CORRENTES DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

GLÁUCIO CORRÊA ROSADO

GLÁUCIO CORRÊA ROSADO

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE A RESPOSTA
DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FRENTE A CORRENTES DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica
Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE
NÚCLEO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS - LRC
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
BELO HORIZONTE
AGOSTO - 2008**

**“INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE A RESPOSTA
DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FRENTE A CORRENTES DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**

GLÁUCIO CORRÊA ROSADO

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de Agosto de 2008,

Por:

Silvério Visacro Filho – Dr.
Prof. DEE/UFMG – Orientador

Manuel Losada Y Gonzalez – Dr.
Prof. DEE/UFMG

Fernando Henrique Silveira – Dr.
Pesq. LRC/UFMG

Dedico este trabalho à minha família e à minha namorada Juliana, que me valorizam e me amam de forma incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que é a origem e sentido da vida.

A meus pais, Jose Eduardo e Aidê, que sempre me incentivaram a prosseguir com a minha formação, preocupando-se, sobretudo, com minha educação ética e religiosa.

Meu irmão, tios e avôs, por estarem sempre por perto de mim apoiando e dando-me forças nos momentos difíceis.

À Juliana, que com seu carinho, amor, paciência e atenção, ajudou-me sempre a seguir em frente.

Ao meu amigo Roger, companheiro de república por meia década, agradeço pelo companheirismo, estima e amizade. A Demal, Bonfim, Emersom e Rafael, agradeço pelo excelente relacionamento ao longo deste mestrado. Sempre prestativos, atenciosos e amigos.

Ao professor e orientador Silvério, pelas ilustres e precisas orientações que sempre me direcionaram para o caminho adequado.

A todos do LRC que, de alguma forma, influenciaram no desenvolvimento deste trabalho; mas um especial agradecimento aos amigos Engenheiros Alissom e Fuad pelas sucessivas orientações práticas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	3
2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO COMPORTAMENTO DOS ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FRENTE A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O COMPORTAMENTO DO ATERRAMENTO.....	5
2.3 COMPORTAMENTO DO ATERRAMENTO FRENTE ÀS CORRENTES DE DESCARGAS	9
2.3.1 <i>Composição da Corrente e a Dependência com a Frequência dos Parâmetros do Solo</i>	10
2.3.2 <i>Distribuição de Campo e Efeitos de Propagação no Solo</i>	11
2.3.3 <i>Efeito da Intensidade de Corrente</i>	14
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	15
3 DESENVOLVIMENTOS	16
3.1 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	16
3.2 ASPECTOS MAIS RELEVANTES DA ONDA DE CORRENTE DE DESCARGA.....	17
3.2.1 <i>Principais Parâmetros de Interesse da Onda de Descarga</i>	18
3.3 GERADOR DE IMPULSOS	21
3.3.1 <i>Introdução</i>	21
3.3.2 <i>Circuito do Gerador</i>	22
3.3.3 <i>Princípio de Funcionamento do Gerador de Impulsos</i>	23
3.4 O GERADOR DE IMPULSOS DESENVOLVIDO.....	25
3.4.1 <i>Aspectos Construtivos do Gerador</i>	25
3.5 CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DE ONDA IMPULSIVA.....	29
3.5.1 <i>Funcionamento do Sistema de Medição</i>	30
3.6 CIRCUITO DE TESTE E SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ONDA IMPULSIVA	30
3.6.1 <i>Configurações de Eletrodos Implementados</i>	30
3.6.2 <i>Sistema de Medição</i>	31

3.7 CUIDADOS PARA OBTENÇÃO DE ONDAS DE CORRENTE COM OS TEMPOS DE FRENTE	
DEFINIDOS	33
3.7.1 <i>Ondas de Corrente com Tempo de Frente Rápido</i>	34
3.7.2 <i>Ondas de Corrente com Tempo de Frente Intermediário</i>	34
3.7.3 <i>Ondas de Corrente com Tempo de Frente Lento</i>	35
3.8 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO E DE RESISTIVIDADE DO SOLO	37
3.8.1 <i>Método da Queda de Potencial</i>	37
3.8.2 <i>Método de Frank Wenner</i>	39
3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	41
4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	41
4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS COM ONDAS COMPLETAS PARA SOLOS DE BAIXA	
RESISTIVIDADE	43
4.3 DETALHE DAS ONDAS EM ESCALA DE TEMPO REDUZIDA PARA SOLOS DE BAIXA	
RESISTIVIDADE	46
4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS COM ONDAS COMPLETAS PARA SOLOS DE ALTA	
RESISTIVIDADE	51
4.5 DETALHE DAS ONDAS EM ESCALA DE TEMPO REDUZIDA PARA SOLOS DE ALTA	
RESISTIVIDADE	52
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
5 ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	55
5.1 INTRODUÇÃO	55
5.2 RESULTADOS RELEVANTES.....	55
5.3 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS	56
5.3.1 <i>Configurações de Eletrodos em Solos de Baixa Resistividade</i>	56
5.3.2 <i>Configurações de Eletrodos em Solos de Alta Resistividade</i>	59
5.4 JUSTIFICATIVAS PROVÁVEIS PARA A CONTRADIÇÃO.....	60
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	63
6.1 CONSIDERAÇÕES	63
6.2 RESULTADOS RELEVANTES.....	63
6.3 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	64
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de uma investigação experimental sobre o comportamento de algumas configurações de eletrodos enterrados em solos de baixa e alta resistividade, frente a ondas impulsivas de correntes de baixa intensidade cuja forma é similar àquela associada às correntes de descargas atmosféricas.

Os resultados obtidos contribuem para um melhor entendimento da resposta do aterramento, possibilitando uma validação mais concisa dos modelos computacionais que realizam cálculo do comportamento transitório de aterramentos elétricos.

O trabalho envolveu desenvolvimentos experimentais, incluindo a implementação de um gerador de impulsos para aplicação das correntes de teste, e a realização sistemática de ensaios de injeção de correntes impulsivas em diferentes configurações de eletrodos para medição das grandezas de interesse.

Duas principais contribuições foram obtidas neste trabalho. Primeiro, verificou-se que o efeito capacitivo no solo é bem mais pronunciado do que usualmente assumido na literatura. Segundo, constatou-se que em todos os casos avaliados, a impedância impulsiva é menor do que a resistência medida em baixa frequência, para eletrodos mais curtos do que o comprimento efetivo do aterramento.

ABSTRACT

This work presents the results of an experimental investigation about the behavior of grounding electrodes subjected to low intensity impulsive currents, whose waveforms are similar to the lightning ones. Basically the results consist in the response of electrodes, in terms of developed voltage, to the injection of impulsive currents, considering soils with high and low resistivity values.

Interesting results were obtained, which might be useful to allow evolving the understanding of the transient response of grounding electrodes. They might be also applied to validate theoretical models intended to predict such response.

The investigation included experimental developments, such as the implementation of an impulse generator for application of the test currents and the systematic tests consisting in impressing impulsive currents to different electrode configurations for measurement of the quantities of interest.

Two main contributions were derived from the results. First, it was found that the capacitive effects in the soil are more relevant than usually assumed. Also, for the evaluated cases, always the impulsive grounding impedance had a value lower than the low frequency resistance in both conditions of soil resistivity when the electrode is shorter than the effective length.

1 Introdução

1.1 Relevância da Investigação

O comportamento dos aterramentos elétricos é capaz de influenciar significativamente a operação de sistemas elétricos e de comunicação durante certas ocorrências, sobretudo, quando estes sistemas são submetidos aos efeitos do fenômeno *Descarga Atmosférica*.

Em estudos recentes, Visacro (2007, 2005a) afirma que a resposta dos eletrodos de aterramento, quando submetidos a correntes de descarga, apresenta comportamento bem diferente em relação àquele observado para correntes lentas, de frequências representativas baixas, tais quais as correntes de curtos-circuitos. Esta diferença de comportamento deve-se a diversos fatores, sendo os mais relevantes, a resposta do aterramento frente às correntes impulsivas e o processo de ionização do solo. O presente trabalho é dedicado ao primeiro aspecto.

Atualmente, a literatura apresenta vários modelos computacionais para cálculo do comportamento transitório de aterramentos elétricos, sendo um dos modelos de destaque apresentado por Visacro e Soares Jr. (2005). De uma forma

geral, estas são ferramentas importantes para avaliar a resposta do aterramento quando submetido a correntes de descargas. Entretanto, como destacado em (ROSADO et al., 2007), a qualidade dos resultados providos por tais modelos depende de uma validação apropriada destes modelos.

Neste contexto, a obtenção de dados experimentais para fins de comparação com tais resultados, torna-se muito importante. Infelizmente, as realizações experimentais requeridas para obtenção de tais dados é complexa, pois envolve a injeção de ondas de corrente impulsivas rápidas no solo através de eletrodos, e complicadas medições para detecção das ondas de corrente e tensão no solo em condições de campo. Por outro lado, a disponibilidade de dados experimentais confiáveis na literatura é bastante limitada, inibindo a possibilidade de se proceder à avaliação da qualidade dos resultados providos pelos modelos computacionais. Isto fragiliza a aplicação desses modelos para fins de entendimento do comportamento transitório dos eletrodos de aterramento, mas constitui fator de estímulo à realização desses experimentos.

1.2 Objetivo

Em tal cenário, este trabalho tem como objetivo principal prover um conjunto de dados experimentais concisos da resposta de algumas configurações básicas de eletrodos de aterramento, colocados em solos com diferentes resistividades, frente a ondas impulsivas de corrente de forma similar àquelas associadas às descargas atmosféricas.

Almeja-se, assim, desenvolver uma contribuição para um melhor entendimento da resposta do aterramento quando submetido a correntes de descargas.

1.3 Organização do Texto

O texto desta dissertação está estruturado em 7 capítulos, incluindo a presente *Introdução*.

No *Capítulo 2* é apresentada uma abordagem objetiva dos principais aspectos que influenciam no comportamento transitório dos aterramentos elétricos.

O *Capítulo 3* descreve os aspectos relativos à caracterização das ondas de corrente de descarga, o gerador desenvolvido e o circuito de teste usado em cada caso para se obter as ondas de corrente impulsiva.

No *Capítulo 4* são mostrados os resultados das medições realizadas em solos com valores baixos e altos de resistividade, para injeção de ondas de corrente com tempos de frente rápido, intermediário e lento.

No *Capítulo 5* são realizadas análises dos resultados obtidos para cada configuração de eletrodo enterrado em solos de baixa e alta resistividades.

As conclusões finais do trabalho, decorrentes dos experimentos práticos realizados, assim como as propostas de continuidade, são apresentadas no *Capítulo 6*.

Por fim, no *Capítulo 7* são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas ao longo desse texto.

2 Aspectos Fundamentais do Comportamento dos Aterramentos Elétricos Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas

2.1 Introdução

Em sua operação, os sistemas elétricos e eletrônicos ficam sujeitos a ocorrências de transitórios eletromagnéticos que podem perturbar o seu funcionamento e, em muitos casos, danificar componentes do sistema.

Durante tais ocorrências, a resposta do aterramento do sistema pode influenciar nos efeitos desta perturbação. Na avaliação desses efeitos, por simulação do comportamento do sistema em relação a tais ocorrências, a representação do aterramento pode assumir configurações diferentes consoante ao tipo de

solicitação. Isto dificulta a definição de circuitos equivalentes representativos.

Para se alcançar representações consistentes do aterramento, são requeridas modelagens capazes de computar simultaneamente todos os efeitos que influenciam no comportamento do aterramento.

Nesta perspectiva, no presente capítulo procede-se a uma abordagem objetiva dos principais aspectos que influenciam no comportamento transitório dos aterramentos elétricos. Esta abordagem consiste basicamente numa síntese da referência (VISACRO, 2007) e visa tão somente contextualizar o desenvolvimento desta dissertação.

2.2 Considerações Preliminares Sobre o Comportamento do Aterramento

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico ao solo, constituído basicamente por: (i) conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos, (ii) eletrodos de aterramento e (iii) a terra que envolve os eletrodos.

Considerando uma parcela limitada de eletrodo enterrada no solo, representada na Figura 2.1, nota-se que a corrente no eletrodo é composta por duas componentes, uma transversal e outra longitudinal. A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo (corrente transversal) e, parcialmente, transferida para o comprimento restante do condutor (corrente longitudinal).

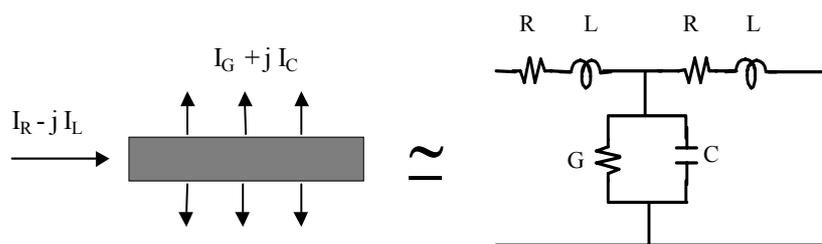


Figura 2.1 – Componentes de corrente no eletrodo e no solo (VISACRO, 2005a)

O fluxo da corrente longitudinal provoca perdas internas e estabelece um campo magnético em torno do eletrodo. As energias associadas ao fluxo dessas correntes são computadas por meio de resistências (R) e indutâncias (L) colocadas em série no circuito equivalente.

Por outro lado, no que concerne à corrente transversal, o campo elétrico no solo (um meio de resistividade ρ e permissividade ϵ) está associado ao fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre as amplitudes de tais correntes transversais ($I_{\text{Condução}}/I_{\text{Capacitiva}}$) pode ser deduzida a partir da segunda *Equação de Maxwell* na sua forma integral (Equação 2.1), quando se considera o domínio particular da frequência, segundo indica a Equação 2.2.

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{Condução}} + \underbrace{\frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot \hat{n} ds}_{\text{Corrente Capacitiva}} \quad (2.1)$$

$$\frac{I_{\text{Condução}}}{I_{\text{Capacitiva}}} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (2.2)$$

Nesta relação, σ refere-se à condutividade do solo e ω à frequência angular.

A energia associada ao fluxo das correntes transversais no solo pode ser computada por meio de uma condutância (G) e de uma capacitância (C), colocadas no ramo paralelo do circuito equivalente da Figura 2.1. Este circuito representa apenas um elemento do aterramento (parcela do eletrodo mais o solo). A representação do aterramento completo requer a adoção de um circuito mais complexo, constituído por um conjunto de circuitos similares ao da Figura 2.1, conectados segundo a topologia de configuração geométrica e de conexão dos eletrodos de aterramento. Esse circuito deve considerar ainda os efeitos mútuos de natureza condutiva, capacitiva e indutiva, entre cada um dos elementos que compõem os eletrodos de aterramentos (VISACRO, 2005a).

A solução completa do aterramento, vista do ponto de injeção de corrente, expressa a sua impedância. No domínio da frequência, como mostrado na Equação 2.3, o comportamento da *Impedância Complexa do Aterramento* pode ser determinado pela relação entre a elevação de potencial desenvolvida no eletrodo (referenciada ao infinito) e a corrente aplicada ao aterramento para cada frequência específica.

$$Z(\omega) = V(\omega) / I(\omega) \quad (2.3)$$

A Figura 2.2 ilustra o comportamento esperado para a impedância complexa no domínio da frequência para um eletrodo longo enterrado num solo de 2.500 Ω·m.

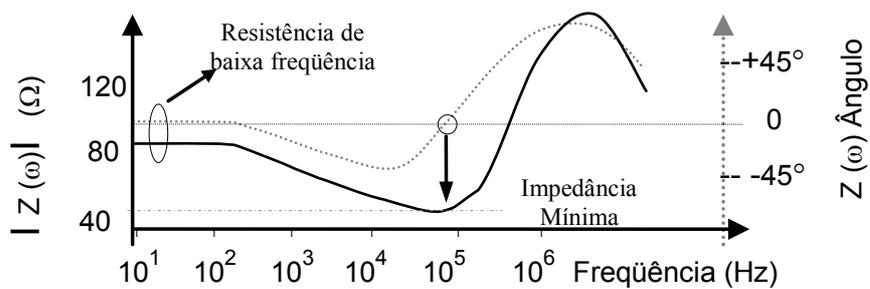


Figura 2.2 – Diagrama de Frequência da Impedância de Aterramento $Z(\omega)$. Adaptado de (VISACRO, 2007). Linha contínua: valor da impedância – Linha tracejada: ângulo da impedância

Quando a frequência é muito reduzida ($f < \text{kHz}$), basicamente os efeitos reativos são desprezíveis e a impedância pode ser aproximada por uma resistência, designada *Resistência em Baixa Frequência*. Desta forma, a representação do aterramento pode ser feita por meio de um conjunto de condutâncias (ou resistências transversais equivalentes), incluindo os efeitos mútuos resistivos entre estas. Assim, o valor da resistência de aterramento, R_T , é definido pela relação entre a elevação de potencial referida ao infinito e a corrente que a gerou:

$$R_T = V_T / I_T \quad (2.4)$$

Mas, à medida que a frequência é aumentada, conforme mostrado na

Figura 2.2, nota-se que, inicialmente, a impedância de aterramento tem seu valor reduzido em relação ao valor da resistência em baixa frequência, devido ao efeito capacitivo. Observa-se, em seguida, que o efeito indutivo começa a exercer influência e a impedância continua decrescendo até o instante em que esta atinge um valor mínimo em torno de uma frequência na qual os efeitos capacitivo e indutivo se compensam ($\theta_z(\omega) \cong 0$). Logo após, a impedância passa a crescer devido ao aumento do efeito indutivo.

Já no domínio do tempo, considerando ondas impulsivas como aquelas associadas às das descargas atmosféricas, muito normalmente, o comportamento do aterramento é representado através da *Impedância Impulsiva de Aterramento* (Z_P). Este parâmetro refere-se ao quociente entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente no aterramento.

$$Z_P = V_p / I_p \quad (2.5)$$

Apesar dos picos das ondas de tensão e corrente não serem simultâneos em vários casos, esta representação tem relevante valor prático. Tal parâmetro permite representar o comportamento do aterramento em situações críticas, usualmente traduzidas pelo valor de pico das tensões desenvolvidas. Assim, através desta representação é possível determinar a máxima elevação de potencial no aterramento (*GPR - Ground Potential Rise*) durante uma ocorrência a partir do produto de Z_P pelo valor do pico de corrente.

Por outro lado, por sua complexidade, a medição de Z_P é uma tarefa impraticável em condições de aplicação em campo. Assim, a medição da resistência de aterramento (R_{med}) é realizada como alternativa. Esta resistência é obtida por meio de instrumentos que empregam correntes de teste em baixa frequência, normalmente entre 40 e 300 Hz.

A relação entre a impedância impulsiva e a resistência em baixa frequência para uma dada configuração de eletrodo, conforme relatam Visacro e Rosado (2008) é dada pelo *Coefficiente Impulsivo* (I_C), como indicado na Equação 2.6. Muitas vezes este coeficiente é usado para estimar a impedância impulsiva a partir do valor medido da resistência de aterramento.

$$I_C = Z_P / R_{med} \quad (2.6)$$

Alguns autores, como Grcev et al. (2007), consideram que na ausência de ionização do solo, este coeficiente é sempre maior ou igual à unidade, conforme mostrado na Figura 2.3, assumindo que o valor da impedância impulsiva é sempre maior do que a resistência em baixa frequência.

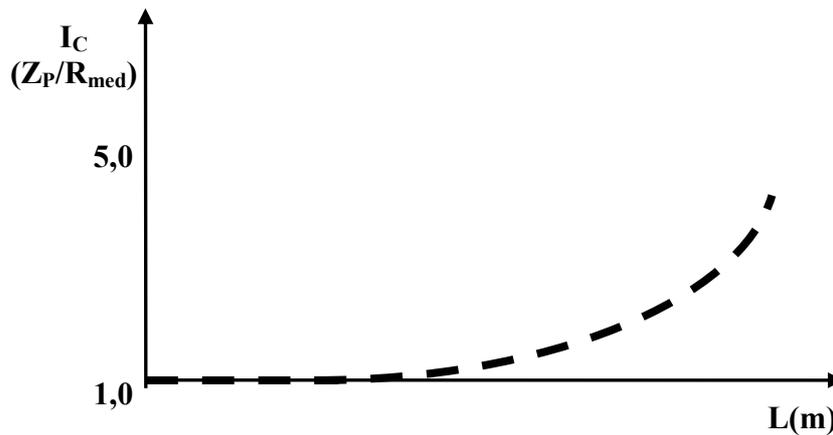


Figura 2.3 - Coeficiente Impulsivo. Adaptado de (VISACRO et al., 2007)

Soares Jr. e Visacro (1998) consideram tal hipótese questionável e sugerem que ao se considerar eletrodos longos, onde o comprimento efetivo não é excedido e o processo de ionização não é relevante, a relação entre a impedância impulsiva e a resistência em baixa frequência é menor do que a unidade.

2.3 Comportamento do Aterramento Frente às Correntes de Descargas

A qualidade da avaliação do comportamento do aterramento frente às

correntes de descargas depende de dois fatores fundamentais: (i) a correta caracterização do comportamento do solo nas condições reais a que fica submetido pelo fenômeno eletromagnético solicitante, ou seja, a definição de seus parâmetros macroscópicos (ρ , ϵ , μ), quando as correntes associadas à ocorrência são injetadas nos eletrodos de aterramento e (ii) o cálculo adequado do acoplamento eletromagnético entre as partes do aterramento, incluindo os efeitos de propagação das ondas eletromagnéticas guiadas no solo pelos eletrodos de aterramento.

A abordagem de ambos os aspectos para formular o modelo efetivo do aterramento pode ser resumida nas seguintes considerações básicas: (i) composição da corrente e a dependência em relação à frequência dos parâmetros do solo (resistividade e permissividade); (ii) a distribuição do campo e efeitos de propagação no solo e (iii) efeito da intensidade da corrente. Tais aspectos são discutidos adiante.

2.3.1 Composição da Corrente e a Dependência com a Frequência dos Parâmetros do Solo

Para fenômenos lentos, cujos valores representativos de frequências são baixos, muitos autores desconsideram em seus estudos a corrente capacitiva, assumindo que o solo é um meio predominantemente condutivo.

Porém, quando o conteúdo de frequência da corrente alcança uma faixa superior do espectro, como no caso das correntes de descargas, a corrente capacitiva torna-se significativa, podendo ter amplitude comparável à da corrente condutiva. Resultados experimentais mostraram que a relação entre as correntes de condução e capacitiva no solo varia com aumento da frequência (VISACRO e PORTELA, 1987).

Por outro lado, como verificado experimentalmente em (VISACRO e PORTELA, 1987) e (PORTELA, 1999), os parâmetros do solo (resistividade e permissividade), responsáveis pelas correntes condutiva e capacitiva, são

fortemente dependentes da frequência. Devido à falta de uma formulação geral na literatura, que permita expressar a dependência da frequência dos parâmetros do solo, o valor da resistividade do solo é assumido como aquele obtido por meio de instrumentos que utilizam sinais em baixa frequência. Da mesma forma, assume-se que a permissividade relativa do solo varia entre 4 e 81 conforme a umidade do solo (VISACRO e PORTELA, 1987). Segundo esta referência, a permeabilidade magnética do solo é similar àquela do ar ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$), na maior parte dos casos.

2.3.2 Distribuição de Campo e Efeitos de Propagação no Solo

Para fins de análise da propagação de ondas eletromagnéticas no solo, os eletrodos de aterramento podem ser representados como uma linha de transmissão colocada num meio dielétrico com perdas elevadas. Assim, quando ondas impulsivas de tensão e corrente são injetadas em um eletrodo longo enterrado no solo, à medida que estas ondas se propagam ao longo do eletrodo, têm suas amplitudes atenuadas devido às perdas de energia.

Como mostrado adiante na Equação 2.7, a constante de atenuação (α) corresponde à parcela real da constante de propagação (γ), e a constante de defasamento (β) correspondente à parte imaginária.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.7)$$

Nota-se nesta equação que a constante de propagação (γ) é dependente da frequência angular (ω) e da condutância (G), sendo G diretamente proporcional à condutividade (σ). Tais parâmetros são responsáveis pelas perdas no solo. Assim, o aumento dos parâmetros citados resulta em maior atenuação das amplitudes das ondas eletromagnéticas que se propagam no solo ao longo do eletrodo. Outra consequência refere-se à distorção ao longo da direção de propagação, com a

redução da inclinação da frente de onda. Tal distorção é devida, sobretudo, à atenuação mais acentuada a que são submetidas as componentes de frequência elevadas. A Figura 2.4 mostra tais aspectos ao longo do eletrodo.

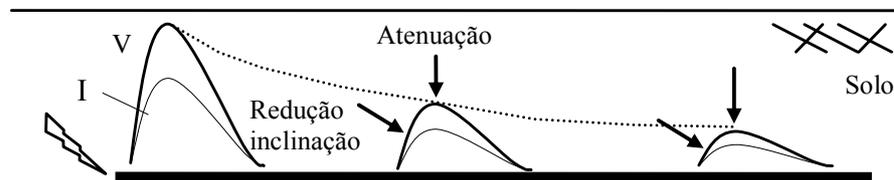


Figura 2.4 - Atenuação e distorção das ondas de corrente e tensão ao longo do eletrodo. Adaptado de (VISACRO, 2007)

Há também que se considerar o caráter divergente do campo eletromagnético, pois a corrente injetada no eletrodo é dispersa ao longo de seu comprimento se dirigindo para o terra remoto. Quando o eletrodo é curto em relação ao comprimento de onda típico do sinal solicitante, o campo divergente gerado pela corrente que dispersa ao longo de eletrodo prevalece. Usualmente, deve-se computar a superposição desse campo divergente e do campo solenoidal associado ao comportamento tipo onda. A Figura 2.5 ilustra tal superposição através de curvas de distribuição do potencial escalar no solo em um eletrodo horizontal.

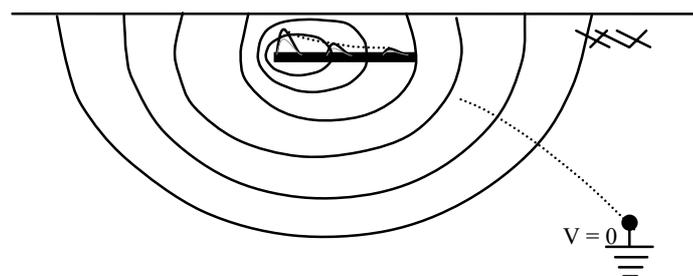


Figura 2.5 - Comportamento divergente do campo no solo. Adaptado de (VISACRO, 2007)

Além disso, a atenuação provoca uma distribuição não uniforme da corrente ao longo do eletrodo, resultando na redução do seu valor. Tais considerações foram importantes para Gupta e Thapar B. (1980) introduzirem o conceito de *Comprimento Efetivo (Lef)*. Este corresponde a um comprimento limite do eletrodo, a partir da qual as componentes de alta frequência das ondas eletromagnéticas que se propagam ao longo do eletrodo são totalmente atenuadas. O aumento do comprimento do

eletrodo além deste limiar não é mais capaz de reduzir o valor da impedância impulsiva de aterramento.

Este conceito é relevante quando a atenuação da onda de corrente é significativa, como acontece nos casos de eletrodos enterrados em solo de baixa resistividade. Assim, o comprimento efetivo não é um parâmetro constante. Para uma dada configuração de eletrodo enterrado, este depende da resistividade do solo e também do conteúdo de frequência da corrente solicitante. Nas ondas de corrente com tempo de frente reduzido, que apresentam componentes de frequência mais elevada, o comprimento efetivo é menor devido à forte atenuação sofrida pela onda no solo.

Em aplicações práticas, tal conceito permite dimensionar a extensão do condutor para o alcance da impedância impulsiva mínima, sem desperdício de condutores.

A Figura 2.6 mostra o valor do comprimento efetivo (indicado por setas) obtido a partir de curvas que expressam a impedância impulsiva (Z_P) em função do comprimento do eletrodo, para uma onda de corrente de 1,2/50 μ s. Três valores de resistividades foram assumidos. Dados relativos à obtenção destas curvas podem ser consultados em (SOARES JR. e VISACRO, 1998).

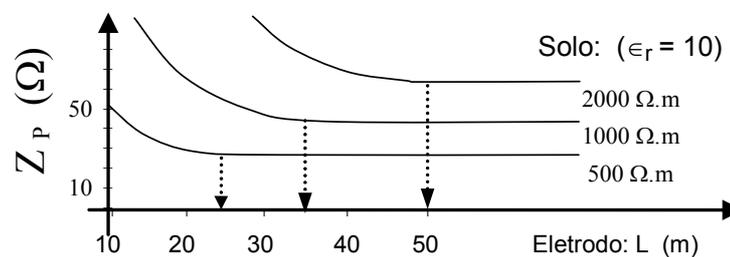


Figura 2.6 - Definição do comprimento efetivo de aterramento a partir de curvas de impedância impulsiva. Adaptado de (SOARES JR. e VISACRO, 1998)

Esta figura indica a dependência do comprimento efetivo em relação à resistividade do solo. Percebe-se que o aumento da resistividade do solo implica

em comprimentos efetivos maiores, uma vez que a atenuação da onda que se propaga no eletrodo é menor.

2.3.3 Efeito da Intensidade de Corrente

Para uma determinada configuração de aterramento mostrada na Figura 2.7 (a) num determinado domínio, quando uma corrente I_1 injetada no solo aumenta, a densidade de corrente na superfície do condutor aumenta linearmente, mantendo-se constante a relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante no solo.

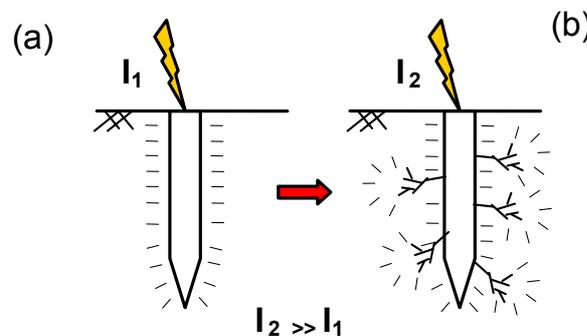


Figura 2.7 - Aspectos de ionização do solo. Adaptado de (VISACRO, 2007)

Entretanto, para eletrodos curtos, a densidade de corrente no meio (J) pode ser muito intensa dando origem a um campo elétrico (E) que excede a um valor crítico.

$$E = \rho \cdot J \quad (2.8)$$

Nesse caso, após alcançar tal limiar que depende da resistividade do meio, pode haver o surgimento de canais de descarga disruptivos no solo próximo ao eletrodo, dando origem a um processo de ionização desse solo. A Figura 2.7 (b) apresenta a formação dos canais disruptivos no meio a partir da injeção de uma corrente elevada.

Efetivamente, tal processo de ionização é responsável pela redução da impedância impulsiva de aterramento, em decorrência do aumento da área de dispersão de corrente, pelo acréscimo da área dos canais ionizados que possuem muito maior condutividade que o solo.

Cabe realçar, ainda, que com base em dados experimentais, Soares Jr. e Visacro (1998) afirmam que o efeito de ionização do solo é capaz de promover a diminuição significativa do valor da impedância impulsiva de aterramento no caso de eletrodos concentrados, mas apenas para eletrodos curtos e altas densidades de corrente. Para eletrodos longos, tais como cabos contrapeso em linhas de transmissão, este efeito praticamente não é capaz de afetar o valor da impedância de aterramento.

2.4 Considerações Finais

A análise da literatura técnica revela que esta carece de informações sobre três pontos de fundamental importância no comportamento do aterramento: (i) a dependência com a frequência dos parâmetros do solo, (ii) a ionização do meio, e (iii) a resposta impulsiva do aterramento.

Esta dissertação é dedicada a este último tópico.

3 Desenvolvimentos

3.1 Metodologia de Desenvolvimento

Um aspecto crítico referente ao tema aterramentos elétricos consiste na carência de referências experimentais para validação dos modelos computacionais para cálculo do seu comportamento transitório. Assim, como realçado no capítulo anterior, definiu-se como objetivo desta dissertação a avaliação experimental da resposta impulsiva de aterramentos elétricos.

Para realizar tal objetivo, optou-se pela simulação experimental baseada na aplicação de ondas de corrente impulsivas de baixa intensidade, de forma e tempos típicos das ondas de corrente de descarga, em algumas configurações básicas de eletrodos de aterramentos. A simulação experimental incluiu a medição simultânea das ondas de corrente aplicadas e das ondas de elevação de potencial resultantes no aterramento.

Para se estabelecer referências de comparação com parâmetros de baixa frequência, foi também realizada a medição da resistividade do solo e resistência de aterramento para cada configuração de eletrodos.

Os próximos itens deste capítulo consideram os aspectos relativos à caracterização das ondas de corrente de descarga para geração das ondas impulsivas de corrente, o gerador desenvolvido e o circuito de teste usado em cada caso para se obter as ondas de corrente, bem como aspectos fundamentais relativos as medições em baixa frequência.

3.2 Aspectos mais Relevantes da Onda de Corrente de Descarga

Os parâmetros característicos das correntes de descargas atmosféricas são aspectos de grande importância tanto na definição de ensaios laboratoriais, que permitam avaliar o desempenho de equipamentos frente a solicitações geradas por este fenômeno, quanto na determinação de práticas de proteção adequadas aos sistemas elétricos (VISACRO, 2005b).

Os parâmetros físicos das descargas nuvem-solo podem ser considerados, agrupando-se em três tipos de descargas, que apresentam certa homogeneidade de comportamento:

- Descarga negativa com impulso único ou primeira descarga negativa: O canal de descarga conecta a base negativa da nuvem com o solo;
- Descargas negativas subsequentes ao primeiro impulso: Após o primeiro impulso, pode haver seqüência nos processos elétricos, com a ocorrência de novas descargas através do mesmo canal;
- Descarga positiva, usualmente caracterizada por um único impulso: A parte da nuvem conectada ao solo pelo canal de descarga está carregada positivamente.

As correntes de descargas constituem ondas de alta intensidade e duração reduzida, como ilustra a Figura 3.1, para uma descarga negativa descendente com

impulso único registrada na estação de medição do Morro do Cachimbo em Belo Horizonte (VISACRO, 2005b).

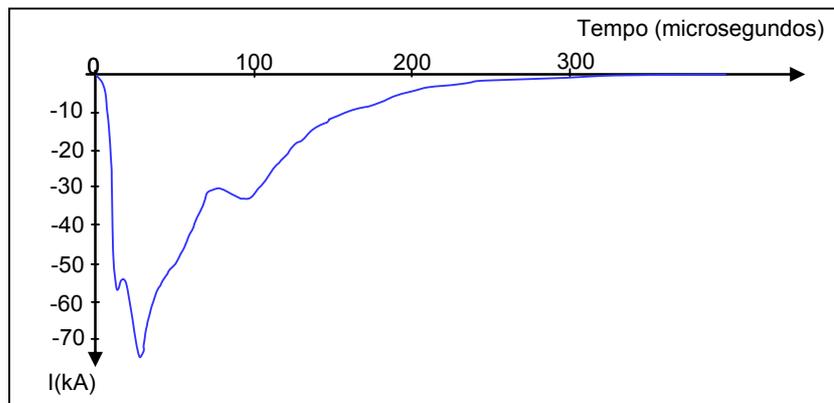


Figura 3.1 - Registro da corrente de uma descarga medida na estação do Morro do Cachimbo em Belo Horizonte (VISACRO, 2005b)

Esta figura representa o perfil típico da onda de corrente de uma primeira descarga negativa. Num tempo muito reduzido (inferior a $1 \mu\text{s}$ a alguns μs), a corrente alcança o pico de 75.000 Ampéres. A partir daí, reduz seu valor lentamente, alcançando a faixa de 1.000 Ampéres num tempo da ordem de 500 microssegundos, se anulando após alguns décimos de segundo.

3.2.1 Principais Parâmetros de Interesse da Onda de Descarga

Para caracterizar a onda de corrente, são especificados alguns parâmetros, como o valor de pico, tempo de frente e o tempo de meia onda. O valor de pico tem definição nítida e corresponde à maior amplitude da onda. Conceitualmente o tempo de frente (T_f) corresponde ao intervalo real de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do valor máximo da onda, conforme mostrado na Figura 3.2.

A dificuldade em caracterizar o tempo de frente, sobretudo devido à perda dos instantes anteriores ao disparo da medição, geralmente determinado por um limiar de amplitude de corrente, levou à padronização dos chamados T_{10} e T_{30} , ambos expressos em microssegundos (μs). Por outro lado, o tempo de meia onda

(T_c) é definido pelo intervalo de tempo compreendido entre o início da onda impulsiva e o instante em que a corrente tenha sido reduzida para 50% do valor de pico. Esse tempo é bem superior ao tempo de frente de onda e não existem dificuldades de definição do instante inicial, pois o instante inicial assumido pouco influencia no valor do parâmetro. Estes tempos são considerados a partir da referência à Figura 3.2.

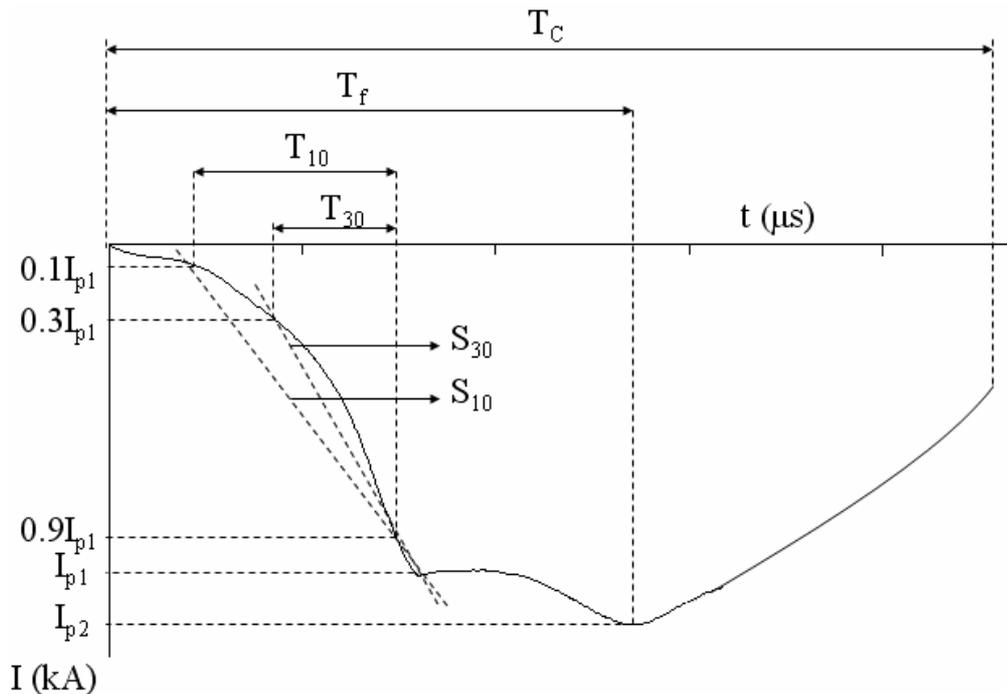


Figura 3.2 - Parâmetro de tempo da onda de descarga. Adaptado de (DE CONTI, 2006)

Sendo:

I_{p1} : Valor do primeiro pico da corrente;

I_{p2} : Valor de pico máximo da corrente;

I_{10} , I_{30} e I_{90} : valores correspondentes, respectivamente, a 10%, 30% e 90% de I_{p1} ;

T_f : Tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do valor máximo da onda;

T_{10} : Tempo para que a onda de corrente atinja I_{90} a partir de I_{10} ;

T_{30} : Tempo para que a onda de corrente atinja I_{90} a partir de I_{30} ;

S_{10} : Taxa de crescimento média da corrente entre as amplitudes de 10% e 90%

na frente de onda (em relação a I_{p1});

S_{30} : Taxa de crescimento média da corrente entre as amplitudes de 30% e 90% na frente de onda (em relação a I_{p1});

Assim, como ilustrado na Figura 3.2, um dos possíveis tempos virtuais de frente da onda de corrente pode ser calculado a partir de T_{10} , traçando uma reta imaginária unindo os valores I_{10} e I_{90} localizados sobre a curva da figura. Seu valor aproximado pode ser obtido através da relação $Td_{10}=T_{10}/0,8$. De forma similar, pode ser obtido o outro tempo de frente virtual, denominado Td_{30} . Para tal, basta considerar o traçado de uma reta imaginária passando pelos valores I_{30} e I_{90} localizados sobre a curva de corrente. O valor de Td_{30} pode ser obtido pela relação $Td_{30}=T_{30}/0,6$.

Visacro (2005b) afirma que as diferenças de tais estimativas, podem ser representativas na medida em que quantificam estágios semelhantes dos processos envolvidos no fluxo da corrente impulsiva. Também afirma que, ao adotar um desses parâmetros, é importante observar que em eventuais comparações, seja empregada a mesma referência de cálculo.

As Tabelas 3.1 e 3.2 ilustram alguns tempos virtuais coletados a partir das medições de Descarga Negativa Única e Descargas Negativas Subseqüentes realizadas no Monte de San Salvatore na Suíça e no Morro do Cachimbo em Belo Horizonte, Brasil.

Tabela 3.1 - Principais parâmetros da corrente de Descarga Negativa Única ou Primeira (VISACRO, 2005b)

Descargas Negativas		
Parâmetro	Estação de San Salvatore (Mediana 50%)	Estação do Morro do Cachimbo (Mediana 50%)
Valor de Pico: I_p (kA)	30	45
Tempo de Frente: T_f (μ s) Derivado de T_{10} / T_{30}	5,6 / 3,8	7,0/ 4,8
Tempo de Meia Onda: T_C (μ s)	75	53,5

Tabela 3.2 - Principais parâmetros da corrente de Descargas Negativas Subseqüentes (VISACRO, 2005b)

Descargas Negativas Subseqüentes		
Parâmetro	Estação de San Salvatore (Mediana 50%)	Estação do Morro do Cachimbo (Mediana 50%)
Valor de Pico: I_P (kA)	12	16
Tempo de Frente: T_f (μ s) Derivado de T_{10} / T_{30}	0,75 / 0,67	0,88 / 0,67
Tempo de Meia Onda: T_c (μ s)	32	16,4

Cabe destacar que os valores medianos de corrente, citados nas tabelas anteriores, têm sido freqüentemente utilizados para estudos relacionados aos efeitos provocados por descargas atmosféricas.

Vale comentar, ainda, que, em função das facilidades de medição, neste trabalho foi possível adotar o tempo de frente como sendo o intervalo real de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do seu valor máximo.

3.3 Gerador de Impulsos

3.3.1 Introdução

A necessidade de avaliar a resposta de equipamentos e componentes frente aos surtos de corrente e tensão associados às descargas atmosféricas, fez necessário o desenvolvimento dos “Geradores de Impulsos” para realização de testes experimentais.

Como é considerado no item 3.3.2, embora tais geradores não sejam capazes de reproduzir a forma real de uma onda de corrente de descarga atmosférica, a aplicação destes possibilita enorme facilidade prática para construir diferentes condições de ensaio.

3.3.2 Circuito do Gerador

Para reproduzir ondas impulsivas de corrente e de tensão, similares àquelas de origem atmosféricas, com aumento rápido da frente de onda e decaimento lento da cauda, são utilizados geradores de impulsos. O circuito básico da Figura 3.3 representa um tipo de gerador.

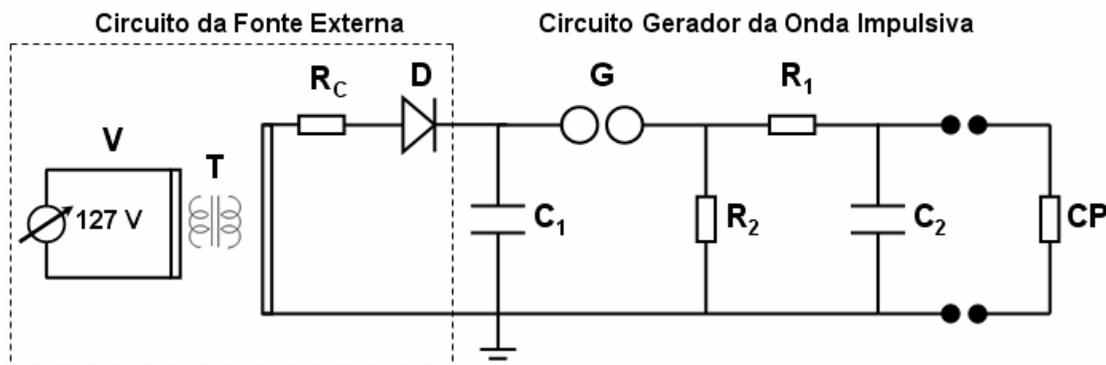


Figura 3.3 - Circuito básico do Gerador de Impulsos. Adaptado de (KUFFEL et al., 2000)

Onde:

C_1 = Capacitor de Descarga;

C_2 = Capacitor de Carga;

CP = Corpo de Prova;

D = Retificador de Meia Onda;

G = Centelhador de Excitação;

R_c = Resistor de Carga;

R_1 = Resistor de Frente;

R_2 = Resistor de Cauda;

T = Transformador Elevador;

V = Varivolt.

Verifica-se por solução analítica deste circuito básico de único estágio para geração impulsiva, que, ao ocorrer o disparo do centelhador, uma onda de tensão é aplicada sobre o corpo de prova com a forma de uma dupla exponencial, como

mostrado na Figura 3.4.

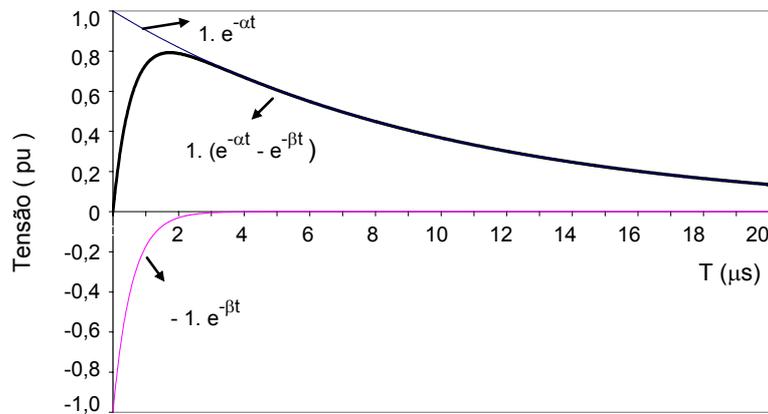


Figura 3.4 - Onda de Dupla Exponencial referida como onda de impulso atmosférico conforme o circuito gerador da Figura 3.3 (VISACRO, 2005b)

Esta onda constitui-se na soma de duas ondas exponenciais de sinais contrários e valores das constantes de tempos muito diferentes. No instante inicial, ambas as ondas têm a mesma amplitude, resultando em um valor nulo para a soma. A partir daí, enquanto a onda positiva se atenua lentamente no tempo, a onda negativa se anula muito rapidamente. A soma resultante tem o aspecto impulsivo, indicado pela linha mais espessa da Figura 3.4.

Essa forma de onda é empregada nas avaliações de desempenho de componentes de sistemas elétricos e eletrônicos frente à solicitação por surtos associados a descargas, mas é prudente realçar que essa onda não traduz absolutamente a forma de uma corrente de descarga real (VISACRO, 2005b). As principais diferenças constituem-se na ocorrência da derivada máxima no instante inicial e a mínima próxima ao pico na dupla exponencial, enquanto a onda real possui início côncavo e derivada máxima próxima ao pico.

3.3.3 Princípio de Funcionamento do Gerador de Impulsos

No circuito da fonte externa da Figura 3.3, uma fonte de tensão alternada de 127 Volts alimenta um varivolt (V), cuja saída está conectada ao primário de um

transformador elevador (T). No secundário deste (lado de alta tensão) um retificador de meia onda (D) carrega lentamente o capacitor (C_1) com uma corrente contínua, na qual sua amplitude é limitada por uma resistência de carga (R_C). À medida que a carga acumulada em C_1 vai aumentando, cresce na mesma proporção a tensão nos seus terminais, que é aplicada entre as duas esferas do espinterômetro (ou centelhador). No momento em que tal tensão ultrapassa a suportabilidade do centelhador ou Gap (G) ocorre a sua disrupção gerando uma tensão impulsiva no corpo de prova (CP). A tensão de ruptura é controlada através da distância entre as esferas do centelhador.

Os resistores R_1 , R_2 e a capacitância C_2 , são responsáveis pela conformação da onda de tensão resultante no corpo de prova. O resistor R_1 do circuito gerador controla o tempo de frente e o resistor R_2 é responsável pelo descarregamento do capacitor C_2 , basicamente determinando o tempo de meia onda (T_C). A capacitância C_1 tem valor muito superior ao da capacitância C_2 . Em C_2 estão incluídas diversas capacitâncias, as capacitâncias do corpo de prova, dos condutores de ligação à fonte, dos equipamentos de medição e, ainda, as capacitâncias necessárias para conformação do tempo de frente da onda.

Nesta análise fundamental, a indutância é desconsiderada. Na realidade, as indutâncias do circuito podem influenciar muito na forma de onda e, por isto, devem ser mantidas tão baixo quanto possível (KUFFEL et al., 2000).

Deve ser realçado ainda que, embora um gerador de impulsos, como descrito anteriormente seja com parâmetros específicos capaz de aplicar ondas de tensão com forma bem definida sobre um corpo de prova, a onda de corrente gerada depende muito da impedância da carga alimentada.

3.4 *O Gerador de Impulsos Desenvolvido*

3.4.1 *Aspectos Construtivos do Gerador*

Para realizar os testes práticos, possibilitando as injeções de corrente em campo, com formas de onda de corrente representativas de descargas subseqüentes e da primeira descarga, foi construído um gerador móvel. Este foi acomodado numa caixa de madeira de dimensões, 140 cm de comprimento, 90 cm de altura e 60 cm de largura, como mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Gerador de Impulsos móvel desenvolvido

A montagem do gerador foi a mais compacta possível e as ligações entre os componentes do circuito foram feitas com cordoalhas de cobre estanhado de seção achatada no intuito de minimizar o efeito indutivo.

Basicamente, o gerador de impulsos, mostrado na Figura 3.5 é formado por dois circuitos:

1. Circuito da Fonte de Corrente Alternada Externa:

Na entrada do circuito, um varivolt alimenta o transformador elevador. Este é responsável pelo isolamento entre o circuito de baixa tensão e alta tensão. A fonte externa é responsável pelo fornecimento de tensão contínua ao capacitor de descarga, através do resistor de carga e do retificador de meia onda. As características desses componentes do circuito são indicadas a seguir.

- Transformador (T): Tensão: 6.600 Volts, Relação de Transformação: 6.600/110 Volts;
- Resistor de carga (R_c): Constituído por um fio de níquel-cromo enrolado em placa de acrílico fina, de 150 Ω para o valor de sua resistência;
- Retificador de Meia Onda (D): Constituído por 15 diodos colocados em série. Estes são montados sobre uma régua de acrílico, sendo que cada diodo tem um resistor em paralelo, com a função de equalizar a distribuição de tensão. O diodo é do tipo: SK3/16 de 1600 Volts e 1,8 Ampéres. O resistor é de Carbono, tem resistência de 10 M Ω , 1/4 Watts de potência e tolerância de 5%.

A Figura 3.6 ilustra os componentes deste circuito externo.

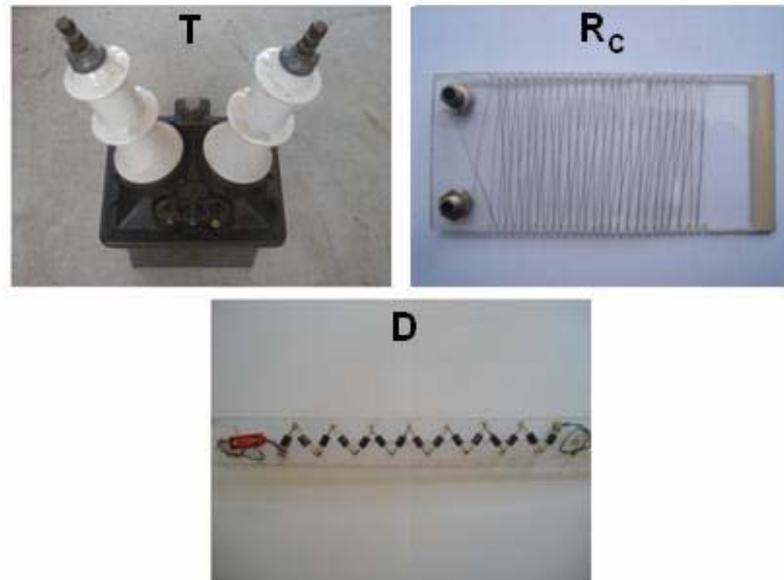


Figura 3.6 - Componentes do circuito da fonte externa

2. Circuito Gerador da Onda Impulsiva:

O circuito é composto por resistores e capacitores adequados para o nível de tensão necessária a cada tipo de aplicação. Tal circuito é responsável pela geração da onda impulsiva aplicada ao corpo de prova.

- Os resistores R_1 e R_2 mostrados na Figura 3.7, têm potência suficiente para suportar esforços elétricos e térmicos de curta duração. Foram utilizados resistores de fio de níquel-cromo enrolado sobre uma forma isolante cilíndrica. As resistências desses elementos valem: $R_1 = 150 \Omega$ e $R_2 = 47 \Omega$, e possuem uma potência 10 Watts e tolerância $\pm 10\%$.

O Capacitor de descarga, representado na figura por C_1 , é formado por dois capacitores Tipo STO 377 de $1 \mu\text{F}$ cada, conectados em paralelo e tensão contínua nominal de 15 kV. Em relação ao capacitor de carga (C_2), seu valor é definido principalmente pelo tempo de frente de onda que se deseja obter. Desta forma, três capacitores de alta tensão foram utilizados: 1,5 nF e 4,5 nF de até 10 kV e 10 nF de até 100 kV. Vale realçar, que estes valores de capacitâncias foram dimensionados

para que a corrente aplicada no corpo de prova pudesse alcançar tempo de frente rápido, intermediário e lento (de 0,4 a 5 μ s aproximadamente) em solos com três resistividades aparentes¹: (i) solo de baixa resistividade: na faixa de 73,69 a 92,50 $\Omega\cdot m$; (ii) solo de baixa resistividade: na faixa de 117,35 a 300,75 $\Omega\cdot m$; (iii) solo de alta resistividade: na faixa de 4055,50 a 6981,47 $\Omega\cdot m$. Para os solos nestas três faixas de resistividade, foram realizadas medições de resistividade utilizando um medidor convencional². Nos desenvolvimentos optou-se por considerar a resistividade aparente do solo (ρ_{calc}).

- Outro componente muito importante neste circuito é o Centelhador de Excitação (G), apresentado na Figura 3.7. Este é fixado e montado logo após o capacitor C_1 , sendo que o comando manual da distância entre as esferas varia o intervalo disruptivo e, por conseqüência, a amplitude da tensão de impulso que se deseja obter.

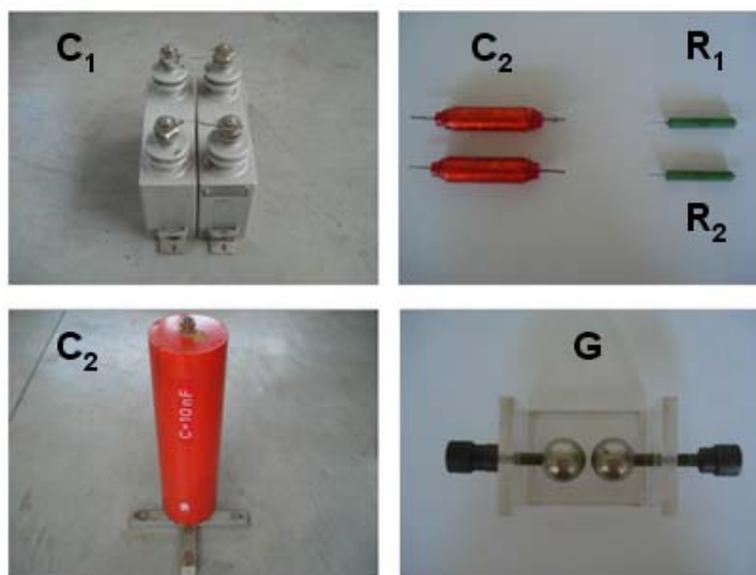


Figura 3.7 - Componentes do circuito gerador de onda impulsiva

¹ Encontrada utilizando um programa computacional que calcula a resistividade aparente do solo a partir da resistência medida em baixa frequência.

² Medidor detalhado adiante no item 3.8.

3.5 Circuito para Medição de Onda Impulsiva

A Figura 3.8 mostra o circuito básico de teste para medição das ondas impulsivas de corrente e tensão, incluindo o gerador de impulsos de alta tensão (GI) citado no item 3.3. O gerador foi posicionado sempre próximo à extremidade do eletrodo em teste (ET). O outro terminal do gerador foi conectado a uma malha de aterramento auxiliar (Ma) através de um longo condutor (C_m), sendo o circuito fechado pelo solo. Vale realçar que o eletrodo e a malha são os únicos pontos de contato que o gerador tem com o solo.

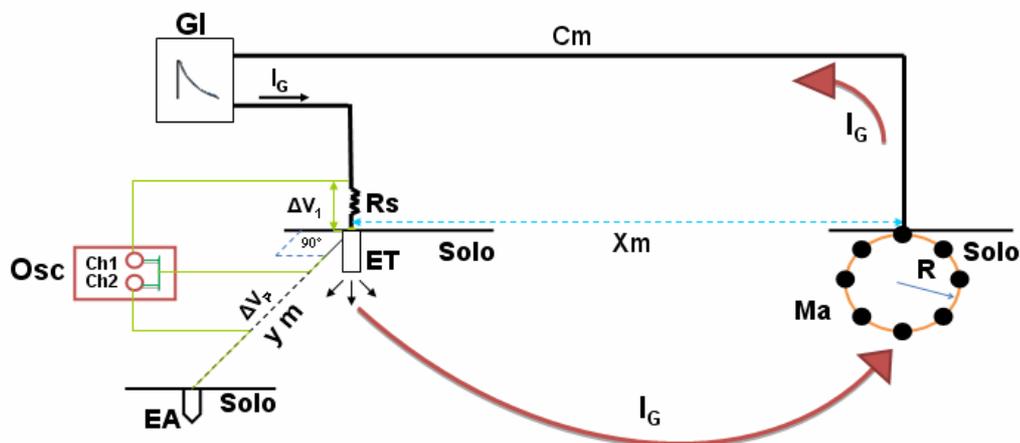


Figura 3.8 - Vista do circuito e do sistema de medição de onda impulsiva

A malha de aterramento auxiliar é constituída por oito hastes de comprimento igual a 1,50 m cada, cujo diâmetro é de 1,43 cm. Estas foram cravadas no solo constituindo um círculo de 1,50 m de raio (R), igualmente espaçadas e interconectadas com cabos de cobre isolados de seção 2,50 mm², buscando-se ter um aterramento de baixo valor de impedância. A malha fica a uma distância (X_m) bem superior a dimensão linear do eletrodo em teste. Foram observadas distâncias não inferiores a 40 m para eletrodos curtos de 3 m e a 60 m no caso de eletrodos longos de 6, 12 e 18 m, para evitar as interferências associadas ao acoplamento mútuo entre as regiões do aterramento do eletrodo sob teste e da malha auxiliar.

O cabo utilizado para aplicar corrente no eletrodo de teste, o cabo de retorno

da malha de aterramento para o gerador de impulsos, e o cabo conectado ortogonalmente na haste de potencial (EA) para se determinar a elevação de potencial, são cabos de cobre isolados com seção de 2,50 mm².

3.5.1 Funcionamento do Sistema de Medição

Para a realização das medições simultâneas, foram utilizados os dois canais do osciloscópio. Desta forma, quando acontece o disparo do impulso proveniente do gerador, estabelece-se uma tensão entre o eletrodo sob teste e a malha de aterramento auxiliar, como ilustra a Figura 3.8, que impõe o fluxo de uma corrente I_G entre o eletrodo e a malha auxiliar.

No circuito de corrente há um resistor (R_s), no qual se efetua a amostragem de corrente. Este está inserido em série no circuito e próximo ao eletrodo de teste. Após tal disparo proveniente do gerador, pode-se determinar a queda de tensão (ΔV_1) neste resistor de valor conhecido (2,2 Ω), encontrando-se assim a corrente que flui para o solo. Tal resistor é de filme de carbono e com tolerância de $\pm 5\%$.

Por outro lado, no circuito de tensão, onde se obtém a onda relativa à elevação de potencial no solo (ΔV_P), utiliza-se uma haste de 20 cm de comprimento e diâmetro igual 1,43 cm, que é cravada ortogonalmente na região do patamar de potencial. Nesta região, o potencial gerado pela corrente que escoar para o solo através do aterramento é desprezível e, teoricamente, pode-se dizer que esta região tem o mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado.

3.6 Circuito de Teste e Sistema de Medição de Onda Impulsiva

3.6.1 Configurações de Eletrodos Implementados

Para um solo definido, é basicamente a configuração dos eletrodos que determina a impedância de aterramento. Como esta impedância influencia na forma

de onda gerada, é preciso atuar na característica do gerador e do circuito de teste para se conseguir gerar ondas representativas das correntes de descargas.

No trabalho buscou-se gerar ondas de correntes impulsivas de tempo de frente com valores aproximados da ordem de 0,4 μs , 1,5 μs e 5 μs , para representar correntes de descargas correspondentes respectivamente a uma onda subsequente rápida e ondas de primeira descarga rápida e típica.

As configurações dos eletrodos de teste utilizados nas medições em solos com baixa e alta resistividades, são indicadas na Tabela 3.3. É oportuno destacar que os eletrodos verticais foram totalmente cravados no solo e os eletrodos horizontais enterrados a uma profundidade de 50 cm.

Tabela 3.3 - Configurações dos eletrodos de teste

Faixas de Valores de Resistividade Aparente ($\Omega\cdot\text{m}$)	Eletrodo Vertical		Eletrodo Horizontal	
	Comprimento (m)	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	Diâmetro (cm)
73,69 a 92,50 $\Omega\cdot\text{m}$	-	-	3,00	1,38
			6,00	1,38
			12,00	1,38
			18,00	1,38
117,35 a 300,75 $\Omega\cdot\text{m}$	3,00	1,43	3,00	1,43
			12,00	1,38
			18,00	1,38
4055,5 a 6981,47 $\Omega\cdot\text{m}$	3,00	1,43	3,00	1,43
			6,00	1,38
			12,00	1,38

3.6.2 Sistema de Medição

Utilizou-se para medição das ondas de corrente e tensão o osciloscópio da Figura 3.9. Este era alimentado por bateria, no intuito de se evitar qualquer acoplamento com o solo ou com o sistema de alimentação de energia.



Figura 3.9 - Osciloscópio utilizado nas medições em campo

O osciloscópio possui dois canais separados de entrada que têm a mesma referência para medição de tensão. Um dos canais foi utilizado para detecção da elevação de potencial no solo e o outro foi usado para medição de corrente, através da detecção da queda de potencial que esta promove num resistor de valor de resistência conhecido e bem definido.

As especificações deste equipamento são: marca Tektronix, modelo TDS 3012 com 100 MHz e 1,25 Giga Amostras/segundo. A quantidade de pontos amostrada pode variar de 500 até 10.000 pontos, sendo o último utilizado neste trabalho. Este dispositivo dispõe também de recursos variados para exibição, manipulação e armazenamento em unidade de disco (*drive*) dos dados medidos.

Outro equipamento utilizado para realização das medições são as duas pontas de prova idênticas, que eram conectadas nos dois canais do osciloscópio. Estas são da marca Tektronix, modelo P1001S com atenuação de 1X ou 10X, sendo ajustadas conforme o valor da frequência máxima característica do sinal e amplitude envolvida. Os valores de resistência, capacitância e tensão de entrada destas são, respectivamente, de 10 M Ω , 15 pF e 600 Vcc, para uma escala de 10X.

3.7 Cuidados para Obtenção de Ondas de Corrente com os Tempos de Frente Definidos

Com o objetivo de obter ondas de corrente com diferentes tempos de frente nas condições similares às das correntes de descargas, foi necessário realizar alguns ajustes específicos no circuito básico para medição de onda impulsiva, apresentado na Figura 3.8. Desta forma, nas avaliações realizadas para cada configuração de eletrodo, foram alcançados os valores de tempo de frente que podem ser considerados representativos para uma descarga subsequente rápida (aqui designado “rápido”), para uma primeira descarga rápida (aqui designado “intermediário”) e para uma típica primeira descarga (aqui designado “lento”). A Tabela 3.4 apresenta os tempos de frente associados aos diferentes tipos de ondas de corrente injetadas em cada eletrodo de teste estudado, nos seus respectivos solos, com o valor resistividade aparente.

Tabela 3.4 - Tempo de frente das ondas de corrente (rápido, intermediário e lento)

Faixa de Valores de Resistividade Aparente	Eletrodos de Teste	Tempo de Frente da Corrente (μs)		
		Rápido	Intermediário	Lento
Baixa Resistividade 73,69 a 92,50 $\Omega\cdot\text{m}$	Horizontal 3 m	0,65	2,50	5,50
	Horizontal 6 m	1,00	2,40	5,10
	Horizontal 12 m	0,60	1,20	4,50
	Horizontal 18 m	0,60	1,20	3,50
Baixa Resistividade 117,35 a 300,75 $\Omega\cdot\text{m}$	Vertical 3 m	0,40	1,30	4,00
	Horizontal 3 m	0,40	1,30	4,00
	Horizontal 12 m	0,50	1,20	3,00
	Horizontal 18 m	0,70	1,20	3,00
Alta Resistividade 4055,5 a 6981,47 $\Omega\cdot\text{m}$	Vertical 3 m	0,50	1,40	2,50
	Horizontal 3 m	0,50	1,00	2,50
	Horizontal 6 m	0,50	1,30	2,70
	Horizontal 12 m	0,50	1,80	2,50

Conforme destacado no item 3.2, os valores de tempos de frente das ondas de corrente foram determinados considerando o intervalo real de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do seu valor máximo.

3.7.1 Ondas de Corrente com Tempo de Frente Rápido

Para obter o tempo de frente rápido das ondas de corrente em solos de baixa e alta resistividades, indicados na Tabela 3.4, foi necessário acrescentar resistores no circuito básico de medição, próximo ao eletrodo de teste (R_e) e na saída da malha de aterramento (R_m), como indicado na Figura 3.10. Tais resistores têm como objetivo conformar o tempo de frente das ondas de corrente. Para X_m , distância entre o eletrodo de teste e a malha de aterramento, os valores utilizados foram de 40 m para os eletrodos de 3 m e para os demais eletrodos, 60 m. Em relação ao condutor C_m , que conecta o gerador a malha de aterramento, seu comprimento varia a cada configuração de eletrodo utilizado, sendo de 45 m para eletrodos de 3 m de comprimento e de 90 m para eletrodos de 6, 12 ou 18 m de comprimento. Tal variação implica em modificações na indutância do circuito de medição. Apesar disso, foi possível gerar ondas de corrente com tempo de frente rápido nas duas condições de C_m , adotando-se para R_e e R_m resistores de $300\ \Omega$. Estes resistores são constituídos por um fio enrolado sobre uma forma isolante, possuindo uma potência de 10 Watts e tolerância $\pm 10\%$.

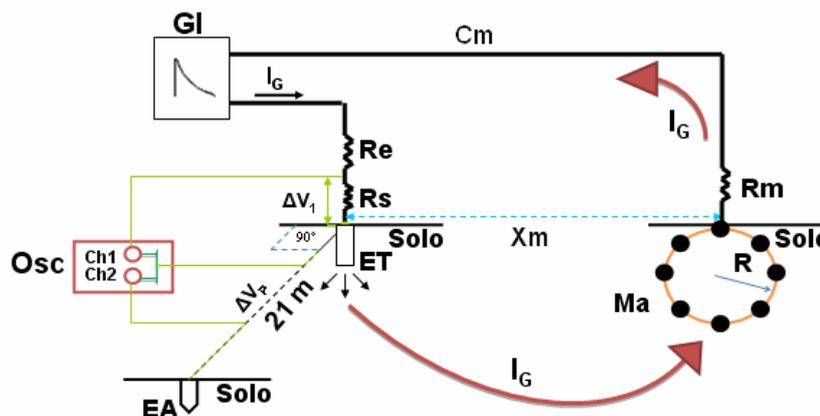


Figura 3.10 - Vista do circuito e do sistema de medição para obtenção do tempo de frente rápido em solos de baixa e alta resistividades

3.7.2 Ondas de Corrente com Tempo de Frente Intermediário

Nos itens (I), (II) e (III) são indicados os valores dos parâmetros adotados para se alcançar o tempo de frente intermediário para cada configuração de

eletrodo.

I - Eletrodos Vertical e Horizontal de 3 m de comprimento para o solo de baixa resistividade: Considerando a Figura 3.8, o comprimento adotado para o condutor C_m foi de 45 m e o valor de X_m , 40 m.

II - Eletrodos Horizontais de 6, 12 e 18 m de comprimento para o solo de baixa resistividade: Considerando a Figura 3.10, o comprimento de C_m foi de 90 m e o valor de X_m , 60 m. Os valores de R_e e R_m foram de 600Ω .

III - Eletrodos Horizontais de 3, 6 e 12 m e Vertical de 3 m de comprimento para o solo de alta resistividade: Conforme a Figura 3.11, os valores de C_m utilizados foram de 70 m para eletrodos de 3 m de comprimento e de 90 m para eletrodos de 6 ou 12 m de comprimento. Os valores de X_m foram de 40 m para os eletrodos de 3 m e para os demais eletrodos, 60 m. O valor de R_e , 300Ω .

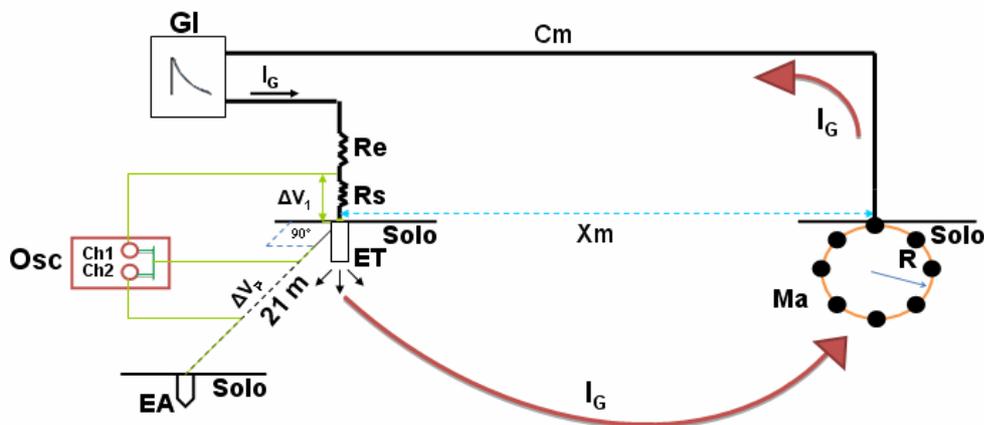


Figura 3.11 - Vista do circuito e do sistema de medição para obtenção do tempo de frente intermediário em solo de alta resistividade

3.7.3 Ondas de Corrente com Tempo de Frente Lento

Por fim, nos itens (I), (II) e (III) são mostrados os valores dos parâmetros adotados para se obter as ondas de corrente com tempo de frente lento para cada

configuração de eletrodo.

I - Eletrodos Vertical e Horizontal de 3 m de comprimento para o solo de baixa resistividade: De acordo com a Figura 3.8, o valor de C_m foi de 70 m e o de X_m , 40 m.

II - Eletrodos Horizontais de 6, 12 e 18 m de comprimento para o solo de baixa resistividade: No circuito da Figura 3.12 é incluída uma bobina L_g com indutância aproximada de $22 \mu\text{H}$ no caminho de retorno da corrente, próxima ao gerador de impulsos. Tal bobina é formada por um cabo de cobre isolado e enrolado sobre um cilindro, constituindo um indutor. Os valores de R_e e R_m são de 600Ω . Para C_m , 90 m e para X_m , 60 m.

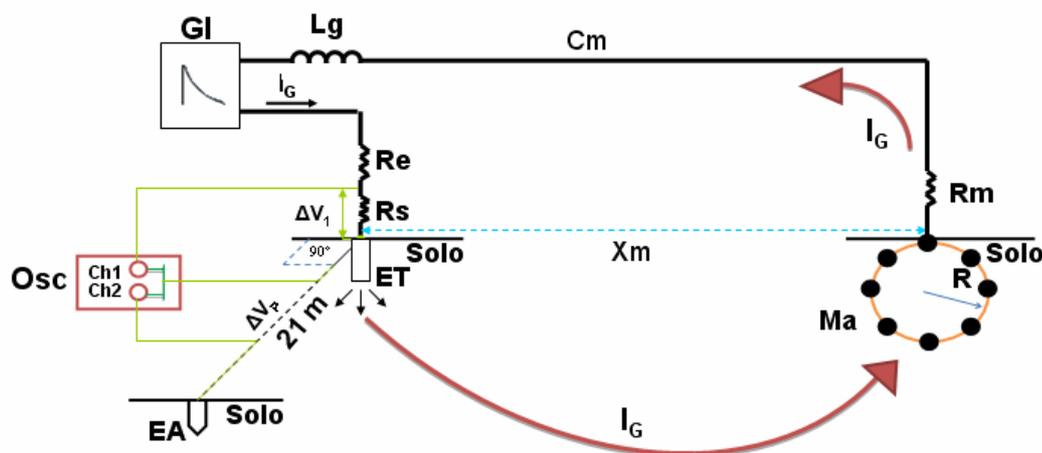


Figura 3.12 - Vista do circuito e do sistema de medição para obtenção do tempo de frente lento para eletrodos horizontais de 6, 12 e 18 m em solo de baixa resistividade

III - Eletrodos Horizontais de 3, 6 e 12 m e Vertical de 3 m de comprimento para o solo de alta resistividade: Considerando o circuito da Figura 3.12, os valores de C_m utilizados foram de 70 m para eletrodos de 3 m de comprimento e de 90 m para eletrodos de 6 ou 12 m de comprimento. Quanto ao parâmetro X_m , o valor foi de 40 m para os eletrodos de 3 m e para os demais eletrodos, 60 m. Para R_e e R_m , os valores foram de 600Ω e para L_g , $22 \mu\text{H}$.

3.8 *Métodos de Medição de Resistência de Aterramento e de Resistividade do Solo*

No presente trabalho, os métodos de *Queda da Potencial* e de *Frank Wenner* foram utilizados para realizar respectivamente as medições de resistência de aterramento e resistividade do solo (VISACRO, 2005a).

Para a aplicação destes métodos, utilizou-se um instrumento eletrônico modelo TDM 2 kW da Megabrás de quatro terminais, alimentado por baterias conforme a Figura 3.13. O aparelho, através de sua fonte interna, faz circular uma corrente elétrica “I” entre os pontos conectados aos terminais de corrente C1 e C2. Os terminais P1 e P2 são conectados aos dois pontos entre os quais se deseja detectar a diferença de potencial causada pelo fluxo da corrente. O aparelho processa internamente e indica na leitura, o valor da resistência elétrica, dada pela relação entre a tensão detectada e a corrente aplicada.



Figura 3.13 – Instrumento para medição de resistência de aterramento

3.8.1 *Método da Queda de Potencial*

Este método é baseado na montagem mostrada na Figura 3.14. Ao estabelecer uma tensão entre o sistema de aterramento (X) e o eletrodo de corrente (C), cravado no solo a uma distância do aterramento bem maior que as dimensões lineares do

sistema, resulta no fluxo de uma corrente I_{XC} entre os eletrodos. Esta provoca uma queda de potencial no solo e parte desta queda é detectada pelo voltímetro através da haste potencial (P), cravada no solo entre os eletrodos de aterramento e corrente, e em linha com os mesmos. Desta forma, pelo deslocamento do eletrodo de potencial entre X e C, obtém-se a cada ponto a indicação no voltímetro, encontrando-se assim o perfil de potencial (P) entre os dois eletrodos, como mostrado na Figura 3.15 (a). A razão entre este potencial e a corrente que flui no aterramento, obtém-se um valor de resistência de aterramento. Como a corrente que flui no aterramento tem valor constante, percebe-se na curva da Figura 3.15 (b) que a resistência medida (R_T) em função da distância tem exatamente a mesma forma do perfil de potencial, pois foi construída ponto a ponto a partir da divisão do potencial pela intensidade de corrente.

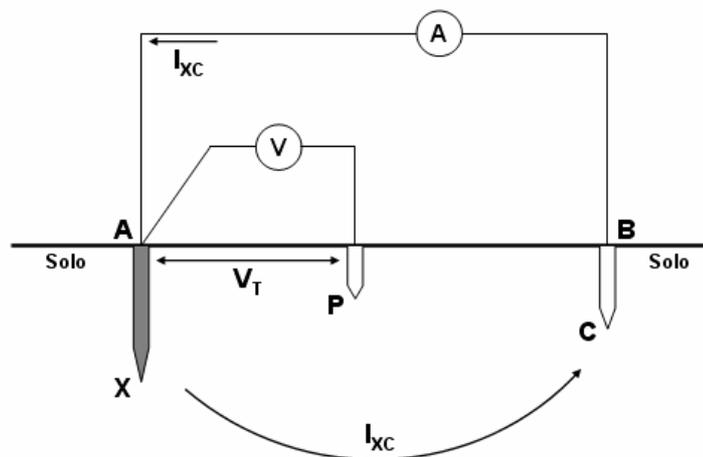


Figura 3.14 – Montagem para implementação da medição pelo método de Queda de Potencial (VISACRO, 2005a)

Assim, pode-se identificar na curva da Figura 3.15 (b) o valor da resistência de aterramento como a resistência correspondente à região do patamar de potencial, onde a queda de tensão é desprezível. Em termos práticos, pode-se dizer que localiza-se neste patamar o “terra remoto”, ponto ao qual se atribui potencial zero e que está infinitamente afastado do aterramento (VISACRO, 2005a).

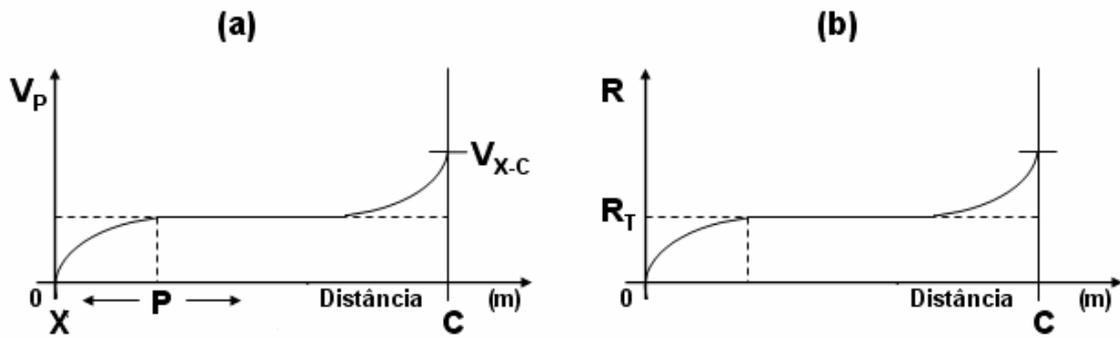


Figura 3.15 - Perfil de potencial e sua relação com a corrente em função da distância (VISACRO, 2005a)

3.8.2 Método de Frank Wenner

Na implementação deste método, utilizou-se a configuração dos quatro eletrodos alinhados e equidistantes entre si, conforme apresentado na Figura 3.16.

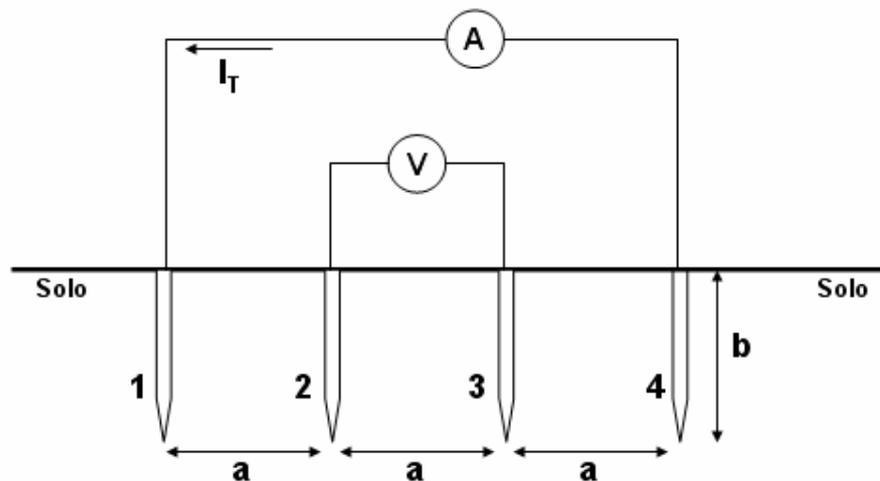


Figura 3.16 - Configuração dos eletrodos pelo método de Frank Wenner (VISACRO, 2005a)

O princípio deste método baseia-se na injeção de corrente no solo através dos eletrodos externos de corrente (1 e 4) e na medição da tensão entre os eletrodos internos de tensão (2 e 3). A razão entre essas duas grandezas corresponde à resistência do solo (R), associada à distância (a) entre eletrodos.

Dessa forma, a partir dos valores de (R) obtidos para diferentes espaçamentos entre eletrodos (a) e considerando as dimensões geométricas (K) envolvidas na

medição, pode-se determinar a resistividade do solo (ρ) através da Equação 3.1:

$$\rho = K \cdot R \quad (3.1)$$

O valor da constante K depende da geometria utilizada nas medições. Sendo a o espaçamento entre as hastes, b a profundidade das mesmas e R a resistência medida entre os eletrodos internos (2 e 3), tem-se:

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.2)$$

Desta forma, o produto entre o valor R , medido pela aplicação do método para cada espaçamento, e o fator geométrico K , corresponde à resistividade de um dado solo.

3.9 Considerações Finais

Este capítulo procurou abordar de forma clara e objetiva o gerador de impulsos desenvolvido e os circuitos de teste implementados para se obter as ondas de corrente. Nos capítulos subseqüentes, são apresentados os resultados obtidos bem como suas análises.

4 Resultados das Medições

4.1 *Considerações Preliminares*

Os ensaios práticos descritos no item 3.7 do Capítulo 3, foram realizados exaustivamente seguindo metodologias previamente definidas com o objetivo de minimizar os erros e conferir maior confiabilidade aos resultados.

Os resultados das medições correspondem às respostas dos eletrodos de teste indicados na Tabela 3.3, enterrados em solos de baixa e alta resistividades, para injeção de ondas de corrente com tempo de frente rápido, intermediário e lento.

Nos itens 4.2 e 4.4 são apresentados os resultados com as ondas completas de corrente e tensão numa janela de tempo de 400 microssegundos. Também são indicados em anexo às figuras, os valores dos seguintes parâmetros para cada medição:

- Tempo de frente da onda de corrente, T_f – Tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do seu valor máximo;

- Tempo de cauda da onda de corrente, T_c - Tempo compreendido entre o início da onda impulsiva e o instante em que a corrente tenha sido reduzida para 50% do valor de pico encontrado;
- Resistência de aterramento medida, R_{med} - Em cada caso, foi também efetuado a medição do perfil de resistividade em função do espaçamento entre hastes (método de *Frank Wenner*), utilizando-se nos dois casos o instrumento da Megabrás que emprega sinais em baixa frequência. Verificou-se que, em geral, a variação dos valores de resistividade com o espaçamento era reduzida, sendo possível modelar o solo por uma única camada, calculando-se assim, os valores médios de resistividade do solo, ρ_{med} . Como, em alguns casos, o valor médio apresentava diferença significativa em relação ao valor da resistividade aparente, calculada a partir da resistência medida R_{calc} , optou-se por adotar este último valor, julgado de maior confiabilidade;
- Resistência de aterramento calculada, R_{calc} - Determinado através do quociente entre os valores instantâneos na cauda das ondas impulsivas, numa faixa compreendida de tempo entre 50 a 100 μs ;
- Resistividade aparente do solo, ρ_{calc} - Encontrado a partir de um programa computacional desenvolvido no LRC³, baseado na aproximação potencial constante, para cálculo da resistência de uma dada configuração de aterramento. Considerando os parâmetros geométricos da configuração, calcula-se a resistência de aterramento do eletrodo R_1 , assumindo-se que o solo seja uniforme e com valor de resistividade unitário. Desta forma, considerando-se a linearidade entre a resistividade e a resistência, obtém-se a resistividade aparente da relação mostrada na Equação 4.1.

³ LRC - Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Descargas Atmosféricas (resultado da parceria UFMG_CEMIG).

$$\rho_{calc} = \frac{R_{med}}{R_1 (\rho=1 \Omega \cdot m)} \quad (4.1)$$

Nos itens 4.3 e 4.5, são apresentadas ondas de corrente e tensão similares aos itens 4.2 e 4.4, porém, com duas escalas de tempo bem reduzidas para cada configuração de eletrodo, indicando somente os primeiros microssegundos. Desta forma, tem-se uma melhor visualização da frente de onda e da defasagem entre as ondas de tensão e corrente.

Nessas condições, os valores máximos desenvolvidos de tensão ($V_{m\acute{a}x}$) e corrente ($I_{m\acute{a}x}$) são indicados nas figuras. Também são indicados o valor da impedância impulsiva (Z_P), obtido pela relação $V_{m\acute{a}x}/I_{m\acute{a}x}$, e os tempos de frente das ondas de tensão $T_f(V)$ e de corrente $T_f(I)$.

Cabe destacar ainda, que cada figura apresenta três ondas de corrente e tensão com seus respectivos parâmetros em anexo ($T_f(V)$, $T_f(I)$, $V_{m\acute{a}x}$, $I_{m\acute{a}x}$ e Z_P), e que a seqüência nos valores destes parâmetros correspondem, respectivamente, às ondas rápida, intermediária e lenta para cada eletrodo de teste utilizado.

4.2 Apresentação dos Resultados com Ondas Completas para Solos de Baixa Resistividade

As figuras a seguir, mostram os resultados e alguns parâmetros das medições em solos de baixa resistividade para ondas de corrente impulsivas com três valores de tempos de frente diferentes, injetadas nos eletrodos de teste. Mostram, também, a elevação de potencial desenvolvida em relação ao terra remoto, ponto no qual se considera ter alcançado o mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado.

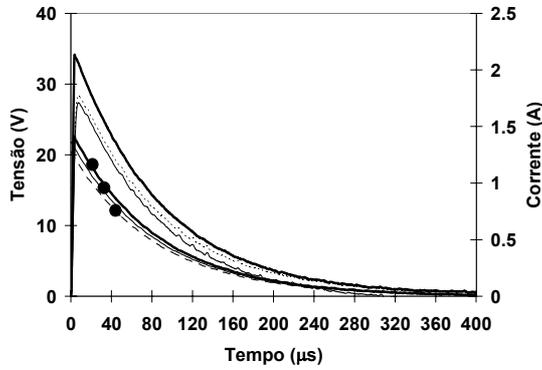
• **Eletrodos Horizontais de 3 e 6 metros:**

$T_f(I) = 0,65/2,5/5,5 \mu s$
 $R_{med} = 26,53 \Omega$

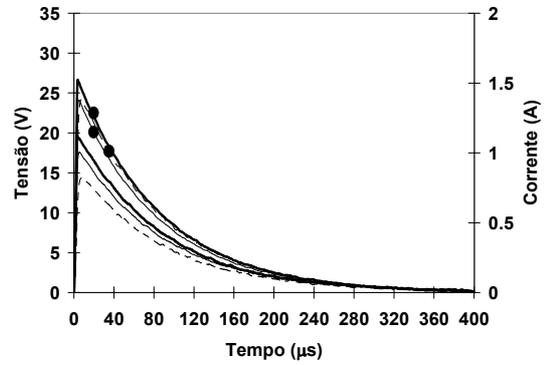
$T_c = 81 \mu s$
 $R_{calc} = 25,52 \Omega$
 $\rho_{calc} = 73,69 \Omega \cdot m$

$T_f(I) = 1,0/2,4/5,1 \mu s$
 $R_{med} = 15,53 \Omega$

$T_c = 78 \mu s$
 $R_{calc} = 13,4 \Omega$
 $\rho_{calc} = 73,95 \Omega \cdot m$



Horizontal 3 metros



Horizontal 6 metros

Figura 4.1 – Resultados para eletrodos horizontais de 3 e 6 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

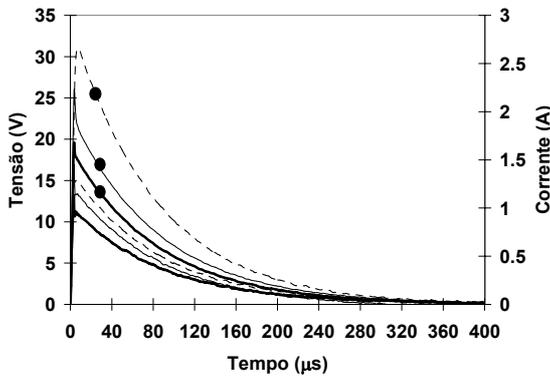
• **Eletrodos Horizontais de 12 e 18 metros:**

$T_f(I) = 0,6/1,2/4,5 \mu s$
 $R_{med} = 8,67 \Omega$

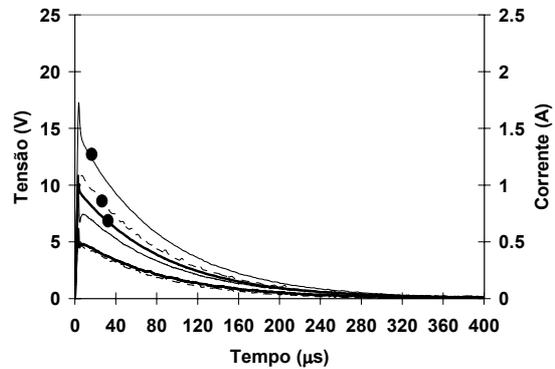
$T_c = 79 \mu s$
 $R_{calc} = 7,23 \Omega$
 $\rho_{calc} = 72,25 \Omega \cdot m$

$T_f(I) = 0,6/1,2/3,5 \mu s$
 $R_{med} = 7,40 \Omega$

$T_c = 75 \mu s$
 $R_{calc} = 4,96 \Omega$
 $\rho_{calc} = 92,50 \Omega \cdot m$



Horizontal 12 metros



Horizontal 18 metros

Figura 4.2 – Resultados para eletrodos horizontais de 12 e 18 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

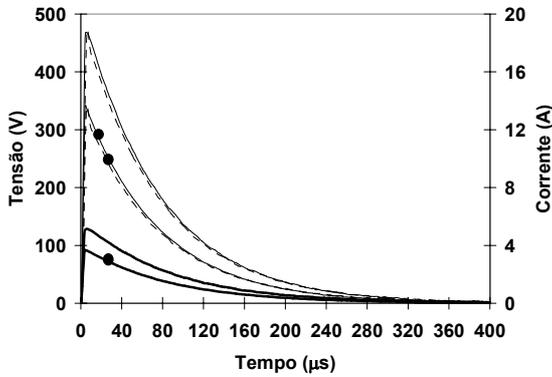
• **Eletrodos Vertical e Horizontal de 3 metros:**

$T_f(I) = 0,4/1,3/4,0 \mu s$
 $R_{med} = 39,9 \Omega$

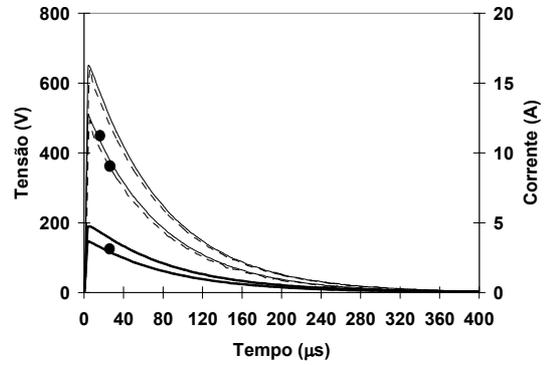
$T_c = 65 \mu s$
 $R_{calc} = 36,17 \Omega$
 $\rho_{calc} = 117,35 \Omega \cdot m$

$T_f(I) = 0,4/1,3/4,0 \mu s$
 $R_{med} = 63,5 \Omega$

$T_c = 68 \mu s$
 $R_{calc} = 53,54 \Omega$
 $\rho_{calc} = 176,38 \Omega \cdot m$



Vertical 3 metros



Horizontal 3 metros

Figura 4.3 – Resultados para eletrodos vertical e horizontal de 3 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

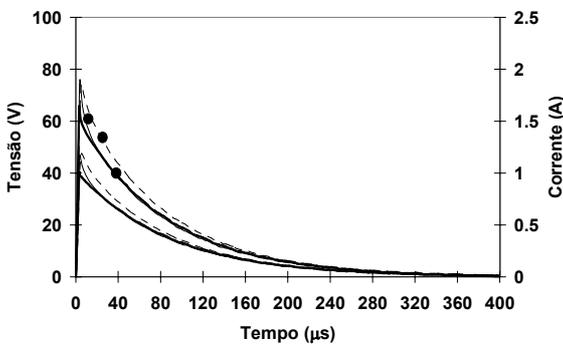
• **Eletrodos Horizontais de 12 e 18 metros:**

$T_f(I) = 0,5/1,2/3,0 \mu s$
 $R_{med} = 29,9 \Omega$

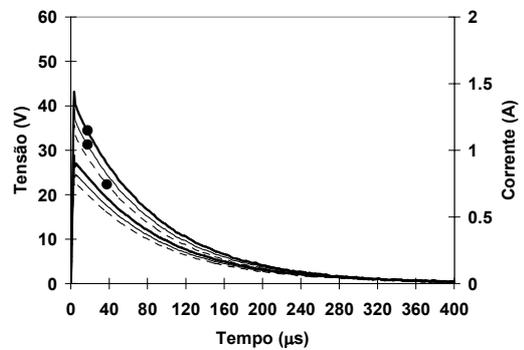
$T_c = 59 \mu s$
 $R_{calc} = 26,48 \Omega$
 $\rho_{calc} = 249,16 \Omega \cdot m$

$T_f(I) = 0,7/1,2/3,0 \mu s$
 $R_{med} = 24,06 \Omega$

$T_c = 55 \mu s$
 $R_{calc} = 21,45 \Omega$
 $\rho_{calc} = 300,75 \Omega \cdot m$



Horizontal 12 metros



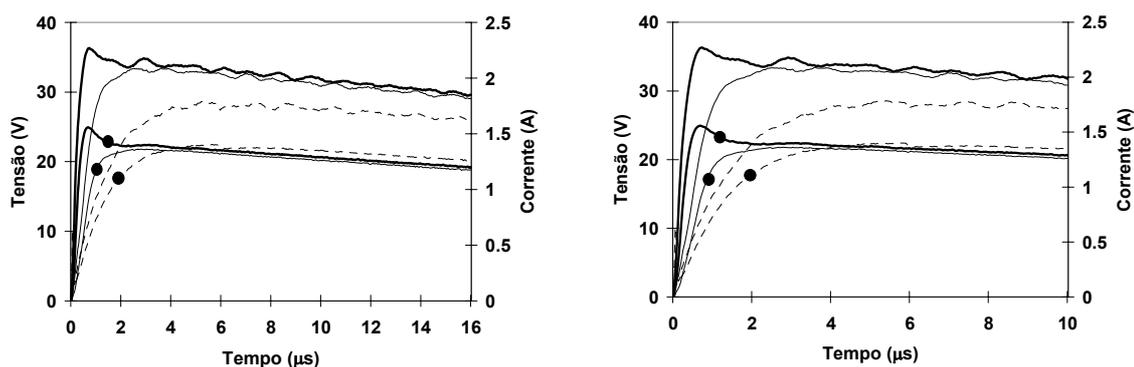
Horizontal 18 metros

Figura 4.4 – Resultados para eletrodos horizontais de 12 e 18 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

4.3 Detalhe das Ondas em Escala de Tempo Reduzida para Solos de Baixa Resistividade

As três ondas de corrente e tensão apresentadas nas figuras adiante são similares às apresentadas no item 4.2, porém, são mostrados em duas escalas de tempo bem reduzidas.

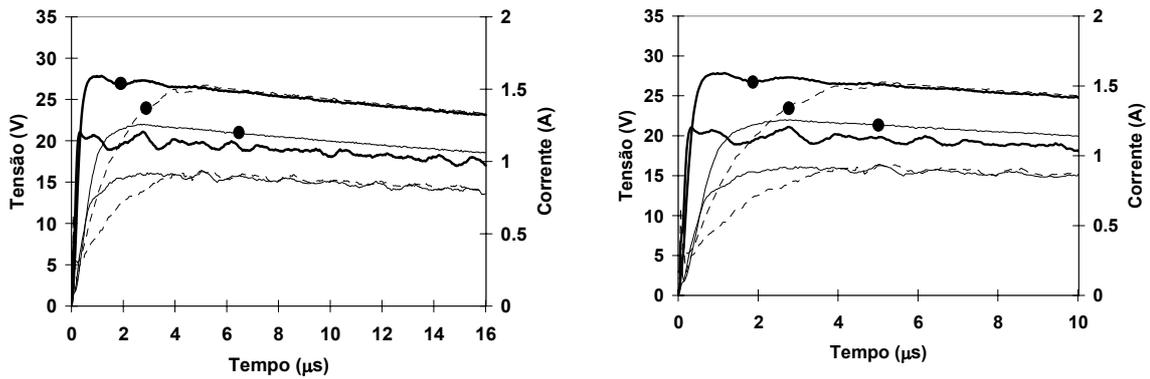
- **Eletrodo Horizontal de 3 metros para resistividade aparente de 73,69 $\Omega \cdot m$:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_p (Ω)	R_{med} (Ω)
0,65	0,70	36,3	1,56	23,26	26,53
2,50	2,50	33,5	1,36	24,62	
5,5	5,5	28,6	1,40	20,42	

Figura 4.5 – Resultados para eletrodo horizontal de 3 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

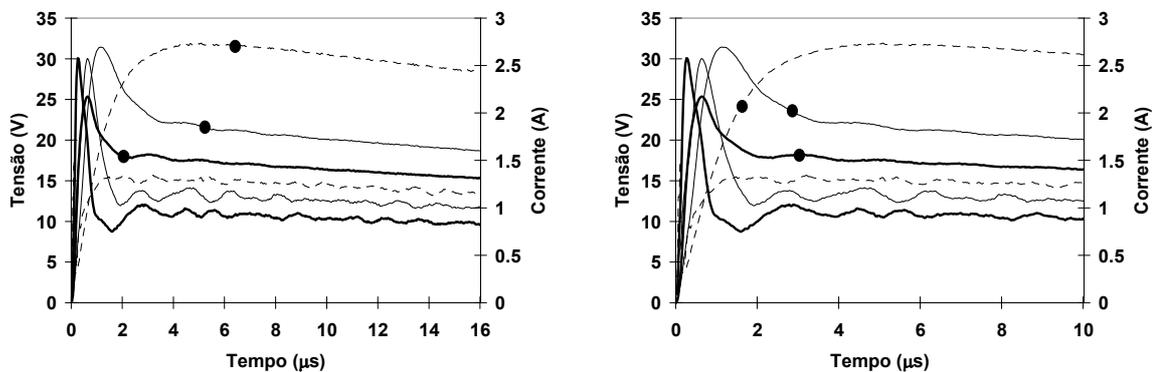
• **Eletrodo Horizontal de 6 metros para resistividade aparente de 73,95 Ω·m:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
1,0	0,35	21,1	1,59	13,27	15,53
2,4	2,7	16,4	1,26	13,01	
5,1	5,5	16,4	1,53	10,71	

Figura 4.6 - Resultados para eletrodo horizontal de 6 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

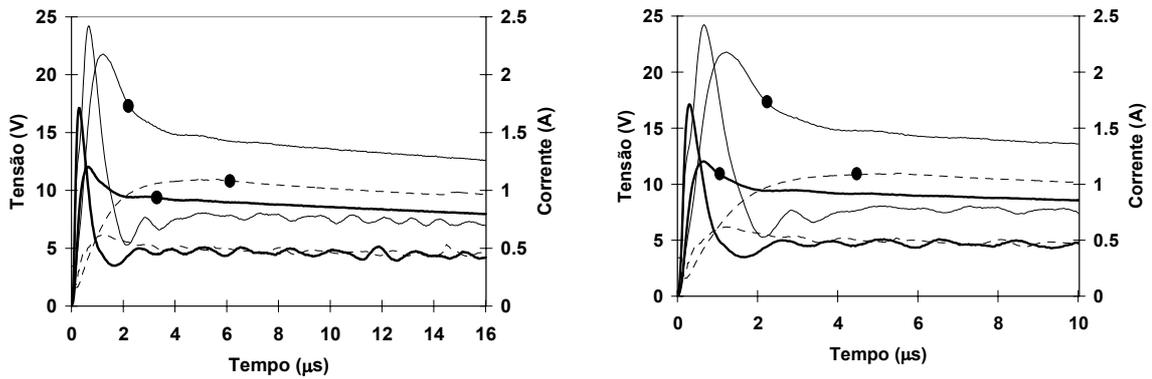
• **Eletrodo Horizontal de 12 metros para resistividade aparente de 72,25 Ω·m:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,6	0,25	30,1	2,17	13,87	8,67
1,2	0,65	30,0	2,70	11,11	
4,5	1,3	17,5	2,74	6,38	

Figura 4.7 - Resultados para eletrodo horizontal de 12 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

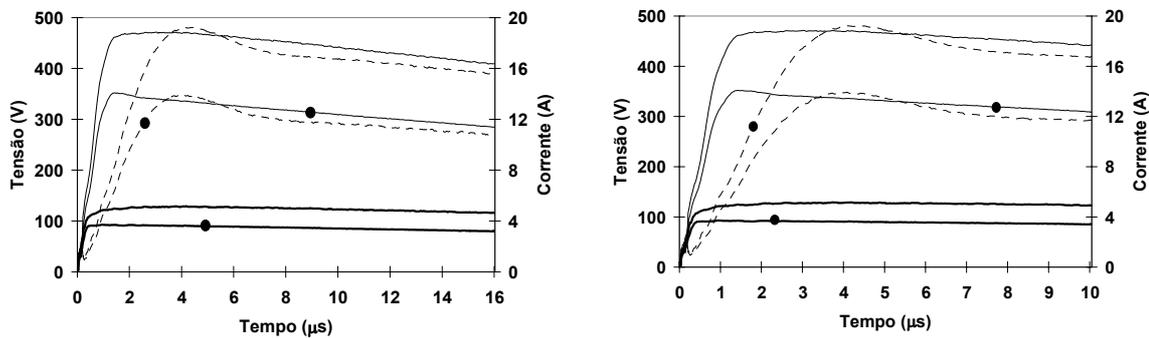
• **Eletrodo Horizontal de 18 metros para resistividade aparente de 92,50 Ω·m:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,6	0,3	17,1	1,20	14,25	7,40
1,2	0,7	24,2	2,18	11,10	
3,5	1,2	10,2	1,10	5,62	

Figura 4.8 – Resultados para eletrodo horizontal de 18 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

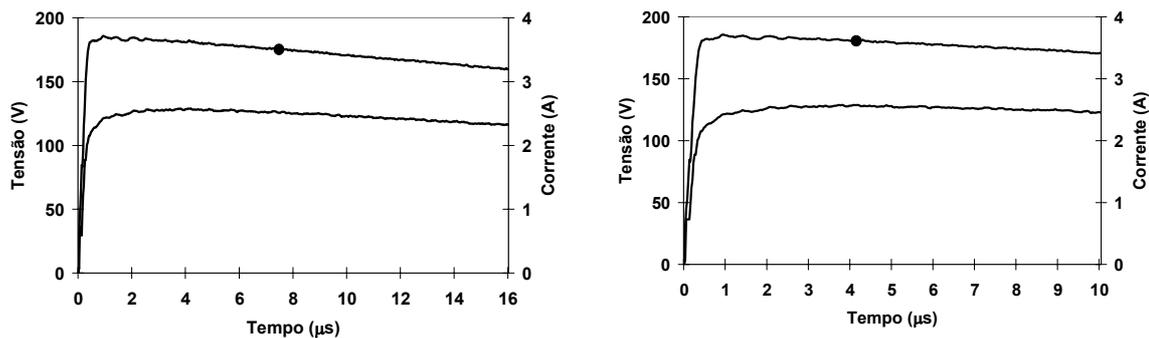
• **Eletrodo Vertical de 3 metros para resistividade aparente de 117,35 Ω·m:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,4	0,45	129	3,7	34,6	39,9
1,3	1,4	481	14,1	34,1	
4,0	4,0	481	13,9	34,6	

Figura 4.9 – Resultados para eletrodo vertical de 3 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

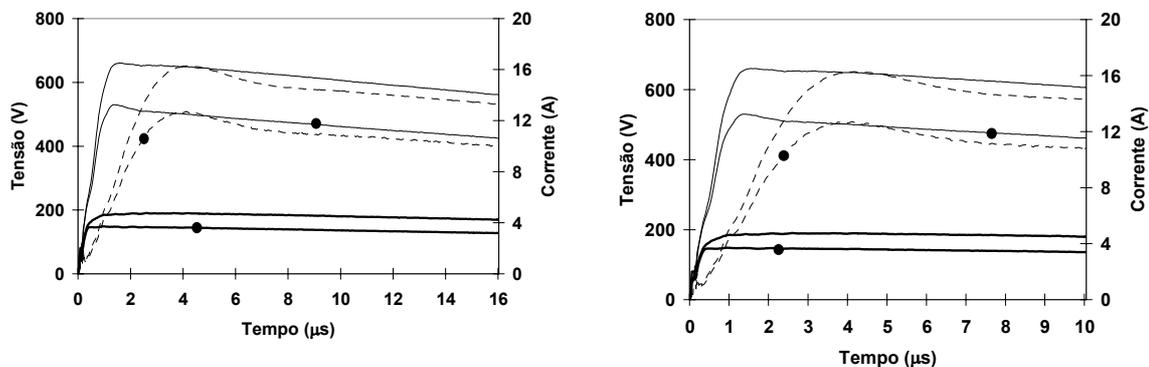
As ondas rápidas de corrente e tensão representadas na Figura 4.9 por linhas contínuas grossas não apresentam uma boa visualização nos instantes iniciais, assim, faz-se necessário mostrá-las mais detalhadamente numa outra figura.



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{\text{máx}}$ (V)	$I_{\text{máx}}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,4	0,45	129	3,7	34,6	39,9

Figura 4.10 – Resultados para eletrodo vertical de 3 m. Onda rápida de corrente (●)

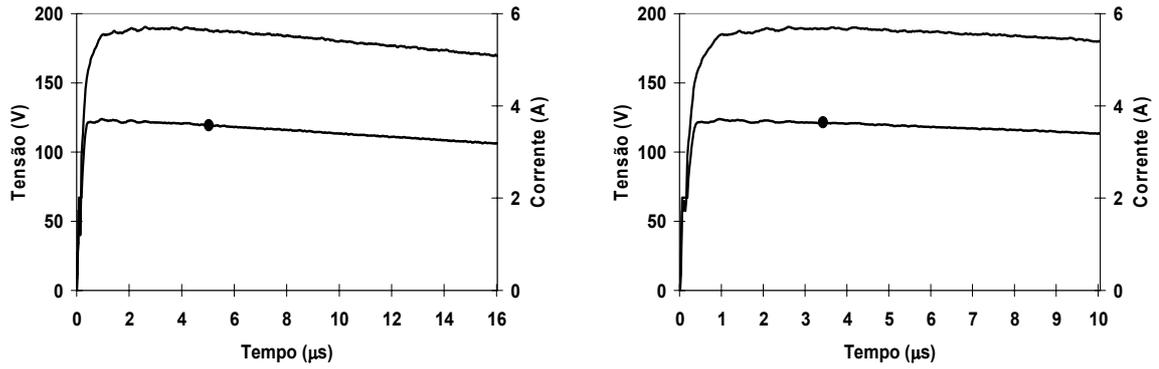
● **Eletrodo Horizontal de 3 metros para resistividade aparente de 176,38 $\Omega\cdot\text{m}$:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{\text{máx}}$ (V)	$I_{\text{máx}}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,4	0,5	190	3,7	51,0	63,5
1,3	1,4	661	13,3	49,7	
4,0	4,0	651	12,7	51,2	

Figura 4.11 – Resultados para eletrodo horizontal de 3 m. Ondas de corrente (●): Linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

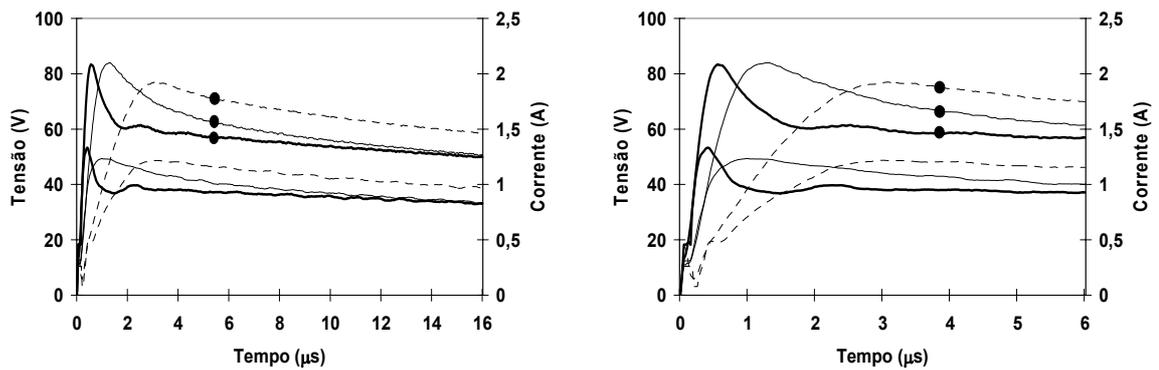
Para uma melhor visualização, as ondas rápidas de corrente e tensão representadas na Figura 4.11 por linhas contínuas grossas, são mostradas adiante numa outra figura.



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,4	0,5	190	3,7	51,0	63,5

Figura 4.12 – Resultados para eletrodo horizontal de 3 m. Onda rápida de corrente (•)

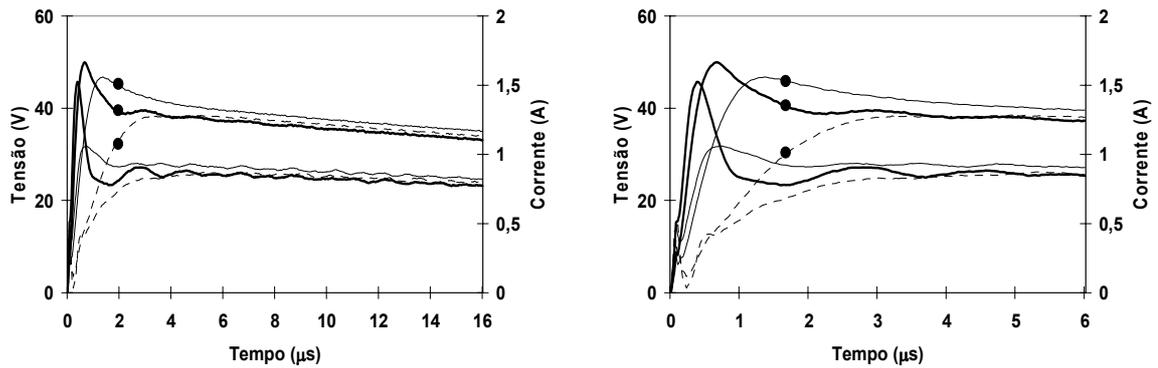
• **Eletrodo Horizontal de 12 metros para resistividade aparente de 249,16 $\Omega \cdot m$:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,5	0,4	53,3	2,08	25,6	29,9
1,2	1,0	49,3	2,10	23,4	
3,0	2,8	48,7	1,92	25,3	

Figura 4.13 – Resultados para eletrodo horizontal de 12 m. Ondas de corrente (•): Linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

• **Eletrodo Horizontal de 18 metros para resistividade aparente de 300,75 Ω·m:**



$T_f(I)$ (μs)	$T_f(V)$ (μs)	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,7	0,4	45,7	1,67	27,3	24,06
1,2	0,7	31,8	1,56	20,3	
3,0	2,9	26,2	1,28	20,4	

Figura 4.14 – Resultados para eletrodo horizontal de 18 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

4.4 Apresentação dos Resultados com Ondas Completas para Solos de Alta Resistividade

As figuras a seguir mostram os resultados correspondentes às medições realizadas em solos de alta resistividade.

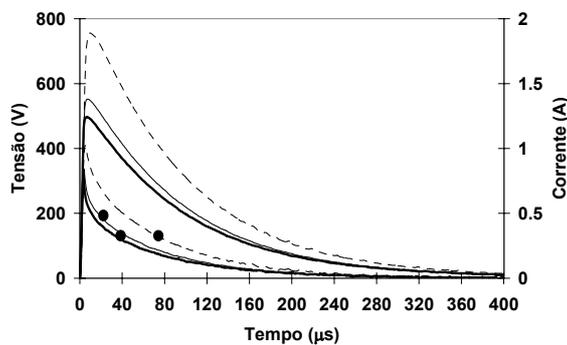
• **Eletrodos Vertical e Horizontal de 3 metros:**

$T_f(I) = 0,5/1,4/2,5 \mu s$
 $R_{med} = 1380 \Omega$

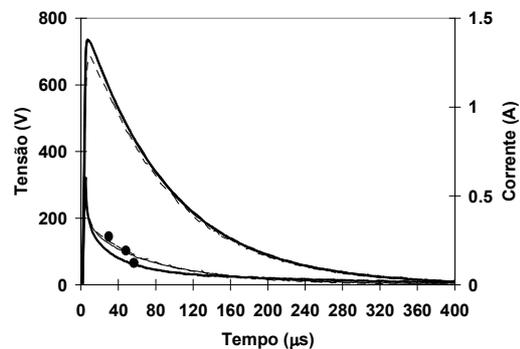
$T_c = 79 \mu s$
 $R_{calc} = 1134,46 \Omega$
 $\rho_{calc} = 4058,82 \Omega \cdot m$

$T_f(I) = 0,5/1,0/2,5 \mu s$
 $R_{med} = 2513,33 \Omega$

$T_c = 74 \mu s$
 $R_{calc} = 2346,30 \Omega$
 $\rho_{calc} = 6981,47 \Omega \cdot m$



Vertical 3 metros



Horizontal 3 metros

Figura 4.15 – Resultados para eletrodos vertical e horizontal de 3 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - Onda lenta

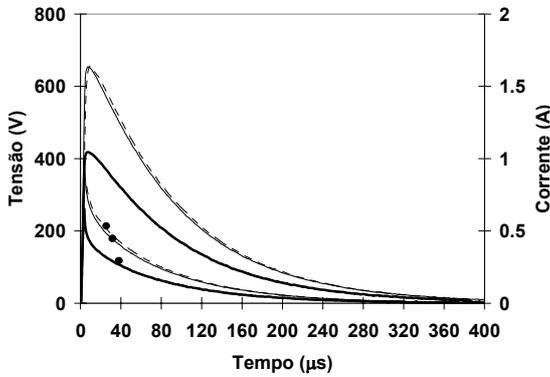
• **Eletrodos Horizontais de 6 e 12 metros:**

$T_f(I) = 0,5/1,3/2,7 \mu s$
 $R_{med} = 1296,66 \Omega$

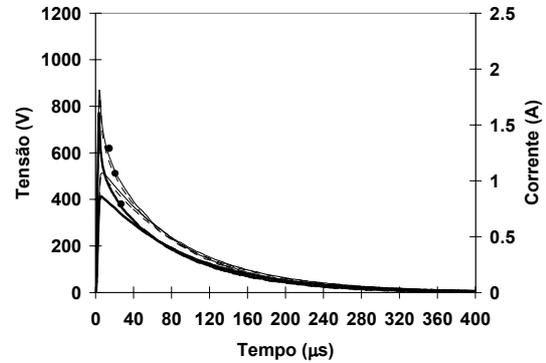
$T_c = 81 \mu s$
 $R_{calc} = 1233,05 \Omega$
 $\rho_{calc} = 6174,57 \Omega \cdot m$

$T_f(I) = 0,5/1,8/2,5 \mu s$
 $R_{med} = 486,66 \Omega$

$T_c = 53 \mu s$
 $R_{calc} = 441,94 \Omega$
 $\rho_{calc} = 4055,50 \Omega \cdot m$



Horizontal 6 metros



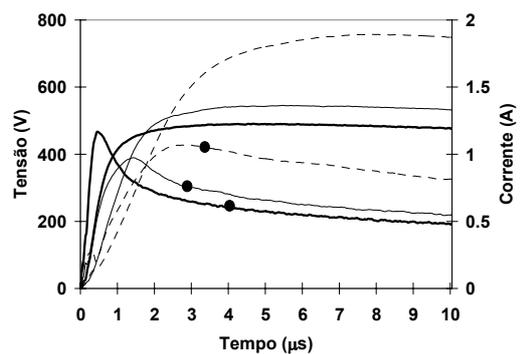
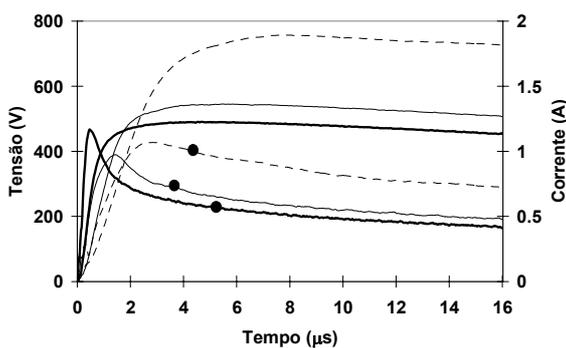
Horizontal 12 metros

Figura 4.16 – Resultados para eletrodos horizontais de 6 e 12 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

4.5 Detalhe das Ondas em Escala de Tempo Reduzida para Solos de Alta Resistividade

As figuras que seguem ilustram três ondas de corrente e tensão similares às apresentadas no item 4.4, porém, são mostrados em duas escalas de tempo bem reduzidas.

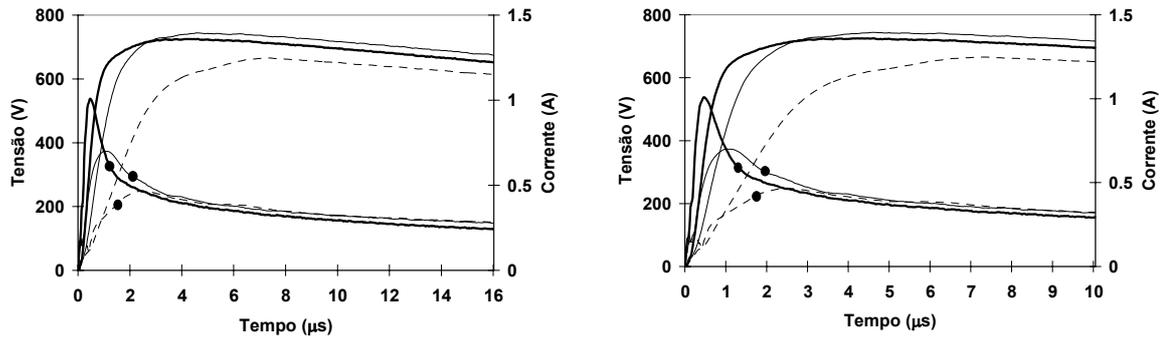
• **Eletrodo Vertical de 3 metros para resistividade aparente de 4058,82 Ω·m:**



$T_f(I) \mu s$	$T_f(V) \mu s$	$V_{m\acute{a}x} (V)$	$I_{m\acute{a}x} (A)$	$Z_P (\Omega)$	$R_{med} (\Omega)$
0,5	4,0	491	1,17	419,6	1380
1,4	4,0	545	0,97	561,8	
2,5	7,5	757	1,07	707,4	

Figura 4.17 – Resultados para eletrodo vertical de 3 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

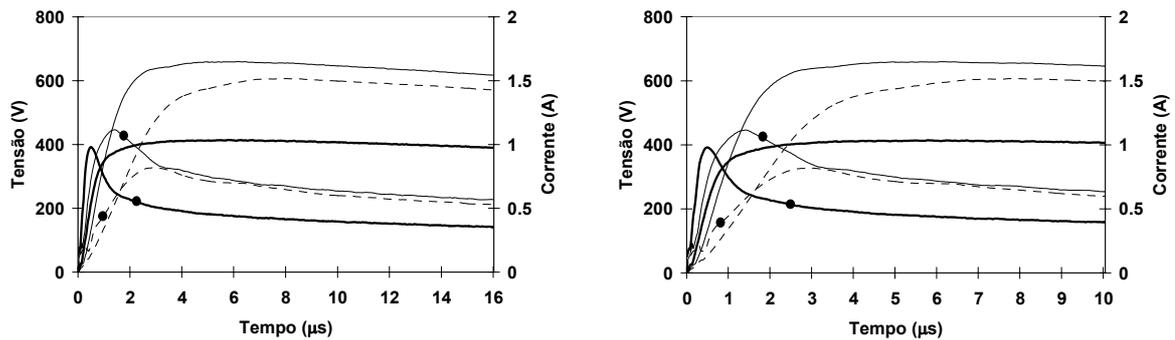
• **Eletrodo Horizontal de 3 metros para resistividade aparente de 6981,47 Ω·m:**



$T_f(I)$ (μs)	$T_f(V)$ (μs)	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,5	3,0	725	1,01	717,8	2513,33
1,0	4,0	744	0,7	1062,8	
2,5	7,0	666	0,4	1447,8	

Figura 4.18 – Resultados para eletrodo horizontal de 3 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

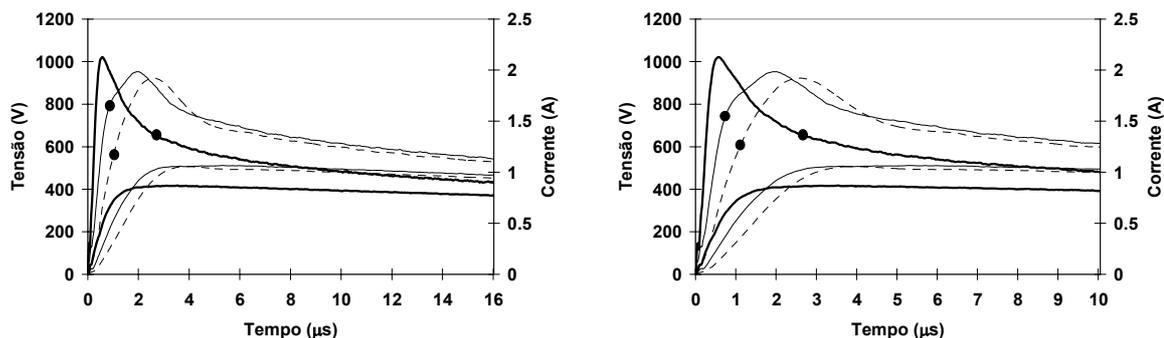
• **Eletrodo Horizontal de 6 metros para resistividade aparente de 6174,57 Ω·m:**



$T_f(I)$ (μs)	$T_f(V)$ (μs)	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)
0,5	4,0	414	0,9	426,8	1296,66
1,3	4,0	660	1,1	594,5	
2,7	7,0	607	0,8	749,3	

Figura 4.19 – Resultados para eletrodo horizontal de 6 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

• **Eletrodo Horizontal de 12 metros para resistividade aparente de 4055,50 $\Omega \cdot m$:**



$T_f(I)$ μs	$T_f(V)$ μs	$V_{m\acute{a}x}$ (V)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	Z_p (Ω)	R_{med} (Ω)
0,5	2,5	418	2,1	196,2	486,66
1,8	5,0	511	1,98	258,0	
2,5	3,5	507	1,92	264,0	

Figura 4.20 – Resultados para eletrodo horizontal de 12 m. Ondas de corrente (●): linha contínua grossa - onda rápida; linha contínua fina - onda intermediária; linha tracejada - onda lenta

4.6 Considerações Finais

No presente capítulo, foram apresentados os resultados de várias medições realizadas em solos de baixa e alta resistividades, para a injeção de três ondas de corrente impulsivas de tempo de frente diferentes. As análises dos resultados destas medições estão destacadas no próximo capítulo

5 Análises dos Resultados

5.1 *Introdução*

Neste capítulo, são realizadas análises dos resultados das medições apresentadas no Capítulo 4, no qual ondas de corrente impulsivas, com formas representativas das correntes de descargas e com três valores de tempos de frente diferentes, foram aplicadas em algumas configurações de eletrodos enterrados em solos de baixa e alta resistividades.

5.2 *Resultados Relevantes*

Existem, basicamente, dois resultados muito relevantes decorrentes dos experimentos realizados:

(i) A relevância da corrente capacitiva no desempenho do aterramento em patamares bem superiores àqueles admitidos na literatura, como assumido em (BOURG et al., 1995), (GRCEV et al., 2007) e (VELAZQUEZ et al., 1995);

(ii) A prevalência de um valor de impedância impulsiva significativamente

inferior ao da resistência medida em baixa frequência, quando o comprimento do eletrodo é inferior ao comprimento efetivo do aterramento.

5.3 Análise Qualitativa dos Resultados

Nesta seção, os aspectos mencionados anteriormente são analisados em maior detalhe, considerando-se separadamente a resposta do aterramento em solos de baixa e alta resistividades.

5.3.1 Configurações de Eletrodos em Solos de Baixa Resistividade

As Figuras 4.5 a 4.14 mostradas no capítulo anterior, apresentam alguns resultados relevantes que devem ser destacados.

Consideram-se, inicialmente, os eletrodos vertical e horizontal de 3 m. Para estes casos, as ondas de corrente com tempo de frente rápido, de frequências representativas mais elevadas, estão adiantadas em relação às ondas de tensão, indicando a relevância do efeito capacitivo no solo. No que se refere às ondas com tempo de frente mais lento, percebe-se a redução da influência do efeito capacitivo, prevalecendo amplamente o efeito resistivo no solo. As ondas de corrente e tensão tendem a apresentar picos simultâneos.

À medida que o comprimento do eletrodo é aumentado (6, 12 e 18 m), o efeito indutivo cresce e começa a prevalecer para comprimentos maiores, atrasando significativamente a onda de corrente em relação à de tensão. Este comportamento não é observado para ondas de corrente mais lenta, no que se refere ao eletrodo de 6 metros. Nesse caso, o efeito capacitivo do solo prevalece sobre o indutivo.

Além disto, cabe realçar alguns comentários práticos em relação ao valor da impedância impulsiva Z_P , quociente entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente no aterramento.

A Tabela 5.1 mostra que na maior parte dos casos estudados, a impedância de aterramento encontrada foi menor do que a resistência medida em baixa frequência. Entretanto, nos casos dos eletrodos de 12 e 18 m de comprimento para o solo na faixa de 73,69 a 92,50 $\Omega \cdot m$ e o eletrodo de 18 m para o solo na faixa de 117,35 a 300,75 $\Omega \cdot m$, considerando ondas rápidas e intermediárias de corrente, a tabela indica que a impedância de aterramento foi maior do que a resistência medida.

Estes resultados são relevantes, pois contradizem alguns trabalhos apresentados na literatura, nos quais autores, como Grcev et al. (2007), afirmam que a impedância de aterramento é sempre maior do que a resistência de aterramento em baixa frequência, resultando assim, num valor de coeficiente impulsivo (I_C), relação entre Z_P e R_{med} , igual ou maior do que a unidade, conforme ilustrado na Figura 2.3.

De acordo com a Tabela 5.1, I_C é menor do que a unidade nos casos dos eletrodos curtos. Mas com o aumento do seu comprimento, e para ondas rápidas de corrente, o coeficiente tende a ser maior do que a unidade. Este comportamento se justifica pelo fato de, nesses casos, o comprimento do eletrodo ser maior que o comprimento efetivo do aterramento. As componentes de alta frequência da onda rápida de corrente que se propaga ao longo de um eletrodo enterrado num solo de baixa resistividade se atenuam antes de alcançar a extremidade deste.

Tabela 5.1 – Coeficiente Impulsivo para solo de baixa resistividade

Faixa de Valores de Resistividade Aparente	Eletrodos de Teste	Tempo de Frente da Corrente (μ s)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)	I_C
Baixa Resistividade 73,69 a 92,50 $\Omega \cdot m$	Horizontal 3 m	0,65	23,26	26,53	0,87
		2,50	24,62		0,92
		5,5	20,42		0,76
	Horizontal 6 m	1,0	13,27	15,53	0,85
		2,4	13,01		0,83
		5,1	10,71		0,68
	Horizontal 12 m	0,6	13,87	8,67	1,59
		1,2	11,11		1,28
		4,5	6,38		0,73
	Horizontal 18 m	0,6	14,25	7,40	1,92
		1,2	11,10		1,5
		3,5	5,62		0,75
Baixa Resistividade 117,35 a 300,75 $\Omega \cdot m$	Vertical 3 m	0,4	34,6	39,9	0,86
		1,3	34,1		0,85
		4,0	34,6		0,86
	Horizontal 3 m	0,4	51,0	63,5	0,80
		1,3	49,7		0,78
		4,0	51,2		0,80
	Horizontal 12 m	0,5	25,6	29,9	0,85
		1,2	23,4		0,78
		3,0	25,3		0,84
	Horizontal 18 m	0,7	27,3	24,06	1,13
		1,2	20,3		0,84
		3,0	20,4		0,84

O gráfico da Figura 5.1 representa o coeficiente impulsivo, contradizendo o gráfico mostrado na Figura 2.3, que expressa a usual hipótese de que tal coeficiente seja sempre maior do que a unidade.

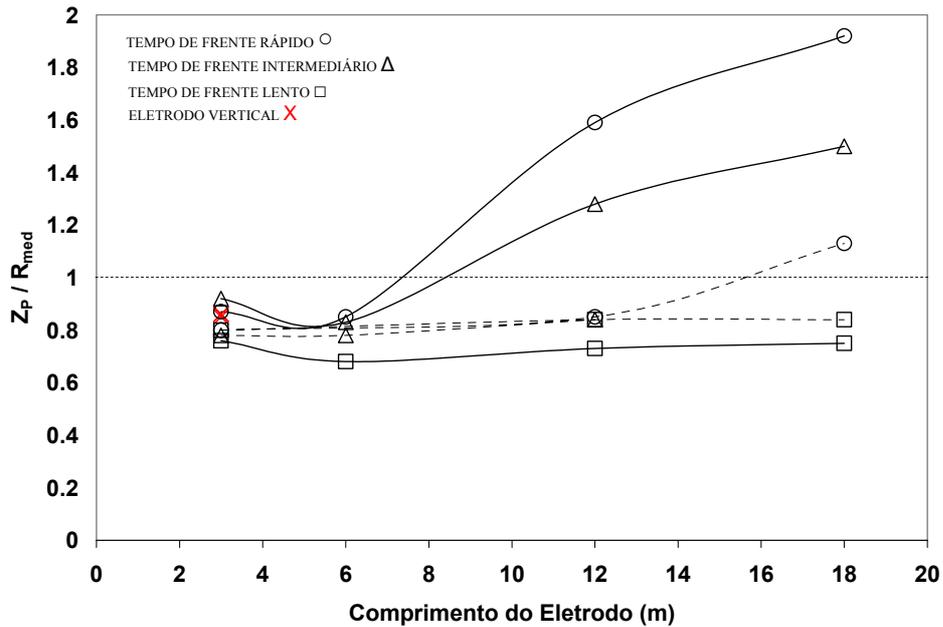


Figura 5.1 – Coeficiente Impulsivo de acordo com dados da Tabela 5.1. Linhas contínuas referente ao solo com resistividade na faixa de 73,69 a 92,50 $\Omega\cdot m$ e linhas tracejadas referente ao solo com resistividade na faixa de 117,35 a 300,75 $\Omega\cdot m$

5.3.2 Configurações de Eletrodos em Solos de Alta Resistividade

Para este tipo de solo, em todos os casos, as ondas de corrente estão avançadas em relação às ondas de tensão, denotando, muito claramente, a relevância do efeito capacitivo no solo. Este efeito é mais significativo para ondas rápidas de corrente. As Figuras 4.17 a 4.20 mostram tal relevância.

Em relação à impedância impulsiva, em todos os casos, seu valor foi menor do que a resistência medida em baixa frequência, resultando assim num coeficiente impulsivo bem menor do que a unidade. A Tabela 5.2 mostra o coeficiente impulsivo para diferentes tempos de frente de corrente.

Tabela 5.2 – Coeficiente Impulsivo para solo de alta resistividade

Faixa de Valores de Resistividade Aparente	Eletrodos de Teste	Tempo de Frente da Corrente (μs)	Z_P (Ω)	R_{med} (Ω)	I_c
Alta Resistividade 4055,5 a 6981,47 $\Omega\cdot\text{m}$	Vertical 3 m	0,5	419,6	1380	0,30
		1,4	561,8		0,40
		2,5	707,4		0,51
	Horizontal 3 m	0,5	717,8	2513,33	0,28
		1,0	1062,8		0,42
		2,5	1447,8		0,57
	Horizontal 6 m	0,5	426,8	1296,66	0,32
		1,3	594,5		0,45
		2,7	749,3		0,57
	Horizontal 12 m	0,5	196,2	486,66	0,40
		1,8	258,0		0,53
		2,5	264,0		0,54

A Figura 5.2 ilustra o coeficiente impulsivo para ondas de corrente aplicadas em eletrodos enterrados no solo de alta resistividade.

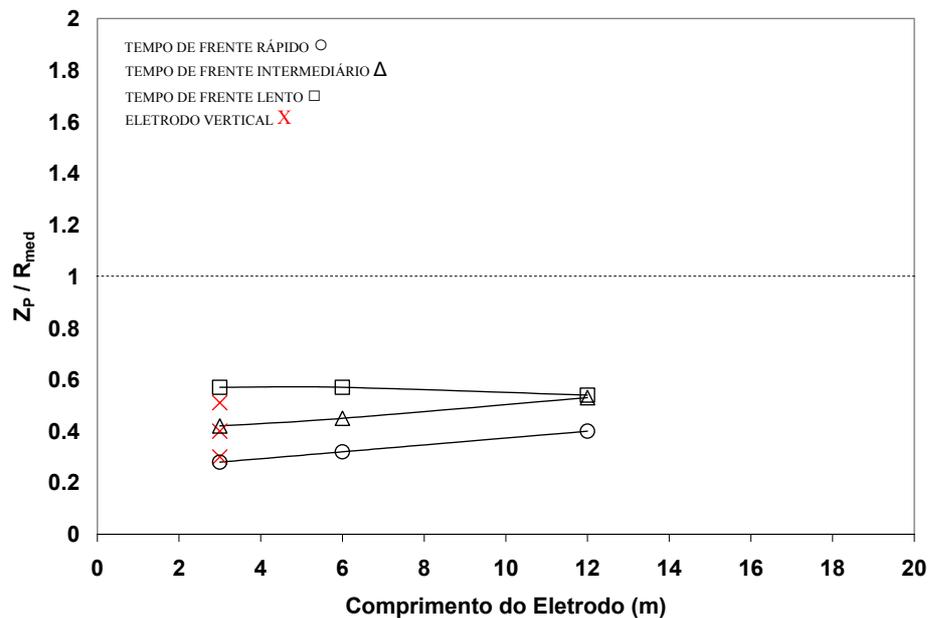


Figura 5.2 – Coeficiente Impulsivo de acordo com dados da Tabela 5.2. Linhas contínuas referente ao solo com resistividade na faixa de 4055,5 a 6981,47 $\Omega\cdot\text{m}$

5.4 Justificativas Prováveis para a Contradição

Um resultado importante deste trabalho é a verificação de que a impedância impulsiva é menor que a resistência de aterramento medida em baixa frequência, para

comprimento de eletrodo inferior ao comprimento efetivo.

Existe na literatura uma idéia disseminada de que a impedância de aterramento é sempre maior que sua resistência, em aparente contradição com os resultados experimentais deste trabalho.

Segundo a análise desenvolvida, atribui-se a disseminação desta hipótese equivocada, basicamente, a duas questões consideradas a seguir.

A primeira questão decorre de que os dados experimentais disponíveis na literatura, correspondem a resultados de algumas medições muito antigas de impedância impulsiva e resistência de aterramento realizadas em solos de muito baixa resistividade, com comprimentos de eletrodos bem maiores que o comprimento efetivo.

Complementarmente, é comum a realização de medições equivocadas onde o que se detecta como queda de potencial no aterramento é, na realidade, a tensão na saída do gerador de impulsos. A Figura 5.3 ilustra este tipo de medição.

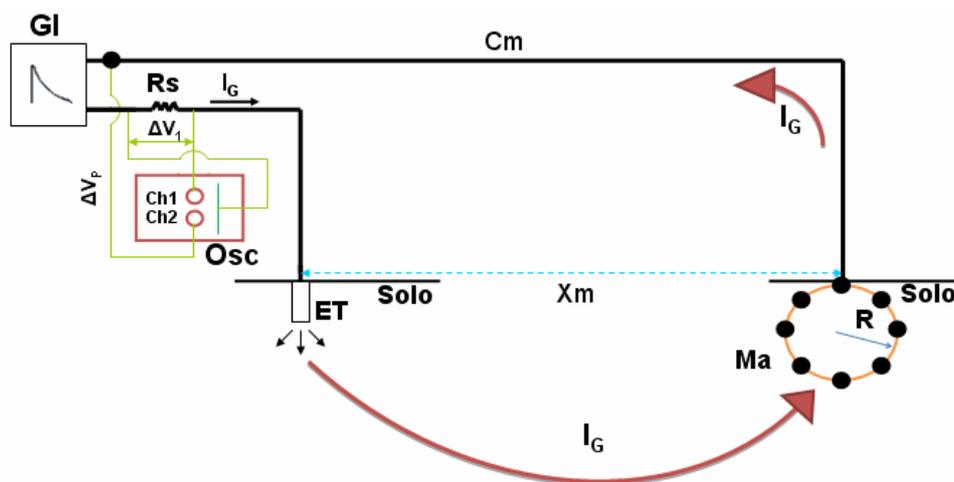
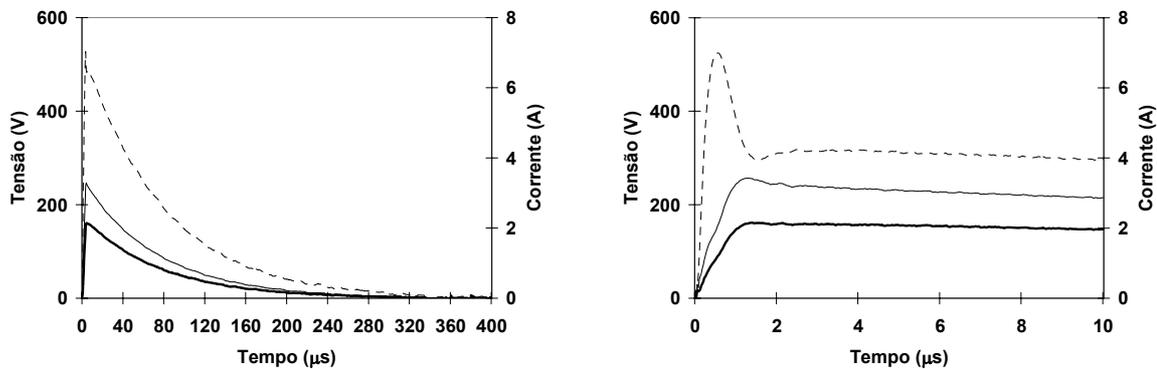


Figura 5.3 - Vista do circuito e do sistema de medição inadequado para obtenção da onda de tensão para um eletrodo vertical de 3 m de comprimento em solo de baixa resistividade

Para fins de ilustrar quão significativo pode ser este erro, na curva da Figura 5.4 apresentam-se ondas que denotam as diferenças entre a elevação de potencial no

aterramento e a tensão imposta pelo gerador, para uma dada onda de corrente injetada num eletrodo vertical de 3 m enterrado num solo de baixa resistividade.



$T_f(I) = 1,2 \mu\text{s}$	$V_{\text{máx}1} = 525 \text{ V}$	$Z_{p1} = 153,06 \Omega$	$R_{\text{med}} = 54 \Omega$	$\rho_{\text{calc}} = 156,52 \Omega \cdot \text{m}$
$T_{f1}(V) = 0,5 \mu\text{s}$	$V_{\text{máx}2} = 162 \text{ V}$	$Z_{p2} = 47,23 \Omega$	$T_c = 51 \mu\text{s}$	
$T_{f2}(V) = 1,4 \mu\text{s}$	$I_{\text{máx}} = 3,43 \text{ A}$			

Figura 5.4 – Resultados para eletrodo vertical de 3 m. Linha contínua grossa - onda de tensão; linha contínua fina - onda de corrente; linha tracejada - onda de tensão na saída do gerador

A Figura 5.4 mostra uma notável diferença entre as ondas de tensão, o que deixa claro a necessidade de se efetuar a medição da elevação de potencial utilizando uma haste de potencial, conforme descrito no item 3.5.

A segunda questão decorre de resultados de simulações com modelos computacionais, nos quais se assume que os parâmetros do solo têm valor constante. Tais simulações ignoram a dependência com a frequência dos parâmetros do solo, resistividade e permissividade, e ainda assumem valor de permissividade bem inferior aos verificados na prática.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo, procedeu-se a uma análise detalhada dos resultados obtidos nas simulações experimentais em campo. Assim, alguns aspectos relevantes foram observados, tais como o efeito capacitivo mais pronunciado do solo e ainda o valor da impedância impulsiva ser menor do que a resistência de aterramento para eletrodos mais curto do que o comprimento efetivo do aterramento.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 *Considerações*

Os resultados apresentados neste trabalho contribuem para um melhor entendimento da resposta dos eletrodos de aterramento quando submetidos a ondas impulsivas de corrente, possibilitando, sobretudo, uma validação apropriada dos modelos computacionais para cálculo do comportamento transitório de aterramentos elétricos.

6.2 *Resultados Relevantes*

Inicialmente, verificou-se que o efeito capacitivo no solo é mais pronunciado do que usualmente assumido na literatura específica.

Outro resultado relevante, refere-se ao valor da impedância impulsiva ser menor que a resistência de aterramento medida em baixa frequência para comprimentos de eletrodo inferior ao comprimento efetivo. Esta característica é claramente observada em solos de alta resistividade e menos destacada nos solos de

baixa resistividade.

Por outro lado, ao se considerar eletrodos longos em solos de baixa resistividade, verificou-se que a impedância impulsiva tende a ser maior do que a resistência de aterramento. Isto ocorre porque, usualmente, este comprimento excede o comprimento efetivo do eletrodo. Com o aumento deste comprimento, a resistência vai decrescendo continuamente, enquanto a impedância se reduz apenas até alcançar o comprimento efetivo. Portanto, se o comprimento continua sendo aumentado, o coeficiente impulsivo passa a decrescer continuamente.

Tais resultados têm impacto significativo por denotarem equívocos assumidos pela literatura. Assim, os resultados apresentados contribuem e passam a ser referência para novos trabalhos relativos às medições de ondas impulsivas similares àquelas provenientes de descargas atmosféricas.

6.3 Propostas de Continuidade

Ao longo deste trabalho, ensaios em solos de baixa e alta resistividades foram realizados sistematicamente para avaliar a resposta de certas configurações simples de aterramentos elétricos frente a correntes impulsivas.

Neste contexto, sugere-se complementar os ensaios, com a realização de medições em solos de resistividade intermediária, em torno de $1000 \Omega\cdot\text{m}$, utilizando-se configurações de eletrodos de vários comprimentos.

Sugere-se também uma investigação experimental da resposta de malhas ou reticulados de aterramentos quando submetidos a ondas de corrente impulsivas.

7 Referências Bibliográficas

BOURG, S., SACEPE, B., DEBU, T., "**Deep Earth Electrodes in Highly Resistive Ground: Frequency Behaviour**" in *Symposium Record, 1995 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 584-589, agosto, 1995.

DE CONTI, A.R., "**Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas**", Orientador: Silvério Visacro Filho, *Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE)*, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, agosto, 2006.

GRCEV, L., "**Impulse Efficiency of Simple Grounding Electrode Arrangements**", in *Proc. 2007 Int. Zurich Symp. Electromagnetic Compatibility*, p.325-328, Alemanha.

GUPTA, B.R., THAPAR, B., "**Impulsive Impedance of Grounding Grids**", *IEEE PAS-99*, N°.6, novembro/dezembro, 1980.

KUFFEL, E., KUFFEL, J., ZAENGL, W. S., "**High Voltage Engineering: Fundamentals-Second Edition**", *book, Butterworth-Heinemann, Inc.*, 2000.

PORTELA, C., "**Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior**", in *Proc. 1999 IEEE, International Symposium Electromagnetic Compatibility*, Estados Unidos.

ROSADO, G.C., VISACRO S., ALMEIDA, F.S., FILHO, A.L.S., "**Experimental Evaluation of the Transient Response of Grounding Electrodes Subjected to Impulsive Currents**", *IX International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, Foz do Iguaçu, Brasil, 26-30, novembro, 2007.

SOARES JR, A., VISACRO S., "**Lightning Response of Typical Brazilian Transmission Line Tower-footing Arrangements**", *International Conference on Ground and Earthing (Ground 98)*, p.98-102, Belo Horizonte, Brasil, 12-16, novembro, 1998.

VELAZQUEZ, R., MUKHEDKAR, D., "**Analytical Modeling of Grounding Electrodes Transient Behavior**", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PAS-103, N°. 6, p. 1314-1321, 1995.

VISACRO S., ROSADO, G.C., "**Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: an Experimental Evaluation**", (submitted to *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008).

VISACRO, S., "**A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents**". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, N°. 1, p. 381-386, janeiro, 2007.

VISACRO S., VALE, M.H.M., PINTO, W.L.F., ROSADO, G.C., "**The Impulsive Coefficient of Short Grounding Electrodes**", *IV International Symposium on Power Quality (SICEL)*, Manizales, Colômbia, 19-22, novembro, 2007.

VISACRO S., SOARES JR., A., "**HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems**", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, N°.2, p. 1026-1208, abril, 2005.

VISACRO, S., "**Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e**

Instrumentação, Filosofias de Aterramentos", *livro*, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005a.

VISACRO, S., "**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**", *livro*, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005b.

VISACRO S., PORTELA C., "**Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems**", *in Proc. 1987 Symposium High Voltage Enginnering*, Alemanha.
